



FLOMMEN KOMMER...

Sluttrapport fra HYDRA
- et forskningsprogram om flom



Redaktører:
Olianne Eikenæs
Arnor Njøs
Torbjørn Østdahl
Trond Taugbøl

Flommen kommer ...

Sluttrapport fra HYDRA
– et forskningsprogram om flom

Redaktører:

Olianne Eikenæs

Arnor Njøs

Torbjørn Østdahl

Trond Taugbøl

Forord

Våren 1995 tok Arne Tollan og Trond Ljøgodt i Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) initiativet til oppstartingen av et forskningsprogram om flom. Arbeidshypotesen som ble lansert, var at summen av arealbruksendringer og andre fysiske inngrep kan ha ført til økt flomrisiko i vassdragene. Hypotesen ble foreslått testet i et forskningsprogram - HYDRA-programmet. Forslaget ble sterkt aktualisert av flommen på Østlandet i juni 1995, og programmet ble startet opp i januar 1996.

Etter flommen i 1995 oppnevnte Regjeringen et eget flomtiltaksutvalg. Utvalget leverte sin innstilling i august 1996 (NOU 1996:16 Tiltak mot flom). Innstillingen inneholdt en del anbefalinger for arbeidet i HYDRA-programmet, og førte til at programmet ble dreid noe mer i anvendt retning enn opprinnelig foreslått.

HYDRA-programmet har hatt en total bevilgning på 20,5 millioner kroner over perioden 1996-2000. Olje- og energidepartementet har bidratt med 18,4 millioner kroner, Landbruksdepartementet ved Statens Naturskadefond med 1,85 millioner kroner og andre med 0,25 millioner kroner.

Programmet ble administrativt organisert under NVE med styringsgruppe, programleder Arnor Njøs, Jordforsk, et programsekretariat med Ollianne Eikenæs, NVE og Per Einar Faugli, NVE og 7 faggrupper med egne faggruppelidere. Erling Norvik, tidligere Fylkesmann i Østfold, var leder for styringsgruppa fra starten i 1996

og fram til han døde 31. desember 1998. Avdelingsdirektør Ola Skauge i Direktoratet for naturforvaltning var styringsgruppas leder fra januar 1999 og ut programperioden. Styringsgruppas viktigste oppgave har vært å godkjenne planer for faglig innretning og budsjetter i programmet, samt å rapportere til NVE. Styringsgruppa har deltatt på programmets fagseminarer og har sammen med fagutvalget gjennomført studiereiser til Karlsruhe og Koblenz i 1996, og til Bologna, Bern og Zürich i 1997, for å studere flomproblematikk i disse områdene.

Enkeltresultatene fra programmet er å finne i publikasjoner trykket i HYDRAs egne rapport- og notatserier. I sluttrapporten er det lagt vekt på å få fram hvordan HYDRA-programmet har styrket kunnskapsgrunnlaget om flomforhold og om sammenhenger mellom menneskelig aktivitet og sannsynligheten for flom og flomskader. I rapporten er det også pekt på mulige videre tiltak mot flom og flomskader og på behov for FoU-arbeid på dette temaet. Det er også laget en popularisert kortversjon av sluttrapporten.

Redaksjonsutvalget for sluttrapporten fra HYDRA-programmet har bestått av programleder, programsekretariatet samt Trond Taugbøl og Torbjørn Østdahl (NINA*NIKU). I tillegg har Dan Lundquist (GLB), Nils Roar Sælthun (NIVA), Arne Tollan (NVE) og Hallvard Berg (NVE) bidratt med nyttige kommentarer i utforming og redigering av sluttrapporten.

Styringsgruppa for HYDRA

Oslo, april 2000

Ola Skauge
leder

Tor M. Bratberg

Ånund Killingtveit

Trond Ljøgodt

Svein M. Skaaraas

Arne Tollan

Arnor Njøs
programleder

Innhold

	Side
SAMMENDRAG	6
SUMMARY	9
INNLEDNING	11
1 FLOM, NATUR OG MENNESKE	15
1.1 Flomhistorie og flomregimer	15
Flomhistorie	15
Flommer i Mississippi	17
Flommer i Europa	18
Utviklingstrekk i arealbruken	18
Årsaker til flom	19
Flomregimer	19
1.2 Flom – en del av naturmiljøet	20
Flom som miljøfaktor	20
Virkning på materialtransport i vassdrag	21
Virkning på vannkvalitet	22
Virkning på vannlevende organismer	23
1.3 Flomskader og skadefunksjoner	26
Jordbruket	27
Bygninger, vei og jernbane	30
Flomsikrings- og erosjonssikringstiltak	33
1.4 Virkninger av menneskelige inngrep	35
Skogens virkning på avrenning og flom	35
Grøfting	36
Skogsveier	37
Jordbruk	38
Tettsteder	39
Reguleringstiltak	40
Flomsikringstiltak	44
1.5 Klimautvikling og flomrisiko	46
Klimautvikling	46
Trender i lange flomserier i Norge	48
Scenarier/prognoser for klimautvikling og naturlig variasjon i klimaet	49
2 DATAGRUNNLAG, DATABASER OG VASSDRAGSMODELL	52
2.1 Naturgrunnlag i Glommas nedbørfelt	52
2.2 Databaser	54
Digitale kartdata	55
Digitale vannlinjedata	55
Tidsseriedata	55

2.3	Vassdragsmodell HYDRA	56
	Kravspesifikasjon og prinsipper for oppbygging	56
	Type inngrep som kan analyseres	56
	Valg av metode og IT-verktøy for oppbygging av vassdragsmodellen	56
	Tilpasning av modellen til Glommavassdraget – Hovedtrekk	57
	Representasjon av ulike typer inngrep i Glommavassdraget	57
	Detaljert modellstruktur for Vassdragsmodell HYDRA anvendt i Glomma	62
	Kalibrering og verifisering av modellen for Glommavassdraget	63
	Definisjon av upåvirket tilstand	63
	Beregning og kvantifisering av virkninger i påvirket og upåvirket tilstand	67
	Hovedresultater – Sammenligning mellom dagens tilstand og upåvirket tilstand og virkning av de enkelte typer inngrep	67
	Oppsummering	71
3	TILTAK MOT FLOMSKADER	76
3.1	Arealplanlegging i flomutsatte områder	76
	Kommunens ansvar	76
	Andre sentrale aktører	76
3.2	Flomkartlegging	77
	Framstilling av flomsonekart	77
3.3	Risikoanalyse	78
	Risikoanalyse for bygninger	78
	Risikoanalyse for andre skadeobjekter	81
	Overførbarhet til andre vassdrag	81
3.4	Kommunaltekniske tiltak	83
	Vannforsyning	83
	Avløpsanlegg og avløpsforhold	83
	Sikring av anlegg for renovasjon	84
	Andre typer forurensning ved flom	84
	Veier	85
	Opprydding og utbedringer	85
3.5	Vassdragsreguleringer og flomsikringsanlegg	85
	Flomdempingseffekter av ytterligere vassdragsreguleringer	85
	Ytterligere regulering av Mjøsa	87
	Flomsikringstiltak	87
	Nødoverløp på flomverk	88
	Miljøtilpasninger ved eksisterende og nye flomsikringstiltak	88
3.6	Flomberedskap og krisehandtering	89
	Risiko- og sårbarhetsanalyse (ROS)	89
	Regional samordning	89
	Flomorganisasjon	90
	Beslutningsstøtte for krisehandtering	91
	Informasjon	91
	Liv og helse	92
	Støtteordninger	92
3.7	Flomvarsling	92
	Generelt	92
	Flomvarsling under Vesleofsen i 1995	93
	Forbedring av flomvarsling	94

4	HOVEDRESULTATER	95
4.1	Forbedring av kunnskapsgrunnlaget	95
	Forbedring av datagrunnlaget	95
	Vassdragsmodell HYDRA	96
	Annet metodearbeid	96
	Kunnskap om effekter av flom på naturgitte forhold	96
	Kunnskap om effekter av menneskelig aktivitet på flom og flomskader	97
4.2	Tiltak mot flomskader	98
4.3	Videre FoU-arbeid	99
	FoU-område 1 - Videreutvikling av datagrunnlag og metodikk	99
	FoU-område 2 - Videreutvikling av modeller	100
	FoU-område 3 - Helhetlig flomsikringsarbeid	100
	Litteraturliste	101
	HYDRA-rapporter	106
	HYDRA-notat	107

NOEN GRUNNLEGGENDE BEGREPER

Definisjoner på vannstand, vannføring og flomstørrelse

- **Vannstand:** Den høyden vannet når opp til.
- **Vannføring:** Vannmengde som passerer et gitt punkt i elva, uttrykt i volum per tidsenhet (oftest m³/s).
- **Middelflom:** Gjennomsnittet av den største vannføringen hvert år for en årrekke.
- **10-års flom:** Vannføring som i gjennomsnitt vil opptre hvert 10. år. Det er 10 % sannsynlighet hvert år for at en flom av denne størrelse vil overskrides.
- **100-års flom:** Vannføring som i gjennomsnitt vil opptre hvert 100. år. Det er 1 % sannsynlighet hvert år for at en flom av denne størrelsen vil overskrides.

Sammendrag

HYDRA, forskningsprogrammet om flom, ble initiert tidlig i 1995 med bakgrunn i de store og hyppige flommene i Europa, Asia og USA det siste tiåret. Vesleofsen i Glommavassdraget i mai/juni 1995 aktualiserte programmet som kom i gang året etter.

Den grunnleggende arbeidshypotesen var at summen av arealbruksendringer og andre fysiske inngrep kan ha ført til økt flomrisiko i vassdragene. Programmet har hatt to hovedmål:

- Å utvide kunnskapen om sammenhengen mellom naturgrunnlag og menneskelige inngrep i vassdraget og nedbørfeltet på den ene siden og flom og flomskader på den andre.
- Ut fra et forbedret kunnskapsgrunnlag, å foreslå tiltak for å forebygge skadeflommer og redusere omfanget av flomskader på en kostnadseffektiv og miljømessig optimal måte.

Målgrupper for HYDRA har vært offentlig forvaltning, organisasjoner og private bedrifter med tilknytning til vassdragsutnytting og forvaltning, samt utdannings-, forsknings- og konsulentvirksomhet. Forskningen innenfor programmet har hatt en tverrfaglig karakter og vært organisert i syv faggrupper under en styringsgruppe:

- Data og geografiske informasjonssystemer
- Flomdemping, flomvern og flomhandtering
- Miljøvirkninger av flom og flomforebyggende tiltak
- Modellutvikling
- Naturgrunnlag og arealbruk
- Skaderisikoanalyse
- Tettsteder

Mer enn 50 personer fra 17 institusjoner har vært involvert i programmet, som har hatt en økonomisk ramme på 20,5 millioner kr. Det faglige nettverket som er etablert er en verdifull ressurs i videre flom- og vassdragsarbeid.

Resultater fra programmet er å finne i publikasjonene trykket i HYDRAs egne rapport- og notatserier. I denne sluttrapporten er det lagt vekt på å få fram hovedresultater fra programmet. Kunnskap om flomforhold i bred forstand og mulige tiltak mot flom og flomskader presenteres. Store deler av arbeidet har vært konsentrert om Glommavassdraget, først og fremst fordi det finnes et godt datagrunnlag for dette nedbørfeltet.

Sluttrapporten er bygget opp av fire hoveddeler:

Del I: "Flom, natur og menneske" tar for seg flom som fenomen, og flommers virkning på natur og menneskeskapte verdier. Videre beskrives også virkningen av ulike menneskelige inngrep på flomforhold. Del I starter med flomhistorie og flomregimer generelt, og her trekkes tråder langt tilbake i tid og utover egen landegrense. Deretter beskrives flom som en del av naturmiljøet, og hvilke effekter flommen har på fysiske og biologiske prosesser. Skadebegrepet kommer først inn i forbindelse med effekt på menneskeskapte verdier. I HYDRA er skader under 1995-flommen analysert, med særlig vekt på bygninger og jordbruksarealer. Del I avsluttes med å diskutere historisk og framtidig klimautvikling og flomrisiko.

Del II: "Datagrunnlag, databaser og vassdragsmodell" gir først en oversikt over datagrunnlaget for den vassdragsmodellen som er utarbeidet for å teste HYDRA-programmets grunnleggende arbeidshypotese. Deretter beskrives oppbygging, tilpasning, kalibrering og verifisering av vassdragsmodellen til Glommavassdraget. Modellen er brukt til å simulere fire typer inngrep (arealbruksendringer, reguleringsmagasiner, flomsikringstiltak og urbanisering/tettstedsutvikling), og deres konsekvenser for flomforholdene i vassdraget. Resultater fra modellkjøringene presenteres.

Del III: "Tiltak mot flomskader" omfatter forebyggende tiltak før flommen, beredskaps- og krisetiltak under selve flommen og tiltak etter flommen i form av opprydding og istandsetting. De viktigste typene tiltak er: innarbeiding av flomhensyn i arealplanleggingen i vassdragsnære områder, skaderisikoanalyser, tiltak for å sikre kommunaltekniske og andre anlegg mot ødeleggelse eller for å hindre forurensning ved flom, bruk av reguleringsmagasiner til flomdemping, bygging av fysiske flomsikringstiltak, planlegging og øving på flomberedskap samt flomvarsling.

Del IV: "Hovedresultater" oppsummerer hovedresultatene fra HYDRA-programmet, fordelt på kapitler om forbedring av kunnskapsgrunnlaget og tiltak mot flomskader. Arbeidet i programmet har også avdekket videre FoU-behov, fra helt konkrete og avgrensede prosjekter til overordnede programlignende tema. I Del IV er det foreslått noen hovedpunkter som det videre FoU-arbeidet bør konsentreres om.

FORBEDRING AV KUNNSKAPSGRUNNLAGET

HYDRA har gitt et bedre datagrunnlag for en god flom- og vassdragsforvaltning, gjennom systematisering og bearbeiding av data og databaseoppbygging. Det forbedrede datagrunnlaget har vært nødvendig for modelloppbygging og simuleringer. Det har også vært arbeidet med å forbedre metodikken for skaderisikoanalyser, som er et viktig grunnlag ved økonomiske kost-nytteanalyser av flomtiltak. En annen viktig del av metodearbeidet har vært konsentrert om usikkerheten i meteorologiske og hydrologiske prognoser. Videre har det vært arbeidet med forbedring av metodikken for flomsoneanalyse og konstruksjon av flomsonekart. I tillegg til metodeutviklingen har et konkret resultat vært framstilling av flomsonekart for gjentakintervall på 10 år, 50 år (1966-flommen) og 100-200 år (Vesleofsen i 1995) for flere elvesletter langs Glomma og Trysilleva.

Et delprosjekt har også sett på oppfatninger og vurderinger hos lokale beslutningstakere og publikum når det gjelder flomrisiko og skadebegrensninger.

Flere av enkeltprosjektene i HYDRA har gitt økt kunnskap om hvordan flom virker inn på fysiske, kjemiske og biologiske forhold i og langs vassdragene, f.eks. ble det påvist at kondisjonen og tilveksten til Hunderørreten i Mjøsa sank betydelig i flomåret 1995.

Menneskelige inngrep i vassdrag og nedbørfelt kan påvirke både størrelse og hyppighet av flommer, og ha betydning for omfanget av flomskader og hvilke typer effekter flommer gir, både lokalt og i vassdraget som helhet. En rekke ulike tiltak og aktiviteter som kan ha effekter på flom og flomskader er undersøkt, både ved kjøring av vassdragsmodellen og gjennom andre analyser og utredninger. De viktigste resultatene er:

- Vassdragsreguleringer har ført til reduserte flommer i Glommavassdraget i forhold til en "upåvirket" (uregulert) tilstand først på 1900-tallet.
- Statistiske analyser av flomvannstand og -vannføring i lange måleserier i norske vassdrag viser med få unntak ingen signifikante trender i måleseriene. Unntakene er måleserier fra vassdrag der reguleringer til kraftproduksjon utgjør betydelige inngrep.
- Modellanalyser av datamateriale fra 8 storflommer i Glommavassdraget på 1900-tallet viser at vassdragsreguleringene har stor flomdempende effekt. For 1995-flommen er det beregnet at flomvannstanden ble redusert med 0,7-1,0 m i Glomma mellom Stor-Elvdal og Norsfoss og med ca. 0,4 m i Lågen mellom Otta og Losna og i Mjøsa. For Øyeren var vannstandsreduksjonen så stor som 2,2 m som følge av reguleringene.

- Ved store flommer medfører flomverk en liten økning i vannstand og vannføring nedstrøms flomverket. Virkninger av noe omfang i Glommavassdraget finnes bare på strekningen Elverum – Kongsvinger, der de største flomverkene er bygd. Raskere flomkulminasjon etter bygging av flomverk er en mer betydelig effekt, og vil gi mindre tid til flomberedskapsarbeid. Eksisterende flomsikringstiltak har lokalt stor betydning for å redusere skadeomfanget ved store flommer.
- Endringene i skogbruk og skogtilstand innen Glommas nedbørfelt har ikke ført til målbare endringer i vassdragets flomforhold.
- I Glommavassdraget er effekten av urbanisering knapt nok målbar i hovedvassdraget, fordi tettsteder ikke utgjør mer enn 0,5 % av totalarealet. Lokalt har økt urbanisering resultert i mindre infiltrasjon av nedbøren og tilhørende større og raskere overflateavrenning fra tette flater.
- Litteraturstudier har vist at reguleringsinngrep og flomsikringstiltak tett inntil elvers hovedløp har resultert i betydelig negative miljøeffekter ved å endre strømhastigheter, habitatdiversitet og kontakten mellom elveløp og elveslette.

TILTAK MOT FLOMSKADER

Tiltak mot flomskader omfatter både planrelaterte tiltak (arealplanlegging, sektorplaner, planer for flomberedskap) og fysiske flomsikringstiltak som påvirker flomforløp og flomvannstand, eller som sikrer infrastruktur og ulike typer virksomhet mot flomskader. De fleste tiltakene er forebyggende i forhold til framtidige flommer, men viktige deler av flomberedskapsarbeidet omfatter også tiltak som iverksettes under selve flommen eller i forbindelse med opprydding i etterkant av flommer.

Miljøvirkninger av flommer og flomsikringstiltak kan med dagens metoder ikke prissettes med rimelig sikkerhet. Det gjør det vanskelig å inkludere miljøhensyn i kost-nytteanalyser og veie de ulike tiltakene som omtales i HYDRA-programmet i forhold til hverandre, i et kostnadseffektivt og miljømessig perspektiv.

I programmet er det vurdert en rekke tiltak som hver for seg er viktige brikker i en samlet vurdering av flomdemping. Her kan nevnes:

- Ved en gjennomføring av tilleggsreguleringene i Glommavassdraget som ble anbefalt av Flomtiltaksutvalget, samt et par nye, kan man i Glomma se bort fra store flomskader ved flommer av størrelse inntil 1995-flommen. I Otta, Lågen og Mjøsa vil en fortsatt måtte regne med flomskader i forbindelse med store sommer- og høstflommer.

- Total og lokal overvannsdistribusjon (TOD/LOD) har lokalt meget god flomdempende effekt i mindre vassdrag i urbaniserte områder.
- Sikring av kommunal vannforsyning mot forurensning og funksjonssvikt ved flom er en sentral oppgave i det forebyggende flomsikringsarbeidet lokalt. Sikring av kommunale avløps- og renovasjonsanlegg er viktig for å hindre forurensning under flom.
- Det bør legges økt vekt på miljøtilpasninger ved gjennomføring av nye flomsikringstiltak.
- Skaderisiko- og kost-nytteanalyser bør bli en del av beslutningsgrunnlaget ved alle nye flomsikringstiltak.
- Arealbruksendringer som redusert jordarbeiding og bruk av direktesåing, kan brukes som tiltak mot flomskader på dyrket jord på elveslettene.
- Det er viktig å utvikle og ta i bruk nye metoder for objektiv estimering av usikkerhet, i meteorologiske og hydrologiske modeller som brukes i forbindelse med flomprognoser og flomvarsling.
- Kommunenes beredskap mot flom bør styrkes gjennom videreutvikling og evaluering av beredskapsplaner, trening i krisehåndtering, økt bruk av flomsonekart i kommunal arealplanlegging og økt bruk av risiko- og sårbarhetsanalyser.

VIDERE FOU-ARBEID

Det foreslås at videre FoU-arbeid konsentreres om tre områder:

- Videreutvikling av datagrunnlag og metodikk
- Videreutvikling av modeller
- Helhetlig flomsikringsarbeid

Med hensyn til innholdet i de tre forskningsområdene vises til Del IV; "Hovedresultater".

Summary

HYDRA is a research programme on floods, initiated by the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) in 1995. The programme's basic working hypothesis is that the sum of all changes in land use and other physical impacts may have led to an increased risk of floods in the watercourses.

The programme has had two main objectives:

- Expanding our knowledge of the connection between natural resources and the human impact on the watercourse and throughout the catchment on the one hand and floods and flood damage on the other.
- On the basis of increased knowledge, proposing measures to prevent damaging floods and reducing the extent of flood damage in a cost-effective and environmentally optimal manner.

HYDRA is aimed at public administration, organisations and private companies associated with utilisation and management of water resources, as well as educational and research institutions and consultancy companies. Research within the programme has been of an interdisciplinary nature, organised into seven technical project-groups: Data and Geographical Information Systems (GIS), Flood reduction, flood protection and flood management, Environmental consequences of floods and flood prevention measures, Model development, Natural resources and land use, Risk analysis and Urban areas. More than fifty persons from seventeen institutions have been involved in the programme, which has had a budget of approximately NOK 20 million (appr. 2.5 million USD).

Results from the programme have been published in Norwegian in HYDRA's own reports and technical notes. The programme's final report will be published in English.

Although the Glomma drainage basin, which is Norway's largest basin, was chosen as the programme's study area, data from other Norwegian rivers were also included in the study. The basin of Glomma is 41,900 sq. km, comprising approx. 13 % of the area of Norway. The basin of Glomma is divided into an eastern and a western branch, coming together just upstream Lake Øyeren (Figure 1).

The Glomma Basin has fifty power stations and forty regulating reservoirs for electricity generation. Total reservoir capacity in the watercourse is 3,500 million cubic metres, corresponding to approx. 16 % of the

annual inflow into the watercourse. The power stations in Glomma River together produce 10 TWh, equal to 9 % of the total annual production of electricity in Norway.

Most of the analysis has been performed on data from the flood of 1995. A snowy winter and late snow melt combined with an extensive and heavy rainfall caused massive flooding in the Glomma and other river systems, particularly in the south-eastern part of Norway. In some areas in the Glomma Basin the return period was of the order of 100-200 years. The material damage of the 1995 flood totalled NOK 1.8 billion (appr. 230 million USD).

The most important results of the HYDRA study may be summed up as follows:

INCREASED KNOWLEDGE

By systematising and processing data and assembling a database, HYDRA has provided a better information basis for proper flood and watercourse management. The improved information basis has been necessary for constructing models and simulations. Work has also gone into improving the methods for risk assessments, which are an important basis for economic cost-benefit analyses of flood protection measures. Other important methodological work in the HYDRA programme has focused on the uncertainty in meteorological and hydrological forecasts. Furthermore, there have been efforts to improve the methods for flood analysis and the design of flood zone maps. In addition to developing methods, flood zone maps have been produced for return periods of 10 years, 50 years and 100-200 years for several river plains.

Human activities in rivers and their basins may affect both the magnitude and the frequency of floods and be significant for the extent of flood damage and the types of effects floods have both locally and in the basin as a whole. A number of measures and activities that may have impacts on flooding and flood damage have been studied, both by running a computer model for the whole basin and through statistical analyses and studies. The most important results are:

- River regulations have led to reduced flooding in Glomma compared with "unaffected" (unregulated) conditions since the beginning of the 1900s.
- Statistical analyses of flood water levels and flood water flow in long-term hydrological series of

measurements show, with few exceptions, no significant trends. The exceptions are series of measurements from rivers where regulations for power generation have a significant impact and series with significant inflow from glaciers.

- Model analyses of data from eight major floods in Glomma in the 1900s show that river regulations have a great flood-reducing effect. For the 1995 flood, flood water level reductions of 0.7–1.0 m were computed at some locations studied in the eastern branch and reductions of approx. 0.4 m in the western branch including Mjøsa Lake, as the result of the regulations. For Øyeren Lake the reduction in water level was as much as 2.2 m.
- During major floods, flood dykes create a slight increase in both the water level and water flow downstream the dykes. The hastening of flood crests after the construction of flood dykes is a more significant effect, and may be important for flood preparedness efforts. Existing flood protection measures have great local significance in reducing the extent of damage from major floods.
- Changes in forestry and forest conditions within the Glomma Basin have not resulted in measurable changes in flood conditions.
- Increased urbanisation has resulted in reduced infiltration of precipitation and concomitant greater and faster surface runoff from built-up areas. In Glomma the effect of this urbanisation is scarcely measurable in the main river. Urbanised areas cover only 0.5 % of the catchment. In smaller local tributaries the urbanisation has resulted in larger and more pronounced flood crests with increased inundation and erosion.
- Regulation and flood prevention measures close to the river banks change the speed of the current, the diversity of the habitat and the contact between the river and the alluvial plain. The consequences may be significant negative environmental effects.

MEASURES AGAINST FLOOD DAMAGE

Measures against flood damage include both planning-related measures (land-use planning, sector plans for flood preparedness) and physical flood protection measures that affect the course of floods and flood water levels, or that protect infrastructure and various activities from flood damage. Although most measures are meant to prevent future floods, key elements of flood preparedness efforts also include measures taken during the flood itself or in connection with clean-up operations after floods.

The environmental impact of floods and flood prevention measures cannot be priced with reasonable certainty using current methods. This makes it difficult to include environmental considerations in cost-benefit analyses and to weigh the various measures described in HYDRA in relation to one another from the perspective of cost-effectiveness and the environment. Nevertheless, the programme has highlighted a number of measures that individually would be important in reducing floods and flood damage. Of the measures that have been evaluated the following may be mentioned:

- By implementing various additional regulations in Glomma River only minor flood damage from floods of magnitudes of up to a return period of 100 years should be expected in the eastern branch and downstream from the confluence. In the western branch including Lake Mjøsa, one would still expect flood damage in connection with major summer and autumn floods.
- Protecting municipal water supplies from pollution and malfunctioning during floods is a key task of local preventive flood protection efforts. Safe-guarding municipal sewerage and sanitation systems is important for preventing pollution during floods.
- Total surface water management and local surface water management have very positive flood-reducing effects in urbanised areas.
- Increased emphasis should be placed on environmental adaptations when implementing new flood protection measures.
- Changes in land use such as reduced tillage and the use of direct drilling-methods in grain fields may be employed as measures against flood damage of cultivated land on river plains. Grassland protects more against soil losses from flooded plains as compared to cultivated land.
- It is important to develop and implement new methods for objectively estimating the uncertainty in meteorological and hydrological models used in connection with flood prediction and flood warning.
- Risk and cost-benefit analyses must become part of the decision basis for all new flood protection measures.
- The municipalities' preparedness for floods must be enhanced through the further development and evaluation of preparedness plans, increased use of flood zone maps in municipal land-use planning and increased use of risk and vulnerability analyses. The training of risk management for decisions during emergency situations is an important part of preparedness.

Innledning

BAKGRUNN FOR HYDRA-PROGRAMMET

Flommer. Tiåret 1990–1999 har vært preget av mange store naturkatastrofer, som f.eks. orkaner, flommer, tørke, jordskjelv og vulkanutbrudd. Begrepet naturkatastrofe brukes ofte om hendelser som fører til skade på mennesker og menneskeskapte verdier. I de tidlige 1990-årene var det en rekke store flommer i Europa, Amerika og Asia, som i Rhinen i 1993/94/95, i Mississippi i 1993, og i Nord-Korea, der det var både flom og hungersnød. Flommen i Mississippi førte til kostnader på 18 milliarder dollar. I deler av Glommavassdraget var flommen i 1995 den største siden Storofsen i 1789 og kalles derfor ofte Vesleofsen.

Ideen til HYDRA-programmet. Arne Tollan og Trond Ljøgodt i NVE hadde allerede før 1995-flommen (Vesleofsen) tatt initiativ til et forskningsprogram om flom (Tollan og Ljøgodt 1995). Arbeidshypotesen var at summen av arealbruksendringer og andre fysiske inngrep som reguleringer, flomverk, senkingstiltak, vei- og jernbaneanlegg, kan ha ført til økt flomrisiko. Som arealbruksendringer ble regnet endringer i skogproduksjon, skogreising og skogavvirkning (spesielt flatehogst), drenering av skog og myrarealer, oppdyrking og andre driftsendringer i landbruket samt tettstedsutvikling. Hypotesen ble foreslått testet i et forskningsprogram – HYDRA-programmet. Vesleofsen og de store flommene ellers i Europa, Amerika og Asia på 1990-tallet aktualiserte forskningstemaet og bidro til at programmet kunne startes opp i 1996.

FLOMMEN PÅ ØSTLANDET 1995

Etter en snørrik vinter og kald vår, ble det i slutten av mai 1995 en rask oppvarming og samtidig sterk nedbør over store, sammenhengende områder av Glomma-vassdragets og Trysilvassdragets nedbørfelter. Sammen med rask snøsmelting førte dette til en storflom med gjentaksintervall på ca. 100 år, og i noen områder opp til 200 år. Ved Elverum var flommen i Glomma i 1995 den største som er observert siden Storofsen i 1789. Flommen satte også beredskapen på prøve, og veisambandet mellom Oslo og Trondheim ble brutt både i Østerdalen og Gudbrandsdalen. Flomskadene på Østlandet i 1995 ble vurdert til 1,8 milliarder kr. Av dette utgjorde forsikringsutbetalinger og egenandeler ca. 1 milliard kr, mens 0,8 milliarder kr ble dekket ved statlige utbetalinger (NOU 1996:16). Det var samtidig flom i flere andre vassdrag på Østlandet, men ingen ga tilsvarende høye verdier for gjentaksintervall.

En hovedårsak til at så stor del av HYDRAs arbeid er konsentrert om Glommavassdraget var at flommen i 1995 særlig rammet dette vassdraget, og at det bl.a. derfor er forholdsvis god tilgang på ulike typer målinger for dette nedbørfeltet. Figur 1 viser Glommavassdragets nedbørfelt.

FLOMTILTAKSUTVALGETS RAPPORT OG ANBEFALINGER

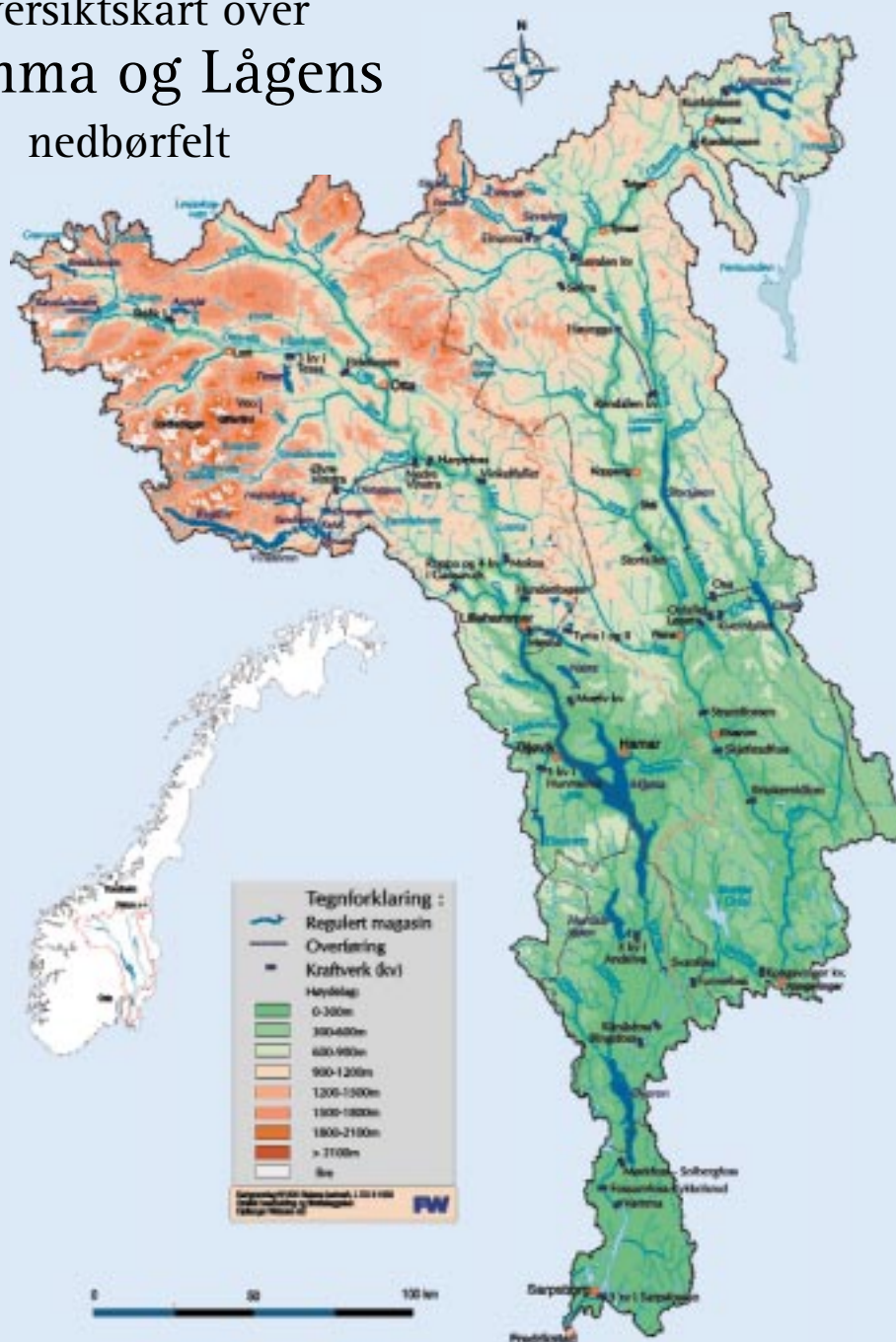
Etter 1995-flommen oppnevnte Regjeringen ved kongelig resolusjon av 13. juni 1995 et eget utvalg (Flomtiltaksutvalget) for å utrede muligheter for å redusere samfunnets sårbarhet mot flom. Mandatet for Flomtiltaksutvalget omfattet bl.a. gjennomgang og evaluering av systemet for flomvarsler og vannføringsprognoser, vassdragsreguleringenes virkning i en flomsituasjon, funksjonen til flom og erosjonssikringstiltak og betydningen av inngrep og endring i arealbruk for flomvannføring. Flomtiltaksutvalget la fram sin utredning i august 1996 (NOU 1996:16).

Flomtiltaksutvalgets arbeid ligger til grunn for mange av de temaene som inngår i HYDRA-programmet. Utvalget så bl.a. på bruk av risikoanalyser ved vurdering av flomsikringstiltak og bruk av flomsonekart som grunnlag for arealplanlegging og flomtiltak. Flomrisiko er i økonomisk sammenheng produktet av sannsynligheten for en aktuell flom og den økonomiske verdien av skadene den medfører. For å redusere eller holde risikoen på et akseptabelt nivå kan det settes inn virkemidler. Endringer eller aktsomhet ved arealbruk, reguleringer og flomsikringstiltak er langsiktige, mens tiltak som bygger på flomvarsling og iverksetting av beredskap er mer kortsiktige. Flomtiltaksutvalget foreslo en rekke tiltak til forbedring av varsling og prognosering, og mange av disse er iverksatt. Effekter av nye reguleringer i Glommavassdragets nedbørfelt ble utredet, og utvalget fremhevet flere prosjekter med flomdempende virkning. Ved storflommen i 1995 var det skader på 35 av 59 flomverk og Flomtiltaksutvalget anbefalte bl.a. sikring mot grunnbrudd, drenering i bakkant (innerkant) av flomverk og dimensjonering i forhold til hvilke verdier som skal vernes.

Flomtiltaksutvalget ga en del anbefalinger for arbeidet i HYDRA-programmet. I sammenfattende form kan anbefalingene uttrykkes slik:

- Utarbeide et helhetlig grunnlag, evt. en modell, for vurdering av flomrisiko i forhold til naturgrunnlag og inngrep, og for optimal manøvrering av magasiner for flomdemping.

Oversiktskart over Glomma og Lågens nedbørfelt



Figur 1. Glommavassdragets nedbørfelt.

- Se på virkningen av reguleringer og flomsikringstiltak for hele vassdraget og for komponenter som tettsteder, og på utvikling av et spesielt vurderings-system for området Kongsvinger - Nes - Mjøsa i forhold til Øyeren.
 - Videreutvikle metodikken for flomsonekartlegging og vurderingsgrunnlaget for flomskader, med sikte på risikoanalyse og bedre planlegging av arealbruk, bygninger og infrastruktur.
 - Vurdere utforming av flomverk for å kombinere bevaring av vegetasjonen på utsiden med vern av jordbruksarealer på innsiden, og for å redusere flomtoppen ved flommer over dimensjonerende flom ved hjelp av nødoverløp.
- Disse anbefalingene påvirket HYDRA-programmet i anvendt retning i forhold til det opprinnelige initiativet, som gikk mer i retning av grunnleggende forskning.

ARBEIDSHYPOTESE, MÅL OG MÅLGRUPPE

Arbeidshypotesen for HYDRA var at summen av alle menneskelige påvirkninger i form av arealbruk, reguleringer, forbygninger, tettstedsutvikling m.m. kan ha økt risikoen for flom. Forskningsprogrammet skulle frambringe kunnskap som gir grunnlag for å teste denne hypotesen.

Forventede resultater av HYDRA var blant annet ny kunnskap om sammenhengen mellom flom og flomskader, forslag til videre tiltak mot flom og flomskader, utvikling av eksisterende databaser som grunnlag for vassdragsmodeller, og for utvikling av bedre varsling og manøvrering i flomsituasjoner.

I litt større bredde var problemstillingen for HYDRA å undersøke om menneskelige inngrep i nedbørfeltet og vassdragsstrengen har betydning for flom og flomskader, i tillegg til naturlige forhold som klima, terreng, jord og vegetasjon. Det foreligger mange undersøkelser som viser at de virkelig store flommene er lite påvirket av mennesket. Fra et visst punkt dominerer naturen. Arealbruk og menneskelige tiltak i og langs vassdragene vil sjelden ha noen avgjørende betydning hvis vi får en intens nedbørepisode på noen hundre mm på vannmettet jord i løpet av kort tid over et helt nedbørfelt. Det foreligger også tall fra andre land som viser at arealbruksinngrep som jordskifte, driftsending, asfalterte driftsveier etc., har gitt økning i frekvens for flommer

med mindre enn 5 års gjentakintervall, men ingen målbar betydning for flommer med 30 års gjentakintervall eller mer (Ihringer et al. 1993).

ORGANISERING

Administrativt har HYDRA-programmet vært organisert som et forskningsprogram under NVE, med en styringsgruppe (Tabell 1), en programleder og et sekretariat. Forskningsaktiviteten har vært organisert med prosjekter innenfor 7 faggrupper. Lederne for faggruppene, programleder Arnor Njøs, programsekretariatet i NVE ved Ollianne Eikenæs og Per Einar Faugli, samt Are Mobæk og Hallvard Berg (NVE), har i tillegg utgjort et eget koordinerende fagutvalg for programmet (Tabell 2). Totalt har HYDRA-programmet omfattet over 50 personer fra i alt 17 institusjoner (Tabell 3).

Med den arbeidshypotesen som var gitt, og med de føringer som kom gjennom Flomtiltaksutvalgets anbefalinger i retning av anvendte oppgaver, var det naturlig at skaderisikoanalyser, arealbruk/naturgrunnlag, tettsteder samt flomdemping, flomvern og flomhandtering ble hovedtema for tilsvarende faggrupper. Skaderisikoanalysegruppen omfattet først også miljøspørsmål, men en kom til at det ville være riktigere å skille ut miljø som egen faggruppe. Opprinnelig var det planlagt at databasegruppen også skulle handtere modellutviklingen og at en skulle bruke Vassdragssimulatoren. NTNU og

Boks 1. Visjon, hovedmål, delmål og målgruppe for HYDRA-programmet

VISJON

En forbedret vassdragsforvaltning ved å redusere sannsynligheten for skadeflommer og omfanget av flomskader gjennom utvidet kunnskap om flom og forbedret beslutningsgrunnlag for tiltak mot flom

HOVEDMÅL

- Å utvide kunnskapen om sammenhengen mellom naturgrunnlag og menneskelige inngrep i vassdraget og nedbørfeltet på den ene siden og flom og flomskader på den andre
- Ut fra et forbedret kunnskapsgrunnlag skal programmet foreslå tiltak for å forebygge skadeflommer og redusere omfanget av flomskader på en kostnadseffektiv og miljømessig optimal måte

DELMÅL

Delmålene for HYDRA kan sammenfattes som oppbygging og videreutvikling av:

- et databasesystem for flommer, flomskader og tekniske inngrep
- metodikk for flomsonekartlegging og skaderisikoanalyser
- grunnlaget for avrenningsmodeller med hensyn til endringer i klima, vegetasjon og arealbruk, samt flomsikring og andre tekniske tiltak
- metodikk for flomberedskap og krisestyring
- flomvarslings- og manøvreringssystemer for vassdrag
- kunnskap om miljøvirkninger av flommer og flomsikringstiltak

MÅLGRUPPE

- Offentlig forvaltning (departementer, fylker, fylkesmenn, kommuner, redningssentraler)
- Organisasjoner og private bedrifter med tilknytning til vassdragsutnyttning og forvaltning
- Utdannings-, forsknings- og konsulentvirksomhet

SINTEF hadde imidlertid under utvikling en ny generasjon vassdragsmodell, såkalt objektbasert modell. Dette førte da til at en innenfor programmet ønsket å bidra i denne utviklingen og valgte å etablere en egen modellgruppe. Denne var sammensatt med deltakere fra de andre gruppene.

Fagutvalget har fungert som en samlende programgruppe. Kontakten mellom fagutvalget og styringsgruppa ved felles møter, seminarer og studiereiser, har

Tabell 1 Styringsgruppa for HYDRA-programmet.

Styringsgruppe:
• Fylkesmann Erling Norvik, Østfold, leder 1996-1998 • Avdelingsdirektør Ola Skaug, Direktoratet for naturforvaltning, leder 1999-2000, medlem 1996-1998 • Landbruksdirektør Tor M. Bratberg, Hedmark • Professor Ånund Killingtveit, NTNU • Avdelingsdirektør Trond Ljøgodt, NVE • Rådmann Svein M. Skaaraas, Hamar kommune • Avdelingsdirektør Arne Tollan, NVE • Professor Arnor Njøs, Jordforsk, programleder

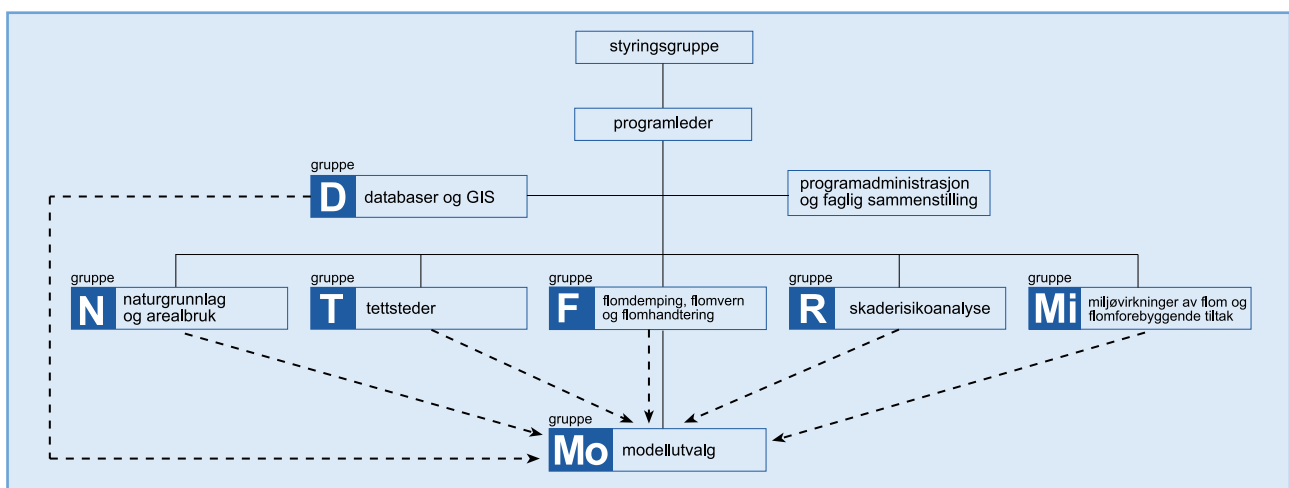
Tabell 3 Institusjoner involvert i HYDRA-programmet.

Institusjon:	
• Norges Byggeforskningsinstitutt (Byggforsk) • Det norske meteorologiske institutt (DNMI) • Direktoratet for naturforvaltning (DN) • Glommens og Laagens Brukseierforening (GLB) • Jordforsk • Norges geologiske undersøkelse (NGU) • Norges landbrukshøgskole (NLH) • Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) • Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)	• Norsk institutt for jord- og skogkartlegging (NIJOS) • Norsk institutt for vannforskning (NIVA) • Norsk Regnesentral (NR) • Stiftelsen for industriell og teknologisk forskning (SINTEF) • Stiftelsen for natur- og kulturminneforskning (NINA/NIKU) • Universitetet i Bergen (UiB) • Universitetet i Oslo (UiO) • Østlandsforskning (ØF)

vært en stor fordel ved planlegging og gjennomføring av programmet.

Tabell 2 Fagutvalget.

Programledelse:
• Arnor Njøs, Jordforsk, programleder • Per Einar Faugli, NVE, forskningssjef • Ollanne Eikenæs, NVE, rådgiver
Ledere for faggrupper:
• Lars Roald, NVE, Data og Geografiske informasjonssystemer (GIS) • Dan Lundquist, GLB, Flomdemping, flomvern og flomhandtering • Ollanne Eikenæs, NVE, Miljøvirkninger av flom og flomforebyggende tiltak • Ånund Killingtveit, NTNU, Modellutvikling • Arne Grønlund, Jordforsk og Noralf Rye, UiB, Naturgrunnlag og arealbruk • Nils Roar Sælthun, NIVA, Skaderisikoanalyse • Oddvar Lindholm, NLH, Tettsteder
samt
• Seksjonssjef Hallvard Berg, NVE • Regiondirektør Are Mobæk, NVE



Figur 2. Organisasjonskart for HYDRA-programmet.

1. Flom, natur og menneske

1.1 FLOMHISTORIE OG FLOMREGIMER

FLOMHISTORIE

Fra mange land hører man beretninger som ligner Bibelsens beretning om syndfloden og Noa. Årsakene til slike syndfloder er at mennesket har gjort seg skyldig i synder, og guddommen sender en flom som straff. Før flommen inntreffer, blir det gitt instruks om å bygge en ark og ta med seg ledsager, og i mange tilfelle dyr av ulike slag.

I nyere tid ligger det mer vitenskapelige metoder til grunn for å forstå hvor og når flommer opptrer. Nedenfor gis en oversikt over hendelser i Norge, med utsyn til resten av verden, som illustrerer klima- og flomhistorie siden istiden og frem til i dag (Lamb 1982, 1995, Njøs 1997).

Postglasial tid til ca. 1800. I Norge er tømmingen av Nedre Glomsjø rundt 9200 BP ("before present") det største kjente flomfenomenet etter siste istid. Store vannmasser, om lag det tredobbelte av Amazonas' vannføring, brøt seg over fra Glåmdalen til Rendalen gjennom Jutulhogget og laget en kjempeflom som avsatte grus, sand og silt langs hele flomløpet. Elveslettene i Solør og en stor siltkappe over de marine leirene i "Romeriksfjorden" ble dannet. Tar vi for oss hele den nordlige halvkule er trolig Massoula-sjøen i Montana, som tømte seg mot staten Washington og dannet Scabland, det største kjente flomfenomenet.

Lenger ut i den postglasiale tida, etter lengre perioder med plantevekst og humusdannelse, kan overdekninger med mineralmateriale brukes som tegn på sterke nedbør- eller snøsmeltingsepisoder. I grus- og steinvifter på Vestlandet er det utført aldersbestemmelser av humuslag som er overdekket av skred- og flommateriale (Blikra & Nemec 1998, Blikra & Selvik 1998). Ut fra alderen på humuslaget, bestemt ved ^{14}C , kan en finne tidspunktet for skredet eller flommen. På Vestlandet har det vært stor frekvens av skred i den kjølige perioden mellom 11 000 BP og 10 000 BP. I en del av varmeperioden fra ca. 9000 BP til ca. 4500 BP eksisterte det ikke isbreer i Sør-Norge, og på denne tid var det skogdekte områder opp til minst 1200 moh. Det er ikke markerte skredoverdekninger i denne perioden. I den kjøligere perioden som fulgte, er det derimot funnet mange lokaliteter med skredmateriale over utviklede humuslag. Det var bl.a. en økning i snøskredfrekvensen fra 4700 BP. Fra 3800 BP til 3300 BP skjedde det også en markert senking av skoggrensa i øvre Gudbrandsdalen (Gunnarsdottir 1996). Blikra & Selvik (1998) hevder at perioden 3900-3100 BP var en av de klimaperioder som var markert med sterkest snøskredaktivitet. Det var et bre-

framstøt i Jotunheimen i perioden 2600-2100 BP, og økt snøskredaktivitet på sørsiden av Jostedalbreen rundt 200 e.Kr. og ved Sunndalsøra rundt 600 e.Kr.

På Østlandet, spesielt i Gudbrandsdalen, er det en stor overdekning (mineralmateriale over humuslag) etter Storofsen i 1789. I øvre deler av Gudbrandsdalen er det imidlertid observert flere overdekte humuslag enn det som ble begravd av Storofsen. På Vieflåtten i Lesja ble det funnet to overdekte humuslag, det øverste fra ca. 1400 e.Kr. og det dypeste fra 4700 BP (Reklev & Vikan 1979). Ved Lesjaverk, på vannskillet mellom Øst- og Vestlandet, ble det funnet tre overdekte humuslag i et jordprofil med veksling mellom humuslag og mineralmateriale (Løken & Helgaker 1977). Det øverste overdekte humuslaget stammet fra 600-700 e.Kr. Det neste overdekte organiske laget var fra 200 e.Kr., og det dypeste fra 4200 BP. På Selsvollene ved Otta ble et overdekt torvlag på 330-340 cm dybde bestemt til å være fra 4500 BP (Haraldsen 1989). Det er funnet et overdekt humuslag fra ca. 2600 BP ved Lågen i Dovre. Det antas å ha sammenheng med oppdemmingen av Lesjavatnet (Gunnarsdottir 1996). Både på Vestlandet og i øvre deler av Gudbrandsdalen tyder de overdekte humuslagene på en opphopning av store skred- og flomepisoder i kjølige perioder. Fra folkevandringstida er det fra Danmark beretninger om at grupper av mennesker ga seg på vandring etter en stor flom i Jylland. Dette var omkring 2100 BP.

Etter den rike nydyrkingstida fra 1100-1300 e.Kr. kom det i Europa en periode med tilbakegang; pest og hungersnød. Perioden fra før 1300 til slutten av 1800-tallet har fått navnet "Den lille istid", etter det kjølige klimaet. Årene 1313-1317 hadde kalde og våte somrer. Det ble oversvømmelser og små kornavlinger med umodent korn (såkalte grønnår), hungersnød og til og med kannibalisme. I 1342 var det rekordflom i Rhinen. Høgåsen (1953) nevner at det i Vågå hadde gått en historie om en flom 7 år før Svartedauden, altså samme året som den store Rhinflommen. Rundt ti år tidligere var det i Kina en storflom som skal ha drept flere millioner mennesker, og som av enkelte er satt i forbindelse med kjernen til Svartedauden. På Vestlandet ble det skrevet ut lavere skatter i 1330-40, som følge av bl.a. store skred. I Gaula var det kombinert flom og dambrudd i 1345. Rundt 500 mennesker ble drept under denne hendelsen.

Den lille istiden kulminerte på 1600- og 1700-tallet og førte altså til en stor tilbakegang i de mest marginale jordbruksområdene i Europa, nemlig vest- og nordsiden av Norden, Skottland og Alpeområdet. En senking av dyrkingsgrensa for korn på 200 m betydde en kraftig nedgang i produksjonspotensialet i disse områdene.

Nyere forskning synes å tyde på at det på 1600- og 1800-tallet var to markerte minima i temperatur under Den lille istid (Jones et al. 1998).

Skattegrunnlaget på Østlandet gikk etter hvert over fra korn til huder og skinn. Korntienden ble for usikker som skatt på grunn av de mange grønnårene i dalene og de høyere liggende områdene. I Norge ser det ut til at perioden fra 1690-1750 var en periode med framrykking av isbreer, grønnår i jordbruket og tilbakegang for skogen.

I Storelvdal i Østerdalen blir tida fra 1650 til 1750 beskrevet som "det vulkanske århundre" (Fosvold 1937). Storelvdølene hadde allerede fra 1358 mindre skatt på grunn av flom, frost og snø. Før 1650 skal det ha vært stillestående oversvømmelser og lite erosjonsskader. Gårdene lå ved elvebredden. Den første storflommen som angrep jordveien, kom i 1650. Koppanggårdene måtte flyttes til kanten av dalsiden. Under flom i 1675 ble jordveien skadet ved mange gårder. Nysådd åkerjord ble til dels vasket bort, og sand ble avsatt mange steder. Det samme gjentok seg i 1691 og 1717. I 1721 kom en storflom som bidro til at mange gårdstun måtte flyttes til kanten av dalsida. Nye flommer fulgte i 1736 og 1757. På flomsteinen fra Grindalen i Elverum er det merket av en vannstand i 1773, som før 1995 var den nest høyeste. Da Storofsen kom i 1789, var de fleste gårdene flyttet opp på sikkert sted. Messeltgårdene i Storelvdal ble først flyttet på 1800-tallet, etter flomskader i 1827 og 1857. Evenstad ble imidlertid liggende på sitt historiske sted. Sætren (1904) nevner at i forbindelse med flom, ble Mjøsas avløp sperret i 111 døgn av et stort jordfall ved Thesen gård i Nes.

Den største kjente flommen i Glomma, Storofsen i 1789, er dokumentert på flomsteiner og gjennom samtidige skildringer, men det foreligger ikke målinger av flommen i NVEs arkiver. Førjulsvinteren 1788 var tørr og ekstremt kald, og det ble dyp tele. Så kom det mye snø etter nyttår. Telen ble isolert, og det tok lang tid før den slapp taket. Flommen oppsto etter en sterk varme- og nedbørperiode. På Toten gikk bygget fram til modning på 84 dager, mens i det kalde året 1784 trengtes 104 dager. Det var ekstremt stor nedbør i løpet av dagene 20.-23. juli 1789. Det er anslått en vannføring inn i Mjøsa på vel 4000 m³/s (Østmoe 1985). Det ble også nevnt at Øyeren var dobbelt så lang som vanlig (Sommerfeldt 1943). Flommen var nesten samtidig i Lågen og Glomma, en situasjon som hadde sammenheng med sterk frontnedbør over det meste av nedbørfeltet. Den kalde forvinteren i 1788 er bekreftet ved at Osensjøen ble islagt 23. desember 1788, noe som er ekstremt tidlig. Under midtsommeren 1789 var jorda i liene i Gudbrandsdalen så mettet at selve flomnedbøren utløste en rekke skred i dalsidene. Sommerfeldt (1943) forteller at elva (Lågen) var så stor som aldri før, og gikk tykk som en velling. Det fløt dyr og hus, tømmer og trær om hverandre. Mjøsa var nesten helt dekket av

busker og trær. I mai 1790 var vannet ennå ikke blitt klart. I liene var det store sår etter alle skredene, mens jord og grus, stein og trær dekket den gamle oppdyrkede jorda i de lavere områdene, dels med metertykke lag. I Kvam ble alle gårdene skadet. I Kvikne og Skåbu var det heller ikke en uskadd gård. I hele Christians Amt (Oppland) var 16 500 daa åker og eng "ødelagt", og 8500 daa skadet for noen år. I alt ble 68 mennesker, 17 hester, 200 storfe og 800 småfe drept, mens 3250 hus ble ødelagt og 800 skadet. Den totale skaden i amtet var anslått til 468 000 riksdaler, derav ca. 25 prosent i Fron. Denne bygda mistet bortimot 50 prosent av sin husdyrbestand. Sætren (1904) forteller at i Østerdalen ble 219 gårder ødelagt, samtidig som det gikk med 4697 husdyr og mange tusen mål dyrket mark og skog.

Tida etter 1800. I 1827-1839 var det mange store isganger. I 1860 inntraff en volummessig svært stor flom i Glomma. Storflommen varte fra slutten av mai og inn i juli og skyldtes både ekstremt stort snøvolum og kraftig regn. Det var to jevnstore flomtopper. Også på Vestlandet ble det storflom. I Lærdøla er flommen den største kjente. Samme år var det også høstflom i Glomma på grunn av sterk nedbør. Det foreligger vannføringsdata for Sarpsfossen for denne flommen, og vannstandsforløpet er observert i noen større innsjøer i Glomma, Drammens- og Skiensvassdraget. Det var også flere andre storflommer på Østlandet i denne perioden, bl.a. i 1858, 1862 og på slutten av århundret. For disse foreligger vannstands- og i noen grad vannføringsdata.

I de siste 100 årene i Norge har det vært store, regionale flommer i 1910, 1916, 1927, 1934, 1938, 1940, 1966, 1967 og 1995. I 1928 gjorde en isgang store skader i Glomma. Mens gruvedriften og tømmerdriften i skogen fikk skylden for flommene før 1900, ble nå skylden lagt på Aursundreguleringen, ved at den skulle ha utløst en høstisgang året i forveien. Det ble dannet en propp som gjorde vårisgangen verre. Flommene i juni-juli 1927, august 1934 og september 1938 var forårsaket av sterk nedbør. I Tinnsjøområdet kom det over 200 mm nedbør i løpet av 3-5 døgn i 1927. Flomnivået var like høyt i Norsjø som under flommen i 1860, men varigheten var betydelig kortere. I 1938 var det en flom med svært stor arealutbredelse. Det er den største observerte flommen i Otta, men det var også storflom i Skiensvassdraget. Under en flom i november 1940 ble det notert norgesrekord i døgnnedbør på 230 mm på et døgn i Indre Matre. Et stort område på Vestlandet hadde mer enn 100 mm i døgnnedbør. Gaula i Sør-Trøndelag hadde sin største flom den 24. august 1940. Ved Støren ble det målt en kulminasjonsvannstand som etter den da gjeldende vannføringskurven ble beregnet til 3000 m³/s. Dette er en meget stor vannføring på et felt på rundt 3500 km². Også i mindre vassdrag kan det bli store flommer, ofte preget av korte reaksjonstider. Høyanger-vassdraget og Jostedøla er eksempler. I Norge har nedbøren på Vestlandet økt siden 1970-årene, og de største breene har økt i volum.

FLOMMER I MISSISSIPPI

Mississippis nedbørfelt strekker seg over 34 stater og dekker 3,2 mill. km². Avrenningen ved utløpet i Mexico-gulpen har et gjennomsnitt på 17 700 m³/s og representerer 1,2 % av all elveavrenning til hav (Dingham 1994). Allerede i 1812 var det bygd 160 km flomvoller (-diker) for å beskytte New Orleans, og i 1855 var det 1600 km voller i Nedre Mississippi. Elveslettene var svært attraktive som jordbruks- og boligområder, og det ble anlagt mange store byer langs elva. Fra 1850 satset US Army Corps of Engineers på strukturelle tiltak som flomvoller og utretting av svinger som forebygging av flomskader. En storflom i 1858 førte til konsentrasjon om prinsippet "Bare flomvoller" ("Levees only"). Dette prinsippet ble fastsatt fra 1861. Det var vesentlig tatt sikte på å beskytte tettstedene mot flomskader, og til en viss grad

å fremme jordbruk og industri i dalføret (Changman 1998).

I 1871 ble det satt i gang et nett av målestasjoner nedover elva og gjennomført en sammenslåing av de hydrologiske og meteorologiske tjenestene. En ny storflom i 1874 førte til oppnevning av Mississippi River Commission i 1879. Det var deretter store flommer i 1903, 1907, 1912 og 1913. Ved de to siste flommene ble mange ikke-føderale flomvoller feid vekk. Prinsippet om "Levees only" ble imidlertid fulgt fram til 1927. En enorm vårflo i Ohio og Nedre Mississippi i 1927 ødela det massive systemet av flomvoller bygget opp etter 1879. Over 900 000 mennesker ble hjemløse i et 100 km bredt oversvømt flomleie på en strekning av 1500 km.

Det kom store flommer i 1936 og 1937, men nå hadde myndigheten lært mer. Det ble satt i gang dambygging for lagring av flomvann i de øvre delene av elva, sammen med en rekke andre tiltak som skulle tjene allsidige formål som skipstrafikk, vannforsyning, flomvern og etter hvert friluftsliv. New Deal førte til oppbygging av Tennessee Valley Authority. Det kom for første gang et Flood Insurance Program i 1968, og i 1970 National Environment Protection Act. Store flommer i elva i 1965, 1973, 1982 og 1983 førte til omfattende skader. Etter 1970 ble det mer vanlig med erstatninger til flomofre. Ikke-strukturelle tiltak og hjelpeprogrammer hadde avløst det kostbare konstruksjonsprogrammet fra 1851-1950.

