HYDRA-rapport nr. R03

Økonomisk risikoanalyse for flommer

av

Nils Roar Sælthun, NIVA
Lars Gottschalk, UiO
Irina Krasovskaia, Univ. i Uppsala
Hallvard Berg, Astrid Voksø,
Søren Elkjær Kristensen, NVE
Hans-Olav Eggestad, Jordforsk
Morten Skoglund, Magne Wathne, SINTEF

Forord

Denne rapporten oppsummerer resultatene fra HYDRA-programmets hovedprosjekt "Skaderisikoanalyse", delprosjektene R1 - Etablere grunnelementer for skadeestimat, R2 - Flomsoneanalyse, og R3 - Flomfrekvens og risikoanalyse. Tre delrapporter danner underlag for rapporten:

- " Samfunnskostnader pga. flomskader i vassdrag" ved Magne Wathne (SINTEF Bygg og Miljøteknikk), Hans Olav Eggestad (Jordforsk) og Morten Skoglund (SINTEF Bygg og Miljøteknikk)

- "Metodebeskrivelse for flomsoneanalyse med eksempler fra Flisa og Kirkenær" ved Søren Elkjær Kristensen og Astrid Voksø (NVE)

- "Economic risk of flooding – a case study for the floodplain upstream Nor in the Glomma River, Norway" ved Lars Gottschalk (Universitetet i Oslo) og Irina Krasovskaia (Uppsala universitet)

En god del av materialet er bare publisert i hovedrapporten. Samarbeidet har i stor grad gått på tvers av delprosjektene, og et klart skille mellom bidragene fra de forskjellige delprosjektene er ikke opprettholdt i hovedrapporten.

Prosjekt R4 - "Førstelinje beslutningsstøtte" rapporteres separat.

Oslo, 20. juli 2000

Nils Roar Sælthun
prosjektleder

Innhold

		Side
1	**Sammendrag**	5
1.1	Skadefunksjoner	5
1.2	Vannlinjer og flomkart	6
1.3	Flomfrekvensanalyse	7
1.4	Risikoanalyse	9
2	**Summary**	11
2.1	Damage functions	11
2.2	Water surface profiles and flood maps	12
2.3	Flood frequency analysis	13
2.4	Economic risk analysis	13
3	**Flommer og flomrisiko, begreper og prinsipper**	14
3.1	Elva, et risikoelement	14
3.2	Flomvassføring, flomvannstand og flomfrekvens	14
3.3	Vannlinjer, flomsonering og flomkart	18
3.4	Flomrisiko	19
3.5	Andre skader enn oversvømmelse	30
3.6	Flommer og miljøeffekter	31
4	**Hovedkomponenter i økonomisk skade**	33
4.1	1995-flommen	33
4.2	Andre nyere flommer	33
5	**Skadefunksjoner**	36
5.1	Generaliserte flomskadefunksjoner	36
5.2	Definisjoner og datakilder	36
5.3	Bygninger	38
5.4	Vei	42
5.5	Jernbane	43
5.6	Flom- og erosjonssikringstiltak	45
5.7	Skader på jordbruksareal	46
5.8	Avsluttende kommentarer	57
6	**Flomfrekvensanalyse**	59
6.1	Regional analyse	59
6.2	Metodiske problemer ved reguleringer	69
7	**Vannlinjeberegninger**	74
7.1	Innledning	74
7.2	Sammenlikning av vannlinjer fra ulikt datagrunnlag	74
7.3	Nøyaktigheten av beregnete vannlinjer	76
8	**Flomkart og flomsonering**	80
8.1	Innledning	80
8.2	Metodikk	80
8.3	Datakilder for generering av terrengmodeller	82
8.4	Datagrunnlag for terrengmodellene	82
8.5	Metoder for generering av terrengmodeller	83
8.6	Metoder brukt i denne studien	84
8.7	Kartgrunnlag og nøyaktighet	85
8.8	Flomsonekart fra forskjellig kartgrunnlag	90
8.9	Teknikker for å kartlegge potensielle skadeobjekter	95

9 **Risikoanalyse** 97
9.1 Økonomisk risiko, bygninger 97
9.2 Risikoanalyse for andre skadeobjekter 107
9.3 Vurdering av overførbarhet av skadefunksjoner til andre vassdrag 107

Referanser 109

Tidligere utgitt i Hydra serien 114

Vedlegg 115

Vedlegg A
Data benyttet i analysen av jordtapskader 115

Vedlegg B
Flomkart 119

Vedlegg C
Vannlinjer for forskjellige flommer 137

Vedlegg D
Elvetverrsnitt beregnet på grunnlag av forskjellig kartgrunnlag 141

1. Sammendrag

Hovedmålsettingen for R-prosjektet i HYDRA er å forbedre metodikk for flomkartlegging og skadeoverslag. Anvendelsesområdene for de forbedrede metodene vil først og fremst være innen arealbruksplanlegging og i økonomisk nytte-kostnadsanalyse for flomtiltak. De viktigste komponentene av prosjektet er:

- etablering av standardiserte skadefunksjoner for forskjellige objekter, med særlig vekt på bygninger og jordbruksarealer,
- forbedring av metodikken for flomsoneanalyse, inkludert testing av forskjellige kartgrunnlag,
- identifisering av utsatte objekter og områder ved hjelp av GIS og eiendomsregistre,
- forbedret regional flomfrekvensanalyse,
- økonomisk risikoanalyse,
- verifikasjon og usikkerhetsanalyse av skadefunksjoner.

Det har vært fokusert på å utnytte forskjellige informasjonskilder, særlig digitale, i kombinasjon med avanserte metoder.

R-prosjektet er begrenset til økonomiske effekter. Miljøhensyn er dekket av andre HYDRA-prosjekter, først og fremst Mi-prosjektet, "Miljøvirkninger av flom og flomforebyggende tiltak". Noen sentrale rapporter på miljøsiden som har relevans i risikoanalyse og utvidet nytte-kostnadsanalyse er:

- Flom og vannkvalitet (Faafeng m.fl. 1999).
- Virkning av flom på vannlevende organismer (Brabrand m.fl. 1999).
- Miljøeffekter av flomforebyggende tiltak (Østdahl, Taugbøl & Dervo 1999).
- Miljøvennlig flomsikring (Østdahl & Taugbøl 1999).
- Flommer, erosjon og sedimenttransport i vassdrag (Bogen & Bønsnes 1999).
- Konflikter omkring flomskader, flomsikring og miljø (Sælthun 1999)
- Flommer og forurensning i tettsteder (Sælthun & Lindholm 1999)

1.1 Skadefunksjoner

Standardiserte skadefunksjoner er etablert for noen objekttyper. Hovedkilden for disse analysene er skaderegistreringene etter "Vesleofsen" i 1995.

De økonomiske tapene er klassifisert som følger:

- Direkte skade: Utbetaling til erstatning eller nybygging som gjør det mulig å føre skadeobjektet tilbake til en standard som tilsvarer dagens krav.
- Indirekte skader: Merkostnader påført eiendom eller organisasjoner utenfor selve det flomutsatte området som en ringvirkning av flommen.
- strakstiltak: Kostnader som er påløpt i løpet av flomepisoden på grunn av de tiltak som er satt inn.

1.1.1 Bygninger

Den viktigste skadeklassen er bygninger. Skadeestimatene er basert på takstene utført etter 1995-flommen. Disse takstene inkluderer registrering av maksimal vannstand i bygningen, slik at skadene kan relateres til vannstand. For bolighus er det i middel en skadeøkning på 1240 kr per cm vannstandsstigning over et basisnivå på -250 cm under gulv første etasje, men med svært store variasjoner (se figur 1). Variabiliteten reduseres noe dersom alder på bygningen tas i betraktning, men ytterligere forbedring forutsetter at man også kan ta med totalverdien av bygningen i analysen. Denne informasjonen er ikke tilgjengelig i skadetakstene. For norske bolighus ser skaden ut til å nærme seg totalskade når vannet har stått ca en meter over første etasjes gulvnivå.

For uthus, garasjer osv er midlere skade av størrelseorden 50 000 kr pr bygning. Andre bygningstyper - forretninger, industribygg osv er det ikke datagrunnlag til å etablere generelle skadefunksjoner for.

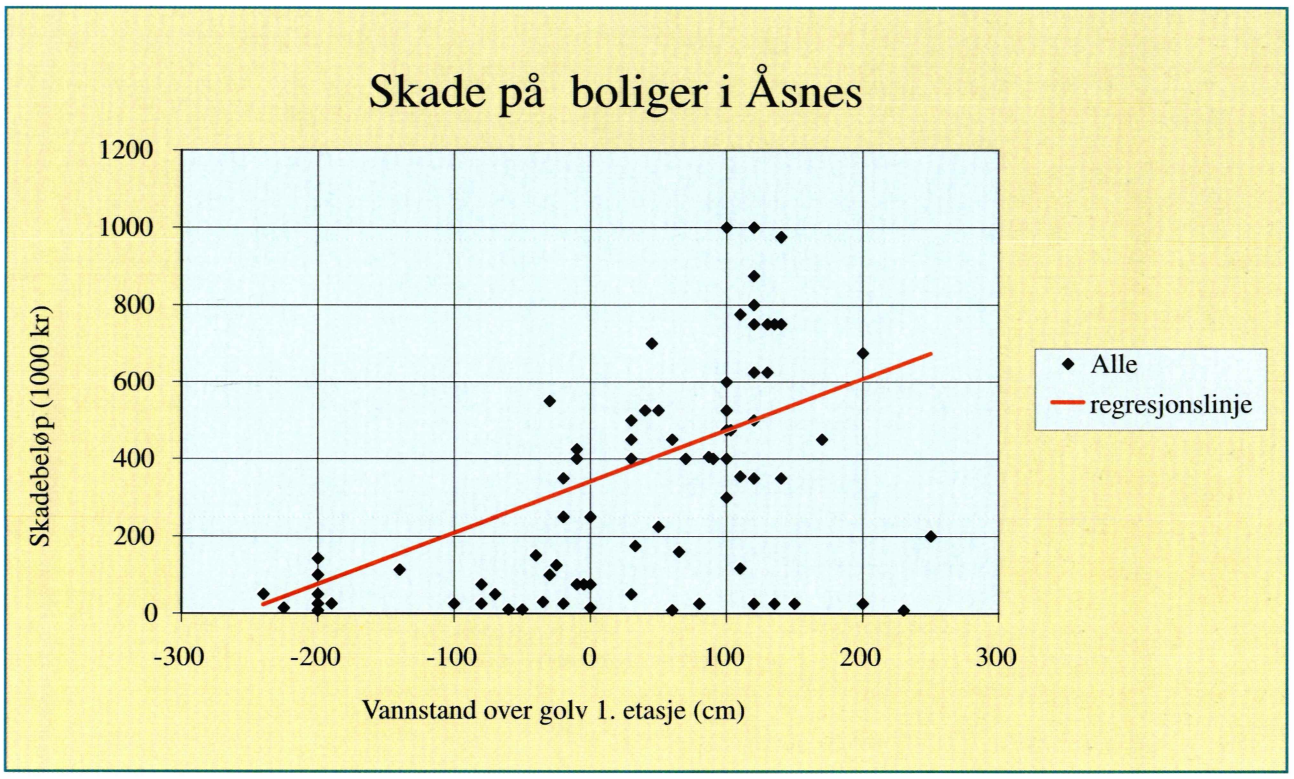
1.1.2 Veier og annen infrastrukturer

Skadene på fylkes- og riksveier var i 1995 i gjennomsnitt 360 000 kr pr km oversvømmet vei. Det er ikke funnet grunnlag for å skille på riksveier og fylkesveier.

Prisindex SSB

Skadene på jernbane avhenger av om vannstanden bare har nådd det såkalte formasjonslaget (hovedfundamentet), eller har oversvømt overbygningen (pukklaget som danner underlag for svillene). I det første tilfellet er midlere skade 35 000 kr pr km, i det siste tilfellet varierer tilleggskostnadene fra 45 000 til 250 000 kr pr km, avhengig av graden av erosjon og tilslamming.

De indirekte kostnadene er vanskelige både å estimere og å generalisere - de avhenger sterkt av i hvor stor grad interregional transport er brutt eller vanskeliggjort. For flommen i 1995, som medførte store problemer både for vei og jernbanetransport, ser de ut til å være av samme størrelsesorden som de direkte kostnadene i transportsektoren.



Figur 1 Skadetakster på bolighus i Åsnes som funksjon av vannstand etter flommen i 1995.

Figure 1 Damage to residential houses in Åsnes after the flood in 1995.

1.1.3 Jordbruksarealer

De viktigste skadene i jordbruket, ved siden av skade på bygninger og infrastruktur er:

- avlingstap
- skade på jordbruksarealer pga erosjon og sedimentasjon.

Erosjonsskadene er ikke en jevn flateerosjon, men konsentrert til groper og renner. Skadene etter flommen i 1995 ble registrert av Øygarden m. fl. (1996), og dette materialet er analysert med sikte på å finne hvordan erosjonen varierer med fysiske faktorer gjennom regresjonsanalyse. Disse fysiske faktorene er blitt etablert ved bruk av digitale flomkart, digitale markslagkart og vannlinjer. GIS-verktøy har vært sentrale hjelpemidler. De viktigste prediktorene har vist seg å være:

- vannhastighet (beregnet på grunnlag av vannlinjehelning og vanndyp ved hjelp av Mannings formel)
- andel dyrket jord av oversvømt areal
- bredden (på tvers av elveretningen) av det oversvømte arealet.

Skader fra 29 strekninger langs Glomma danner grunnlag for regresjonsanalysen. Figur 2 viser et eksempel på samvariasjon av estimert og observert jordtap (pr arealenhet) for disse områdene.

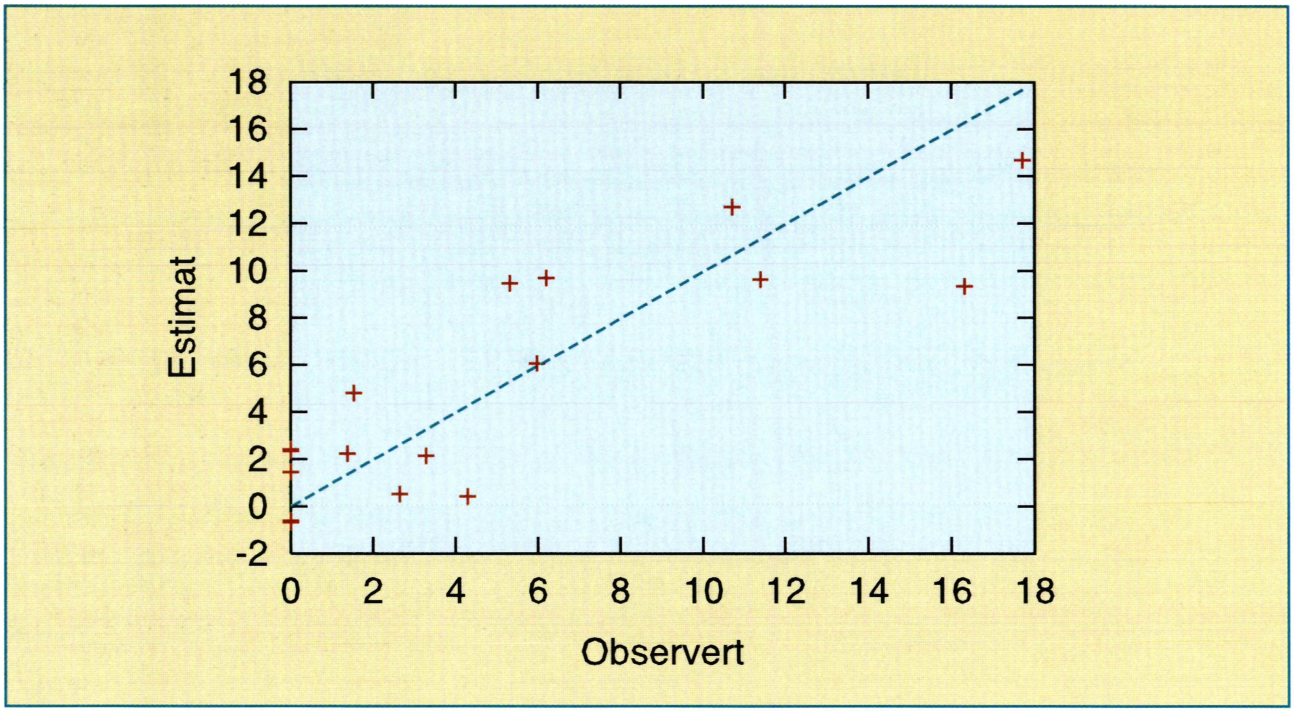
Årstid må antas å ha en betydelig innflytelse på slike flomskader - de største skadene vil man få dersom flommen inntreffer like etter jordbearbeiding og såing. Siden de analyserte skadene er fra en enkelt flomsituasjon (tidlig i juni), har det ikke vært mulig å analysere denne avhengigheten.

1.2 Vannlinjer og flomkart

Forskjellige metoder for beregning av vannlinjer og konstruksjon av flomkart er vurdert. For vannlinjeberegninger gir bruk av kalibrerte matematiske hydrauliske modeller de beste resultatene, fulgt av parallellforskyving av registrert historiske flomlinjer. Parallellforskyvning av vannlinje fra normale vassføringsforhold, som vannlinjene i vassdragsnivellementet, kan lokalt gi store feil.

Forskjellige grunnlagsdata for å produsere flomkart er testet for ni flomsletter i Glomma og Trysilelv. Disse datakildene er:

1. Standard 1:50000 kart med 20 m ekvidistanse (N50) i digital form
2. Økonomisk kartgrunnlag i digital form, 5 meter ekvidistanse med høydeinformasjon fra elvebredd og veier
3. Detaljert høyde hentet fotogrammetrisk fra flybilder
4. Laserscanning fra fly.



Figur 2 Estimert jordtap mot observert for de undersøkte områdene.

Figure 2 Estimated vs observed eroded mass from flood plains.

Terrengmodeller og flomkart fra de to første kildene har blitt sammenlignet med de to siste (som fasit), og med observerte flomlinjer.

Hvor gode flomkartene basert på økonomisk kartverk blir avhenger i stor grad av hvor høydekotene ligger i forhold til flomsletta. Når en tar med annen høydebærende informasjon fra veier og elver når terrengmodellen genereres, blir resultatet bedre der det er mangel på høydekoter. De grove terrengmodellene mangler høydevariasjonene mellom 5 meter kotene og utjevner koller, forsenkninger og brattkanter. Feilene blir gjerne størst ved begynnende oversvømmelse - dette er på den andre side situasjoner som vanligvis gir moderat skade og dermed har begrenset vekt i risikoanalyse og nytte-kostnadsanalyse for flomtiltak.