Den store sommerflommen i juni-juli 1993 førte til kostnader på 18 milliarder USD (ca. 140 milliarder NOK). Flommen ødela 56 000 boliger og oversvømte 4 % av jordbruksarealet i maisbeltet. Mer enn 1000 flomvoller ble vasket bort. Her var det en langt større prosent av de føderale anleggene som overlevde, enn de som var bygd av statene eller lokale myndigheter. Veiforbindelsen på tvers av Mississippi var stoppet i 800 km lengde i 6 uker, og båttrafikken på Mississippi to måneder. Mange adkomster til bruene måtte bygges opp i høyden. Når det gjaldt forsikring viste det seg at bare 10 prosent av de som ble rammet, var dekket.

Eksemplet fra Mississippi viser at det i praksis er umulig å sikre et område fullt ut mot flom. Selv om det gjennomføres svært omfattende og dyre sikringstiltak kan flomskadene bli enorme. Det kom tydelig fram ved flommene på 1990-tallet.



Figur 1.1 Flomstøtte med avmerkete historiske flommer på Grindalen, Glomma.
(Foto: Nils Roar Sælthun)

FLOMMER I EUROPA

I FRIEND-programmet er det utarbeidet en oversikt over store flommer i Europa som går lenger tilbake enn 1800-tallet (Tabell 1.1).

Tabell 1.1 viser en oversikt over historiske flommer i Europa. De eldre målingene er basert på flomvannsstand som er omregnet til flomvannføring. Den eldste målingen i denne tabellen er fra 1342 i Rhinens sideelv Main, ved Würzburg. Dette var en typisk sommerflom i slutten av juli. Vannføringen var beregnet til 3300 m³/s for et tilsigsareal på ca. 14 000 km², noe som gir en spesifikk avrenning på 0,24 m³/s/km². I august 1501 var det storflom i Donau ved Wien, beregnet til 14 000 m³/s. I spesifikk avrenning svarer det til ca. 0,14 m³/s/km². I august 1573 var det storflom i Mulde, ei sideelv til Elbe, ved Golzeen. Her er spesifikk avrenning på ca. 0,41 m³/s/km². En må imidlertid huske at nedbørfeltet ikke var større enn 5440 km². Sideelva Isère til Rhône hadde storflom ved Grenoble i november 1651. Vannføringen er beregnet til 2500 m³/s. Dette svarer til en spesifikk avrenning på 0,44 m³/s/km². Nedbørfeltet var på 5720 km².

I november 1787 var det storflom i Donau ved Wien med en vannføring på 11 800 m³/s. Den spesifikke avrenningen var 0,12 m³/s/km². I 1790 hadde sideelva Allier til Loire storflom i november. For dette nedbørfeltet på 13 000 km² var den spesifikke avrenningen på 0,54 m³/s/km², som er den største i denne tabellen. For øvrig er det interessant at de to sistnevnte flommene har foregått i årene rundt Storofsen (1789).

På 1800-tallet er det tatt med 4 storflommer. I slutten av oktober 1824 hadde sideelva Neckar til Rhinen en vannføring ved Heidelberg på 4000 m³/s for et nedbørfelt omtrent på størrelse med Glomma ved Elverum eller Lågen ved Mjøsa. Den spesifikke avrenningen var 0,29 m³/s/km². Rhône hadde storflom i hovedløpet ved Beaucaire den 31. mai 1856, med en vannføring på 10 000 m³/s, tilsvarende 0,1 m³/s/km² for et nedbørfelt på 96 500 km², omtrent som Donaus tilsigsfelt ved Wien. Glommas største volummessige flom var i 1860. Elva Tejo i Spania-Portugal hadde i hovedløpet, ved Vila Velha en vannføring på 12 000 m³/s i desember 1876, noe som tilsvarer 0,19 m³/s/km² for et nedbørfelt på ca. 59 000 km². Dette er stor spesifikk avrenning. I slutten av desember 1882 hadde Rhinen ved Maxau en flomavrenning på 4620 m³/s, tilsvarende 0,09 m³/s/km². Til slutt tas med at Rhinen ved Lobith i januar 1995 hadde en flomvannføring på 12 100 m³/s, noe som tilsvarer 0,07 m³/s/km² i spesifikk avrenning for et nedbørfelt på 160 000 km².

Regnet etter tidspunkt er det i tabellen 1 vårflom, 3 sommerflommer, 4 høstflommer og 3 vinterflommer.

UTVIKLINGSTREKK I AREALBRUKEN

Etter siste istid har det globalt sett vært enkelte grunnleggende endringer i arealbruken. Den største endringen er overgangen til bofast jordbruk med åkerdyrking i steinalderen. For å så frø av matvekster måtte en fjerne konkurrerende planter, ugras, og lage et såbed, altså en form for jordarbeiding. Nydyrking av skog eller prærier tok bort vegetasjonen som beskyttet jordoverflaten.

Tabell 1.1 Store flommer i europeiske vassdrag (fra Stanescu & Matreata 1997).

Land	Nedbørfelt	Vassdrag	Stasjon	Areal km ²	Q _{max} m ³ /s	Dato
Østerrike	Donau	Donau	Wien	101700	14000	08.1501
					11800	01.11.1787
Tyskland	Rhinen	Rhinen	Lobith	160000	12100	01.1995
		Rhinen	Maxau	50196	4620	28.12.1882
		Neckar	Heidelberg	13809	4000	30.10.1824
		Main	Würzburg	14031	3300	22.07.1342
Frankrike	Elbe	Mulde	Golzeen	5440	2200	14.08.1573
	Rhône	Rhône	Beaucaire	96500	10000	31.05.1856
		Isere	Grenoble	5720	2500	11.11.1651
Portugal	Loire	Allier	Moulin	13000	7000	11.1790
Portugal	Tejo	Tejo	Vila Velha	59170	12000	07.12.1876

Tabell 1.2 Arealbruksendringer 1700-1980 i prosent av arealet (Richards 1990).

Region	Skog	Gras/Beite
Nord-Afrika/Midtøsten	-63	-6
Tropisk Afrika	-21	+10
Nord-Amerika	-7	-14
Sør-Asia	-46	-1
Kina	-57	-3
Europa	-8	-27
Verden	-19	-1

Dermed ble det mindre infiltrasjon og raskere overflateavrenning, som igjen førte til erosjon. De store dyrkingsperiodene har sammenheng med voksende folketall. Tabell 1.2 viser et eksempel på regionale endringer i arealbruken i perioden 1700-1980.

Reduksjonen i skogarealer er et av de mest interessante trekkene i utviklingen i denne perioden. I Europa har det vært forholdsvis liten endring i skogarealene de siste 200 år fordi mye av nydyrkingen hadde foregått tidligere. Totalarealet av produktiv skog i Norge er per i dag ca. 75 000 km² (23 % av totalarealet). Over barskog-grensa er det ca. 10 000 km² trebevokst mark (fjellbjørkeskog). Jordbruksarealet utgjør 10 400 km² (3,2 % av totalarealet), mens det i 1900 var 9900 km². Toppen var i 1939 med et samlet jordbruksareal på 11 200 km². Kornarealet har økt fra 1650 km² til 3700 km² over den samme perioden. Tettstedsarealet har i enkelte land økt sterkt, for eksempel i Tyskland, hvor det nå er oppe i 12 %. Med den lave befolkningstettheten vi har i Norge, er arealet av tettstedene totalt sett svært lite. I Glommas nedbørfelt utgjør dette mindre enn 0,5 %.

ÅRSAKER TIL FLOM

De vanligste årsakene til flom er snøsmelting og regn, ofte kombinert med høy fuktighet i jorda. Fuktighets-tilstanden i jorda er viktigst for flommer som skyldes mye regn. Er jorda bortimot vannmettet før regnet setter inn, kan det bli stor avrenning selv ved liten nedbør. Er jorda derimot tørket ut til full rottybde, er det tilgjengelig et stort infiltrasjonsvolum for vannet, som må fylles opp før særlig avrenning kan finne sted. Kombinasjoner av regn og snøsmelting kan gi ekstrem flom. Ekstra stor fare for storflom har en når snøsmeltingen starter sent om våren, slik at store områder, fra lavland til høyfjell, samtidig bidrar med smeltevann.

Flommer vil som regel forverres ved tele i bakken og i urbane strøk med stor andel tette flater. Kortvarige, intense nedbørsituasjoner kan gi store flommer i små nedbørfelt, mens større felt ikke får tid til å reagere.

Flom kan også oppstå som følge av at bredemmede sjøer plutselig tømmes (jøkullaup) eller at det dannes isdammer på tvers av elva, som siden brister. Slike flommer er ofte kortvarige, men kan ha høy intensitet. Isdammer kan også gi store oversvømmelser uten høye vannføringer.

De store elvene på Østlandet har lang reaksjonstid på grunn av store og trege nedbørfelt, med arealet fordelt på et stort høydeintervall. Vårflommer er det mest vanlige, men høstflommer forekommer. Storofsen i 1789 og Vesleofsen i 1995 er klassifisert som vårflommer. Den forholdsvis store flommen i Sør-Norge i 1987 var derimot en høstflom.

Ytre deler av Vestlandet har ofte brå flommer på senhøsten og vinteren. Her kan også vindtransport av store varme- og vanndampmengder inn over land, med påfølgende kondensasjon av vanndamp, kunne bidra til rask smelting av snøen. Et eksempel er Jostedalsflommen i august 1979, som var en høstflom. Bre- og snøsmelting bidro til flommen sammen med mye regn. Løsmassene på fjellsidene kom i bevegelse, og det var ikke lett å skille mellom flom og skred.

De store elvene i Finnmark har markerte snøsmeltingsflommer. Her er det små høydeforskjeller og derfor en samtidig snøsmelting, ofte med isgang. Høstflommer av betydning forekommer her sjelden. I Midt-Norge hadde en den største flommen i nyere tid i Gaula 24. august 1940, dvs. en høstflom. Samtidig var det også stor flom i Orkla.

Sideelver som bryter ut av sitt normale løp kan være en viktig skadeårsak i flomsituasjoner. Skadepotensialet er spesielt stort når elva går gjennom tettsteder og byggefelt. Mange norske byggefelt er anlagt på rasvifter rundt småelver og på dalfyllinger i leirjordsområder. Skadene her skyldes ofte oversvømmelse eller erosjon/graving. Moksas brudd gjennom Tretten under 1995-flommen er et slikt eksempel. Flommene i Høyanger 1971, i Jostedalen i august 1979 og i Gjøvik/Lillehammer 1998 gjorde også stor skade ved slike elvebrudd.

FLOMREGIMER

Etter årsak til økt avrenning, skilles det i de nordiske land primært mellom snøsmelteflommer og regnflommer. Etter årstid benevnes disse også ofte som vårflommer respektive høstflommer. Tollan (1975) foreslo en enkel klassifisering av norske flomregimer ut fra årstid med stor og liten avrenning. Dette arbeidet er videreført av Gottschalk et al. (1979), som definerte hydrologiske flomregimer ut fra sesongvariasjonen i avrenning. Denne variasjonen styres av klima og fysiografi. En oversikt over de ulike hydrologiske regimer i Norge er gitt i Tabell 1.3.

Tabell 1.3 Særtrekk ved ulike hydrologiske regimer (fra NVE, Vassdragshåndboka (Sæterbø et al. 1998))

Regime	Høy avrenning	Lav avrenning	Steder
Breregimer	Sommer	Vinter	Vassdrag påvirket av isbreer
Fjellregimer	Vår	Vinter	Indre deler av Sør-Norge, Nord-Trøndelag og Nordland. Mesteparten av Troms og Finnmark
Innlandsregimer	Vår og høst	Vinter	Indre deler av Øst- og Sørlandet og Trøndelag, smalt belte på Vestlandet, Nordland, delvis i Troms
Overgangsregimer	Vår og høst	Sommer og vinter	Som for innlandsregimer, men nærmere kysten
Kystregimer	Høst og vinter	Sommer	Kystområder i Sør-Norge, ytterste kyststrøk i Trøndelag, Nordland og deler av Troms

Regionalisering for flomfrekvensanalyse. I forbindelse med flomfrekvensanalyser, bl.a. for dimensjonering av dammer, er det også foretatt alternative inndelinger av Norge i flomregioner. Dette er områder hvor flommene opptrer på noenlunde samme måte, og en slik inndeling bygger på analyser av tidsserier for flomavrenning i uregulert tilstand. For vassdrag som er regulert, må en derfor regne seg fram til forholdene i uregulert tilstand.

Wingård et al. (1978) delte inn Norge i regioner basert på midlere årsavløp over en viss periode og tidspunkt for flom og lavvannsføring. Det ble skilt ut en kystregion med klimatiske forhold som er slik at vårfloppen ikke representerer en markert årvisst hending i vassdraget. Siden forfatterne hadde et begrenset materiale, behandlet de bare årlige maksimalflommer i denne regionen. I resten av landet, innlandsregionen, ble høst- og vårflopper behandlet hver for seg. Det ble også foretatt en videre underinndeling i totalt 10 delregioner.

Sælthun et al. (1997) gikk videre med denne regioninndelingen, basert på et større datagrunnlag fra 212 nedbørfelter. Kravene til observasjonene var at de i liten grad skulle være påvirket av reguleringer og overføringer, og at tidsseriene omfattet minst 20 observasjonsår. Det ble også her skilt mellom vårflopper (snøsmeltingsflopper) og høstflopper (regnflopper). Langs kysten ble det imidlertid ikke definert noe skille mellom regn- og snøsmelteflopper.

Datamaterialet ble sammenliknet med Wingård et al. (1978) for å finne om de lengre observasjonsseriene i Sælthun et al. (1997) ga større avvik. En sammenlikning viste små forskjeller, noe som antyder at det er stabilitet over tid. I flomregioninndelingen etter Sælthun et al. (1997) var ikke Skagerakkysten med i kystregionen, som tilfelle var hos Wingård et al. (1978). Inndelingen fra 1997 har også en innlandsregion som et sammenhengende belte på østsiden av indre kystregion helt opp til Finnmark.

1.2 FLOM – EN DEL AV NATURMILJØET

Innenfor HYDRA-programmet har flommens effekter på materialtransport, vannkvalitet og vannlevende organismer blitt behandlet av henholdsvis Bogen & Bønsnes (1999), Faafeng et al. (1999) og Brabrand et al. (1999).

FLOM SOM MILJØFAKTOR

Et vassdrag er et dynamisk system som alltid er i endring, og flommer utgjør en naturlig del av dette systemet. Endringer i fysiske, vannkjemiske og biologiske forhold som følge av flom, medfører at vassdraget etablerer ny dynamisk likevekt tilpasset de nye forholdene. Miljøendringer som følge av flom betraktes derfor ikke som skade på miljøet. Først når menneskeskapte verdier

Boks 1.1

Flomregionalisering

De benyttede flomseriene besto av de største observerte døgnmiddelflopper innen hvert år og sesong for det enkelte nedbørfelt. Seriene ble standardisert ved å dividere enkeltverdier for hvert felt med middelflomverdien. Regionaliseringen hadde som mål å definere geografiske regioner med hensyn på flomforløp. Etter en todeling av materialet i en region med nedbørfelt fra innlandet med definert sesongskille, og en

region med nedbørfelt fra kystnære områder uten definert sesongskille, ble det brukt 6 parametre for videre inndeling. Disse parametrene var midlere årsnedbør, forholdet midlere årsnedbør til årsnedbør for 5-års gjentaksintervall (i prosent), midlere antall dager med snødekke, midlere årlig snødybde og middeltemperatur i januar og juli. Denne regionaliseringen har gitt en kystregion med to klasser; en ytre, med størst regnaktivitet, og en innenfor, med større variabilitet. Innlandet er delt i fire klasser for vårflopper og tre regioner for høstflopper. (Sælthun et al. 1997.)

som bygninger, infrastruktur og jordbruksområder ødelegges av flom, er skadebegrepet relevant (jf. Sælthun 1999).

Selve flombegrepet er ikke entydig, men flom defineres vanligvis som stor vannføring. Stor vannføring medfører en rekke fysiske endringer i vassdrag, og dette har stor betydning for enkeltarter, biologiske samfunn og hele økosystemer i ferskvann og ferskvannsnær våtmark. Høy vannføring gir økt vannstand, økt dyp og økt vannhastighet og vil utløse erosjon og massetransport som gir redusert siktedyp på vannet. Høy vannstand kan medføre at elva går utover sine bredder og flommer inn over tilstøtende våtmarker og landområder. Høy vannstand kan derfor gi stor økning i vanndecket areal, og der vannhastigheten reduseres vil det skje sedimentering. I innsjøer og elver kan siktedyp og lystilgang bli vesentlig redusert, vannmassenes oppholdstid i innsjøene reduseres, samtidig som innsjøene vil få tilført oppløste næringsalter og materiale utenfra (Figur 1.2).

VIRKNING PÅ MATERIALTRANSPORT I VASSDRAG

Episoder med stor vannføring er viktig for de prosessene som danner elvesletter. Karakteristisk for flomepisoder er at erosjonsintensiteten øker i de øvre deler av elva og at elva går over sine bredder og legger igjen masser i de nedre delene. På denne måten bygges elveslettene opp av materiale som elva fører med seg, og samtidig foregår det erosjon i andre deler av vassdraget som kan føre til at elva tar nye løp. Uten flommer ville ikke elvesletter og deltasletter langs vassdragene blitt bygd opp til den form og sammensetning de har i dag. De forskjellige formelementene er i dynamisk likevekt med de fremherskende vannføringene. Under flom vil erosjons- og sedimentasjonsprosessene intensiveres, men elveløpene opprettholder hovedformen under de årvisse flomvannføringene.

Når det gjelder utforming av selve elveslettene, er det flommer med større gjentakintervall som har størst betydning. Under 1995-flommen ble det målt en pålagring på opp mot 30 cm på deltasletten i Nordre Øyeren. I denne delen av Glommavassdraget var gjen-



Figur 1.2 Samløpet mellom Vorma og Glomma under flommen i 1995. Vorma har liten massetransport sammenliknet med Glomma. Grunnen til dette er at Vorma har utløp fra Mjøsa, som fungerer som et sedimentasjonsbasseng. (Foto: FOTONOR AS)

taksintervallet for 1995-flommen 100-200 år. På elve-slettene oppover langs Glomma var sedimentasjonen variabel, men ved gjennombruddet ved Lauta i Solør ble det sedimentert opp mot 2 m sand. Overstrømningen var imidlertid visse steder så sterk at det også foregikk en utstrakt erosjon av topplaget.

Det er mange betingelser som må være oppfylt for å få høy erosjonsintensitet over større områder. Noen av de viktigste er høy nedbørintensitet, høy jordfuktighet og høyt grunnvannsnivå. I tillegg må det i nedbørfeltet finnes erosjonsutsatte jordarter som kan fremføres til vassdraget. Områder med ødelagt vegetasjon er spesielt utsatt for erosjon. Sannsynligheten er stor for at en ny ekstremflom vil transportere like mye, eller mer materiale enn den foregående. Gjenveksten av vegetasjon er her en avgjørende faktor for erosjonsforløpet under en påfølgende flom, da vegetasjonen binder jordsmonnet og setter ned eroderbarheten.

Flommene har forskjellig virkning i forskjellige typer vassdrag. Variasjoner mellom forskjellige vassdrag er avhengig av om det fins løsmasser tilgjengelig for transport.

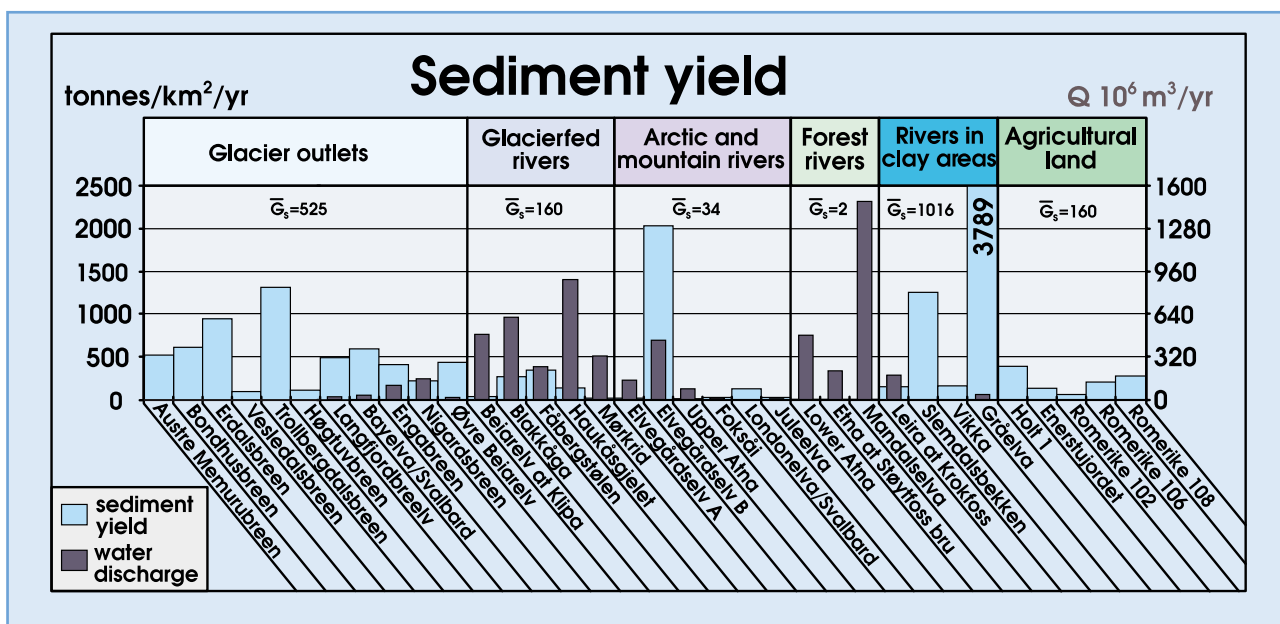
Den største sedimenttilførselen til norske vassdrag kommer fra brevassdrag, der sedimentene frigjøres ved smelteprosesser langs bresålen. Under ekstremisituasjoner kan vannføringen stige så raskt at vannet drenerer på overflaten av breen uten å komme i kontakt med sedimentene langs bresålen, noe som resulterer i at materialtransporten ikke blir spesielt stor. I motsetning til brevassdrag er sedimenttilførselen fra skogsvassdrag liten fordi barskogen i lavlandsområdene i Sør-Norge gir en effektiv beskyttelse mot erosjon (Figur 1.3).

VIRKNING PÅ VANNKVALITET

Når erosjonsprosessene blir mer aktive, eller når det bringes mer materiale inn i vassdragssystemene, vil konsentrasjonen av partikler i vannmassene øke. Ved stor flom består partiklene hovedsakelig av uorganisk (mineralsk) materiale, og konsentrasjonen vil ofte være høyest like før maksimal vannføring. Under flom vil totalkonsentrasjonen av mange komponenter øke med partikkelinnholdet, slik at massetransporten av både organiske og uorganiske kjemiske forbindelser vil være høy. Storflommene i Glommavassdraget og Drammenselva i 1995 er gode eksempler på dette. Da økte fosforkonsentrasjonen til opp mot 50 ganger typisk vinterkonsentrasjon. Dette fosforet var imidlertid i hovedsak bundet til partikler og var derfor lite tilgjengelig for biologisk vekst.

Økt nitrogenkonsentrasjon og nitrogentransport kan også være relatert til stor partikkelkonsentrasjon, men den relative økningen for nitrogen er vesentlig mindre enn for fosfor. Ved flommer som i hovedsak skyldes ren snø- eller breavsmelting, vil derimot nitrogenkonsentrasjon i vassdraget normalt avta under flom som følge av fortykning. Fjell- og breflommene i Gudbrandsdalslågen er eksempler på dette.

Partikkelpåvirkningen fra flommer vil kunne berøre innsjøer over relativt lang tid, og gi høye fosforkonsentrasjoner i lang tid etter flommen. Flom har derimot sjelden stor betydning for nitrogenkonsentrasjonen i innsjøer, noe som også ble registrert i Mjøsa, Lomnesjøen, Storsjøen i Rendalen og Øyeren i forbindelse med Vesleofsen i 1995. Konsentrasjonen av løste komponenter (ioner) har ofte et annerledes variasjonsmønster enn konsentrasjonen av partikler og partikkelassosierte



Figur 1.3 Norske vassdrag klassifisert etter erosjonsintensitet. Fra Bogen (1996).
(Q = avrenning, G = mengde suspendert materiale.)

stoffer, og de ulike ioner reagerer ulikt gjennom en flomperiode. En årsak er at forskjellige ioner i naturlig vann kommer fra ulike kilder: fra hhv. nedbøren og nedbørfeltet. Ionene Ca^{2+} , Al^{3+} , HCO_3^- og H_2PO_4^- kommer primært fra nedbørfeltet, Na^+ , SO_4^{2-} og Cl^- kommer fra nedbøren, mens andre ioner, som f.eks. Mg^{2+} , kan ha både nedbørfelt og nedbør som viktige kilder. I tillegg har de ulike ionene forskjellige fysiske/kjemiske egenskaper som gjør at det kan være store forskjeller i hvilken grad de både kvantitativt og kvalitativt tar del i biogeokjemiske prosesser i nedbørfeltet.

Vanligvis vil effektene både på land- og vannlevende flora og fauna øke med økende maksimal vannføring under flom. For organismene som lever i vann kan i tillegg ekstreme vannkjemiske forhold ha svært store effekter. Dette faller ikke nødvendigvis sammen med de mest ekstreme flomvannføringerne, og hydrologiske og klimatiske forhold forut for en flom er ofte viktigere for vannkjemien enn hvor stor vannføringen blir under flommen. Eksempelvis vil mengden svovelsyre og salpetersyre (sur nedbør) eller natriumklorid (sjøsalter) i snø eller regn være langt viktigere for vannkjemien i vassdraget enn vannføringen. Selv om det vaskes ut og transporteres store mengder partikkelbundet og løst næringsstoff og mengden miljøgifter øker under flom, er det likevel så store vannmengder til stede at konsentrasjonene som regel ikke blir dramatisk høye.

VIRKNING PÅ VANNLEVENDE ORGANISMER

Korttids- og langtidsvirkninger. De fysiske endringene i vassdragene som følger av høy vannføring, virker på organismene som lever i vassdraget. Det kan forenklet skilles mellom korttidsvirkninger og langtidsvirkninger. Korttidsvirkning er knyttet til selve flomperioden, mens langtidsvirkning omfatter den påfølgende periode fram til de biologiske samfunn igjen er blitt normalisert, dvs. igjen er i (dynamisk) likevekt med de fysiske forholdene i vassdraget. Dette innebærer ikke at samfunnene nødvendigvis blir slik de var før flomepisoden. Varigheten av langtidsvirkningen vil avhenge av vassdraget og vassdragsavsnittet, det biologiske samfunnet, foruten selve flomepisoden (omfang, varighet, tidspunkt). Virkningen vil kunne strekke seg over mange år, spesielt der det settes i gang suksesser som inkluderer organismer med lang levetid og der nye biologiske samfunn skal etableres.

Flombegrepet bør også omfatte flomtidspunktet, fordi biologiske samfunn forventes å tilpasse seg mer til regulære enn til irregulære hendelser. Der biologiske samfunn eller enkeltarter ble undersøkt under og etter flommen i 1995, til dels også i 1997, ble det for alle grupper påvist korttidsvirkninger. Etter all sannsynlighet er redusert kondisjon og tilvekst for Hunderørreten i 1995 en direkte følge av flommen, og årsaken settes i forbindelse med stor partikkeltilførsel og redusert lystilgang i vannmassene. Først etter to år ble det registrert

at kondisjon og tilvekst var tilbake til nivået før flommen.

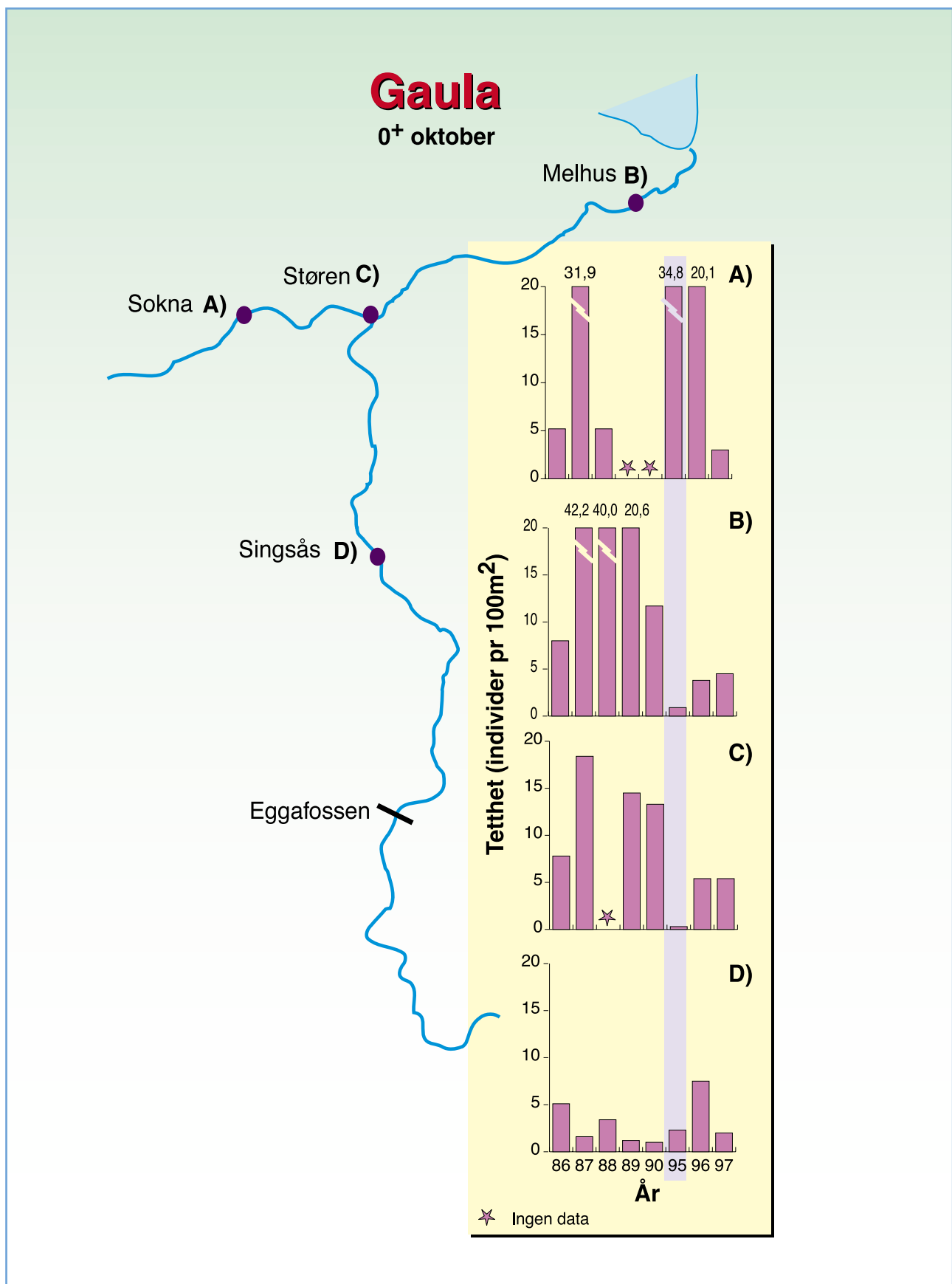
For organismer i rennende vann hadde korttidsvirkningene vanligvis karakter av høy og/eller selektiv dødelighet på grunn av fysisk og mekanisk påvirkning. Hos bunndyr var dødeligheten knyttet til erosjon og økt drift. Hos laks ble plommeseikkelarver sluppet ned før de kom opp av grusen. Årsaken til den store tetthetsreduksjonen i 1995-årsklassen av laks (70-90 %) i midtre og nedre deler av Gaula sammenliknet med øvre deler, er betydelig sedimentasjon i midtre og nedre deler i etterkant av flommen (Hindar et al. 1999). Beregninger tyder på at laksyngelen på dette tidspunkt fortsatt lå nede i grusen, og at sedimentasjonen forårsaket økt dødelighet på dette stadium. Dette betyr at flommens effekt kan være avhengig av det nøyaktige tidspunktet for flomtoppen, noe som bekreftes av at en like stor flom i 1997 som inntraff et par uker senere sammenliknet med 1995, ikke ga samme rekrutteringssvikt (Figur 1.4 a og b).

I innsjøer og lavlandsvassdrag var korttidsvirkningen mer direkte biologisk. I innsjøer ble det påvist økt nærings-tilgang for planktonsamfunn. I lavlandsvassdrag ble det påvist stor innvandring av mange fiskearter over oversvømmet landområde. Dette gir umiddelbar redusert relativ populasjonstetthet og stor tilgang på områder med liten predasjonsrisiko.

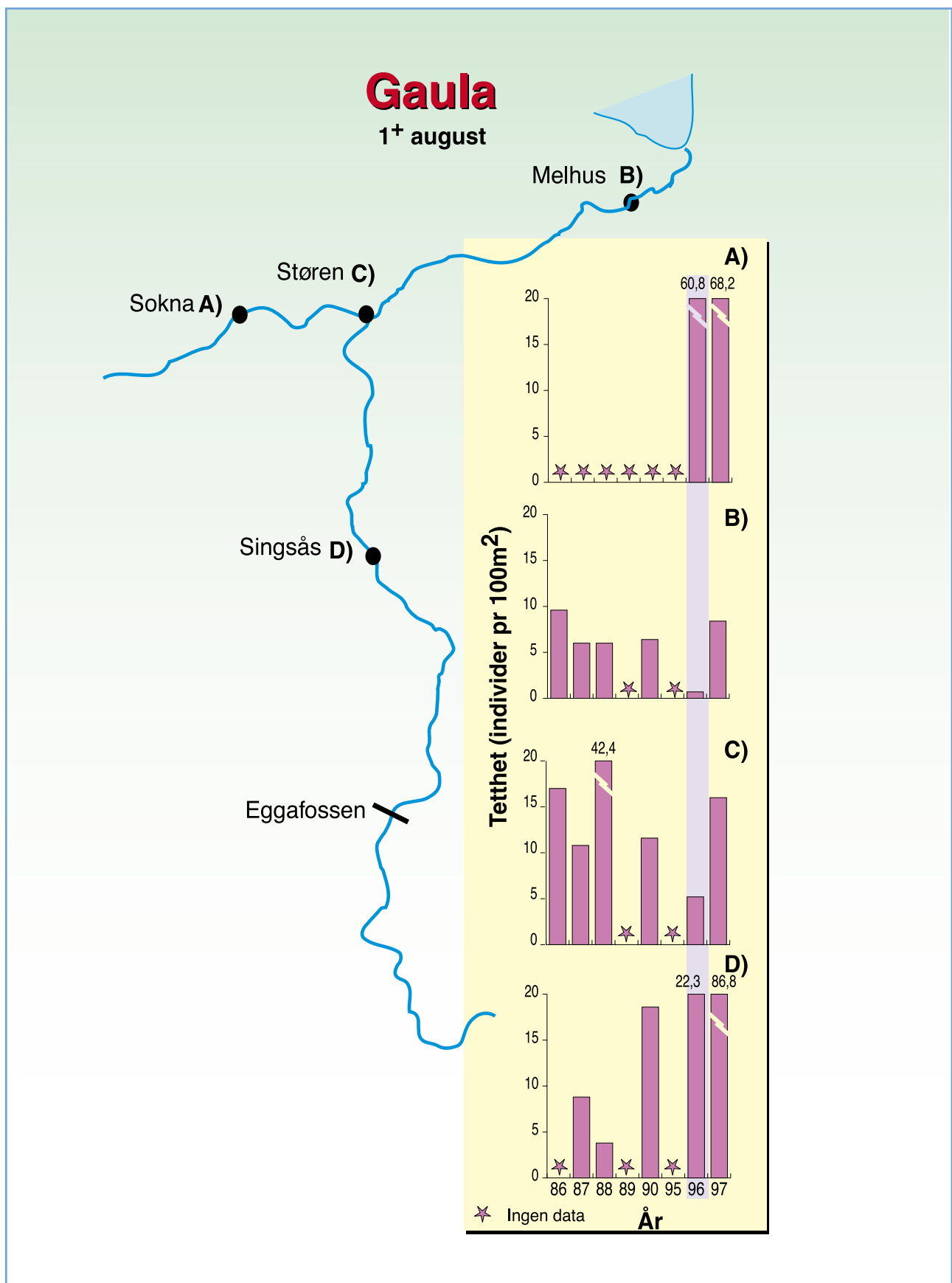
For fastsittende planter eller andre organismer, eller stadier med liten egenbevegelse, kan dødeligheten eller svekkingen under flom være betydelig. Årsakene er først og fremst redusert lystilgang, erosjon og sedimentering. Vann- og sumpvegetasjon i deltaområder kan være svært frodig og artsrik. Den nedsenkede planten hjerte-tjønnaks er en karakterart for Øyeren og en verdifull ressurs for fugl og fisk. Forekomsten av denne planten ble sterkt redusert ved storflommen i 1995, trolig på grunn av grumset flomvann og sedimentering på bunnen (Figur 1.5).

Organismer med stor egenbevegelse, f.eks. fisk og enkelte bunndyr, kan utnytte flomarealene. Her vil et større vanddekket areal gi en reduksjon i relativ tetthet. Reduksjonen vil kun vare i flomperioden. Når flommen er over, vil tettheten av organismer bli gjenetablert, fordi arealet igjen er tilbake til normalt nivå. For arter som har profittert på flomperioden vil tettheten etter flommen kunne øke, slik det er observert for abbor i lavlandsvassdrag.

Korttidsvirkningen på organismene induserer langtidsvirkninger. Disse inntreffer som en konsekvens av de fysiske endringene i vassdraget og den biologiske korttidsvirkningen, spesielt der korttidsvirkningen har gitt dødelighet. Langtidsvirkningen inkluderer kompliserte biologiske prosesser. Selve variasjonen i vannføring sammen med forhold som følger vannføring, er trolig de viktigste faktorene som former det akvatiske økosystem. Der korttidsvirkningen har gitt redusert populasjonstetthet eller



Figur 1.4a Tetthet (antall pr 100 m²) av laksunger i aldersgruppe 0+ i Gaula i oktober 1986-1990 og 1995-1997. Årsklasse 1995 er fremhevet.



Figur 1.4b Tetthet (antall pr 100 m²) av laksunger i aldersgruppe 1+ i Gaula i august 1986-1990 og 1995-1997. Årsklasse 1995 er fremhevet.

selektiv dødelighet av bestemte livsstadier, vil populasjonstettheten kunne øke etter flommen. Lav populasjonstetthet etter flomkulminasjon kan gi påfølgende redusert dødelighet for hele eller deler av populasjonen, ved at veksten eller rekrutteringsraten øker. Konsekvensen er økt populasjonsvekst, eventuelt med endret demografisk fordeling eller sterke årsklasser som resultat. I vassdrag med få arter vil populasjonsveksten etter flom kunne være stor inntil populasjonstettheten og reguleringsmekanismer igjen er stabilisert.

For biologiske samfunn og økosystemer kan det skje markerte endringer som følge av at en eller flere viktige arter i næringskjeden har fått endret tetthet eller populasjonsstruktur under flomepisoden. Både planktonsamfunnene i Atnsjøen og forholdene for Hunderørreten i Mjøsa er eksempler på dette.

Reetablering av biologiske samfunn. Det mest generelle mønsteret for reetablering av biologiske samfunn etter flom er knyttet til suksesjoner og suksesjonsforløp. Dette er prosesser der biologiske samfunn (over tid) igjen kommer i likevekt med de fysiske forholdene.

Flom vil favorisere arter som raskt kan respondere på nye forhold, og profittere på forhold med økt ressurstilgang (r-selektert livssyklusstrategi). Dette er et generelt prinsipp og det er også observert for de grupper som inngår i undersøkelsen innenfor HYDRA-programmet. Det gjelder bunndyr i Gaula og i en høyfjellsbekk i Jotunheimen, plankton i Atnsjøen, organismer i elvenære dammer samt vannvegetasjon og fiskesamfunn i nordre Øyeren. Noen vannplanter klarer flomsituasjonen godt og kan faktisk profittere på en større flom, f.eks. flótgras og beslektede arter som fikk økt sin forekomst i Øyeren etter 1995-flommen (Figur 1.6). Trolig skyldes dette at

de er tilpasset raske skiftninger i lys- og sedimenteringsforhold.

Forekomst av ulike suksjesjonsstadier og innslag av arter med r-selektert livssyklus reflekterer skiftende forhold. Dette inkluderer også flommer. Fysisk miljøvariasjon er relatert til biologisk mangfold ved å bidra til større habitatvariasjon. Men det er ingen enkel sammenheng mellom fysisk miljøvariasjon (her: flom) og biologisk mangfold. Flomfrekvens, flomstørrelse og vassdragets utforming vil her på hver sin måte influere på artsammensetning og dominans i de biologiske samfunn. Tydeligst kommer dette til syne for vannvegetasjon i Otra, der kontrollerte flommer gjør at plantebestandene aldri kommer i likevekt med de fysiske forholdene. Men generelt vil de vassdrag som stadig blir utsatt for flom ha større innslag av arter med kort livssyklus og ha større andel av biologiske samfunn i tidlige suksjesjonsstadier.

1.3 FLOMSKADER OG SKADEFUNKSJONER

Vesleofsen på Østlandet og deler av Trøndelag i 1995, er den flommen som har gitt størst skader i nyere tid. Flomtiltaksutvalget anslo skadene på såkalte menneskeskapte verdier (jordbruksarealer, bygninger, infrastruktur m.m.) til 1,8 milliarder kroner. I HYDRA har man analysert sammenhengen mellom skader og vannstand under 1995-flommen og etablert standardiserte skadefunksjoner (dvs. sammenhengen mellom skade og f.eks. vannstand) for forskjellige objekter, med særlig vekt på bygninger og jordbruksarealer (Sæltun et al. 1999). Anvendelsesområdet for skadefunksjonene vil først og fremst være i risikoanalyser og økonomiske nytte-kostnadsanalyser for flomtiltak (se Kap. 3.3).



Figur 1.5 Den nedsenkede planten hjertetjønna, som er en karakterart for Øyeren, ble sterkt redusert ved storflommen i 1995. (Foto: Bjørn Rørslett)

Skader i denne sammenhengen er brukt synonymt med begrepet kostnader og gjelder økonomiske tap, erstatninger og omkostninger som flommen har påført samfunnet, både i den private og offentlige sektor. Skadene omfatter både direkte skade (utbetaling til erstatning eller nybygging som gjør det mulig å føre skadeobjektet tilbake til en standard som tilsvarer tilstanden før flommen), indirekte skade (merkostnader påført eiendom eller interesser utenfor selve det flomutsatte området som en ringvirkning av flommen) og strakstiltak (kostnader som er påløpt i løpet av flomepisoden på grunn av de tiltak som er iverksatt).

Nedenfor beskrives nærmere flomskader og skadefunksjoner for de ulike typer objekter. En rekke skader som er inkludert i totalsummen på 1,8 milliarder kroner omfattes ikke av skadefunksjonene nedenfor. Det gjelder f.eks. skader på kommunale og fylkekommunale bygg og anlegg, avbruddsforsikringer, inntektstap for NSB, diverse strakstiltak (beredskap, opprydding og forbygging) og egenandeler; totalt ca. 663 millioner kroner.

JORDBRUKET

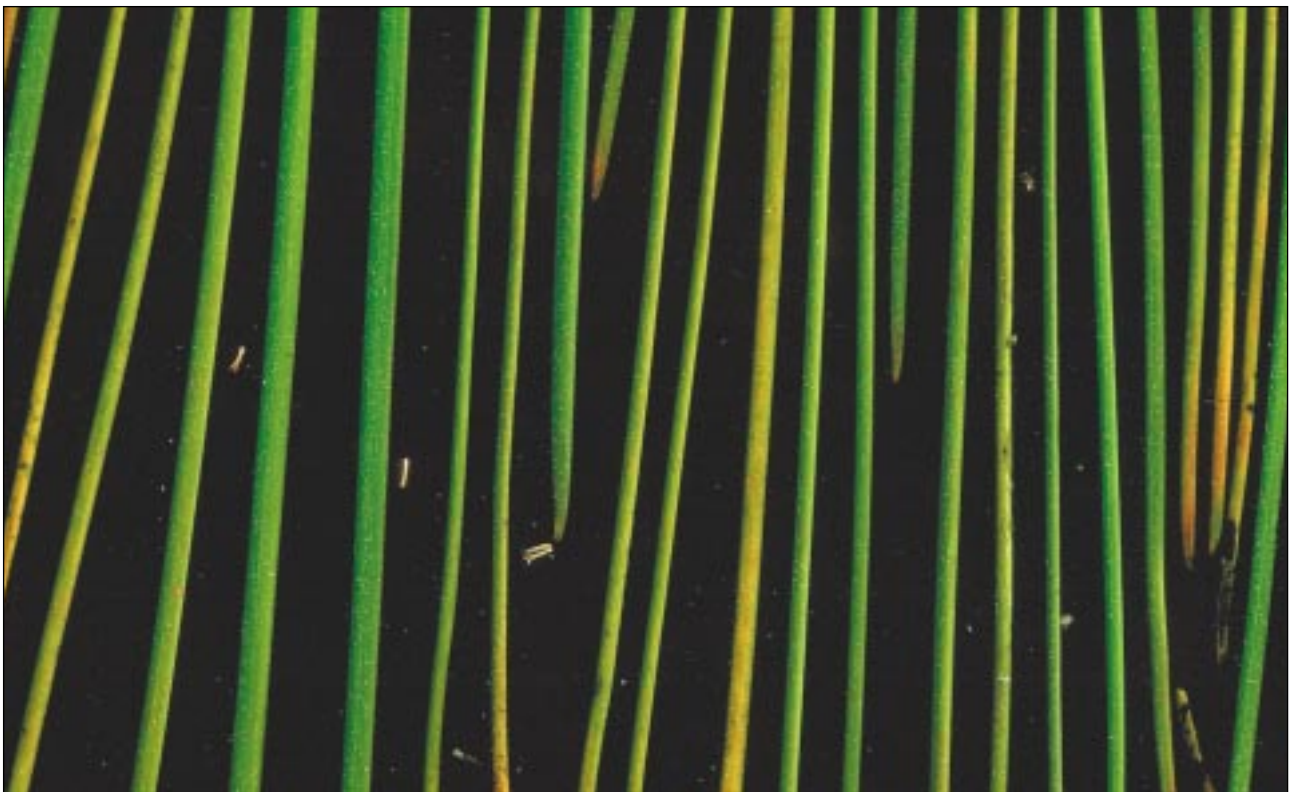
De viktigste flomskader på jordbruket er:

- direkte skade på arealene som følge av erosjon og sedimentasjon
- avlingstap, både i flomåret og kommende år

Etter flommen i 1995 dekket Statens naturskadefond direkte skader på arealene med 204 millioner kr. Disse erstatningene dekker også skade på gjerder, og i noen tilfeller gårdsveier og hager. I tillegg kommer skader på bygninger og infrastruktur som behandles i et senere avsnitt. Flomskader som beskrives nedenfor er i hovedsak basert på erfaringer fra Glomma etter flommen i 1995, på strekningen mellom Kongsvinger og Alvdal.

Arealskader som følge av erosjon og sedimentasjon.

Erosjonsskadene er ikke en jevn flateerosjon, men konsentrert til groper og renner. Punktiskader oppstår i spesielle eksponeringspunkter, som f.eks. støtsider for vannstrømmen og åpninger i vegetasjonsbeltet, samt ved turbulensframkallende terrengformasjoner som trær, steiner, eiendomsgrenser o.l. (Figur 1.7). Slike punktiskader får i hovedsak form av langstrakte groper. Ved åpningen av flomverket i Heradsbygd ble det betydelige skader, men likevel langt mindre enn hvis flomverket hadde blitt ukontrollert brutt i øvre ende.



Figur 1.6 Flyteblad av fløtgrass. Denne og beslektede arter fikk økt sin forekomst i Øyeren etter flommen i 1995. (Foto: Bjørn Rørslett)

Vekkvasking av matjord har en sterkere sammenheng med vannhastighet og tilstanden på jordoverflaten. Denne tilstanden varierer avhengig av årstid, vekstvalg og type jordbearbeiding. Hvis flommen kommer på et tidspunkt like etter såing eller under spiring, vil den bearbeidede delen av jorda ha liten fasthet. Dette sjiktet kan da bli vasket vekk over store områder. Arealer som kun harves, mister mindre jord enn pløyde arealer. Hvis vannet klarer å slite hull på plogsålene, kan det oppstå alvorlige graveskader som erosjonsrenner. Under flommen i 1995 fikk noen erosjonsrenner et slikt omfang at de nesten ble til nye elveløp.

Nedstrøms graveskadene vil det gjerne bli avsatt store sanddyner, særlig i tilknytning til turbulensframkalt skader. Avsetningene synes å være noe større i skogspartier enn på åpne jordbruksarealer.

Skader på arealer knyttet til brudd i flomverk kan arte seg forskjellig avhengig av helningen på elva. I Solør var det ved flommen i 1995 en kraftig graving i bruddstedene og store sandavsetninger innenfor, men vannstrømmen og skadeutviklingen stoppet da arealet var fylt opp med vann. Fra Elverum og nordover, der helningen var større, fortsatte vannet å strømme over de oversvømte arealene så lenge oversvømmelsen pågikk (Figur 1.8).

Avlingsskader. Avlingsskader kan deles i to grupper:

- avlingsskader i skadeåret og manglende avling inntil arealet er utbedret
- avlingsreduksjoner i kommende år som følge av redusert jordkvalitet

Avlingsskader i skadeåret skyldes i hovedsak drukning av planteveksten og dårligere førkvalitet når det gjelder engarealer. Det er ikke nødvendigvis noen entydig sammenheng mellom oversvømmelsens varighet og avlingsreduksjon. Utviklingen til veksten, veksttype, eller om det er rennende eller stillestående vann er derimot av betydning. Spesielt er det stor forskjell mellom veksttyper. Etter flommen i 1995 viste det seg at korn på visse steder kunne greie seg relativt bra med en oversvømmelse på opptil 8-9 dager. Det var imidlertid stor forskjell mellom kornarter. Enkelte hvetearealer i Solør viste 40 % avlingsreduksjon etter 4-5 dager oversvømmelse og 35 % ved 1-2 dager. Engarealer hadde som regel normal vekst igjen etter oversvømmelsen. Potet hadde stor utgang etter bare 1-2 dager. Etter Vesleofsen betalte fondet for katastrofeordning i planteproduksjonen 35 millioner kr for avlingsskader, mens egenandelen var 40 millioner kr.



Figur 1.7 Flomskade på Rustad-området i Elverum. Graveskader framkalt av turbulens i eiendomsdeler. (Foto: FOTONOR AS)

Omfanget av avlingsreduksjoner i kommende år er avhengig av hvordan jordsmonnet bygges opp igjen. På arealer med vekkasket matjord kan innholdet av organisk materiale være redusert til rundt halvparten av innholdet i uskadet jord. Jordkvaliteten av godt jordmateriale må gjenoppbygges før avlingene er tilbake til opprinnelig nivå. Uten ekstra tilførsel kan det imidlertid ta lang tid å gjenopprette produksjonsevnen. Selv om det dyrkes en flerårig vekst, kan det ta 10-20 år og kanskje mer enn det. Jordforbedringer i topplaget som f.eks. innblanding av mold, torv og kloakkslam, har dermed stor betydning for avlingene, særlig de første årene etter flommen. Ved store graveskader har kvaliteten på de ifylte massene (lagringsevne for vann og næringsstoffer) stor betydning for plantenes vannusholdning og dermed avlingsnivå. Etter flommen i 1995 ble de fleste graveskadene ifylt med tilgjengelige masser som flommen etterlot, men disse massene var i stor grad

utvasket for finstoff. Tilgang på masser av god kvalitet var dermed et problem for mange i Østerdalen.

Ved store sandavsetninger etter en tidligere flom i Storelvdal, hevder grunneieren at det var synlige forskjeller i veksten i mer enn 20 år etterpå, selv på eng med stor dosering av husdyrgjødsel. Arealer med sandavsetning vil ha svært liten nyttbar lagringsevne for vann og kan ha større avlingsproblemer enn arealer med vekkasket matjord, dersom det er silt under matjorda.

Erfaringer fra dyrking på utbedrede arealer etter flommen i 1995 antyder at avlingene i 1997, som var et relativt tørt år, lå på ca. 50-60 % av det man kunne forvente uten skader. I 1998, da nedbørfordelingen var god, lå avlingene på ca. 80-90 % av forventet nivå.



Figur 1.8 Flomskade på Øksna i Elverum. Brudd i øvre ende av flomverk førte til vannstrøm over arealet under hele oversvømmelsen med graveskader og vekkasking av matjord. (Foto: FOTONOR AS)

Skadefunksjoner. Skader på jordbruksarealer på strekningen fra Kongsvinger til Alvdaal er analysert gjennom regresjonsanalyse med tanke på å finne ut hvordan erosjonen varierer med fysiske faktorer. De fysiske faktorene (vannndyp, helningsgrad, dyrket areal, oversvømt areal, m.fl.) er etablert ved bruk av digitale flomkart, digitale markslagskart og vannlinjer. De viktigste prediktorene (forklaringsvariablene) for erosjon viste seg å være:

- vannhastighet
- andel dyrket jord av oversvømt areal
- bredden (på tvers av elveretningen) av det oversvømte arealet

Basert på regresjonsanalysene er det utviklet skadefunksjoner for risikoen for jordtap (både turbulens-fremkalt massetap, vekkvasjing av matjord og graveskader ved brudd i flomverk), sedimentasjon og avlingstap (for detaljer, se Sælthun et al. 1999). Mange viktige momenter, f.eks. årstidsvariasjon, har det ikke vært mulig å trekke inn i analysene på grunn av manglende empiriske data. Effektene av flomskader på avlinger er kompliserte. Det finnes mange kombinasjoner av jordforbedringer, vekstvalg og dyrkingsteknikker for å gjøre det beste ut av situasjonen, men det finnes lite systematiske forsøk og registreringer. Estimering av skadefunksjoner er dermed i stor grad også basert på skjønn.

Svært forenklet og skjønnsmessig ble det også satt opp kostnadsligninger for de enkelte skadetyper på jordbruksarealene. Multiplisert for hele området langs Glomma mellom Kongsvinger og Alvdaal fikk man en kostnad på ca. 65 millioner kroner, noe som gir en liten indikasjon på skadeomfanget for jordbruket.

BYGNINGER, VEI OG JERNBANE

Bygninger. Datagrunnlaget for skader på bygninger er basert på 232 skaderapporter fra Åsnes kommune. Den viktigste analysen har vært å se på skadeomfanget i forhold til vannstand og bygningstype. Boliger var den kategorien av bygninger som hadde størst andel av totale skadeutbetalinger, og som det derfor var spesielt viktig å finne en skadefunksjon for.

Som forventet øker skaden på boliger med økende vannstand. Den forventede flomskaden er i gjennomsnitt kr 1240 per cm vannstand over fundamentet. Punktene for registrerte skader viser stor spredning rundt gjennomsnittslinjen (Figur 1.9). Dette kan skyldes flere forhold, uten at det har vært mulig å anslå innflytelsen til de enkelte faktorer. Varighet på flommen kan ha spilt en rolle for skaden på noen av boligene, ved at skadene øker jo lenger huset berøres av flomvannet. Videre kan skader ha blitt redusert hvis mottiltak er satt inn på et tidlig stadium. Alder eller byggeår har ingen entydig sammenheng med flomskader. En markant forskjell oppnås imidlertid ved å se på om boligen er satt opp før eller etter annen verdenskrig. På førkrigsboligene er

skadene nærmest vilkårlige i forhold til vannstand, mens på etterkrigsboligene er det en klarere sammenheng mellom vannstand og skade. Samtidig er den gjennomsnittlige skaden høyere på etterkrigs- sammenliknet med førkrigsboligene. Her spiller byggematerialene, f.eks. om det er brukt stående trepanel eller plater, en rolle. Boliger med innredet kjeller har generelt hatt større skader enn de med uinnredet kjeller, som igjen har større skader enn boliger uten kjeller. Bygningens tilstand har med andre ord betydning. Fullverdien kunne vært et godt mål på bygningens tilstand og kunne kanskje gitt en god sammenheng med flomskader og vannstand, men denne informasjonen er fortrolig fra forsikrings-selskapene. Generelt for norske bolighus ser skadene ut til å nærme seg totalskade når vannet har stått ca. en meter over første etasjes gulvnivå.

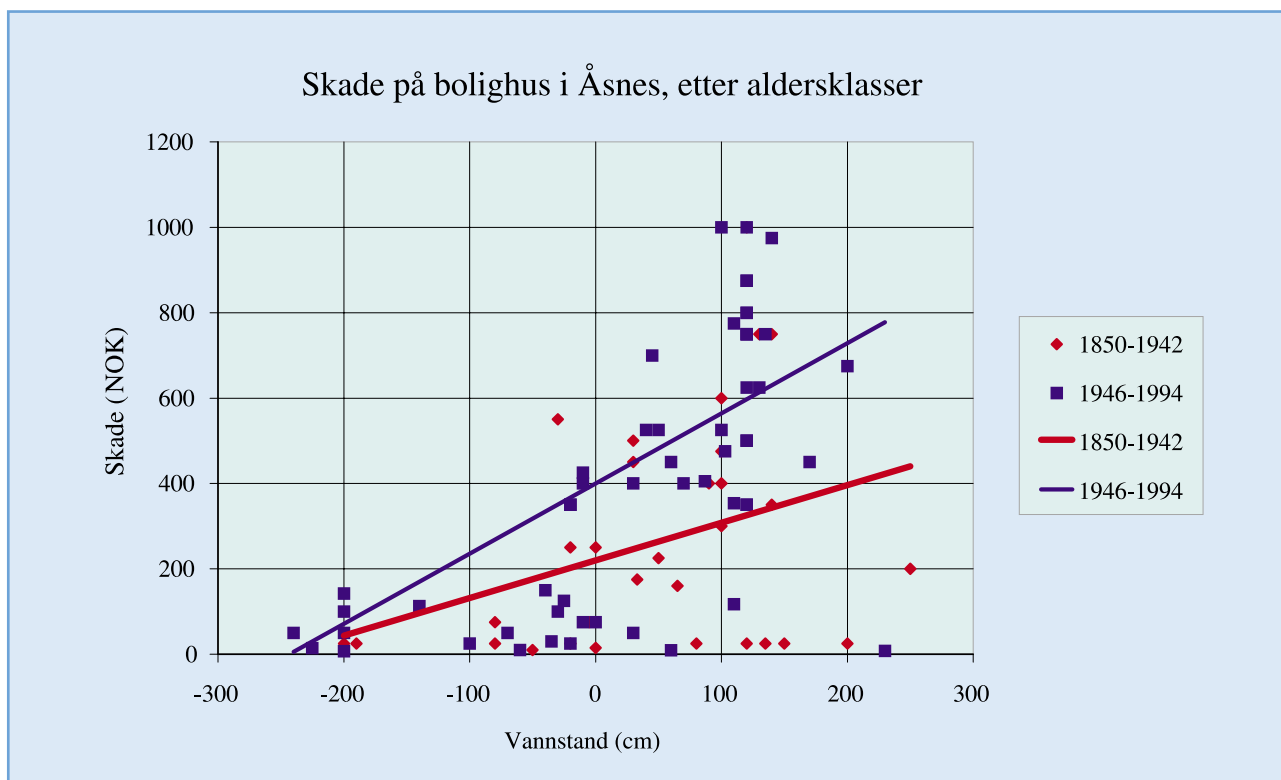
For bygninger som driftsbygninger, garasjer og andre uthus, er skadebildet mer uklart enn for boliger. Hovedobservasjonen er at skadenivået er langt lavere enn for boliger, og det er svært liten sammenheng med vannstand. Gjennomsnittlig skade for slike bygninger var ca. kr 50 000. Av andre bygningstyper, som f.eks. forretninger og industribygg, har det ikke vært datagrunnlag for å etablere sammenhenger mellom vannstand og skade.

Skadefunksjoner. Den store spredningen i dataene gjør det umulig å etablere pålitelige, generelle vannstand/skade-funksjoner for enkeltbygninger. For en gruppe av berørte bygninger kan det imidlertid etableres en skadefunksjon (skade som funksjon av vannstand) på grunnlag av det midlere skade/lokal vannstand-forholdet for boliger (1240 kr/cm opp til totalskade), og skade på uthus (kr 50 000 per berørt bygning). Når flere bygninger behandles sammen reduseres usikkerheten.

Skadefunksjonen for bygninger innen et potensielt oversvømmelsesområde kan etableres på ulike måter. Dersom det finnes et flomkart for en gitt vannstand/flomstørrelse, kan dette gi et punkt på skadefunksjonen ved at man kartlegger alle berørte bygninger, beregner sokkelhøyde ut fra digitalt topografisk kart og anslår skaden ut fra oversvømmelses/skade-forholdet nevnt over (1240 kr/cm). I tillegg finnes berørte uthus (kr 50 000 per bygning). Større bygninger må vurderes enkeltvis. Til sammen gir dette en samlet skade for området for en gitt vannstand/flomstørrelse.

Dersom man har et godt digitalt kartgrunnlag kan en kontinuerlig skadefunksjon, dvs. for flere ulike vannstander, konstrueres uavhengig av flomkart på følgende måte:

- flomlinjer for det aktuelle området knyttes til et lokalt vannmerke
- sokkelhøyden for bygninger i forskjellige kategorier bestemmes på grunnlag av digitale kart – dette gir en empirisk fordelingsfunksjon av sokkelhøyden



Figur 1.9 Flomskade på boliger i Åsnes som funksjon av vannstand over bunnfundament.

- fordelingsfunksjonen for sokkelhøyde sammenholdt med flomlinjenivåene gir antall berørte bygninger og en fordelingsfunksjon for oversvømmelse (vannndyp) i bygninger ved gitte vannstander ved vannmerket
- oversvømmelse-/skade-forholdet nevnt ovenfor benyttes til å beregne skaden for den aktuelle vannstanden
- beregningen gjentas for mange nok punkt til å spenne ut en vannstand-/skade-kurve for det aktuelle variasjonsområdet for ulike flomvannstander

Dersom deler av området er beskyttet mot oversvømmelse av flomverk eller naturlige høydedrag må dette tas spesielt hensyn til.

Vei. Skadene på veier etter flommen i 1995 kom hovedsakelig i to fylker, Oppland og Hedmark (Figur 1.10). Det ble innhentet skadeestimat på riks- og fylkesveier i disse to fylkene. Totalt skadebeløp ble beregnet til 65,1 millioner kroner, hvorav riksveier sto for 42,4 millioner kroner og fylkesveier for 22,7 millioner kroner. Ved beregning av skadefunksjoner ble riksveier og fylkesveier sett under ett. Det er ikke klart om den ene typen er mer kostbar å reparere eller mer utsatt for skade. På den ene side kan det forventes at riksveiene er mer utsatt, fordi dette er hovedårer som ofte er lagt i dalførene langs de store elvene. Fylkesveiene ligger ofte lenger vekk fra elva og er dermed mindre flomutsatt. På den annen side holder riksveiene en høyere standard slik at de er bedre egnet til å motstå erosjon og setninger. Fylkesveiene har svakere drenering og er mer sårbare for flomvann.

Ved etablering og bruk av skadefunksjoner for vei, er det to størrelser som må tas hensyn til:

- hvor lang strekning av veien som er utsatt for skade
- hvor stor andel av denne veistrekningen det faktisk oppstår skader

Den første vil kunne estimeres ut fra vannføring og tilhørende vannstand. Hvis vannstanden når opp i fyllingen under veidekket kan det antas at veien er utsatt. Dataene fra 1995 ga ikke grunnlag for å etablere en nærmere sammenheng mellom skade og vannstand i forhold til veidekkets nivå. Den andre størrelsen er mer komplisert. Skadene på veiene skyldes enten setninger eller utvasking. Setninger skjer når grunnvannsnivået kommer opp i bærelaget under veidekket og vil forverres jo lenger veien står under vann. Utvasking kan skje når veien ligger så nær elva at vannhastighetene blir høye nok til utgraving. Utvasking vil naturlig nok være størst der det ikke er beskyttelse i form av plastring, eller der det er svakheter i plastringen. Det har vist seg at lokale svakhetspunkt kan danne kimen for skade over en lengre strekning med plastring. Ofte er det bare veien som ligger på selve elvekanten som blir skadet ved flom. I 1995 var det flere veistrekninger et stykke fra elva som ikke ble varig skadet, selv om de sto under vann. De kunne være midlertidig ubrukbare når fyllingen var vannmettet, men krevde ikke reparasjon etter opp-tørring. Kombinerte effekter av ulike skademekanismer gjør det vanskelig å finne en signifikant korrelasjon mellom vannstand og skadeomfang.

Skadefunksjon. Kompliserte årsaksforhold gjorde det nødvendig med en forenklet skadefunksjon basert på to størrelser, med vannføring eller vannstand i hovedvassdraget som prediktor:

- Skadeutsatt strekning som er den veilengden der den maksimale vannstanden når opp til veidekket. Denne lengden øker med økende vannstand og vannføring og kan bestemmes fra kart eller terrengmodell.
- Statistisk forventet skade per km skadeutsatt vei, anslått til kr 360 000.

Dette er en forventningsverdi hvor to verdier er inkorporert. Den ene er den gjennomsnittlige andel av utsatt veistrekning hvor det faktisk oppstår skade som krever reparasjon. Den andre er en gjennomsnittlig kostnad for reparasjon av skadd veilengde. Disse verdiene er basert på totale skadetall fra Oppland og Hedmark etter flommen i 1995.

Denne enkle skadefunksjonen med vannføring/vannstand i hovedelva som prediktor, antar at skadene som sideelvene volder er proporsjonale med skadene som skyldes hovedvassdraget. Det innebærer en stor usikkerhet. Ofte vil det være sammenheng mellom vannføring i sideelver og hovedelv, men noen god, generell sammenheng finnes ikke. Flere alvorlige skader i 1995 oppsto på

grunn av plutselig økt vannføring i sideelver som følge av store lokale nedbørsmengder. Som eksempel kan nevnes Mokså. Her ville ikke vannstanden i Lågen være noen god prediktor for å anslå skadeomfanget.

Jernbane. Skadekostnader for Jernbaneverket etter flommen i 1995 på de mest berørte banene, Rørosbane Nord og Dovrebanen Nord, beløp seg til 22,1 millioner kroner. Kostnadene fordelte seg omtrent likt med ca. 11 millioner på hver bane. Det er imidlertid verdt å merke seg at det i denne summen også inngår vedlikeholdskostnader som uansett ville påløpt. For Rørosbane Nord ble derfor merkostnadene som utelukkende skyldes flommen, ca. 7,5 millioner kroner.

Skadene på jernbanen vil være avhengig av om vannstanden når de ulike deler av banelegemet (Figur 1.11), men så lenge det ikke oppstår utgraving (erosjon) vil skadene være relativt beskjedne. Hvis vannstanden er lavere enn formasjonsplanet vil det ikke oppstå skade. Hvis vannstanden når opp i formasjonsplanet, men ikke overbygningen, vil opprensning av stikkrenner som regel være det eneste som kreves av utbedringer. Ved vannstander som når opp i overbygningen, vil det i ettertid være nødvendig å sørge for at pukklaget pakkes. Dette gjøres med en spesiell pakkemaskin. Hvis vannet blir stående over svillene, og særlig hvis det skjer over noe



Figur 1.10 Flomskadet vei. (Foto: Per Einar Faugli)

tid, vil det avleire seg finstoffer i pukklaget som vil forhindre den nødvendige dreneringen vekk fra skinner og sviller. Da må pukklaget renses i tillegg til at det pakkes.

Skadefunksjon. Fordi skadene er så knyttet til vannstanden når opp i de ulike lagene i banelegemet, er det mulig å benytte en enkel funksjon for å estimere skadekostnader, basert på erfaringer etter flommen i 1995:

- For den banelengden der vannstanden når opp i formasjonslaget beregnes 30 000 kr per km.
- For den banelengden der vannstanden når opp over formasjonsplanet og inn i overbygningen, og det ikke forventes erosjon eller tilslamming, beregnes en minste tilleggskostnad på 45 000 kr per km.
- For den banelengden der vannstanden når opp over formasjonsplanet og inn i overbygningen, og det er fare for erosjon eller tilslamming, beregnes en maksimal tilleggskostnad på 250 000 kr per km.

Estimatet vil avhenge sterkt av vurderingen av flomforløp og vannstand, noe som i praksis er vanskelig å anslå. Skadepotensialet er større der sideelver kan forårsake utvasking og slamtilførsel.

FLOMSIKRINGS- OG EROSJONSSIKRINGSTILTAK

I forbindelse med flommen i 1995, er det sett på tre typer flomsikringstiltak med hensyn på om de har fungert som forutsatt, eller om flommen har forårsaket skader på tiltakene og bakenforliggende områder. De tre tiltakene er:

- Forbygningsanlegg (elveskråning som er erosjons-sikret for å hindre utgraving av elvekanten).
- Flomverk (voll ved elvekanten for å beskytte et bestemt areal mot oversvømmelse).
- Senkningsanlegg (elveløp som er senket for å hindre oversvømmelse og bedre dreneringen, ofte bygget sammen med flomverk).

Disse tiltakene skiller seg fra de andre skadeobjektene ved at de er oppført i den hensikt å verne mot vannet, og selv kunne motstå en dimensjonerende eller gitt flomvannføring. Dimensjoneringskravene for tiltakene som ble berørt i 1995 var flom med gjentakintervall mellom 30 og 100 år. Det kan antas at alle anleggene ble utsatt for en vannføring minst så stor som dimensjonerende, fordi gjentakintervallet på flommen var mer enn 100 år.

Av totalt 478 anlegg, ble det registrert skader på 116 (24 %). Skadekostnadene beløp seg til 74 millioner kr, hvorav forbygninger sto for 34 millioner kr, flomverk for 39 millioner kr og senkningsanlegg for mindre enn 1 million kr (Tabell 1.4). Kostnadene omfatter bare reparasjon og vedlikehold knyttet til selve anlegget eller elva. Skade på bakenforliggende objekter er ikke inkludert. Lengdene på skadde flomverk og senkningsanlegg er ikke tatt med, fordi funksjonsdyktigheten til slike anlegg er tapt selv om bare en del av anlegget er skadd.

Skadene på de enkelte anlegg er trolig avhengig av den lokale vannstand, vannføring, vannhastighet og varighet av flommen, men tilgjengelige data gir ingen mulighet til å spesifisere skadeomfanget som funksjon av disse hydrologiske variablene.

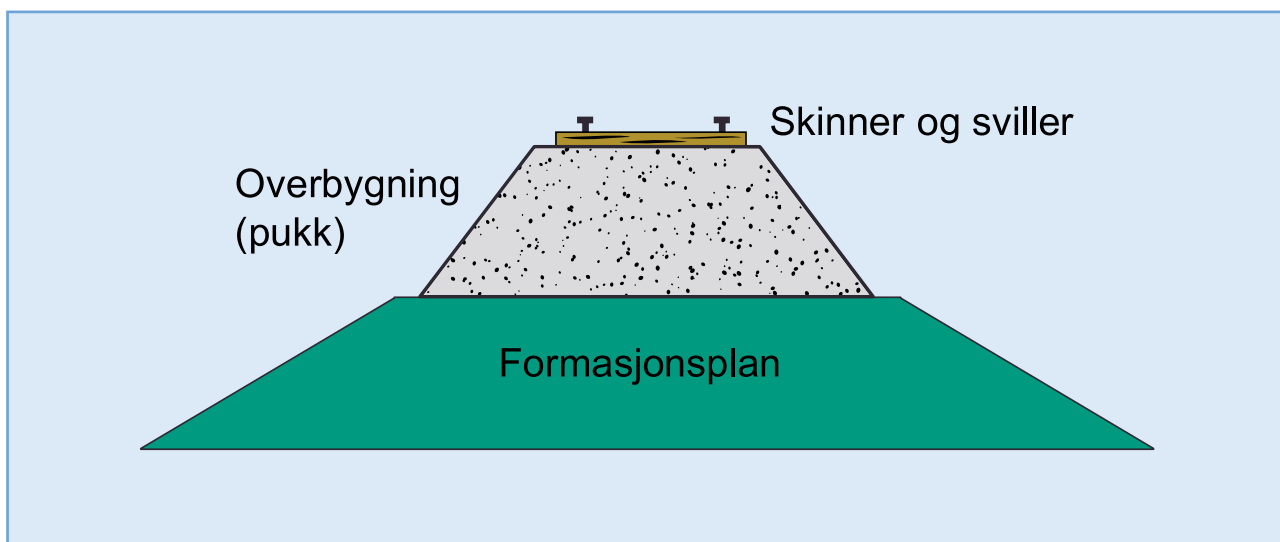
Skadefunksjon. Data fra 1995-flommen (Tabell 1.4) gir grunnlag for å estimere skader på sikringstiltak, men egentlig bare for den faktiske vannføringen i 1995. Skadeomfanget vil ikke være proporsjonalt med vannføring eller vannstand fordi anleggene er dimensjonert bare for å holde for vannføringer under den dimensjonerende vannføringen. Videre er det også slik at i praksis vil mange anlegg stå imot vannføringer som er høyere enn den dimensjonerende, mens andre ikke holder selv ved flommer under denne grensen.

Basert på tallene fra 1995 kan det estimeres en sannsynlighet for at et anlegg blir skadd (skadeforekomst) ved vannføringer over den dimensjonerende og gjennomsnittskostnader for skadetilfellene (Tabell 1.4). Forutsatt at anleggene holder for vannføringer under den dimensjonerende, kan dette gi følgende fremgangsmåte for å estimere forventet skade på flomsikringstiltak:

- Angi vannføringen som skal legges til grunn for estimatet.
- Finn den lengde (antall) av hver anleggstype som utsettes for en flom minst så stor som dimensjonerende ved den angitte vannføringen. Dette er de skadeutsatte lengdene.
- Multipliser totallengden (antallet) av skadeutsatte anlegg med sannsynligheten for skade (i % av lengde eller % av antall fra Tabell 1.4) for å bestemme forventet omfang av flomskaden.
- Multipliser det forventede skadeomfanget med gjennomsnittskostnadene per tilfelle eller per km (Tabell 1.4).

Tabell 1.4 Skade på anlegg for flom- og erosjonssikring under flommen i 1995.

	Forbygnings- anlegg	Flomverk	Senknings- anlegg	Totalt
Totalt antall anlegg	407	59	12	478
Total lengde anlegg (km)	333	134	37	504
Antall skadde anlegg	80	33	3	116
Lengde av skadde anlegg (km)	22			
Skadekostnader (mill. kr)	34	39	0,6	74
Skadeforekomst: andel av totalt antall (%)	20	56	25	24
Skadeforekomst: andel av total lengde (%)	7			
Gj.snittlig kostnad (mill. kr per tilfelle)	0,43	1,18	0,20	0,64
Gj. snittlig kostnad pr. skadelengde (mill. kr per km)	1,55			



Figur 1.11 Skjematisk snitt gjennom jernbanetrasé. Skinner og sviller ligger oppe på overbygningen som består av et 0,5 meter lag med pukk. Formasjonsplanet er fundament for overbygningen. Dreneringsgrøfter og stikkrenner er lagt i tilknytning til dette planet.

1.4 VIRKNINGER AV MENNESKELIGE INNGREP

Hypotesen i HYDRA er at menneskelige inngrep kan ha ført til endret flomrisiko. Dette kapitlet tar opp hvilke effekter arealbruken i skogbruket, jordbruket og i tettstedene har for forbruk, lagringsevne og oppholdstid av vann i nedbørfelt og vassdrag. Videre tar kapitlet opp virkninger av vassdragsinngrep, som reguleringstiltak og flomsikringstiltak. I del II beskrives en vassdragsmodell som ser hele Glommavassdraget i sammenheng. Her kommer en nærmere inn på den relative betydningen av disse arealbruksendringene og inngrepene i forhold til flom.

SKOGENS VIRKNING PÅ AVRENNING OG FLOM

Beskrivelsen nedenfor er dels av generell karakter og bygger dels på tallmateriale fra arealer i Glomma og Lågens nedbørfelt (Grønlund et al. 1999). Skogen bidrar til å redusere avrenningen først og fremst gjennom fordampning, dvs. gjennom transpirasjon (at plantene avgir vann) og intersepsjon (fordampning av nedbør som blir liggende på vegetasjonen). Etter snauhogst er det påvist økt årsavrenning (opptil 30 %) i forhold til felt som ikke hogges. Skogen reduserer også innstrålingen ned på marken, noe som fører til at snøsmeltingen om våren forsinkes. En slik forsinkelse vil i de fleste tilfeller virke dempende på flomtoppen. Det kan imidlertid oppstå situasjoner hvor sen snøsmelting fra skogsområder faller sammen med avrenningstopper fra snau fjellet og at flomtoppen dermed forsterkes. I tillegg til å redusere innstråling, kan også skogen redusere utstrålingen fra overflaten. Dette beskytter mot frost, og bidrar til at jorda fortsatt kan infiltrere vann. Skog på elveslettene vil også beskytte mot erosjon under flom.

Intersepsjon og transpirasjon vil variere med ulike faktorer som nedbørmengde og -intensitet, treslag, bonitet og hogstklasse samt middelhøyde, grunnflate og kronedekningsgrad for trærne. Dersom nedbøren er fordelt på mange episoder med liten intensitet, vil en stor del fordampe fra trekronene uten å nå bakken. Med de nedbørsforholdene en har på Østlandet, kan en regne med at ca. 30 % av årsnedbøren vil interseptes i en fulltett granskog. Effekten er størst når nedbøren har lav intensitet og er jevnt fordelt over tid. Det er sterke indikasjoner på at vinterintersepsjon reduserer snømagasinet i barskog (Lundberg & Halldin 1994).

Når det gjelder treslag, vil gran og furu gi større intersepsjon enn løvtrær og dessuten større skyggeeffekt under snøsmeltingen. Ved samme høyde og diameter har gran større nålemasse enn furu, og vil dermed være det treslaget som gir størst intersepsjon og skyggeeffekt. Bonitet er et uttrykk for skogens produksjonsevne, og transpirasjonen øker med økende bonitet. Det er f.eks. beregnet at lav skogbonitet gir en transpirasjon på ca.

110 mm per år, mens den ved høy bonitet er ca. 325 mm per år. Hogstklasse er et mål på skogens utviklings-trinn. Ved hogstklasse I, der arealet består av hogstflater med enkelttrær eller svært glissen skog, er det stort sett bare bunnvegetasjonen som bidrar med transpirasjon og intersepsjon. Hogstklasse II består av ungtrær opptil 20-55 år, avhengig av bonitet. Det er anslått at vannforbruket til denne hogstklassen er ca. 50 % av forbruket til klassene III-V, som man regner med har omtrent samme forbruk. Dersom hogstklasse V omfatter en del gammelskog, kan det imidlertid være noe mindre fordampning, både direkte og ved nedsatt intersepsjon, enn i hogstklasse IV. Middelerdien for høyde og grunnflate varierer med bonitet og hogstklasse og brukes for å beregne bladarealindeks og kronedekning, som er viktige faktorer for transpirasjon og intersepsjon.

Data fra Landsskogtakseringen viser at det er god korrelasjon mellom volum av stammetrevirke og de faktorer som påvirker skogens vannforbruk og evne til å redusere avrenning. Volum av trevirke kan derfor brukes som indikator på skogens forbruk av vann.

Endring i skogtilstand og effekt på avrenning. Ved slutten av 1800-tallet var skogen i dårlig tilstand på grunn av kjølig klima gjennom den lille istid, uttak av trevirke til gruver, kopperverk og jernverk, tømmereksport og stigende forbruk av tømmer til innenlandsk tremasse- og papirproduksjon. Skogkommisjoner kom i gang for å finne tiltak for å sikre et produktivt og utholdende skogbruk, og fra ca. 1900 startet en ny skogkultur, basert på skogplanting, bestandspleie og drenering av sumpmark.

Det har vært små endringer i skogarealet i Glommans nedbørfelt i løpet av dette århundret. Ifølge landbruksstatistikken har det vært en nedgang på ca. 6 % i Hedmark, hovedsakelig som følge av nydyrking, mens det i Oppland var samme skogareal i 1989 som i 1907. Når det gjelder skogvolumet, har det imidlertid skjedd store endringer. Det samlede skogvolum i Østfold, Akershus, Hedmark og Oppland har økt med 72 % fra 1920 til 1990. Denne utviklingen må først og fremst ses på som et resultat av skogkulturen, hvor blant annet planting og grøfting har vært viktige tiltak. I det senere kan også en økning i CO₂-innhold og løselige N-forbindelser i atmosfæren ha bidratt til denne utviklingen.

Økningen i skogvolumet må antas å ha ført til økt vannforbruk og redusert avrenning. Det meste av vannforbruket foregår i veksttiden, og det er derfor en mulighet for at mindre sommer- og høstflommer kan være redusert. Effekten på større vårflommer som skyldes kraftig regnvær i kombinasjon med sterk snøsmelting, er trolig liten. Andelen av snauflater og ungskog har økt i tida etter andre verdenskrig, og i en overgangsperiode kan dette også ha bidratt til å endre vannbalansen i retning av større avrenning.

Arealbruksendringer og reguleringer virker ulikt på vassdragsparametre som avrenning og flomfrekvens. Ved en statistisk analyse vil en større regulering nok så umiddelbart kunne vise seg som et sprang i for eksempel avrenning eller flomfrekvens. Flere reguleringer etter hverandre vil kunne vise seg som en trend i disse størrelsene. Arealbruksendringer i skogbruket kan i visse tilfelle vise seg som et sprang i avrenning, f.eks. hvis størsteparten av et nedbørfelt blir snauhogd eller nedbrent ved skogbrann i løpet av ett år. Da ville en vente en umiddelbar større avrenning. I større nedbørfelt er det utenkbart med slike sprangvise endringer, fordi omløpstida er svært lang (i størrelsesorden 80-100 år) og uttaket av tømmer per år lite (i størrelsesorden 1 % av skogarealet). Det nye skogbruket, som startet rundt 1900 med planting og andre skogkulturtiltak, ville kunne få virkninger på stigende tilvekst og skogvolum etter lang tid. Siden denne virkningen er påvist etter starten av landskogtakseringen rundt 1920, vil det eventuelt kunne ventes en svak langvarig tendens i retning av minkende maksimalavrenning. Overgangen til flatehogst fra 1950-tallet skulle i første omgang føre til mindre trehøyde etter nyplanting. Trolig blir den virkningen mer enn oppveid av de andre langsomme virkningene, som planting og skogkultur. Økende tilvekst som følge av grøfting vil også ha en betydelig ventetid før den slår ut i en eventuell demping av årsavrenning gjennom økt fordamping. I store nedbørfelt blir virkningen av de gradvise endringene i arealbruk små innenfor korte tidsperioder. Dersom både reguleringer og endringer i arealbruk virker i samme retning, blir det vanskelig å skille dem fra hverandre. Den store økningen i tilvekst og skogvolum gir også en gradvis virkning, som eventuelt kan måles som en trend i avrenning over lang tid.

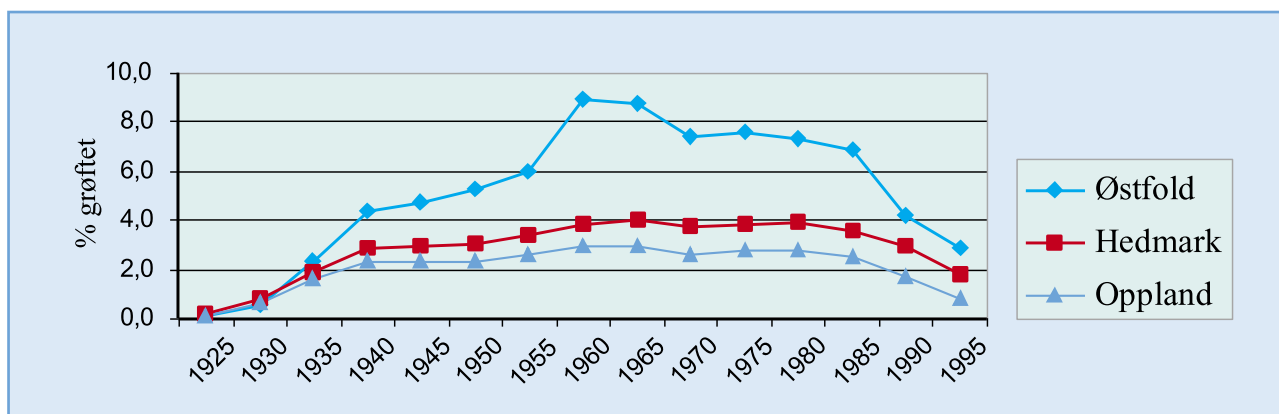
Innenfor HYDRA har man undersøkt arealbruksendringers innvirkning på avrenning, ved å simulere nedbørfeltets respons dersom ingen endringer hadde funnet sted siden utgangssituasjonen i 1920. Flisafeltet er brukt som forsøksområde. Simuleringsresultatene viser at forandringene i vegetasjonstilstand fra 1920 til 1990 ikke

har hatt nevneverdig innvirkning på avrenningsforholdene. For Flisafeltet har årlig avrenningsvolum i gjennomsnitt blitt redusert med ca. 0,5 %. Ser en på flomhendelsene i de enkelte år går det fram at vårflommene i gjennomsnitt har fått en økning på 0,1 %, mens høstflommene har blitt redusert med 1,1 % (Rinde 2000).

GRØFTING

Omfang. Grøfting i skog hadde sitt største omfang i 1930-årene og på 1950- og 1960-tallet. I Oppland, Hedmark og Østfold er det gitt tilskudd til grøfting av ca. 1300 km², noe som tilsvarer 8 % av skogarealet. Maksimal levetid for grøfter uten vedlikehold antas å være ca. 30 år. Figur 1.12 viser grøftet skogareal i prosent av totalt skogareal i de tre fylkene i perioden 1925-1995.

Virkning på vannbalanse og avrenning. Grøfting som skogtiltak har som formål å øke skogproduksjonen ved å lage en bedre rotsone der plantene får optimal tilgang til vann og luft. Etter grøfting fjernes det drenerbare vannet, dvs. det vannet som ved metning fyller opp de groveste porene. Endringene i grunnvannstanden er avhengig av jordas hydrauliske ledningsevne, grøfteavstand og -dybde. I de tetteste myrene, dvs. der torvjorda har høy omdanningsgrad, er det lite drenerbart porevolum. Vannet er sterkt bundet og plantenes vannforbruk er ikke på noen måte tilstrekkelig til å tømme rotsonen. Infiltrasjonsvolumet, dvs. summen av det drenerbare porevolumet og den delen av porene som er tømt av plantene, er forholdsvis lite, og det blir en liten endring i grunnvannstanden. I de myrene som har minst omsatt torv, er det et stort drenerbart porevolum. Infiltrasjonsvolumet er stort i slik jord, og det vil bli en rask senking av grunnvannsnivået etter grøfting. Grøfting vil generelt føre til større infiltrasjonsvolum for vann og dermed større flomdemping. Denne virkningen er sterkest om sommeren og tidlig på høsten. Den totale avrenningen kan på kort sikt øke som følge av redusert



Figur 1.12 Grøftet skogareal i prosent av totalt skogareal.

total fordamping, fordi markoverflaten blir tørrere. Når det utvikles en skogbestand vil imidlertid transpirasjonen og intersepsjonen øke, og på lengre sikt kan dette kompensere for en eventuelt redusert fordamping fra markoverflaten.

Virkningen av grøfting vil avhenge av bl.a. myrtype og torvas hydrauliske egenskaper (jf. effekt på grunnvannsstanden som beskrevet ovenfor). Nedbørsmyr (med lite omsatt torv) som får vann bare fra nedbør, har etter grøfting større infiltrasjonsvolum og kan ta inn en større nedbørmengde enn tilsigsmyr (med sterkt omsatt torv). Den flomdempende virkningen vil derfor være størst ved grøfting av nedbørsmyr. Grøfting av tilsigsmyr, som får vann både fra nedbør og tilsig, har mindre effekt på infiltrasjonsvolumet, men kan likevel gi en viss demping av avrenningstopper under små nedbørepisoder. På tilsigsmyr, som får mye avrenning fra overliggende areal, vil de åpne kanalene og grøftene kunne øke vanntransporten under flom. Grøfting av slik myr kan føre til en raskere drenering av hele myras nedbørfelt, som kan være betydelig større enn bare det grøftede arealet. Skogreising eller dyrking av sterkt omsatt torvjord er lite aktuelt, og derfor heller ikke grøfting. På slik jord dominerer overflateavrenning, og hvis slik jord blir dyrket, er profilering av overflaten mer effektivt enn lukkede grøfter for å få etablert en kulturvekt.

Virkningen av grøfting på avrenning vil også avhenge av den hydrologiske situasjonen. Ved små og moderate nedbørmengder på jord som ikke er vannmettet, vil som nevnt en større del av vannet kunne lagres og avrenningen forsinkes. Ved større nedbørmengde og vannmettet jord vil dreneringen imidlertid kunne føre til raskere avrenning og spissere flomtopp. Også under snøsmelting kan grøfting gi raskere avrenning av et areal, f.eks. når grøftene ikke er tettet av snø og is, de naturlige helningsgradientene er små og arealets utløp hadde en liten naturlig transportevne før dreneringen.

Generelt kan det hevdes at grøftingens flomdempende effekt er størst på sensommeren og tidlig på høsten, som følge av større ledig infiltrasjonsvolum.

SKOGSVEIER

Omfang. Før 1940 hadde skogsveier lite omfang. Veibyggingen økte sterkt på 50- og 60-tallet, men har senere stagnert eller gått noe tilbake. Siden 1940 har den samlede lengden av skogsveier økt omlag 15 ganger og var i 1995 ca. 17 000 km i Akershus, Østfold, Hedmark og Oppland (Tabell 1.5). I 1960 var ca. 0,5 % av skogarealet i disse fylkene påvirket av drenering av skogsveier, mens i 1995 var denne andelen økt til 2,5 %. Det forutsettes her at en skogsvei drenerer en sone med 30 m bredde.

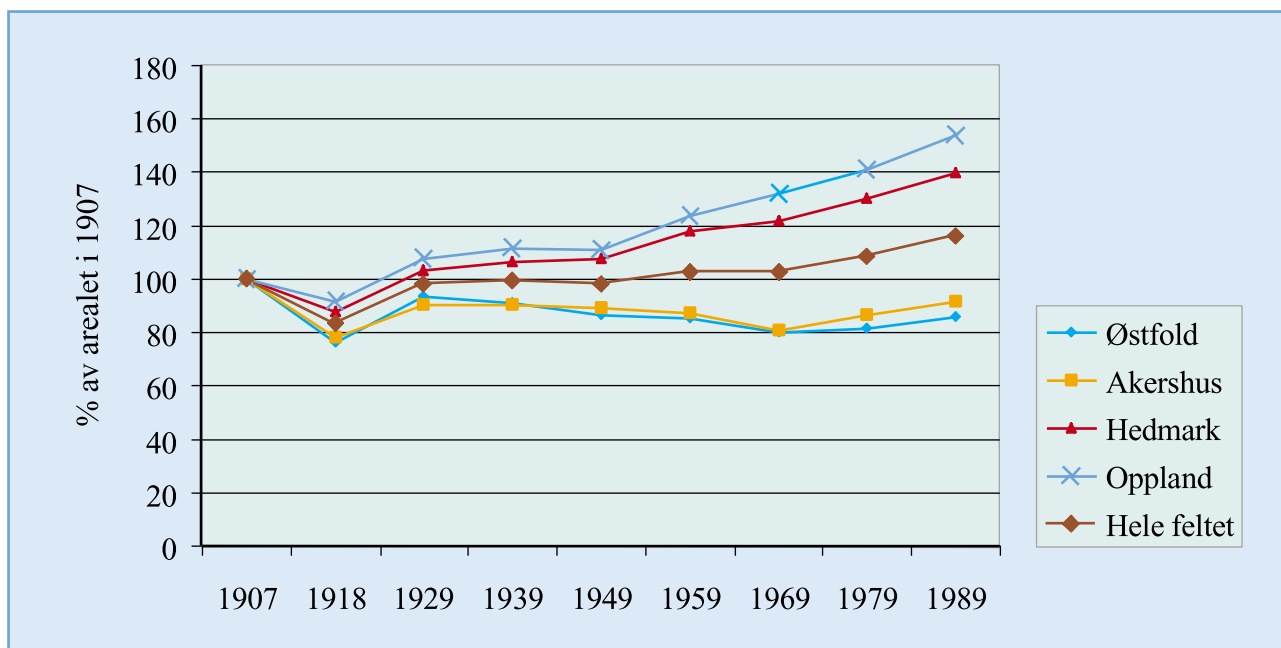
Virkning på avrenning og flom. Skogsveier vil ha en dreneringseffekt som kan sammenliknes med grøfting, men i motsetning til grøfting har ikke veiene noen positiv effekt på skogproduksjonen. Veigrøftene vil avskjære og samle vannstrømmene i jorda, spesielt i hellende terreng, og vil gi rask avrenning av overvann fra veibanen. Skogsveier vil derfor bidra til en raskere avrenning og til å øke risikoen for både sommer-, høst- og vårflokker.

Jones & Grant (1996) undersøkte avrenning fra 5 parvise nedbørfelt over en tidsserie på opptil 55 år i Oregon, USA. Nedbørfeltene varierte i størrelse fra 0,6-600 km², og var med og uten snauhogst og skogsbilveier. Snauhogsten kunne være opptil 100 % av feltet og veiene utgjøre opptil 6 %. Inngrepene har økt toppavrenningen med opptil 50 % i de minste og 100 % i de større nedbørfeltene i løpet av den siste 50-årsperioden. En vesentlig del av økningen tilskrives effekten av veiene, som gjør at vannet strømmer raskere gjennom feltet. Økt snøakkumulering og smelting og redusert fordamping som følge av snauhogsten, bidrar også. Fordi så liten andel av arealet i Glommas nedbørfelt er påvirket av skogsveier, er det imidlertid liten sannsynlighet for at skogsveier har ført til noen vesentlig økning i flomstørrelsene i hovedvassdraget. For lokale flommer og flomskader kan derimot skogsveiene ha betydning.

Tabell 1.5 Antall km skogsveier i Glommas nedbørfelt.

	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1995
Hele nedbørfeltet*)	197	1134	2378	4725	9818	13259	16147	17164
Østfold	0	25	59	132	219	322	372	389
Akershus	0	96	260	447	812	1126	1523	1676
Hedmark	136	661	1321	2988	5503	7059	8254	8679
Oppland	61	352	738	1158	3284	4752	5998	6420

*) unntatt Sør-Trøndelag



Figur 1.13 Utviklingen av jordbruksarealer i Glommas nedbørfelt i perioden 1907 til 1989.

JORDBRUK

Endring i jordbruksareal. Det totale arealet av dyrket mark i Glomma og Lågens nedbørfelt har økt med 16 % fra 1907 til 1989 (Figur 1.13). I Østfold og Akershus har det dyrkede arealet gått ned, trolig som følge av om-disponering til andre formål og at en del marginale og tungdrevne arealer er tatt ut av produksjon. I Hedmark og Oppland har det skjedd en betydelig økning i jordbruksarealet som følge av nydyrking. Økningen har vært størst i Solør, Østerdalen og Gudbrandsdalen, hvor jordbruksarealet nesten er fordoblet. Totalt er bare 6 % av Glomma og Lågens nedbørfelt dyrket, og i Hedmark og Oppland, hvor det har skjedd en betydelig nydyrking, er likevel bare 4-5 % dyrket.

Avrenning fra jordbruksarealer. Dyrket jord har generelt større overflateavrenning enn skog og tettere overflate enn tilsvarende udyrket jord. Dessuten har jordbruksvekster generelt lavere vannforbruk ved fordamping enn skog.

Betydelige deler av jordbruksarealet i Norge er drenert. Drenering senker grunnvannsnivået, slik at røttene kan trenge dypere ned og gjøre en mer stabil vannmengde tilgjengelig for plantene. Ved moderate nedbørmengder om sommeren vil grøfting resultere i økt plantevekst og gi økt fordamping fra plantene. I slike tilfelle vil både avrenningstopperne og totalavrenningen bli mindre. Om senhøsten og våren vil normalt det plantenyttbare vannlagret i jorda være oppfylt, og ekstra tillegg av infiltrert vann vil fylle de drenerbare (grove) porene og drenere ut via grøftene. Når alle porer er fylt, blir overflateavrenningen mindre fra grøftete arealer enn fra arealer uten

grøfting. Dette skyldes at grøftene normalt legges på tvers av fallet for at overflatevann raskt kan renne gjennom grøftefylla til rørene, slik at risikoen for overflateerosjon avtar.

Jordbruksareal gir vanligvis større avrenning enn skog på grunn av mindre transpirasjon og intersepsjon gjennom en kortere vekstsesong. Til tross for at jordbruksarealet har økt relativt sterkt i deler av Glommas nedbørfelt, utgjør det fortsatt en liten del av nedbørfeltets totalareal. Det er derfor lite sannsynlig at dyrking kan ha bidratt med noen vesentlig økning i flomstørrelsene i selve hovedvassdraget.

Bakkeplanering. Bakkeplanering gjennomføres for å få gunstigere terreng og arrondering til korndyrking. Forbedringen i arrondering vil imidlertid bidra til raskere avrenning på grunn av større sammenhengende flater, færre åkerreiner og andre hindringer som kan forsinke avrenningen. Dessuten vil planeringen vanligvis føre til dårligere jordstruktur, tettere jordoverflate og dermed mindre infiltrasjonsevne de første 20-30 årene etter planeringen. Bakkeplanering vil derfor kunne bidra til større risiko for lokale flommer. Større vårflokker i hovedvassdraget vil derimot neppe påvirkes, fordi avrenningen fra planerte arealer i lavlandet finner sted før snøsmelting i høyereliggende områder.

Innenfor Glomma og Lågens nedbørfelt finnes de største arealene med bakkeplanert jord i Østfold og i Akershus, der henholdsvis 12 og 31 % av jordbruksarealet er planert. Det meste av bakkeplaneringen fant sted på 1970- og 80-tallet.

TETTSTEDER

Avrenning fra tettsteder. Urbanisering har medført at stadig større arealer har fått tett dekke. Dette hindrer infiltrasjon av nedbøren og resulterer i større og raskere overflateavrenning. Som en tommelfingerregel kan en regne med at i områder med tett skog renner bare ca. 20 % av nedbøren av på overflaten, mens tilsvarende tall for sterkt urbaniserte områder kan være opptil 90 % (Endresen 1998) (Figur 1.14). I vassdragene blir effekten av økt overflateavrenning at flomtoppene kommer raskere, de blir høyere og spissere og gir oversvømmelser og erosjonsskader. En annen effekt er at den store og raske avrenningen gir utspyling av partikulært materiale, slik at forurensningstilførslene til bekker og elver øker. Dette kan gi skader på dyre- og plantelivet i vassdraget, gjennom mekanisk slitasje, nedslamming, overskridelser av toleransegrenser for kjemiske komponenter og endringer av leveområder.

Den økte overflateavrenningen ved urbanisering reduserer vanntilførselen til grunnvannet, slik at grunnvannstanden kan synke. Tørrværsvannføringen i vassdragene blir dermed lavere og mindre stabil. Effektene av dette kan være betydelige, f.eks. kan resipientkapasiteten reduseres slik at vannkvaliteten i varme perioder om sommeren kan bli problematisk for enkelte dyrearter (Endresen 1997).

Avrenningsmodeller for 25 tettsteder i Glomma-vassdragets nedbørfelt, viser at den gjennomsnittlige økningen i avrenningsvolum på grunn av økt andel tette flater tilknyttet avløpsnett og med lokal infiltrasjon i tettstedene, var på 22 % sammenliknet med situasjonen før utbygging. Forskjellene i prosentvis økning i avrenningsvolum var store mellom de ulike tettstedene. I tettsteder som Brumunddal, Koppang, Minnesund og Raufoss var forskjellene neglisjerbare, mens de ble

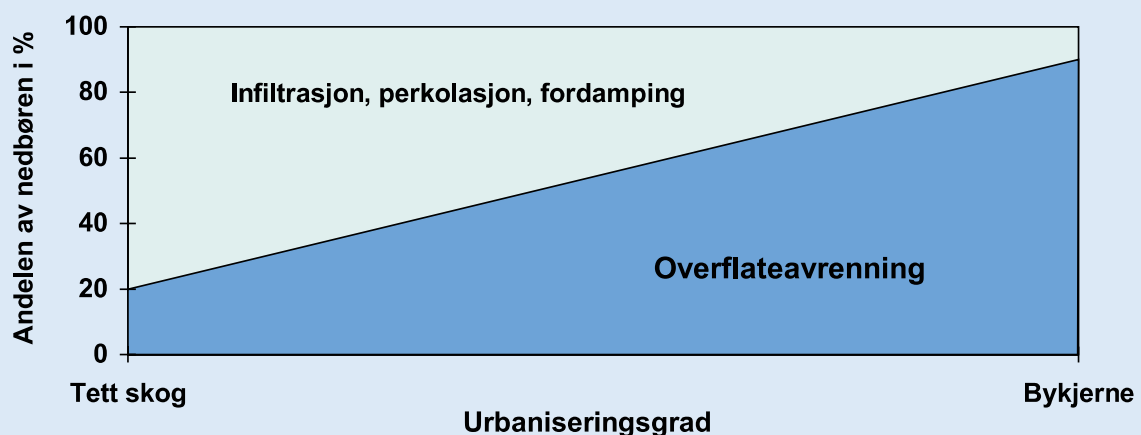
beregnet til å være på 79 % i Sarpsborg, 64 % på Otta, 58 % på Hamar og 47 % på Tretten for modellperioden 1.1.94 til 31.8.95 (Figur 1.15).

Modellberegningene viser også at avrenningen er endret i retning av mer fluktuerende og raskere respons enn før utbygging. Dette har stor betydning for flomhyppigheten. Ved liten urbaniseringsgrad kommer de største avrenningstoppene i våte sesonger når marka er mettet og hele feltet kan delta direkte i avrenningen, mens ved økt andel tette flater øker flomhyppigheten vesentlig også ved nedbør i tørre sesonger (Lindholm et al. 1999).

De lokale effektene av økt avrenning fra tettsteder på lokale flomforhold kan være betydelige. For Glomma-vassdraget sett under ett er imidlertid betydningen av endret avrenning fra tettsteder begrenset, i og med at tettstedene bare utgjør 0,5 % av det totale arealet på nedbørfeltet.

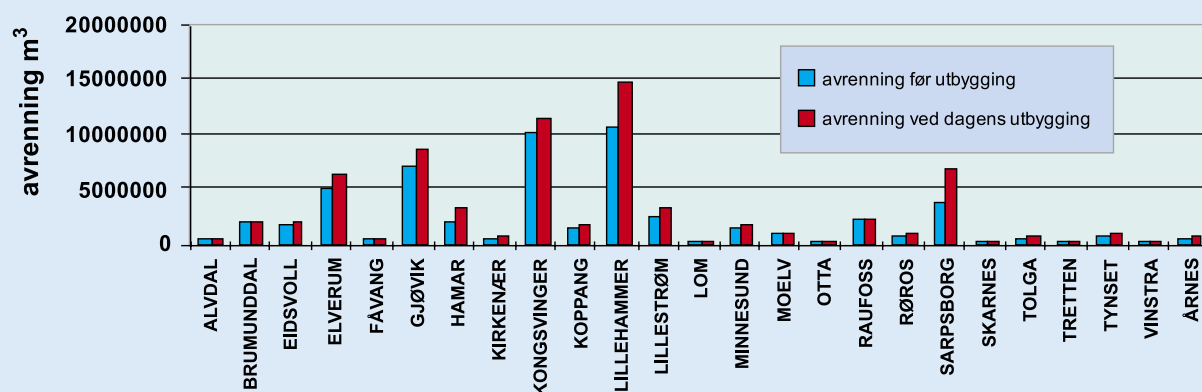
Metode

Modelleringen av overflateavrenningen fra 25 tettsteder i Glommavassdraget er foretatt med basis i en modell av vannbalansen på Gardermoen flyplass. Det er samlet data om arealbruk, hydrologiske forhold og jordpermeabilitet i alle tettstedene samt nedbør og temperatur fra nærliggende meteorologiske stasjoner. I modelleringene sammenliknes dagens situasjon mht. tette flater med en jomfruelig situasjon med naturlige arealer. Modelleringene er gjort med døgnoopløsning for perioden 1.1.94 til 31.8.95, og med kortere tidsoppløsning for perioden 1.5.95-30.6.95 for et mindre utvalg av tettstedene.



Figur 1.14 Forholdet mellom urbanisering og overflateavrenning.

AVRENNING FØR OG ETTER UTBYGGING perioden 1.1.94 - 31.8.95



Figur 1.15 Simulert avrenning fra 25 tettsteder i Glomma og Lågens nedbørfelt ved dagens utbygging og før utbyggingen skjedde i tettstedene

Forurensning fra tettsteder. De viktigste forurensningskildene fra tettsteder under flommer kan summeres opp i følgende punkter:

- utslipp av urensset kloakk fra havarerte pumpestasjoner, rensesanlegg og overløp
- erosjon og utvasking av fyllinger, deponier og sedimentasjonsdammer
- oppflyting og brekkasje på olje, parafin og kjemikalietanker
- tap av kjemikalier fra lagre og oppstillingsplasser

Alle disse kildene er punktkilder, og typiske effekter er vannforsyningsproblemer, infeksjonssykdommer og helsefare i forbindelse med opprydding. Av punktkildene regnes kjemikalieutslipp (særlig utslipp av pesticider) fra tanker, deponier eller transportere som de farligste. Sannsynligheten for at slike utslipp skal skje i en flomsituasjon er imidlertid så liten at totalrisikoen må betraktes som moderat (Sælthun & Lindholm 1999).

Utvasking av næringsstoffer og miljøgifter fra mer diffuse kilder øker også kraftig under flom. Stor fortykning fører imidlertid til at forurensningskonsentrasjonene fra disse kildene sjelden når dramatiske nivåer under flommer (Faafeng et al. 1999). Faren for høye forurensningskonsentrasjoner er størst i små vassdrag. Norske vannverk er ofte basert på inntak av overflatevann fra slike små vassdrag, men det norske bosetningsmønsteret gjør at det sjelden er farlige punktkilder oppstrøms disse inntakene (Sælthun & Lindholm 1999).

REGULERINGSTILTAK

I alle uregulerte sjøer stiger og synker vannstanden i takt med variasjonene i tilsiget, mer eller mindre forsinket og dempet i forhold til tilsigsvariasjonene. Dette kalles selvregulering. For å kunne beregne den reelle effekten av menneskelige reguleringstiltak under flom, f.eks. reguleringsmagasiner til vannkraftformål, er det derfor nødvendig å kunne tallfeste den naturlige selvreguleringen i innsjøene. Store sjøer med trange avløpsprofil har størst selvregulering. Volumet av og varigheten på flommen er også av stor betydning for flomstigningen både i innsjøer og i elvene nedenfor. Vannstanden i elvene stiger gjerne mer enn i sjøene, og i tillegg kan vannstands nivået før en flom være av stor betydning for kulminasjonsvannstanden under selve flommen.

Reguleringsmagasinene i Glomma og Lågen har en kapasitet på totalt ca. 3600 mill. m³ (Tabell 1.6). Dette utgjør ca. 16 % av årstilsiget i nedbørfeltet og er lavere enn i andre regulerte vassdrag på Øst- og Sørlandet, der magasinprosentene er på 30–55. I disse vassdragene forekommer det nesten ikke flomskader under vårflommer.

Manøvrering av reguleringsmagasinene. Prinsippene for reguleringen av de ulike magasinene i Glomma og Lågen varierer en del. Magasin som Aursunden, Savalen, Storsjøen, Osen, Bygdin og Olstappen tillates svært sjelden å gå over høyeste regulerte vannstand (HRV). Andre magasin som Mjøsa og Øyeren har normalt en

årssyklus med en flomperiode over HRV, mens Fundin, Breidalsvatn og Raudalsvatn er bygd med faste overløp, og ligger vanligvis en lengre periode hvert år over HRV. I Vinsteren og Kaldfjorden forutsettes det at vannstanden overstiger HRV under stor flom.

Aursunden, Storsjøen og Breidalsvatn fylles normalt med vårtilsiget og tappes samtidig med fylling (forhåndstapping), fordi dette gir best utnyttelse i kraftverkene nedenfor og kan gi "ekstra" magasin til flomdemping. Aursunden og Storsjøen har fyllingsrestriksjoner i sommerperioden og tillates ikke fylt til HRV før etter hhv. 15. og 1. september. Savalen og Osen skal fylles raskest mulig til hhv. 75 og 80 % fylling før det tillates tapping fra magasinene. Dette reduserer mulighetene for flomdemping. Magasin som Storsjøen og Mjøsa som har relativt store nedbørfelt ovenfor og god tappekapasitet, kan alltid brukes effektivt til flomdemping.

I år med spesielt stort vårtilsig vil nesten alle magasinene i Glomma fylles innen 1. juli. Forhåndstappingen blir da av stor betydning for flomdempingen, men flomforløpet og hvor godt en lykkes med å tilpasse tappingen til flomtoppen i tid vil være avgjørende.

Flomdemping ved flommen i 1995. En analyse på data fra flommen i 1995 i Glommavassdraget viser at reguleringene hadde en klar flomdempende effekt. Analysen tar hensyn til vassdragets naturlige flomdempende effekt (naturlig selvregulering). I Aursunden, Storsjøen, Osen, Bygdin, Mjøsa og Øyeren er den naturlige selvreguleringen beregnet på døgnbasis utfra kjente magasin- og avløpskurver fra før regulering. For de øvrige reguleringene i Glomma og Lågen er den naturlige selvreguleringen beregnet på grunnlag av estimert naturlig magasinering/uttapping, blant annet ut fra vannstandsobservasjoner fra tiden før regulering.

Flomdempingen som ble oppnådd gjennom reguleringene i Glommavassdraget ved flommen i 1995, var størst i Glomma både målt i m³/s, i prosent og som vannstandsreduksjon (Tabell 1.7).

Den høyeste flomdempingen ble oppnådd ved Elverum, Nor/Norsfoss og i Øyeren med en vannføringsreduksjon på 7-800 m³/s, en flomdemping på 19-20 % og en vannstandsreduksjon på ca. 1,0 meter ved Elverum og ved Nor/Norsfoss. I Øyeren ble vannstandsreduksjonen beregnet til 2,3 meter. I Lågen ved Otta og Losna varierte flomdempingen fra 325 til 125 m³/s (12-15 % flomdemping). Dette tilsvarer ca. 0,4 m reduksjon i flomvannstanden (Tingvold 1999). Flomdempingen i Mjøsa som følge av reguleringene ovenfor var på 0,45-0,5 m. Denne effekten reduseres imidlertid til ca. 0,4 m når det tas hensyn til at avløpet fra Mjøsa periodevis var redusert under flommen i 1995.

Flomdempingen på 800 m³/s ved Elverum under flommen i 1995 skyldtes i stor grad reguleringene av

Tabell 1.6 Magasinivolum i ulike delnedbørfelt av Glomma og Lågen.

Delnedbørfelt	Areal på nedbørfeltet (km ²)	Magasinivolum i delnedbørfeltet (mill. m ³)
Aursunden	830	215
Einunna	280	85
Savalen	400	61
Storsjøen	2300	175
Osen	1190	265
Breidalen	135	70
Raudalen	160	166
Aursjø	110	60
Veo/Tesse	380	130
Lalm uregulert	3200	0
Bygdin	310	336
Vinsteren	160	102
Heimdalen	130	15
Kaldfjorden/Øyangen	145	84
Olstappen	635	31
Losna	5630	8 ¹⁾
Mesna	270	100
Hurdalen	585	137 ²⁾
Mjøsa	5450	1403 ³⁾
Øyeren	17720	166 ⁴⁾
Totalt	40020	3611

¹⁾ 4 magasin i Mokså

²⁾ inkludert 5-6 magasin ovenfor Hurdalssjøen, til sammen 15 mill. m³

³⁾ inkludert magasiner i Gausa, Hunnselva og Næra, til sammen 91 mill. m³

⁴⁾ inkludert Myklebysjøen og Børte vann, til sammen 9 mill. m³

Osen (reguleringshøyde 6,6 m og magasin på 265 mill. m³) og av Storsjøen (reguleringshøyde 3,64 m og magasin på 175 mill. m³) (Figur 1.16). Begge disse sjøene ble forhåndstappet, og flomdempingen på kulminasjonstidspunktet 2. juni kl. 20.00 er beregnet til henholdsvis 250 m³/s (Osen) og 225 m³/s (Storsjøen) (Tingvold 1999).

Etter flommene i 1966 og 1967 ble avløpskapasiteten i Øyeren økt gjennom utsprenninger ved Mørkfoss. Effekten av dette tiltaket under 1995-flommen var en flomdemping på 2,2 m i Øyeren. Samtidig ga reguleringene i Glomma og Lågen til sammen en flomdemping på ca. 1,9 m, mens forhåndstapping av Øyeren og den nevnte avløpsreduksjonen fra Mjøsa til sammen ga en flomdemping på 0,4 m. Den totale flomdempingen ble dermed på 4,5 m. Uten noen av disse tiltakene ville

Tabell 1.7 Flomdempende effekt av reguleringene i Glomma og Lågen ved flommen i 1995.

Sted	Flomdemping (m ³ /s)	Flomdemping (%)	Vannstands-reduksjon (m)
Lågen:			
Lalm i Otta	125	15	ca. 0,40
Losna i Lågen	325	12	ca. 0,40
Mjøsa	-	-	ca. 0,40
Glomma:			
Alvdal	325	18	ca. 1,00
Stor-Elvdal	325	14	ca. 0,70
Elverum	800	19	ca. 0,90
Nor/Norsfoss	775	20	ca. 1,00
Øyeren	700	20	ca. 2,30

vannføringen ved Solbergfoss kulminert ca. 700 m³/s høyere enn den observerte kulminasjonen på 1995-flommen.

Miljøeffekter av reguleringstiltak. I HYDRA-programmet er det gjennomført en litteraturstudie av miljøeffekter av flomforebyggende tiltak, der reguleringstiltak er en av tiltakstypene som behandles (Østdahl et al. 1998). I Norge er vassdragsreguleringer vesentlig gjennomført for vannkraftproduksjon, men reguleringsmagasinene som er bygget innebærer samtidig en mulighet for bruk til flomdemping. Det er spesielt for vårflokker at reguleringsmagasinene kan virke flomdempende, fordi de er tappet ned i løpet av vinteren. Vassdragsreguleringene gir miljøeffekter både i selve magasinområdet og i vassdraget nedstrøms magasinet.

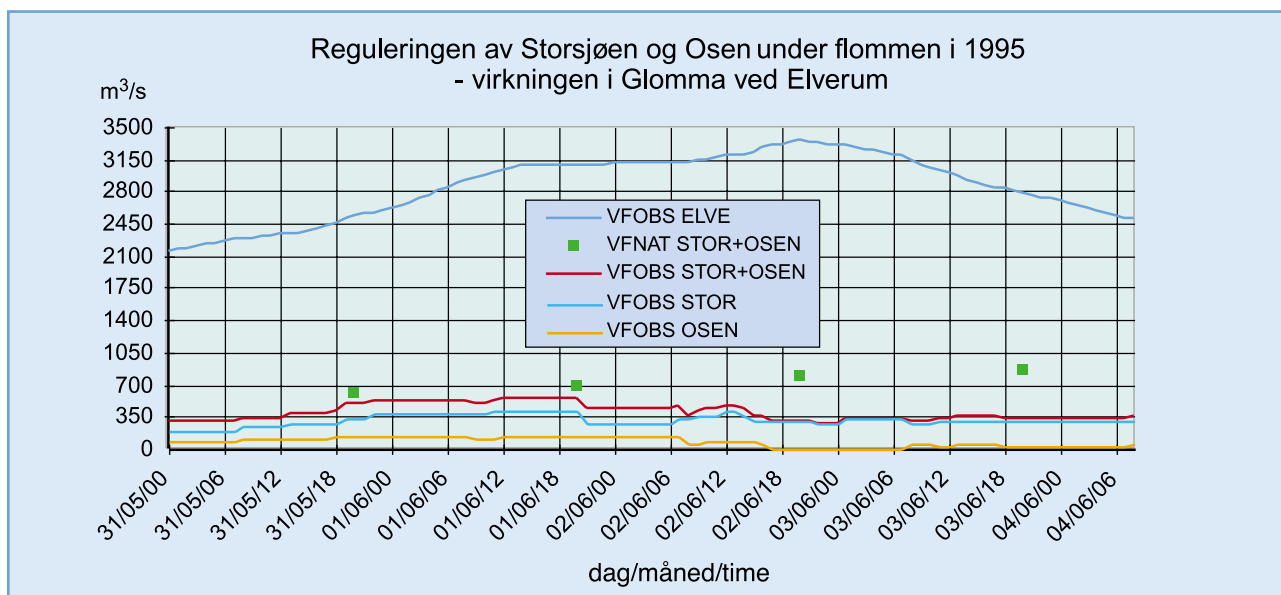
I reguleringsmagasinet vil effektene bestå i økt erosjon i innløpsbekker og elver pga. endret erosjonsbasis, økt bølgeerosjon og økt grunnvannserosjon, fordi likevekten mellom porevannstrykket og vanntrykket fra magasinet endres. Den sterkeste erosjonen i reguleringsmagasiner skjer når vannstanden tappes ned under den opprinnelige vannstanden.

De minste erosjonspartiklene vil ofte holde seg suspendert i vannmassene lenge nok til at de transporteres ut av reguleringsmagasinet, mens de større og tyngre partiklene sedimenteres i magasinet. Ved store reguleringshøyder (over 5 meter) vil vannvegetasjonen få problemer fordi det fysiske stresset med uttørring, frysing, isskuring, bølgeslag og erosjon blir for stort.

Effektene på dyreplankton og bunndyr i reguleringsmagasiner vil avhenge av hvor mye strandsonene utarmes. I magasiner med store grunne områder (store

strandsoner) vil de negative effektene på bunnfaunaen bety relativt mer for den biologiske produksjonen enn i et brådypt magasin med liten strandsoner. Dyreplanktonet som lever i de frie vannmassene i et reguleringsmagasin vil være den dyregruppen som i minst grad blir direkte berørt av reguleringen, men det kan skje endringer i dominansforhold mellom arter. På grunn av negative effekter på bunndyrfaunaen i store reguleringsmagasiner, vil effektene være store også på fisk. Spesielt gjelder dette ørretpopulasjoner i langgrunne magasiner på fjellet. Så lenge ørret er eneste fiskeart i et magasin, kan den kompensere manglende bunndyrdiett med å spise en større andel store dyreplankton. Forekommer ørret sammen med planktonspisere som røye og sik, vil den tape kampen om denne føderessursen, men kan beite på røye og sik dersom den vokser seg stor nok til å bli fiskespiser. I lavlandsmagasiner med liten reguleringshøyde vil sik eller andre planktonspisere kunne opprettholde stor fiskeavkastning etter regulering (Erlandsen et al. 1997).

I elva umiddelbart nedstrøms et reguleringsmagasin vil vann som slippes over dammen ha stor nok energi til å flytte sedimenter, samtidig som vannet har lite sedimenter å flytte på. Dette resulterer i økt erosjon, senking av elvebunnen og en trend mot grovere bunnsubstrat de første årene etter at reguleringsdammen er etablert (jf. f.eks. Kondolf 1997). Sidevassdrag nedstrøms et reguleringsmagasin vil ha samme materialtransport som før, mens hovedelva har redusert vannføring og ikke lengre den samme kapasiteten til materialtransport. Endringen i vannføringsmønster nedstrøms et reguleringsmagasin påvirker også vanntemperaturen. Ved magasinering av vann blir temperaturen i elvevannet lavere om vinteren og høyere om sommeren enn det som er naturlig i vassdraget. Ved tapping av vann blir effekten den motsatte,



Figur 1.16 Reguleringen av Storsjøen og Osen – virkningen i Glomma ved Elverum ved flommen i 1995.

Tegnforklaring:

VFOBS ELVE: Observert vannføring ved Elverum
 VFNAT STOR + OSEN: Uregulert vannføring fra Storsjøen + Osen
 VFOBS STOR + OSEN: Observert vannføring fra Storsjøen + Osen
 VFOBS STOR: Observert vannføring fra Storsjøen
 VFOBS OSEN: Observert vannføring fra Osen



Figur 1.17 Glomma ved Elverum 3. juni 1995. (Foto: FOTONOR AS)

spesielt når vannet tappes fra dypere lag i magasinet. Hastigheten temperaturendringen skjer med nedstrøms et reguleringsmagasin, vil være lavere enn naturlig ved tapping og raskere enn naturlig ved magasinering. Både endringene i vannstand og vanntemperatur nedstrøms magasinet vil påvirke bunndyrfaunaen. Bunndyrene er tilpasset bestemte temperaturforløp for å kunne gjennomføre sin livssyklus, og enkelte arter vil rammes hardere enn andre av slike temperaturendringer. Elvestrekninger som får redusert sommervannføring vil få høyere sommertemperatur på vannet. Innenfor visse grenser vil dette føre til økt tetthet av bunndyr, mens sammensetningen av bunndyr kan bli betydelig endret. En utjevning av vannføringen over året med mer stabile fysiske forhold ved regulering, kan virke positivt inn på fiskens næringsgrunnlag og gi økt fiskeproduksjon, forutsatt at tilgjengelig vanddekket areal er stort nok til at ungfisken kan vokse opp og at den større fisken kan gyte. Selv om vannføringen over året utjevnes, vil driftsmønsteret kunne gi ustabile forhold for fisken, f.eks. ved effektkjøringer som gir raske endringer i vannføringen nedstrøms reguleringsmagasinet og raske tørlegginger av oppvekstområder for ungfish.

I tillegg til de nevnte miljøeffektene vil vassdragsreguleringer bidra til å dempe effekten av flommer som naturlige, dynamiske prosesser i vassdragene. Flommer er viktige både når det gjelder å forme elveløp og for å øke kompleksiteten i leveområdene for planter og dyr i og langs vassdragene.