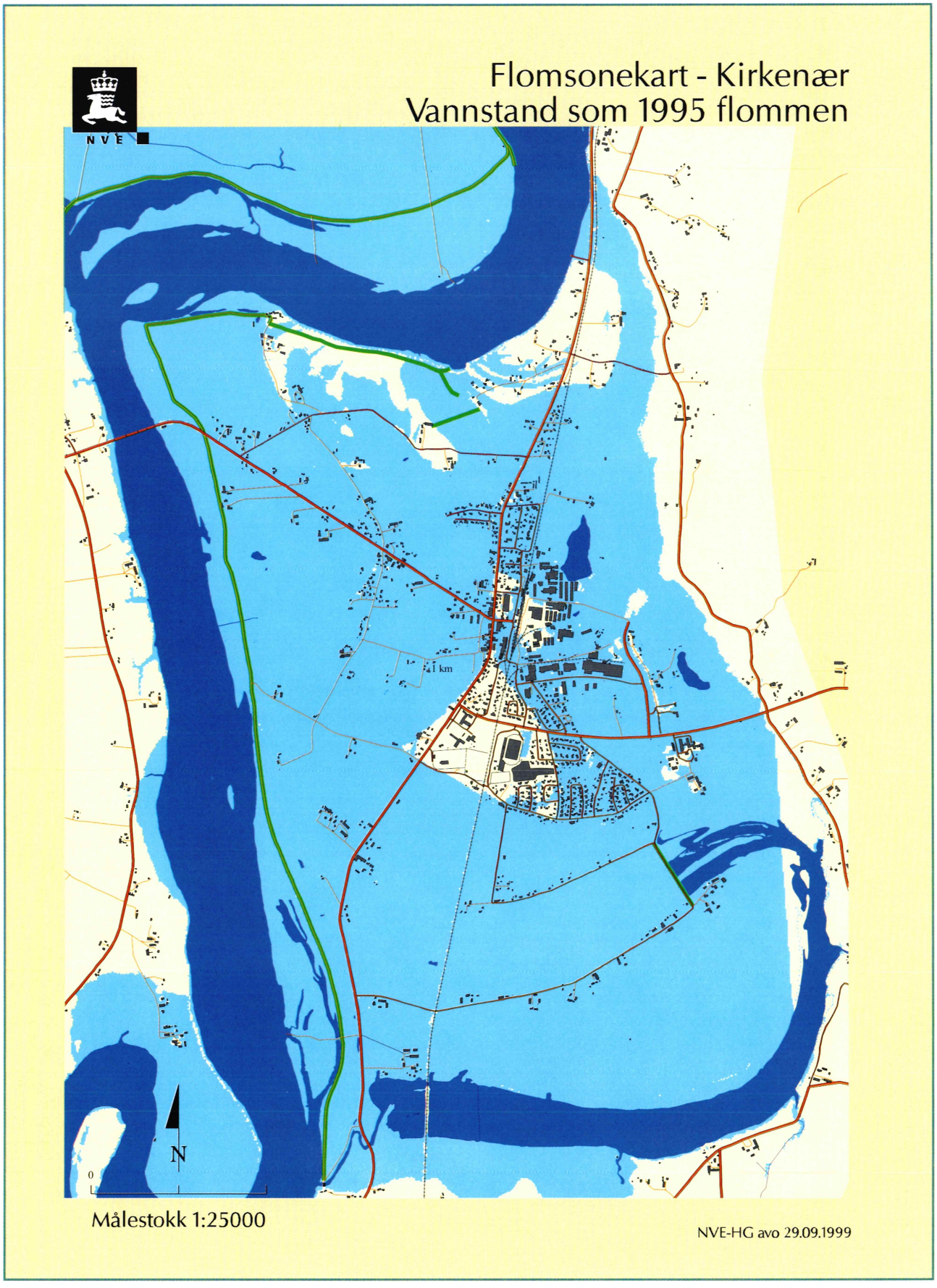
Ved ekstrem flom dekker gjerne flommen hele elvesletta bortsett fra koller og høydedrag og feilene opptrer der disse høydene er utjevnet og dermed feilklassifisert som under flomvannstand. Flomkart basert på økonomisk kartverk kan dermed være tilfredsstillende for statistiske formål og for nytte-kostnadsanalyse, men ikke for detaljert flomsonering. Figur 3 viser et eksempel på flomkart og profiler av flomsletta for ett av de ni områdene (Kirkenær uten flomverk). I tillegg til kart basert bare på kotene fra økonomisk kartverk er det også undersøkt hvorvidt bruk av annen høydesatt informasjon fra samme kartverk forbedrer terrengmodellen. Slik informasjon kan være veier, vannflater osv. For enkelte områder, m.a. Trysil, gir dette en forbedring. Utslagene er imidlertid ikke konsekvente, først og fremst fordi forekomsten av slik informasjon er nokså tilfeldig. Nøyaktigheten i terrengmodellen blir dermed mer variabel ved inkludering av slik informasjon.

I tillegg til metodeutviklingen er et viktig produkt av denne delen av prosjektet flomkart for gjentaksintervall på 10 år, 50 år (1966-flommen) og 100-200 år (Vesleofsen) for elveslettene Flisa, Kirkenær, Kongsvinger, Heradsbygd, Elverum, Øksna, Koppang og Alvdal i Glomma, og Trysil i Trysilelva.

1.3 Flomfrekvensanalyse

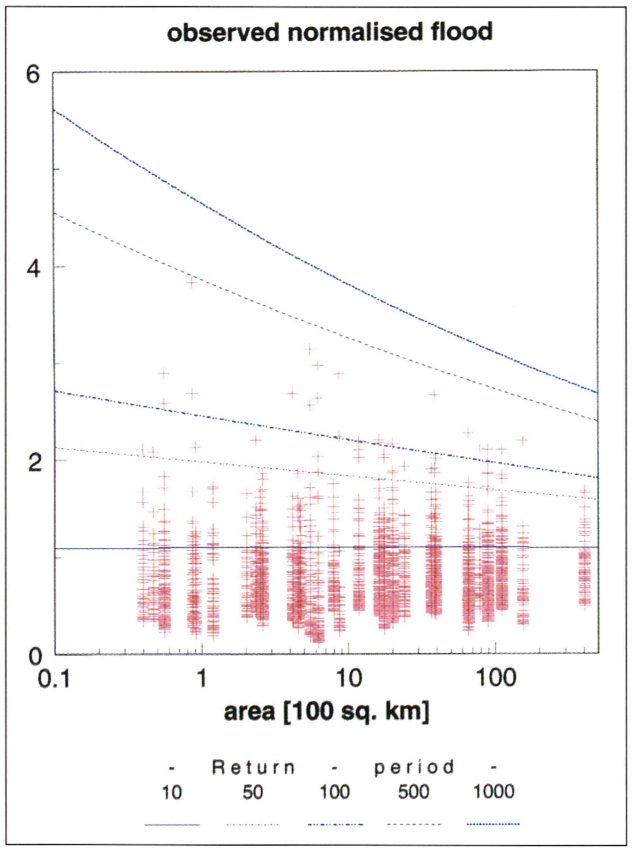
Flomfrekvensanalyse er et viktig element i risikoanalyse. Norge har et godt utbygd nettverk av hydrologiske målestasjoner, med kontinuerlige måleserier på opptil 120 år, men selv i en så gunstig situasjon innebærer estimering av flomstørrelsen for flommer med lav overskridelsesrisiko/høyt gjentaksintervall store usikkerheter.[1]) Disse usikkerhetene økes ytterligere ved at mange elver i Norge er regulerte, og ved den ukjente innflytelsen fra andre arealinngrep, vassdragsinngrep, naturlige klimavariasjoner og menneskeskapte klimapåvirkninger. Noen, men

[1]) Den samme usikkerheten gjør seg selvsagt gjeldende i det omvendte problemet - å estimere gjentaksintervallet for en historisk flom eller sannsynligheten for oversvømmelse av et gitt punkt/objekt.



Figur 3 Eksempel på flomkart (Kirkenær, med oversvømte flomverk).

Figure 3 Example of floodmap (Kirkenær inundated).



Figur 4 Regional flomfrekvensanalyse for Glomma, 10, 50, 100, 500 og 1000 års flom skalert mot middelflom, som funksjon av areal Markørene viser observerte flommer.

Figure 4 Regional flood frequency analysis for River Glomma, 10, 50, 100, 500 and 1000 year flood scaled on average flood, as function of area. The markers show observed floods.

ikke alle av disse usikkerhetskildene, kan reduseres ved at man kombinerer lokal og regionale flomdata. Prosjektet har prøvd ut forbedret metodikk for regionalflomfrekvensanalyse og estimert usikkerheten forbundet med flomfrekvensanalyse i risikoanalysesammenheng.

I Norge har man tradisjonelt benyttet regional flomfrekvensanalyse basert på indeksflom-metoden uten å ta hensyn til innflytelsen av nedbørfeltets størrelse på frekvenskurvens forløp (Wingård m.fl. 1978; Tveito 1993). Denne studien har anvendt en metode utviklet av Gottschalk og Weingartner (1999), som tar hensyn til feltarealets innflytelse på skjevheten i fordelingsfunksjonen. Den regionale analysen for Glomma (basert på 35 stasjoner med nedbørfelt fra 40 til 40 000 km^2) indikerer at 1000-års flommen er rundt 4.7 ganger middelflommen for et felt på 100 km^2 og ca 3.2 ganger middelflommen for et felt på 10 000 km^2. Figur 4 viser 10, 50, 100, 500 og 1000-års flom, skalert mot middelflommen, som funksjon av nedbørfeltareal.

Usikkerhetsanalysen viser m.a. at usikkerheten fra de regional analysene reduseres raskt når noe lokal informasjon finnes.

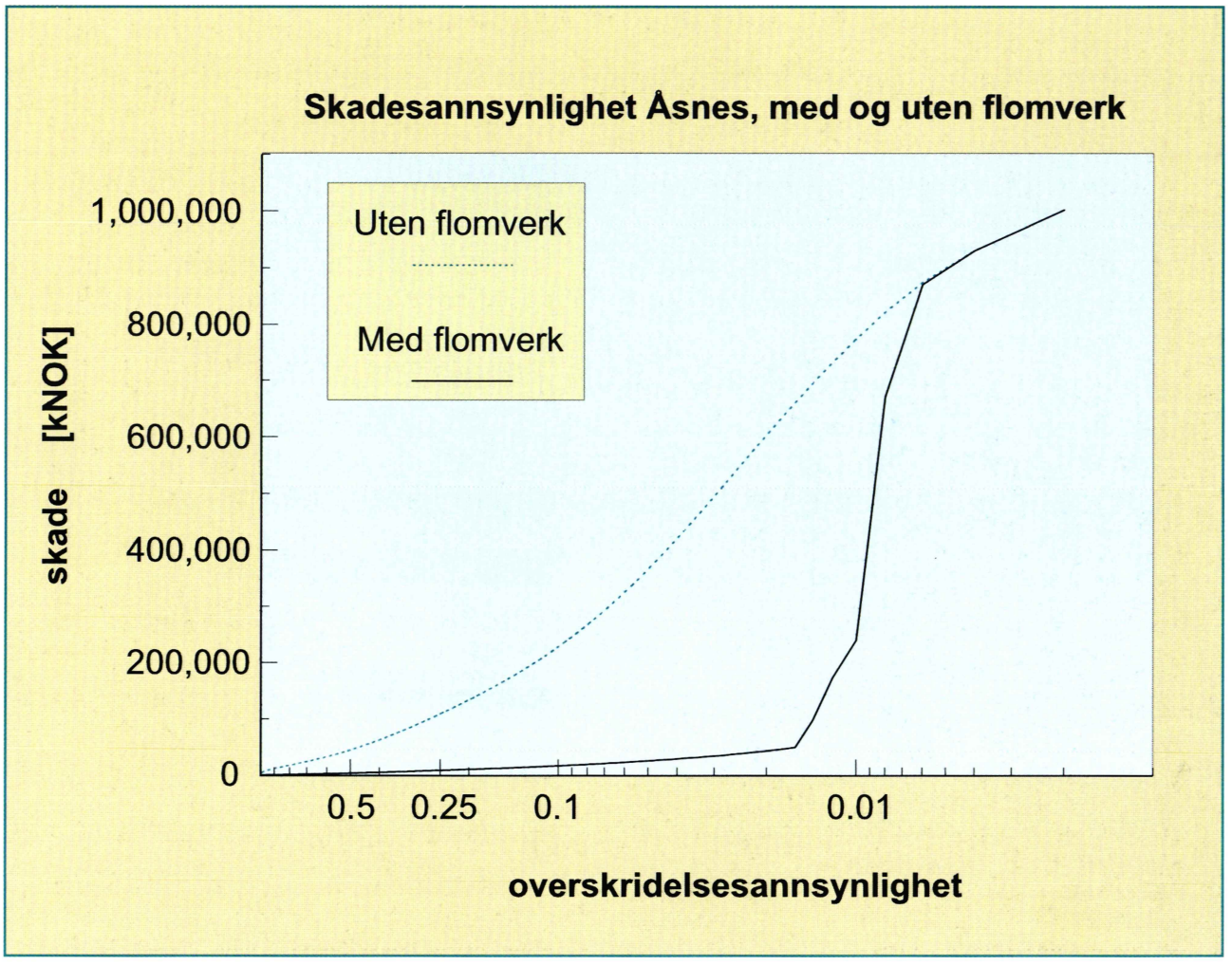
1.4 Risikoanalyse

Som et eksempel på risikoanalyse er sammenhengene skade/vannstand og skade/sannsynlighet for bygninger etablert for flomsletta i Grue og Åsnes, en strekning på 32 km oppstrøms Norsfoss. Slike kurver danner grunnlag for nytte-kostnadsanalyse av flomtiltak. Skade/vannstand-kurvene er etablert både for en hypotetisk situasjon med dagens bebyggelse, men uten flomverk, og for dagens flomverker.

Analysen baserer seg på følgende informasjon:

1. Forenklet skadefunksjon for bygninger, basert på figur 1. Bare to skadeklasser er benyttet: Lav skade - bare oversvømmelse i kjeller, 48 000 kr pr bygning. Høy skade - oversvømmelse i første etasje og høyere, 410 000 kr pr bygning.
2. Sokkelhøyde på bygninger i Grue og Åsnes kommuner hentet fra en detaljert terrengmodell.
3. Vannstand/vassføringskurven for Nor/Norsfoss ved nedre ende av strekningen.
4. Flomfrekvens basert på regional frekvensanalyse.
5. Vannlinje for strekningen, basert på en empirisk sammenheng mellom vannlinjens helning og vassføringen.
6. Toppnivå for flomverkene i segmenter langs strekningen.

Fordelingsfunksjonen for flomskade med og uten flomverk er vist i figur 5. Risikoen, uttrykt som forventet årlig skade, er integralet under disse kurvene. For den eksisterende bygningfordelingen, men uten flomverk utgjør risikoen 50 mill kr pr år, mens den med flomverk synker til ca 5 mill kr pr år. 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 5 skulle skadene på bygninger vært ca 900 mill kr. Ved hjelp av midlertidig påbygning klarte man å unngå overtopping av de viktigste flomverkene, m.a. Kirkenær-verket, og skadene ble av størrelseorden 100 mill kr (kilde: Naturskadepoolen). Usikkerhetene er estimert for alle faktorer som inngår, og usikkerhetsanalysen viser at usikkerheten i flomfrekvensanalysen dominerer, i særdeleshet når lokale observasjoner mangler. Det nest største bidraget kommer fra usikkerheten i vannstand/vassføringsrelasjonen.



Figur 5 Fordelingsfunksjon for flomskade på bygninger for Grue og Åsnes, med og uten flomverk.

Figure 5 Frequency distribution of flood damage to buildings for the municipalities of Grue and Åsnes, with and without levees.

2. Summary

HYDRA is a research programme on flood initiated by the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) in 1995. The large floods in Asia, North America and Europe during the 1990s form the background for the programme. The major flood in South-eastern Norway in the spring of 1995 made the programme particularly relevant.

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

HYDRA is aimed at developing knowledge, information and methodology to support state and municipal authorities, insurance companies and other organisations in their work and decision making. The work is carried out at Norwegian research institutions and universities, the Norwegian Water Resources and Energy Directorate, and one river authority.

HYDRA has a time frame of 3 years, terminating in 1999 and with an economic framework of NOK 18 million - largely financed by the Ministry of Petroleum and Energy. The programme consists of the following projects:

- Natural resources and land use.
- Flood impacts in urban areas.
- Flood reduction, flood protection and flood management.
- Risk analysis.
- Environmental consequences of floods and flood prevention measures.
- Databases and Geographical Information Systems (support activity at NVE).

The main objective for the risk analysis project has been to improve the methodology for flood mapping and loss assessments. The main uses of this methodology are in land use planning and cost/benefit analysis of flood mitigation measures. Central components have been:

- to establish standardised loss functions for various objects, with special emphasis on buildings and cultivated land, based on assessments and inventories after the 1995 flood;
- improving flood zoning methodology, including testing of various base map types and laser scanning;
- identification of exposed objects and areas by use of GIS and digital property registers;
- improved regional flood frequency analysis;
- economic loss risk analysis;
- test and verification of loss curves.

The focus has been to utilise and combine different information sources, especially digital ones, with state-of-art methods.

Environmental considerations, and impacts of point source pollution have been covered by other HYDRA projects, especially the project "Urban areas" and "Environmental consequences of floods and flood prevention measures". Some reports that have relevance for risk analysis and extended cost/benefit analysis are:

- Flood impacts on water quality: Faafeng et al (1999);
- Floods and aquatic life: Brabrand et al (1999);
- Environmental effects of flood mitigation structure, and environment-friendly mitigation activities and designs: Østdahl et al (1999), Østdahl and Taugbøl (1999);
- Erosion and sediment transport: Bogen (1999);
- Flood protection and environment conflicts: Sælthun (1999);
- Flood and pollution: Sælthun and Lindholm (1999).

2.1 Damage functions

Standardised damage functions have been established for a number of typical objects, mainly based on the damage registered after the flood in Eastern Norway in 1995.

Economic damages have been classified as follows:

- Direct damages. Expenses required to restore flood damaged objects to the state they were in before the flood.
- Indirect damages. Costs that are not directly connected to flood water impacts - typically interruption and stoppage losses, often referred to as secondary costs.
- Emergency cost. Cost associated with the immediate mitigation and salvage activities during the flood.