FLOMSIKRINGSTILTAK

Flomsikringstiltak omfatter både tiltak som påvirker selve flomforløpet (f.eks. flomverk og senkingstiltak), og tiltak som er rettet mot å hindre erosjon under flom og som har liten eller ingen direkte betydning for flomforløpet (f.eks. forbygninger, plastringer, bunnterskler og

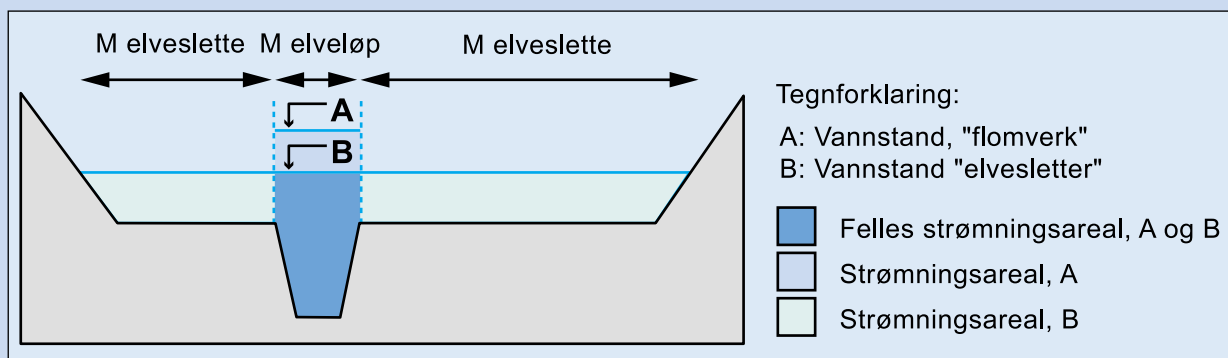
strømstyrere). I HYDRA-programmet er det kun flomverk og senkingstiltak (i tillegg til reguleringer) som er vurdert når det gjelder effekt på flomforløpet (Berg et al. 1999), mens det er gjennomført en egen litteraturstudie på miljøeffektene av et bredt spekter av ulike typer flomsikringstiltak (Østdahl et al. 1998). Hensikten med flomverk og senkingstiltak er å redusere flomskadene lokalt, men det er kjent fra flere andre land at slike tiltak kan endre flomforholdene både oppstrøms og nedstrøms området hvor tiltakene gjennomføres. Oppstrøms flomverk kan flomvannstandene bli høyere fordi elveløpet er blitt snevret inn, mens vannstandsstigningen kan skje raskere og flomtappen nå et høyere nivå nedstrøms flomverket, fordi den naturlige magasineringen på elvesletter eller i sjøer blir redusert. Ved senking av innsjøer kan en liknende effekt oppstå ved at det naturlige magasinet i innsjøene blir redusert. I tillegg til disse endringene kan flomverk og senkinger gjøre at vannstanden synker raskere enn tidligere etter at flomtappen er nådd.

Flomverk. I Glommavassdraget er effekten av flomverk analysert i Alvdal og på en strekning mellom Elverum og Kongsvinger (Haddeland & Høydahl 1999) (Figur 1.18). Resultatene viser at flomverkene som beskytter elveslettene i undersøkelsesområdet fører til oppstuvning av vannstanden lokalt. Den største forskjellen oppstår i områdene oppstrøms Kirkenær, der situasjonen med flomverk gir opp til 0,5 m høyere vannstand enn uten flomverk.

Nedstrøms Kirkenær reduseres vannstandsforskjellene raskt. Forskjellene i vannføring med og uten flomverk er også forholdsvis små (høyeste beregnede forskjell i vannføring er 57 m³/s ved flomkulminasjon) under flomforhold som i 1995. Dette tilsvarer ca. 1,5 % høyere kulminasjonsverdi. Den mest betydelige forskjellen som framkommer i analysen er på tidspunktet kulminasjonsvannføringen inntreffer. Flomtappen ble framskyndet

Metode

Effektene av flomverkene er analysert ved hjelp av den hydrauliske modellen MIKE 11, kalibrert på data fra flommen i 1995. Analysen sammenlikner situasjon der flomverk holder vannet borte fra elvesletten (A) med situasjon uten flomverk (B) når det gjelder vannføring, vannstand og kulminasjonstidspunkt for flomtappen. Analysene er gjort med 3 forskjellige forutsetninger om ruhet på elvesletta (Manningtall 25, 12,5 og 0,25).



Tabell 1.8 Simulert kulminasjonsvannføring (m³/s) og klokkeslett for kulminasjon.

	Kirkenær		Norsfoss		Kongsvinger	
	Maksimal vannføring (m ³ /s)	Tidspunkt for kulminasjon	Maksimal vannføring (m ³ /s)	Tidspunkt for kulminasjon	Maksimal vannføring (m ³ /s)	Tidspunkt for kulminasjon
Med flomverk	3 200	20.45*	3 173	22.45*	3 195	03.30
Med elvesletter (M=0,25)	3 143	08.00	3 124	10.15	3 161	22.15
Med elvesletter (M=12,5)	3 152	06.30	3 132	08.45	3 169	21.15
Med elvesletter (M=25)	3 152	06.00	3 132	08.30	3 170	21.00

* Dato 2. juni, mens de øvrige klokkeslett er 3. juni.

med ca. 10-12 timer i Kirkenærområdet og med ca. 18-20 timer ved Kongsvinger som følge av flomverkene (Tabell 1.8). En raskere forplantning av flommen innebærer større utfordringer både for flomvarslingen og beredskapsapparatet, ved at tidspunktet fra utløsning av værforhold inntreffer til flommen når skadeutsatte områder blir kortere.

Samme type analyse er gjennomført for et område mellom Folla og Steimosletta i Alvdal, hvor det foreligger planer om å bygge flomverk både mot Folla og mot Glomma. Resultatene fra analysen av data fra 1995-flommen i dette området, viser svært liten effekt på vannstanden og en økning av vannføringen ut av området som tilsvarer 1,5 % økning i kulminasjonsvannføringen i situasjonen med flomverk.

Den samlede konklusjonen på analysene fra Glomma av flomverkene effekt på flomforløpet under 1995-flommen, er at flomforløpet er relativt uavhengig av om det finnes flomverk eller ikke. I situasjonen uten flomverk og hvor elveslettene kan oversvømmes, forsinkes imidlertid flomtappen noe, og dempes litt.

Senkingstiltak. Effekten av senkingstiltak på flomforhold er undersøkt i bl.a. Vangsvatn og Myrkedalsvatn i Vossovassdraget (Berg et al. 1999). Senkingen av Vangsvatn er gjennomført for å redusere vannstanden under flom, mens senkingen av Myrkedalsvatn primært er for å bedre utnyttelsen av jordbruksarealer ved lavvann.

Beregninger av effektene av senkingstiltakene i Vosso ble gjort for hhv. en raskt stigende og kortvarig flom, og en mer langsomt stigende og langvarig flom. Begge disse forløpene ble skalert slik at de representerer flommer med gjentaksintervall på 2-3 (middelflom), 10 og 100 år. Vannstanden under flom ble redusert med 1,3-1,6 m etter senking i begge innsjøene. Dette er en stor gevinst, spesielt for områdene rundt Vangsvatn ved Voss sentrum. I Vangsvatnet er lavvannstand ikke endret og flomtappen framskyndes med opptil 5 timer ved raskt stigende og kortvarig flommer. Kulminasjons-

verdien øker også med ca. 10-12 % ved middelflom. Effekten avtar med økende gjentaksintervall og blir helt borte ved 100 års-flommer. Nedstrøms Vangsvatnet kan fremskyndingen av flomtappen ha medført økt flomfare pga. større sammenfall med flom fra Teigdalselva. I Myrkedalsvatn ble både lavvannstand og flomvannstand senket like mye og det blir praktisk talt ingen forskyvning i kulminasjonstidspunktet. Kulminasjonsverdien økte med opptil 3 % etter senking med avtakende endring ved økende gjentaksintervall på flommen (Tabell 1.9).

Miljøeffekter av flomsikringstiltak. Flomverk og senkingstiltak kan ha betydelige negative miljøeffekter, fordi disse typene tiltak påvirker dynamikken mellom elveløp og elveslette, suksesjonsforløp, habitatdiversitet, migrasjonsmuligheter og andre prosesser i elvesystemet, og resulterer i redusert biologisk diversitet (Ward 1998). Mange våtmarksområder har gått tapt som følge av flomsikringstiltak. I tillegg kombineres tiltakene ofte med en kanalisering eller utretting av elveløpet som påvirker fallforholdene og dermed også erosjonen på tiltaksstrekningen og på elvestrekninger oppstrøms og nedstrøms. Økt erosjon gir økt partikkelinnhold i vannmassene og resulterer i mer ensartet habitat der erosjonsmaterialet sedimenteres. Dette gir i neste omgang negative effekter både på bunndyrfaunaen og på fiskefaunaen (Brookes 1989). Kanaliseringer er i internasjonal målestokk en type flomsikringstiltak som er gjennomført i stort omfang, og som har resultert i store negative miljøeffekter i mange vassdrag.

Andre flomsikringstiltak som primært skal hindre erosjon, f.eks. forbygninger, plastring, bunnplastring, terskler og lave demninger, kan ha positive miljøeffekter både gjennom å hindre at uønsket erosjonsmateriale transporteres nedstrøms og ved at stabilisering av elvekantene er gunstig for etablering av vegetasjon. I tillegg vil grove strukturer (stein eller tremateriale) som brukes i erosjonssikringen i elvekanter og på elvebunnen, gi større variasjon i substratet og dermed flere skjulesteder og oppvekstområder for fisk og bunndyr (Brookes 1994).



*Figur 1.18 Glomma ved Arneberg bru i Åsnes kommune, fotografert 3. juni 1995. Flomverk på begge sider av elva – flomverket til venstre hindrer oversvømmelse av elvesletta, mens brudd har oppstått i flomverket til høyre.
(Foto: Hallvard Berg)*

1.5 KLIMAUTVIKLING OG FLOMRISIKO

KLIMAUTVIKLING

Perioden fram til kvartærtida. Gjennom de siste 550 millioner år har det vært en gradvis økning i solas innstråling på 6 prosent og endringer i andre astronomiske forhold (Berger & Loutre, 1998).

Store svingninger i klimaet på Jorda har vært vurdert i sammenheng med storskala variasjoner i innholdet av karbondioksid i atmosfæren (Berner 1998). For 550 millioner år siden var trolig CO₂-innholdet i atmosfæren minst 15 ganger større og den globale temperaturen

sannsynligvis mer enn 10 °C høyere enn i dag. Da landplantene utviklet seg for 350–300 millioner år siden, ble det et sterkt fall i atmosfærisk CO₂ og samtidig en sterk forvitring av bergartsmateriale. Innholdet av CO₂ i atmosfæren falt til verdier på linje med dagens nivå for ca. 300 millioner år siden. Deretter var det en viss nivåheving. Fra starten av kvartærtida, da istidene begynte, ble det en ny nedgang.

Kvartærtida som omfatter de siste 2–3 millioner år, er en periode med istider. I de siste 600 000 år av kvartærtida har det, ifølge Berger & Loutre (1998), vært sykliske klimaendringer (Milankovich-cykler) på 100 000 år (jordbanens ovalform), 41 000 år (jordaksens helning) og

Tabell 1.9 Sammenlikning av avløp før og etter senking i Myrkdalsvatn (M) og Vangsvatn (V) i Vossovassdraget for to typer konstruerte flomforløp med gjentakintervall på 2-3 år, 10 år og 100 år.

Flomtype og gjentakintervall	Største tidsforskyvning (timer)		Tidsforskyvning av kulminasjon (timer)		Forskjell i kulminasjonsverdi % (m ³ /s)		Forskjell i kulminasjonsvannstand før og etter senking (meter)	
	M	V	M	V	M	V	M	V
Rask og kortvarig flom								
2-3 år	+0-1	+10	0	+5	+3 (+4)	+12 (+35)	-1,48	-1,42
10 år	+0-1	+5	0	+3	+2 (+3)	+5 (+20)	-1,53	-1,51
100 år	+0-1	+2	0	-2	+1 (+2)	-2 (-9)	-1,55	-1,46
Mindre rask og mer langvarig flom								
2-3 år	+3	+10	0	0	+1 (+1)	+9 (+29)	-1,54	-1,47
10 år	+1	+5	0	+1	0 (1)	+3 (+14)	-1,56	-1,48
100 år	+0-1	+3	0	0	0 (0)	-3 (-17)	-1,57	-1,31

Forskjeller i kulminasjonsvannstand < 0 indikerer at avløpet kulminerer på lavere vannstand etter senking.

Tallene i kolonnene for forskjeller i kulminasjonsverdi angir prosentvis forskjell og forskjell målt som m³/s (parenteser).

22 000 år (jordas solavstand ved solvern). Periodene på 100 000 år representerer bølgelengden for istidsperioder. I de isfrie periodene har CO₂-innholdet i atmosfæren vært høyere enn under istidene. Forfatterne peker på at under siste is-maksimum for ca. 20 000 år siden var globaltemperaturen rundt 5 °C lavere enn i dag.

Postglasial tid til ca. 1800 år e.Kr. Slutten av siste istid starter med temperatursvingninger i takt med tilbaketrekking og framrykking av isen. Deretter følger en lang varmeperiode fra ca. 9000 BP til 4500 BP. Innenfor denne perioden var Det klimatiske optimum, med et isfritt Sør-Norge, rundt 2 °C varmere enn i dag og en skoggrense minst 200 m høyere enn i dag (Nesje & Kvamme 1991, Larsen 1998).

Pfister et al. (1998) har studert variasjonene i vintertemperatur for desember, januar og februar i Vest-Europa gjennom perioden 750-1300 e.Kr., med tilnærmingsvariable (erstatningsvariable) som årringer og skriftlig dokumentasjon av såtid, høstetid, avling, lengde av periode med snødekke etc. for tida før meteorologiske observasjoner. Studieområdet var Vest-Europa, inkludert Alpene. Harde vintrer var noe mindre vanlige og mindre ekstreme i den middelalderske varmeperioden (900-1300) enn i det 9. århundre og i tida 1300-1900. Fra 1180 til 1300 var vintertemperaturen på nivå med det 20. århundre. I 30-årsperioden 1300-1329, overgangen til den lille istid, var vintertemperaturen gått ned med 1 °C. En viktig konklusjon er at for 1961-90 er nivået for vintertemperatur i dette området innenfor den naturlige variasjonen i de siste 1000 år, men normalen 1961-90 ligger nær øvre grense.

Jones et al. (1998) brukte 17 ulike tilnærmingsvariable for temperatur der det ikke foreligger måleserier, for å utvikle årstemperaturer for nordlige og sørlige halvkule. I den nåværende 1000-års perioden for nordlige halvkule er det kaldeste året 1601, den kaldeste 10-års perioden 1691-1700 og det kaldeste århundret det 17. århundre. For den nordlige halvkule er det klar påvisning av kaldere århundrer mellom 1500 og 1900, særlig det 17. og 19. århundre. Dette antyder at Den lille istid (1300-1900, jf. Kap. 1.1) hadde to minimumsfaser. Det 20. århundre er det varmeste innen det siste årtusen.

Rundgren & Beerling (1999) målte radioaktiv alder og spalteåpningsindeks for blad av en seljeart, *Salix herbacea* L., i sediment fra ca. 1000 moh. i Nord-Sverige, for å rekonstruere utviklingen av CO₂ i atmosfæren gjennom de siste 9000 år. Deres resultater viste at CO₂-innholdet i atmosfæren ikke har vært stasjonært etter istida, men lavt i perioden 9000-5000 BP (varmeperioden) og stigende fra 5000 BP til år 950 e.Kr., nedgang i Den lille istid, og en klar økning fra 1850 til i dag.

Karlen & Kuylenstierna (1996) hevder at den faktoren som har påviselige storskala- og langvarige temperaturvirkninger etter istida, er variasjoner i solaktiviteten. For de siste århundrene har Friis Christensen (1998) studert virkningen av endringer i solaktivitet (solflekke og periode for solflekke) og kosmisk stråling og påvist at det er korrelasjon mellom skydekke og kosmisk strålingsflux. Han mener at usikkerheten i tallfesting av skydekke gir stor usikkerhet i klimamodellene. Men hovedstrømmen av klimaforskere legger fortsatt størst vekt på virk-

ningen av økt innhold i drivhusgasser, spesielt CO₂, på grunn av menneskelige påvirkninger som brenning av fossile brensler og avskoging.

Vulkanisme – avkjøling av kort varighet. Kortvarig avkjøling viser sammenheng med vulkanutbrudd. Nyere forskning på årringer og askelag i isbreer har f.eks. vist stor sammenheng mellom forutgående vulkanutbrudd og neste års værforhold (Briffa et al. 1998). I året 1600 var det et kjempeutbrudd i Huaynaputina i Peru. Året etter var det en meget kald sommer i Amerika og Vest-Europa. Både i 1601 og 1602 er det rapportert om rødlig dis og disig sol over store deler av kloden. Et annet stort utbrudd var Tambora i Indonesia i 1815, som ble fulgt av de svært kjølige årene 1816-1818. Et større utbrudd fant også sted i 1809, bl.a. sporbart ved askelag i isbreer. Tiåret 1810-1820 er regnet som en av de kaldeste perioder i nyere tid. På Island var det et enormt utbrudd i Lakagigar i 1783. Det førte til kjølig sommer og dis over store deler av Europa.

Korttidsvariasjon: de siste 100-200 år, global oppvarming som følge av menneskelig påvirkning?

Dagens syn på klimautvikling, slik det presenteres av det internasjonale klimapanelet (The Intergovernmental Panel on Climate Change- IPCC), er at vi befinner oss i en periode med global oppvarming, som i første rekke skyldes økning i drivhusgassene karbondioksid (CO₂), metan (CH₄) og dinitrogenoksid, lystgass (N₂O) (IPCC 1996). Houghton (1998) summerte de tekniske og vitenskapelige resultatene fra IPCC, og hevdet at siden førindustriell tid, ca. 1750, er veksten i klimagasser 30 % for CO₂, 145 % for CH₄ og 15 % for N₂O. Klorfluorkarboner (CFC og HCFC) gir også en viss temperaturøkning. Aerosoler fra forbrenningsprosesser, for eksempel sulfater og støv, fører til et fradrag i temperaturøkningen. Alt i alt antas det at den globale overflate-temperaturen har steget 0,6 °C siden midten av 1800-tallet. Natt-temperaturen har generelt økt mer enn dag-temperaturen.

Grønås (1999) viser til at været i nordlige områder er påvirket av den nord-atlantiske oscillasjon (NAO), som er et mål for forskjellen i lufttrykk mellom Azorene og Island. Den sørlige oscillasjon, forkortet til ENSO (El Nino Southern Oscillation), er et viktig fenomen sør for ekvator. Jacob Bjerknes oppdaget både ENSO og NAO. NAO-indeksen er en normalisert midlere differens for fire vintermåneder (desember-mars) mellom høytrykket ved Azorene og lavtrykket ved Island. I år med høy indeks er vestavindsbeltet mot Nord-Europa sterkere enn i år med lav indeks. Været i Norge er ved høy indeks varmere og fuktigere om vinteren. Det er også påvist at i år med milde og våte vintrer i Nord-Europa opptrer samtidig kalde vintrer vest for Grønland. Fra århundreskiftet til 1930 var NAO-indeksen høyere enn normalt, fra 1940-70 var den lavere, og de siste 20 årene har den vært langt høyere enn normalt.

WMO (1999) peker på at slutten av det 20. århundre er omkring 0,6 grader varmere enn slutten av det 19. århundre. De nevner mange orkaner og flommer de siste årene. De peker på svært høye middeltemperaturer, bl.a. på grunn av høye minimumstemperaturer i Australia, Irland og Qatar, og høye temperaturer generelt i USA, Kypros, Canada, Japan og New Zealand. Årsmiddeltemperaturer som var rundt gjennomsnittet for hundre-året, forekom bare i få land, bl.a. Tyskland, Island og Norge.

På Vestlandet er det siden 1970 målt en økning i årsnedbør (Førland 1993), som også kan merkes i årsavrenning (Hisdal et al. 1995). En lignende trend er funnet i Danmark. Det årlige maksimum i dagnedbør har ikke økt på samme måte i det senere. Det er heller slik at det er flere daglige nedbørtilfeller. Dette kan trolig forklare mangelen på trender i flomserier, selv der det er en økning i årlig middelaavrenning. Temperaturseriene er karakterisert av en klar topp i 1930-årene og en ny sterk stigning fra andre halvdel av 1980-tallet til i dag.

TRENDER I LANGE FLOMSERIER I NORGE

Ved å bestemme høyeste årlige vannføring for hvert år i lange tidsserier, framkommer serier som beskriver flommene ved utvalgte stasjoner. Det er utført analyse av mulige trender og sprang i vel 50 flomserier fra vassdrag i hele Norge (Roald 1999). Analysen er utført for to perioder, 1920-1990 og 1970-1990. En generell konklusjon er at det ikke er påvist trender i naturlige (uregulerte) vassdrag. Noen få måleserier hadde signifikante synkende trender, mens et antall serier hadde antydning til trender som ikke var signifikante. De fleste signifikante trender kan forklares som en følge av reguleringer i samband med vannkraftutbygging. Magasinene forebygger flommer dersom de blir manøvrert slik at det er betydelig oppfyllingsvolum ved starten av flomepisoder. En signifikant avtakende trend for vannføring ble funnet for noen vassdrag med stort bidrag til avrenning fra bresmelting.

I noen tidsserier er det påvist tydelige sprang i avrenning. De fleste sprang finnes i regulerte vassdrag og ofte rundt tida for gjennomføring av reguleringen. Andre sprang forekommer ved skifte fra en periode med mange flommer til en periode med færre, altså ved endring i flomfrekvens. I en eller to måleserier er endringen blitt forklart som avslutning av tømmerfløtningen. Ved fløtning var det ekstra utslipp av vann fra små magasinene for å få nok vann til å transportere tømmer ut til hovedvassdraget. Det er videre påvist endringer i kulminasjonstidspunktet for flommene. I Glomma var det en rekke høstflommer i de milde 1930-årene og i 1940- og 1950-årene, da det generelt var kalde vintrer med lite snø. Regulert og uregulert (naturalisert) årlig middelflom er studert ved en rekke stasjoner i hovedgrenen av Glomma. Reguleringene reduserte middelaavviket for den

årlige daglige avrenningen ved middelflom med 95 % av gjennomsnittet oppstrøms det nederste magasinet og 61 % nedstrøms det nederste magasinet. Tidspunktet for flomtoppen i regulert tilstand var 3-4 dager senere oppstrøms og 17 dager senere nedstrøms det nederste magasinet i forhold til uregulert.

I en påfølgende undersøkelse er det etablert en sammenhengende vannføringsserie for Sarpsfossen for perioden 1846-1998. Denne bygger på direkte vannstandsmålinger i perioden 1851-1905 med tilhørende vannføringskurve ved Sarpsfossen, observert vannføring ved Langnes og Solbergfoss, og vannstandsobservasjoner i perioden 1846 til inn i 1860-årene ved flere punkter i Glomma. Årsverdiene viser en svak økning, men trenden er ikke signifikant. Økningen ser likevel ut til å følge økning i årlig nedbør målt i perioden 1870-1994 ved Røros. Det er et markant sprang i dataserien i perioden mellom 1920-40, som ser ut til å være styrt av temperaturutviklingen.

Det er påvist en betydelig overrepresentasjon av store flommer tidlig i 1850-årene og fra 1857 til henimot 1870. Likeså er det flere store flommer fra slutten av 1880-årene og i 1890-årene. Disse flommene er vårflommer med et betydelig bidrag av snøsmelting. Perioden rundt 1860 var en langvarig kjølig periode med stort overskudd av snø. Likeså var det store snøsmelteflommer i 1910 og 1916. Som følge av reguleringene, blir det en betydelig reduksjon i flomstørrelsen rundt 1905-1910, med indikasjoner på ytterligere reduksjon utover på 1900-tallet. Samtidig er det mulig at utviklingen av skogkultur og økende tilvekst over lang tid kan ha bidratt noe til dette (jf. Kap. 1.4). I 1930-årene var det en rekke lokale sommer- og høstflommer på Østlandet i forbindelse med en meget varm periode. I denne perioden var bare vårflommen i 1934 forårsaket av betydelig bidrag fra snøsmelting. Regnflommene var vesentlig mindre enn de store snøsmelteflommene ved Sarpsfossen, men kunne gjøre betydelig skade i avgrensede områder. Spesielt var regnflommen i 1938 stor i Otta. Store regnflommer har inntruffet lokalt i 1987 og 1988.

Fra 1900 har lavvannsføringene gått opp fra ca. 130 m³/s mot større verdier, med et ytterligere sprang rundt 1920 opp til 400 m³/s. Dette skyldes trolig i hovedsak reguleringene, men kan også skyldes endringer i nedbørforholdene.

De store flommene i Glomma er preget av store avrenningsvolumer, som krever samtidighet i de forholdene som fører til flom. For å få de store flomvolumene er det en nødvendig forutsetning at det er et betydelig bidrag fra snøsmelting. Dette forklarer noe av overrepresentasjonen av store flommer i forrige århundre, da temperaturen var lavere og muligheten for akkumulering av store snømengder var større. Dominerende årsak til reduksjonen i toppverdiene er likevel reguleringene.

I varme perioder øker sannsynligheten for store konvek-tive nedbørsituasjoner. Dette var typisk for de milde 1930-årene, da det inntraff en rekke sommer- og høstflommer med lite bidrag fra snøsmelting. Dersom temperaturene skulle bli vesentlig høyere, som under sommeren 1997, øker sjansen for lokalt meget høye nedbørintensiteter. Dette vil gi lokalt store flommer, men virkningen vil være begrenset i de nedre delene av vassdrag av Glommas størrelse.

SCENARIER/PROGNOSER FOR KLIMAUTVIKLING OG NATURLIG VARIASJON I KLIMAET

IPCCs prognoser for global temperaturstigning som følge av økende mengde av drivhusgasser, først og fremst CO₂, ligger mellom 1 °C og 3,5 °C for hundreåret fram til 2100. Den laveste verdien svarer til en CO₂-konsentrasjon på 450 ppmv^{*)} og lav klimatisk følsomhet, den høyeste verdien til 1000 ppmv^{*)} for CO₂ og høy klimatisk følsomhet (Houghton 1998).

IPCC har konsentrert sine scenarier om drivhusgassenes isolerende virkning på langbølget utstråling fra jorda. De har ikke interessert seg like mye for periodiske variasjoner i klimaet, som istider og varme- og kuldeperioder mellom og under istider.

Hovedstrømmen av klimaforskere mener at den globale temperaturøkningen siden 1850-årene skyldes økningen i drivhusgasser i atmosfæren. Rummikainen (1999) gir en oppsummering av denne forskningen. Vi tar med noen av hans konklusjoner:

- Den globale oppvarmingen gjennom de siste 140 år har vært 0,6 °C, og de siste 30-50 år har vært varmere enn noen annen periode siden 1500-tallet.
- Den globale middeltemperaturen vil sannsynligvis stige med 2,0-2,5 °C i løpet av neste hundreår. Hvis en tar hensyn til usikkerhet kan en regne en temperaturstigning på 1,0-4,5 °C.
- De mulige årsakene til klimaets variasjon gjennom de siste 10 000-12 000 år omfatter variasjoner i solaktivitet, vulkanisme og indre variasjon og samspill i klimasystemet, som gjelder atmosfære, isdekke, hav- og landdekning. Over lange tidsskalaer kan endringer i jordbanen ha utløst mer ekstrem klimavariasjon. Banevirkningene ville da motta tilbakespill innenfra systemet. Dette er fortsatt former for naturlig klimapåvirkning.
- I det siste har virkningene av aerosoler blitt inkludert i klimamodellene. Dette har ført til en redusert stignings-hastighet for oppvarming, og den er observert. Men oppvarmingen blir ikke snudd eller kompensert.
- Det er mulig at de siste 30-50 år har vært de varmeste på global basis i løpet av de siste 500 000 år.

^{*)} milliondeler i volum.

Det siste utsagnet kan diskuteres. For Norge kan det vises til at under varmeperioden for 4500-9000 år siden, var det en tid da hele Sør-Norge var isfritt (Nesje & Kvamme 1991, Larsen 1998). Men Norge er ikke hele verden.

Prognoser for klimavirkninger på flom. Endringer i nedbør påvirker størrelse og tidspunkt for avrenning og frekvens og intensitet av flom og tørke. Endringer i temperatur fører med seg endringer i evapotranspirasjon, jordfuktighet (markvann) og infiltrasjon. De resulterende forandringene påvirker den aktuelle fordampingen og skydannelsen, og gir endringer i netto innstråling og nedbør (IPCC 1996).

Virkningene av klimaendring på hydrologiske regimer blir vanligvis estimert ved å kombinere hydrologiske modeller for nedbørfelt med klimaendringsscenarier avledet fra generelle sirkulasjonsmodeller (GCM). I tillegg til usikkerhet som er knyttet til GCM-simuleringer, er det problemer med å uttrykke scenarier i en skala som er tilpasset hydrologisk modellering, og problemer med å gjøre om klimatiske verdier til hydrologiske responser. I Impact-studien har studiegruppen gitt noen generelle konklusjoner om følsomhet for endringer. Graden av tiltro til disse konklusjonene er samtidig oppgitt som høy, middels eller lav.

Det er høy grad av tiltro til utsagn om at økningen i lufttemperatur fører til økt fordamping, at dess tørrere klimaet er, dess større følsomhet har hydrologiske regimer for klimaendringer, og at hvis snødelen av nedbøren avtar i innlands- og fjellområder, vil det bli et bredt skifte fra vår- til vinteravrenning.

Det er middels tiltro til konklusjoner som uttrykker følgende:

- at variasjonen i avrenning vil øke ved klimaendring
- at frekvensen av både høy og lav avrenning vil øke
- at mer intens nedbør vil gi en trend i retning av økt forekomst av flommer

For virkninger på økosystemer har Impact-gruppen høy grad av tiltro til at endringer i tilsig og avrenning vil endre tilsiget av næringsstoffer, som igjen vil endre siktedybde og produktivitet i vassdraget, at alvorlige flommer kan gi størst skade i tørre områder med ikke-lineære forhold mellom nedbør og avrenning, og at klimaendringer som gir økt variabilitet, ventes å få større økologiske virkninger enn endringer i nivå. Det er middels tiltro til at økninger i landbasert produktivitet vil øke produktiviteten i vassdrag og til at klimainduserte endringer i temperatur, is og snødekke vil være mer intens ved høyere breddegrader.

Heimann (1996) nevner at veksten i CO₂ har avtatt i 1990-årene i sammenlikning med 1980-årene. På den nordlige halvkule er det tilsynelatende et betydelig sluk

for den ekstra økningen en har i CO₂ fra forbrenning av fossile brenslers. Dette sluket kan skrive seg fra økende tilvekst i skogene og en generell gjødslingseffekt på andre landplanter gjennom for eksempel større avlinger i jordbruket. I det minste kan disse momentene bety en betydelig forsinkelse i CO₂-mengden i atmosfæren, siden skogene i alle fall har lang omløpstid.

Vischer & Bader (1999) har satt opp prognoser for kraftproduksjon som bygger på de beregnede endringer i avrenning i Sveits. De har gått ut fra to scenarier, et "realistisk" scenario og ett "overdrevet" scenario, det siste basert på det realistiske for sommer, men med +3 °C og +20 % nedbør om vinteren. I Tabell 1.10 er vist utgangsbetingelsene for det "realistiske" scenario.

Tabell 1.10 Utgangsbetingelser for det realistiske scenario.

Endring	Sommer	Vinter
Temperatur	+2 °C	+2 °C
Nedbør	+/- 0	+10 %

Ved de to scenariene gir modellberegninger for år 2050 som resultat for den "realistiske" varianten, at avrenningen om vinteren vil øke med 13 % i forhold til dagens normalavrenning. Sommeravrenningen vil avta med 11 %. Ved den "overdrevne" varianten, som forutsatte +3 °C og +20 % nedbør for vinteren, er endringen for vinteravrenning +26 % og for sommeravrenning -14 %. Snøreservene vil være redusert. Årsavrenningen er i begge tilfelle redusert med 5 %.

Prognoser for klimavirkninger på flom i Norge.

Sælthun et al. (1990) tok utgangspunkt i forutsetninger om temperatur- og nedbørøkninger etter Eliassen & Grammeltvedt (1990) (Tabell 1.11).

"Det mest sannsynlige scenario" forutsetter en økning i vintertemperatur på hhv. 3,0 °C for kyst og 3,5 °C for innland, samt 1,5 °C og 2,0 °C for sommer. For nedbør blir det regnet med 15 og 10 % økning for hhv. vår og sommer for kyst og 10 % for både vår og sommer i innlandet. For høst og vinter regnes med 5 % både for kyst og innland.

Sælthun et al. (1990) simulerte en rekke forhold, bl.a. tilsig, flommer og flomskader for 7 nedbørfelt (vassdrag) i ulike deler av Norge. Vårflommene ble redusert, mens høst- og vinterflommene økte. I de befolkningsrike områdene ga simuleringene flomøkninger på 5 til 30 %.

En økning i flomstørrelse på 15 % gir omtrent en fordobling av sannsynligheten for overskridelse av en viss flomstørrelse, og dermed flomskader. Forfatterne nevner at de økte flomstørrelsene etter scenario 1 ("det mest

Tabell 1.11 Forutsetninger for beregning av prognoser for klimavirkninger i Norge etter Eliassen og Grammeltvedt (1990).

Temperaturendring (°C)	Kyst	Innland
Vinter	+3,0	+3,5
Sommer	+1,5	+2,0
Nedbør (%)		
Vår	+15	+10
Sommer	+10	+10
Høst	+5	+5
Vinter	+5	+5

sannsynlige”) vil føre til økte flomskader i størrelsesorden 100 millioner kr (1990-kroner) per år, uten bedre flomsikringstiltak.

Sælthun et al. (1998) har foretatt simuleringer av effekten av mulige menneskeskapte klimaendringer på flommer for 25 nedbørfelt i Norden, av disse 10 i Norge. Simuleringene er basert på klimascenarier utarbeidet av en nordisk ekspertgruppe (Jóhannesson et al. 1995). Disse scenariene er basert på sammenstilling av forskjellige kilder, GCM-simuleringer, statistiske metoder m.m., og er ”Business As Usual”-scenarier for de nærmeste hundre år. De gir en typisk oppvarming på 0,3 °C pr. tiår for kystområdene i Sør-Norge (0,35 °C for vinteren og 0,25 °C for sommeren), økende til 0,45 °C per tiår (0,6 °C om vinteren og 0,3 °C om sommeren) i sentrale innlandsstrøk. Nedbøren antas å øke med 2 % per tiår for de kystnære områdene og 1,5 % for innlandet, mer i vinterhalvåret enn om sommeren.

De hydrologiske simuleringene er utført med en spesialtilpasset versjon av HBV-modellen, og er foretatt med døgnoopløsning over en 30-års periode. De er foretatt for dagens klima (1960-90), og for 30 og 100 år framskriving etter scenariene gitt over – med endring av både temperatur og nedbør, og med endring bare av temperatur. Scenariet med endring av både nedbør og temperatur gir som generelt resultat at for elver hvor vårflommen i dag er dominerende, blir flomrisikoen redusert, mens hvor høst- og vinterflommene dominerer, øker flomrisikoen. Det samme gjelder breelver. De simulerte seriene er analysert for flommer opp til 1000 års gjentakintervall. For Norge varierer endringene av 1000-års flommen fra -16 % (Alta) til +31 % (Ågårdselv i Fosen) for +30 års-scenariet, men de store usikkerhetene som ligger både i forutsetninger og metode tilsier at man ikke skal legge for stor vekt på enkeltresultater. Det viktigste resultatet av denne og tilsvarende studier er at usikkerheten i flomanalysene øker sterkt ved mulighetene for klimaendringer. Siden tradisjonelle flomanalyser bygger på historiske data med et tyngdepunkt typisk 20 til 30 år tilbake i tiden, er en betydelig del av denne usikkerheten allerede realisert – vi vet ikke hvor gyldige de historiske analysene er for dagens klima.

Som en oppsummering kan det sies at den nåværende stigende trenden i temperatur, spesielt i vintertemperatur, kan bidra til en omfordeling av flommer fra vår til høst og vinter. Det ser foreløpig ikke ut til at Norge vil få noen stor endring, i forhold til den globale trenden. Muligheten til å dempe høst- og vinterflommer ved hjelp av både reguleringer og nye manøvreringsbestemmelser, som tar hensyn til å holde et visst fribord på dammer fra høsten av, kan bli viktig. I bredistriktene og generelt mot kysten kan avrenningen øke så sterkt at hensynet til damsikkerhet kommer inn.

2. Datagrunnlag, databaser og vassdragsmodell

2.1 NATURGRUNNLAG I GLOMMAS NEDBØRFELT

I dette avsnittet er det lagt vekt på å beskrive naturgrunnlaget i Glommas nedbørfelt, etter utstrekning og høydesoner, klima, berggrunn, jordarter, vegetasjon og arealbrukstilstand.

Nedbørfeltet, størrelse og høydesoner. Glomma er med sine 617 km den lengste elva i Norge. Den starter på Rørosvidda og har utløp ved Fredrikstad. Flateinnholdet av nedbørfeltet er 41 922 km². Det er ca. 13 % av Norges totalareal. Lågen starter fra Lesjaskogsvann, som har avløp mot vest i Rauma og mot øst i Lågen. Otta starter noen få kilometer fra den innerste bukta i Geirangerfjorden. Gjennom Bøvra tar den opp betydelige avløp fra høyfjellsområdene i Jotunheimen. Sjøa og Vinstra har også avløp fra fjellområdene. Ved utløpet av Lågen i Mjøsa er nedbørfeltet på 12 370 km². Mjøsa er på 360 km². Ved samløpet mellom Vorma og Glomma i Nes har de to grenene av vassdraget omtrent like store nedbørfelt, hhv. 17 509 km² og 20 433 km². Vassdraget med Øyeren drenerer flatlandsområdene på Østlandets sydøstre del på veien videre til utløpet i Fredrikstad. Det midlere årlige avløpet fra Glomma er ca. 700 m³/s. Den første betydelige reguleringen kom med Mjøsa I i 1907. Reguleringsgraden i vassdraget var i 1999 ca. 16 %. Høydeforholdene innen nedbørfeltet er vist i Tabell 2.1.

En sammenlikning av høydesoner i Hedmark og Oppland fylker, gir en god indikasjon på forskjellene mellom det østlige delnedbørfeltet (Glomma) og det vestlige delnedbørfeltet (Lågen) av Glommavassdraget (Tabell 2.2).

Til sammen utgjør de to høydesonene under 600 m 45 % av totalarealet i Hedmark, mens det tilsvarende tallet for Oppland bare er 20 %. På samme måte dekker det produktive skogarealet 46 % av totalarealet i Hedmark, men bare 24 % av totalarealet i Oppland.

Klima. Klimaet i Glommavassdragets nedbørfelt er sterkt preget av breddegrad og høyde over havet (Tabell 2.3). Nedbøren varierer fra 300–400 mm på årsbasis i dalbunnen av de øvre bygdene i Gudbrandsdalen, til over 1000 mm i de høyere områdene. Målinger av nedbør fra fjellstasjoner har stor usikkerhet. Som eksempel på størrelsen av nedbør i fjellet kan det tas med tall fra NVE for topper på 2100 mm i Sjøliområdet, hvor nedbøren ble målt til 2500 mm på årsbasis. Ved utløpet av Sjølielva i Otta ved Bismo, er nedbøren til sammenlikning ca. 300 mm (Lars Roald, pers. medd.).

Vekstsesongen starter etter 15. juni i høyfjellet og avsluttes før 1. september og er dermed vel 2 måneder. Ved Glommas utløp varer vekstsesongen rundt et halvt år. Klima og klimavariasjonene over tid er behandlet mer inngående i Kap. 1.5 om klimautvikling og flomrisiko.

Normalt vil de store høydeforskjellene innen nedbørfeltet og mellom Glommas og Lågens nedbørfelt, føre til at vårfloppen i vassdraget blir langvarig dersom det er en typisk smelteflom. De laveste områdene, fra samløpet Vorma-Glomma til utløpet, vil ha unnagjort det meste av snøsmeltingen før den setter inn i de øvre delene av Østerdalen. Østerdalen og Solør vil på sin side være ferdig med det meste av smeltefloppen før smeltingen kulminerer i høyfjellet i Lågens nedbørfelt. Blir det utsatt smelting på grunn av kjølig vær og nattefrost, kan snøsmeltingen komme mer brått over en større del

Tabell 2.1 Prosentvis arealfordeling etter høydesoner i Glommavassdragets nedbørfelt.

0–300 m	300–600 m	600–900 m	900–1200 m	1200–1500 m	>1500 m
18	22	24	21	10	5

Tabell 2.2 Prosentvis arealfordeling etter høydesoner i Hedmark og Oppland.

Fylke	<300 m	300–600 m	600–900 m	>900 m
Hedmark	16	29	34	21
Oppland	4	16	23	57

Tabell 2.3 Temperatur- og nedbørnormaler fra stasjoner i Glommavassdragets nedbørfelt, 1961-1990.

Stasjon	Høyde moh.	Temperatur °C	Nedbør mm
Sognefjell	1413	-3,1	860
Røros	628	0,3	504
Flisa	184	3,3	617
Lesjaskog	621	0,9	499
Vågåmo	371	2,4	380
Kise på H.	128	3,6	585
Hvam-Tolvshus	159	4,0	665
Eidsberg-Johnsrud	135	5,3	880
Sarpsborg	54	5,8	880

av nedbørfeltet, som følge av en rask temperaturstigning og eventuelt samtidig regn over store områder. Transport av fuktig varmluft kan ellers forsterke snøsmeltingen på grunn av kondensasjon av vanndamp i snøen.

Berggrunn. Berggrunnen i nedbørfeltet er preget av Trondheimsfeltet i nord, sør for denne den såkalte sparagmittformasjonen, og deretter grunnfjellet. Kvitvoladekket i Trysil-Engerdal er mektige lagpakker fra kambro-silur skjøvet ut over grunnfjellet. Tidligere var de regnet som rent grunnfjell, men nå mener en de er oppblandet grunnfjell etter store bevegelser i jord-skorpen. Prekambriske bergarter som er skjøvet over grunnfjell, også kalt Jotundekkene, fins i store deler av Jotunheimen. I Lesja og Skjåk er det gneis og andre om-dannede bergarter. I Sel og i Folldal og Røros-området fins det ellers kis, og i Lesja jernmalm, som tidligere var utnyttet til jernverk. Innslag av Oslofeltet finner vi ved Mjøsa og lenger sørover. Her er det en del kalkrike bergarter. Øst og sørøst for Oslofeltet dominerer grunnfjellet.

Jordarter. Jordarter i nedbørfeltet varierer fra et stort område med bart fjell og tynt eller oppdelt løsmasse-dekke i høyfjellet i Jotunheimen, Dovrefjell og Rondane til leirjordsområdet i sør. I mellom- og sørområdet i Hedmark og Oppland er det et stort moreneområde av varierende tykkelse. I de øvre dalområdene er det mange breelv- og bresjøavsetninger. Nedre Glomsjø tømte seg for 9200 år siden og dannet Jutulhogget mellom Glåmdalen og Rendalen. Det ble en kjempeflom med vannføring på omtrent det tredobbelte av Amazonas i dag. Flommen førte med seg mye materiale og la silt og sand oppå havavsetningene i nedre del av dalføret og i deler av den daværende Romeriksfjord.

I Solør har vi elvesletter med siltjord over sand og grus. Mange steder er de selvdrenerte. Det var stor oppdyrking i 1950-1980, og det ble skapt mange store bruk. En stor del av elveslettene i Solør ble liggende udyrket til 1950-

årene, fordi de var næringsfattige. I Norge utgjør elveslettene en liten del av arealet dyrket jord. Ute i verden er elvesletter vanligvis de første landområdene som er dyrket og bosatt, hvis flommene ikke har vært for irregulære. I de sørligste områdene av nedbørfeltet går Glomma gjennom et leirjordsplatå, ca. 150 moh. på Romerike, ned mot 120-130 moh. ved Askim og gradvis lavere mot vest og sør, f.eks. 30-50 moh. rundt Sarpsborg.

Vegetasjon. Vegetasjonen i nedbørfeltet har sterk sammenheng med temperaturen. I de nordlige og nord-vestlige delene av nedbørfeltet har vi mellom- og høyfjellsbeltet, med sparsomt plantedekke av hei- og snøleiesamfunn. Det mangler sammenhengende plantedekke av karplanter, og det er vanligvis mosematter i søkk og lavarter på værhard mark. Under denne sonen ligger lågfjellsbeltet. Her er blåbærhei og viersamfunn vanlig. Det kan skilles mellom rabb- og snøleiesamfunn, de siste med bl.a. finnskjegg. Det forekommer myrer, men myrdanningen er ikke sterkt utviklet. Den neste sonen er fjellskogene med fjellbjørkeskog og dessuten småvokst, glissen furuskog. Seterdriften har fra gammelt av vært knyttet til denne vegetasjonstypen. På Østlandet er det delvis skiferbergarter i denne sonen, og i perioden 1965-1985 var det en god del nydyrking.

For økonomisk utnytting er den midtre barskogs-sonen som dekker de nordlige områdene øst og vest for Mjøsa viktig. Her dominerer barskog, bl.a. lågurt-granskog. Det kan være betydelig innslag av gråor. Myr dekker store områder. Den midtre barskogen dekker dalsidene et godt stykke nordover, og områdene mellom Glomma og Rena fra Koppang og sørover. De sørlige barskogene dekker store områder på begge sider av midtre og søndre del av Mjøsa, samt videre sørover. Barskogen dominerer, men det fins også områder med myr og oreskog. Lengst mot sør ligger den nordlige edellauvskog- og barskogs-sonen. Her fins den nordligste sonen for eik i naturlig tilstand, eventuelt på tidligere dyrkajord (hagemark). Eik, ask, alm, lind, hassel og varmekrevende undervekster fins i solvendte lier på godt jordsmonn, med bjørk, bar- og oreskoger i resten av landskapet. I nedbørfeltet er størstedelen av Østfold og den søndre delen av Akershus med i sonen.

Naturgunnlag og arealbruk. Det samlede naturgunnlaget er karakterisert av stor variasjon for klima, bergarter, jordarter, vegetasjonstyper, terrengtyper og arealbrukstyper, dvs. kulturendret naturgunnlag. I HYDRA-programmet er det samlet inn data for naturgunnlag og endringer i klima, vegetasjon og landbrukets arealbruk over tid. Tidshorisonten er fra 1900 og fram til i dag. Når det gjelder statistikk over målte endringer, er det mest materiale fra 1920 til i dag, spesielt når det gjelder produktivt skogbruksareal. Av Tabell 2.4 går det fram at omtrent halvparten av nedbørfeltets areal per i dag er dekket av skog, med variasjon fra 33,5 % i Oppland til 67 % i Akershus.

Tabell 2.4 Arealtilstand i nedbørfeltet totalt og fordelt på fylker. Arealbruk i prosent av totalt areal.

Tettsteder	Totalt areal, km ²	Dyrket areal	Skog-areal	Myr-areal	Annen snaumark	Snø og breer	Tettsteder
Glommavassdragets nedbørfelt	41 922	5,8	48,9	7,1	36,8	0,8	0,5
Østfold	1790	24,0	52,3	1,6	19,6	0,0	2,5
Akershus	2828	18,8	67,0	2,6	9,3	0,0	2,3
Hedmark	19 253	4,5	60,2	9,7	25,3	0,0	0,3
Oppland	16 294	3,6	33,5	5,3	55,4	1,9	0,3
Sør-Trøndelag	1757	1,4	35,2	9,1	52,8	1,3	0,2

Tabell 2.5 Skogareal (i km²) etter jordbruksstillingene i 1907 (Norge, Hedmark og Oppland) og 1918 (Akershus/Oslo og Østfold) og etter Landsskogtakseringen i 1919-1930.

Klassifisering	Norge	Hedmark	Oppland	Akershus/Oslo	Østfold
Jordbruksstillingene	69 000	12 200	5600	3400	2300
Landsskogtakseringen	72 000	13 200	7200	3200	2300

Tabell 2.6 Utvikling i Norges jordbruksareal (i km²) over tid.

Areal	1900	1939	1969	1997
Total	9900	11 200	9600	10 400
Korn	1650	1840	2520	3400

Det produktive skogarealet i nedbørfeltet består av ca. 50 % granskog, 35 % furuskog, 9 % lauvskog og 5 % uten dominerende treslag. Gran er det treslaget som generelt har størst bladarealindeks, og dermed størst evne til å virke på vannbalansen. Haveraaen (1981) viste at avrenningen fra et skogsområde med barskog i Vestfold økte med 200-300 mm etter snauhogst.

Vurdert på grunnlag av årlig tilvekst er 22 % av skogarealet av høy bonitet, 48 % av middels bonitet og 30 % av lav bonitet. Østfold og Akershus har naturlig nok størst andel høy bonitet og lavest andel lav bonitet, mens alle fylkene har omtrent samme andel middels bonitet. Boniteten gir et uttrykk for skogens produksjonsevne. Det antas at en stor del av variasjonen i aktuell fordamping fra skog har sammenheng med bonitet.

Tabell 2.5 viser skogarealet i begynnelsen av det 20. århundre i fylkene som inngår i Glommavassdragets nedbørfelt, estimert på grunnlag av data fra Jordbruksstillingene og Landsskogtakseringen.

Etter definisjonen i økonomisk kartverk er skog et areal med minst 6 trær per dekar som er, eller kan bli, minst 5 m høye. Produktiv skog skal ha en produksjon på

minst 1 m³ per ha og år. Etter Landsskogtakseringen/ Norsk institutt for jord- og skogkartlegging (NIJOS) utgjør produktivt skogareal i 1995 for Norge 72 000 km². Etter FAOs statistikk utgjør "Skog" 87 000 km². Her er det med noe skogareal som ikke er regnet inn i tallene for produktivt skogareal etter Landsskogtakseringen/ NIJOS.

Jordbruksarealet utgjør 5,8 % av totalarealet i nedbørfeltet, med variasjon fra 24,0 % i Østfold til hhv. 4,5 % og 3,6 % i Hedmark og Oppland. Utviklingen i jordbruksareal for Norge er gitt i Tabell 2.6.

Disse tallene viser at jordbruksarealet har variert rundt 10 000 km² gjennom de siste hundre år. Nydyrket areal etter år 1900 har omtrent akkurat blitt balansert av avgangen av dyrket areal til veier, flyplasser, tettstedsutvikling og noe til gjengroing. Kornarealet har økt og utgjør i dag omlag en tredjedel av jordbruksarealet. Samtidig har arealet av gras og poteter gått tilbake. Grasarealene har normalt mindre overflateavrenning og noe lengre vekstperiode enn korn, og tettstedsarealene har en betydelig større avrenning enn jordbruksarealene. Sett under ett kunne denne utviklingen gi en viss økning i avrenning, spesielt i de sentrale låglandsområdene, der tettstedsutviklingen og tilbakegangen i grasarealer har vært størst.

2.2 DATABASES

Et viktig produkt fra HYDRA-programmet er et samordnet datasett som har vært grunnlag for andre prosjekter innenfor programmet (Roald & Kristensen 2000). Data er i hovedsak tatt vare på i ulike systemer i

NVE, slik at de er tilgjengelige også for nye forskningsprosjekter. I HYDRA-programmet er Glomma valgt som det sentrale studieområdet, men det er også benyttet utvalgte dataserier fra andre områder for å undersøke regional variabilitet av flommer.

DIGITALE KARTDATA

Formålet med de digitale kartdataene har vært å komme frem til en rutemodell (grid) med oppløsning 100x100 m som skal inneholde den informasjonen som er nødvendig for å simulere effekten av endret arealbruk på flom. Dette arbeidet har vært utført både for små forsøksfelt og for to større felt, Flisa- og Osenfeltene i Glomma. Arbeidet har vært fokusert på betydningen av skog, som har endret seg betydelig fra 1920-årene til i dag. Grunnlaget for å beregne skogparametre som bladarealindeks og feltkapasitet i hver rute har vært data hentet fra ulike datakilder. Sentrale kilder har vært:

- Landsskogstakseringen (LSK)
- Digitalt markslagskart (DMK)
- Jordregisterdata
- Kvartærgeologisk kart for Hedmark
- Høydemodell fra Statens kartverk
- N250 kartdata

Det er stilt opp algoritmer for beregning av skogparametre som er direkte inngangsdata til modellen LANDPINE (Rinde 1999). Disse algoritmene er beskrevet i Grønlund (1999). Sentral parameter har vært boniteten, H40. I LSK er denne bestemt for et utvalg av prøveflater, men det er mange ruter som ikke faller sammen med prøveflatene. Proveflatene ligger i så vidt stor avstand at det er lav korrelasjon mellom nærliggende prøveflater, og dermed dårlig grunnlag for å fylle i verdier ved interpolasjon basert på Thiessenpolygoner eller ved Kriging. I stedet er det etablert regresjonslikninger mellom bonitet og prøveflatens høyde, skråning og nordkoordinat. Av disse forklaringsvariablene gav høyden R^2 -verdier på rundt 0,5 for Hedmark og Oppland fylker. Andre forklaringsvariable som eksposisjon eller kvartærgeologi viste seg ikke å øke forklaringsgraden signifikant.

I tillegg til bonitet krevdes treslag og hogstklasse for hver rute. Den siste beskriver skogens utviklingstrinn. Fordi treslag og hogstklasse også er lavt korrelert, ble manglende data utfyllt ved randomisering. Skogdekning, bonitet og treslag ble antatt å være de samme i 1920-årene, i 1960 og i 1990, mens hogstklassen endret seg over tid. Randomiseringen ble gjort slik at fordelingen av hogstklasser stemte overens med resultatet av takseringene ved de ulike tidspunktene, men det er en vesentlig svakhet at det ikke er korrekt stedfesting av data til hver rute utenfor prøveflatene. Ved framtidige studier bør slike data stedfestes ut fra fjernmåling, f.eks. ved satellitt. Basert på de empiriske algoritmene beskrevet i Grønlund (1999), ble bladarealindeks og feltkapasitet beregnet for hver rute.

DIGITALE VANNLINJEDATA

Det er utarbeidet digitale vannlinjer for 8 områder. Dessuten er midtlinjen bestemt som grunnlag for konstruksjon av flomutbredelseskart og flomsonekart. For å lage flomsonekart er det nødvendig å kjenne sammenhengen mellom vannføring og vannstand i en rekke tverrprofiler/observasjonspunkter. Dette er et krav for å kunne generere en vannflate referert til en historisk flom eller en flom med et gitt gjentakintervall. Ved å kombinere en digital terrengmodell og en vannflate vil en kunne bestemme flomutsatte områder.

TIDSSERIEDATA

Sentralt for analyser i ulike HYDRA-prosjekter har vært observerte tidsserier med vannstands-, vannførings-, tilsigs-, snø-, grunnvanns-, nedbør- og lufttemperaturdata. Dataene finnes for en stor del på NVEs hydrologiske database Hydra II (Taksdal 1999). I tillegg til disse dataene kreves opplysninger om vannføringskurver, magasinvolumentabeller, overføringer og ulike inngrep. Disse opplysningene ligger delvis i Hydra II, men har også i noen grad vært innhentet hos Glommens og Laagens Brukseierforening. I tillegg til data fra Glomma er det benyttet data fra et utvalg av serier fra andre landsdeler for regional analyse av lange flomserier (Roald 1999). Fjelstad (1997) har undersøkt et større utvalg av serier fra Sognefjorden til Nordfjord. Solberg & Nordseth (1998) har benyttet data fra Sverige i tillegg til data i øvre del av Glomma i en undersøkelse. Gottschalk og Weingartner (1998) har benyttet data fra Glomma i en ny metode for regional flomfrekvensanalyse. Wathne & Alfredsen (1997) har benyttet hydrologiske data for modellering av effekten av reguleringer i Lågen-grenen av Glommas nedbørfelt. Vassdragsmodellen til Alfredsen & Killingtveit (2000) er videre brukt til å beregne flommene i hele vassdraget i 1967, 1984 og 1995. I Roald & Kristensen (2000) finnes tabeller over vannføringsseriene i Glomma ordnet vassdragsvis, og tabeller med stasjonsopplysninger om serienøkler til magasin-vannstandene og til eventuelle overføringer. Likeså finnes oversikt over gamle vannstandsserier fra Kanalvæsenets arkiver.

Som inngangsdata til modellene brukes observerte døgnverdier for nedbør- og lufttemperatur fra Det norske meteorologiske institutt. Disse er overført til NVE og ligger i databasen Hydra II. Dersom det skal utføres simuleringer før 1957, er det lite data tilgjengelig på digital form. Det er derfor foretatt registrering fra originalskjema av lufttemperatur for perioden 1921-1930.

2.3 VASSDRAGSMODELL HYDRA

KRAVSPESIFIKASJON OG PRINSIPPER FOR OPPBYGGING

For å kunne studere hvordan ulike typer menneskelige inngrep i et vassdrag påvirker og evt. endrer flomforholdene i vassdraget, er det nødvendig å bruke beregningsmodeller som viser sammenheng mellom inngrepene og de hydrologiske forhold i vassdraget. Under forarbeidet i HYDRA-programmet ble det tidlig klarlagt at en slikt beregningsmodell ville bli nødvendig, og en kravspesifikasjon for denne ble utarbeidet (Roald 1997). Denne beregningsmodellen har senere under prosjektet blitt kalt "Vassdragsmodell HYDRA".

I kravspesifikasjonen heter det bl.a. at: "Reguleringer og andre tiltak i vannstrengen vil særlig foregå i de større vassdragene. De vil påvirke flomforholdene på de vassdragsnære områdene i de lavere delene av vassdraget. For å kunne integrere ulike scenarier basert på alternativ arealbruk, reguleringsinngrep og forbygningstiltak, er det behov for et modellverktøy, en vassdragsmodell. Vassdragsmodellen skal være et verktøy for å integrere effekter av arealbruk, regulering og flomverk i vassdragets ulike delfelt og for å handtere dynamikken i vassdraget".

I den videre, detaljerte spesifikasjon for modellen kreves det bl.a. at:

"Vassdragsmodellen skal bygge på at elvestrengen deles opp i et antall objekter som elvesegment, innsjøer, magasin og kraftverk. Til hvert objekt kan det være et lokalt nedbørfelt. I tillegg kan vann renne inn i segmentet fra oppstrøms objekter. Vassdragsmodellen forutsetter at tilløpsserier kan fremskaffes for alle delnedbørfelt. De ulike delnedbørfeltene påvirkes av endret arealbruk og andre menneskelige aktiviteter, i ulik grad avhengig av feltets høyde over havet. Mange felt som i sin helhet ligger over tregrensen, vil bare i ubetydelig grad bli påvirket av arealbruksendringer. For disse feltene skal vannføringen beregnes en gang for alle basert på en nedbør-/avrenningsmodell som HBV-modellen. Dette kan trolig utføres sentralt, og det innebærer at vassdragsmodellen må inneholde kobling til en slik modell. For delnedbørfelt i lavereliggende områder kan endringer i arealbruk ha betydning for flomforholdene. Tilløpsserier i disse områdene må i praksis simuleres ved bruk av en eller flere modeller utviklet av de enkelte faggruppene. De simulerte tilløpene må kombineres med simulert tilløp fra de upåvirkede områdene, og verktøyet må være i stand til å kombinere simulert vannføring fra delfelt med ulik arealutnyttelse. For senere å lage et generelt verktøy for konsekvensanalyse, kan det være nødvendig å integrere de spesialiserte nedbør-/avrenningsmodellene inn i vassdragsmodellen. Verktøyet bør derfor være bygd opp slik at dette senere kan gjøres, men det er ikke krav til at dette skal være gjort i løpet av HYDRA-programmet".

Vassdragsmodellen er i HYDRA-programmet brukt i Glommavassdraget, men kravspesifikasjonen understreker at modellen skal være generell, slik at den kan overføres og brukes til tilsvarende studier i andre vassdrag. Dette stiller store krav til fleksibilitet i modellen, den må utformes slik at en anvendelse i andre vassdrag kan gjøres uten omprogrammering av selve programkoden, all beskrivelse skal kunne gjøres gjennom data for vassdraget.

TYPE INNGREP SOM KAN ANALYSERES

Vassdragsmodell HYDRA skal i Glommavassdraget primært brukes til å representere fire typer inngrep og deres konsekvenser for flomforholdene i vassdraget:

- Vannkraftregulering
- Flomsikringstiltak (flomverk og senkningstiltak)
- Arealbruksendringer (jordbruk, skogbruk etc.)
- Urbanisering/tettstedsutvikling

Modellen er bygget opp slik at disse typer inngrep kan representeres og legges inn på det sted i vassdraget der de forekommer. Det viste seg under prosjektets gjennomføring at den viktigste type arealbruksendring i Glommavassdraget syntes å være skogbruk. Det ble derfor fokusert spesielt på å hente inn data for karakterisering av skogtilstand, og oppbygging av modellverktøy for å tallfeste hvilken hydrologisk virkning endringer i skogtilstand ville ha. For jordbruk ble det gjort den vurdering at disse endringene var så små at det med stor sannsynlighet ikke kunne medføre endringer av flomforhold i et stort vassdrag som Glomma. Modellverktøyet som er blitt utviklet er imidlertid så generelt utformet at en i andre vassdrag lett kan legge inn en beskrivelse av jordbruksarealer og inkludere disse i beregningene, dersom det skulle vise seg nødvendig.

VALG AV METODE OG IT-VERKTØY FOR OPPBYGGING AV VASSDRAGSMODELLEN

Under arbeidet med utarbeidelse av kravspesifikasjonen for Vassdragsmodell HYDRA (Roald 1997) ble det drøftet ulike alternativer for hvordan den planlagte vassdragsmodellen skulle kunne realiseres. I hovedtrekk var disse drøftingene fokusert på bruk av programsystemet Vassdragssimulator (Killingtveit et al. 1994), MIKE II (DHI 1995, 1998) eller en utvidelse av NVEs eget Hydra II system. Slik kravspesifikasjonen var utformet var ingen av disse alternativene optimale, særlig på grunn av kravet til stor fleksibilitet med hensyn på å inkludere mange typer "vassdragsobjekter", og kravet om overførbarhet til andre vilkårlige vassdrag. Det ble derfor bestemt å bygge opp vassdragsmodellen ved hjelp av en ny type teknologi basert på det som kalles objekt-orientert metodikk.

Vassdragsmodell HYDRA er bygget opp ved bruk av teknologi som er utviklet gjennom to doktorgrads-arbeider ved NTNU, og disse to arbeidene danner nå basis for Vassdragsmodell HYDRA. Den ene hovedkomponenten er en svært generell og fleksibel modell for simulering av nedbør-avløp, PINE-modellen (Rinde 1998). Den andre hovedkomponenten er et såkalt rammeverk for bygging av modeller for prosesser i vassdrag, f.eks. hydrauliske modeller, økologiske modeller eller modeller av kraftverkssystem (Alfredsen 1999). Til sammen gir disse to programsystemene en svært stor fleksibilitet, og de vil kunne oppfylle alle de krav som var spesifisert til Vassdragsmodell HYDRA. Et sammen-drag er gitt i Alfredsen (2000). Den faktiske tilpasningen til Glomma er beskrevet i Alfredsen & Killingtveit (2000).