2.1.1 Buildings

The most important class of objects is buildings. The loss estimates are based on the damage assessments by independent insurance assessors - these registrations also include the inundation level, allowing the damage to be related to water level. The results for residential houses are summarised in Figure 1. It is possible to relate damage to water level, a regression line gives a loss increase of 1240 NOK per cm water level over a base level of 250 cm under ground floor level, but the variability is very large. It is somewhat reduced if age of the

house is considered, but for significant improvement of the estimate the total value of the house is needed. This information is not available in the data obtained from the assessors. For the typical Norwegian residential house, which is a wooden structure with extensive use of insulation mats (rock/glass wool), the damage seems to approach the full value when the water stage reaches one meter above ground floor level.

For barns, garages, shacks etc the average damage is 50000 NOK per building. Industrial buildings, shops, public buildings etc do not lend themselves to generalised loss functions.

2.1.2 Roads and other infrastructure

The damage on public roads (county and national routes) are on the average 360 000 NOK per km inundated road. The damage on railroads are dependent on whether the water reaches only reaches the formation layer or the crushed stone sleeper foundations. In the former case, the average damage is 35 000 NOK per km, in the latter case the extra costs vary from 45 000 NOK to 250 000 per km, depending on the degree of siltation and erosion.

The indirect costs are very difficult to estimate, and to a large extent depending on the degree of interruption of interregional and national transport, there are indications that they are of the same order of magnitude as the direct costs.

2.1.3 Agricultural areas

The main losses in agriculture, beside the damage on buildings and infrastructure, are:

- harvest losses;
- damage on agricultural areas due to erosion and sedimentation.

The erosion damage is not evenly distributed, but concentrated to local hollow erosion. The damage after the flood in 1995 was registered by Øygarden et al (1996), and this material has been analysed to investigate how the erosion varies with physical factors through regression analysis. These factors have been established through application of digital flood maps, digital land use/land cover maps and water surface profiles. GIS has been an important tool in this context. The main predictors are:

- water velocity (calculated from river slope and depth by the Manning formula);
- proportion cultivated area of total flooded area;
- width of flooded area.

Damages registered from 29 inundated areas along the Glomma river form the basis for the regression analysis. Figure 2 shows an example of the variation of estimated vs observed eroded mass (per unit area) for the investigated areas.

Season is also important - naturally the largest damages are experienced if a flood hits shortly after soil preparation and sowing. As all the registrations are from one particular flood situation (in early June), such dependencies have not been investigated.

2.2 Water surface profiles and flood maps

Different approaches for flood water surface estimation and flood map construction have been assessed. For surface water profiles, calibrated mathematical hydraulic modelling produces the best results, followed by parallel shift of historical flood lines. Parallel shift of water surfaces from normal runoff conditions can give large errors.

Several data sources for producing flood maps have been tested for nine flood plains in Glomma and Trysil Rivers. These data sources are:

1. Standard maps (N50, 1: 50 000, 20 m equidistance) in digital form;
2. Digital economic maps (contour lines with 5 meter intervals and elevation captured from riverbeds and roads);
3. Detailed elevation data captured by photogrammetry from aerial photos;
4. Airborne laser scanning.

Digital elevation models and flood maps produced from the first two sources have been compared with similar maps from the two last sources, which are considered as accurate. The flood maps have also been compared with maps of observed inundation.

As a general rule, 20 m equidistance maps will not give satisfactory results, while 5 m gives varying results, depending on whether the critical levels are close to a contour line or not. The result can improve considerably when elevation from riverbeds and roads are added to the elevation model. The errors are greatest for floods with limited inundation. On the other hand these floods usually result in moderate damage and are of less significance in economic risk analysis and cost-benefit analysis for flood protection measures.

The less accurate elevation models lack the topographic variations between the 5 meter contour lines and smoothes hills, depressions and steep edges.

Extreme floods give water levels that cover the whole flood plain and this gives errors mainly where higher areas have been smoothed and therefore wrongly classified as below flood water level.

Figure 3 shows an example of a flood map profiles for one of the nine test areas.

In addition to the methodology development, an important result of the project is flood maps for 10, 50 and 100/200 year return period floods produced for flood plains at Flisa, Kirkenær, Kongsvinger, Heradsbygd, Elverum, Øksna, Koppang and Alvdal in Glomma River, and Trysil in Trysil River.

2.3 Flood frequency analysis

A central element in economic risk assessments is flood frequency analysis. Norway has a well developed network of hydrometric stations with observation series of up to 120 years. Estimates of flood magnitude for floods of low exceedance probabilities/high return periods are never-the-less connected with large uncertainties. This is further accentuated by the fact that many of the rivers are regulated for hydropower, creating non-stationarity in the runoff timeseries alongside other unknown influences like land use changes, river channel modifications, natural climatic variations and anthropogenic climate change effects. Some, but not all of these sources of uncertainty can be reduced by combining local and regional flood information. The project has tested improved regional flood frequency methodology, and addressed the uncertainty in the estimates, including the influence of this uncertainty on economic risk assessments.

Norway has traditionally applied regional flood frequency analysis based on the index flood approach without considering the influence of catchment size on the growth curves (Wingård et al. 1978; Tveito 1993) . The present study utilises a methodology developed by Gottschalk and Weingartner (1999). It includes a relationship between catchment area and flood distribution skewness. The regional analysis for the Glomma River (35 stations with catchment areas from 40 to 40 000 km2), indicates that the 1000 year flood is 4.7 times the average flood for a catchment of 100 km2, and 3.2 times the average flood for a catchment of 10 000 km2. Figure 4 shows the variation of the 10, 50, 100, 500 and 1000 year flood scaled on average flood, as a function of area.

The uncertainty analysis demonstrates inter alia that the uncertainty of the regional analyses is greatly reduced when some local observations are available.

2.4 Economic risk analysis

As a demonstration of risk analysis methodology, damage/stage and damage/probability relationships for buildings have been established for a test area. Damage/stage curves for the situation with and without flood levees give the basis for flood cost-benefit analysis of flood protection measures.

The analysis is carried out based on the following information:

1. Simplified loss functions for individual buildings, based on the damage functions presented in Figure 1. Only two classes have been used: Low damage: Only basement inundation - average damage 48 000 NOK per building. High damage: First floor inundated - average damage 410 000 NOK per building.
2. Elevation distribution of houses established through digital map analysis.
3. Stage/discharge curve from the lower end of the 32 km long river reach.
4. Flood probability established through regional flood frequency analysis.
5. Water surface variations for the reach established through an empirical function of discharge.
6. Levee crest elevations on segments along the reach.

The distribution function of flood damage to buildings for the situation with and without levees can then be established, as shown in Figure 5. The risk, spesified as expected annual damage, is the integral under these curves. For the situation without levees, this amounts to 50 mill NOK, while the presence of levees reduces it to 5 mill NOK per annum. The flood crest water stage during the 1995 flood was higher than the design water level for the flood protection works in the reach. According to Figure 5 the resulting damages to buildings should be 900 mill NOK. Massive emergency reinforcements, largely through voluntary effort, however prevented overtopping of the major levees, and the damages were limited to 100 mill NOK.

The uncertenly is analysed known for all factors, and the uncertainty analysis shows that the uncertainty in the flood frequency analysis dominates, especially in the abscence of local observations. The second most important source of uncertainty is the stage/discharge relationship.

3. Flommer og flomrisiko, begreper og prinsipper

"The revolutionary idea that defines the boundary between modern times and the past is the mastery of risk..." Peter L. Bernstein

3.1 Elva, et risikoelement

Et vassdrag søker en balansetilstand med de hydrologiske forholdene og geomorfologien i landskapet det renner gjennom. En norsk elv skal avlede vassføringer som kan variere med en faktor på hundre. Dette lar seg ikke gjøre innen et naturlig elveleie; ved vassføringer på noe over middelflommen vil lavtliggende oversvømmelsesområder tas i bruk. Disse er i utgangspunktet en naturlig del av vassdragssystemet. Like naturlig er det at store flommer endrer vassdraget og de vassdragsnære områdene, ved massetransport, utrasning, sedimentasjon osv. Dette inngår i de prosessene som påvirker landskap og terrengformer.

At det er naturlig, betyr ikke nødvendigvis at det er ønskelig. Over alt i verden er oversvømmelseområder, deltaer og andre elvenære områder de mest fruktbare og økonomisk viktige. Og vi setter ikke alltid pris på at våre kulturlandskap, dyrkningsområder, industri- områder og tettbebyggelser skal underkastes fluvialgeomorfologiske endringsprosesser, samme hvor naturlige de er. Menneskene har i århundreder kjempet for å unngå oversvømmelser og holde elva på plass i kulturlandskapet med flomverk og kanaliseringer, i de fleste tilfeller med storslagne nederlag.

3.2 Flomvassføring, flomvannstand og flomfrekvens

I Norsk ferskvannstesaurus (Østrem m.fl. 1993) og Norsk miljøtesaurus er flom definert som

"Vann som flyter ut over en elvs normale elvebasseng og går ut over områder som normalt står under vann"

Dette er strengt tatt en definisjon som knytter seg til den lokale oversvømmelsen, ikke til elvens tilstand av å være i flom.

Flomvarslingstjenesten i NVE varsler flom når vassføringen går over midlere årsflom - middelverdien av største vassføring hvert år. Dette er et nivå som i gjennomsnitt overskrides hvert andre til tredje år. Man benyttet tidligere et lavere varslingsnivå, men dette var ikke i samsvar med hva som intuitivt ble oppfattet som flom. Flom forbinder man gjerne med vassføringer og vannstander som gir eller innebærer fare for skade - i praksis når elven går over sine bredder. Dette er et nivå som ikke er knyttet til et bestemt gjentaksintervall - i naturlige elveløp opptrer det enkelte steder nesten årvisst, andre steder aldri, men mer vanlig omkring hvert femte år. Dersom man definerer et flomnivå i form av en vannstand, vassføring (absolutt eller spesifikk), eller gjentaksintervall, vil det altså i følge slike definisjoner variere fra elv til elv, fra sted til sted, og også i tid, etter som elvas morfologi endrer seg med eller uten menneskelige inngrep. Samtidig snakker man også om vårflommen som en karakteristisk høyvannsperiode i det hydrologiske regimet, uten å knytte det til skader ("vårflommen var liten på Østlandet i år"). Typisk for denne tvetydigheten er flomdefinisjoner som:

FLOOD: A flood is an overflow or inundation that comes from a river or other body of water and causes or threatens damage. It can be any relatively high streamflow overtopping the natural or artificial banks in any reach of a stream. It is also a relatively high flow as measured by either gage height or discharge quantity (Texas Environmental Center, Encyclopedia of Water Terms).

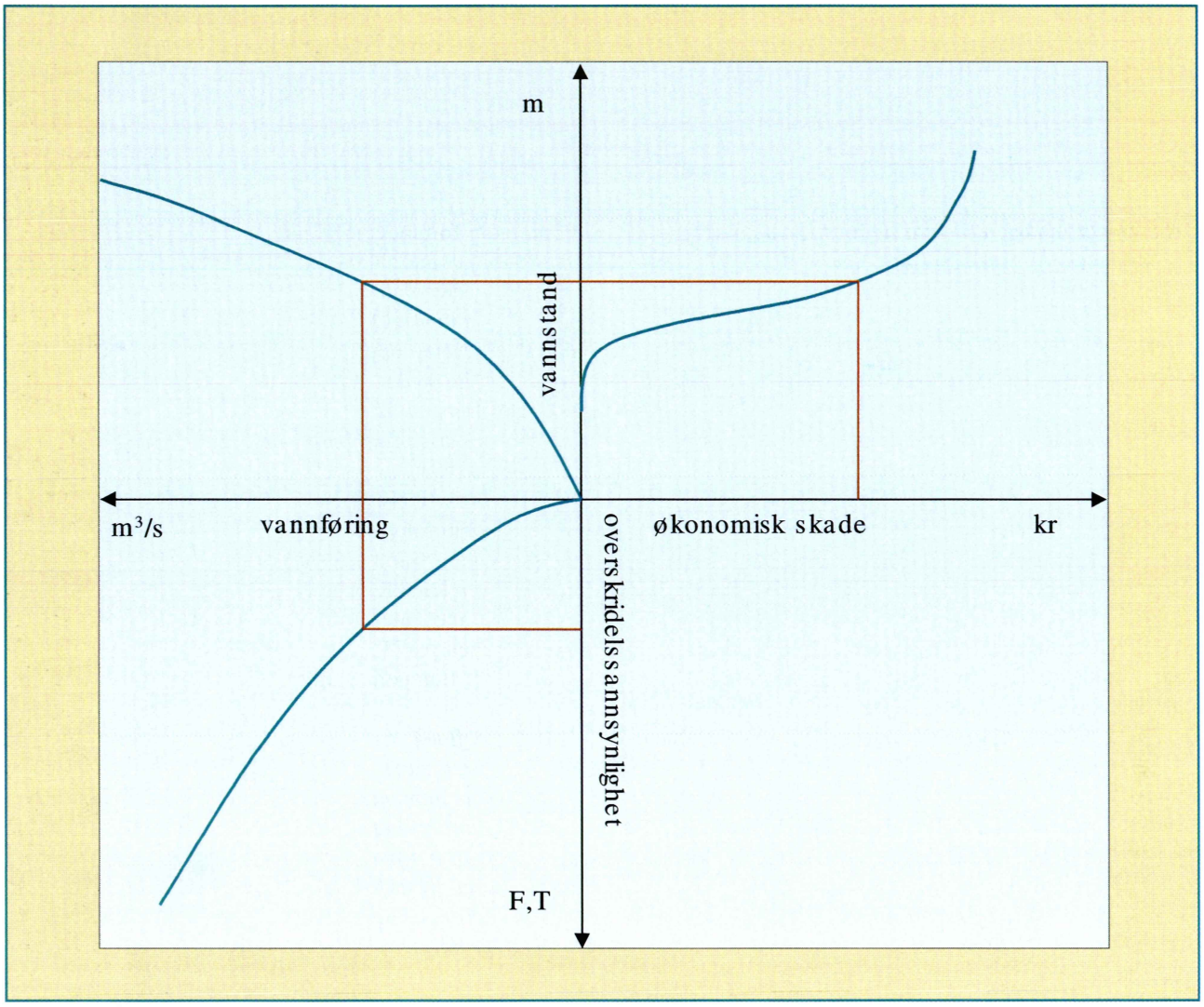
eller omtalen av flom hos Otnes og Ræstad (1978):

En meget generell formulering beskriver flom som et forholdsvis høyt avløp målt enten som vannstand eller som avløpt vannmengde. I enkelte elver kan følgende definisjon være brukbar: En relativt høy vassføring som går ut over de naturlige eller kunstige breddene på en elvestrekning. Flomdefinisjoner ved hjelp av elvebredder er åpenbart ulempelig for mange norske elver som går gjennom gjel og kløfter, men kan være praktisk i strøk hvor overskridelsen av en bestemt vannstand bør utløse tiltak for å hindre flomskader. Et norsk forslag til flomdefinisjon sier at en elv er i flom når vassføringen overstiger middelvassføringen. Denne definisjonen er ganske vid, og vil bety at de fleste norske elver har flom ca 1/3 av året i gjennomsnitt.

Når flom skal kvantifiseres, har man dermed i alle fall fire valg av målestokk (se figur 6)

- vannstand
- vassføring
- overskridelsesannsynlighet
- skade

For en gitt lokalitet og over et begrenset tidsrom er det



Figur 6 Forskjellige mål på flomstørrelse.

Figure 6 Measures of flood magnitude.

en tilnærmet entydig sammenheng mellom disse størrelsene. Vannstand er den mest intuitive, mens vassføring er enklest å behandle analytisk. Overskridelsesannsynlighet gir et mål på hyppigheten av flommen, målt enten i årlig overskridelsesannsynlighet F - altså sannsynligheten for at et gitt flomnivå skal overskrides i et tilfeldig år, eller gjentaksintervall T, som er definert som 1/F. Et flomnivå med årlig overskridelsesannsynlighet på 0.1 har altså et gjentaksintervall på 10 år - målt over et langt tidsrom vil nivået overskrides i gjennomsnitt hvert tiende år.

Sammenhengen mellom vannstand og vassføring påvirkes av endringer i elveløpet lokalt, mens sammenhengen mellom vassføring og overskridelsesannsynlighet særlig påvirkes av oppstrøms endringer og inngrep i nedbørfeltet. Sammenhengen mellom vannstand og økonomisk skade påvirkes av aktivitetene i de elvenære områdene og av lokale flomforbygningstiltak.
Flommer er også høyst dynamiske hendelser, og selv om økonomisk skade først og fremst er avhengig av toppnivået vil den også påvirkes av andre flomkarakteristika, først og fremst varighet over kritiske nivå, og stigningshastighet (som påvirker tilgjengelig tid for evakuering), lokal hastighet på vannet (mulighet for erosjon), sesong (har innflytelse på aktiviteten i flomsonen, særlig for landbruksarealer), og tid siden forrige flom.

Flomregimet i de norske elvene varierer en del, men de fleste har to flomsesonger, vårflom og høstflom. I kystvassdragene kan det være flommer året rundt, med store vinterflommer. På Finnmarksvidda er det i hovedsak bare

vårflom. Vårflommene har en noe forskjellig karakteristikk fra de øvrige flommene, ettersom basis utgjøres av en årviss smelteflom med stort volum og varighet. De store vårflommene er imidlertid nesten uten unntak forårsaket av betydelige nedbørmengder i tillegg til snøsmeltingen. Avløps- og flomregimene i Norge er mellom annet beskrevet av Wingård m.fl. (1978), Gottschalk m. fl. (1979) og Sælthun m.fl. (1997).

Det er vannstanden man må forholde seg til når man skal kartlegge oversvømmelseområder. Vannstanden er bestemt av lokale forhold, mens vassføringen varierer mer systematisk med nedbørsfeltets areal. Når man skal analysere flommer går man som regel ut fra vassføringen, og konverterer så denne til vannstander lokalt.

Av og til benyttes begrepet *normalvannstand*. Dette er ikke entydig definert. I denne rapporten benyttes det for de vannstander som er referert til i vassdragsnivellementet - oppmålingen av vassdragets lengdeprofil. Dette er en vannstand som i Glommas tilfelle tilsvarer en vassføring noe under middelvassføringen.

Vassføring og vannstand hører ikke nødvendigvis entydig sammen. Relasjonen mellom de to, vassføringskurven, kan for det første variere på lengre sikt pga profilforandringer, erosjon i kanalen osv. Sesongmessig påvirkes den av is i profilet og vegetasjon. Den kan også variere pga oppstuvingseffekter fra regulering, tidevann osv. Dessuten vil ikke vannstand/vassføringsrelasjonen være entydig under rask endring av vassføringen, f.eks ved en raskt avanserende flombølge, eller ved endring i tapping fra oppstrøms luker og kraftverk.

Vassføringskurven må bestemmes ved kalibrering - det vil si ved at man måler vassføringen for forskjellige vannstander. Dette kan gjøres på mange måter, men den vanligste er å detaljoppmåle vannhastigheten gjennom et tverrprofil i elven. Vassføringskurven er svært nyttig, for det betyr at man kan klare seg med løpende registreringer av vannstand, som er mye raskere og billigere å måle enn vassføring. Dessuten kan analysene altså gjøres på vassføring og så konverteres tilbake til vannstand lokalt.

Problemet med vassføringskurven er at det er svært vanskelig å få kalibrert den for høye vassføringer. Flommer er kortvarige og sporadiske, og det sier seg selv at det er vanskelig å nå dem i riktig øyeblikk og så få foretatt en måling. Effekten av den problematiske kalibreringen av de øvre delene av vassføringskurven er selvsagt at man får usikre bestemmelser av de store flommene. Dermed kommer lett systematiske feil inn i estimatene av ekstreme flommer, når det ekstrapoleres fra de observerte flommene (med usikker vassføring) til de sjeldne hendelsene.

Siden nedbørmengdene og de spesifikke avløpstallene er mye større i kystområdene fra Sørlandet til Nordland enn i de øvrige delene av landet, kunne man tro at hyppigheten av skadeflommer er tilsvarende større. Men siden vassdragene er i balanse med det hydrologiske regimet blir ikke oversvømmelsene hyppigere her enn i resten av landet, selv om avløpstallene er mange ganger så høye. Derimot varierer årstiden for de største flommene fra landsdel til landsdel. I kyststrøkene er det høst- og vinterflommene som dominerer; forårsaket av frontalnedbør, ofte kombinert med snøsmelting.

I innlandsstrøkene kan juni være kritisk, med snøsmelting kombinert med regn, og høstmånedene; regn på mettet mark. Figur 7 viser den største flommen dette århundredet, januar 1932 i Øyungen på Fosen - et kystnært felt på 230 km^2, og den største flommen ved Elverum i Glomma - 15428 km^2. Vassføringen er oppgitt som spesifikke tall (l/s km^2). Feltet på Fosen har over 7 ganger så høy spesifikk maksimalvassføring som østlandsfeltet; dette skyldes både regionale ulikheter og forskjellen i feltstørrelse.

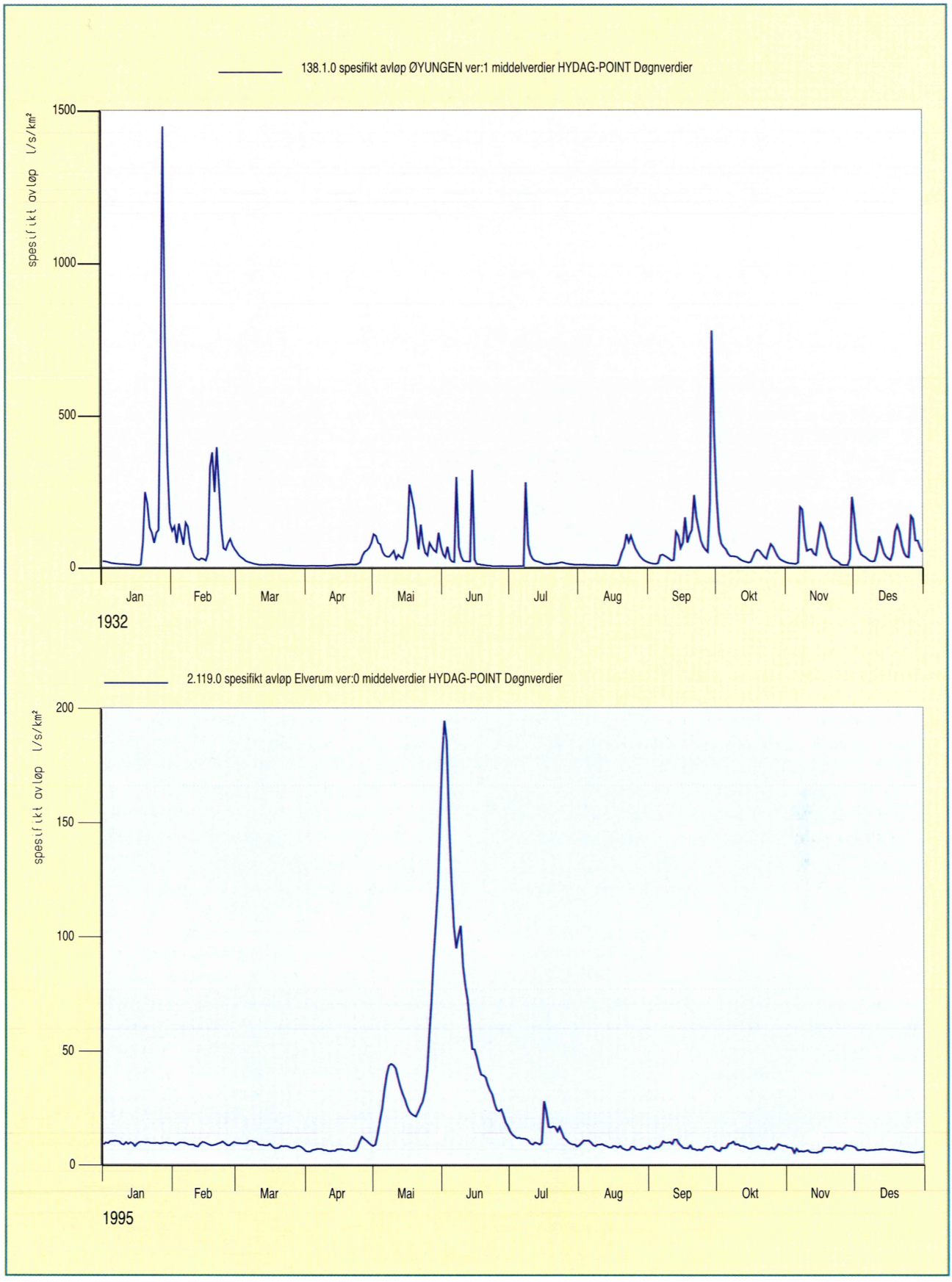
De store feltene krever store volumer av tilført vann for bygge opp en storflom; dette kan være sterk snøsmelting som toppes med nedbør, eller nedbørsystemer som stopper opp og blir liggende nesten stasjonære i flere døgn. Dersom fronten da har orientert seg langs et hovedvassdrag er det store muligheter for dramatiske flomutviklinger.

Småfelt, og særlig urbaniserte felt, er med sin raske reaksjon, utsatt for flom i forbindelse med heftig konvektiv nedbør om sommeren. Større felt reagerer ikke på disse situasjonene; arealutbredelsen er for liten og markvannsunderskuddet vanligvis stort.

I et naturlig vassdrag vil det forekomme oversvømmelser ved gjentaksintervall fra to til ti år dersom det ikke er gjort forebyggende tiltak. Ved gjentaksintervall fra 50 til 100 år, vil skadene være betydelige. Flommer med gjentaksintervall av størrelseorden 500 år eller mer er katastrofeflommer som huskes i generasjoner. Noen eksempler på slike flommer som har rammet større områder er:

- juli 1789: Stor-Ofsen i Glomma og Lågen
- juni 1860: Lågen og sentrale fjellstrøk i Sør-Norge
- juni 1927: Skiensvassdraget
- anuar 1932: Fosen
- august 1940: Gaula

Disse kjempeflommene dekker gjerne et område av størrelseorden 10000 km^2, en trettidel av Norge, og selv om de har et gjentaksintervall på 500 år eller mer vil de derfor opptre adskillige ganger i løpet av et hundreår, landet sett under ett. Vi har slik sett gode sjanser til å oppleve slike flommer. I tillegg til disse flomsituasjonene som berører store områder, er det nesten årlig store skadeflommer i mindre vassdrag.



Figur 7 Flom i kystfeltet Øyungen på Fosen 1932 (230 km²) og vårflommen i Glomma 1995 ved Elverum (15400 km²).

Figure 7 Hydrographs for the flood in the coastal catchment Øyungen (230 km²) in 1932 and the spring flood in River Glomma 1967 at Elverum (15400 km²).

NVE benytter i flomvarslingssammenheng følgende klassifisering:

- *flom:* flomstørrelse mellom middelflom og flom med ti år gjentaksintervall
- *stor flom:* flom mellom ti og hundre års gjentaksintervall
- *ekstrem flom:* flom med hundre års gjentaksintervall eller mer

I denne rapporten er denne klassifiseringen benyttet for ikke-kvantitativ beskrivelse av flommer.

Estimat av flomstørrelser med gjentaksintervall 500-1000 år har selvsagt nokså stor usikkerhet. De representerer en betydelig ekstrapolasjon ut over observasjonsmaterialet, og det er ikke selvsagt at de statistiske forutsetninger som vanligvis legges til grunn virkelig gjelder. Benoit Mandelbrot (fraktalenes far) innførte begrepene "Noa-effekten" og "Josef-effekten" (Mandelbrot & Wallis 1968). "Noa-effekten" er knyttet til spørsmålet om syndefloden lar seg innlemme i en flomfrekvensanalyse. Skyldes de ekstremt store flommene værsituasjoner som ikke foreligger i vårt observasjonsmateriale og som ikke lar seg ekstrapolere ut fra dette? Kunne f.eks. en tropisk syklon følge Golfstrømmen over fra Mexicogolfen og gitt 1000 mm nedbør på Vestlandet? Det er lite som tyder på at "Noa-effekten" gjør seg gjeldende i vårt klima.

"Josef-effekten" reiser spørsmålet om de sju rike og de sju fattige år, altså om ekstreme kombinasjoner er riktig representert av våre statistiske modeller. Dette er et vanskelig tema. Klimaet har fluktuasjoner som vi ennå ikke fullt ut forstår. Opphopninger av storflommer i Europa på nititallet er ett eksempel. I Norge var det en rekke storflommer i mellomkrigstiden.

Et problem i all statistisk flomanalyse er at den forutsetter at de statistiske egenskapene ikke endres fra observasjonsmaterialet til prediksjonsperioden. Dette er ikke nødvendigvis tilfredsstilt. Dersom menneskene forandrer dynamikken til nedbørfelt og vassdrag gjennom endringer i arealbruk - ved skogsavvirkning, omfattende grøfting, urbanisering, bakkeplanering eller lignende, eller gjennom vassdragsreguleringer, så vil selvsagt de statistiske egenskapene endres. Klimaendringer, naturlige eller menneskeskapte, vil kunne ha samme virkning. Klimaendringer og flom diskuteres nærmere i avsnitt 3.4.1.

3.3 Vannlinjer, flomsonering og flomkart

Flomkart brukes som samlebetegnelse på kart med flom som tema. Flomsonekart defineres som

kart som viser (forventet) oversvømt areal ved en flom med gitt gjentaksintervall.

Flomarealkart defineres som

kart som viser den faktiske flomutbredelsen ved en historisk flomhendelse.

Faresonekart kan inkludere faremomenter ut over høy vannstand, så som vannhastighet, massetransport- og avlagring.

Vi skal komme litt tilbake til forskjeller og likheter mellom disse kartene, men redegjør i første omgang for framstilling av flomsonekart.

For å identifisere flomsonene (det oversvømte areal) trenger en kjennskap til høyden på terrenget langs elva og vannstanden i elva for den aktuelle flommen. Pr definisjon skal flomsonen være knyttet til et gjentaksintervall. Før analysen av oversvømt areal kan gjøres, må det derfor foreligge en flomfrekvensanalyse. Fra denne velges et utvalg av flomstørrelser for framstilling på flomsonekart; eksempelvis 10, 50 og 100-årsflom.

For de aktuelle vassføringer må det tilordnes en vannstand. En må ha vannstandsopplysninger med en tetthet som gjør at den faktiske vannflaten gjenskapes med en tilfredsstillende nøyaktighet. For elvestrekninger er det vanlig å beregne vannstanden i en hydraulisk modell (vannlinjeberegning). Vassdragsnivellement finnes for en rekke elvestrekninger og viser fallforholdene ved lav vassføring. For disse strekningene er et mindre kostnadskrevende alternativ å basere seg på en vassføringskurve for ett punkt og forutsette parallelle vannlinjer. Etter Vesleofsen ble flommerker som skal representere kulminasjonsvannstanden målt inn en rekke steder langs vassdraget. Tilsvarende målinger er gjort langs Glomma for flere av de store flommene tidligere på 1900-tallet. Denne typen målinger av vannstander ved historiske flommer gir nyttig informasjon ved kalibrering av hydrauliske modeller, men representerer også en metode for direkte innhenting av vannstandsdata til flomsoneanalysen. I kapittel 7 beskrives utslaget av ulike typer datasett på vannlinjene nærmere.

Terrenginformasjon finnes tradisjonelt som høydekurver på kart - ekvidistansen er avhengig av kartgrunnlaget. Nøyaktigheten av terrenginformasjonen gjenspeiles i ekvidistansen og nøyaktigheten i plassering av høydekurvene. Ved digitale metoder kan en også beskrive terrenget ved hjelp av rutenett der hver rute inneholder informasjon om høyden på terrenget. Nøyaktigheten av terrenginformasjonen ved denne metoden avhenger av størrelsen på hver rute og hvor riktig høydeverdien i hver rute er.

Ved hydraulisk modellering er de grunnleggende inngangsdata vassføring, formen på elveløpet og ruhetstall for de ulike deler av elveløpet. Elveløpet representeres oftest som tverrprofiler som velges ut med tanke på å gjenskape strømningen i elveløpet best mulig. Tverrprofilene skal i prinsippet dekke hele strømningst-

verrsnittet i flomsituasjoner. Modellen kalibreres ved hjelp av observerte vannstander med tilhørende vassføringer. For noen formål er det vesentlig å simulere et helt flomforløp med bevegelse av flombølgen nedover vassdraget. En benytter da en hydrodynamisk modell der vassføringen varierer med tiden. I tilfeller der det er behov for å gjenskape strømningen særlig nøyaktig kan en bruke modeller der strømhastighet og strømretning varierer i samme tverrprofil. For flomsonekart kan det være tilstrekkelig å beregne vannlinjen med en konstant vassføring innenfor et nærmere avgrenset prosjektområde.

Simuleringene gir vannstand ved hvert tverrprofil. Den beregnede vannlinja er generert ved å interpolere lineært mellom tverrprofilene. Til bruk ved utarbeidelse av flomsonekart må man generere en vannflate på bakgrunn av vannlinja. Denne vannflaten skal dekke hele det flomutsatte område og beskrive hvor høyt vannet forventes å nå under den analyserte flommen. De flomutsatte arealer er de arealer der vannflaten er høyere enn terrenget. Analysen gjøres i rutenett slik at differansen beregnes i hver rute.

Flomsonekartene skal fortrinnsvis ta opp i seg effekten av faste anlegg som påvirker omfanget av oversvømmelser, f eks flomverk. I den hydrauliske modellen kan flomverk tas inn direkte i tverrprofilene. Ved beregning av oversvømt areal blir håndtering av flomverk mer komplisert. Ved en svært detaljert terrengmodell, kan det være mulig å få beskrevet flomverk direkte og få avgrenset flomutbredelsen mot disse. Oftest vil en likevel være avhengig av informasjon som terrengmodellen ikke gir om det enkelte flomverks dimensjoner og virkemåte.

Sluttproduktet er beheftet med usikkerhet som er avledet fra usikkerheten i inngangsdataene og analysene. For å kunne analysere usikkerheten er det nødvendig å kjenne hvordan usikkerheten i de ulike inngangsdata påvirker sluttproduktet. Eksempel: Usikkerheten mht faktiske vassføringer som inngang til en hydraulisk beregning kan være betydelig og et produkt dels av usikkerhet i vassføringskurver, dels statistisk usikkerhet fra flomfrekvensanalysen. Dersom det finnes gode data for kalibrering av de aktuelle vannlinjene kan man bortimot eliminere usikkerheten mht faktisk vassføring, mens den statistiske usikkerheten består.

Evalueringer av kvaliteten på flomsonekartene, vil typisk skje etter store flommer. Da blir det regelmessig gjort flomfrekvensanalyser og flommen blir "stemplet" f eks som en 100-årsflom. Har man flomsonekart for en strekning og sammenlikner dette med de faktiske oversvømmelsene som skjer, kan en få et mål på treffsikkerheten til kartet. En slik sammenlikning er mulig blant annet langs Glomma, Lågen og Trysilelv. Under flommen våren 1995 på Østlandet ble oversvømte områder langs hovedstrengen i disse vassdragene vertikalfotografert så nær kulminasjon som mulig. Disse bildene ble brukt som underlag da Statens kartverk digitaliserte flomlinjen. Utstrekningen av flommen i 1995 er vist på flomarealkart.