TILPASNING AV MODELLEN TIL GLOMMAVASSDRAGET – HOVEDTREKK

Generelt vil en oppbygging av en modell for et vassdrag ved hjelp av Vassdragsmodell HYDRA bestå av fire hovedfaser:

- Identifikasjon av komponenter (objekt) i vassdraget. Denne prosessen vil være styrt av formålet med modellen og detaljeringsgrad i modellarbeidet. I eksemplet Glomma vil objektene være elve-strekninger, magasiner, flomsletter, nedbørfelt etc.
- Innsamling av data for beskrivelse av karakteristiske egenskaper for hvert objekt. Krav til datamengde og type data vil avhenge av hvor detaljert beskrivelse som ønskes. I eksemplet Glomma kan data være f.eks. areal (nedbørfelt), volum (innsjø), effekt (kraft- verk) og skogtilstand (nedbørfelt).
- Valg av beregningsmetode for hvert objekt. For en elvestrekning må en f.eks. velge hvilken metode som skal brukes for å beregne transporttid for vannet, og for en innsjø kan en f.eks. velge hvordan vannføring ut avhenger av vannstanden.
- Data og beregningsmetoder må kobles sammen med objektet for å danne et ferdig beregningselement. De forskjellige beregningselement må til slutt kobles sammen i det som kalles en vassdragstopologi. Dette betyr rett og slett hvordan komponentene henger sammen og hvordan vannet transporteres nedover i vassdraget.

Glommavassdraget kan deles inn i fire hovedområder. Disse er:

- Lågen med Mjøsa
- Glomma ned til Elverum
- Strekningen Elverum til Øyeren, inkludert Vormå
- Øyeren til utløpet.

Denne hovedinndelingen er vist på Figur 2.1. Grunnen til at denne hovedinndelingen er valgt er at modellen MIKE 11 skal brukes til å beregne hydrauliske forhold på strek-ningen Elverum – Øyeren, koblet sammen med utløpet fra Mjøsa via Vormå. Slik de hydrauliske forhold er, må hele denne strekningen beregnes som en enhet (Figur 2.1).

Hver av disse fire hovedområdene må deretter deles inn i underområder med en beskrivelse av de ulike typer objekter som inngår i hvert delområde. I hovedtrekk vil beregningene utføres slik at Lågen til og med Mjøsa beregnes først. Deretter beregnes Glomma ned til Elve-rum. Dette bestemmer vannføring inn til segmentet fra henholdsvis Elverum og utløp Mjøsa og ned til Øyeren. Når MIKE 11 har gjennomført beregning for dette området vil vannføring inn til Øyeren være bestemt. Denne vannføringen blir så inngangsverdi til nedre del av modellen fra Øyeren og til utløpet ved Sarpsborg.

Videre beskrives kort hvordan de fire hovedområdene kan deles inn i finere oppløsning. Denne inndelingen vil være bestemt av hvilke menneskelige inngrep som finnes i hvert område, eller mer presist, de inngrep som kan tenkes å påvirke flomforholdene. Som nevnt inn-ledningsvis er dette begrenset til fire typer inngrep: vannkraftregulering, flomsikringstiltak, endringer i areal- bruk (skogsdrift) og urbanisering/tettstedsutvikling. De objekter som må inkluderes i beregningene og som det må innhentes data for, er bestemt ut fra dette.

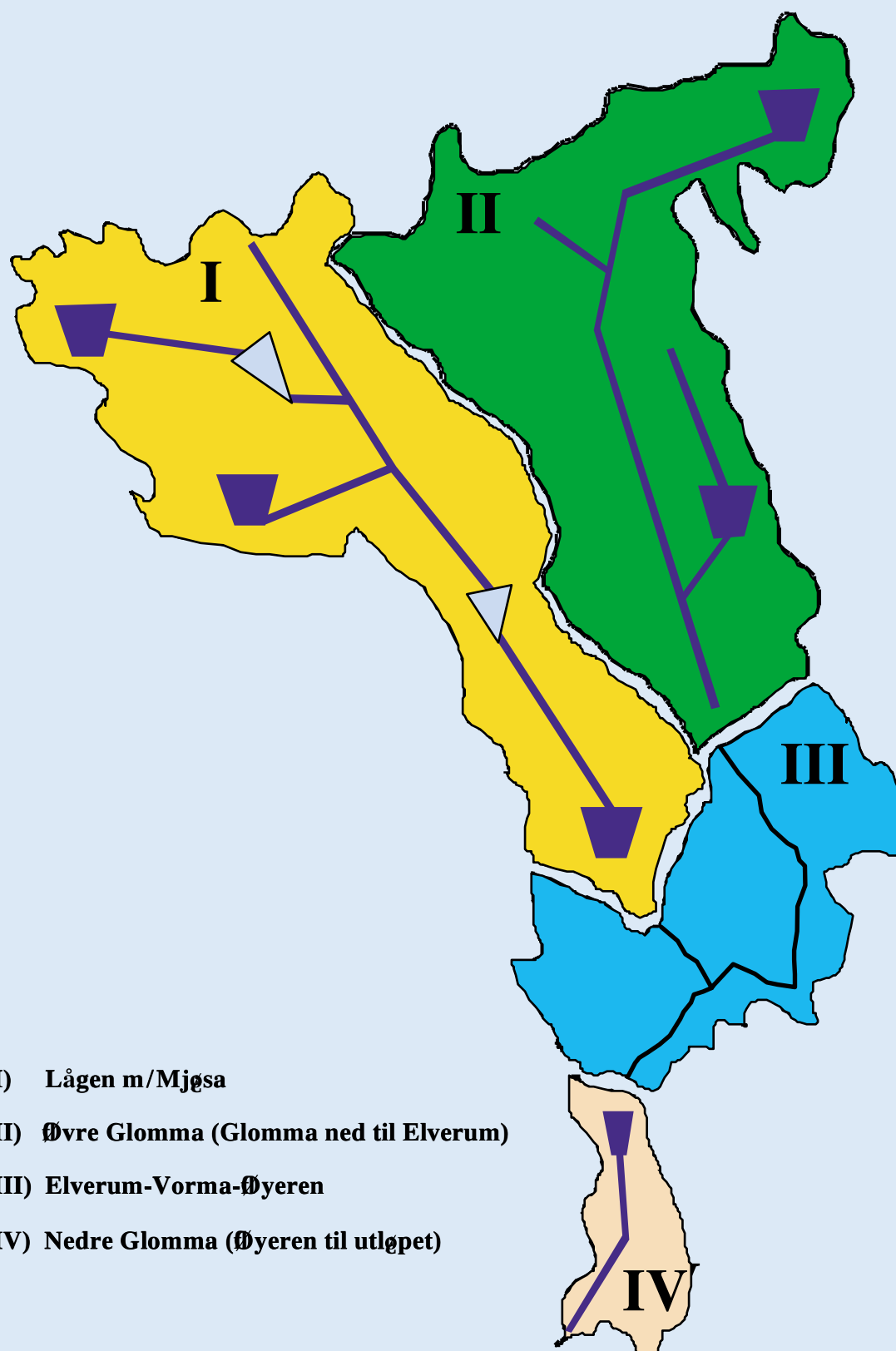
REPRESENTASJON AV ULIKE TYPER INNGREP I GLOMMAVASSDRAGET

I en modell er det alltid nødvendig å forenkle beskrivel- sen av det virkelige systemet, og slik vil det også være i Vassdragsmodell HYDRA. Det beskrives kort hvordan virkningen av de ulike typer menneskelige inngrep i Glomma er representert i modellen. Som tidligere nevnt er følgende typer inngrep/enderinger studert:

- Vannkraftregulering
- Flomsikringstiltak
- Endringer i skogbruk og skogtilstand
- Urbanisering/tettstedsutvikling.

En generell omtale av hvordan disse og andre inngrep virker inn på hydrologi, og i særlig grad på flomforhold, er gitt i Kap. 1.4. I denne delen omtales derfor mer spe- sifikt hvordan de fire hovedtyper inngrep er representert, samt spesielle forhold som er nødvendig å kommentere.

Vannkraftregulering. Den viktigste effekten på flom- forholdene fra vannkraftregulering kommer pga. bygging av magasiner og bygging av overføringstun- neler. Magasinene vil gjøre det mulig å samle opp flomvann og forsinke og redusere flomtoppen videre nedover. Overføringstunneler vil gjøre det mulig å flytte vann fra en del av vassdraget til en annen, f.eks. tunnelen fra dam Høyegga i Glomma over til Rendalen.



Figur 2.1 Glommavassdraget oppdelt i fire hovedområder.

Magasinene vil ha meget stor innvirkning på nedstrøms flomforhold, og virkningen av disse vil være et sentralt tema i modellarbeidet. De to viktigste karakteristika ved magasinene er deres volum eller lagringskapasitet, og vannføringskurve for utløpet når magasinet kommer over høyeste regulerte vannstand (HRV). Volumet oppgis vanligvis fra laveste regulerte vannstand (LRV) til HRV. Dersom tilløpsflommen inn i magasinet fortsetter etter at magasinet har nådd HRV, vil vannstanden kunne stige slik at vann kan magasineres midlertidig over HRV. Forholdet kan ha stor betydning, og det er viktig at dette modelleres riktig. Dette kan illustreres med Mjøsa som eksempel: Mjøsa reguleres mellom LRV (119,33 moh.) og HRV (122,94 moh.), dvs. en reguleringshøyde på 3,61 m. Dette gir et volum på 1312 mill. m³. Under flommen i 1995 steg vannstanden opp til 125,55 moh., dvs. en stigning på 2,61 m over HRV. Dette medførte en lagring av vann i magasinet over HRV på hele 940 mill. m³. Eksempler på vannstand-volumkurve og vannføringskurve for utløpet i dagens tilstand er vist på Figurene 2.2 og 2.3.

Ved studier av denne art ønsker en å sammenlikne tilstanden i dagens situasjon med tidligere upåvirket situasjon. For vannkraftsystemets del betegnes dagens situasjon som *Regulert*, mens upåvirket situasjon betegnes som *Uregulert*. Det er da viktig å ta hensyn til at naturlige sjøer som blir regulert, for eksempel Mjøsa, også vil ha en betydelig flomdempende kapasitet i uregulert tilstand. Dette betegnes gjerne som *Selvregulering*, fordi naturlige sjøer holder tilbake en stor del av tilløpsflommen og slipper denne langsomt ut ettersom vannstanden i sjøen stiger. Når en skal studere hvordan inngrep fra vannkraftregulering påvirker flomforholdene, må en derfor innhente volumkurver og vannføringskurver for uregulert tilstand, og bruke disse ved simulering av flomforløp i uregulert tilstand. Det er ikke riktig å bare fjerne magasinet og anta null magasinering og flomdempning i uregulert tilstand, særlig ikke dersom magasinet er laget ved regulering (senkning og/eller heving) av en naturlig sjø. I modellen skilles det derfor mellom naturlige sjøer og regulerte sjøer, selv om disse kan ha mange fellestrekk.

Overføringstunneler vil vanligvis ha liten betydning i flomsituasjoner, da kapasiteten er svært begrenset i forhold til flomstørrelsen. Som eksempel kan vi vise til overføringen Høyegga dam til Rendalen. Maksimalt kan det her overføres 55 m³/s, mens flomstørrelsen f.eks. under kulminasjonen våren 1995 var ca. 1450 m³/s. (Denne overføringen ble forøvrig stengt under flomtoppen i 1995, og bidro dermed verken til flomdemping i Stor-Elvdal eller økning i Rendalen.)

I Vassdragsmodell HYDRA legges tunneler inn med sin maksimale kapasitet, og eventuelle tiltak i form av midlertidig stengning vil også ivaretas.

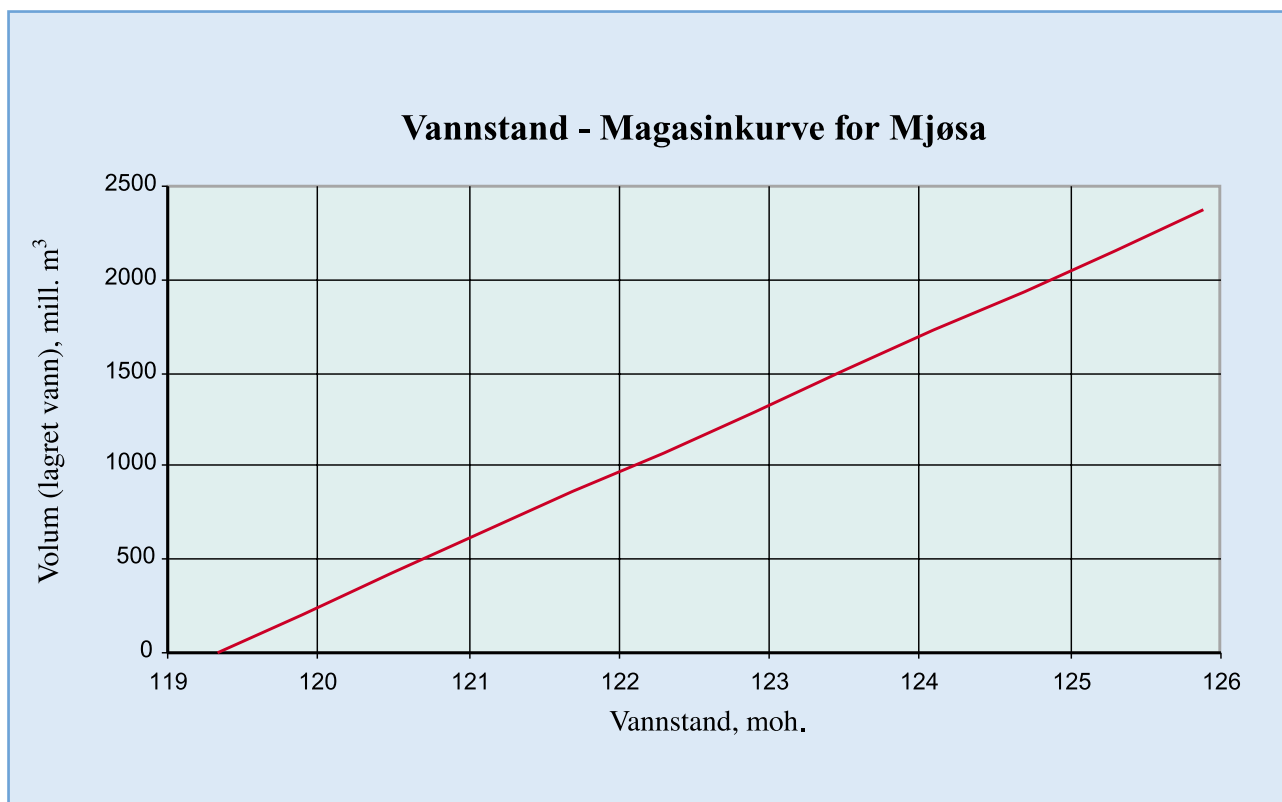
Flomsikringstiltak. Flomsikringstiltak i form av flomverk eller senkningstiltak vil kunne påvirke flomforholdene lokalt der anleggene ligger, og i vassdraget nedenfor. Slike tiltak blir ofte tillagt en uforholdsmessig stor betydning for påvirkning av flomforholdene i vassdraget nedenfor, og i HYDRA-programmet er det derfor utført omfattende analyser for å klarlegge hvordan slike anlegg virker inn.

Det er bygget en rekke flomsikringsanlegg i Glomma-vassdraget, særlig etter de store flommene i 1966 og 1967. De største anleggene ligger i Solør-området, mens anleggene i Lågen og Glomma oppover i Østerdalen er langt mer beskjedne (Berg & Strømmen 1999). I Vassdragsmodell HYDRA behandles flomverk på noe forskjellig måte, avhengig av deres størrelse og betydning.

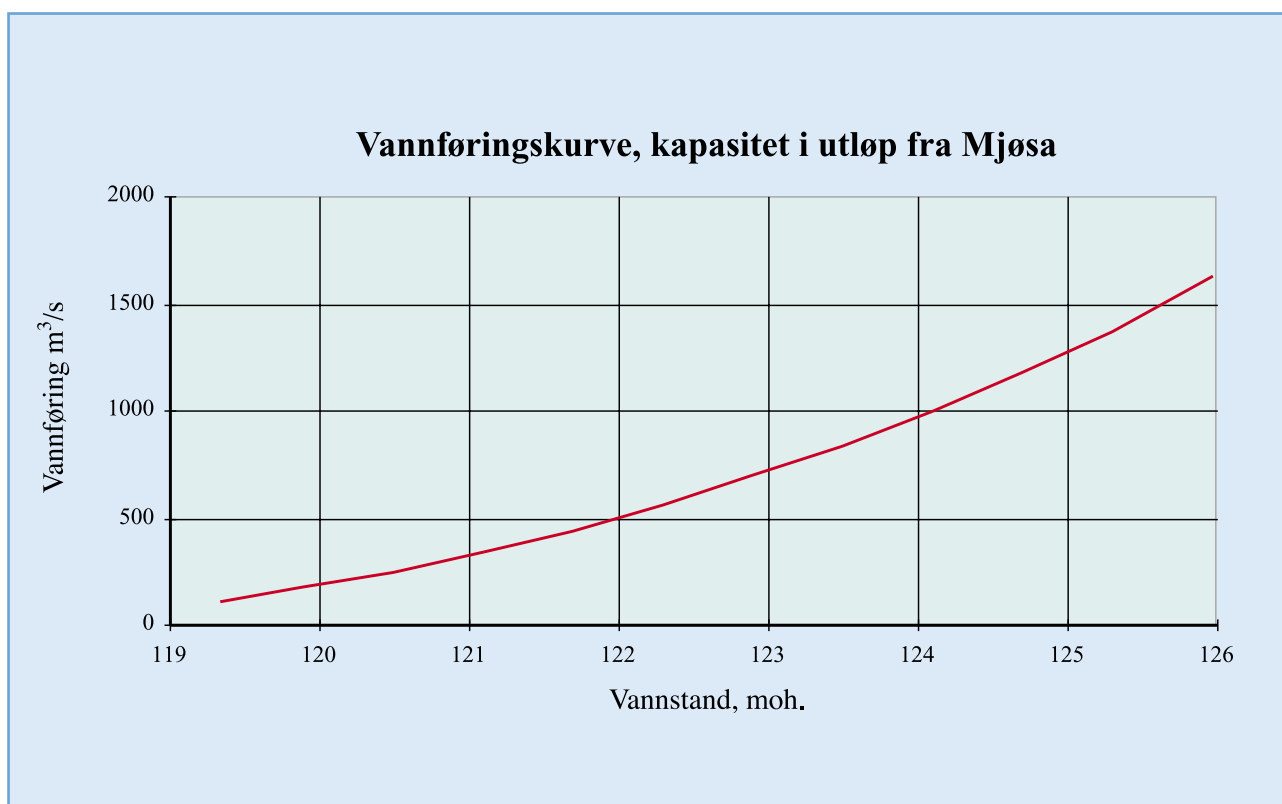
I området fra Elverum til Øyeren, og fra utløp Mjøsa til samløp med Glomma (Hoveddel III på Figur 2.1), beregnes virkningen av alle typer flomverk ved hjelp av en egen hydraulisk modell (MIKE 11). Det er bygget opp en detaljert beregningsmodell som inneholder en fysisk riktig beskrivelse av elveslettas topografi, samt data for flomverk som er bygget langs elva (Haddeland & Krokli 1999). I dette modelloppsettet beregnes også inn- og utstrømning til Storsjøen, noe som vil ha betydelig innvirkning på flomforløpet på denne strekningen. Med en slik modell kan virkningen av menneskelige inngrep studeres i stor detalj, og forholdene i upåvirket tilstand kan beregnes ved å fjerne flomverkene i modellen (Haddeland & Høydal 1999). Denne modelltypen er svært ressurskrevende og kan derfor i praksis bare brukes på spesielt viktige strekninger, og særlig der det er utført eller planlegges utført omfattende flomverksanlegg, slik tilfellet er mellom Elverum og samløp Vorma.

Anlegg andre steder i vassdraget beskrives noe forenklet ved den hovedfunksjon de har; å hindre eller redusere midlertidig magasinering på elvesletta under flom. Et flomverk vil ha som hovedformål å hindre at vann strømmer inn over elvesletta. Dermed vil et flomverk føre til en redusert magasinering lokalt og i prinsippet større vannføring nedstrøms. I praksis er effekten av slike tiltak små. Dataoppsett for til sammen 7 større flomverk i Lågen og Glomma oppstrøms Elverum er gitt fra NVE (Berg & Strømmen 1999).

Endringer i skogbruk og skogtilstand. Det er kjent at skog påvirker de hydrologiske forhold, først og fremst gjennom fordampning som øker med økende mengde skog (se Kap. 1.4). Dette fører igjen til mindre avrenning, idet vannbalansen forskyves. Motsatt kan en i prinsippet vente mindre fordampning og større avrenning når skog hogges. Effekten på avrenning er vel kjent fra studier der det er utført store endringer, f.eks. snauhogst av et område. Det er mer komplisert å forutsi hva som vil skje dersom en utfører mindre endringer i skogtilstanden over lang tid. Dette er derfor studert i detalj i to større felt i Glommavassdraget, der data for skog-



Figur 2.2 Vannstand-Volumkurve for Mjøsa (data fra GLB).



Figur 2.3 Vannføringskurve for utløp fra Mjøsa (data fra GLB).

tilstand var tilgjengelig, samtidig som hydrologiske og meteorologiske data med akseptabel kvalitet kunne finnes. De to feltene som ble valgt ut, var Flisas nedbørfelt i Solør og Osensjøens nedbørfelt.

I disse to feltene ble virkning av endringer i skogbrukstilstand analysert ved å innhente data for upåvirket tilstand og dagens tilstand. Deretter ble en nedbør-avløpsmodell, tilpasset de observerte data, brukt til å studere hvordan endringer i skogtilstand påvirket endring i avrenning og spesielt flommene. Som upåvirket tilstand ble brukt situasjonen i 1920. Dette er det lengste en kunne gå tilbake og samtidig finne akseptable skogdata og hydrologiske og meteorologiske data. Videre ble det innhentet data fra 1960 og 1990 for å studere om det var mulig å påvise endringer, eventuelt hvordan disse endringene slo ut på flomforholdene.

Den hydrologiske modellen som ble brukt, var en arealmessig fordelt versjon av PINE-modellen (LANDPINE) (Rinde 1998, 1999), som ble spesielt tilpasset for å modellere hvordan skog påvirker vannbalansen. Dette gjøres ved at prosessene intersepsjon og fordampning beskrives som funksjon av noen viktige skogparametre. De parametre som ble valgt ut var skogens høyde, arealmessige dekning samt den såkalte bladarealindeks. Disse parametrene kunne dels hentes direkte ut fra skogtakseringsdata, dels beregnes ved korrelasjon med slike data.

Resultatet fra beregningene i Flisa- og Osensjø-feltet viste at selv om det hadde vært betydelige endringer i skogbruket fra 1920 og fram til i dag, så har dette ført til små endringer i de skogparametre som innvirker på fordampningen, og dermed også gitt små eller ingen merkbare endringer i hydrologiske forhold. Dersom en ser på endringen fra 1920 til i dag, har fordampningen økt med 0,7 % og avrenningen avtatt med 0,5 %. Disse endringene er så små at det ikke er mulig å si om de er signifikante, i forhold til usikkerhet i datagrunnlaget og usikkerhet i modellen (Rinde 2000). Modellresultatene er stort sett de samme i de to feltene, og de viser at endringer i arealbruk for skogbruket i Glommavassdraget neppe har gitt endringer av noen betydning for de hydrologiske forhold. Denne konklusjonen underbygges også av statistisk analyse av avrenningsdata for de samme feltene. Det er ikke mulig å spore noen trender som kan føres tilbake til endringer i arealbruk (Roald 2000). Endringene i skogbruk består i skogplanting og stell av ungskog fra først på 1900-tallet, flatehogst og bygging av skogsbilveier fra 1950-årene. Tilveksten og skogvolumet har økt med 70 % fra 1920. Mens snauhogst og bilveier gir en påvirkning i retning av større avrenning, vil økningen i tilvekst og skogvolum som følge av skogplanting og skogkultur gi en tendens til mindre avrenning. Med en omløpstid på ca. 100 år blir det små endringer det enkelte år.

Resultatet av analysene i de to delfeltene Flisa og Osensjøen ga dermed den konklusjon at det ikke er noe

grunnlag for å knytte endringer i skogbruk i Glommavassdraget til endringer i flomforhold. Dette førte videre til den konklusjon at det ikke vil være behov for å inkludere skog og endringer i skogtilstand i den endelige versjon av Vassdragsmodell HYDRA anvendt på Glommavassdraget. Dette betyr at tilløp i alle delfelter under større flommer kan settes likt med dagens tilstand og med upåvirket tilstand.

Urbanisering/tettstedsutvikling. Urbanisering medfører at naturlige flater får tett dekke, f.eks. i form av hus, veier og parkeringsplasser. Dette hindrer infiltrasjon og fører til raskere overflateavrenning og spissere flomtopper. Denne effekten er velkjent i tettsteder og byer, og kan lokalt medføre sterk økning i flommene. I et større vassdrag vil det først og fremst være størrelsen på de urbaniserte områdene i forhold til det totale nedbørfeltet som bestemmer hvor omfattende virkningen blir i vassdraget. I alt er 25 tettsteder i Glommavassdraget undersøkt og endringer i flomforholdene er beregnet ved hjelp av den såkalte SINBAD-modellen (Killingtveit et al. 1994). Dagens tilstand er lagt inn for alle de 25 byer og tettsteder, og flomforholdene før og under flommen i 1995 ble simulert (Lindholm et al. 1999). Deretter ble forholdene endret tilbake til upåvirket tilstand i de samme 25 tettsteder, og modellen ble kjørt på nytt. Differansen mellom disse to serier med simuleringer viser hvordan urbanisering/tettstedsutvikling i Glommavassdraget har påvirket flomforholdene.

En slik modellering ville ha vært meget omfattende, og datagrunnlaget var vanskelig og kostbart å skaffe til veie. Det ble derfor bestemt å bare gjennomføre denne type beregning for 1995. Det viser seg at endringer pga. urbanisering i Glommavassdraget, gir så ubetydelige bidrag til flommene at det ikke er nødvendig å studere denne effekten for andre flommer.

Beregning av transporttid på elvestrekninger. Langs en elvestrekning vil det alltid skje både en forsinkelse og en utjevning av vannføringen, på grunn av magasineringseffekter i selve elveløpet og eventuelt på flomsletta dersom vannstanden blir høy nok. Et eksempel på slik forsinkelse ser vi på Figur 2.4, som viser vannføring inn til området mellom Elverum og Funnefoss, og samtidig vannføring ved Funnefoss. Det framgår klart at flomtoppen både forskyves i tid og samtidig jevnes ut gjennom transporten ned gjennom selve elvesystemet.

En del av denne effekten stammer fra innstrømming fra Glomma til Storsjøen under stigende flom, og utstrømming andre veien under synkende flom. Resten av effekten skyldes rett og slett en magasinering av vann i elveløpet og på de elveslettene der det ikke er bygget flomverk. Dette vil medføre en oppsamling av vann under stigende flom, og dette vannet vil så strøme ut og bidra til å forlenge flomvarigheten når flommen avtar igjen. Den samme effekten vil skje i andre deler av vassdraget, og vil kunne føre til at flommer fra forskjel-

lige deler av vassdraget ikke når de flomutsatte områdene i nedre deler av vassdraget samtidig, men adderes sammen med en viss forskyvning av toppverdiene.

Dette var som kjent en viktig effekt under 1995-flommen, der GLBs manøvrering av flomvannet fra Mjøsa førte til at flomtoppen derfra ble holdt tilbake inntil toppen av flommen fra Glomma hadde passert samløpet med Vorma. Selv om det inntreffer sterk nedbør og snøsmelting samtidig i feltet, så vil forsinkelsen av vann fra fjernere deler av vassdraget og utjevningen pga. dette medføre at den totale flommen nede i vassdraget reduseres i forhold til det momentane bidraget fra hvert delfelt.

En beregning av denne transporten kalles ofte "routing", etter det engelske uttrykket. En slik beregning kan utføres ved ulike metoder, avhengig av datagrunnlag og behov for nøyaktighet. I Vassdragsmodell HYDRA kan en velge mellom flere alternative routing-metoder, fra den aller enkleste, men mye brukte, som kalles hydrologisk routing (f.eks. Muskingum-routing) opp til den mest avanserte (Hydraulisk routing), som kan utføres ved å bruke programmet MIKE 11. I praksis er oppnådd nøyaktighet ikke alltid bedre ved å velge den mest "avanserte" metoden, mye kommer også an på datagrunnlag og hvor komplisert elveløpets geometri er.

De fleste routing-metoder er basert på at metoden må kalibreres på basis av ett eller flere observerte flomforløp. I Glomma-modellen har ikke dette vært mulig for alle de 30 elvestrekninger som er definert i modellen, fordi det ikke har vært data tilgjengelig. Beregningen for mange av elvestrekningene er derfor basert på en

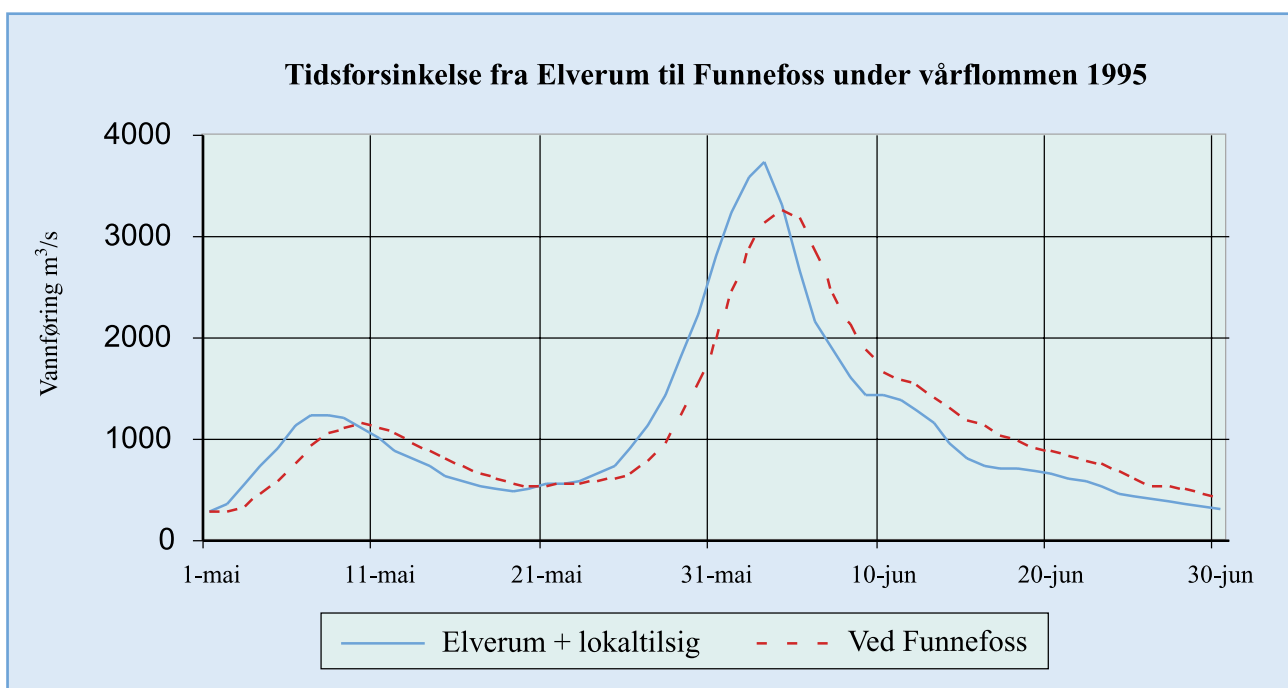
metode som knytter parametrene i modellen opp mot parametre i elveløpet. Der det har vært mulig, er dette kontrollert og eventuelt justert, basert på målte data. Parametre som er brukt i modellen er dokumentert i Alfredsen & Killingtveit (2000). Transporttiden vil variere med lengde på elvestrekningen og elvas helning, og den varierer fra 0,5 timer på de korteste elvestrekningene og opp til 14 timer for de lengste elvestrekninger som er definert.

DETALJERT MODELLSTRUKTUR FOR VASSDRAGS-MODELL HYDRA ANVENDT I GLOMMA

Endelig oppbygging og detaljert struktur i modellen ble bestemt ut fra de forhold som er omtalt foran, og førte til en modellstruktur med fire hovedområder som vist i Figur 2.5 og som er satt sammen av følgende "byggeklosser" eller objekter:

- 21 kraftverk
- 2 naturlige sjøer
- 18 reguleringsmagasin
- 10 overføringstunneler
- 30 elvestrekninger
- 20 rene tilsigsfelt (kommer i tillegg til lokale tilsigsfelt til alle andre objekter)
- 25 tettsteder (bare for 1995-flommen)
- 8 flomverk

Modellen er vist på Figur 2.5. Figuren viser hvordan de enkelte objektene i modellen er koblet sammen. Vannet transporteres i modellen ved de objektene som er kalt elvestrekning eller overføringstunnel, på samme måte



Figur 2.4 Eksempel på tidsforsinkelse langs en elvestrekning. Flomtoppen vil både forskyves i tid og jevnes ut med lengre varighet.

som i det virkelige vassdraget. For å etterligne det virkelige vassdragets oppførsel er det viktig å legge inn i modellen den tidsforsinkelsen som skjer langs en elvestrekning. I en tunnel vil det ikke være en tilsvarende forsinkelse, fordi vannstrømmen her setter opp en trykbølge som fører til at inn- og utstrømning skjer samtidig, dvs. uten tidsforsinkelse.

KALIBRERING OG VERIFISERING AV MODELLEN FOR GLOMMAVASSDRAGET

Når alle data er samlet inn og beregningsmetodene definert, vil det være nødvendig å tilpasse deler av modellen, og deretter verifisere at modellen regner riktig. Dette må alltid gjøres før modellen kan brukes til å gjennomføre analyser, f.eks. sammenlikning mellom regulert og uregulert tilstand. Kalibreringen utføres i praksis for å bestemme routing-parametre, dvs. de parametre som styrer tidsforsinkelsen langs elvestrekningene.

Modellen ble først kalibrert for flommen i 1995. Denne er brukt til å bestemme en del av de routing-parametrene som ikke kunne bestemmes på andre måter. Deretter er flommene i 1984 og 1967 beregnet og brukt som en kontroll. Det er lagt vekt på å finne ett sett parametre som passer for alle de tre flomepisodene, og som fortrinnsvis bestemmes ut fra flommen i 1995.

Så langt som mulig er det brukt tilsigsdata til alle lokalfelt som er beregnet og verifisert ved GLB. Dette har vært mulig for de fleste delfelt i 1995, men for de to andre flommene har det vært betydelig flere problemer. For mange av lokalfeltene er lokaltilsiget beregnet ut fra målte vannføringer ved nærliggende hydrologiske målestasjoner. Dette kan gi en del unøyaktighet i beregningen og er søkt unngått ved en oppdatering og justering av lokaltilsiget under modell-tilpasningen (Alfredsen & Killingtveit 2000).

Basert på observert tilsig er flomutviklingen beregnet for tre steder i vassdraget der en har hatt gode og stabile målinger for alle tre flomepisoder: Strandfossen/Elverum i Glomma, Losna i Lågen og i Mjøsa. I tillegg er det gjort enkelte kontroller i noen magasiner som et supplement. En nærmere dokumentasjon av kalibreringen er gitt i Alfredsen & Killingtveit (2000). Særlig for 1967, men også i 1984, har det vært en del problemer med å skaffe gode tilsigsdata, og en del justeringer har vært nødvendig.

Verifisering utføres ved å sammenlikne observert og beregnet vannføring og/eller vannstand ved de kontrollpunktene som var valgt ut (Elverum, Losna, Mjøsa). Noen eksempler på hvordan modellen reproduserte de tre flommene, er vist i Figurene 2.6 - 2.9.

Resultatet av verifiseringen bedømmes som godt. Modellen greier stort sett å reproducere alle viktige

målte resultater ved de kontrollpunktene som var mulige å bruke. Det er likevel episoder der en kan stille spørsmål ved resultatene, slik som f.eks. i Øyeren for 1967-flommen. Her er selve flomtoppen bra beregnet, men det blir et avvik mot slutten av episoden. Dette og noen andre lignende episoder synes i stor grad å skyldes at det er problemer med å skaffe tilveie pålitelige tilsigsdata for alle lokalfeltene. Dette er som kjent spesielt vanskelig under en større flom, da målestasjoner ofte kan settes ut av drift og vannføringskurver kan være ekstra usikre. Dette var også et problem som fikk stor oppmerksomhet etter flommen i 1995, der spesielt vannføringene ved Elverum ble omdiskutert. Det synes ennå ikke helt sikkert hvilken vannføring som faktisk ble målt her, pga. usikkerhet i vannføringskurven.

Den samlede vurdering av modellkalibrering og verifisering er likevel at modellen nå er i stand til å beregne alle viktige forhold vedrørende flommene i Glomma, og at de viktigste inngrep kan karakteriseres i modellen på en slik måte at deres virkning kan tallfestes. Virkning på flommene fra hver enkelt inngrepstype kan dermed beregnes. Resultater fra disse beregningene presenteres i det følgende.

DEFINISJON AV UPÅVIRKET TILSTAND

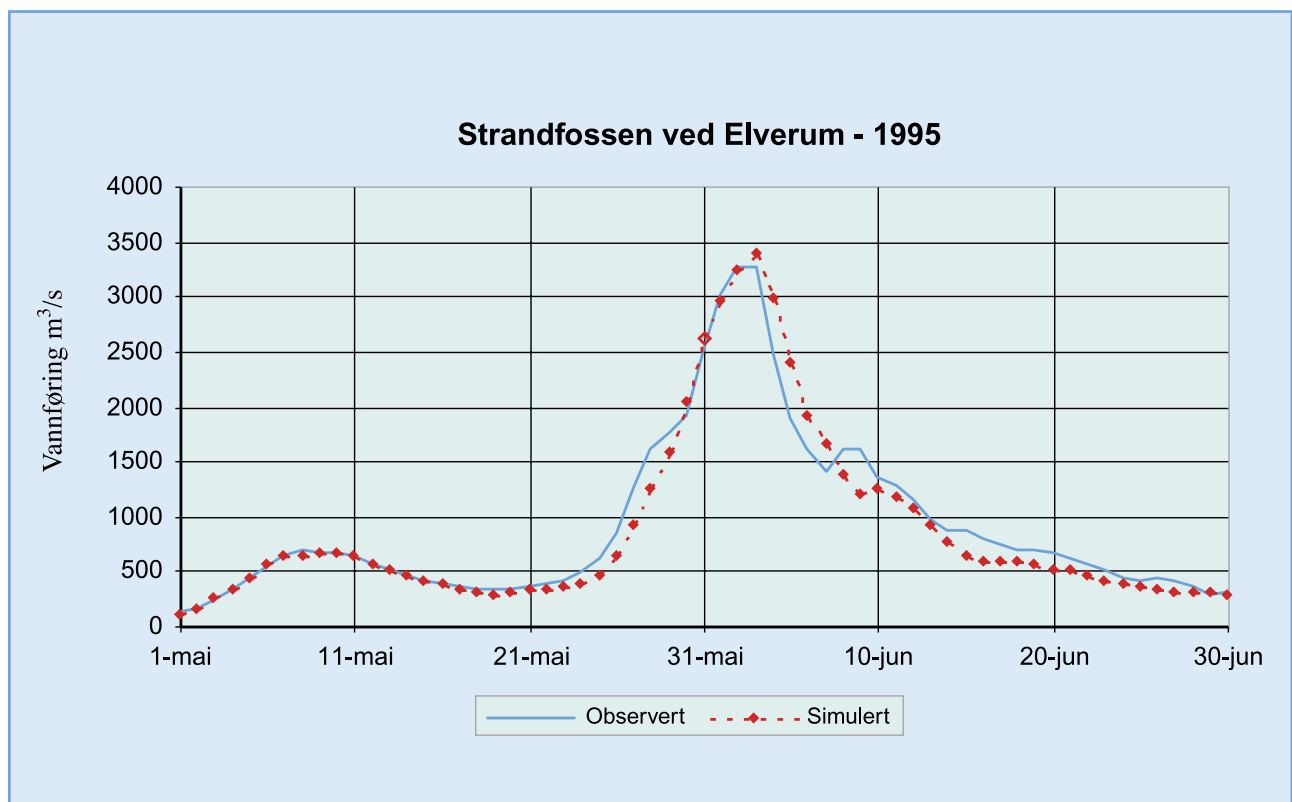
Et hovedformål med HYDRA-programmet har vært å undersøke i hvilken grad summen av alle menneskelige inngrep i norske vassdrag har påvirket og eventuelt økt flomfaren. Dette gjøres ved å sammenlikne dagens tilstand med en eller annen upåvirket tilstand, og ved å bruke Glommavassdraget som "test-vassdrag". Glomma ble valgt ut både pga. de store konsekvensene av flommen i 1995, men også fordi en i dette vassdraget har gode data for beskrivelse av både upåvirket og påvirket tilstand.

Det viser seg likevel ikke helt enkelt å definere en slik upåvirket tilstand, bl.a. fordi tidspunktet for start av påvirkning vil variere med type inngrep. For jordbruk og skogbruk må en i tilfelle gå hundrevis eller kanskje tusenvis av år tilbake for å finne en "upåvirket" tilstand, for vassdragsreguleringer må en minst tilbake til midten av 1800-tallet for å finne en upåvirket (uregulert) tilstand. Ulempen ved å velge en slik ideell definisjon av upåvirket tilstand er selvsagt at det er nesten umulig å skaffe tilveie data for kvantitativt å beskrive denne tilstanden.

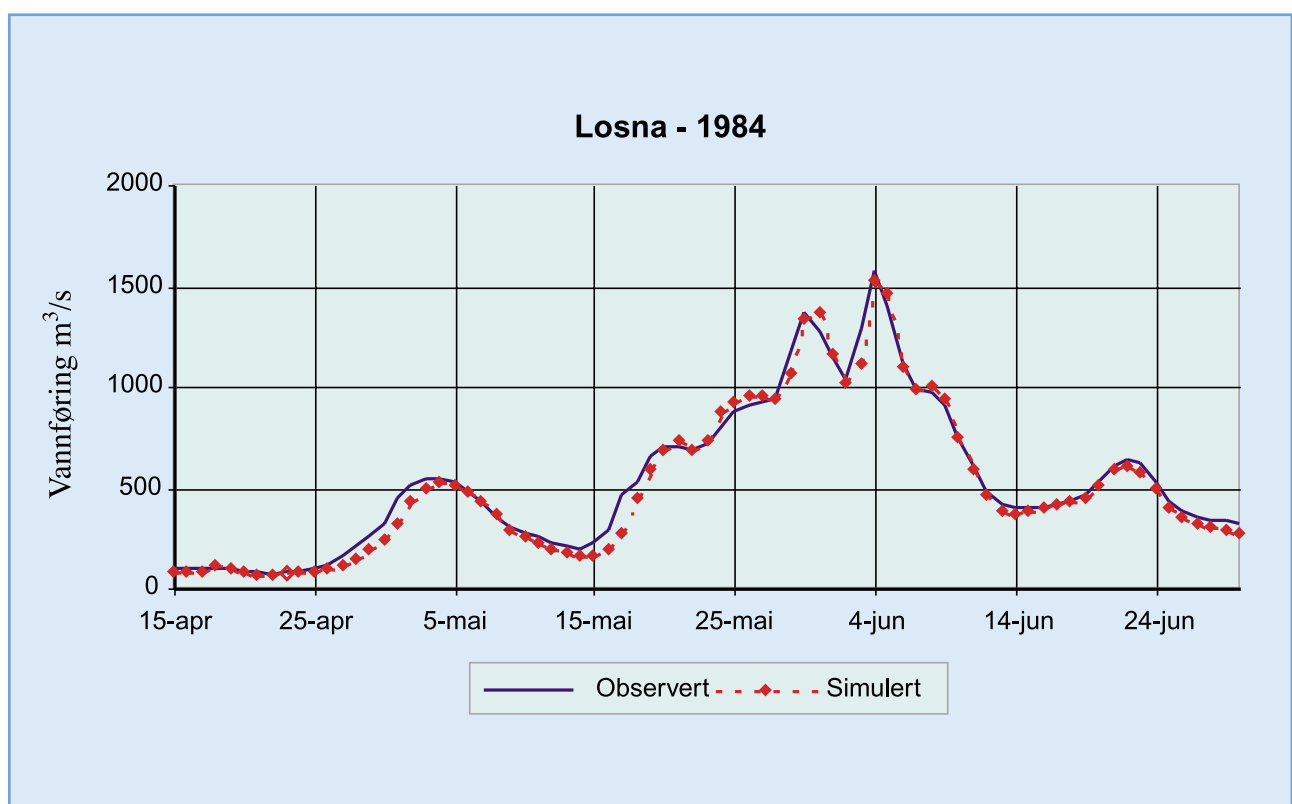
Innenfor HYDRA har en derfor valgt en noe pragmatisk løsning på dette problemet ved at "upåvirket" defineres som situasjonen omkring år 1900. På dette tidspunktet var det bare få og små inngrep i form av vassdragsreguleringer og flomsikringsanlegg. Urbaniseringen var nesten uten betydning, og skogbruket var slik det var før den moderne skogsdriften begynte sitt inntog.



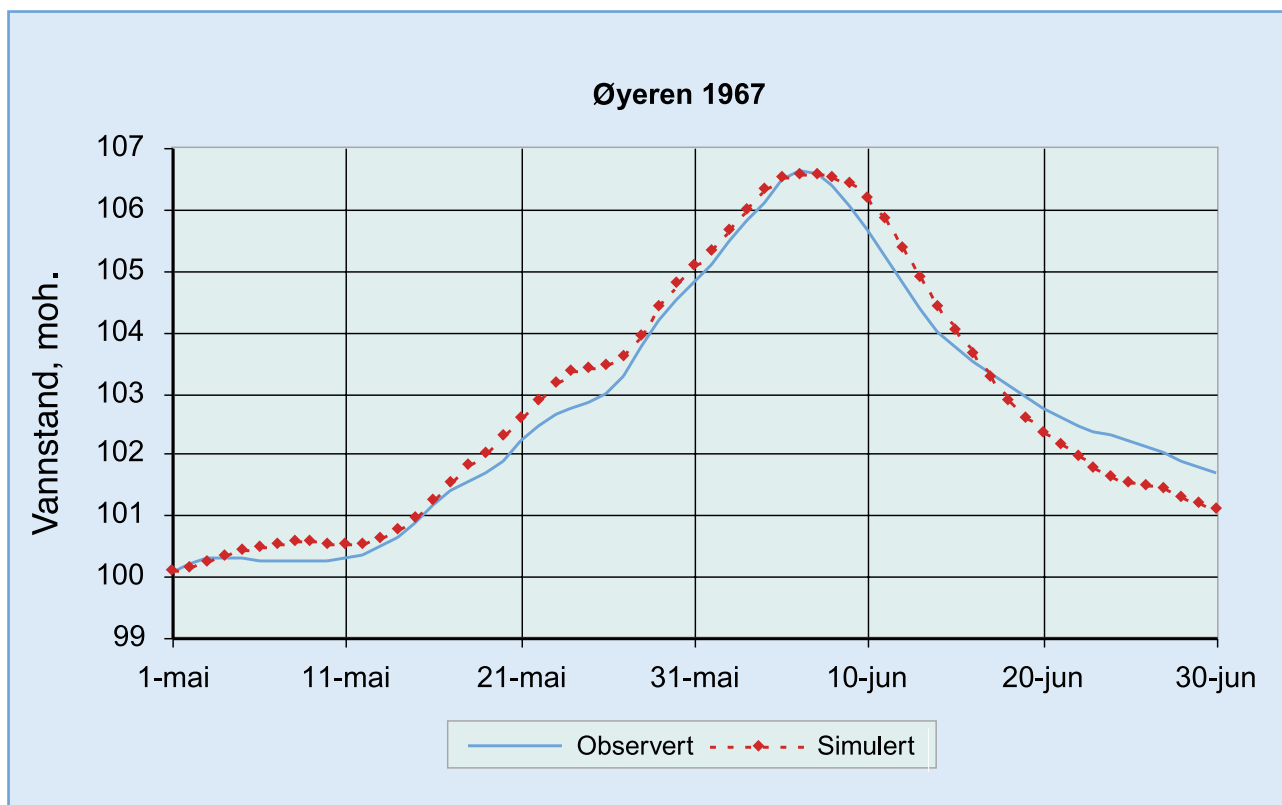
Figur 2.5 Vassdragsmodell HYDRA tilpasset Glommavassdraget. Objekter og topologi.



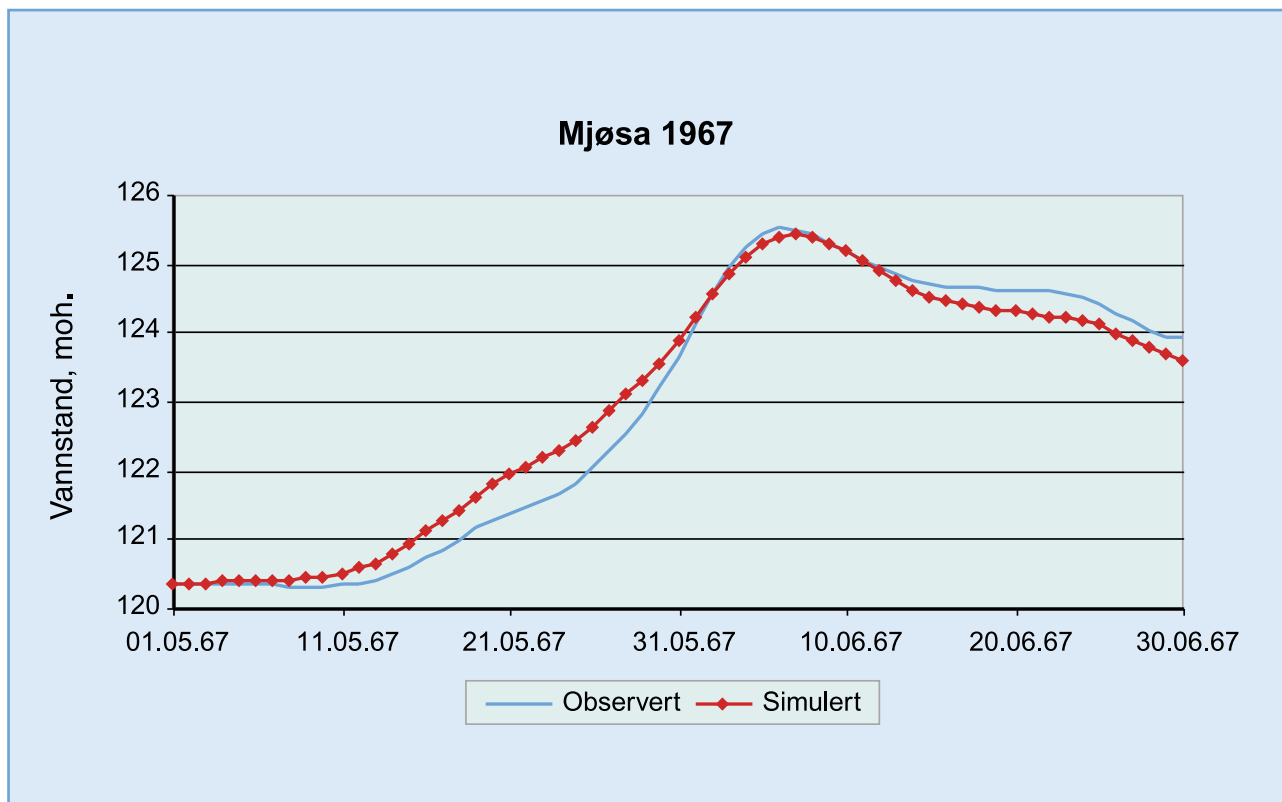
Figur 2.6 Eksempel på verifisering – Målt og beregnet vannføring ved Strandfossen-Elverum under flommen i 1995.



Figur 2.7 Eksempel på verifisering – Målt og beregnet vannføring ved Losna under flommen i 1984.



Figur 2.8 Eksempel på verifisering – Målt og beregnet vannstand i Øyeren under flommen i 1967.



Figur 2.9 Eksempel på verifisering – Målt og beregnet vannstand i Mjøsa under flommen i 1967.

BEREGNING OG KVANTIFISERING AV VIRKNINGER I PÅVIRKET OG UPÅVIRKET TILSTAND

Den metodikk som ble brukt for å undersøke og kvantifisere virkninger på flommer av de ulike typer inngrep, kan trinn for trinn karakteriseres på følgende måte:

- Påvirket tilstand (også kalt regulert tilstand og dagens tilstand) defineres som situasjonen omkring 1990.
- Upåvirket tilstand (også kalt uregulert tilstand) defineres som situasjonen omkring år 1900. For skogbruk brukes tidspunktet 1920, da de første gode skogtakseringer ble utført.
- Det velges ut tre historiske flommer som brukes for å studere hvordan flomforholdene endres for flommer av ulik type. Dette er alle vårflommer i 1995, 1984 og 1967.
- Vassdragsmodellen tilpasses og kalibreres for 1995-flommen, slik at denne kan reproduseres for alle viktige steder i vassdraget. Kalibrering verifiseres ved kontroll av flommene i 1984 og 1967.
- Påvirkede (regulerte) flomforhold simuleres med dagens tilstand for alle inngrep, og for de tilsigsforhold som var under hver av de tre flomepisodene (1995, 1984 og 1967).
- Upåvirkede (uregulerte) flomforhold simuleres med upåvirket tilstand (år 1900), dvs. uten alle viktige inngrep i vassdraget, og for de tilsigsforhold som var under hver av de tre flomepisodene (1995, 1984, 1967).
- Siden det ble påvist at endringer i skogsdrift ikke har medført hydrologiske endringer av noen betydning, blir tilsig til alle lokalfelt de samme i påvirket og upåvirket tilstand.
- For hver av de tre flomepisodene blir det dermed gjennomført to simuleringer av flomforhold i hele vassdraget, med ett sett fysiske parametre for påvirket tilstand (år 1990) og ett sett parametre for upåvirket tilstand (år 1900).
- Endringer i flomforholdene søkes karakterisert ved å se på hvordan flomforholdene er påvirket på fem utvalgte steder i vassdraget. De punktene som ble valgt ut var: Losna i Lågen, Mjøsa, Elverum, Øyeren og Sarpsborg.
- Ved hvert av disse punktene beregnes flomvannstand og -vannføring kontinuerlig under hele flommens forløp. Som hovedresultat velges ut og presenteres vannføring og/eller vannstand ved flomkulminasjon. For noen utvalgte steder presenteres også kurver som viser flomforløpet i påvirket og upåvirket tilstand.
- Selv om det bare er valgt ut noen få representative punkter i denne presentasjonen er dette ingen stor begrensning. Alle resultater finnes i utskrifter fra beregningsmodellen, og kan lett tas ut og presenteres etter behov og på forespørsel.
- Etter at hovedresultater er funnet (påvirket/upåvirket) er det kjørt flere analyser med ulike kombinasjoner av inngrep, for å klarlegge hvordan de forskjellige typer inngrep spiller sammen i totalresultatet. Dette gjør det mulig å kvantifisere individuelt virkningen av vannkraftreguleringer, urbanisering og flomsikringsanlegg. Skogbruk er undersøkt innledningsvis og ga som tidligere omtalt ingen målbare endringer.

HOVEDRESULTATER – SAMMENLIKNING MELLOM DAGENS TILSTAND OG UPÅVIRKET TILSTAND OG VIRKNING AV DE ENKELTE TYPER INNGREP

Virkninger av ulike typer inngrep presenteres for de ulike flomepisodene i 1995, 1984 og 1967. Resultatene oppsummeres i tabeller med nøkkeltall for endringer ved selve flomkulminasjonen. For Losna, Elverum og Sarpsborg er det vannføring som gir mest fornuftig presentasjon, mens for innsjøene Mjøsa og Øyeren er det mest fornuftig å vise vannstand. I all hovedsak er det inngrep i form av vannkraftreguleringer som påvirker og reduserer flommene. Hele flomforløpet på de 5 stedene oppsummeres grafisk, med regulert og uregulert flom (vannføring eller vannstand). Dette gir en mulighet til å vurdere både virkning for maksimalverdier og hele flomforløpet.

Det er så stor forskjell mellom type inngrep og virkninger at det er vanskelig å presentere de enkelte virkninger i samme diagram. Virkninger av inngrepene blir derfor oppsummert og kommentert separat for hver inngrepstype.

Endringer i skogbruk/skogtilstand. Som tidligere omtalt har det ikke vært mulig å påvise noen endring i flomforhold som kan føres tilbake til endringer i skogtilstand. Det må presiseres at dette gjelder for de to feltene (Osensjøen og Flisa), som har vært studert i detalj og ved hjelp av hydrologiske modeller. Disse feltene ble valgt ut som representative for den skogsdrift som har vært praktisert i tidsrommet siden 1900. Disse to feltene ble også valgt ut pga. stor skogdekning, og fordi en antok at eventuelle hydrologiske virkninger ville være spesielt godt synlige her.

De beregninger som ble utført med den hydrologiske modellen LANDPINE, viste at endringer som har funnet sted neppe vil medføre hydrologiske endringer. Denne konklusjonen stemmer også bra med resultatet fra statistiske analyser av tidsserier med vannføring og flommer. Heller ikke her har det vært mulig å påvise endringer av betydning, ut over endringer i Osensjøfeltet som tilskrives reguleringer av sjøen.

På bakgrunn av disse relativt entydige resultater, er det trukket den konklusjon at det heller ikke har forekommet endringer av betydning i resten av Glommafeltet. Generelt har det vært en økning i skogtilvekst og skogvolum etter 1920 i hele feltet.

Det må presiseres at de resultatene som er funnet her ikke beviser at endringer i skogtilstand ikke kan medføre hydrologiske virkninger, tvert imot er dette velkjent fra undersøkelser i mange land. Konklusjonen fra studien i Glommafeltet viser bare at i dette vassdraget synes ikke endringene i skogtilstand å ha vært store nok eller å ha gått i en slik retning at dette har fått signifikant betydning. Det må også påpekes at de eldste skogdata fra 1920 neppe har god nok kvalitet til entydig å fastslå dette med sikkerhet.

Urbanisering/tettstedsutvikling. Virkningen av urbanisering er studert ved simulering av flommen i 1995, med og uten de 25 tettsteder som er inkludert i studien. De samlede arealer som kan karakteriseres som tettsteder eller urbane er svært små i Glommavassdraget, og dette fører derfor til svært små samlede virkninger i selve hovedvassdraget. Tabell 2.7 oppsummerer de endringer som ble funnet for de kontrollpunktene som var valgt ut.

De beregnede virkninger er svært små, men det er noe overraskende at virkningen ved Øyeren og Sarpsborg ikke engang er synlig. Dette skyldes vel mest sannsynlig at de urbane feltene først og fremst gir økt avrenning ved kraftig regnvær og sterk snøsmelting. Ved de tidspunkt da flommen i 1995 kulminerte, var nedbøren ubetydelig og snøsmeltingen ferdig i alle de urbane feltene som var inkludert i analysen. En analyse av en kraftig regnflom, f.eks. den som inntraff høsten 1987, ville nok gitt et noe annet resultat, men fremdeles ville virkningene av urbanisering i dette store vassdraget bli ubetydelig. På bakgrunn av dette relativt klare resultatet, er det ikke funnet grunn til å inkludere urbanisering som en egen type inngrep ved studiet av flommene i 1984 og 1967.

Virkning av flomsikringstiltak. Virkningen av ulike typer flomsikringstiltak er studert ved å inkludere magasiner på elvesletta i regulert tilstand og fjerne disse i uregulert tilstand. Dette er utført for i alt 7 større anlegg utenom den strekningen som er modellert med MIKE 11, dvs. fra Elverum og Vormå og ned til Øyeren. Virkningen av flomsikringstiltak er oppsummert i Tabell 2.8.

Resultatene viser at tiltak oppstrøms Losna har gitt en marginal økning i flommene både i 1995 og i 1984, men virkningen er meget liten, under 1 m³/s i begge tilfeller. For Elverum er konklusjonen noe av det samme, beregningsmessig er en sågar kommet ut med en liten reduksjon i 1995, men dette er neppe signifikant. En årsak til at det blir såpass liten forskjell er at flom-

verkene har størst innvirkning på vannføringen litt før selve flomtappen, idet vannføringen øker og kommer inn over flomslettene, og også (i prinsippet) når vannet trekker seg tilbake. Dette er illustrert i Figur 2.10, som viser beregnet virkning av flomverkene oppstrøms Losna. I hovedsak er denne endringen forårsaket av flomverkene på Sel og Lesja. Figuren viser at differansen (vannføring med flomverk minus vannføring uten flomverk) er maksimalt oppe i litt over 8 m³/s, men den største forskjellen inntreffer idet vannføringen begynner å stige og lenge før selve flomkulminasjonen som inntreffer noen dager etter. Da er forskjellen minimal, og slik sett kan en si at flomverkene oppstrøms ikke påvirker flomtappen nevneverdig, men at forløpet endres litt.

På strekningen fra Elverum nedover mot Øyeren, der en finner de fleste større flomverk, er virkningene noe større, men fortsatt svært små i forhold til flomtappen. Ved Funnefoss er det beregnet at flomvannføringen økte med ca. 14 m³/s pga. flomverkene mellom Elverum og Funnefoss. Forklaringen er her at vannet strømmer noe raskere gjennom denne strekningen når flomverkene hindrer vannet å strømme ut over elveslettene og magasineres der. Dette utgjør likevel en svært liten økning i forhold til upåvirket tilstand uten flomverk, prosentvis er økningen bare ca. 0,5 %.