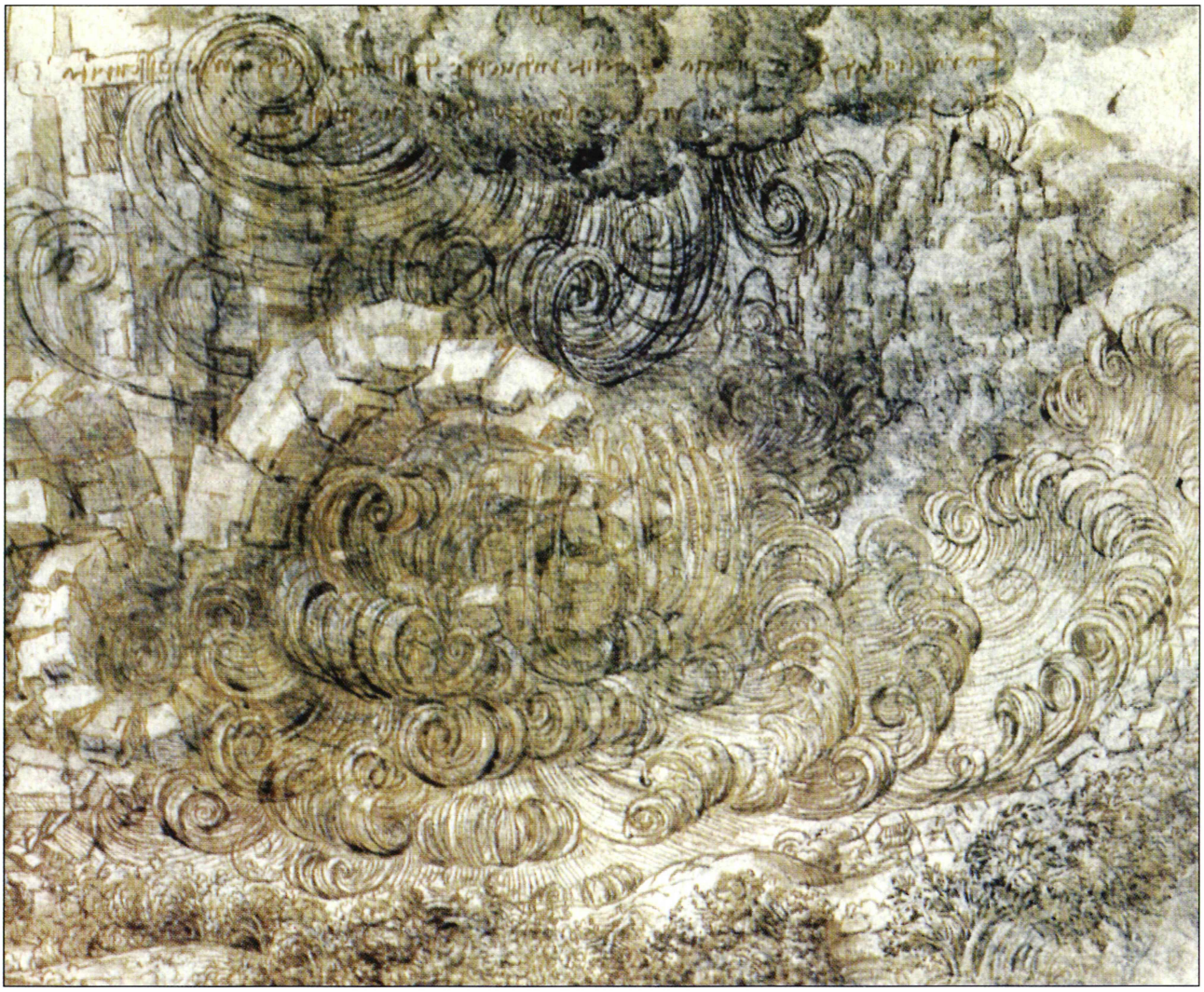
Forskjellen mellom flomsonekart og flomarealkart ligger særlig i hvordan grunnlagsdata er samlet. Flomsonekart baserer seg på beregning av vannstander, mens flomarealkartene baserer seg på at faktisk utbredelse av flommen kartlegges direkte eller at oversvømt areal beregnes ut fra observerte vannstander i området. Avviket i flomutsatt areal på flomsonekart i forhold til flomarealkart for samme flomstørrelse i et område skyldes imidlertid ikke nødvendigvis 'feil' ved flomsonekartet. Flomarealkart framstilt etter fotografering av flomtoppen, vil bli påvirket av om flomverk fungerte etter hensikten eller ikke. Likeledes vil det i slike flomsituasjoner bli bygget en mengde midlertidige flomvoller. Arealer som unngår oversvømmelse som følge av slike tiltak, representerer avvik, men ikke 'feil' ved flomsonekartet. Likeledes kan man ha ekstraordinær oppstuving som følge av blokkering av elveløp med is, rekved eller annet.

3.4 Flomrisiko

Leonardo da Vinci skriver:
"Blant de ukontrollerbare og ødeleggende naturkatastrofer må flom i de ustyrlige elvene uten tvil settes foran alle andre redsler"
(Codex Atlanticus 108 vb - figur 8).

500 år senere er flom fremdeles en stor trussel for mennesker og bebyggelse. Ekstreme hydrologiske hendelser med stort omfang får mange til å tro at trusselen om flom er større i dag enn noen gang tidligere. Det er på det rene at det på verdensbasis har vært mange flomhendelser på 1980 og 1990 tallet (WMO 1995). Det viser seg også at flom (og tørke) forårsaker større ødeleggelser og dreper flere mennesker enn noen annen type naturkatastrofe (Rodda 1995). Kundzewicz (1998) gir en dramatisk oversikt over flommer i løpet av 1990. Vi kan bare spekulere på hvorvidt Leonardo hadde sagt seg enig i at situasjonen har blitt verre etter som århundrene har gått. På hvilken måte har eventuelt situasjonen forverret seg? Er det slik at ekstremhendelser som flom opptrer hyppigere og har større omfang enn før? Eller er det slik at det er flomødeleggelsene som trekker den store oppmerksomheten; ikke på grunn av større antall og omfang, men fordi sårbarheten i forhold til flommer har økt i samfunnet?

Frekvensen til en uønsket hendelse sammen med et mål på skaden (Lowrance 1976) og den faren uønskede hendelser utgjør for mennesket, miljøet og økonomiske verdier (Aven 1992) er begge aspekter av risikobegrepet. Med dette utgangspunktet er det stor sannsynlighet for at flomrisikoen har økt. Årsaken til en eventuell økning er på den annen side et mer kontroversielt spørsmål, og det er ikke mulig å gi noen generell forklaring på dette.



Figur 8 Tegning av Leonardo da Vinci som viser flom som bryter gjennom en fjellrygg og utløser jordras. Motivet kan være inspirert av flomkatastrofen i Bellinzona i 1515. En lignende hendelse, men mindre katastrofal, var flommen i Posciavo i 1993.

Figure 8 Drawing by Leonardo da Vinci showing a mountain chain opened by flooding water and causing landslides. The drawing might be inspired by the Bellinzona catastrophe in 1515. A parallel to this event, but less disastrous, is the flooding in Posciavo in 1993.

De største usikkerhetene knytter seg til om sannsynligheten for store flommer har økt, og hva som eventuelt er årsaken til økningen. Når det gjelder skadeomfanget er det noen forhold som klart kan medvirke til til at skadene øker raskere enn den generelle økonomiske aktiviteten i samfunnet:

- I det moderne samfunnet er det i liten grad den enkelte person som bærer risikoen for flommer og andre naturkatastrofer. Dette gir generelt ikke incitament til risikoavvergende adferd. Et eksempel er at etter flommen i 1995 ønsket mange huseiere å gjenreise flomødelagte bygninger på samme sted som de stod tidligere.
- Det er også mulig at det moderne samfunnet har stadig større del av sine verdier investert i faste installasjoner og infrastruktur - og at disse installasjonene er blitt mer sårbare for flomskade.

I Norge gjør et par forhold seg spesielt gjeldende:

- Moderne norsk byggeskikk - reisverk i tre med utstrakt bruk av vannabsorberende isolasjonsmateriale - er ekstremt sårbar for vannskade. Bygninger blir totalskadet allerede ved nokså moderat oversvømmelse. Norske hus tåler ikke vann, for å spissformulere. Eldre bygninger er langt mer robuste.
- I regulerte vassdrag endres gjerne flomregimet. De små og middelstore flommene blir redusert i større grad enn de ekstreme flommene. Dette kan føre til at folk tror at elveslettene er blitt sikrere for flom enn de i virkeligheten er.

Hydrologer har tradisjonelt sett hatt et heller snevert perspektiv på ekstreme flomhendelser ved å definere sannsynligheten for at en slik hendelse kan oppstå - også kalt gjentaksperiode. Først i det siste har risikobegrepet kommet i fokus. Begrepet inkluderer både et mål på sannsynlighet og et estimat på konsekvensene. Det må innrømmes at bruken av begrepet risiko ikke er entydig i hydrologisk litteratur. Yevjevich (1977) var den første til å påpeke denne uklarheten. Minst tre tolkninger er tilstede. Risiko kan være sannsynligheten for overskridelse av et visst flomnivå i en gitt periode (Haan 1977; Kite 1977). En mer vanlig tolkning er at risiko er sannsynligheten for et uheldig utfall av et system (overvannssystemer, flomverk, broer) der all usikkerhet ved estimeringen er tatt i betraktning (Tang, Mays & Yen 1975; Simonovic & Mariño 1981; Tung & Mays 1981; Jain, Yogararasin & Seth 1992; Plate 1998). Mange av disse arbeidene definerer forventet skade eller forventet tap som et eget begrep. Plate (1998) kaller dette for den generelle risiko. Til slutt; en generelt akseptert definisjon av risiko som har fått hydrologisk anvendelse (Ashkar & Rouselle 1981; Mitsiopolous, Haimes & Li 1991; Lambert & Li 1994; Thompson, Stedinger & Heath 1997; Stedinger 1997): forventet tap, skade, eller nytte, som også er definisjonen i Norsk Standard 5814. Det er verd å merke seg at usikkerhet også er et viktig spørsmål i denne definisjonen av risikobegrepet (se under). I det følgende er denne definisjonen benyttet. Under følger en oversikt over faktorer som påvirker denne risikoen.

I kapittel 9 utvikles en risikomodell for en strekning i Glomma med tanke på å finne svar på hvilke faktorer som bestemmer flomrisikoen.

3.4.1 Faktorer som påvirker flomrisiko

I nord-amerikansk hydrologisk litteratur er flomskader et sentralt tema. James og Hall (1986) har sett på utviklingen i USA. I 1936 ble det satt igang et program for å få større kontroll over flommene ("Flood Control Act"), og store ressurser ble satt inn for å minske ødeleggelsene ved å konstruere dammer, flomverk og kanaler. I 1966 konkluderte man med at skadene totalt sett fortsatte å øke. I tillegg opplevde man en helt ny type ulykker i form av brudd på flomverk. I 1986 øker fremdeles de totale skadene og en ny type kostnad introduseres - økonomisk tap på grunn av redusert produktivitet i områder på elveslettene. Tiltaksprogrammet for å redusere flomskadene i USA inkluderer også kartlegging av flomutsatte områder ved hjelp av såkalte "Flood Insurance Rate Maps" (FIRM) som viser utstrekningen av oversvømmelsesområdene for 100-års og 500-års flommen. Flomfare-faktoren ("flood hazard factor") defineres som differansen mellom 10-års og 100-års flom vannstand.

I en kommentar til James og Hall kritiserer Handmer (1988) imidlertid deres konklusjon - at årsaken for den fortsatte økningen i flomødeleggelser hovedsakelig ligger i manglende informasjonen om 100-årsflom-standarden. Han mener at informasjon i seg selv ikke kan løse problemet siden mennesker ikke har fri mulighet til å velge hvor de vil bosette seg. Han gir i stedet tre andre grunner for at skadene fortsetter å øke:

1. Økte investeringer og inngrep på elveslettene samt investeringer og forandringer av innhold i eksisterende bebyggelse. Slik kan både verdien på eiendom som er utsatt for flomrisiko og motstandsdyktigheten mot flom skade endres.
2. Geofysiske faktorer som klimaforandringer, landsenkning og endringer i elveløpet.
3. Bedre rapportering på grunn av subsidierte forsikringsordninger.

Handmer avslutter sin diskusjon ved å vise til New South Wales i Australia hvor 100-års standarden er forlatt til fordel for en angrepsmåte basert på fare (vanndyp og -hastighet), samt økonomiske, sosiale og miljømessige aspekter av hvert nytt prosjekt. Denne tilnærmingen faller sammen med erfaringer gjort i Sveits. Nye retningslinjer for planlegging av flomvern er utviklet som en følge av de store ødeleggelsene etter flommer i Reuss- og Poschiavo-dalene i de sveitsiske alpene i 1987 (Jaeggi & Zarn 1990). Ekstrem flom er her definert som en kombinasjon av flomhastighet og dybde. Prinsippene rundt retningslinjene er avhengig av hvilken type objekter som skal beskyttes og ulike arealbruksklasser.

En metode for å håndtere flomproblemer -"Inondabilité" er utviklet i Frankrike. Målet er å koble "åpenbare samfunnsmessige ønsker om vern mot oversvømmelse med eksisterende kunnskap om hvordan vassdrag og nedbørfelt fungerer hydrologisk og hydraulisk" (Gilard 1998). De ulike delene av metoden er illustrert i figur 9. Utgangspunktet for metoden er ikke bare å finne hvor ofte ekstremflommer forekommer, men også varighet og dybde (som gjør at flomhastigheten kan beregnes). Metoden har paralleller med erfaringene fra Australia og Sveits omtalt ovenfor. Hver kritiske situasjon er derfor karakterisert av tre parametre (T - gjentaksintervall, d - varighet, p - dybde). Disse parametrene beskriver flommene statistisk. Metodikken for å bestemme denne oversvømmelsessannsynligheten på et bestemt sted fra en enkelt observasjonsserie eller fra regional analyse for avrenningsdata kalles QdF (Q-avrenning, d-varighet, F-frekvens) (Galea & Prudhomme 1994).

Sårbarheten ("vulnerabilité") er det andre viktige elementet i bestemmelsen av flomrisikoen. Den er basert på konseptet om maksimal tillatt oversvømmelsesannsynlighet (RXA). Metodens opphavsmenn hevder at begrepet forventet skade er umulig å anvende i praktiske situasjoner. Flomskade er avhengig av en rekke faktorer og ikke alle disse kan ikke på en meningsfull måte kobles til frekvensen til flomhendelsen. RXA er alternativet og kan defineres for alle klasser arealbruk gjennom parametrene T, d og p. Et kritisk punkt i denne tilnærmingen er knyt-

tingen av disse tre parametrene til en tilsvarende, entydig sårbarhet for å kunne gi en konsistent sårbarhetsbeskrivelse for forskjellig typer arealbruk. Denne prosedyren inneholder mange subjektive antagelser om hvordan RXA er relatert uten noen eksplisitt spesifikasjon av disse.

Siste skritt i metoden er å sammenholde sårbarhet med oversvømmelsesannsynligheten for det aktuelle området. Man kan ha tre situasjoner:

I. Oversvømmelsesannsynligheten er neglisjerbar.
II. Maksimal tillatt oversvømmelsesannsynlighet (sårbarhet) er større enn aktuell oversvømmelsessannsynlighet.
III. Oversvømmelsesannsynligheten er større enn maksimal tillatt.

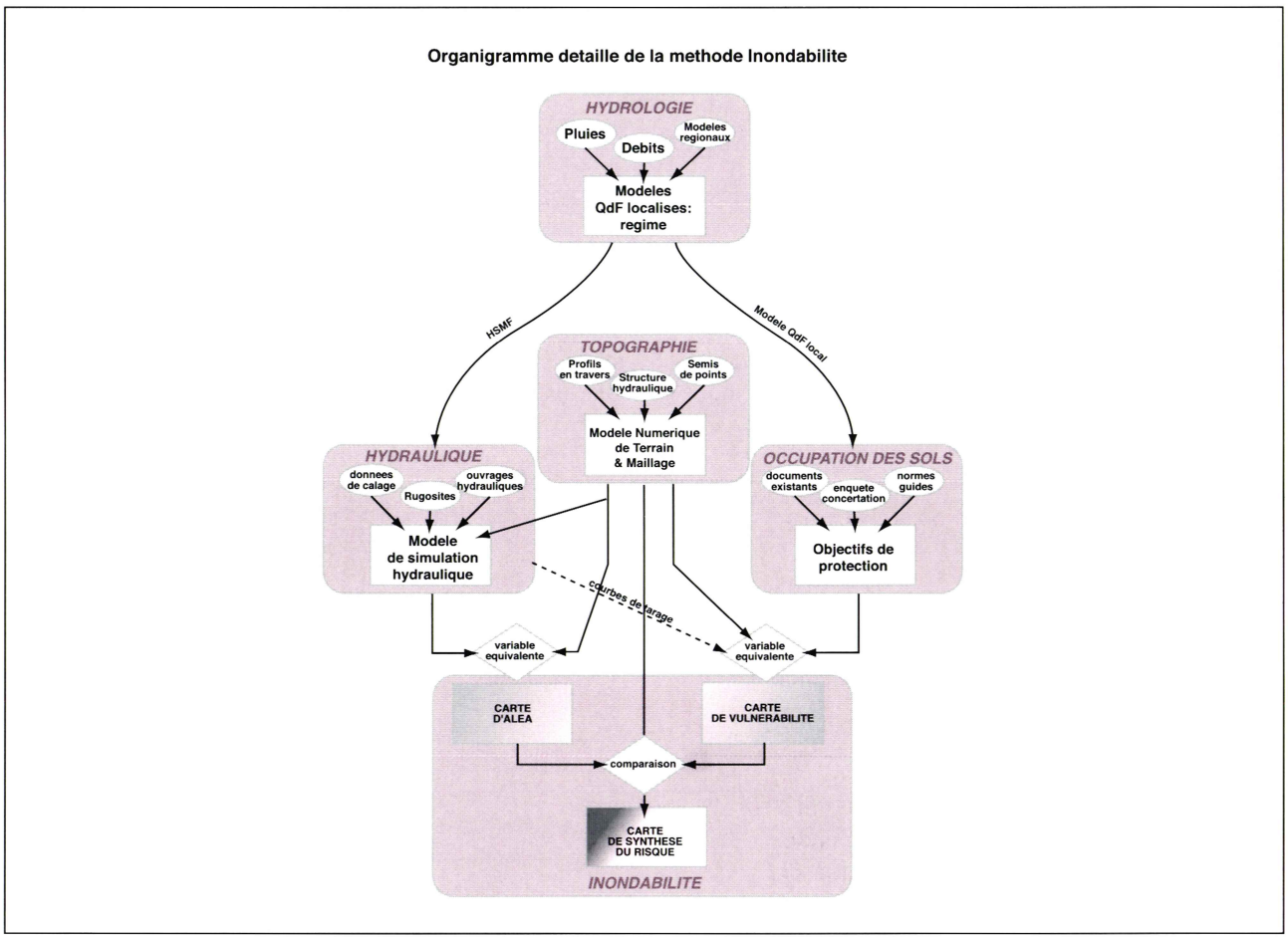
Kart med disse tre klassene blir så produsert.

Burrell og Keefe (1989), Watt og Paine (1992), og Paine og Watt (1992) viser til erfaringer fra flomskader og tiltak i Canada. Et nasjonalt program for å redusere flomskade startet i 1976, og det ble innledet flere flomrisiko-kartleggingsprosjekt. På flomsonekart er det gjerne gjort et skille mellom flomkanal definert som området berørt av 20-års flommen og flomrisiko-områder som er relatert til 100-års flommen. Det er et klart behovet for å evaluere usikkerheten i slike kart. Det skyldes den store variasjonen i kartenes kvalitet, den høye kartleggingskostnaden for små områder og det faktum at den totale usikkerheten kanskje er for høy i forhold til bruksområdet. De følgende usikkerhetskilder er de viktigste :

1) topografisk usikkerhet
2) hydrologisk usikkerhet
   a) flomfrekvensanalyse (regional analyse)
   b) vassføringsberegninger
3) hydraulisk usikkerhet
4) usikkerhet i vannstand/vannlinje
5) usikkerhet i oversvømmelsesdybde

En vanlig konklusjon er at usikkerheten i dimensjoneringsvassføringen (hydrologisk usikkerheten) dominerer over de andre. Den er typisk i størrelsesorden ±0.5 meter. Tabell 1 viser de to typene av hydrologisk usikkerhet etter Watt og Paine (Watt & Paine 1992).

I Europa har de ødeleggende flommene i Rhinen og Meuse/Maas 1992, 1993 og 1996, Po 1994 og Odra/Oder 1997 nok en gang satt fokus på flomrisiko også i denne delen av verden. Andre dramatiske flom-



Figur 9 Prinsippene for flomrisikokartlegging i Frankrike, basert på "Inondabilité"-metoden (fra Gilard 1998).

Figure 9 Principles for flood risk mapping in France, based on the "Inondabilité" method (from Gilard 1998).

Tabell 1 Hydrologisk usikkerhet i flomberegningen (fra Watt og Paine 1992).

Tabell 1 Hydrological uncertainty in flood estimation (from Watt and Paine 1992)

Kriterium Criterion	Samlet hydrologisk usikkerhet, % Total hydrologic uncertainty, %
Oppgitt vannstand Specified water level	0
Oppgitt vassføring Specified flow	0
100-års flom (regional analyse) 100-year flood (regional analysis)	minste av 25 eller $5+65/\sqrt{N}$
100-års regnflom (kalibrert modell) 100-year rain flood (calibrated model)	35
100-års regnflom (ukalibrert modell) 100-year rain flood (uncalibrated model)	50
100-års regn- og snøsmelteflom (kalibrert modell) 100-year rain and snowmelt flood (calibrated model)	40
100-års regn- og snøsmelteflom (ukalibrert modell) 100-year rain and snowmelt flood (uncalibrated model)	55
Regional enkeltflomsimulering (ukalibrert model) Regional storm (uncalibrated model)	50

hendelser er "lynflommene" i Vaison-la-Romaine i Frankrike i 1992 og i Posciavo i Sveits i 1993. Flere prosjekter er lansert og koordinert av "concerted actions" finansiert av EU-kommisjonen som RIBAMOD (River Basin Modelling, Management and Flood Mitigation) (Casale & Samuels 1998)[3], RIPARIUS (Risk of Inundation - Planning and Response Interactive User System)[4] og FloodAware[5]. I Norge er flommen i Glomma i 1995 en del av bakgrunnen for HYDRA programmet. Glomma har opplevd dramatiske flommer i 1675, 1717, 1724, 1749, 1773, 1789 (Storofsen), 1850, 1860, 1916, 1934, 1966, 1967 og til slutt 1995 (Vesleofsen) (figur 10). Det europeiske flomsamarbeidet setter fokus på at den menneskelige faktoren (endret klima og arealbruk) som er en av hovedgrunnen til økt flomrisiko. For HYDRA-prosjektet er arbeidshypotesen at "summen av alle menneskelige inngrep i form av arealbruk, reguleringer, flombeskyttelse osv kan ha økt risiko for flom".

Det er allerede en stor mengde litteratur som ser på klimaendringer som en mulig forklaring på endret avrenning. Krasovskaia (1996), Gottschalk og Krasovskaia (1997) og Sælthun m.fl (1998) gir omfattende oversikter for skandinaviske forhold. Det er tendenser til at antall flomhendelser øker med økende temperaturer. At antall flomhendelser øker kan tolkes som om værsystemer og sirkulasjonsmønstre som gir økning i mye nedbør over større områder forekommer hyppigere enn tidligere. Dette stemmer overens med Caspary (1998) som konkluderer med at de siste store flommene i Rhinen og øvre Donau er forårsaket av en omlegging av de fremherskende værsystemer over Nord-Europa.

Det er et felles trekk at flommer er høye over større områder på samme tid. Kvasi-periodiske fenomen som solflekk-intensitet (Yongquan 1993) og El Nino/Southern Ocillation (ENSO) er mulige forklaringer på dette. Signalene er vanligvis svake. Fenomenene varierer med geografisk posisjon. Krasovskaia et al. har studert ENSO innvirkning på flommer i Costa Rica. Konklusjonen er at flomstørrelsen er konstant mens frekvensen øker sterkt i La Niña-år, i forbindelse med de mer hyppige tropiske stormer i slike år.

[3]) http://www.hrwallingford.co.uk/
[4]) http://www.nwl.ac.uk/ih/www/research/briparius.html
[5]) http://www.lyon.cemagref.fr/floodaware



Figur 10 Flomstøtte ved Grindalen, Elverum

Figure 10 Flood stage marker at Grindalen, Elverum (Glomma River).

(Foto: N.R. Sælthun).

Hydrologisk design er tradisjonelt basert på antagelsen om stasjonaritet. Kuusisto m.fl. (1994) viser til at praktisk talt alle eksisterende vannressurssystemer er dimensjonert under forutsetning av det samme aksiom: fortiden er nøkkelen til fremtiden. Hydrologiske tidsserier inneholder mer eller mindre dominerende ikke-stasjonære trekk på grunn klimaendringer og stor skala kvasi-periodiske fenomen. Hovedkonklusjonen er at verdien av slike forutsigelser har minket (Gottschalk & Sælthun 1990). Den økte usikkerheten kan det tas hensyn til i risikoanalyse.

Et annet klassisk tema i hydrologisk sammenheng er innvirkning av endret arealbruk på hydrologiske fenomen. Studier er gjort i små nedslagsfelt i Sveits fra begynnelsen av dette århundre (Engler 1919). Rodda (1976) gir en omfattende oversikt. Det kommer klart fram i slike studier at endringen i arealbruk, for eksempel avskoging, kan ha en signifikant innvirkning på flommer.

Hovedkonklusjonen fra en kjent studie fra Wagon Wheel Gap (Bates & Henry 1928) er at skog reduserer størrelsen på ordinære sesongflommer og at vassføringen opprettholdes i tørt vær. Resultat er blitt bekreftet av flere studier i temperert klima. Det kritiske punktet er imidlertid hvordan resultatet kan skaleres opp til større nedbørsfelt. Spørsmålet om skala er sentralt i dobbel forstand – skala knyttet til endring av arealbruk og skala knyttet til framherskende værfenomen. I Skandinavia er det moderate utslag av storskalaendringer av arealbruk. I andre deler av verden er situasjonen annerledes. Kina er i en ganske enestående situasjon der myndighetene har erklært at det er den omfattende avskogingen som øker flomrisikoen i Yangtze - se tekstboks 1.

"The State Council on August 5 issued an emergency order called for an immediate halt to all illegal forestry and a one year moratorium on all conversion of forest land to other purposes. A USD 2 billion five-year reforestation program is intended to reduce soil loss on the upper reaches of the Yangtze and Yellow River and so reduce silting at the Three Gorges and Xiaolangdi dams as well as flood risk. In addition, the state timber company work force will be cut by one million workers and wood production will be reduced by 10 million cubic meters." http://www.usembassy-china.gov/english/sandt/fldrpt.htm

Virkninger av endringer av arealbruk i Glomma og Lågen er undersøkt som en del av HYDRAs N-prosjekt "Naturgrunnlag og arealbruk" (Grønlund, Njøs & Kløve 1999; Grønlund 1999), og M-prosjektet, "Modellutvikling".

3.4.2 Begrepet risiko

Dersom vi betrakter en prosess som kan medføre skade eller tap, er en generell definisjon på risiko forventet tap ρ (Berger 1985):

$$\rho = \int_0^\infty L(z)\, f_Z(z) dz \qquad (3.1)$$

hvor $L(z)$ er en tapsfunksjon (skadefunksjon), z er naturtilstand (for eksempel vannstand eller vassføring i elva) og $f_Z(z)$ er frekvensfordelingen til z. For en nærmere beskrivelse av "Bayesisk" og tradisjonell tilnærmelse til risikobegrepet se Gottschalk og Krasovskaia (1999).

Utgangspunktet i flomrisikoanalyser er som regel en frekvensanalyse, f.eks. en regional frekvenskurve for flomvassføringen $f_Q(q_A)$, hvor A er arealet på nedbørfeltet. For et spesielt nedbørfelt A_i på punktet i i elva med avløpsobservasjoner, kan den regionale beskrivelsen bli oppdatert med lokal informasjon på dette stedet.

Vassføringen q_{Ai} kan relateres til flomvannstand ved hjelp av vassføringskurven $q_A = g(z_i)$. Fra flomvannstanden kan man finne tapet (eller skaden) L ved hjelp av en vannstand-skadekurve $l = l(z_i)$, hvor indeksen i indikerer at kurven gjelder for et bestemt sted i elva. Transformasjonen fra kulminasjonsvassføring til økonomisk tap er gitt ved følgende ligning:

$$l = l[z] = l[g^{-1}(q)] \tag{3.2}$$

Anta nå at kulminasjonsvassføringen Q kommer fra en kjent fordeling (for eksempel lognormal, Gumbel, Weibull osv). Den analytiske utledningen av fordelingsfunksjonene til vannstanden Z og det økonomiske tapet L, gitt vassføringen Q og transformasjonene l og g, er da (figur 11):

$$F_Q(q) = F_Z(g^{-1}(q)) = F_Z(z) = F_L(l(g^{-1}(q))) = F_L(l) \tag{3.3}$$

En måte å beskrive flomrisiko på er ganske enkelt å se på det forventede tap ved flom. Det har vært hevdet at det ikke er tilfredsstillende å basere beslutninger på estimat av forventet skade alene fordi forventningsverdien ikke viser variasjonsbredden av skadesituasjoner - den viser ikke om skaden oppstår som følge av mange hendelser med moderat skade eller få hendelser med stor skade (Thompson, Stedinger & Heath 1997). Noen beslutningstakere føler at slike hendelser ikke er sammenlignbare. I hydrologisk litteratur kan man finne flere alternativer. I "partitioned multiobjective risk method" (PMRM) (Mitsiopolous, Haimes & Li 1991) er en betinget forventet skade definert ved at skadene er større eller lik $l(p)$ - altså forventet midlere skade når skade inntreffer eller overskrider visse nivå. Karlsson og Haimes (1988a; 1988b) utvikler metoder for å dele opp sannsynlighetsfordelinger. Andre alternativ er "partial expected damage function" dvs forventet skade fra alle hendelser større enn en terskel (1997). I risikoanalyse-litteratur er risiko sett i forhold til skadeomfang for ulike hendelser (Starr 1969; Rasmussen 1981). Tilsvarende er ulike flomsikringsalternativ ofte evaluert ved å plotte varierende nivå av skadekostnad mot sannsynlighet for overskridelse (Parett 1987; Loucks, Stedinger & Haith 1981; Mays & Tung 1992). Figur 12 illustrerer de to siste alternativene. Det er klart at et enkelt mål på flomskade som forventet årlig skade slik sett er unyansert. For nytte-kostnadsanalyse er det imidlertid et velegnet mål. Forutsetningen er at samfunnets "nyttefunksjon" for flomskade, og dermed for redusert flomskade, er lineær eller nøytral, det vil si at samfunnsøkonomisk er en reduksjon av skade på 5 mill kr i gjennomsnitt hvert tiende år likeverdig med en reduksjon av skade på 50 mill kr i gjennomsnitt hvert hundreår (begge tilfeller tilsvarer en reduksjon av forventet årlig skade med 0.5 mill). Dette kan være en rimelig antagelse så lenge samfunnet lett kan absorbere flomskadene. Dersom flomskadene blir så store at sentrale samfunnsfunksjoner settes tilbake over en lengre periode, kan man imidlertid tenke seg at samfunnet ikke vil forholde seg nøytralt til skade - bli det som i risikoterminologi kalles "Risk Adverse". I så fall kan man tenkes seg at en overinvestering i skadeforbyggende tiltak er akseptabelt. Dette gjelder særlig tiltak som har skadereduserende virkning på de virkelig store flommene. For nærmere beskrivelse av nyttefunksjoner og beslutningsanalyse se HYDRA-rapport Mi06 (Sælthun 1999).

For andre formål kan forventet årlig skade være lite egnet. Når forsikringsselskapene vil vite hva deres maksimale utbetalinger i forbindelse med flom kan beløpe seg til, er forventet årlig skade uten informasjonsverdi. Det er også verdt å merke seg at man ikke kan beregne forventet årlig skade eller endringer i samme uten å kjenne store deler av fordelingsfunksjonen for skade F_L - dvs de delene som påvirkes av et eventuelt tiltak.

I tilnærmingen beskrevet over var utgangspunktet vassføring Q i en elv. I flomtilfeller er det ofte enklere å gå ut fra det observerte kritiske vannivået z_c i elva. Med dette utgangspunktet er de to sentrale problemstillingene (figur 13):

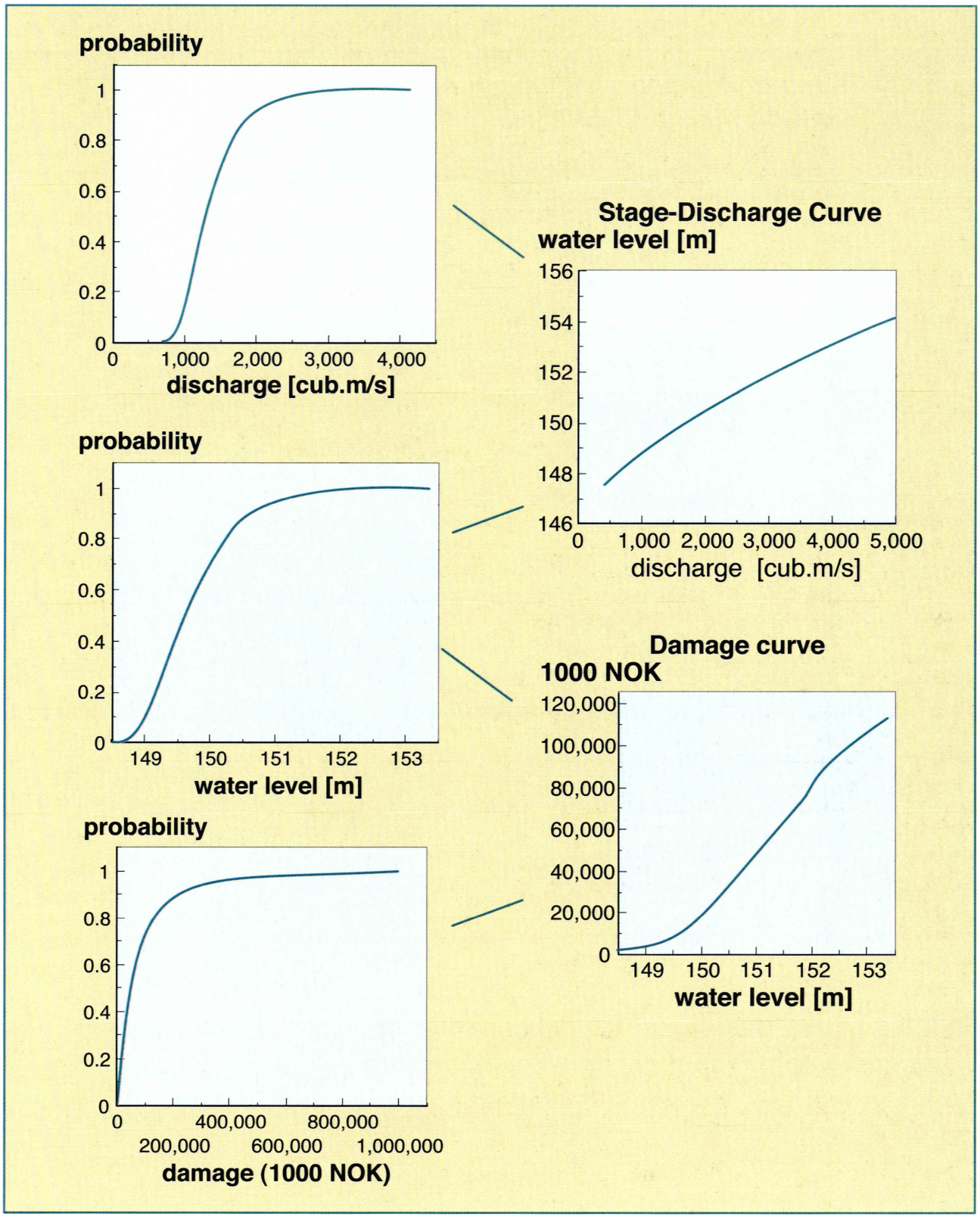
1. Hva er tapet (skadekostnaden) av en gitt høy vannstand?
2. Hva er sannsynligheten for å overskride dette vannstanden?