Tabell 2.7 Beregnet virkning av urbanisering på flommer i Glommas nedbørfelt i 1995.

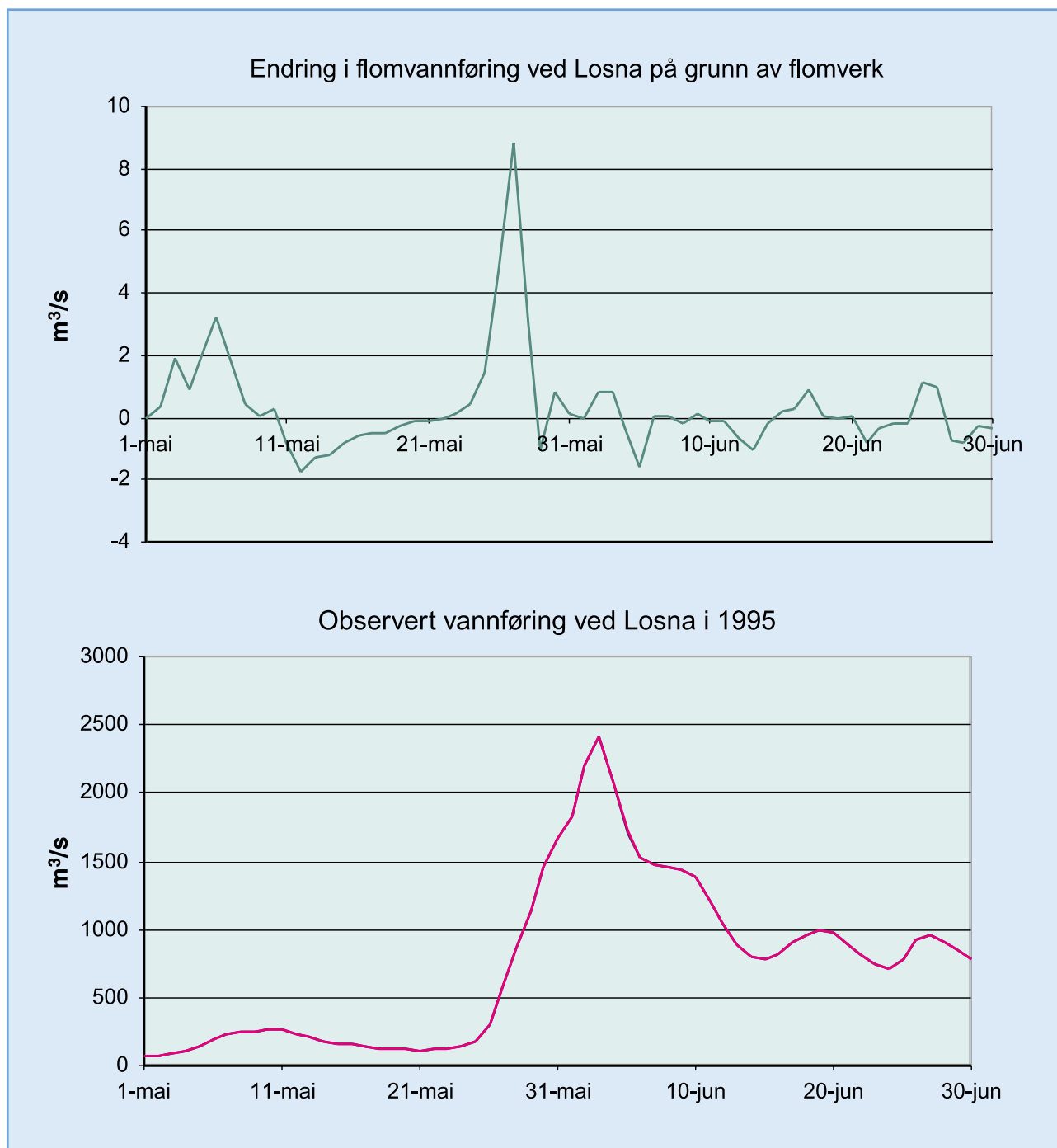
	Med	Uten	Differanse
Losna (m ³ /s)	2411.72	2411.71	0.01
Elverum (m ³ /s)	3382.92	3382.81	0.11
Øyeren (m ³ /s)	3580.00	3580.00	0.00
Sarpsborg (m ³ /s)	3593.13	3593.13	0.00

Tabell 2.8 Beregnet virkning av flomsikringstiltak på flomforhold i Glommavassdraget.

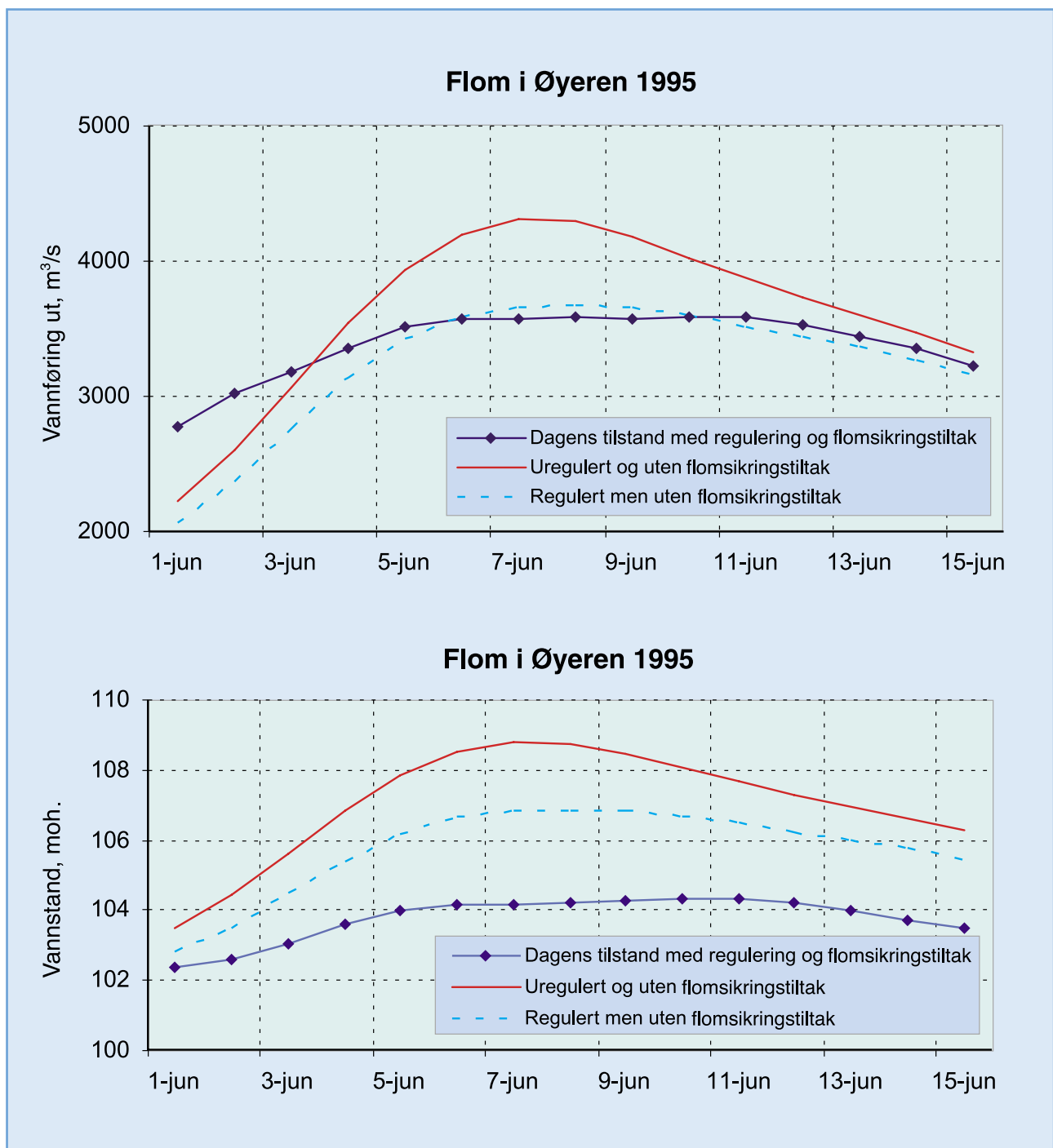
	Med	Uten	Differanse
1995			
Losna (m ³ /s)	2411.72	2410.89	0.83
Elverum (m ³ /s)	3382.92	3383.11	-0.19
Ved Funnefoss (m ³ /s)	3241.61	3227.79	13.82
Øyeren (moh.)	104.32	106.84	2.52
Sarpsborg (m ³ /s)	3593.13	3681.28	-88.15
1984			
Losna (m ³ /s)	1524.63	1524.32	0.31
Elverum (m ³ /s)	1127.43	1127.43	0.00

I Øyeren viser beregningen at summen av flomsikrings-tiltak har medført at flomvannstanden er redusert med 2,52 meter. Her virker flomsikringstiltakene helt forskjellig fra strekningene lenger opp, fordi de tekniske inngrep er forskjellige. Etter storflommene i 1966 og 1967 ble det utført kanalisering og økning av tappeskapiteten ut av Øyeren. Dette medførte at en i dag er i stand til å avlede mye større flommer enn før ved samme vannstand. Vannstanden i 1995 ble senket betydelig, sammenliknet med det en ville hatt uten disse tiltakene. Dette gir da en reduksjon i flomvannføring, rett og slett fordi dette er formålet med de tiltak som er utført. Det kan kanskje

virke noe merkelig at dette også har medført at vannføringen nedover mot Sarpsborg er blitt beregnet til 88 m³/s mindre i dagens situasjon, enn for situasjonen uten flomsikringstiltak. Forklaringen ligger i at den totale flomavledningskapasitet i dag inkluderer både tapping i luker og kraftverk samt overløp, mens situasjonen uten flomsikringstiltak inkluderer bare tapping i kraftverk og overløp over dammen. En må se på hele flomforløpet for å forstå hvordan de forskjellige tiltak har virket inn på flomforløp i Øyeren. Figur 2.11 viser både vannføring ut av Øyeren og vannstand i Øyeren for de tre interessante situasjonene:



Figur 2.10 Beregnet virkning av flomsikringstiltak oppstrøms Losna.



Figur 2.11 Detaljert flomforløp i Øyeren under flommen i juni 1995.

- Dagens tilstand (med både regulering og flomsikringstiltak)
- Upåvirket tilstand (uregulert og uten flomsikringstiltak)
- Regulert tilstand, men uten flomsikringstiltak.

Flommen i upåvirket tilstand ville ha gitt en flomtopp omkring 7. juni med maksimal vannføring omkring 4300 m³/s og maksimal vannstand på ca. 108,8 moh. En situasjon med regulering, men uten flomsikringstiltak ville ha senket vannstanden ned til ca. 106,9 moh. med maksimal vannføring ut på 3672 m³/s og med kulminasjon en dag senere, 8. juni. Det virkelige flomforløpet ga en enda lavere flomvannstand med kulminasjon omkring 104,3 moh. og med maksimalt avløp på 3580 m³/s den 11. juni (Figur 2.11).

Flomsikringstiltakene i Øyeren medførte derfor en betydelig reduksjon av flomvannstanden der. På grunn av økt tapping i tiden før selve flomkulminasjonen medførte dette også at flomvannføring ut ble noe redusert slik en ser på øverste del av Figur 2.11. Et annet flomforløp kunne ha gitt et annet resultat med hensyn på vannføring ut. Det er bare i perioden fra 7. til 10. juni at vannføringen for alternativet uten flomsikringstiltak blir høyere, mens vannstanden ligger betydelig høyere i hele perioden (Figur 2.11). Utenom Øyeren er virkningene av flomsikringstiltak i resten av vassdraget små når det gjelder vannføringer, mens vannstanden lokalt kan heves på grunn av flomverk. Slike flomverk gir imidlertid liten virkning videre nedover i vassdraget.

Virkning av vannkraftreguleringer. Konklusjonen fra modellstudiene viser at det, med unntak av situasjonen i Øyeren, er virkninger fra vannkraftreguleringene og i særlig grad magasinene som dominerer fullstendig. En kan derfor for alle praktiske formål konkludere med at de endringene i flomforhold som er beregnet og oppsummert i Tabell 2.9, i all hovedsak skyldes vannkraftmagasinene og deres flomdempende virkning. Hele flomforløpet på de 5 stedene er oppsummert grafisk i Figurene 2.12 – 2.16, med regulert og uregulert flom (vannføring eller vannstand). Andre typer inngrep synes ikke å ha hatt noen nevneverdig innvirkning, med unntak av senkningstiltakene i utløpet av Øyeren (Figur 2.11) og små lokale virkninger på strekningen mellom Elverum og nedover mot samløp med Vorma. Her vil flomverkene føre til noe økt vannstand, økt vannføring og noe redusert transporttid på vannet. Også disse

effektene er små i forhold til vannføringen i hovedvassdraget, og når dette jevnes ut i Øyeren blir videre innvirkning nedover mot utløpet svært liten. Det kan knyttes en kommentar til resultatene ved Elverum for 1984-flommen. Her er det tilsynelatende en økning i flom pga. regulering og andre inngrep. Dette er ikke reelt, årsaken er at det i 1984 bare var flom i Lågen-delen og ikke i Glomma. Den lille endringen fra regulert til uregulert ligger innenfor usikkerheten i datagrunnlaget.

Øyeren er spesiell fordi en her har utført omfattende flomsikringstiltak med formål å senke vannstanden under flom ved å øke tappekapasiteten ut av sjøen. Samtidig er det bygget ut kraftverk med betydelig tappekapasitet, noe som også medfører en mulighet for å senke flomvannstanden. På grunnlag av modellanalysen kan en konkludere med at summen av reguleringer og flomdempende tiltak reduserte flomvannstanden i Øyeren i 1995 med ca. 4,5 m. Av dette skyldtes ca. 1,9 m reguleringsmagasin i Glomma og Lågen, flomsenkningstiltak i utløpet av Øyeren bidro med ca. 2,2 m reduksjon og resten, ca. 0,4 m, ser ut til å stamme fra forhåndstapping fra Øyeren og manøvreringen av Mjøsa under flommen.

OPPSUMMERING

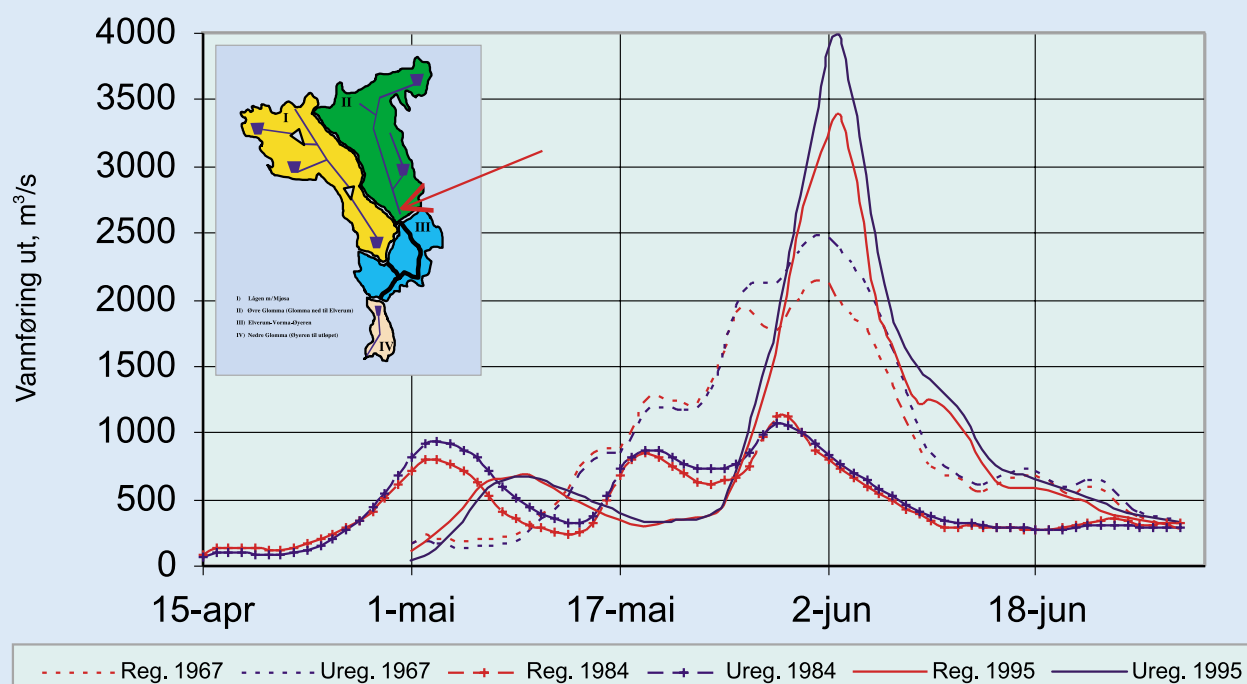
Analyseresultater med Vassdragsmodell HYDRA for Glommavassdraget kan oppsummeres i noen få hovedpunkter:

- Flomforholdene i Glomma er blitt endret pga. menneskelig påvirkning i vassdraget.
- Endringene har ført til reduserte flommer i vassdraget.
- Årsaken til endringene er i alt vesentlig at magasiner bygget for vannkraftregulering demper flommer.
- Urbanisering medfører lokalt en økning i flommer, men i svært liten skala. Virkninger i hovedvassdraget er små, og fører til knapt målbare endringer.
- Flomverk medfører en liten lokal økning i vannstand og en liten økning i vannføring nedstrøms. Virkninger av noe omfang finnes bare på strekningen fra Elverum til Kongsvinger, der de største flomverk i Glomma finnes.
- Endringer i skogbruk og skogtilstand har ikke ført til målbare endringer i flomforhold.

Tabell 2.9 Resultater ved flomkulminasjon for de tre utvalgte flomepisoder 1995, 1984 og 1967. Upåvirket tilstand (naturtilstand), dagens tilstand og differanse i vannføring eller vannstand er gitt.

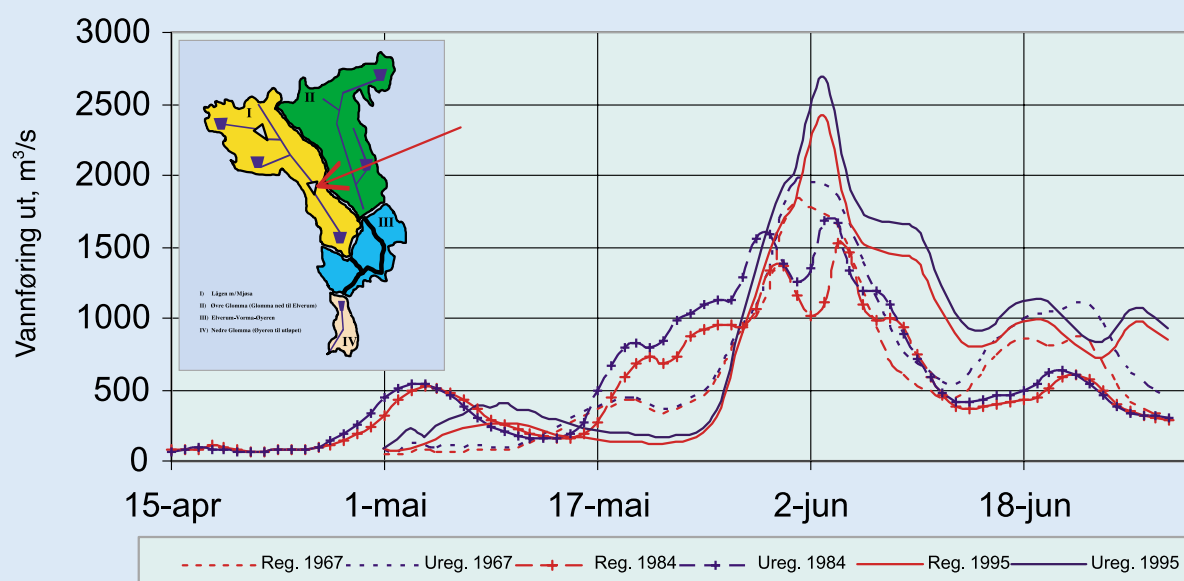
1995-FLOMFORLØP				
Vannføring (m³/s) ved kulminasjon	Losna	Elverum	Øyeren	Sarpsborg
Upåvirket	2689	3985	4303	4318
Dagens tilstand	2412	3383	3580	3593
Reduksjon i vannføring (%)	10.3	15.1	16.8	16.8
Vannstand (moh.) ved kulminasjon	Øyeren	Mjøsa		
Upåvirket	108.78	125.98		
Dagens tilstand	104.32	125.67		
Reduksjon i vannstand (m)	4.46	0.31		
1984-FLOMFORLØP				
Vannføring (m³/s) ved kulminasjon	Losna	Elverum	Øyeren	Sarpsborg
Upåvirket	1671	1078	2109	2112
Dagens tilstand	1525	1127	2029	2026
Reduksjon i vannføring (%)	8.7	-4.6	3.8	4.2
Vannstand (moh.) ved kulminasjon	Øyeren	Mjøsa		
Upåvirket	103.18	124.85		
Dagens tilstand	102.04	123.77		
Reduksjon i vannstand (m)	1.14	1.08		
1967-FLOMFORLØP				
Vannføring (m³/s) ved kulminasjon	Losna	Elverum	Øyeren	Sarpsborg
Upåvirket	1989	2490	3986	3992
Dagens tilstand	1839	2144	3307	3310
Reduksjon i vannføring (%)	7.6	13.9	17.0	17.1
Vannstand (moh.) ved kulminasjon	Øyeren	Mjøsa		
Upåvirket	107.96	125.87		
Dagens tilstand	103.18	125.50		
Reduksjon i vannstand (m)	4.78	0.37		

Regulert og uregulert vannføring ved Elverum



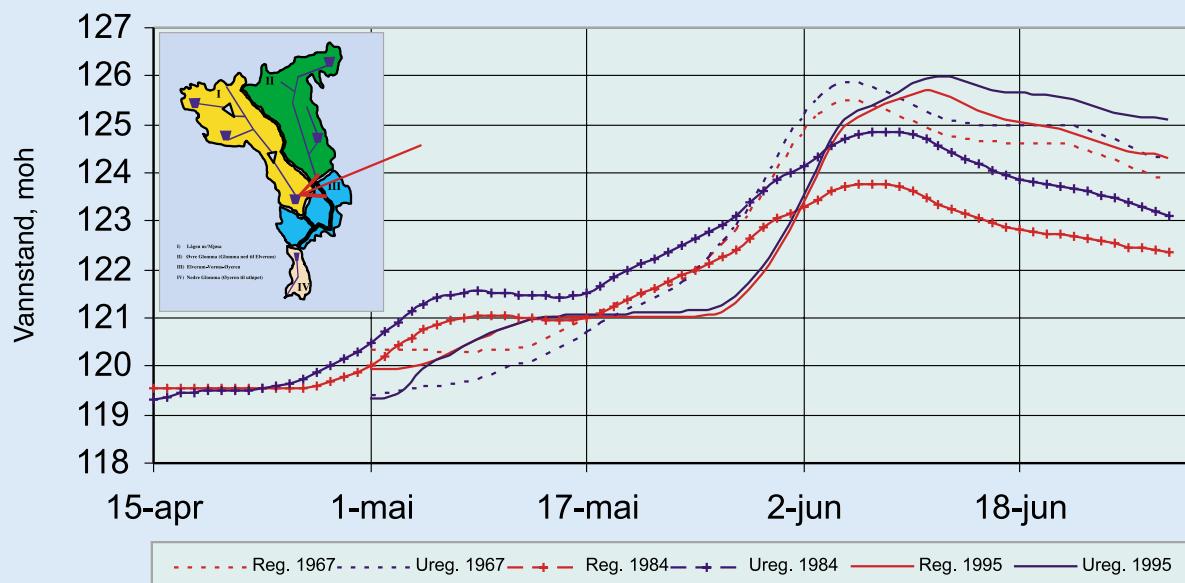
Figur 2.12 Flomforhold ved Elverum i regulert og uregulert tilstand.

Regulert og uregulert vannføring ved Losna



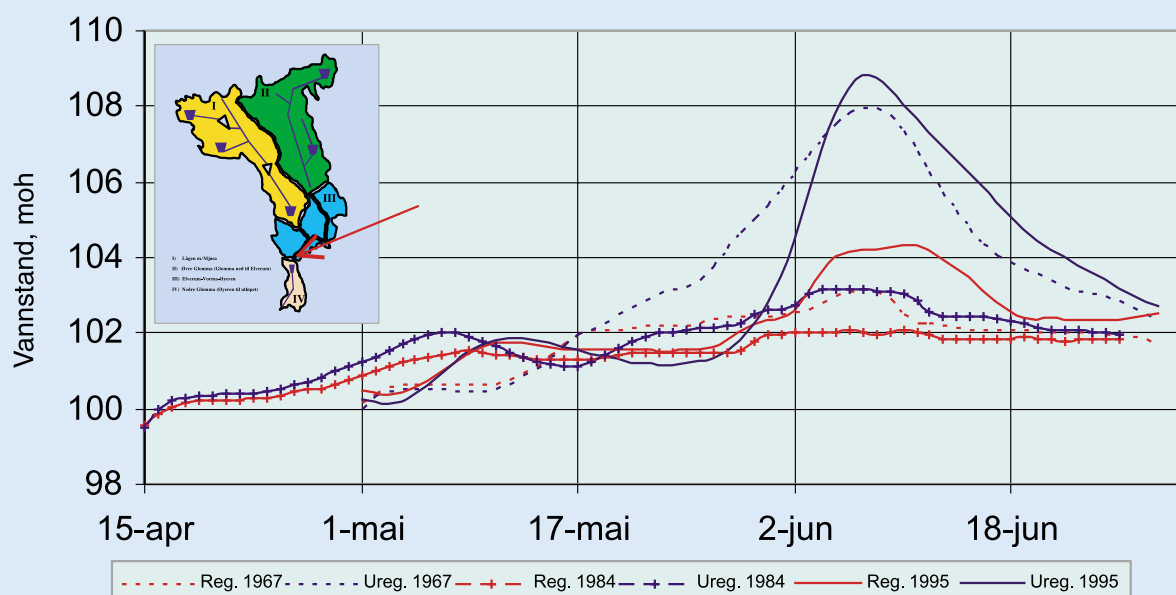
Figur 2.13 Flomforhold ved Losna i regulert og uregulert tilstand.

Regulert og uregulert vannstand i Mjøsa



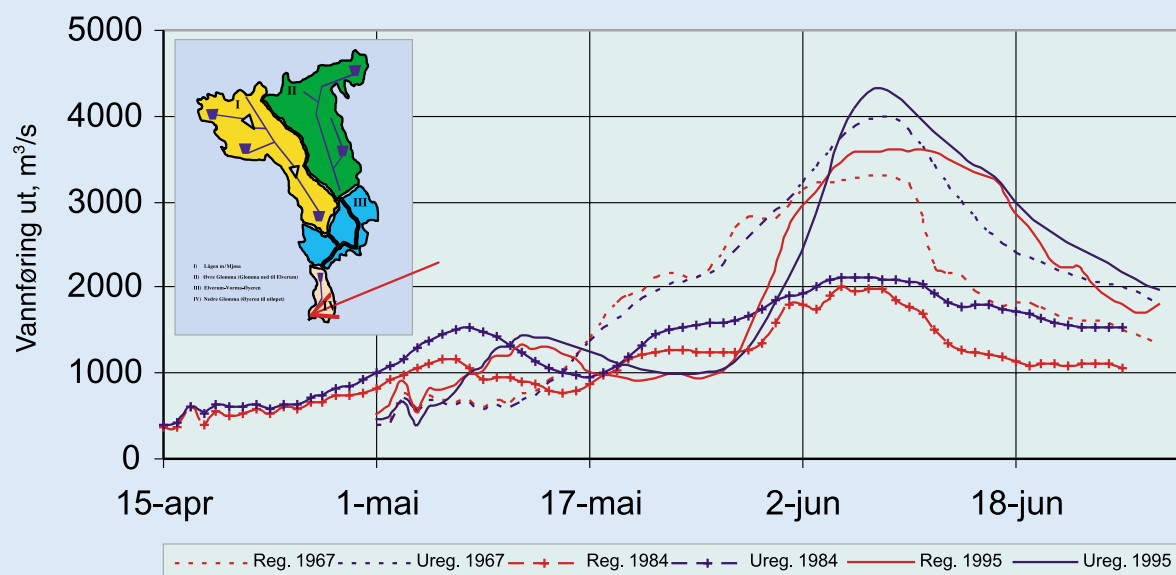
Figur 2.14 Flomforhold i Mjøsa i regulert og uregulert tilstand.

Regulert og uregulert vannstand i Øyeren



Figur 2.15 Flomforhold i Øyeren i regulert og uregulert tilstand.

Regulert og uregulert vannføring ved Sarpsborg



Figur 2.16 Flomforhold ved Sarpsborg i regulert og uregulert tilstand.

3. Tiltak mot flomskader

Tiltak mot flomskader gjennomføres før flommen som forebyggende tiltak, under selve flommen gjennom flomberedskap og krisetiltak, og etter flommen i form av opprydding og istandsetting. De viktigste typene tiltak omfatter innarbeiding av flomhensyn i arealplanleggingen i vassdragsnære områder, skaderisikoanalyser, tiltak for å sikre kommunaltekniske anlegg og andre anlegg som kan bli ødelagt eller gi forurensende utslipp ved flom, bruk av reguleringsmagasiner til flomdemping, bygging av fysiske flomsikringstiltak som flomverk, planlegging og øving på flomberedskap samt flomvarsling.

3.1 AREALPLANLEGGING I FLOMUTSATTE OMRÅDER

Gjeldende bestemmelser og ansvarsforhold knyttet til arealplanlegging og flom er innenfor HYDRA behandlet av Endresen & Lindholm (1998).

KOMMUNENS ANSVAR

Et av målene for plan- og bygningsloven (pbl) er å sikre at arealene blir disponert på en måte som ikke medfører fare. I arealplanlegging må derfor kartlegging av potensielle fareområder (f.eks. flomutsatte områder) være et viktig element. I pbl § 68 "Byggegrunn. Miljøforhold", heter det at "Grunn kan bare deles eller bebygges dersom det er tilstrekkelig sikkerhet mot fare eller vesentlig ulempe som følge av natur- eller miljøforhold. Kommunen kan for grunn eller område som nevnt i første ledd, om nødvendig nedlegge forbud mot bebyggelse eller stille særlige krav til byggegrunn, bebyggelse og uteareal". Denne bestemmelsen kan komme til anvendelse dersom det ikke er tatt tilstrekkelig hensyn til faren i planarbeidet, eller hvis det ikke foreligger plan for området.

Kommunen som planmyndighet er altså ansvarlig for å sikre en forsvarlig bruk og vern av arealer og bygninger innen kommunens grenser (jf. Rundskriv T-5/97 "Arealplanlegging og utbygging i fareområder" (KAD/MD 1997) og Retningslinjer 1-1999 "Arealbruk og sikring i flomutsatte områder" (Toverød 1999)). Rundskrevet angir blant annet at kommunen har en "selvstendig undersøkelsesplikt med hensyn til farer både ved utarbeidelsen av arealplaner og ved vurdering av dele- og byggetillatelse". Unnlater kommunen å foreta nødvendige undersøkelser, risikerer kommunen å bli erstatningsansvarlig. For å fastslå om et område er "risikoområde" må kommunen innhente tilstrekkelige fagkyndige uttalelser. I forbindelse med flom er det NVE som er fagmyndighet, og ved arealplaner er kommunen forpliktet til å innhente uttalelse fra NVE før endelige

vedtak kan fattes. Ved vurdering av flomfare vil flomsonekartleggingen som gjøres av NVE, og som for alvor kom igang gjennom HYDRA, være til stor hjelp (se eget avsnitt om flomkartlegging).

Kommunen er ansvarlig for at det ikke bygges på utrygg grunn, men er i utgangspunktet ikke forpliktet til å bære kostnadene forbundet med en eventuell sikring av området. Slike kostnader kan etter nærmere avveininger fordeles på ulike aktører. Kommunen kan ikke fraskrive seg ansvar for naturskade ved tinglyst erklæring. I rundskriv T-5/97 heter det: "Kommunen kan neppe gi bygge-/deletillatelse på betingelse av at tiltakshaver bebygger grunnen på eget ansvar" (KAD/MD 1997).

Kommunen har også plikt til å påse at endrede forutsetninger i plangrunnlaget, f.eks. nye beregninger om flomhyppighet, om nødvendig også fører til justeringer i den eksisterende plan.

I retningslinjene fra NVE som er nevnt ovenfor (Toverød 1999), er det oppstilt kriterier for arealbruk og sikring i flomutsatte områder. Kriteriene er basert på en beregnet sannsynlighet for en hendelse, og det er skilt mellom hendelser med fare for tap av liv og med fare for store materielle skader. For begge typer hendelser opereres det med sikkerhetsklasser. Det er altså snakk om differensierte sikringstiltak avhengig av sannsynlighet og type skade som kan forvoldes.

ANDRE SENTRALE AKTØRER

NVE skal kontrollere at områder med en uakseptabel stor fare for flom, erosjon eller isgang ikke bebygges. Alle planer eller byggesaker som blir berørt av slik fare skal behandles av NVE, jf. kommunens ansvar som beskrevet ovenfor. NVE kan fremme innsigelser til planer dersom forhold som berører NVEs fagfelt ikke blir tilstrekkelig ivarettatt.

Fylkesmannen skal kontrollere at foreskrevne prosedyrer i planprosessen er fulgt. Dette gjelder blant annet kommunens plikt til å innhente uttalelse fra NVE når det gjelder flomforhold, og at NVE har gitt den uttalelsen de er forpliktet til å gi. Dersom NVE har innsigelser til kommunalt planforslag og kommunen og NVE ikke kommer til enighet, skal fylkesmannen megle. Hvis meglingen ikke lykkes, sendes saken til Miljøverndepartementet for avgjørelse. Fylkesmannen har også en selvstendig innsigelsesrett dersom planforslaget innebærer ulike former for risiko, f.eks. knyttet til vassdrag.

3.2 FLOMKARTLEGGING

Begrepene som brukes om ulike typer flomkart er definert i boks 3.1.

Kartlegging av flomutsatt areal er som nevnt et viktig og nødvendig element i arealplanleggingen. Gode flomkart vil være et nyttig verktøy for kommunene ved vurdering av nye utbyggingsprosjekter og bruk av arealer. Videre vil kartene være nyttige ved prioritering av flomsikring og andre beredskapstiltak i forbindelse med flom, jf. risiko- og sårbarhetsanalyser som beskrives i Kap. 3.6.

Avgjørende for nytteverdien av flomsonekartene er selvsagt hvor riktig de flomutsatte arealene kan beregnes i forhold til en reell situasjon. Forbedring av metodikken for flomkartlegging har derfor vært et viktig prosjekt innenfor HYDRA (Boks 3.2).

I tillegg til metodeutviklingen, har et viktig produkt av prosjektet vært flomsonekart for gjentakintervall på 10 år, 50 år (1966-flommen) og 100-200 år (Vesleofsen i 1995) for elveslettene Kongsvinger, Kirkenær, Flisa, Heradsbygd, Elverum, Øksna, Koppang og Alvdal i Glomma og Trysil i Trysilelva. Anvendelsesområdet for flomsonekart vil først og fremst være innenfor arealbruk- og beredskapsplanlegging.

Eksempel på flomarealkart og flomsonekart er vist i Figurene 3.1 og 3.2. Flomarealkartet er for Vesleofsen i 1995 for strekningen Lauta – Kirkenær, og flomsonekartet er for Kirkenær for en 50-årsflom.

FRAMSTILLING AV FLOMSONEKART

Hensikten med flomsonekart er som nevnt å identifisere de arealer som er flomutsatt (for en flom med et gitt

Boks 3.1

Definisjoner knyttet til flomkart

Flomkart brukes som samlebetegnelse på kart med flom som tema.

Flomsonekart defineres som kart som viser forventet oversvømt areal (dvs. flomsone) ved en flom med gitt gjentakintervall.

Flomarealkart defineres som kart som viser den faktiske flomutbredelsen ved en historisk flomhendelse.

I tillegg finnes **faresonekart** som kan inkludere andre faremomenter enn høy vannstand, f.eks. vannhastighet, massetransport og avlagring, og konsekvenser av dette.

gjentakintervall), og presentere arealene på kart. Man trenger da kjennskap til høyden på terrenget langs elva og vannstanden (vannlinjen) for den aktuelle flommen. Per definisjon skal flomsone være knyttet til et gjentakintervall. Før analysen av oversvømt areal kan gjøres, må det derfor foreligge en flomfrekvensanalyse. Fra denne velges et utvalg av flomstørrelser for fremstilling på flomsonekart; f. eks. 10-, 50- og 100-års flom. Forbedret metodikk for flomfrekvensanalyse har vært et eget stort prosjekt innenfor HYDRA (Boks 3.3).

Kvaliteten på flomsonekartet er avhengig av hvor god terrengmodellen (dvs. beskrivelsen av terrenget i en rutenettsmodell) er, hvor korrekt vannlinjen for den spesifiserte flommen er og hvor god selve metoden for å trekke de to høydemodellene (terreng og vannflate) fra hverandre er. Det endelige flomsonekartet er beheftet

Boks 3.2

Framstilling av flomkart – metodeutvikling

Forbedring av metodikken for flomsoneanalyse har vært et viktig prosjekt innenfor HYDRA. Forskjellige metoder for beregning av vannlinjer og terrengmodeller og konstruksjon av flomkart har blitt vurdert. For vannlinjeberegninger gir bruk av kalibrerte matematiske hydrauliske modeller de beste resultatene, fulgt av parallellforskyvning av registrerte historiske flomlinjer. Parallellforskyvning av vannlinjer fra normale vassføringsforhold kan lokalt gi store feil. For å produsere terrengmodeller er det testet høyder hentet fra flere datakilder: 1) Standard M711 kart med 20 m ekvidistanse, 2) Økonomisk kartgrunnlag med

5 m ekvidistanse samt annen høydeinformasjon fra elvebredd og veier, 3) Flyfoto og 4) Laserscanning fra fly. Høydemodeller fra de to siste datakildene samt observerte flomlinjer har fungert som "fasit". Et generelt problem med å bruke høydedata fra kartkoter er at terrengmodellen blir veldig grov. Dette kan forbedres betydelig ved å ta med annen høydebærende informasjon fra f.eks. veier, elver og andre høydebestemte punkter. Flomsonekart basert på økonomisk kartverk kan være tilfredsstillende for statistiske formål og kost-nytteanalyse, men ikke for detaljert flomsonekart. Da er det nødvendig med ny, detaljert høydekartlegging av terreng og skadeobjekter.

En mer inngående beskrivelse av flomkartprosjektet og metodeutviklingen finnes i Kristensen & Voksø (1998) og Sælthun et al. (1999).

Boks 3.3

Flomfrekvensanalyse

Flomfrekvensanalyse er et viktig element både ved utarbeiding av flomsonekart og i risikoanalyse. Norge har et godt utbygd nettverk av hydrologiske målestasjoner, med kontinuerlige måleserier på opptil 150 år. Selv i en så gunstig situasjon innebærer estimering av sjeldne flomstørrelser store usikkerheter. Usikkerheten økes ytterligere ved at mange elver i Norge er regulerte og ved ukjent innflytelse fra andre parametre som har endret seg med tiden, f.eks. areal- og vassdragsinngrep og naturlige og menneskeskapte klimaendringer. Noen usikkerhetskilder kan reduseres ved å kombinere lokale og regionale flomdata.

I HYDRA er det prøvd ut forbedret metodikk for regional flomfrekvensanalyse (Sælthun et al. 1999). Videre er usikkerheten knyttet til flomfrekvensanalyse estimert i risikoanalysesammenheng (jf. Kap. 3.3).

I Norge har regional flomfrekvensanalyse tradisjonelt blitt basert på indeksflom-metoden uten å ta hensyn til innflytelsen av nedbørfeltets størrelse. HYDRA-programmet har anvendt en metode utviklet av Gottschalk & Weingartner (1998), som tar hensyn til feltarealets størrelse. Den regionale analysen for Glomma (basert på 35 stasjoner med nedbørfelt fra 40 til 40 000 km²) indikerer at 1000-årsflommen er rundt 4,7 ganger middelflommen for et felt på 100 km² og ca. 3,2 ganger middelflommen for et felt på 10 000 km² (Sælthun et al. 1999).

med usikkerhet som stammer fra usikkerheten i inngangsdataene og analysene. For eksempel kan det være betydelig usikkerhet i vannlinjen som beregnes fra en hydraulisk modell. Denne usikkerheten kan skyldes både usikkerhet i vannføringskurven (hvor mye vann renner det faktisk i elva?) og statistisk usikkerhet i flomfrekvensanalysen (hvor stor er egentlig 100-årsflommen?). Dersom det finnes gode data for kalibrering av vannlinjen mot en kjent vannføring, kan den delen av usikkerheten bortimot elimineres, men den statistiske usikkerheten i flomfrekvens vil alltid være der.

Evaluerings av kvaliteten på flomsonekartene vil typisk kunne skje etter store flommer. Ved fotografering av oversvømt areal får man et flomarealkart. Ved å sammenlikne dette kartet med flomsonekartet for en flom med samme størrelse, kan man se i hvilken grad det er overensstemmelse i oversvømt areal. Under Vesleofsen ble oversvømte arealer langs Glomma, Lågen og Trysil-elva fotografert så nær kulminasjonen som mulig. Disse flomarealkartene tjener som gode "fasitgrunnlag" ved utarbeiding av flomsonekart i de samme områder.

Avvik i oversvømt areal på flomsonekart i forhold til flomarealkart skyldes ikke nødvendigvis "feil" ved flomsonekartet. Det faktisk oversvømte arealet som vises på flomarealkartet er påvirket av om flomverk fungerer eller ikke. Videre vil det kunne bli bygget midlertidige voller som beskytter områder som normalt vil bli oversvømt. Det kan også skje ekstraordinære oppstuvninger som følge av blokkering av elveløp med is, rekved eller annet. I tillegg vil gjentakintervallene kunne variere mellom ulike deler av vassdraget.

3.3 RISIKOANALYSE

Flomrisiko kan defineres som forventet skade eller tap på grunn av flom. Risikobegrepet omfatter altså både skadeomfanget og sannsynligheten for at skaden inntrer. Flomrisikoanalyse er et viktig grunnlag ved økonomiske kost-nytteanalyser av flomtiltak. Innenfor HYDRA har det vært arbeidet med å forbedre metodikken for slike analyser (Sælthun et al. 1999). En fullstendig økonomisk risikoanalyse for et oversvømmelsesområde kan foretas dersom man har tilgjengelig:

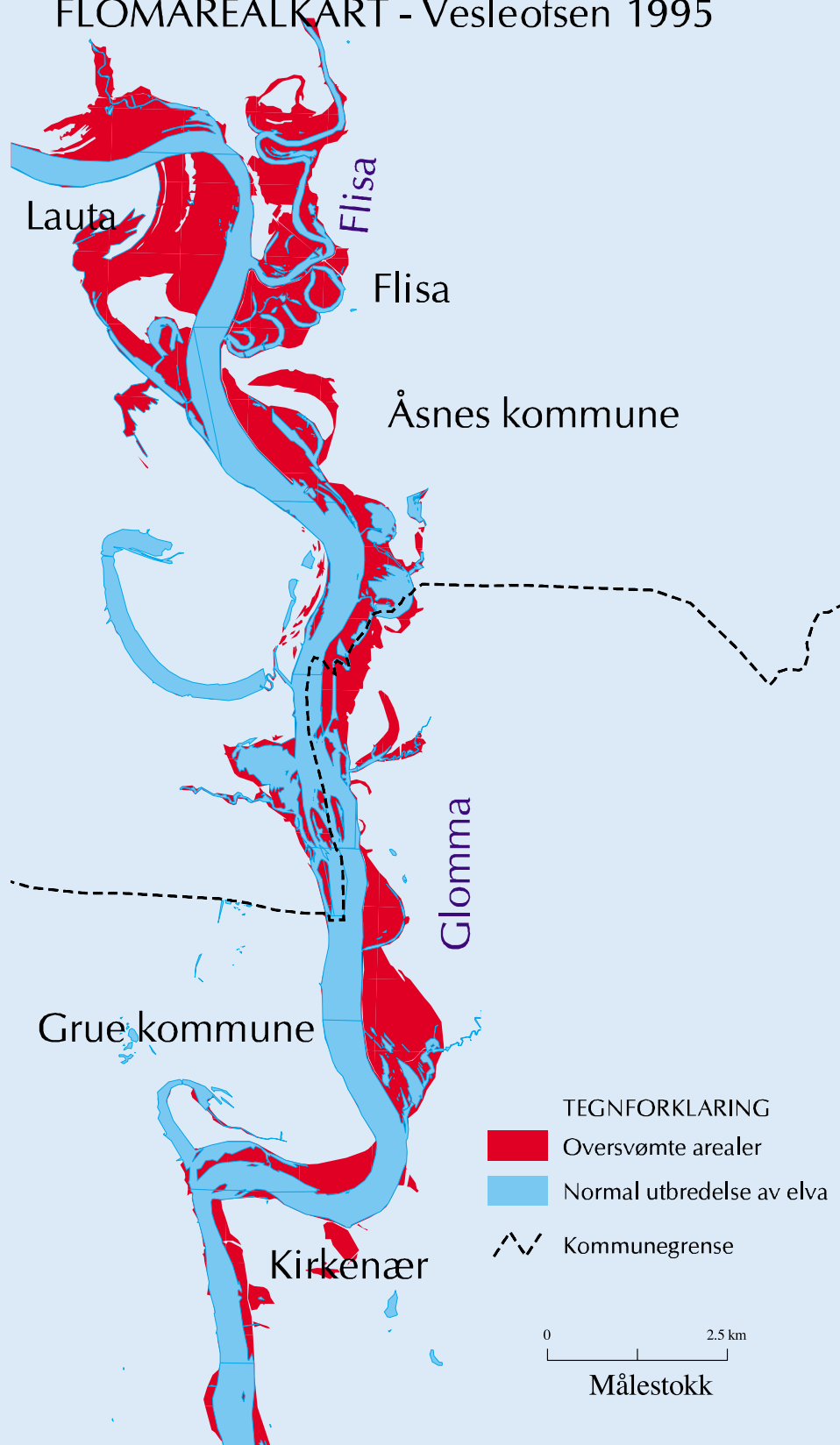
- en fullstendig skadefunksjon (jf. Kap. 1.3)
- vannføringskurve for vannmerket
- regional eller lokal flomfrekvensanalyse for vannmerket

Disse tre elementene knytter skade og sannsynligheten for skadevannstanden (alternativt flommens gjentakintervall) sammen, slik at man får en sammenheng mellom skade og sannsynlighet (risikofunksjon). Denne kan både benyttes til å beregne sannsynligheten for gitte skadenivåer, og forventet skade (gjærne uttrykt i millioner kr per år). Analysen er naturlig nok begrenset til de skadetyperne som er inkludert i skadefunksjon(ene). Etablering av skadefunksjoner er beskrevet i Kap. 1.3, og mer detaljert av Sælthun et al. (1999).

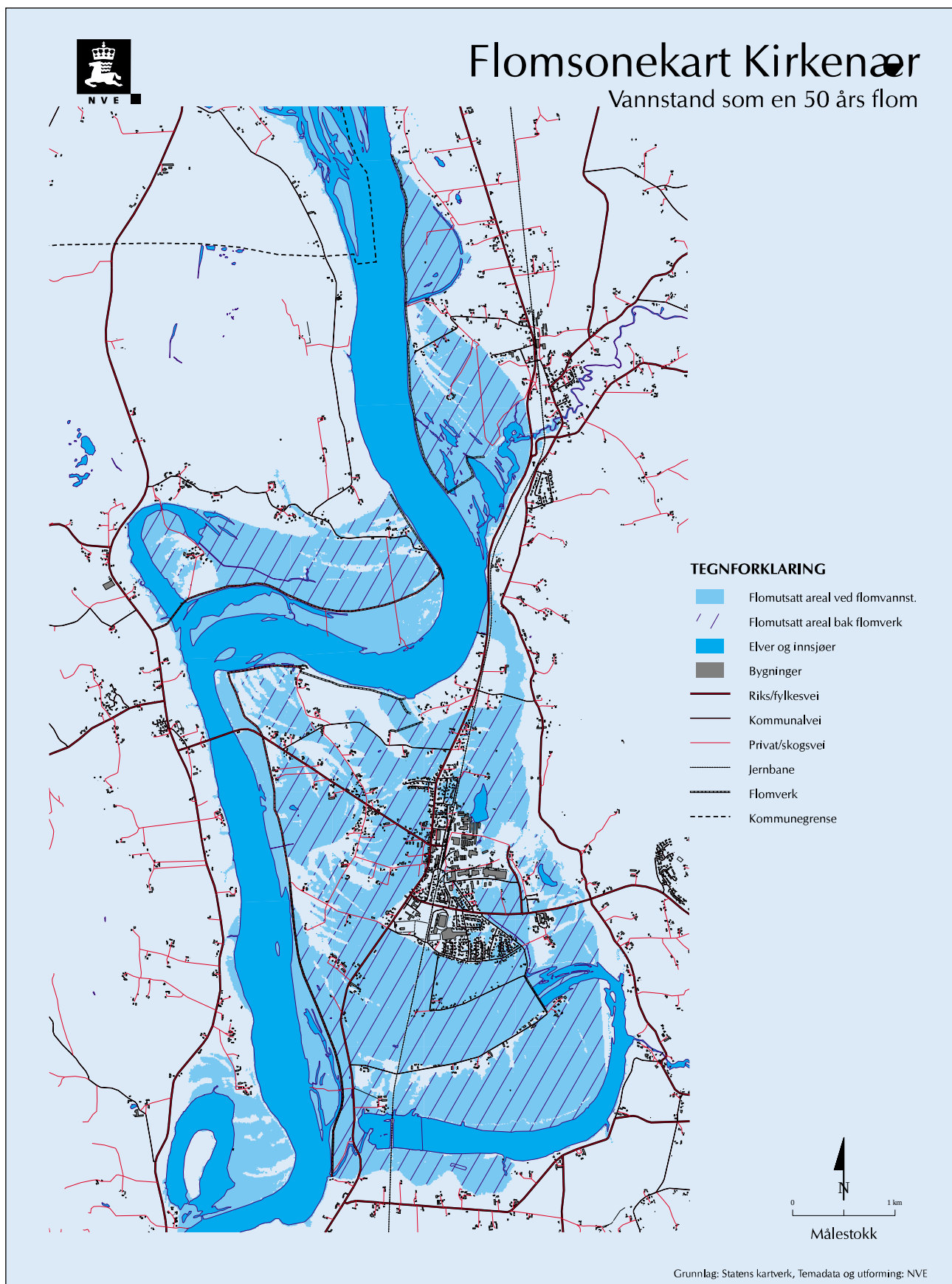
RISIKOANALYSE FOR BYGNINGER

Som en pilotstudie på risikoanalyse, ble det i HYDRA valgt å se på bygninger på flomsletta i Grue og Åsnes, en strekning på 32 km oppstrøms Kongsvinger. Det ble etablert sammenhenger mellom skade/vannstand og skade/sannsynlighet for bygninger i dette området, med grunnlagsdata fra Vesleofsen i 1995 (jf. Kap. 1.4). Skade/vannstandkurvene er etablert både for en hypotetisk situasjon med dagens bebyggelse, men uten flomverk, og for dagens flomverker.

FLOMAREALKART - Vesleofsen 1995



Figur 3.1 Flomarealkart fra kommunene Åsnes og Grue under Vesleofsen i 1995.



Figur 3.2 Flomsonekart for Kirkenær for 50-årsflom.

Analysen baserer seg på følgende informasjon:

- Forenklet skadefunksjon for bygninger. Bare to skadeklasser er benyttet: Lav skade - bare oversvømmelse i kjeller, 48 000 kr per bygning. Høy skade - oversvømmelse i første etasje og høyere, 410 000 kr per bygning.
- Sokkelhøyden på bygningene i Grue og Åsnes kommuner hentet fra en detaljert terrengmodell.
- Vannstand/vannføringskurven for Nor/Norsfoss ved nedre ende av strekningen.
- Vannlinje for strekningen, basert på en empirisk sammenheng mellom vannlinjens helning og vannføring.
- Toppnivå for flomverkene i segmenter langs strekningen.

Skade/vannstand-sammenhengen med og uten flomverk er vist i Figur 3.3. Risikoen, uttrykt som forventet årlig skade, er integralet under disse kurvene, når vannstandsaksen skiftes ut med tilhørende overskridelsessannsynlighet. For den eksisterende bygningfordelingen, men uten flomverk, utgjør risikoen 50 millioner kr per år, mens den med flomverk synker til ca. 5 millioner kr. Maksimalvannstanden under flommen i 1995 var 152,36 m ved Nor. Dette er over dimensjonerende vannstand for flomverkene i det aktuelle området, og i følge Figur 3.3 skulle skadene på bygninger vært ca. 900 millioner kr. Ved hjelp av midlertidig påbygning klarte man å unngå overtopping av de viktigste flomverkene, bl.a. Kirkenær-verket, og skadene ble redusert til i størrelsesorden 100 millioner kr (Kilde: Naturskadepoolen). Det viktigste avviket mellom beregninger fra risikoanalysen og faktisk, observert skade, skyldes altså at flomverkene ble midlertidig forsterket.

Usikkerhetene er estimert for alle faktorer som inngår. Analysen viser at usikkerheten i flomfrekvensanalysen dominerer, i særdeleshet når lokal informasjon mangler. Det nest største bidraget kommer fra usikkerheten i vannstand-/vannføringsrelasjonen.

Det ble også foretatt en risikoanalyse for Kirkenær både med dagens bygningsmasse og bebyggelsen slik den var i 1996. Med de flomverkene man har nå er den økonomiske risikoen, gitt som forventet årlig skade, beregnet til 4,9 millioner kr, mens bebyggelsen fra 1966 gir en økonomisk risiko på 3,7 millioner kr. Endringen i antallet bygninger alene gir altså en økning av risikoen på 32 % over 30 år. I tillegg kommer økning som skyldes endring i skadefunksjonene, ved at dagens bygninger sannsynligvis er mer sårbare enn sekstitallets bygningsmasse.

RISIKOANALYSE FOR ANDRE SKADEOBJEKTER

Metodikken for risikoanalyse som ble anvendt for bygninger, kan i prinsippet anvendes for alle typer objekter hvis skaden primært er avhengig av lokal vannstand. Dette gjelder enten den generaliserte skadefunksjonen (skade per objekt, lengde eller areal) er gitt som en kontinuerlig funksjon (bygninger), en trappefunksjon (jernbane eller bygninger hvis man kun opererer med to skadeklasser, jf. ovenfor), eller av/på-funksjon (flomverker). Mer komplisert blir det når det er nødvendig å benytte flere skadeprediktorer (forklaringsvariable) slik som ved skader på jordbruksareal. Her kommer bl.a. helning på vannlinjen (dvs. vannhastighet) inn som en viktig prediktor i tillegg til vannstand.

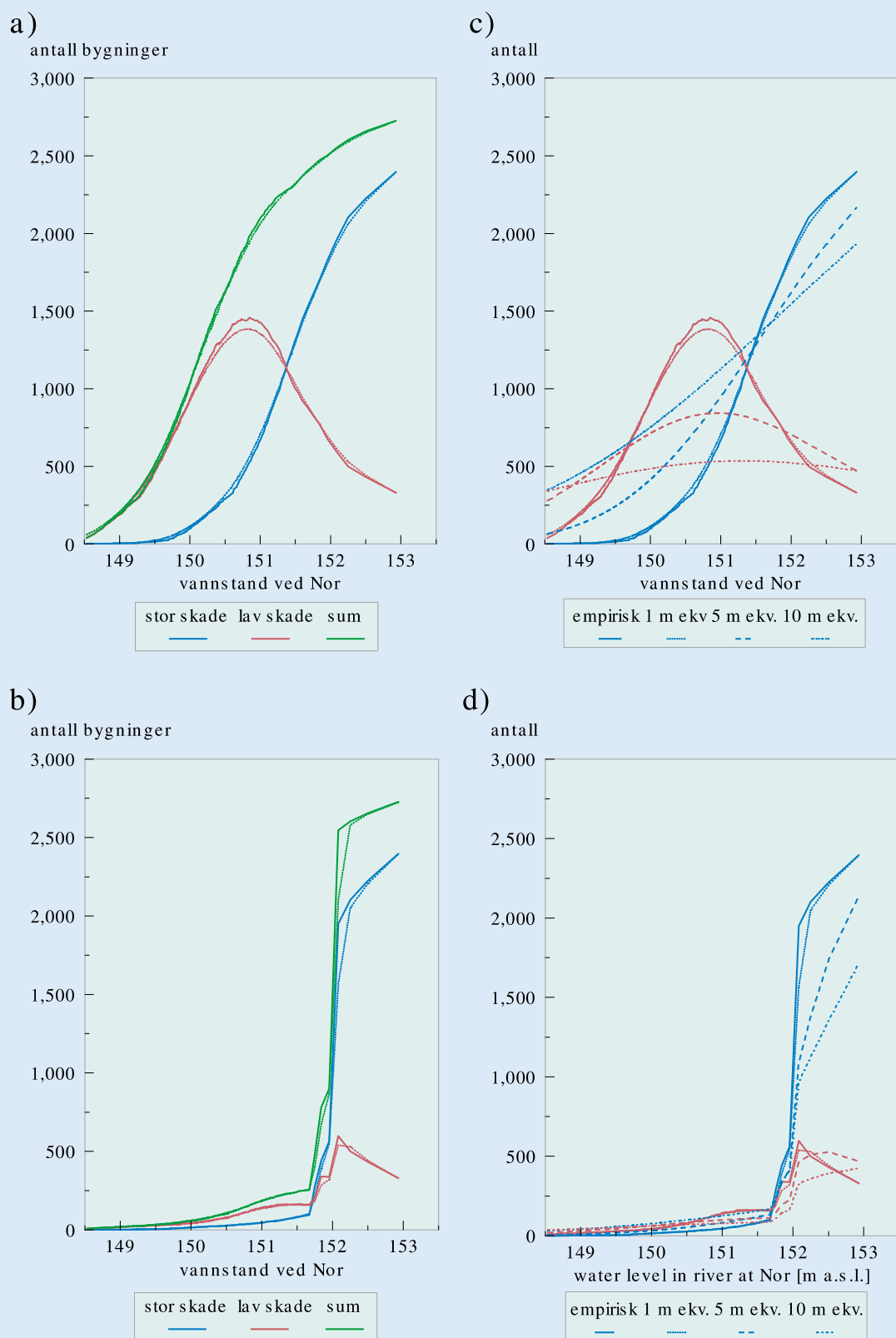
OVERFØRBARHET TIL ANDRE VASSDRAG

Metodikken for risikoanalyse som er anvendt innenfor HYDRA for bygninger langs Glomma i Solør (jf. ovenfor), er generelt overførbart til andre vassdrag hvor man kan etablere den nødvendige grunnlagsinformasjonen, dvs. vannstand og vannføringskurver, flomfrekvensanalyse, flomsoneanalyse, generaliserte skadefunksjoner og den romlige fordelingen av skadeobjekter. Med unntak av skadefunksjonene, kan alle de andre elementene i prinsippet bestemmes a priori for et hvert potensielt oversvømmelsesområde ved bruk av eksisterende data/modeller og kartanalyse, evt. registrering og oppmåling i marken. Spørsmålet om overførbarhet blir dermed et spørsmål om overførbarhet av skadefunksjonene. Risikoanalysen og skadefunksjonene som ble etablert innenfor HYDRA var basert på skaderegistreringer fra Vesleofsen i 1995, dvs. en vårflo i et stort østlandsvassdrag, og det blir da spørsmål om disse registreringene er overførbare i rom (dvs. fra sted til sted), sesong og tid.

Overførbarhet i rom vil for bygninger først og fremst være et spørsmål om byggeskikk. Skadefunksjonen gjelder ikke dersom byggeskikk, hustype eller størrelse varierer mye fra sted til sted. Skadefunksjonene for jord- og avlingsskader er trolig også vanskelig overførbare, mens funksjonene for vei, jernbane og flomsikringstiltak sannsynligvis er nokså generelle.

Overførbarhet i sesong er mest problematisk for jordbrukskadene. Eroderbarhet og avlingsskader er klart sesongavhengig. For de andre skadefunksjonene er overførbarheten trolig god.

Overførbarhet i tid kan være problematisk for jordbrukskadene i og med at avlingstype og jordbrukspraksis endrer seg. For bygninger har alder en viss betydning for skadefunksjonen, men dette ser mer ut til å skyldes variasjoner i byggeskikk enn forringelse med tiden. For veier og jernbane vil skadefunksjonene sannsynligvis være relativt konstante over tid.



Figur 3.3 Antall bygninger oversvømt med lav skade (rød kurve), høy skade (blå kurve) og sum av de to (grønn kurve) som funksjon av vannstand ved Nor. a) og c) ser bort fra effekten av flomverk, mens b) og d) inkluderer flomverk. c) og d) illustrerer betydningen av nøyaktigheten i kartgrunnlaget.

3.4 KOMMUNALTEKNISKE TILTAK

Flommer, som f.eks. 1995-flommen i Glommavassdraget, forårsaker betydelige fysiske og funksjonelle skader på kommunal infrastruktur. Skadene rammer vannforsyning, avløp, renovasjon, veier, jernbane, stier, anlegg for rekreasjon og strømforsyning (Sælthun & Lindholm 1999). Erfaringer fra storflommer i Tyskland viser at skadeomfanget på kommunal infrastruktur kan reduseres betydelig gjennom forebyggende tiltak og gode forberedelser. Tiltakene kan også forhindre at kommunal infrastruktur settes ut av drift under flom. I tillegg til fysiske skader på vassdragsnær infrastruktur, ligger det betydelige risikomomenter knyttet til forurensninger og utslipp fra infrastruktur som avløps- og renovasjonsanlegg under flom.