For å løse det første problemet, dvs etablere en vannstand-skadekurve for elvesletta er følgende faktorer viktige:

- *Elvekanalkarakteristikker*
  - Elveprofiler
- *Elvesletteka rakteristikker*
  - Økonomisk aktivitet (antall objekt)
    Topografi (til objektene)
  - Flomverk osv
  - Økonomisk tap (som en funksjon av den lokale vannstand)
- *Usikkerhet*
  - Nøyaktighet i topografiske data
  - Nøyaktighet i estimatet på økonomisk tap
  - Nøyaktighet i estimatet av vannlinje

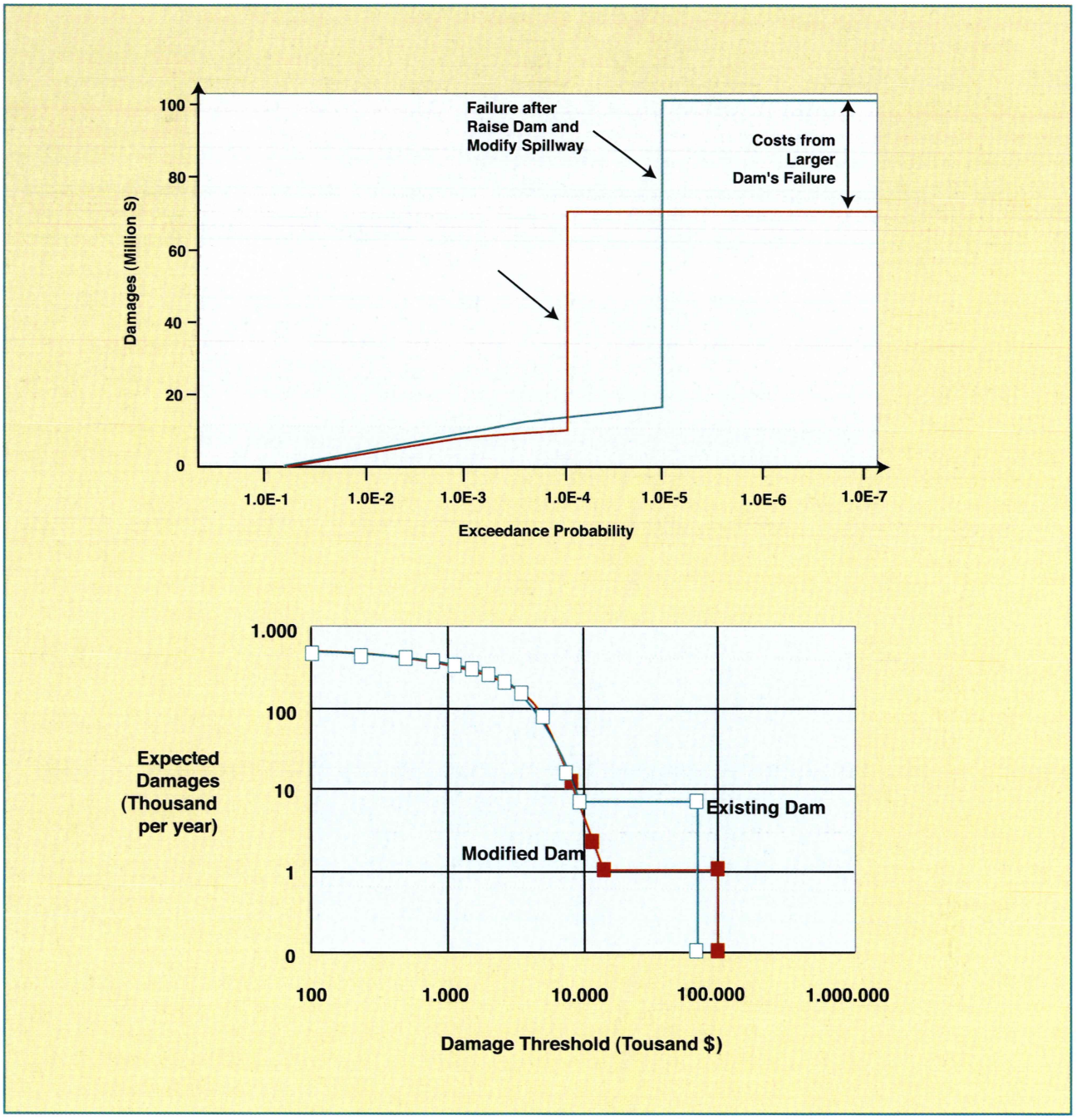
For å løse det andre problemet er følgende faktorer viktige:

- *Sannsynlighet for overskridelse for flom*
  - Størrelsen av flommer i hovedelva, $F_Q(q_A)$
  - Størrelsen av flommer i sidevassdrag
  - Samtidighet av flom i hovedvassdrag og sidevassdrag
  - Effekter av reguleringer



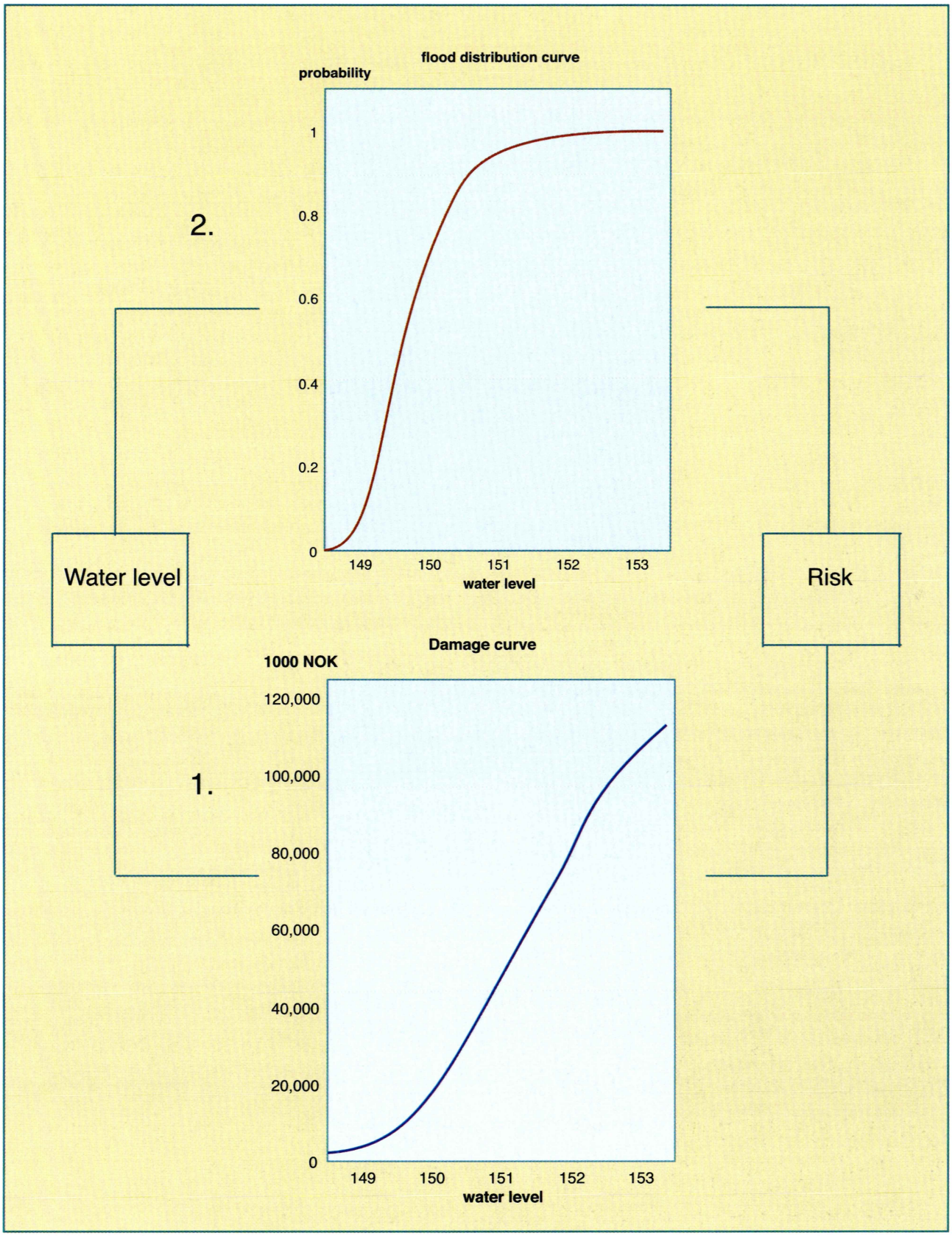
Figur 11 Beregning av fordelingsfunksjon av flomskade når den underliggende vannstandsfordelingen er kjent (etter Lambert og Li 1994).

Figure 11 Calculation of distribution function for flood damage when the underlying stage distribution is known (after Lambert and Li 1994).



Figur 12 Fordelingsfunksjon for skade fra store flommer (a) og den partielle skadefunksjon (b) illustrert med effekten av å heve dammer og gjøre overløp bredere (fra Thompson et al. 1997).

Figure 12 Distribution function for damage from large floods (a) and the partial loss function (b) illustrated by the effect of raising dams and broadening the spillway (from Thompson et al. 1997)



Figur 13 Flytskjema som viser prinsippene for estimering av flomrisiko.

Figure 13 Flow chart illustrating the principles for estimation of flood risk.

- *Kanalkarakteristikker*
  - Vassføringskurve for bestemmende profil ned strøms, $q_A=g(z)$

- *Usikkerhet*
  - Nøyaktighet i estimering av overskridelsesannsynligheter av flom
  - Nøyaktighet i vassføringskurven

I kapitlene 6 og 7 presenteres fremgangsmåter for å løse disse to problemene med utgangspunkt i faktorene nevnt over.

3.4.3 Endring av flomrisiko

Flomrisiko er ikke konstant over tid. Alle faktorer som inngår kan endre seg, både ved naturlige prosesser og ved menneskelige tiltak og inngrep. Enkelte av tiltakene kan være spesielt rettet mot å redusere flomrisikoen, andre følger av den generelle aktiviteten i vassdraget og nedbørfeltet.

3.4.3.1 Endret flomfrekvens

Hyppigheten av flommer over et gitt vassføringsnivå, $F_Q(q)$, kan påvirkes av flere faktorer:

Naturlige:
- Klimavariasjoner. Klimaet er ikke konstant, selv uten menneskelig påvirkning, og klimavariasjoner påvirker flomforholdene direkte - ved endret nedbør, snøfordeling og fordampning, og indirekte - gjennom endringer i vegetasjonssonene. Under den lille istiden endret flomforholdene seg dramatisk i Norge.

Antropogene:
- I Norge er den viktigste antropogene påvirkningen vassdragsreguleringer. Flomfrekvensen reduseres - dette er pålagt regulantene, i og med at naturlige flomforhold ikke skal forverres - dette er i praksis tolket dithen at ingen flommer skal forøkes. Dette innebærer en generell reduksjon av flomfrekvensen. Reduksjonen er imidlertid størst for små og middelstore flommer, store flommer påvirkes gjerne mindre. Denne effekten er i HYDRA-programmet beskrevet av F-prosjektet (Wathne & Alfredsen 1999; Tingvold 1999).

- Arealbruksendringer i nedbørfeltet. De arealbruksendringene som har størst innflytelse på flomforholdene er endringer i skogareal og endring i skogsdriftpraksis, f.eks. grøfting og pløying. Urbanisering er også en viktig faktor, først og fremst i småfelt. Videre kan storstilt omlegging av jordbrukspraksis påvirke flomforhold. Disse effektene studeres i HYDRA-programmet i N- og T-prosjektene (Grønlund, Njøs & Kløve 1999; Grønlund 1999; Lindholm m.fl. 1999).

- Oppstrøms endring av elvekanalen. Dette gjelder først og fremst avstenging og innsnevring av naturlige oversvømmelsesområder for lokale flomvernsformål. Slik påvirkning er i HYDRA-prosjektet beskrevet i F-prosjektet (Berg m.fl. 1999).

- Antropogene klimaendringer. Utslipp av klimagasser og endring av drivhuseffekten er en potensiell påvirkning av flomforholdene - se ovenfor.

3.4.3.2 Endret vannføring/vannstands-relasjon

Vannstand/vassføringsrelasjonen, vassføringskurven $g(z)$ påvirkes av mange typer inngrep i elvekanalen. I Norge er elvestrekninger oftest underlagt en "hydraulisk kontroll" fra det man gjerne kaller bestemmende profil - dvs et tverrsnitt hvor man har omslag fra strømmende bevegelse til stryk. I så fall er påvirkninger i dette profilet dominerende. Dersom det ikke er bestemmende profil som kontrollerer vannstanden, er lokale inngrep viktigere.

Naturlige påvirkninger:

- Elvekanalen er alltid i endring. I de øvre delene av vassdraget har man gjerne en utgravning og senkning, mens man i de nedre, alluviale delene har en pålagring (sedimentasjon). De største endringene får man i forbindelse med store flommer. I mange deler av verden fører menneskene en kontinuerlig kamp mot denne naturlige prosessen - man avstenger de naturlige sedimentasjonsområdene, d.v.s. elveslettene, ved flomverk, og elva sedimenterer i stedet i selve elveløpet, slik at bunnen og dermed flomvannstanden blir høyere. Som et resultat av dette må flomverkene stadig forhøyes. Særlig tydelig ser man dette i nedre del av Yangtze (over en strekning på 2000 km).

Antropogene påvirkninger:

- Kanalisering. Kanaliseringer har gjerne til hensikt nettopp å endre vassføringskurven $g(z)$, slik at man får større vassføring ved en gitt vannstand. Dette skjer både gjennom flere faktorer:
  - utvidet tverrsnittareal
  - senket bunn
  - økt hellning og dermed økt hastighet ved utretting av elveløpet
  - glattere bunn og sider ved utstøpning eller plastring og dermed økt hastighet

- Flomverk. Flomverk har ikke til hensikt å endre vannstand/vassføringsrelasjonen, men vil til en viss grad gjøre det, i og med at man innsnevrer tverrprofilet for

flomvassføringer. Hvor mye denne effekten betyr lokalt, kommer an på hvor effektive de naturlige oversvømmelsesområdene har vært som transportkanaler - ofte er vannhastigheten lav i disse områdene.

- Bruer og veifyllinger. Bruer og veifyllinger innsnevrer elvekanalen, og påvirker gjerne vannstand/vassføringsrelasjonen oppstrøms. Effekten er ofte betydelig, men gjerne upåaktet siden slike inngrep ofte ikke er underlagt konsekvensutredninger. Et eksempel: Glommen og Laagens Brukseierforening reiste sak mot Statens Vegvesen med utgangspunkt i at utfyllinger rundt brokarene i nye Minnesund-brua reduserte avledningskapasiteten i utløpet av Mjøsa til Vorma.

- Vassdragsreguleringer. Dersom vassføringen endres, vil naturlige prosesser endre elvekanalen. Disse prosessen er først og fremst erosjon/sedimentasjon, og tilgroing - ved redusert vassføring ser man gjerne at kratt og skog invaderer elvekanalen. Den siste effekten fører til økt friksjon og redusert effektivt tverrsnitt, og dermed redusert avledningskapasitet. I Norge er den viktigste årsaken til endret vassføring vassdragsreguleringer, og denne viktige følgeeffekten er ofte upåaktet. Et unntak er studiene av endret kanal og dermed endrete flomforhold i Fortun-elva (Fergus 1993)

3.4.3.3 Endret vannstand/skade-relasjon

Vannstand/skade-relasjonen *l(z)* har flere komponenter:

- vannstand/oversvømt areal
- oversvømt areal/arealbruk
- skade på enkeltobjekter

Påvirkningene her er først og fremst antropogene. De viktigste er:

Vannstand/oversvømt areal

Det viktigste inngrepet her er bygging av flomverk, som direkte tar sikte på å redusere oversvømt areal. Et alternativt inngrep, som man m.a. ser i Øst-Europa, og i en del norske industriarealer er oppfylling med overskuddsmasser fra elvemudring og tunnelarbeider.

Oversvømt areal/arealbruk

Selv om man ved planlegging ofte antar at arealbruken i oversvømmelsesområdene ikke endres med tiden, er dette langt fra tilfelle. Arealbruken endres som en naturlig følge av endrete økonomiske og sosiale forhold, og spesielt hurtig endres den dersom man i større eller mindre grad sikrer et område mot oversvømmelse.

Vanlige endringer er overgang fra natureng/beitemark til fulldyrking, bygging av bolighus, og overgang fra jordbruksarealer til urbaniserte områder. De fleste endringer fører til høyere økonomisk aktivitet og dermed større skadepotensiale. For å redusere den økonomiske aktiviteten må man gjerne ty til aktiv arealplanlegging og eventuelt båndlegging.

Skade på enkeltobjekter og jordbruksarealer

Skade på bygninger og andre objekter er avhengig av konstruksjon og faste installasjoner, f. eks elektroinstallasjoner. Konstruksjonsmåten kan gjøre objektet mer eller mindre robust mot flomskade. Når det gjelder bygninger, ser det ut til at moderne byggematerialene og byggemåtene er mindre robuste mot flom enn de tradisjonelle. I tillegg blir det stadig mer installasjoner som lett skades av vann. Norske byggeforskrifter tar generelt ikke hensyn til mulighet for oversvømmelse.

Når det gjelder skade på jordbruksområder, er avling, dyrkingsmetoder, terrengbearbeiding og arrondering avgjørende for hvor store skadene blir. Et gjennomgående trekk er at dersom flomhyppigheten går ned som følge av regulering eller bygging av flomverk, så går man over til mer intensiv og oftest mer sårbar dyrkingspraksis.

3.5 Andre skader enn oversvømmelse

3.5.1 Underminering og utrasning

Dersom elveløp ikke er erosjonssikret, vil flommer gi stedvis høy erosjon i elvebreddene, og dette kan føre til utrasninger av områder som ikke er direkte truet av oversvømmelse. Dette kan føre til jordtap, skader på veier og i ekstreme tilfelle utrasning av bygninger. Under flommen i 1995 hadde man spesielt store utrasninger i Åsta (Bogen & Bønsnes 1999). En av de største utrasningene under flom i nyere tid i Norge er Helgåbruddet i Verdalen i 1893, hvor 800 daa dyrket mark gikk tapt (Andersen 1996). En stor del av skadene og dødsfallene under Stor-ofsen i 1789 ser ut til å ha skyldtes utrasninger.

3.5.2 Sideelver ute av kontroll

Sideelver som bryter ut av sitt løp er en viktig skadeårsak i flomsituasjoner, og rammer gjerne hurtig og uforutsigbart. Skadepotensialet er stort når elva går gjennom tettsteder og byggefelt (overraskende mange norske byggefelt er anlagt i rasvifter rundt småelver). I tillegg til direkte oversvømmelse gir disse situasjonen skader gjennom direkte vanntrykk på konstruksjoner, undergraving og stor massetransport. Det siste dramatiske tilfellet i Norge var Moksas brudd gjennom Tretten under 1995-flommen. Flommen i Jostedalen i 1979 gjorde stor skade

ved slike elvebrudd (se figur 14), det samme gjaldt flommen i Høyanger i 1971, og flommen i Gjøvik/Lillehammerområdet i 1988.

Det er gjerne stor fare for tap av menneskeliv under slike flommer. I Sør-Europa har det vært til dels store dødstall, eksempler fra det siste tiåret er Vaison-la-Romaine (Frankrike) i 1992 (35 døde), Piedmont (Italia) i 1994 (60 døde), Biescas (spanske Pyreneér) i 1996 (70 døde), Jarovnice (Slovakia) i 1998 (34 døde). I Norge har det heldigvis vært få dødsfall i slike situasjoner - det alvorligste tilfellet er en kombinert flom og rassituasjon i Tinn i 1927, seks personer omkom i Rjukan.

Sikringstiltak mot slike flommer er gjerne løpsstabilisering og kanalisering. Dette blir gjerne forholdsvis store inngrep, fordi man må kunne håndtere svært store vassføringsvariasjoner. Et alternativ er etablering av ekstra flomløp utenom de kritiske områdene. Da kan man bevare elveleiet i en tilnærmet naturlig form.

3.5.3 Forurensning

Flommer har potensial for å utløse punktutslipp av forurensninger som kan gi store lokale belastninger. De mest kritiske situasjonene vil være

- Utslipp av kloakk fra havarerte pumpestasjoner, renseanlegg og overløp.
- Erosjon av søppelfyllinger og andre deponier og fyllinger.
- Oppflyting og brekkasje på olje, parafin og kjemikalietanker, med etterfølgende utslipp.
- Tap av kjemikalier fra lagre og oppstillingsplasser.
- Havari av kjemikalietransporter.
- Kadavre.