VANNFORSYNING

Vannforsyning er en vital funksjon i samfunnet og det bør være et absolutt krav at tilnærmet normal vannforsyning kan opprettholdes under flom, både når det gjelder helsemessig sikkerhet og tilgang på vann. Tiltak for å sikre vannforsyningen kan være:

- å etablere en tilfredsstillende reservevannforsyning
- å montere elektrisk utstyr for vannforsyning over flomnivå så langt som mulig
- å sørge for nødstrømforsyning til behandlingsanlegg og pumpestasjoner
- å erstatte elektrisk utstyr for manøvrering av ventiler og luker med hydraulisk eller lufttrykkdrevet utstyr
- å innføre forbud mot å bruke vann fra vannforsyningsnettet til å fylle kjellere for å hindre tilbakestuving av spillvann under flom
- å forsterke, beskytte og heve vanninntak i vassdrag for å hindre skader eller nedslamming av inntak
- å forlenge brønnrørene på grunnvannsbrønner
- å tette rundt brønntoppene
- å sørge for at behandlingsanlegg har tilstrekkelig kapasitet til å ta hånd om forurensninger i vannkilden
- å sikre pumpestasjoner og adkomst til disse mot flom
- å tette dreneringer, ventiler og kabelgjennomføringer under flomnivå

AVLØPSANLEGG OG AVLØPSFORHOLD

Utslipp av kloakk fra pumpestasjoner, renseanlegg og overløp er av de viktigste typene forurensning ved flom. Forebyggende tiltak rettet mot å redusere slike utslipp ved flom er derfor av stor betydning, og det er en rekke større og mindre tiltak som kan gjennomføres (jf. Sælthun & Lindholm 1999).

Boks 3.4

Flomtiltaksutvalget om kloakkutslipp under 1995-flommen:

”Flere kloakkrenseanlegg fikk problemer med driften, slik at en del avløpsvann gikk urensset ut i vassdragene. En rekke pumpestasjoner for kloakk ble stoppet og dels demontert for å unngå skader, med samme konsekvens for vassdraget. Videre oppsto det brudd og skader på ledningsnettet blant annet ved Tretten” (NOU 1996).

Punktene som er nevnt i avsnittet om vannforsyning gjelder i like stor grad for avløpsinstallasjoner som for vannforsyningsinstallasjoner. I tillegg kommer tiltak som:

- å installere utløpspumper som muliggjør pumping til resipient
- å utvide overløpene med flomvannspumpestasjoner og sette inn tilbakeslagsventiler på overløpsledningene
- å rehabilitere/sanere ledninger for å redusere innlekking og behov for pumping
- å bygge om kummene på ledninger i områder som kan bli oversvømmet
- å begrense/utjevne overvannsmengde ved systematisk bruk av LOD (lokal overvannsdistribusjon)
- å legge om fra felles til separate systemer
- å la ledninger fra områder over flomsone gå som trykkledninger gjennom denne

Bruken av total overvannsdistribusjon (TOD) og lokal overvannsdistribusjon (LOD) i flomsammenheng er behandlet i egne prosjekter i HYDRA-programmet (Endresen 1997, 1998). TOD og LOD kan redusere de uheldige effektene urbanisering gir på avrenningsmønsteret i bekker og elver, og dermed også redusere skader på infrastruktur og de negative miljøeffektene som oppstår i flomsituasjoner. LOD/TOD bygger på to hovedtyper prosesser; infiltrasjon og fordrøyning (forsinkelse). Infiltrasjonsmetodene kan være naturlig infiltrasjon på grøntarealer, anleggelse av åpne rabatter mellom tette flater eller bruk av grøfter/magasiner. Metodene for fordrøyning kan være bruk av steinfyllinger, takarealer, parkeringsarealer, dammer, kunstige basseng eller omforming av elveløp. Ofte kombineres flere metoder i samme anlegg. I USA og Canada er bruken av TOD utstrakt, mens i Norge er systematisk bruk foreløpig mindre vanlig (Endresen 1997).

LOD/TOD har lokalt meget god flomdempende effekt. Flomdempingseffekten er imidlertid liten i hovedvassdrag, der nedbørfeltet er vesentlig større enn tettstedenes areal. Andre positive effekter som kan oppnås

lokalt ved bruk av LOD/TOD, er at grunnvannstanden og tørrværsvannføringen man hadde forut for urbaniseringen kan gjenopprettes. Dessuten kan forurensningstilførslene til vassdragene med overvann reduseres. Slike tilførsler er en viktig årsak til dårlig vannkvalitet i mange vassdrag. LOD/TOD kan også bidra til å redusere bortspyling av vannvegetasjon og redusere dødelighet hos dyr under flom. Frie vannspeil og våtmarker ansees som regel å være positive elementer i nærmiljøet, og i parkanlegg kan permanente vannspeil ofte være sentrale elementer for rekreasjonsbruken. Slike dammer i parkanlegg kan brukes i LOD/TOD-sammenheng, ved at vannstanden i dammene økes i flomsituasjoner gjennom tilførsel av overvann. Overvannsanlegg med permanent lavvannspeil kan også tjene som leveområder for en rekke plante- og dyrearter, og kan være nyttige lokalteter for undervisning i miljøfag i grunnskolen.

SIKRING AV ANLEGG FOR RENOVASJON

Forebyggende tiltak for sikring av anlegg for renovasjon under flom tar sikte på å hindre spredning av søppel, utvasking av forurensninger og at installasjoner på deponiene skades.

Aktuelle forebyggende tiltak er å montere elektrisk utstyr på deponiene over flomnivå så langt som mulig, å sikre

permanente deponier med flomvoller, å sikre provisoriske deponier for rivningsavfall mot at trematerialer og annet føres bort med flomvannet, å anlegge pumpestasjoner for pumping av overvann på deponier til resipient og å plassere søppelstativ og containere slik at de ikke tømmes ved flom.

ANDRE TYPER FORURENSNING VED FLOM

I tillegg til de forurensningene som kan oppstå fra kommunale avløps- og renovasjonsanlegg under flom, kan følgende kilder gi alvorlig forurensning ved flom:

- sedimentasjonsdammer for gruveavfall
- lagertanker, ledninger og deponier for olje og oljeprodukter (Figur 3.4)
- kjemikalier fra kjemisk industri
- kadavre

Internasjonalt finnes det eksempler på alvorlige forurensninger fra alle disse typene kilder, både i forbindelse med flom og uavhengig av flom. En viktig faktor knyttet til lagertanker, ledninger og deponier, er at selv om de vanligvis er godt sikret og fundamentert og vanligvis ikke skal bli oversvømt under flom, så kan grunnen rase ut eller installasjonene kan bli tatt av ras eller elvebrudd.



Figur 3.4 Oljespill under flommen i 1995. (Foto: FOTONOR AS)

VEIER

Det er nødvendig at viktige veier kan trafikkeres under flom, f.eks. av hensyn til mulighetene for syketransport. Aktuelle forebyggende tiltak er å heve veilinjen ved bygging av veifyllinger, eller å flytte veitraseer ut av selve flomområdet eller til steder innenfor flomområdet, der grunnforholdene tillater veibygging uten at dette gir setninger. Andre forebyggende tiltak er å erosjonssikre veiskråninger og å kombinere flomvern og veianlegg.

OPPRYDDING OG UTBEDRINGER

I etterkant av en flom vil kommunene måtte handtere avfall som stammer fra:

- opprydding av vrakgods, trær, busker og avfall på oversvømte landområder
- opprydding på innsjøer, elvestrekninger og ved utløpsområdene fra elvene
- riving og rehabilitering av ødelagte bygninger, anlegg og konstruksjoner

Rapporten fra Fylkesmannen i Hedmark etter flommen i 1995, viser at den dominerende avfallsfraksjonen fra flomoppryddingen var rivningsavfall og ødelagt løsøre fra hus og bygninger. Mesteparten av avfallet fra rehabilitering av bebyggelsen etter flommen gikk utenom det organiserte avfallssystemet, fordi de som ble rammet av flommen hadde så store avfallsmengder at det måtte leveres direkte til grovavfallsplasser (Fylkesmannen i Hedmark 1996, Sælthun & Lindholm 1999).

Det er betydelige helserisiki forbundet med opprydding etter flommer. Det er som regel ikke selve forurensningen som utgjør den største risikoen, men faktorer som fare for sammenrasning, elektriske støt, utløsning av allergi og luftveisproblemer pga. utvikling av mugg og annen mikrobakteriell vekst i fukt og stillestående vann innendørs, samt kullsforgiftning fra vannpumper og lignende. Kontakt med forurenset vann kan også være en helserisiko, spesielt når forurensningen stammer fra kilder innomhus slik at fortynningen med flomvann blir relativt liten. Forurenset vann kan også øke faren for stivkrampe ved rifter og sår.

3.5 VASSDRAGSREGULERINGER OG FLOMSIKRINGSANLEGG

FLOMDEMPINGEFFEKT AV YTTERLIGERE VASSDRAGSREGULERINGER

I Flomtiltaksutvalgets arbeid ble effekten av ca. 50 nye reguleringsprosjekter i Glomma og Lågen utredet (NOU 1996, Flood 1996). Utvalget fremhevet 10 prosjekter med betydelig flomdempende effekt. Samlet kan disse 10 reguleringene lagre nesten 1500 mill. m³ mer enn dagens magasiner, slik at reguleringsgraden i Glomma-vassdraget øker fra dagens 16 % til 23 %. I tillegg foreslo utvalget mindre tilleggsreguleringer i Osensjøen, Bygdin og Vinsteren (se Tabell 3.1).

Stortinget ga ved sin behandling av St.meld. nr. 42 ("Flommeldingen") fra april 1997 tilslutning til at flomdemping bør tillegges vesentlig større vekt enn tilfellet har vært fram til i dag. Stortinget ga sitt samtykke til at ytterligere regulering av Storsjøen i Rendalen, Osensjøen, Raudalsvann, Bygdin og Vinsteren kan plasseres administrativt i Samlet Plan (SP), slik at søknader om regulering kan fremmes. I tillegg er allerede Markbulia (minste alternativ), Tunna/Savalen og Storsjøen i Odalen plassert i SP kategori I, dvs. konsesjonssøknader kan behandles. Flomtiltaksutvalget anbefalte også ytterligere overføring av vann fra Glomma til Storsjøen i Rendalen (Burua kraftverk/flomtunnel) og Jora til Aursjø i Møre og Romsdal. Burua ses i sammenheng med en moderat regulering i Imsa og Storsjøen i Rendalen. Overføringen av Jora (SP kategori I) og regulering av Vågåvann (nytt prosjekt) gir flomdemping blant annet ved tettstedet Otta. Vågåvann har primært blitt fokusert ut fra problem med sandflukt ved lav vannstand (Tingvold 1999).

Flomdempingseffekter av ytterligere reguleringer av innsjøene i Tabell 3.1 er analysert med data fra 8 omfattende flommer i 1910, 1916, 1927, 1934, 1939, 1966, 1967, 1995 (Tabell 3.2). Alle disse flommene kulminerte i perioden mai-juli.

Hovedkonklusjonen på analysene av kulminasjonsvannføring og kulminasjonsvannstand ved de 8 storflommene, er at dagens reguleringer har hatt stor flomdempende effekt. På samme måte viser analysene at gjennomføring av de 10 reguleringsprosjektene som ble fremhevet av Flomtiltaksutvalget, supplert med et par andre aktuelle tilleggsreguleringer, har et betydelig potensiale når det gjelder videre flomdemping (Tabell 3.2). Ved gjennomføring av alle de anbefalte tilleggsreguleringene i Glomma, forventes bare mindre flomskader ved flommer av størrelse inntil 1995-flommen. I Otta, Lågen og Mjøsa ville en fortsatt måtte regne med flomskader i forbindelse med store sommer- og høstflommer (Tingvold 1999).

Tabell 3.1 Mulige reguleringer for ytterligere flomdemping i Glommavassdraget og Lågenvassdraget.

Innsjø/elv	Regulering i dag				Mulig fremtidig regulering		
	HRV moh. NN-54	Reg. høyde m	Magasin- volum mill. m ³	Årstilløp mill. m ³	Reg. høyde m	Magasin- volum *) mill. m ³	Årstilløp mill. m ³
Markbulia	858,83	2,5	1	85	19,5	39	85
Tunna/Savalen	707,54	4,7	61	40	13,1	139	210
Imsa	(618)	-	-	-	27,0	60	135
Burua	(265)	-	-	-	-	-	(3000)
Storsjøen i Rendalen	251,86	3,64	175	1100	10,64	500(+100)	1900
Osen	437,82	6,6	265	690	7,6	300(+43)	720
Raudalsvann	912,80	30,3	166	235	80,3	666	780
Vågåvann	(360)	-	-	-	2,5	75	2100
Jora	(890)	-	-	-	-	-	(240)
Bygdin	1057,63	9,15	336	410	10,65	385(+90)	460
Vinsteren	1031,73	4,0	102	150	6,1	145(+40)	195
Heimdalsvatn	1052,44	2,2	15	110	2,2	15	15
Kaldfjorden	1019,23	5,9	76	75	10,4	175	210
Totalt			1197	2895		2499	6810

*) Magasinvolym i parentes er beredskapsmagasin over HRV.

Tabell 3.2 Flomdempingseffekt av eksisterende og av ytterligere reguleringer på ulike elveavsnitt i Glommavassdraget som gjennomsnitt for 8 storflommer fra 1910 til 1995.

Reguleringer	Gj. snitt obs. kulminasjons- vannføring m ³ /s	Ved dagens regulering		Ved ytterligere regulering		
		Gj. snitt flomdemping m ³ /s	Gj. snitt beregnet kulminasjons- vannføring m ³ /s	Gj. snitt ytterligere flomdemping m ³ /s	Gj. snitt simulert kulminasjons- vannføring m ³ /s	Gj. snitt vannstands- reduksjon *) m
Glomma:						
Ovenfor Stai	1509	207	1327	275	1052	0,75 (0,50-1,05)
Ovenfor Elverum	2435	497	2000	499	1502	0,65 (0,35-1,05)
Lågen:						
Ovenfor Lalm, Otta	778	228	635	187	448	0,75 (0,40-1,10)
Ovenfor Losna	2029	432	1759	268	1491	0,40 (0,15-0,65)

*) Gjelder vannstand ved stedene nevnt i tabellen (Stai, Elverum, Lalm og Losna). Tallene i parentesene angir laveste og høyeste vannstandsreduksjon ved de 8 flommene.

YTTERLIGERE REGULERING AV MJØSA

Avløpet fra Mjøsa bestemmes av vannstanden i innsjøen, lukestillinger ved Svanfoss dam, vannføringen i Glomma og av høyden på overvannet ved Rånåsfoss kraftverk. De eksisterende reguleringene i Lågen i dag ville ha hatt en ytterligere vannstandsreduksjon i Mjøsa på gjennomsnittlig 0,45 m (fra 0,25 til 0,75 m) på storflommene tidligere på 1900-tallet. Med de foreslåtte nye prosjektene ovenfor Mjøsa ville en i tillegg kunne få en reduksjon i vannstanden på gjennomsnittlig 0,3 m (fra 0,10 til 0,45 m). I tillegg ville de nye reguleringene i Glomma resultert i mindre oppstuvning i Vormo og en ytterligere vannstandsreduksjon i Mjøsa. Ved 1995-flommen ville f.eks. denne tilleggseffekten vært på 0,2 m.

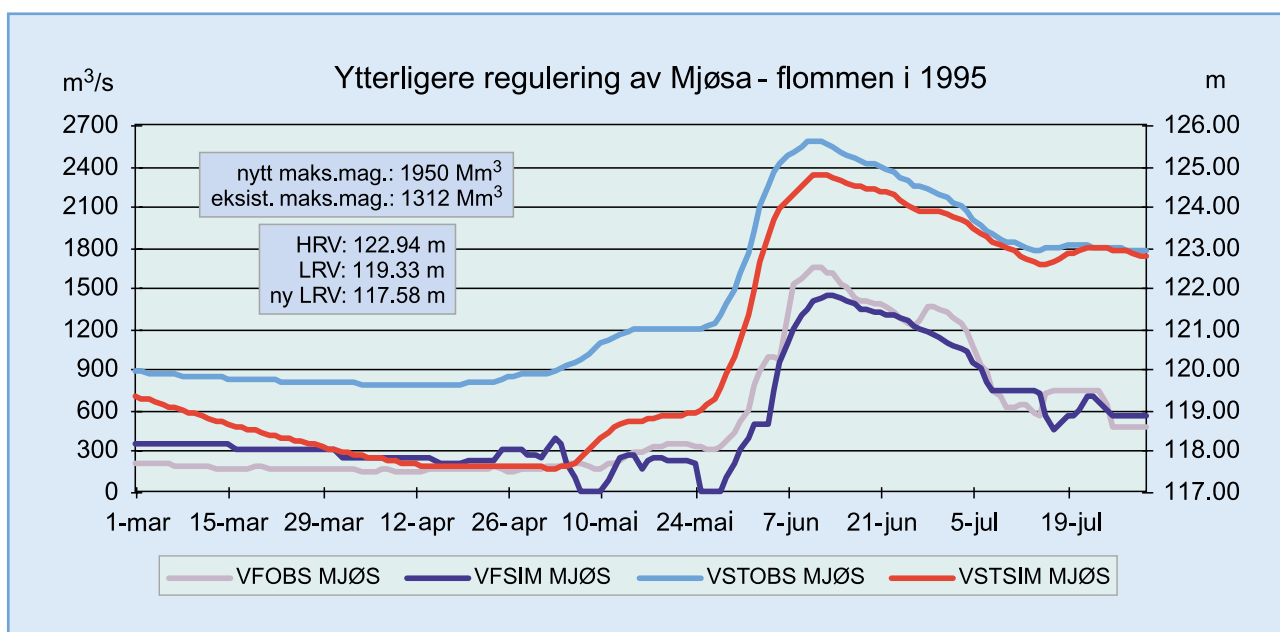
Et annet av prosjektene som Flomtiltaksutvalget anbefalte var ytterligere senking av Mjøsa med 1,75 m gjennom et pumpeverk ved Minnesund. Dette prosjektet er ikke med blant de 12 prosjektene som analysen ovenfor er basert på. Flomdempingseffekten av ytterligere regulering av Mjøsa, uavhengig av reguleringene i Lågen, er beregnet for 10 år med store snømagasin, gjennomsnittlig 150 % av det normale. Beregningene viser at flomvannstanden i Mjøsa ville kulminert 0,7 m lavere (fra 0,5 til 1,0 m) de aktuelle årene, dersom senkingsprosjektet var blitt gjennomført. I 1995 ville flomvannstanden i Mjøsa kulminert på 124,8 m, som er

0,85 m lavere enn den observerte kulminasjonsvannstanden (Figur 3.5). I tillegg ville flomvannstanden i Øyeren i 1995 kulminert 1,0 m lavere enn observert.

FLOMSIKRINGSTILTAK

I Norge har bygging av flomverk og gjennomføring av senkingstiltak foregått i statlig regi i snart 200 år. NVE har til sammen i hele landet bygget 162 flomverk med en samlet lengde på 238 km, og gjennomført 137 senkingstiltak med en samlet lengde på 279 km. I tillegg kommer 3530 erosjonssikringsanlegg med samlet lengde på 2086 km (NOU 1996).

Flomverk. Det primære formålet med flomverk har vært å redusere flomskadene lokalt. I tillegg kan flomverkene virke inn på flomforløpet i vassdraget ved å øke flomtoppen nedstrøms eller oppstrøms, der tiltakene gjennomføres og ved å forskyve tidspunktet for kulminasjonsvannføring. Bygging av flomverk i et vassdrag i Polen ble av den grunn kansellert, fordi forundersøkelser viste at det ville øke faren for oversvømmelser nedstrøms. I et annet eksempel fra øvre delen av Rhinen økte flomvannstanden noen desimeter på grunn av bygging av diker oppstrøms (referanse i Haddeland & Høydahl 1999). Konklusjonen fra undersøkelser i HYDRA-programmet av flomverk i Glommavassdraget,



Figur 3.5 Simulert flomdempende effekt av ytterligere regulering av Mjøsa ved flommen i 1995.

Tegnforklaring:

VFOBS MJØS = observert vannføring ut av Mjøsa

VFSIM MJØS = simulert vannføring ut av Mjøsa

VSTOBS MJØS = observert vannstand i Mjøsa

VTSIM MJØS = simulert vannstand i Mjøsa

viser at disse flomverkene betyr lite for størrelsen på kulminasjonsvannføringen, mens effekten på flomforløpet i tid er mer merkbar ved at flomtoppen kommer raskere, jf. eksemplene i del II (Berg et al. 1999).

Senkingstiltak. Senkingstiltak har også som hovedformål å redusere flomskadene lokalt. Innsjøer som senkes har ofte en betydelig naturlig flomdempende effekt. Ved ensidig flomsenking i slike innsjøer vil den naturlige flomdempingen reduseres, mens en ved senking også av lavvannstanden vil kunne beholde tilnærmet samme flomdempende effekt (Berg et al. 1999).

NØDOVERLØP PÅ FLOMVERK

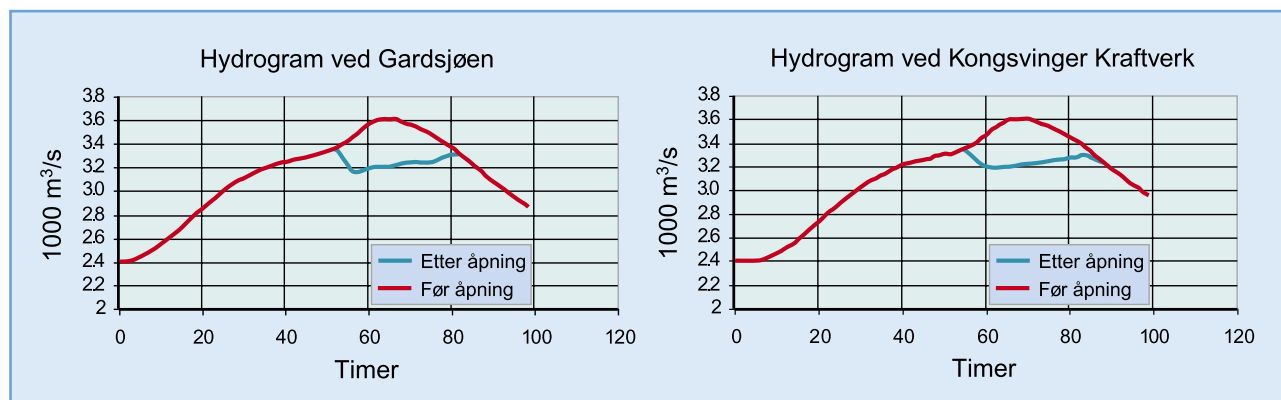
Nødoverløp på flomverk brukes for å lede vann kontrollert over eller gjennom flomverket i situasjoner hvor det er fare for ukontrollert brudd på flomverket (Figur 3.6). Hensikten er å begrense skadene ved et ukontrollert brudd. Oftest vil det være best å plassere nødoverløpet i nedstrøms ende av flomverket, fordi terrenget innenfor som regel er lavest her, slik at det raskt dannes vannspeil på innsiden som demper strømhastighet og erosjon. I tillegg vil helningen på terrenget gjøre at vannstanden vil stige innover i stedet for å strømme mot lavere områder, og det vil være lettere å forberede en lokal seksjonering når strømkreftene er små, slik at ikke hele området behøver å fylles (Berg et al. 1999).

Dimensjonen på nødoverløp må bestemmes ut fra tiden en har til rådighet fra sikre observasjoner og beslutning om åpning tas, til nødvendig oppfylling må være gjennomført. Jo lengere tid en har til rådighet, jo mindre behøver størrelsen på nødoverløpet å være. Det må også være et godt nettverk av målestasjoner for vannføring og gode hydrologiske/hydrauliske modeller som beregner flomforløpet på aktuelle elvestrekninger med stor nok nøyaktighet, for at utformingen av og bruken av nødoverløp skal kunne optimaliseres. For eksempel må det tas hensyn til hvordan åpning av andre nødoverløp oppstrøms i vassdraget vil kunne påvirke flomforløpet.

Det skilles mellom 3 hovedtyper nødoverløp; faste overløp, regulerbare overløp og ukontrollert innslipp. De faste overløpene kan være synlige med fast overløpstærskel eller usynlige med fast overløpstærskel dekket med løsmasser. De regulerbare overløpene kan være bjelkestengsel, gummiluker, segmentluker eller klappeluker. Ukontrollerte innslipp betegner planlagt aksjon ved gitte hendelser, f.eks. at flomverket skal åpnes på gitt sted ved en gitt vannstand. I Berg et al. (1999) anbefales det at nødoverløp som hovedregel ikke konstrueres slik at det trer i funksjon av seg selv, f.eks. ved en bestemt vannstand, men at vedtak om åpning foregår som en aktiv handling. Gummiluker eller eroderbare felt anbefales som egnede typer nødoverløp. Gummiluker er spesielt anvendelige fordi de tillater at innfyllingen av vann om nødvendig kan avbrytes, f.eks. ved feil i prognosene og dermed feil beslutning om åpning. Kostnadmessig har eroderbare felt en stor fordel ved at de er billige å anlegge og drive.

MILJØTILPASNINGER VED EKSISTERENDE OG NYE FLOMSIKRINGSTILTAK

Innenfor HYDRA-programmet er det foretatt en gjennomgang av mulige miljøtilpasninger ved eksisterende og nye flomsikringstiltak, basert på norsk og internasjonal litteratur og erfaringer (Østdahl & Taugbøl 1999). Miljøtilpasninger omfatter et bredt spekter av tiltak; fra enkle tiltak for å bedre miljøtilstanden på avgrensede elvestrekninger eller for å legge til rette for økt menneskelig bruk og utnyttelse av elvestrekninger (avbøtende tiltak), via tiltak som delvis reetablerer naturlige strukturer og funksjoner (rehabilitering), til tiltak som nærmer seg full økologisk restaurering. Rehabilitering og restaurering vil stort sett bestå av flere tiltak som er planlagt ut fra et helhetlig perspektiv (nedbørfeltperspektiv), ved at valg av metode og lokalisering av tiltakene tar hensyn til prosesser som foregår på nedbørfeltet, og at tiltakene skal virke sammen. Miljømålsettingene med avbøtende, rehabiliterende og restaurerende tiltak dreier seg i hovedsak om å reetablere naturlige fysiske strukturer og funksjoner i vassdraget,



Figur 3.6 Hydrogram for vannføring like nedstrøms et nødoverløp i Kirkenær og ved Kongsvinger kraftverk med og uten åpning av nødoverløp i Kirkenær.

ivareta det biologiske mangfoldet, legge til rette for spesielle arter eller artsgrupper eller å legge bedre til rette for rekreasjon og visuell opplevelse av naturverdier.

En rekke restaurerende tiltak har i tillegg flomforebyggende effekt og kan dermed benyttes i vassdragsområder med behov for flomsikring. Felles for disse tiltak er at de i mindre grad enn tradisjonelle flomforebyggende tiltak (f.eks. kanaliseringer og flomverk tett inntil elveløpet) forstyrrer eller ødelegger naturlige vassdragsfunksjoner. De viktigste miljøvennlige flomforebyggende tiltakene er tilbaketrukne flomverk, reetablering av våtmarksområder (naturlige retensjonsområder) og kunstige retensjonsområder. I tillegg kommer tiltak som gjennom å forhindre erosjon overflødiggjør mer omfattende flomforebyggende tiltak. Eksempler på slike tiltak er terskler, strømstyrere (buner), sedimentasjonsbasseng, stabiliseringsbasseng, erosjonssikring av elveskråninger, slakke elveskråninger og skjøtsel av vegetasjon i elveprofilen. Bruken av avbøtende, rehabiliterende og restaurerende tiltak i forbindelse med eksisterende flomtiltak i Norge har vært relativt beskjeden. Det samme gjelder bruken av miljøvennlige flomforebyggende tiltak. Det finnes imidlertid en god del eksempler på bruk av terskler og buner som avbøtende tiltak i forbindelse med vannkraftutbygginger. I alle vurderinger omkring flomsikringstiltak er det behov for å inkludere mulige miljøtilpasninger som tema.

3.6 FLOMBEREDSKAP OG KRISEHANDTERING

Flomberedskap og krisehandtering er innenfor HYDRA behandlet av Endresen & Lindholm (1998), Sælthun & Lindholm (1999) og Krasovskaia et al. (1999). Det er et praktisk og forvaltningsmessig prinsipp at første linje katastrofeberedskap er lagt til det laveste forvaltningsnivået, dvs. kommunene. Grunnlaget for kommunenes beredskapsarbeide foreligger i følgende veiledere fra Direktoratet for sivilt beredskap (DSB):

- Normalreglementet for kommunenes beredskapsarbeid (DSB 1979)
- Beredskapshåndbok for kommunene (DSB 1989)
- Veileder for kriseplanlegging i kommunene - plan for kriseledelse (DSB 1994b)
- Veileder for kommunal risiko- og sårbarhetsanalyse (ROS) (DSB 1994a)
- Veileder for internkontroll i kommunal beredskap (DSB 1998)

RISIKO- OG SÅRBARHETSANALYSE (ROS)

Flomproblematikk tas ikke opp direkte i veilederne nevnt ovenfor, bortsett fra i ROS-veilederen. I en liste over risikomomenter er det, i tillegg til flommen i seg selv, tatt med følgende flomrelaterte hendelser: forurensning

av drikkevann, olje- og kjemikalieforurensning, svikt i vann- og/eller elektrisitetsforsyning og svikt i avløps-systemer. En metodegjennomgang for sårbarhetsanalyse for flom er gitt av Jenssen (1998). Et sentralt element i en ROS-analyse vil være flomsonekartlegging som beskrevet i Kap. 3.2. Det er viktig å være klar over at også objekter over og utenfor selve flomsone kan være truet i en flomsituasjon, f.eks. på grunn av: utrasing og sammenstyrtning som følge av undergraving, sideelver og bekker som bryter ut av løpet, dambrudd (små dammer kan gi store flommer og ras) og tette eller underdimensjonerte kulverter.

Det var lagt opp til at samtlige kommuner skal ha gjennomført risiko- og sårbarhetsanalyser (ROS) innen utgangen av 1998 (Justis- og politidepartementet 1994). Dette er ikke fullt gjennomført, men man har kommet godt i gang. Erfaringer etter Vesleofsen i 1995 viste at de kommunene som hadde gjennomført ROS-analyser mestret situasjonen best, men generelt var beredskapen ikke god nok (Stortingsmelding 25 (1997-1998) (Justis- og politidepartementet 1998)). Stortingsmeldingen presiserer også behovet for kvalitetssikring av beredskapsarbeidet. Det skal gjennomføres etter internkontrollprinsippet, med fylkesmennene som tilsynsmyndighet for kommunene. I etterkant av en flomsituasjon blir det spesielt viktig å evaluere beredskapsapparatet og -rutinene med tanke på forbedringer.

REGIONAL SAMORDNING

Organisasjonsstrukturen og ansvarsfordelingen på regionalt nivå er i hovedsak klarlagt gjennom Kongelig resolusjon av 12. desember 1997 - "Retningslinjer for regionalt samordningsansvar ved kriser og katastrofer i fred". Fylkesmannen har den regionale koordinatorrollen i en krisesituasjon. Behovet for samordning oppstår hvis kommunen eller et organ på fylkesnivå ber om dette eller ikke makter å handtere situasjonen alene.

I følge retningslinjene omfatter fylkesmannens ansvar for samordning følgende oppgaver:

- tilsyn med kommuners, fylkeskommuners og regionale statlige organers kriseplanlegging før en krise inntreffer.
- etablering av gjensidig informasjon mellom fylkesmann, politimester, regional statsforvaltning, fylkeskommune og berørte kommuner når en krise har oppstått.
- sammenkalling av fylkesberedskapsrådet for å skape enighet om hvilke tiltak som bør iverksettes.
- å legge saker, der det ikke er enighet om hvilke tiltak som bør iverksettes eller hjemmelsgrunnlaget for et tiltak er uklart, frem for Justisdepartementet.
- videreformidling av ekstra ressurser til kommunene samt avklaring av spørsmål fra kommunene, fylkeskommunen og den regionale statsforvaltningen

Anmodning om ressurser fra forsvaret og sivilforsvaret, utover de som eventuelt er disponible lokalt, rettes til fylkesmannen. Forsvarets bistand er regulert ved kongelig resolusjon av 13. februar 1998 - "Instruks for Forsvarets bistand til Politiet i fredstid".

Politiet er tildelt et spesielt ansvar i akutte krisesituasjoner. Politimesteren har ansvar for å iverksette nødvendige tiltak for å avverge fare og begrense skade, og har myndighet til å fatte beslutninger som også berører andre myndigheters ansvarsområder. Politiet organiserer og koordinerer hjelpeinnsats inntil annen myndighet overtar. "Annen myndighet" kan for eksempel være en etablert kriseorganisasjon hos fylkesmannen, kommunen eller andre myndigheter på regionalt eller sentralt nivå.

FLOMORGANISASJON

Kommunene bør til en hver tid ha etablert flomorganisasjoner som raskt kan organiseres i forbindelse med flom. Rutiner må innarbeides gjennom realistiske øvelser.

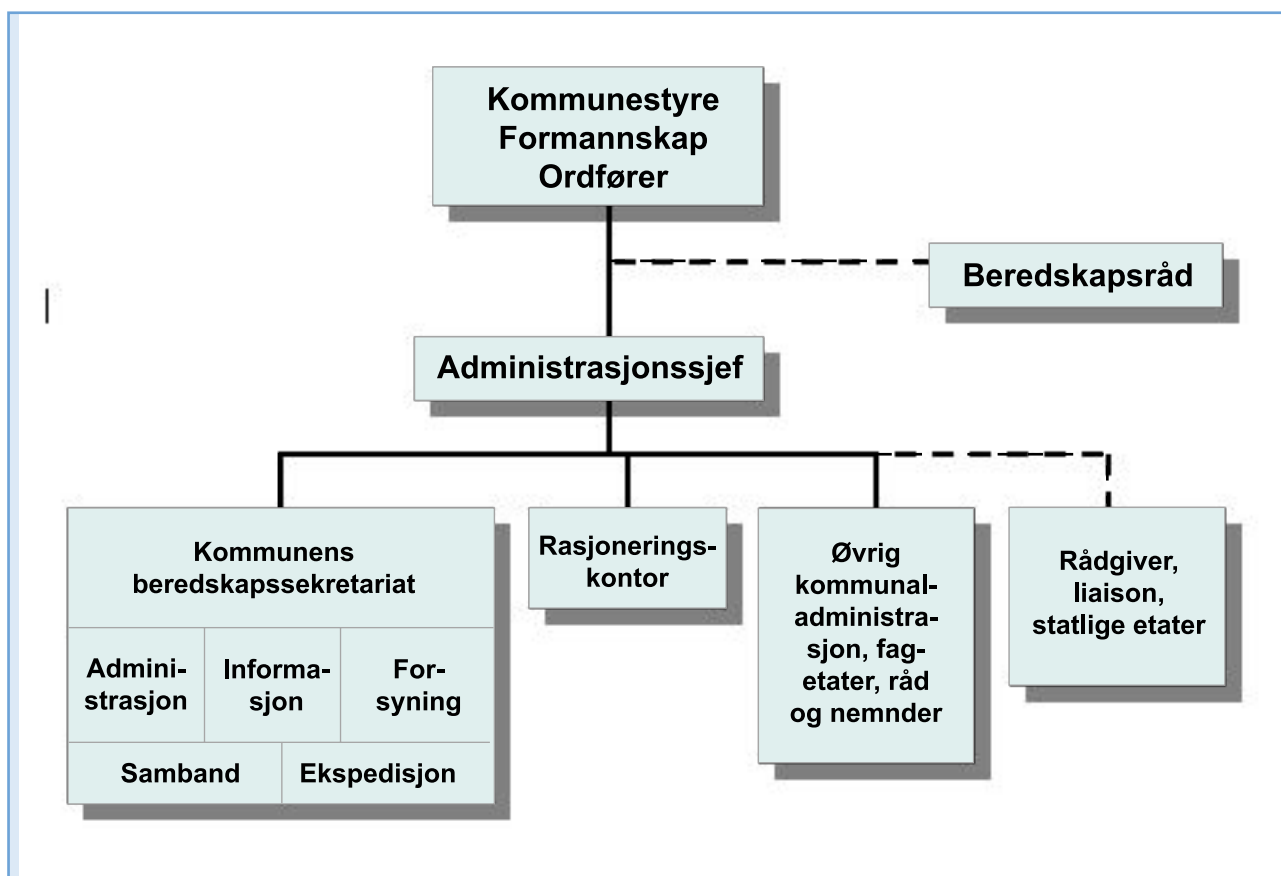
Endresen & Lindholm (1998) beskriver beredskapsorganiseringen som brukes av Fet kommune. Under Vesle-

ofsen i 1995 ble krisearbeidene her ledet av beredskapsrådet, som i perioden 1992 - 1995 hadde følgende medlemmer:

- Ordfører
- Rådmann
- E-verkssjef
- Teknisk sjef
- Leder av rasjoneringskontoret
- Lensmann
- Representant fra forsvaret/heimevernet
- Representant for sivilforsvaret

Beredskapsrådets plassering i den kommunale organisasjonen er vist på Figur 3.7.

I boksen til høyre på figuren ("Øvrig kommunaladministrasjon, fagetater etc.") kan mange ressurser/interesser være representert, f.eks. forsvaret, sivilforsvaret, politi/lensmann, Televerket, NSB, Statens Vegvesen, trygdeetaten, helse-/sosialsektoren, kirken, lege, veterinær, e-verk, vannforsyning, handelsbedrifter, industri, humanitære organisasjoner, havnevesen, landbruk og transport.



Figur 3.7 Eksempel på kommunal beredskapsorganisering.

BESLUTNINGSSTØTTE FOR KRISEHANDTERING

I HYDRA-programmet har delprosjektet "Førstelinje - beslutningsstøtte" sett på oppfatninger og vurderinger hos lokale beslutningstakere og publikum når det gjelder flomrisiko og skadebegrensninger (Krasovskaia et al. 1999). Undersøkelsen hadde to hovedelement: en lokal spørreundersøkelse blant flomutsatt befolkning, først og fremst i området Kirkenær - Elverum og et arbeidsmøte med lokale beslutningstakere. Arbeidsmøtet besto av to deler, en spillpreget gjennomgang av to flomscenarier, hvor hver enkelt foretok risikovurderinger og foreslo tiltak fra en forhåndsoppsatt liste, og en generell diskusjon. Hovedinntrykket er at det ikke er dramatiske forskjeller mellom publikums og beslutningstakers oppfatning av flomrisiko og fare.

Arbeid på flomverkene er forbundet med fare for liv. Det kan i mange tilfeller være vanskelig å vurdere graden av risiko for arbeidsstokken organisert i krisetiltak på flomverkene. Typiske faremomenter er fall fra flomverket, at flomverket blir uventet destabilisert ved grunnbrudd og at man kan bli "fanget" på arealer skapt ved gjennombrudd i flomverket. Utilstrekkelig søvn og hvile og manglende organisering av arbeidet øker faren. Tilskuere og uorganisert personell kan ved ubetenksomme handlinger sette sitt eget og andres liv i fare. Opplistet etter grad av kontrollerbarhet, er det tre hovedkategorier av personell i aktivitet i et flomområde: 1) militært personell, 2) organiserte sivile og 3) uorganiserte sivile.

For å redusere risikomomenter i forbindelse med disse gruppene ble følgende tiltak identifisert:

- Begrensning i adgang til området (med hjelp av politi, sivilforsvar og militære).
- Skriftlige, forhånds etablerte instruksjoner for tiltak under flomsituasjoner, inkludert arbeid på flomverkene.
- Uniformering av ledere, eller annen tydelig identifi-
sering.
- Stringent gjennomføring av sikkerhetsinstruksjoner for arbeid på flomverkene (pauser, organisert skift og hvile, bruk av personlig sikkerhetsutstyr som redningsvester, etablering av redningsbåter osv.).
- Bruk av politistyrke ved behov.
- Bruk av kun militært personell i spesielt kritiske situasjoner.

Usikkerheten i påvente av en varslet storflom kan være en betydelig psykisk belastning, særlig for de som har opplevd skadeflommer tidligere. Dette stresset avtar når noen tar kommandoen og arbeid med skadebegrensende tiltak starter, og selve tiltaksarbeidet kan ha en terapeutisk effekt. Ansvar og stresset overføres til den eller de som har kriseledelsen. Klare retningslinjer for arbeidet er av avgjørende viktighet for å lette dette stresset, og for å sikre at kritiske arbeidsoperasjoner blir avbrutt i tide.

Det bør være en oppgave for NVE å utarbeide og oppdatere instruks for krisetiltak på flomverkene under flomsituasjoner, inkludert instruksjoner om tekniske tiltak som påbygging, kontrollert åpning osv. Slike instruksjoner bør finnes for hvert enkelt flomverk.

Spørreundersøkelsen og erfaringene fra 1995 viser at en generell evakueringsordre er utilstrekkelig. Dør-til-dørkontroller må utføres av f.eks. lokalt sivilforsvar. I noen sjeldne tilfeller kan tvang være nødvendig. Evakuering kan medføre store fysiske og psykiske påkjenninger, særlig for eldre mennesker. Et velorganisert sosialt nettverk er essensielt også i tiden etter flomsituasjonen.

Teknisk utstyr kan være en begrensende faktor for effektive krisetiltak. Det er nødvendig å ha god innsikt hvor forskjellige typer utstyr raskt kan skaffes, ikke bare fra regionale kriselager, men sannsynligvis også fra lokale entreprenører. Det må foreligge lister og oversikter før krisen oppstår.

Resultatene synes å indikere at det er vanskelig å sette i gang skadebegrensende tiltak av noe omfang før krisesituasjonen er etablert. Når krisen først er et faktum, synes imidlertid ikke økonomiske ressurser å oppfattes som en begrensende faktor. For å komme i gang tidlig nok er derfor godt forberedte og oppdaterte tiltaksplaner for flomsituasjoner et uvurderlig hjelpemiddel. Flomberedskapsplanen for Åsnes kommune er en god mal (Krasovskaia et al. 1999).

Problemet med å organisere logistikk rundt krisetiltakene ble understreket. Å skaffe fram mat og drikke til personellet i arbeid og evakuert befolkning kan være en stor utfordring. Bruk av kommunale storkjøkken, f.eks. i forbindelse med sykehjem og bruk av frivillige organisasjoner, ble framhevet som effektive tiltak.

Viktigheten av trening i å handtere krisesituasjoner ble også understreket. Scenariespillene er et mulig utgangspunkt for å etablere treningsopplegg. Et forum for utveksling av erfaringer og diskusjoner omkring kriseledelse ville være et viktig element i denne sammenheng. Det er meget viktig at beredskapsplaner, treningsopplegg osv. ikke blir engangstiltak, men at det blir etablert rutiner for periodisk oppdatering og rullering.

INFORMASJON

Informasjon i forbindelse med flom er viktig både før, under og etter flomhendelsen. I en før-situasjon er det viktig at alle som bor i en risikosone er informert om hvordan man skal forholde seg ved en eventuell krise, f.eks. evakueringsveier og varslingssignaler. Dette må være viktige elementer i det kommunale beredskapsarbeidet.

Generell informasjon om hvordan man skal forholde seg under og etter en flomsituasjon, f.eks. i forhold til mat, drikke og muligheter for sykdomssmitte, kan være av interesse for mange og bør alltid være lett tilgjengelig. I USA er mye informasjon av denne karakter lagt ut på Internett. Dette kan være en spredningskanal for folk flest, og ikke minst et godt arkiv for lokale myndigheter og ressurspersoner for videre kopiering og distribuering.

Under Vesleofsen i 1995 viste tradisjonelle massemedia seg som gode informasjonsbærere, ikke minst var lokal- og regionalradio effektivt. Fet kommune hadde f.eks. meget god erfaring med lokalradioen som formidler av nyheter, informasjon og beskjeder. Man kan imidlertid ikke ta som selvsagt at beskjeder formidlet over radio når fram til alle. Særlig eldre som bor alene, kan lett falle utenfor. Det er gode erfaringer med spesielle "informasjonspatroljer" fra brannvern eller sivilforsvar.

LIV OG HELSE

Selv om de materielle skadene i forbindelse med flommer i Norge har vært store, er det heldigvis svært sjelden at menneskeliv går tapt eller at det blir epidemiske sykdomsutbrudd. Under Vesleofsen var forurensnings-situasjonen såpass alvorlig at sykdomsspredning ville vært uunngåelig dersom flomvannet hadde kommet inn på nettet. At det ikke forekom epidemiske utbrudd kan, ifølge Flomtiltaksutvalget (NOU 1996), for en stor del tilskrives at vannverkene gjennom sin innsats har klart å etablere tilstrekkelig hygienisk sikring.

Faren for dødsulykker er først og fremst knyttet til selve flommen, men det er et spørsmål om ikke de største helsefarene er knyttet til oppryddingsfasen (jf. avsnitt om opprydding og utbedringer under Kap. 3.6). De fysiske og psykiske belastningene er meget store, og arbeidet foregår under forhold og med faremomenter som er ukjent for de fleste. Forurensninger gir ekstra-belastninger i denne situasjonen, og øker den akutte helsefaren. Informasjon og et aktivt støtteapparat er meget viktig. Oppryddings- og reetableringsfasen etter storflommer varer typisk ett år.

STØTTEORDNINGER

Det er ikke teknisk eller økonomisk mulig å oppnå fullstendig sikkerhet mot flomskader. Gjennomsnittlige kostnader knyttet til skader i forbindelse med flommer i Norge er anslått til 173 millioner kr per år, hvorav 19 millioner gjelder indirekte skader (NOU 1996). De samlede kostnader knyttet til skader i forbindelse med flommen på Østlandet i 1995 beløp seg til 1,8 milliarder kr (jf. Del I). Dette ble dekket ved forsikringsutbetalinger og egenandeler med 1,0 milliard kr og resten ved statlige utbetalinger.

Norsk Naturskadepool dekker forsikrede tap knyttet til bygninger og løsøre, mens Statens naturskadefond dekker erstatning for naturskader som ikke dekkes ved alminnelige forsikringsordninger. Etter naturskadeloven dekker ikke naturskadefondet skader på offentlig eiendom, dvs. at kommunens og statens skader faller utenom. Det innebærer f.eks. at flomskader på kommunal infrastruktur som veier og anlegg for vannforsyning og avløp vanligvis ikke dekkes av forsikringsordninger.

Kommunenes kostnader til forebygging av skade og opprydding etter Vesleofsen, samt skader på kommunal infrastruktur, ble dekket av en særskilt statlig engangs-utbetaling fastsatt av Stortinget. Egenandelen for skader på kommunal infrastruktur var på 15 % begrenset til kr 40,- per innbygger. Det finnes ikke regler for statlige erstatninger ved framtidige flomskader. Dette blir en politisk vurdering i forbindelse med den enkelte skade-flom. Ved 1995-flommen ble alle krav om erstatninger sendt NVE for vurdering og sammenstilling.

3.7 FLOMVARSLING

GENERELT

For å få best mulig effekt av de tiltak som skal iverksettes i forbindelse med flom, er det viktig med en god flomvarsling. NVE har det formelle ansvaret for denne varslingen. Det samarbeides imidlertid med regulanter som også lager sine egne flomvarsler og prognoser.

NVE skiller mellom varsel om:

- flom (vannføring i nivået mellom middelflom og 10-årsflom)
- stor flom (vannføring i nivået mellom 10- og 100-årsflom)
- ekstrem flom (vannføring større enn 100-årsflom).

Boks 3.5

Scenario, prognose og varsel

- Et **scenario** er en framtidig situasjonsbeskrivelse basert på gitte forutsetninger, en slags "Dersom – så"-beskrivelse.
- En **prognose** beskriver en framtidig situasjon ut fra modellbaserte data. Prognosene kan strekke seg ulik lengde fram i tid. Under Vesleofsen ble det f.eks. operert med 5, 2 eller ett døgns prognoser.
- Et **varsel** sendes ut når prognosen viser sannsynlighet for flom.

Når det ventes flom i et område, sender NVE telefakser med flomvarsel til aktuelle mottakere i dette området. Faste mottakere er Vegdirektoratet, Det norske meteorologiske institutt, berørte regulanter, Direktoratet for sivilt beredskap, Olje- og energidepartementet, Justisdepartementet, NRK/TV2, NTB og fylkesmennene i aktuelle fylker. Fylkesmannen vurderer om det er behov for videresending av varslet til berørte kommuner. I flomsituasjoner oppdateres flomvarslet daglig.

Flomvarslingen gjelder normalt vannføringer, og det er vanligvis ingen enkel, lokalt tilpasset sammenheng mellom vannføring og vannstand. Det er derfor viktig at sammenhengen mellom vannføring og vannstand og hvilke konsekvenser en gitt vannføring/vannstand kan få, er kjent lokalt. Noen steder kan en "stor flom" forløpe uten at det er behov for spesielle tiltak, mens andre steder vil dette gi en vannstand som kan påføre skade. Under Vesleofsen i 1995 ble det også varslet om sannsynlige vannstander for steder hvor det var datagrunnlag for et slikt varsel. Flomvarsler, spesielt under ekstreme forhold, er forbundet med stor usikkerhet, jf. avnittet om flomvarsling under Vesleofsen nedenfor.

Vanlig prosedyre ved utarbeiding av flomvarsel er å bruke observerte meteorologiske data og prognoser kombinert med en hydrologisk nedbør-avrenningsmodell (vanligvis den svenske HBV-modellen). I en slik modell brukes nedbør- og temperaturdata til å beregne endringer i snødekke, markvann og grunnvann og den resulterende avrenningen fra nedbørfeltet. Den nasjonale flomvarslingen ved NVE bygger på modellberegninger for et begrenset antall indikator- eller prognosefelt. Usikkerheten ved flomvarslet vil være avhengig av usikkerheten i de meteorologiske dataene, de hydrologiske modellene og prognosefeltenes representativitet. Et godt varsel forutsetter videre at det finnes gode data om eksisterende forhold (f.eks. snødekke), og det er igjen avhengig av et godt nettverk av målestasjoner. I Glommavassdraget har Glommens og Laagens Brukseierforening (GLB) 34 kalibrerte HBV-modeller for ulike deler av vassdraget, som igjen er knyttet sammen med en "routing"-modell som gjør det mulig å se hele vassdraget i sammenheng (Lundquist 1997).

FLOMVARSLING UNDER VESLEOFSEN I 1995

I hovedsak fungerte flomvarslingen tilfredsstillende både i forkant av flommen og under selve flomutviklingen (Killingtveit et al. 1996, Lundquist 1997). NVE var tidlig ute med å advare mot flom, og det ble presisert både fra NVE og GLB at værutviklingen ville være avgjørende for størrelsen på flommen. I utgangspunktet var ikke snømengdene spesielt høye sammenliknet med andre år som ikke hadde gitt storflom, men værutviklingen ble altså den verst mulige. Varsel om flom på størrelse med dem som hadde vært i 1966 og -67, ble utstedt relativt tidlig; f.eks. 5 dager før flommen kulminerte i de øvre

delene av vassdraget og 9 dager før kulminering i Øyeren. Problemene for flomvarslingen inntraff under den mest kritiske perioden, da det ikke lenger var nok å melde om stor størrelse, men også mer konkret om vannstander og tidspunkt for kulminasjon. I den mest kritiske fasen ble flomprognoser utstedt daglig både av GLB og NVE, men i hovedsak ble de utarbeidet ved GLB. Prognosene dekket vanligvis en uke fram i tid og var basert på værprognoser fra Det norske meteorologiske institutt. Det var til dels store avvik i prognosene fra NVE og GLB. Prognosene viste ofte store variasjoner fra dag til dag og var tidvis alt for høye (Killingtveit et al. 1996, Lundquist 1997). Forskjellen mellom varslet og observert vannføring i de nedre deler av Glomma kunne være opptil 1500 m³/s, dvs. en relativ feil på ca. 50 %. For Øyeren ble varslet vannstand overestimert med nesten 2 meter (Figur 3.8). En kritisk analyse etter flommen har forsøkt å identifisere de viktigste feilkildene for varslingen. Betydningen av de ulike feilkildene viste seg å variere mye mellom ulike flomvarsler og mellom øvre og nedre deler av vassdraget. En forenklet framstilling av gjennomsnittlig bidrag fra de ulike feilkildene er gitt i Tabell 3.3 (Lundquist 1997).

Tabell 3.3 Forenklet oversikt over bidrag fra ulike feilkilder i flomvarslingen i forbindelse med Vesleofsen i 1995.

Feilkilde	Øvre elvestrekninger	Nedre elvestrekninger
Meteorologiske varsel	25 %	15 %
Hydrologiske modeller	75 %	10 %
Transporttider og vanntap ("routing"-modeller)	0 %	50 %
Kvalitet på vannføringsdata under flom	0 %	25 %

Meteorologiske varsler har stor betydning for presisjonen i flomvarslingen og er ofte den viktigste feilkilden. Også under Vesleofsen utgjorde de meteorologiske varslene tidvis en signifikant feilkilde, men de hadde som oftest mindre betydning. Feil i de hydrologiske modellene hadde spesielt stor betydning i de øvre deler av vassdraget, og mindre betydning lenger ned. Den viktigste feilkilden for de nedre deler av vassdraget gjaldt transporttider og vanntap, dvs. "routing"-modellen tok ikke hensyn til økt oppholdstid på vannet. I Storsjøen i Odalen som vanligvis drenerer ut i Glomma, ble vannstrømmen reversert, og innsjøen virket som et retensjonsbasseng i 13 dager. På det meste strømmet det her inn 450 m³/s. I tillegg ble store landarealer oversvømt oppover i hele vassdraget. Feil i relasjonen mellom høye vannstander og store vannføringer ved målestasjonen på Elverum var også en relativt stor feilkilde for flomvarslet

Boks 3.6

Usikkerhet i meteorologiske og hydrologiske prognoser

Usikkerhet i meteorologiske og hydrologiske prognoser er av største betydning for presisjonen i flomvarslingen. Innenfor HYDRA-prosjektet er det utprøvd mange metoder for å bestemme meteorologiske og hydrologiske forhold og usikkerheter knyttet til prognosene:

- metoder for å bestemme det mest sannsynlige værregime, nedbørsmengder og sannsynlighet for nedbør (Ødegaard 1998, Jensen 1998, Bremnes 1998).
- modell for beregning av usikkerhet i nedbør- og temperaturvarslar (Follestad & Høst 1998).

- metoder for beregning av arealnedbør og betydningen av tettheten i nedbørstasjonsnett (Tveito & Førland 1998, Tveito 1999).
- metoder for bruk av meteorologiske satellitter og værradar (Godøy 1998).
- metoder for kvantifisering av hydrologiske prognosefelts representativitet (Fjelstad 1997).
- klassifisering av usikkerhet i den hydrologiske modellen (HBV) (Langsrud et al. 1998).
- kobling av modeller for usikkerhet til en samlet modell for beskrivelse av total usikkerhet i flomprognoser (Langsrud et al. 1999).

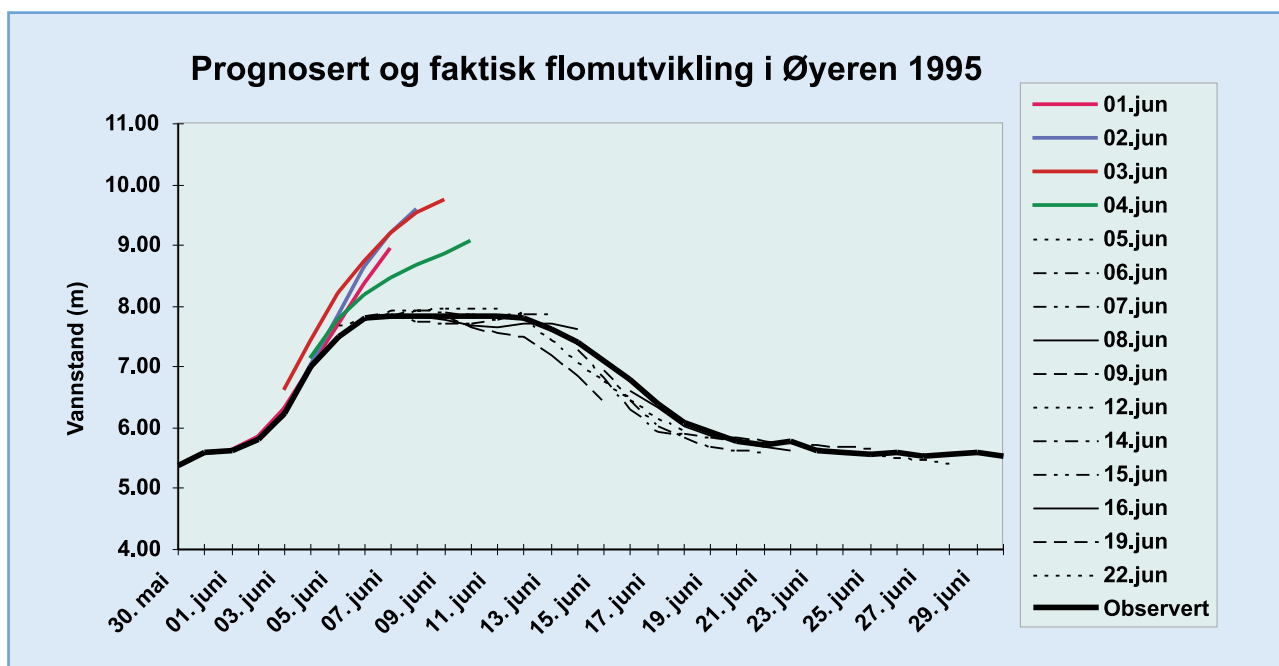
Mye av denne metodeutviklingen krever videre utvikling og utprøving. Modellen for beskrivelse av total usikkerhet i flomprognoser er imidlertid tatt i operasjonell prøvedrift, jf. hovedteksten.

i de nedre deler. Det er dessverre en kjensgjerning at en sjelden har konkrete oppmålinger av vannføringen under store flommer i norske vassdrag.

FORBEDRING AV FLOMVARSLING

Innenfor HYDRA er det arbeidet med å forbedre modellene for flomvarsling, særlig med hensyn på å få bedre kunnskap om den usikkerheten som ligger i prognosene. Dette har delvis vært initiert på bakgrunn av de store avvik og usikkerheter i flomvarslingen som ble avdekket under Vesleofsen (Skaugen 1999). Sentralt for prosjektet har vært å kvantifisere usikkerheten i nedbør- og

temperaturprognoser, eksisterende hydrologiske modeller og vannføringsprognoser, og koble dette sammen til en modell som beskriver den totale usikkerheten ved flomvarslene (Boks 3.6). Situasjonen for flomvarslere har hittil vært at han/hun subjektivt må vurdere usikkerheter ved hydrologiske og meteorologiske prognoser og tilhørende sannsynlighet for kritiske verdier. Med en modell for usikkerhet vil mye av den subjektive vurderingen kunne bli erstattet av modellens objektive vurdering. En slik modell er tatt i prøvedrift av flomvarslingen ved NVE i 1999 (Skaugen 1999). Vassdragsmodellen som har blitt utviklet innenfor HYDRA (jf. Del II), vil også kunne bli et viktig redskap for bedre flomvarsling.



Figur 3.8 Varslede og observerte vannstander i Øyeren under Vesleofsen i 1995.

4. Hovedresultater

Mål for HYDRA-programmet

HYDRA-programmet har hatt 2 hovedmål. For det første skulle programmet forbedre kunnskapsgrunnlaget om sammenhenger mellom naturgrunnlag og menneskelige inngrep i vassdrag og nedbørfelt på den

ene siden og flom og flomskader på den andre siden. I neste omgang skulle denne kunnskapen brukes til å foreslå tiltak for å forebygge flomskader og redusere omfanget av flomskader på en kostnadseffektiv og miljømessig optimal måte.

En rekke HYDRA-prosjekter har vært tverrfaglige og organisert som samarbeidsprosjekter mellom flere forsknings- og utredningsinstitusjoner (jf. liste over deltagende institusjoner i innledningen til rapporten). I tillegg har arbeidet med vassdragsmodellen til HYDRA-programmet involvert flere institusjoner som dataleverandører.

En del av det faglige nettverket som har vært utnyttet i programmet, har vært godt etablert fra tidligere FoU-arbeid, mens andre deler av nettverket er nytt og har vært viktig for å sikre den tverrfaglige karakteren i HYDRA-programmet. Det faglige nettverket vil være en verdifull ressurs i framtidig flom- og vassdragsarbeid i Norge, f.eks. ved videre utvikling av prosessbaserte hydrologiske modeller og ved studier av vannbalansen.

4.1 FORBEDRING AV KUNNSKAPSGRUNNLAGET

Arbeidshypotesen i HYDRA-programmet har vært at summen av all menneskelig aktivitet i vassdragenes nedbørfelt i form av arealbruk, reguleringer, flomsikring m.m. kan ha økt risikoen for flom. Dette har krevd enkeltprosjekter innenfor et bredt spekter av fagområder og har engasjert en rekke forsknings- og utredningsinstitusjoner. Enkeltprosjektene i programmet har i tillegg omfattet ulike tilnærminger, som oppbygging av databaser, metodeutvikling, modellutvikling og -simulering, lokale detaljstudier, statistiske analyser og litteraturstudier. Programmet som helhet har hatt en tverrfaglig karakter, selv om mange av enkeltprosjektene har vært smale og har krevd spisskompetanse på et avgrenset fagområde. Dette mangfoldet av prosjekter, tilnærminger og fagområder gjør at kunnskapsgrunnlaget er forbedret på mange felter. Noe av kunnskapen som har kommet fram gjennom programmet, har kommet direkte til nytte som grunnlag for etableringen av en generell vassdragsmodell for HYDRA. Denne modellutviklingen har vært et viktig element i programmet. Andre biter av kunnskapen og datamaterialet som er

samlet og sammenstilt, har vært mer uavhengig av modellarbeidet og vil ha sin verdi i forvaltningsorganenes videre arbeid med flomberedskap, flomsikringsarbeid og integrering av flomhensyn i arealplanleggingen.

FORBEDRING AV DATAGRUNNLAGET

Et godt og vel tilrettelagt datagrunnlag er viktig både for en god og kunnskapsbasert flomforvaltning, og for forvaltningen av andre interesser i vassdragene. Å få styrket datagrunnlaget og gjort eksisterende vassdragsdata bedre tilgjengelig som forvaltningsverktøy gjennom systematisering, bearbeiding og databaseoppbygging, var et viktig argument for oppstartingen av HYDRA-programmet, og har stått sentralt gjennom hele programmet. Følgende punkter bør nevnes som resultater av HYDRA-programmet:

- Databasearbeidet har medført gjennomgang og opprydding i eksisterende data på NVEs hydrologiske database, Hydra II (Roald & Kristensen 2000).
- Det er gjennomført en systematisering av lange måleserier for hydrologiske data fra målestasjoner i norske vassdrag. Det er under arbeid en katalog over flommer i de større vassdragene.
- Meteorologiske data fra perioden 1920 til 1930 er etterregistrert og digitalisert.
- Data fra Landsskogstakseringen/NIJOS, digitale markslagskart og kvartærgeologiske kart fra NGU er konvertert til rasterform for bruk i modellkjøringene med LANDPINE-modellen.
- I Osens og Flisas nedbørfelt er bonitetsklasse for skog og høyde over havet brukt for å få fordelt boniteter i et 100x100 m rutenett. Det er videre beregnet bladarealindekser, tildelt hogstklasse og treslag i samme rutenett.

VASSDRAGSMODELL HYDRA

Et viktig element i HYDRA-programmet har vært utviklingen av en modell for å studere hvordan ulike typer menneskelige inngrep påvirker og eventuelt endrer flomforholdene i et vassdrag. Modellen som er utviklet har fått betegnelsen "Vassdragsmodell HYDRA", og er en objektbasert, fleksibel modell som kan brukes i mange typer vassdrag og med mange typer objekter (f.eks. reguleringsmagasiner, kraftverk, flomsikringsanlegg, arealbruksendringer og urbanisering/tettstedsutvikling). Den ene hovedkomponenten er en generell og fleksibel modell for simulering av nedbør-avløp (PINE-modellen) (Rinde 1998). Den andre hoveddelen er et rammeverk for bygging av modeller for prosesser i vassdrag, f. eks. hydrauliske modeller, økologiske modeller eller modeller av kraftverksystem (Alfredsen 1999). For tettsteder brukes en modell, SINBAD, utviklet ved SINTEF. Til sammen gir disse programsystemene svært stor fleksibilitet i modelloppbyggingen.

I forbindelse med modellarbeidet er også modellen MIKE 11 (DHI 1995) brukt til å beregne virkningen av alle typer flomverk på strekningen fra Elverum til Øyeren, inkludert Vorma.

I HYDRA-programmet har vassdragsmodellen kun blitt tilpasset for bruk i Glommavassdraget. Konkrete resultater fra modellkjøringene er referert nedenfor i avsnittet "Kunnskap om effekter av menneskelig aktivitet på flom og flomskader".

ANNET METODEARBEID

Skaderisikoanalyse knyttet til flom er et viktig grunnlag ved økonomiske kost-nytteanalyser av flomtiltak. Innenfor HYDRA har det vært arbeidet med å forbedre metodikken for slike analyser (Sælthun et al. 1999). Som en pilotstudie på risikoanalyse ble det valgt å se på bygninger på flomsletta i Grue og Åsnes, oppstrøms Kongsvinger. Det ble bekreftet at bygningsskader økte med vannstand over grunnmur. Metodikken for risikoanalyse som ble anvendt for bygninger, kan i prinsippet anvendes for alle typer objekter hvis skaden primært er avhengig av lokal vannstand. Metodikken er også generelt overførbar til andre vassdrag hvor man kan etablere den nødvendige grunnlagsinformasjonen, dvs. vannstand og vannføringskurver, flomfrekvensanalyse, flomsoneanalyse, generaliserte skadefunksjoner og den romlige fordelingen av skadeobjekter. Skader på jordbruksarealer ble påvist å være avhengige av vannhastighet som funksjon av vannstand og fall.

En annen viktig del av metodearbeidet innenfor HYDRA-programmet har vært konsentrert om usikkerheten i meteorologiske og hydrologiske prognoser. Metodearbeidet knyttet til de meteorologiske prognosene har gått på oppløseligheten i meteorologiske modeller

(Ødegaard 1998, Jensen 1998), sannsynlighetsfordelinger for nedbør (Bremnes 1998), usikkerhet i nedbør- og temperaturvarsel (Follestad & Høst 1998), beregning av arealnedbør (Tveito & Førland 1998), betydningen av tettheten i nedbørstasjonsnettet (Tveito 1999) og bruk av meteorologiske satellitter og værradarer (Godøy 1998). Metodearbeidet med hydrologiske prognoser har omfattet testing av hydrologiske prognosefelts representativitet (Fjelstad 1997), klassifisering av usikkerhet i hydrologiske modeller (Langsrud et al. 1998) og sammenkopling av metoder for beskrivelse av total usikkerhet i flomprognoser (Langsrud et al. 1999).

Forbedring av metodikken for flomsoneanalyse og konstruksjon av flomsonekart har vært et annet viktig metodeprosjekt. Forskjellige metoder for beregning av vannlinjer, terrengmodeller og konstruksjon av flomkart har blitt vurdert (Kristensen & Voksø 1998, Sælthun et al. 1999). I tillegg til metodeutviklingen har et konkret resultat av prosjektet vært framstilling av flomsonekart for gjentakintervall på 10 år, 50 år (1966-flommen) og 100-200 år (Vesleofsen i 1995) for flere elvesletter langs Glomma og Trysilelva.

KUNNSKAP OM EFFEKTER AV FLOM PÅ NATURGITTE FORHOLD

Flere av enkeltprosjektene i HYDRA har gitt bidrag til kunnskapsgrunnlaget om hvordan flom virker inn på fysiske, kjemiske og biologiske forhold i og langs vassdragene. Kunnskapen som er samlet og sammenstilt stammer delvis fra Glomma og Lågen og delvis fra andre norske vassdrag. Følgende punkter er sentrale:

- Erosjon i tilknytning til brevassdrag og vassdrag i leir-områder utgjør de mest intense erosjonsprosessene i norske vassdrag. I brevassdrag er materialet nedstrøms breene ofte ukonsolidert og vil være lett tilgjengelig for transport slik at det kan oppstå omfattende endringer i elvebanksystemet under flom. I vassdrag i leirområdene kan store flommer påvirke stabiliteten ved at erosjonen intensiveres langs elveløpene og forårsaker tilbakeskridende erosjon og bunnsenking (Bogen og Bønsnes 1999).
- Transporten av partikler fra elveleiet og fra oversvømte områder øker under flom. Partiklene består hovedsakelig av uorganisk materiale og totalkonsentrasjonen av mange stoffer, som for eksempel fosfor, øker med økt partikkelinnhold (Faafeng et al. 1998).
- For planter og dyr som lever i vann, vil effektene være størst under de mest ekstreme vannkjemiske forhold. Dette faller ikke nødvendigvis sammen med de mest ekstreme hydrologiske situasjonene i vassdraget (Faafeng et al. 1999). Dessuten vil fortynningseffekten være stor under flom, og innholdet av vannløselige skadelige komponenter vil da sjelden nå

opp i konsentrasjoner som gir akutte effekter. For vannplanter er sekundæreffekter pga. lyssvekking og omflytting av sedimenter viktigere enn direkte slitasjeskader fra høy vannføring, men raskt stigende flommer kan direkte påvirke fastsittende alger og vannmoser (Rørslett 1998).

- For biologiske samfunn vil flomtidspunktet være viktig for hvilke effekter flommen resulterer i. Innenfor populasjonen av en enkeltart vil flom på kort sikt kunne gi redusert tetthet eller endret aldersstruktur i populasjonen, mens effekten av flom på et helt biologisk samfunn vil omfatte langsiktige endringer (suksesjoner) mot en ny likevekt, dersom de fysiske forholdene blir permanent endret (Brabrand 1998).
- For Hunderørret i Lågen ble det påvist at kondisjon og tilvekst sank betydelig i flomåret 1995. Dette er satt i forbindelse med at store mengder tilført slam til Mjøsa har medført redusert lystilgang i store deler av ørretens næringsområder, og derved redusert produksjon og fangbarhet av byttefisk som lagesild og krøkle (Aass 1998).
- Flomepisoder i elveslettelandskap gir som regel en dramatisk økning i vanddekket areal med stort næringstilbud, liten konkurranse og lav risiko for predasjon. Dette favoriserer fiskearter som raskt kan utnytte korte perioder med gunstige betingelser. Etter flommen i 1995 har derfor spesielt abborer økt sin relative forekomst i fangstene i nordre Øyeren, mens karpefisk viser en tilbakegang (Brabrand 1998).

KUNNSKAP OM EFFEKTER AV MENNESKELIG AKTIVITET PÅ FLOM OG FLOMSKADER

Menneskelige inngrep i vassdrag og nedbørfelt kan påvirke både størrelse og hyppighet av flommer, og ha betydning for omfanget av flomskader og hvilke typer effekter flommer gir både lokalt og i vassdraget som helhet. En rekke ulike tiltak og aktiviteter som kan ha effekter på flom og flomskader, er analysert i HYDRA-programmet. Analyseresultatene stammer både direkte fra kjøringene av Vassdragsmodell HYDRA i Glomma-vassdraget og fra andre analyser og utredninger. Punktene nedenfor beskriver kunnskapsstatus når det gjelder effekter av menneskelig aktivitet på flom og flomskader:

- Statistiske analyser av flomvannstand og -vannføring i lange måleserier i norske vassdrag viser med få unntak ingen signifikante trender i måleseriene. Unntakene er måleserier fra vassdrag der reguleringer til kraftproduksjon utgjør betydelige inngrep i vassdragenes hydrologi. Dette gjelder også i Glomma-vassdraget, hvor det er en avtakende trend for maksimalavrenning og en økende trend for lavvanns-

avrenning (Roald 1999). Analysen viser også at store flommer har en tendens til å samle seg i perioder, adskilt av perioder med vesentlig mindre flommer. I 1920-40 var det en periode med mer intensiv nedbør og hyppigere høstflommer. Det var også mange store flommer i den kjølige perioden 1850-1870. Flommen i Glomma i 1860 er målt etter volum den største flommen som er registrert i Norge (Roald & Kristensen 2000).

- Analyser av datamateriale fra 8 storflommer i Glommavassdraget på 1900-tallet viser at reguleringsanleggene for vannkraftformål har stor flomdempende effekt. I Lågen hadde dagens reguleringer kunnet redusere flomvannstanden i Mjøsa med i gjennomsnitt ca. 0,45 m på flommene på 1900-tallet, samtidig som reguleringene i Glomma hadde gitt mindre oppstuvning i Vormå og en ytterligere reduksjon i flomvannstanden i Mjøsa. For 1995-flommen er det beregnet at reguleringene reduserte flomvannstandene med 0,7-1,0 m i Glomma på strekningen Storelvdal - Norsfoss og med ca. 0,4 m i Lågen på strekningen Otta - Losna. For Øyeren var vannstandsreduksjonen som følge av reguleringene så stor som 2,2 m (Tingvold 1999).
- Modellberegningene fra Vassdragsmodell HYDRA på flomepisoder i Glommavassdraget i 1967, 1984 og 1995, viser at vassdragsreguleringer har ført til reduserte flommer i vassdraget i forhold til en "upåvirket" (uregulert) tilstand først på 1900-tallet (jf. Kap. 2.3).
- Eksisterende flomsikringstiltak har lokalt stor betydning for å redusere skadeomfanget i forbindelse med store flommer på de elvestrekningene der tiltakene er gjennomført. Dette har også vært hovedformålet med disse tiltakene. Når det gjelder effekten av flomsikringstiltak på flomforholdene videre nedover i vassdraget er denne som regel liten, og i mange tilfeller neglisjerbar. Dette gjelder spesielt vannstand for flomkulminasjon ved store flommer. Framskynding av flomkulminasjonen etter bygging av flomverk er en mer betydelig effekt, og kan ha betydning i forhold til flomberedskapsarbeidet i vassdraget (Berg et al. 1999).
- Modellberegningene viser at flomverk medførte en liten økning både i vannstanden og vannføringen nedstrøms tiltaksområdet på de 3 analyserte flommene. Virkninger av noe omfang forekom først og fremst på strekningen fra Elverum til Kongsvinger, der de største flomverkene i vassdraget er lokalisert (jf. Kap. 2.3).
- Økt urbanisering har resultert i mindre infiltrasjon av nedbøren og tilhørende større og raskere overflateavrenning fra tettstedsarealer. I sterkt urbaniserte områder kan opp til 90 % av nedbøren renne av på overflaten. I Glommavassdraget utgjør tettsteder ca.

0,5 % av nedbørfeltet, og effekten av denne urbaniseringen er knapt nok målbar i hovedvassdraget. I sideelver og lokalt ved tettstedene gir urbaniseringen større og spissere flomtopper, med økt oversvømmelse og erosjon og økt utspyling av partikler som øker tilførselene av forurensninger til bekker og elver. Dette kan i neste omgang gi negative effekter på dyre- og plantelivet i vassdraget (Endresen 1997).

- Endringene i skogbruk og skogtilstand har ikke ført til målbare endringer i flomforhold (jf. Kap. 2.3).
- Beregninger som er utført med modellen LANDPINE, viser ingen signifikante endringer i avrenning på grunn av endringer i skogbrukets arealbruk i perioden 1920-90 (Rinde 1999). Dette understøttes av de statistiske analyser som er utført av Roald (1999). Grønlund et al. (1999) har foretatt vurderinger av jordbrukets arealbruk, grøfting og bakkeplanering i Glommavassdragets nedbørfelt, og konkluderer at det er lite sannsynlig at disse faktorene har bidratt signifikant til flomrisiko i hovedvassdraget. Dette skyldes lite omfang av slike arealendringer i forhold til totalarealet. For bakkeplaneringsområder vil det i tillegg være slik at den raske avrenningen kommer før flomtoppen i hovedvassdraget.
- Litteraturstudier viser at reguleringsinngrep og flomforebyggende tiltak som kanaliseringer/elveløpskorleksjoner og bygging av flomverk tett inntil elvers hovedløp, har resultert i betydelige negative miljøeffekter ved å endre strømhastigheter, habitatdiversitet og kontakten mellom elveløp og elveslette i en rekke vassdrag (Østdahl et al. 1998).

4.2 TILTAK MOT FLOMSKADER

Aktuelle tiltak mot flomskader omfatter planrelaterte tiltak som f.eks. innarbeidelse av flomhensyn i den generelle arealplanleggingen, i ulike typer sektorplaner for virksomhet i vassdragsnære områder og i egne planer for flomberedskap. I tillegg kommer strukturelle (tekniske) tiltak, f.eks. flomsikringstiltak som påvirker flomforløp og flomvannstand, eller sikrer infrastruktur og ulike typer virksomhet mot flomskader. De fleste tiltakene er forebyggende i forhold til framtidige flommer, men viktige deler av flomberedskapsarbeidet omfatter også tiltak som iverksettes under selve flommen eller i forbindelse med opprydding i etterkant av flommer. Internasjonalt er det i flomsammenheng en dreining i retning bort fra strukturelle tiltak og over mot ikke-strukturelle tiltak, der en forsøker å gjenskape naturlige avrenningsforhold og funksjoner i vassdragene. Denne trenden er synlig også i Norge, men potensialet for ikke-strukturelle tiltak er mer begrenset her i landet på grunn av topografiske forhold med relativt få og små elvesletter (Sælthun 1999).

HYDRA-programmet hadde som ett mål å foreslå tiltak som kan forebygge flomskader og redusere omfanget av flomskader på en kostnadseffektiv og miljømessig optimal måte. Dette helhetlige perspektivet forutsetter at det lar seg gjøre å inkludere miljøhensyn i kost-nytteanalyser. Problemene rundt dette drøftes i Sælthun (1999). Konklusjonen er at miljøvirkninger av flommer og flomsikringstiltak med dagens metoder ikke kan prissettes med rimelig sikkerhet. Bindeleddet mellom hva som er de teknisk-økonomisk og hydrologisk viktige tiltakene, og hva som er de miljømessige riktige tiltakene, mangler derfor i stor grad. Resultatet er at det er vanskelig å veie de ulike tiltakene som omtales i HYDRA-programmet i forhold til hverandre, i et helhetlig perspektiv.

Til tross for problemet med mangel på en felles enhet for vurdering av tiltakene, gir fagrapportene i HYDRA en gjennomgang av en rekke tiltak som hver for seg er brikker som kan bidra til en samlet vurdering av flomsikring, der miljøhensyn er inkludert. Noen av flomsikringstiltakene er vurdert ut fra et bredt perspektiv og ut fra flere brukerinteresser i vassdraget, f.eks. miljøhensyn, mens andre tiltak er vurdert spesifikt ut fra en bestemt brukerinteresse:

- En analyse av *flomdempingseffekten* av ytterligere reguleringer i Glommavassdraget på data fra historiske flommer i vassdraget på 1900-tallet, viser at de 10 prosjektene som ble anbefalt av Flomtilaksutvalget, supplert med et par andre aktuelle tilleggsreguleringer, har et betydelig potensiale når det gjelder flomdemping, ikke minst i Glomma. Ved gjennomføring av alle de anbefalte tilleggsreguleringene i Glomma, forventes bare mindre flomskader ved flommer av størrelse inntil 1995-flommen. I Otta, Lågen og Mjøsa ville en fortsatt måtte regne med flomskader i forbindelse med store sommer- og høstflommer (Tingvold 1999).
- Sikring av kommunal vannforsyning mot forurensning og funksjonssvikt ved flom er en sentral oppgave i det forebyggende flomsikringsarbeidet lokalt. På samme måte er sikring av kommunale avløps- og renovasjonsanlegg viktig for å hindre forurensning og funksjonssvikt på slike anlegg under flom (Sælthun & Lindholm 1999).
- Total og lokal overvannsdiskonering (TOD/LOD) har lokalt meget god flomdempende effekt i urbaniserte områder, mens den flomdempende effekten i hovedvassdrag synes å være ubetydelig. Forurensningsutførelsen til vassdragene reduseres og anleggene kan utnyttes til rekreasjons- og undervisningsformål. Samtidig viser erfaringer fra Sverige at kostnadene er 25 % lavere enn for konvensjonelle anlegg (Endresen 1998).

- Det bør legges økt vekt på miljøtilpasninger ved gjennomføring av nye flomsikringstiltak. Dette innebærer at fysiske strukturer som grov stein og blokkmateriale, naturlige vekslinger mellom kulper og stryk, meandere og soner med kantvegetasjon bør forsøkes bevart. I områder med negative miljøeffekter av gamle flomsikringstiltak bør det gjennomføres avbøtende tiltak eller rehabilitering og restaurering for å bedre leveforholdene for planter og dyr, og for å legge bedre til rette for rekreasjon og opplevelse av naturverdier (Østdahl & Taugbøl 1999).

Tiltakene som foreslås er knyttet til modellutvikling, metodeutvikling og til videreutvikling og integrering av flomrelatert arealplanlegging:

- Meteorologiske og hydrologiske modeller som brukes i forbindelse med flomprognoser og flomvarsling vil alltid inneholde unøyaktigheter. Det er derfor viktig å ta i bruk nye metoder for objektiv estimering av usikkerhet i den operative bruken av slike prognoser etter hvert som de utvikles (Skaugen 1999).
- Skaderisiko- og kost-nytteanalyser må bli en del av beslutningsgrunnlaget ved alle nye flomtiltak (Sælthun 1999).
- Arealbruksendringer som redusert jordarbeiding, bruk av direktesåing og eventuelt høstsådd korn på sandjord, kan brukes som tiltak mot flomskader på dyrket jord på elveslettene.
- Kommunenes beredskap mot flom må styrkes gjennom videreutvikling og evaluering av beredskapsplaner, økt vektlegging av flomhensyn f.eks. gjennom bruk av flomsonekart i kommunal arealplanlegging, og ved økt bruk av risiko- og sårbarhetsanalyser knyttet til flomforhold (Endresen & Lindholm 1998, Sælthun & Lindholm 1999, Krasovskaia et al. 1999).

4.3 VIDERE FOU-ARBEID

Den tverrfaglige forskningen som er utført i HYDRA, viser at samarbeid gir resultater. Flom i vassdrag er en viktig del av vassdragsdynamikken. I forsknings-sammenheng har problemene både samfunnsvitenskaplige og naturvitenskaplige sider, med betydelig gjensidig avhengighet.

I likhet med de fleste andre land, har Norge begrenset tradisjon i denne typen helhetlig vassdragsforskning. Det er på mange måter et paradoks at Norge som en "vassdragsnasjon" har hatt såvidt fragmentert tilnærming til vassdragsforskning som tilfellet har vært. HYDRA har vist at det kan være betydelig kunnskap og erkjennelse å hente ved å bringe sammen samfunnsfaglig og naturfaglig forskning med vann og vassdrag som et bredt tema.

Det anbefales at NVE bidrar til at det blir etablert et bredt program for vassdragsforskning i Norge. Det er naturlig å bygge videre på det arbeidet som er gjort i Glommavassdraget, og hvor en sikrer bred deltaking fra både samfunnsvitenskaplige og naturvitenskaplige miljøer. Dette for å høste synergieffekter for å løse de mange oppgavene vi har i vassdragene.

Arbeidet som er gjennomført i HYDRA-programmet har avdekket en rekke behov for videre FoU-innsats innenfor flomforskning. Behovene er av svært ulik karakter og kan variere fra helt konkrete og avgrensede prosjektema til mer overordnede programlignende tema. Når det gjelder videreutvikling av datagrunnlag, videre modellarbeid og videre undersøkelser knyttet til effekter av flom og tiltak mot flomskader, er det skissert tre FoU-områder som det anbefales å jobbe videre med.

FOU-OMRÅDE 1 - VIDEREUTVIKLING AV DATAGRUNNLAG OG METODIKK

Klima og vannbalanse. Klimaendringer kan endre vannbalansen og dermed påvirke flomforholdene i vassdragene. Gode meteorologiske og hydrologiske data er viktig for å avdekke slike endringer. For å styrke det meteorologiske datagrunnlaget er det nødvendig med flere systematiske meteorologiske registreringer, bl.a. i fjellområdene. Det er også behov for digitalisering av eksisterende eldre meteorologiske registreringer. Arbeid med videreutvikling av metodikk er viktig innenfor felter som estimering av arealnedbør og kvantitativ varslings, estimering av maksimalvannføring for vårflokker, bestemmelse av regionale vannekvivalenter i snø og beregning av usikkerhet i flomprognoser.

Vegetasjon, terreng, jord og arealbruk. Modeller som skal brukes til å undersøke følgene av endringer i arealbruk, må være geografisk fordelt. De nye modellene krever bedre datagrunnlag for å beskrive de fysiske prosessene på ulike skalaer. Det er viktig med en videreføring av datainnsamling i middels store nedbørfelt (=1000 km²), av samme type som Flisa- og Osensjøfeltene i HYDRA-programmet. Det er mulig å forbedre datakvaliteten betydelig ved å kombinere skogdata fra Landsskogtakseringen/NIJOS med digitaliserte data fra satelittbilder med høy oppløsning. Det kan også være aktuelt å bruke radarbilder som gir mulighet for direkte måling av trehøyder og stammevolum. På flomsletter trenger en særlig nøyaktige høydedata for å konstruere riktige flomkart og beregne strømhastigheter på slettene.

Erosjons- og sedimentasjonsprosesser. Erfaringene med målinger av sedimenttransporten under flommen i Glomma i 1995, viste at de hydrauliske forholdene i elveløpene forandrer seg svært mye under ekstremflommer. Det oppstår ofte så høye vannhastigheter at ordinære prøvetakingsmetoder ikke er anvendbare. Det

bør derfor utvikles instrumentering, metoder og prosedyrer for slike ekstremforhold. Effekter av erosjonsprosesser under ekstremflommer bør undersøkes nærmere. Dette gjelder spesielt erosjon som kan resultere i spredning av gamle partikkelbundne forurensninger og erosjon i sårbare høyfjells- og arktiske strøk.

Biologi. En viktig forutsetning for å kunne studere virkning av flom på biologiske samfunn er å ha data over en viss tidsperiode forut for flommen. Det vil derfor være viktig å styrke overvåkingen av biologiske parametre for ulike grupper av organismer, da dette vil bidra til økt forståelse av de økologiske effektene av flom, både på kort og lang sikt. Elveslettene på Østlandet bør være med i overvåkingen, da de biologiske prosessene kommer tydelig til uttrykk i slike områder.

FOU-OMRÅDE 2 – VIDEREUTVIKLING AV MODELLER

Vassdragsmodell HYDRA. Arbeidet med vassdragsmodell HYDRA bør videreføres ved at modellen anvendes på historiske flomepisoder med ulike gjentakintervall i Glommavassdraget. Videre bør modellen kalibreres for bruk i mindre vassdrag og i vassdrag der graden av menneskelig påvirkning er større enn i Glommavassdraget.

Operasjon og drift av hele vassdrag. Det er behov for videreutvikling av modeller med verktøy for beslutningsstøtte som kan brukes til drift og utnytting av vassdrag. Det er et generelt behov for å gjennomføre usikkerhetsanalyser for varsler og prognoser. Ved en rekke modelleringer trenger en sensitivitetstester for inngangs- og kalibreringsdata for de variable som går inn i modellene. Modelleringer knyttet til tilsig, flomforløp og funksjon av elvesletter og flomverk er avhengig av godt datagrunnlag når det gjelder vannføring, vannføringskurver og terrengmodeller. Datagrunnlaget for slike modelleringer bør forbedres, og forholdene under flommen i 1995 bør studeres mer inngående mht. hva som ville skjedd dersom flomverkene ble overtoppet eller brøt sammen på et annet tidspunkt enn de virkelig gjorde.

FOU-OMRÅDE 3 – HELHETLIG FLOMSIKRINGSARBEID

Flomdemping. Potensialet for flomdemping gjennom ytterligere reguleringer er godt dokumentert i HYDRA-programmet, mens potensialet for flomdemping gjennom manøvrering av de eksisterende reguleringsmagasinene ikke er utredet på tilsvarende måte. Det bør derfor utredes nærmere hva som kan oppnås når det gjelder bedre flomdemping innenfor gjeldende manøvreringsreglement, og innen nye reglementer der flomdemping av f.eks. høstflommer er et viktig mål.

Utredningene bør omfatte hva som er flaskehalsene og hvilke effekter og sidevirkninger en slik manøvrering kan ha for eiere av reguleringsanleggene og for andre brukerinteresser i vassdraget. Klimaendringer er et viktig element i videre forskning omkring flomdemping.

Flomsikring. Det bør etableres et større prosjekt eller program for utarbeiding av strategi for videre flomsikringsarbeid. Et element i dette bør være etablering av et demonstrasjonsanlegg for differensiert flomvern med ytre og indre flomverk, mulighet for styrt overtopping og vektlegging av miljøtilpasning av anlegget. Demonstrasjonsområdet bør brukes til opplæring i bl.a. planlegging, beredskap og krisestyring. Strategiarbeidet bør starte med en gjennomgang og etteranalyse av et utvalg av prosjekter med typiske flomsikringstiltak i norske vassdrag, for å vurdere alle forutsetninger for slike prosjekter. Arbeidet må også kartlegge hvilke faktorer som er viktige for at tiltakene skal være forenlig med prinsippet om helhetlig flomforvaltning. Eksempler på slike faktorer er i hvilken grad tiltakene påvirker fysiske og biologiske prosesser og hva som er de samfunnsmessige sidene ved tiltakene. Strategiarbeidet bør også omfatte utarbeidelse av kvantitative indikatorer for miljøtilstand for bruk til kost-nytteanalyser av flomsikringstiltak. Indikatorene bør rettes mot viktige leveområder i vann, våtmarker og strandsoner, og mot parametre som beskriver biodiversitet. Strategiarbeidet bør resultere i bedre kunnskapsformidling og utarbeidelse av veiledningsmaterieell for helhetlig flomsikringsarbeid.

Flommer med kort gjentakintervall og flommer i mindre vassdrag. Videre forskning bør i større grad enn det som har vært praktisk mulig i HYDRA-programmet, ta opp flomproblemer i mindre og middels store vassdrag. Det bør utføres studier av skadepotensial, virkning av arealbruksendringer og miljøeffekter ved flommer av kortere gjentakintervall enn Vesleofsen i 1995. Ut fra mulige klimaendringer i retning av varmere vintre og større andel nedbør som regn, er det interessant med videre undersøkelser på høst- og vinterflommer.

Litteratur

- Alfredsen, K. 1999. An object-oriented framework for application development and integration in hydroinformatics. Doktor ingeniør avhandling 1999: 20. NTNU, Institutt for vassbygging.
- Alfredsen, K. 2000. Rammeverk for bygging av generelle vassdragsmodellar. HYDRA-notat 02/00, 9 s.
- Alfredsen, K. & Killingtveit, Å. 2000. Vassdragsmodell HYDRA – Tilpasning til Glommavassdraget. HYDRA-notat 03/00, 26 s.
- Berg, H. & Strømmen, O. 1999. Flommagasiner i Lågen og Glomma oppstrøms Elverum. NVE-notat (saksnummer 1997- 04227-10).
- Berg, H., Engen, I.K., Haddeland, I., Høydal, Ø., Skoglund, M. & Traae, E. 1999. Effekter av flomsikrings tiltak på flomforløpet. HYDRA-rapport F05, 35 s.
- Berger, A. & Loutre, M.F. 1998. Climate model in an astronomical perspective. Proc. International Seminar: Do we understand global climate change? Norwegian Academy of Technological Sciences: 149-183.
- Berner, R.A. 1998. The carbon cycle and atmospheric CO₂ over phanerozoic time (past 550 million years). Proc. International seminar: Do we understand global climate change? Norwegian Academy of Technological Sciences: 121-147.
- Blikra, L.H. & Nemec, W. 1998. Postglacial colluvium in western Norway: depositional processes, facies and paleoclimatic record. *Sedimentology* 45: 909-959.
- Blikra, L.H. & Selvik, S.F. 1998. Climatic signals recorded in snow avalanche-dominated colluvium in western Norway: depositional facies successions and pollen records. *The Holocene* 8 (6): 631-658.
- Bogen, J. 1996. Erosion and sediment yield in Norwegian rivers, p 73-84 in: D.E. Walling and B.W. Webb (eds.). *Erosion and sediment yield: Global and regional perspectives*, IAHS - publ no 236.
- Bogen, J. & Bønsnes, T. 1999. Miljøvirkninger av erosjon og sedimenttransport under flommer. HYDRA-rapport Mi05, 48 s.
- Brabrand, Å. (red.) 1998. Virkning av flom på vannlevende organismer. HYDRA-rapport Mi02, 100 s.
- Brabrand, Å. 1998. Flom i komplekse fiskesamfunn i nordre Øyeren. Side 87-95 i Brabrand, Å. (red.) 1998. Virkning av flom på vannlevende organismer. HYDRA-rapport Mi02, 100 s.
- Bremnes, J.B. 1998. Statistical forecasting of precipitation conditional on numerical weather prediction models. HYDRA-notat 8/98, 15 s.
- Briffa, K.B., Jones, P.D., Schweingruber, F.H. & Osborn, T.J. 1998. Influence of volcanic eruptions on northern hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature* 393 4 June 1998: 450-455.
- Brookes, A. 1989. Alternative channelization procedures. In: Gore, J.A. & Petts, G.E. (eds.). *Alternatives in regulated river management*. CRC Press, Inc, Boca Raton, Florida, 139-162.
- Brookes, A. 1994. River channel change. In: Calow, P. & Petts, G.E. (eds.). *The rivers handbook*. Blackwell Science Ltd, 55-75.
- Changman, S.A. 1998. The historical struggle with floods on the Mississippi River Basin. Impacts of recent floods and lessons learnt for future flood management and policy. *Water international* 23 (4/1998): 263-271.
- DHI 1995. MIKE 11 Technical Reference, Dansk Hydraulisk Institutt, Hørsholm, Danmark.
- DHI 1998. MIKE 11 Overview.
<http://www.dhi.dk/mike11/index.htm>
- Dingham, S.L. 1994. *Physical Hydrology*. Prentice Hall, Inc. N.J., 575 p.
- DSB 1979. Normalreglementet for kommunenes beredskapsarbeid. Direktoratet for sivilt beredskap, Oslo.
http://www.dsb.no/nivaa_tre/publikasjoner/normalreglementet/normalreglementet_for_kommunenes.htm
- DSB 1989. Beredskapshåndbok for kommunene. Direktoratet for sivilt beredskap, Oslo.
- DSB 1994a. Veileder for kriseplanlegging i kommunene - plan for kriseledelse. Direktoratet for sivilt beredskap, Oslo. http://www.dsb.no/nivaa_tre/publikasjoner/krise-veileder/veileder_for_kriseplanlegging_i_.htm
- DSB 1994b. Veileder for kommunale risiko- og sårbarhetsanalyser. Direktoratet for sivilt beredskap, Oslo. http://www.dsb.no/nivaa_tre/publikasjoner/ros-veileder/veileder_for_ros.htm
- DSB 1998. Veileder for internkontroll i kommunal beredskap. Direktoratet for sivilt beredskap, Oslo. http://www.dsb.no/nivaa_tre/publikasjoner/internkontroll/rettelrar_for_internkontroll.htm
- Eliassen, A. & Grammeltvedt, A. 1990. Scenarier (2xCO₂) i Norge. Notat til Den interdepartementale klimagruppen, 1.2.1990.

- Endresen, S. 1997. Betydningen av lokal/total overvannsdistribusjon (LOD/TOD) på flommer. HYDRA-rapport T01, 31 s.
- Endresen, S. 1998. Lokal og total overvannsdistribusjon (LOD/TOD). Beskrivelser av anlegg, erfaringer m.m. NVE, HYDRA-rapport T03, 92 s.
- Endresen, S. & Lindholm, O. 1998. Skadereduserende kommunaltekniske tiltak med tanke på flom. HYDRA-rapport T04, 36 s.
- Erlandsen, A.H., Faugli, P.E. & Grimstad, C.E. 1997. Vannets kraft. Samfunnsbygger og miljøpåvirker. NVE og Enfo, 80 s.
- Faafeng, B., Lydersen, E., Kjellberg, G. & Bjerknes, V. 1998. Miljøkonsekvenser av flom – flom og vannkvalitet. HYDRA-rapport Mi01, 67 s.
- Fjelstad, K. 1997. Metoder for kvantifisering av hydrologiske prognosefelts representativitet. HYDRA-notat 1/97, 40 s.
- Flood, M. 1996. Flomtiltaksutvalget, delrapport 3.1. Ytterligere reguleringer i Glomma og Lågen. NVE-rapport nr. 28/1996.
- Follestad, T. & Høst, G. 1998. A statistical model for the uncertainty in meteorological forecasts. HYDRA-notat 12/98, 46 s.
- Fosvold, A. 1937. Bygdebok for Storelvdal. Bidrag til bygdens historie. Utgitt av en arbeidsnevnd. Norsk skoletidendes Trykkeri, Hamar. Bind I: 1-402. Bind II: 410-952.
- Friis Christensen, E. 1998. Correlation between solar activity and global climate. Proc. International Seminar: Do we understand global climatic change? Norwegian Academy of Technological Sciences: 65-80.
- Fylkesmannen i Hedmark 1996. Flommen – miljøkonsekvenser. Rapport 1/96, Miljøvernavdelingen, Hamar.
- Førland, E.J. 1993. Trends in precipitation amount and number of days with precipitation in Western Norway. Proc. of the Fourth Nordic Climate Workshop Reykjavik. Eds.: T. Jonsson, J. Cappelen & P. Frich. DMI Technical Report 17/93 Danish Meteorological Institute, Copenhagen.
- Godøy, Ø. 1998. Precipitation estimation using satellite remote sensing. HYDRA-notat 13/98, 33 s.
- Gottschalk, L., Lundager Jensen, J., Lundquist, D., Solantie, R. & Tollan, A. 1979. Hydrologic regions in the Nordic countries. Nordic Hydrology, 10: 273-286.
- Gottschalk, L. & Weingartner, R. 1998. Scaling of regional floods – an L-moment approach. European Geophysical Society XXIII General Assembly Nice, 20.-24. April. Abstract. European Geophysical Society, Annales Geophysical, Part II, Hydrology, Ocean & Atmosphere, Supplement II to Vol. 16.
- Grønlund, A. 1999. Naturgrunnlag og arealbruk i Glommas nedbørfelt. HYDRA-rapport N03, 22 s.
- Grønlund, A., Njøs, A. & Kløve, B. 1999. Endringer i landbrukets arealbruk i Glommas nedbørfelt. HYDRA-rapport N02, 26 s.
- Grønås, S. 1999. Den nord-atlantiske oscillasjon (NAO) og påvirkning av været. Naturen 1/1999: 29-37.
- Gunnarsdottir, H. 1996. Holocene Vegetation history in the Northern part of the Gudbrandsdalen Valley, South-Central Norway. Universitetet i Oslo.
- Haddeland, I. & Høydahl, Ø. 1999. Effekten av flomverk på flomforløpet. HYDRA-notat 5/99, 27 s.
- Haddeland, I. & Krokli, B. 1999. Hydrodynamisk modell for Glomma mellom Kongsvinger og Øyeren. HYDRA-notat 8/99, 8 s.
- Haraldsen, T.K. 1989. "Storofsen" – et 200 års minne. Jord og Myr, 3/1989: 89-101.
- Haveraaen, O. 1981. Virkning av snauhogst på vannmengde og vannkvalitet fra en østnorsk barskog. Medd. Norsk institutt for skogforskning 36 (7): 1-27.
- Heiman, M. 1996. Closing the atmosphere CO₂ budget. Global Change Newsletter 28/1996: 9-11.
- Hindar, K., L'Abée-Lund, J.H. & Arnekleiv, V. 1999. Storflommers effekt på laksunger i Gaula. HYDRA-notat 9/99, 17 s.
- Hisdal, H., Erup, J., Gudmundsson, K., Hiltunen, T., Jutman, T., Ovesen, N.B. & Roald, L.A. 1995. Historical runoff variations in the Nordic countries. NHP Report (37) 99 p. The Nordic Coordinating Committee for Hydrology/Norwegian Hydrological Council, Oslo.
- Houghton, J. 1998. Technical and scientific summary of the 1995 IPCC report. Proc. International seminar: Do we understand global climate change? Norwegian Academy of Technological Sciences: 9-15.
- Høgåsen, O.M. 1953. Vågå herad. I norske gardsbruk, Oppland, fylke III, Gudbrandsdalen, bind XI: 1006-1008.

- Ihringer, J., Plate, E. & Oberholzer, G. 1993. Massnahmen der Flurbereinigung und ihre Wirkungen auf das Abflussverhalten ländlicher Gebiete. Flurneuordnung und Landentwicklung in Baden-Württemberg. Schriftreihe des Landesamts für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg. Heft 3. 1993: 87-137.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climatic Change). 1996. Climate Change 1995. Working Group II. Impacts, Adaptions and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. IPCC. Cambridge University Press, 879 p.
- Jenssen, L. 1998. Assessing infrastructure vulnerability to major floods. IVB-rapport B2-1998-2.
- Jensen, M.H.J. 1998. Bruk av ensembleprognoser til estimering av usikkerhet i lokale nedbørsprognoser. HYDRA-notat 1/98, 19 s.
- Jóhannesson, T., Jónsson, T. & Kaas, E. 1995. Climate Change Scenarios for the Nordic Countries. Clim. Res. 5, 181-195.
- Jones, P.D., Briffa, K.R., Barnett, T.P. & Tett, S.F.B. 1998. High resolution palaeoclimatic records for the last millenium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures. The Holocene 8, 1998.
- Jones, J.A. & Grant, G.E. 1996. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, Western Cascades, Oregon. Water Resources Research 32: 959-974.
- Justis- og politidepartementet 1994. Langtidsplan for det sivile beredskap 1995-98. St. meld. nr. 48 (1993-94), 38 s.
- Justis- og politidepartementet 1997. Retningslinjer for regionalt samordningsansvar ved kriser og katastrofer i fred.
- Justis- og politidepartementet 1998. Hovedretningslinjer for det sivile beredskaps virksomhet og utvikling i tiden 1999-2002. St. meld. nr. 25 (1997-98). <http://odin.dep.no/repub/97-98/stmld/25/>
- KAD/MD 1997. Arealplanlegging og utbygging i fare-områder. Rundskriv T-5/97.
- Karlén, W. & Kuylenstierna, J. 1996. On solar forcing of Holocene climate: evidence from Scandinavia. The Holocene 6 (1996): 359-365.
- Killingtveit, Å., Fredriksen, O.F. & Løseth, O.E. 1996. Evaluering av flomvarsling i NVE. Hovedrapport. NTNU/CIVITAS. Trondheim/Oslo.
- Killingtveit, Å., Rinde, T., Markhus, E., Bostrøm, T., Furuberg, T., Sægrov, S. & Milina, J. 1994. Application of a semi-distributed urban hydrology model NHK'94, Nordic Hydrological association, Torshavn, The Faroe Islands, 31 July - 4 August 1994.
- Kondolf, G.M. 1997. Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels. Environmental Management 21 (4): 533-551.
- Krasovskaia, I., Gottschalk, L., Sælthun, N.R. & Berg, H. 1999. Flomrisiko og skadebegrensning – oppfatninger og vurderinger hos lokale beslutningstakere og publikum. HYDRA-rapport R04, 41 s.
- Kristensen, S.E. & Voksø, A. 1998. Metodebeskrivelse for flomsoneanalyse med eksempler fra Flisa og Kirkenær. HYDRA-notat 7/98, 26 s.
- Lamb, H.H. 1982. Climate, history and the modern world. Methuen & Haraldsen. T. K. Co. London and New York, 387 p.
- Lamb, H.H. 1995. Climate, history and the modern world. Routledge. London. 2nd edition, 433 p.
- Langsrud, Ø., Frigessi, A. & Høst, G. 1998. Pure model error of the HBV-model. HYDRA-notat 4/98, 28 s.
- Langsrud, Ø., Høst, G., Follestad, T., Frigessi, A. & Hirst, D. 1999. Quantifying uncertainty in HBV runoff forecasts by stochastic simulations. HYDRA-notat 2/99, 38 s.
- Larsen, E. 1998. Pre-historic climate variations: Ice ages and warm interglacials. Proc. International seminar: Do we understand global climate change? Norwegian Academy of Technological Sciences: 17-31.
- Lindholm, O., Myrabø, S., Milina, J., Sægrov, S. & Selseth, I. 1999. Urbaniserte områders innvirkning på flomforhold. HYDRA-rapport T02, 90 s.
- Lundberg, A. & Halldin, S. 1994. Evaporation of intercepted snow: Analysis of governing factors. Water Resources Research 30: 2587-2598.
- Lundquist, D. 1997. Flood forecasting in practice. HYDRA-notat 9/97, 8 s.
- Løken, P.E. & Helgaker, K.I. 1977. Jordkartlegging og vurdering av dyrkingsjord i Lesja kommune. NLH, Institutt for jordkultur, 196 s.
- Nesje, A. & Kvamme, M. 1991. Holocene glacier and climate variations in western Norway: Evidence for early Holocene glacier demise and multiple Neoglacial events. Geology 19: 610-612.

- Njøs, A. 1997. Flommer, klima og naturgrunnlag i perspektiv. HYDRA-notat 8/97, 27 s.
- NOU 1996. Tiltak mot flom. Norges offentlige utredninger 1996: 16, 207 s. Statens trykning, Oslo. <http://odin.dep.no/nou/1996-.16/index.htm>
- Pfister, C., Luterbacher, J., Schwarz-Zanetti, G. & Wegmann, M. 1998. Winter air temperature variations in western Europe during the Early and High Middle Ages (AD 750-1300). *The Holocene* 8 (1998): 535-552.
- Reklev, A. & Vikan, J.G. 1979. Jordressurser i området Bøåi-Nestandeåi i Lesja kommune. Hovedoppgave NLH Institutt for jordkultur, 146 s.
- Richards, J.F. 1990. Land transformation. In Turner et al. *The Earth as transformed by human action*. Cambridge University Press: 163-178.
- Rinde, T. 1998. A flexible hydrological modelling system using an object-oriented methodology. Doktor ingeniør avhandling 1998: 59. NTNU, Institutt for vassbygging.
- Rinde, T. 1999. LANDPINE – En hydrologisk modell for simulering av arealbruksendringers innvirkning på avrenningsforhold. HYDRA-rapport N04, 23 s.
- Rinde, T. 2000. Betydningen av endringer i landbrukets arealbruk på avrenning og flomrisiko i Glommas nedbørfelt. HYDRA-notat.
- Roald, L.A. 1997. Forslag til kravspesifikasjon av vassdragsmodell. HYDRA-notat 4/97, 9 s.
- Roald, L.A. 1999. Analyse av lange flomserier. HYDRA-rapport F01, 95 s.
- Roald, L.A. & Kristensen, S.E. 2000. Dokumentasjon av data brukt i HYDRA-programmet.
- Rummikainen, M. 1999. On the climate change debate. Report RMK No 86, 1999. SMHI, 27 p.
- Rundgren, M. & Beerling, D. 1999. A Holocene CO₂ record from the stomatal index of subfossil *Salix herbacea* L. from northern Sweden. *The Holocene* 9 (5/1999): 509-513.
- Rørslett, B. 1998. Flom og makrofyter i norske vassdrag. s. 74-86 i Brabrand, Å. (red.) 1998. Virkning av flom på vannlevende organismer. HYDRA-rapport Mi02, 100 s.
- Skaugen, T. 1999. Kvantifisering av usikkerhet i meteorologiske og hydrologiske prognoser. HYDRA-notat 3/99, 11 s.
- Solberg, G. & Nordseth, K. 1998. Flomvolum Østlandet våren 1995. Frekvens og regional fordeling. HYDRA-notat 11/98, 55 s.
- Sommerfeldt, W. 1943. Storofsen i 1789 og virkninger av den i Fron. Avhandling til embedseksamen, Geografi hovedfag, 236 s.
- Stanescu, V.A. & Matreata, M. 1997. FRIEND. Flow Regimes from International Experimental and Network Data. Projects H-5-5 and 1.1., 3. report 1994-1997: 229-236.
- Sælthun, N.R. 1999. Flommer, flomsikring og miljø – konflikt eller konsensus? HYDRA-rapport Mi06, 48 s.
- Sælthun, N.R., Bogen, J., Flood, M.H., Laumann, T., Roald, L.A., Tvede, A.M., & Wold, B. 1990. Klimaendringer og vannressurser. Bidrag til Den interdepartementale klimautredningen. NVE Publikasjon V 30, 104 s.
- Sælthun, N.R. 1996. The "Nordic" HBV model – version developed for the project Climate Change and Energy Production. NVE Publication no 7, Norwegian Water Resources and Energy Administration, Oslo.
- Sælthun, N.R., Bønsnes, T.E. & Roald, L.A. (red.) 1997. Regional flomfrekvensanalyse for norske vassdrag. NVE Rapport 14/97, 82 s.
- Sælthun, N.R., Aittoniemi, P., Bergström, S., Einarsson, K., Jóhannesson, T., Lindström, G., Ohlsson, P.-E., Thomsen, T., Vehviläinen, B. & Aamodt, K.O., 1998: Climate Change Impacts on Runoff and Hydropower in the Nordic Countries. Final report from the project "Climate Change and Energy Production". TemaNord 1998 552, Nordisk ministerråd, København, 170 s.
- Sælthun, N.R., Berg, H., Eggestad, H.O., Gottschalk, L., Krasovskaia, I., Kristensen, S.E., Skoglund, M., Voksø, A. & Wathne, M. 1999. Økonomisk risikoanalyse for flommer. HYDRA-rapport R03.
- Sælthun, N.R. & Lindholm, O. 1999. Forurensning under flom. HYDRA-rapport T05, 24 s.
- Sæterbø, E., Syvertsen, L. & Tesaker, E. 1998. Vassdragshåndboka. Tapir forlag, Trondheim, 409 s.
- Sætren, G. 1904. Beskrivelse af Glommen. Beskrivelse af Norske Vassdrag. Efter Offentlig Foranstaltning Udgivet af Kanaldirektøren. I Glommen. H. Aschehoug & CO. (W. Nygaard). Kristiania.
- Taksdal, S. (red.) 1999. Hydrologiske data i Norge. En dataoversikt per september 1999. Bind I og II. NVE-rapport nr. 9/1999.

- Tingvold, J.K. 1999. Effekt av vassdragsreguleringer i Glomma og Lågen på stor flom. HYDRA-rapport F04, 56 s.
- Tveito, O.E. 1999. Døgnarealnedbør for flomvarslng. HYDRA-notat 1/99, 39 s.
- Tveito, O.E. & Førland, E.J. 1998. Areal precipitation for flood forecasting. DNMI-report 8/1998.
- Tollan, A. 1975. Hydrologiske regioner i Norden. Vannet i Norden 1: 3-16.
- Tollan, A. og Ljøgodt, T. 1995. Prosjekt Hydra - mot ekstremflommer. Vann og Energi nr. 2/1995.
- Toverød, B.S. (red.) 1999. Arealbruk og sikring i flomutsatte områder. NVE - Retningslinjer 1/1999.
- Vischer, D. & Bader, S. 1999. Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserkraft. Wasser, Energie Luft. 91 (7/8 1999): 149-152.
- Ward, J.W. 1998. Riverine Landscapes: Biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation. Biological Conservation, 83 (3): 269-278.
- Wathne, M. & Alfredsén, K. 1997. Flomdemping i Gudbrandsdalslågen. Programstruktur og systembeskrivelse. HYDRA-notat 7/97, 22 s.
- Wathne, M. & Alfredsén, K. 1998. Modellstudie av regulerings flomdempende effekt i Gudbrandsdalslågen. HYDRA-rapport F03, 31 s.
- Wathne, M., Eggstad, H.O. & Skoglund, M. 1999. Samfunnskostnader pga. flom i vassdrag. HYDRA-rapport R02, 43 s.
- Wingård, B., Hegge, K., Mohn, E., Nordseth, K. & Ruud, E. 1978. Regional flomfrekvensanalyse for norske vassdrag. NVE, Vassdragsdirektoratet, Rapport 2-78, 100 s.
- WMO (editorial). 1999. The global climate system in 1998. World Meteorological Organisation Bulletin 48 (3/1999): 251-255.
- Ødegaard, V. 1998. High resolution precipitation forecasting with initial and boundary conditions from ensemble forecasts. HYDRA-notat 14/98, 8 s.
- Østdahl, T., Taugbøl, T. & Dervo, B. 1998. Miljøeffekter av flomforebyggende tiltak – en litteraturstudie. HYDRA-rapport Mi03, 46 s.
- Østdahl, T. & Taugbøl, T. 1999. Miljøtilpasninger ved eksisterende og nye flomsikringstiltak – en litteraturstudie. HYDRA-rapport Mi04, 71 s.
- Østmoe, A. 1985. Storofsen 1789. Værssystemet som førte til den største flomkatastrofen i Norge. Oversiktsregisteret. ISBN 82-7379-001-0, 56 s.
- Aass, P. 1998. Hunderørretens kondisjon og tilvekst etter flom. S. 44-45 i Brabrand, Å. (red.) 1998. Virkning av flom på vannlevende organismer. HYDRA-rapport Mi02, 100 s.

Flomdemping, flomvern og flomhandtering (F)

- F01 Analyse av lange flomserier.
Lars Andreas Roald, (NVE).
- F02 Estimating the mean areal snow water equivalent from satellite images and snow pillows.
Thomas Skaugen, (NVE).
- F03 Modellstudie av reguleringens flomdempende effekt i Gudbrandsdalslågen.
Magne Wathne og Knut Alfredsen, (SINTEF).
- F04 Effekt av vassdragsreguleringer i Glomma og Lågen på stor flom.
Jens Kristian Tingvoll, (GLB).
- F05 Effekter av flomsikringstiltak på flomforløpet.
Hallvard Berg, Inger Karin Engen, Inggjerd Haddeland, Øyvind Høydal & Eirik Traae, (NVE), Morten Skoglund, (SINTEF).

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 & Børre Dervo, (Østlandsforskning).
- Mi04 Miljøtilpasninger ved eksisterende og nye flomsikringstiltak - en litteraturstudie.
Torbjørn Østdahl & Trond Taugbøl, (Østlandsforskning).
- Mi05 Miljøvirkninger av erosjon og sedimenttransport under flommer.
Jim Bogen & Truls Erik Bønsnes, (NVE).

- Mi06 Flommer, flomsikring og miljø - konflikt eller konsensus?
Nils Roar Sælthun, (NIVA).

Naturgrunnlag og arealbruk (N)

- N01 Naturlige magasineringsområder.
Bjørn Follestad, (NGU),
Noralf Rye, (UiB).
- N02 Naturgrunnlag og arealbruk i Glommas nedbørfelt.
Arne Grønlund, (Jordforsk).
- N03 Endringer i landbrukets arealbruk i Glommas nedbørfelt.
Arne Grønlund, Arnor Njøs & Bjørn Kløve, (Jordforsk).
- N04 LANDPINE - en hydrologisk modell for simulering av arealbruksendringers innvirkning på avrenningsforhold.
Trond Rinde, (SINTEF).

Skaderisikoanalyse (R)

- R01 Economic Risk of Flooding - a case study for the floodplain upstream Nor in the Glomma River, Norway.
Lars Gottschalk, (UiO),
Irina Krasovskaia, (Universitetet i Uppsala).
- R02 Samfunnskostnader på grunn av flom i vassdrag.
Magne Wathne & Morten Skoglund, (SINTEF),
Hans Olav Eggestad, (Jordforsk).
- R03 Økonomisk risikoanalyse for flommer.
Nils Roar Sælthun, (NIVA),
Hallvard Berg & Astrid Voksø, (NVE),
Hans Olav Eggestad, (Jordforsk),
Lars Gottschalk, (UiO),
Irina Krasovskaia, (Universitetet i Uppsala),
Magne Wathne & Morten Skoglund, (SINTEF),
Søren Elkjær Kristensen, (NVE).
- R04 Kampen mot vannet - risikovurderinger og handlingsvalg blant lokale beslutningstakere og publikum.
Irina Krasovskaia, (Universitetet i Uppsala),
Lars Gottschalk, (UiO),
Nils Roar Sælthun, (NIVA),
Hallvard Berg, (NVE).

Tettsteder (T)

- T01 Betydningen av lokal-/total overvannsdiskonering (LOD/TOD) på flommer.
Svein Endresen, (Sivilingeniør Svein Endresen AS).
- T02 Urbaniserte områders innvirkning på flomforhold.
Oddvar G. Lindholm, (NLH),
Steinar Myrabø, (Jordforsk),
Jadranka Milina, Sveinung Sægrov &
Ingrid Selseth, (SINTEF).
- T03 Lokal og total overvannsdiskonering (LOD/TOD)
- Beskrivelser av anlegg, erfaringer mm.
Svein Endresen, (Sivilingeniør Svein Endresen AS).
- T04 Skadereduserende kommunaltekniske tiltak med
tanke på flom.
Svein Endresen, (Sivilingeniør Svein Endresen AS),
Oddvar Lindholm, (NLH).
- T05 Forurensningsproblemer i og fra tettsteder
i forbindelse med flom.
Nils Roar Sælthun, (NIVA),
Oddvar Lindholm, (NLH).

HYDRA-notat

- 1/97 Metoder for kvantifisering av hydrologiske
prognosefelts representativitet.
Kai Fjelstad, (NLH).
- 2/97 Effekter av flomsikringstiltak. En gjennomgang
av litteraturen.
Magne Wathne, (SINTEF).
- 3/97 Virkningen av lokal overvannsdiskonering på
tettstedsflommer.
Dag Rogstad & Bjørn Vestheim, (NLH).
- 4/97 Forslag til kravspesifikasjon av vassdragsmodell.
Lars Andreas Roald, (NVE).
- 5/97 A note on floods in high latitude countries.
Lars Andreas Roald, (NVE).
- 6/97 Climate change and floods.
Nils Roar Sælthun, (NIVA).
- 7/97 Flomdemping i Gudbrandsdalslågen.
Programstruktur og systembeskrivelse.
Magne Wathne & Knut Alfredsen, (SINTEF).
- 8/97 Klima, arealbruk og flommer i perspektiv.
Arnor Njøs, (Jordforsk).
- 9/97 Flood forecasting in practice.
Dan Lundquist, (GLB).
- 1/98 Bruk av ensembleprognoser til estimering av
usikkerhet i lokale nedbørprognoser.
Marit Helene Jensen, (DNMI).
- 2/98 LANDSKAP OG ESTETIKK –et kulturelt perspektiv.
Oddrun Sæter, (Byggforsk).
- 3/98 Betydning av vårflommens størrelse for tetthet av
laks- og ørretunger i Saltdalselva.
Arne J. Jensen & Bjørn Ove Johnsen, (NINA).
- 4/98 Pure Model Error of the HBV-model.
Øyvind Langsrud, Arnoldo Frigessi & Gudmund
Høst, (Norsk Regnesentral).
- 5/98 Analyse av effekter av urbanisering og
avrenningsutjevnenende tiltak i Svebestadfeltet –
Sandnes kommune.
Jadranka Milina, (SINTEF).
- 6/98 Virkning av urbanisering på avrenningsforhold i
Storånavassdraget.
Jadranka Milina, (SINTEF).

- 7/98 Metodebeskrivelse for flomsoneanalyse med eksempler fra Flisa og Kirkenær.
Søren Elkjær Kristensen & Astrid Voksø, (NVE).
- 8/98 Statistical Forecasting of Precipitation Conditional on Numerical Weather Prediction Models.
John Bjørnar Bremnes, (DNMI).
- 9/98 1995-flommens volum, stigningstid og varighet i Gudbrandsdalslågen.
Jan Ove Søderholm, (UiO).
- 10/98 Vårflommer i Glomma. Modellerings av maksimalvannføringen på bakgrunn av volum og flomhydrogrammets form.
Grete Orderud Solberg, (UiO).
- 11/98 Flomvolum Østlandet våren 1995. Frekvens og regional fordeling.
Grete Orderud Solberg & Kjell Nordseth, (UiO).
- 12/98 A Statistical Model for the Uncertainty in Meteorological Forecasts, with Applications to the Knappom and Røykenes Catchments.
Turid Follestad & Gudmund Høst, (Norsk Regnesentral).
- 13/98 Precipitation estimation using satellite remote sensing.
Øystein Godøy, (DNMI).
- 14/98 High Resolution Precipitation Forecasting with Initial and Boundary Conditions from Ensemble Forecasts.
Viel Ødegaard, (DNMI).
- 1/99 Døgnarealnedbør for flomvarslings.
Ole Einar Tveito, (DNMI).
- 2/99 Quantifying uncertainty in HBV runoff forecasts by stochastic simulations.
Øyvind Langsrud, Gudmund Høst, Turid Follestad, Arnoldo Frigessi & David Hirst, (Norsk Regnesentral).
- 3/99 Kvantifisering av usikkerhet i meteorologiske og hydrologiske prognoser.
Thomas Skaugen, (NVE).
- 4/99 The Effect of Peatland Drainage and Afforestation on Runoff Generation. Consequences on Floods in River Glomma.
Bjørn Kløve, (Jordforsk).
- 5/99 Effekter av flomverk på flomforløpet.
Ingjerd Haddeland & Øyvind A. Høydal, (NVE).
- 6/99 Effekter av senkingstiltak på flomforløpet.
Inger Karin Engen, Øyvind Høydal, Øystein Nøtsund & Eirik Traae, (NVE).
- 7/99 = 11/99.
- 8/99 Hydrodynamisk modell for Glomma mellom Kongsvinger og Øyeren.
Ingjerd Haddeland & Bjarne Krokli, (NVE).
- 9/99 Storflommers effekt på laksunger i Gaula.
Kjetil Hindar, (NINA),
Jan Henning L'Abée-Lund, (NVE),
Jo Vegar Arnekleiv, (NTNU).
- 10/99 Effekten av regulering på flomdempning i Namsen – datarapport.
Magne Wathne, (SINTEF).
- 11/99 Nødoverløp på flomverk.
Morten Skoglund, (SINTEF),
Eirik Traae, (NVE),
Einar Tesaker, (SINTEF).
- 1/00 Improved front line decision tools - risk perception among decision-makers and riparian population.
Irina Krasovskaia, (Universitetet i Uppsala),
Lars Gottschalk, (UiO),
Nils Roar Sælthun, (NIVA),
Hallvard Berg, (NVE).
- 2/00 Rammeverk for bygging av generelle vassdragsmodellar.
Knut Alfredsen, (SINTEF).
- 3/00 Vassdragsmodell HYDRA – tilpassing til Glommavassdraget.
Knut Alfredsen, (SINTEF),
Ånund Killingtveit, (NTNU).
- 4/00 Romlig korrelasjonsstruktur på regnflom i Sør-Norge.
Marit Astrup, (UiO).



Layout: ABC Visuell Kommunikasjon. Omslag: Gazette.
ISBN 82-410-0402-8. ISSN 1501-2832.



N V E