Den største faren er selvsagt at forurensninger fra punktkilder når fram til usikrede drikkevannskilder mens konsentrasjonen er høy. Man så omrisset av slike problemer under flommen i 1995, f.eks. gikk betydelige mengder råkloakk direkte i vassdragene. I tillegg utgjør forurensingene en betydelig ekstrabelastning under opprydningsarbeidet. Forurensning fra olje og kjemikalier kan også gi miljøbelastninger. Forurensning under flom er i HYDRA-programmet behandlet av T-prosjektet (Sælthun & Lindholm 1999).

3.5.4 Følgeskader

I tillegg til de direkte fysiske skadene, har man en rekke mer eller mindre indirekte skader og tap, både økonomiske og ikke-økonomiske. Det dreier seg om

- avbruddstap
- indirekte skader for bedrifter og organisasjoner som ikke er direkte berørt av flommen
- helseskader og psykiske belastninger



Figur 14 Jostedalen 1979. Sagerøyelva har tatt nytt løp.

Figure 14 Jostedalen 1979. Sagerøy River has taken a new course

Foto: Bård Andersen, NVE.

Gjennomgående er disse tapene vanskelige å estimere, men de kan være betydelige. Et lokalsamfunn som er utsatt for massive oversvømmelser og evakuering, kan typisk bruke et år på å komme tilbake i normal funksjon, og det hender at samfunn ikke gjenvinner den vitalitet de hadde før flommen. Lengre avbrudd kan lett føre til konkurser i berørte bedrifter, og tap av arbeidsplasser. Fra USA er erfaringen at 43% av små firmaer aldri åpnet igjen etter å vært stengt under en flom (NVE 1999). De indirekte skadene for samfunnet utenfor flomsonen er forårsaket av skader på sentral infrastruktur - veier, jernbane, strøm og samband - og ringvirkninger av svekket økonomisk aktivitet i de flomrammede områdene. Det har vært anslått at dersom skader fra en enkelt naturkatastrofe kommer opp i området 5-10% av BNP, så kan nasjonaløkonomien få et varig tilbakeslag.

Helseskader kan følge av ødelagt drikkevannforsyning, og epidemier i evakuert befolkning. Dette problemet ser i moderne samfunn ut til å være mindre enn fryktet. Oppryddingsfasen etter flom byr imidlertid på en rekke farer - sammenrasing, elektrisk støt, kullosforgiftning, luftveisplager fra mugg osv. I tillegg er den psykiske belastningen betydelig.

3.6 Flommer og miljøeffekter

Miljøeffekter av flommer og flomsikringstiltak er behandlet i en rekke HYDRA-rapporter fra hovedprosjektet "Miljøvirkninger av flommer". Disse er:

- "Miljøkonsekvenser av flom - flom og vannkvalitet", HYDRA-rapport Mi01 (Faafeng m.fl. 1999).

- "Virkning av flom på vannlevende organismer", HYDRA-rapport Mi02 (Brabrand m.fl. 1999).

- "Miljøeffekter av flomforebyggende tiltak - en litteraturstudie", HYDRA-rapport Mi03 (Østdahl, Taugbøl & Dervo 1999).

- "Miljøvennlig flomsikring - en litteraturstudie av metoder og effekter", HYDRA-rapport Mi04 (Østdahl & Taugbøl 1999).

- "Flommer og sedimenttransport i vassdrag", HYDRA-rapport Mi05 (Bogen & Bønsnes 1999).

- "Flommer, flomsikring og miljø - konflikt eller konsensus?", HYDRA-rapport Mi06 (Sælthun 1999)

Ut over naturmiljøet er kulturlandskapet behandlet i HYDRA-notat 2/98 "Landskap og estetikk - et kulturelt perspektiv" (Sæter 1998).
Den følgende oppsummeringer er hentet fra HYDRA-rapport Mi06 (Sælthun 1999):

1) Flommer har en naturlig og nødvendig funksjon for å opprettholde balansen i de akvatiske miljøene. Dersom flomregimet endres, endres også naturmiljøet og økosystemene.

2) Dersom ekstreme flommer kan føre til irreversibel skade på biodiversitet og akvatisk miljø dreier det seg uansett om flomstørrelser som ikke kan avhjelpes ved tekniske flomsikringstiltak.

3) De største miljøvirkningene av flomsikringstiltak som flomverk, kanaliseringer og erosjonssikring er:

   a) endring (vanligvis forringelse) av habitat i selve vassdraget (substrat, vanndyp, hastighet, skjul)
   b) endring av terrestriske biotoper, særlig kantvegetasjon
   c) avskjæring av elveelementer som sideløp, meandere og kroksjøer fra vassdraget
   d) bortfall av våtmark

4) Miljøvirkninger av flommer og flomsikringstiltak lar seg med dagens metoder ikke med rimelig sikkerhet prissette.

5) Ut fra studiene i HYDRAs Mi-prosjekt synes det som virkningene av tradisjonelle flomforbygningstiltak på naturmiljøet er indifferente eller negative.

6) Det er en rekke andre ikke-prissatte konsekvenser av flomsikringstiltak i tillegg til miljøvirkningene (kulturlandskap, kulturminner, rekreasjonsverdier, bosettingsmønster osv). Disse virkningene vil gjerne havne på nyttesiden i en utvidet nytte-kostnadsanalyse.

4. Hovedkomponenter i økonomisk skade

4.1 1995-flommen

Vesleofsen på Østlandet og deler av Trøndelag i 1995 er den flommen som har gitt størst skader i nyere tid. Totalskadene ble av Flomtiltaksutvalget anslått til 1.8 milliarder kroner (NOU 1996). Oversikten, som er gjengitt i tabell 2 og 3, er for en stor del basert på anslag som ble innrapportert i tiden umiddelbart etter flommen.

Tallene over faktiske utbedringer og reparasjoner etter flommen er ikke på en tilsvarende måte gjort tilgjengelige. Endelige kostnader på grunn av flommen må ta hensyn til at faktiske utlegg og senvirkninger er registrert i mer enn et år etter at flommen fant sted.

4.2 Andre nyere flommer

Selv om 1995-flommen på Østlandet var stor, er den langt fra enestående. Noen store flommer i dette århundre er (kilde: Andersen 1996):

1910: Vårflom i Glomma og Lågen. Store oversvømmelser i Mjøsbyene og i Skedsmo.

1916: Vårflom i Glomma: ca 100-års flom i Solør, nest størst i dette århundre (flomverkene i Solør er stort sett dimensjonert for denne flommen).

1918, 24-25/6: Snøsmelting og regnflom i Trøndelag, særlig Gaula. 3 millioner kr i skader.

1925: Stor høstflom i Gaula.

1927: Stor vårflom i Lågen og Mjøsa - nest størst i dette århundre. Store oversvømmelser i Mjøsbyene.

1927, 27-28/6: Flom og ras i Rjukan. Store skader på bebyggelsen. 6 omkom i ras.

1927, 30/6: Meget stor flom i Skiensvassdraget, kanskje den største i historisk tid. Skader for nærmere 3 mill kr.

1932, 19/1: Stor vinterflom på Nord-Vestlandet og i Trøndelag.

1934: Stor vårflom i Glomma, omtrent samme nivå som i 1927. Store skader. Denne våren var det skadeflommer over store deler av Sør-Norge: Glomma, Toten, Etnedal, Hallingdal, Sigdal, Telemark - særlig Hjartdal og Notodden, Sørlandet, Vestlandet - særlig Stryn og Surnadal, Trøndelag - særlig Gaula og Orkla.

1937, 10.8: Hjøkullaup i Simadal ved brudd på isdemningen i Demmevatn. Meget store ødeleggelser.

1938, 28/8-2/9: Storflom i Gudbrandsdalen. Verst i Vågå og Heidal.

1940, 24/8: Største registrerte flom i Gaula og Orkla. 3000 m3/s i Gaula. Store skader.

1940, 27/11: Voldsomme nedbørmengder og flommer over store deler av Vestlandet - 210 mm nedbør registrert i Mauranger på ett døgn (full nedbørmåler).

1953, 8/9: Regnflommer i Nordfjord og Møre og Romsdal - særlig småvassdrag.

1959, 6/10: Regn og snøsmelting i Nordland. Elvebrudd, særlig i Beisfjordelv.

1959, 1961 og 1962: Skadeflommer i Namsen. Erosjon i breddene og elvebrudd ga fare for omfattende utrasninger, og førte til igangsettelse av omfattende sikringstiltak.

1966: Stor vårflom i Glomma og Lågen. Store oversvømmelser rundt Øyeren.

1967: Stor vårflom i Glomma og Lågen. Skader for 35 millioner rundt Øyeren, særlig Lillestrøm.

1967, 8/7: Store oversvømmelser i Orkla.

1971, 30-31/5: Regn og sterk snøsmelting ga storflom i Lærdal og øvre Ottadalen.

1971, 2/11: Storflom i Sogn og Vosse-traktene. Verst i Høyanger (regulert vassdrag), store skader i tettstedet.

1973, 8/1: Stor vinterflom i Sogn og Fjordane og Møre og Romsdal.

1979, 14-15/8: Katastrofeflom i Jostedalen. 100 bolighus skadet, 14 bruer tatt. Samlete skader ca 35 millioner.

1983, oktober: Langvarig, store nedbørmengder på hele Vestlandet. Store oversvømmelser.

1987, juni: Regnflom Lena, Østre Toten og langs Glomma. Betydelige skader.

1987, 16-17/10: Stor flom i Telemark, store skader.

Tabell 2 Totale skader etter flommen på Østlandet 1995.

Tabell 2 Summary of damages after the flood in Eastern Norway in 1995 (mill. NOK)

Skadetyper *Type of damage*	**Privat sektor** *Private sector*		**Offentlig sektor** *Public sector*		**Totalt** *Total*
	Forsikring *Insurance*	**Egenandel** *Own risk*	**Bevilgning** *Grant*	**Udekket** *Non-covered*	
Direkte/*Direct*	1024[1]	100	190[2]		1314
Indirekte/*Indirect*	35[3]		154[4]		189
Strakstiltak[5]/*Immediate measures*			313[6]		313
Totalt/*Total*	1059	100	657		1816

Tabell 3 Spesifiserte skader etter flommen i 1995 (mill kr)

Tabell 3 Specified damages after the 1995 flood (mill NOK).

1	Norsk naturskadepool	800		
	Statens naturskadefond	204		
	Annet	20		
	Direkte, privat sektor, forsikring		**1024**	
	Direkte, privat sektor, egenandel		**100**	
2	Riks- og fylkesvei	44		
	NSB (Jernbaneverket)	50		
	Bygg, museer, skole	31		
	Kommunale og fylkeskommunale anlegg	65		
	Direkte, offentlig sektor, bevilgning		**190**	
3	Avlingsskade	35		
	Indirekte, privat sektor, forsikring		**35**	
4	Avbruddsforsikring	100		
	NSB inntektstap	54		
	Indirekte, offentlig sektor, bevilgning		**154**	
5	Beredskap, opprydding, forbygging			
6	Forsvar, Sivilforsvar, politi, NVE	248		
	Kommuner, fylkeskommuner	65		
	Strakstiltak, offentlig sektor, bevilgning		**313**	
	Totalt			**1816**

1988, 2-4/9: Store nedbørmengder i Gjøvik-Lillehammerområdet. Skader for ca 50 millioner (Harby 1988).

1995, juni: Storflom over store deler av Østlandet, Vesleofsen. Skader for ca 1800 millioner.

Tabell 4 (hentet fra Flomtiltaksutvalgets rapport - NOU 1996:16) (NOU 1996) viser skadeutbetalingene i perioden 1980 til 1995. Utbetalingene for Vesleofsen er like store som de andre 15 årene til sammen. For Vesleofsen dekker disse utbetalingene ca halvparten av de direkte skadene. Dersom dette forholdet er typisk, blir samlet skade 3.5-4 milliarder. Midlere årlig skade blir ca 230 millioner kroner for perioden 1980-1995, 120 millioner for perioden 1980-1994.

Tabell 4 Årlige utbetalinger for flomskade (kilde: Flomtiltaksutvalget)

Tabell 4 Annual flood damage compensations paid by the Insurance Natural Disaster Pool and the governmental Natural Disaster Fund

År *Year*	**Norsk Naturskadepool** *Insurance Pool mill. NOK*	**Statens naturskadefond** *Natural Disaster Fund mill. NOK*	**Samlete utbetalinger** *Total payments mill. NOK*
1980	28.2	32.7	60.9
1981	30.9	15.7	46.6
1982	25.5	9.1	34.6
1983	42.8	17.4	60.2
1984	3.5	16.7	20.2
1985	15.3	16.9	32.2
1986	6.8	12.4	19.2
1987	366.6	10.8	377.4
1988	52.1	25.1	77.2
1989	13.5	60.0	73.5
1990	19.4	20.0	39.4
1991	3.8	11	14.8
1992	18.1	10.4	28.6
1993	6.4	10.5	16.9
1994	27.0	5.8	32.8
1995	750.7	193.6	944.4
Sum	1.410.6	468.1	1.878.9

5. Skadefunksjoner

5.1 Generaliserte flomskadefunksjoner

De generelle flomskadene er så langt som mulig analysert på samme måte. Følgende forutsetninger er gjort:

- Andelen eller antallet av objekter som utsettes for flom har en sammenheng med flommens størrelse.
- Av de objektene som utsettes for flom, vil det bare være et begrenset antall som påføres flomskade og blant disse igjen vil skadeomfanget variere. Det er framskaffet midlere eller statistisk forventet flomskade pr objekt som tar hensyn til begge disse to sannsynlighetene.
- For de objektene som faktisk påføres flomskade, vil omfanget av skaden uttrykt som en kostnad være gitt av en statistisk fordeling. Skaden vil ikke være ensartet, noe som skyldes både tilstanden til de enkelte objekter samt lokale hydrauliske forhold.

I denne rapporten er det undersøkt flomskade på fire sektorer; bygning, vei, jernbane og anlegg for flom og erosjonssikring. De konkrete kostnadstall er oppsummert nedenfor:

Bygninger

- For bolighus:
  1240 kr skade pr cm vannstand der nivået på vannet (flomtoppen) er gitt over et basisnivå satt til 250 cm under gulv 1. etasje.

- For jordbruksbygninger:
  Gjennomsnitt på kr 50 000 pr bygning uansett den relative vannstand.

Vei

- For den strekning av riks- og fylkesvei som utsettes for flom ved at vannstanden når opp til veidekket:
  360 000 kr pr km.

Jernbane

- For den banelengden der vannstanden når opp i formasjonsplanet:
  30 000 kr pr km.

- For den banelengden der vannstanden når opp over formasjonsplanet og inn i overbygningen (pukklaget) hvis det ikke forventes erosjon eller tilslamming:
  Minste tilleggskostnad på 45 000 kr pr km.

- For den banelengden der vannstanden når opp over formasjonsplanet og inn i overbygningen (pukklaget) hvis det er fare for erosjon eller tilslamming:
  Maksimal tilleggskostnad på 250 000 kr pr km.

Anlegg for flom- og erosjonssikring

- For forbygningsanlegg
  Gjennomsnittlig kostnad på 430 000 kr pr anlegg med skade.

- For flomverk
  Gjennomsnittlig kostnad på 1.18 million kr pr anlegg med skade.

- For senkningsanlegg
  Gjennomsnittlig kostnad på 200 000 kr pr anlegg med skade.

5.2 Definisjoner og datakilder

Skade er i denne rapporten brukt henimot synonymt med begrepet kostnader. Det henspeiler på økonomiske tap, erstatninger og omkostninger som flommen har påført samfunnet, både den private og den offentlige sektor. Hovedvekten legges på faste objekter som blir helt eller delvis skadd eller får forringet sin bruksverdi som følge av en flom. Følgende kategorier er vist i tabell 2:

- Direkte skade
  Utbetaling til erstatning eller nybygging som gjør det mulig å føre skadeobjektet tilbake til en standard som tilsvarer dagens krav.

Direkte skade er den kategorien som det er spesielt fokusert på i denne rapporten. Normalt antas det at et skaderammet objekt skal ha det samme kvalitetsnivå etter en reparasjon som det hadde før flommen inntraff. For enkelte objekter, så som bygninger, kan det inntreffe at reparasjonen medfører en verdistigning i forhold til den tidligere tilstanden, på grunn av at taksten er uavhengig av bygningens forfatning før flommen inntraff. Selv om dette strider mot den gjengse oppfatning av hva skade er, har det innenfor rammene av dette prosjekt ikke vært mulig å utelukke erstatninger som øker verdien.

- Indirekte skader
  Merkostnader påført eiendom eller organisasjoner utenfor selve det flomutsatte området som en ringvirkning av flommen.

Ringvirkninger er registrert av noen etater i den offentlige sektor. Dette inkluderer eksempelvis dokumenterte inntektstap. Ett av problemene med indirekte kostnader er at de ikke nødvendigvis er en kostnad for samfunnet som helhet. De kan i noen tilfeller bare være en forskyvning av inntekter fra en sektor til en annen, f.eks. fra jernbane til veitransport. Ett annet problem er at tilsvarende ringvirkninger ikke er registrert, spesielt for den private sektor, og ville være svært vanskelige å anslå. I dette arbeidet er det derfor ikke forsøkt innhentet noen supplerende eller mer detaljerte data for indirekte kostnader.

- Strakstiltak
  Kostnader som er påløpt i løpet av flomepisoden på grunn av de tiltak som er satt inn.

Mye av dette vil gå til økte driftsmidler og utstyr for organisasjoner som har ansvar for bergingsarbeid eller flomsikring. Det omfatter også en del umiddelbart forebyggende arbeid utover ordinære utgifter til flomsikring. Det er bare den offentlige sektor som har registrert disse kostnadene og fått dem erstattet. Tilsvarende kostnader som den private sektor måtte ha pådratt seg, ville være høyst spekulative og er ikke inkludert i dette prosjektet.

Bortsett fra skader på landbruket, er datamaterialet basert på registrerte utbetalinger etter flommen i 1995, stort sett fra tre kilder:

- Estimat eller etterbetalinger fra departementer til dekning av utgifter som er påført kommuner og statlige etater.
- Utbetalinger fra forsikringsselskap etter skjønn til privatpersoner og i mindre grad til kommuner.
- Utbetalinger fra Statens naturskadefond etter skjønn til privatpersoner i landbruket.

Beløpene som rapporteres, er aggregerte tall fra de respektive kilder. Enkelte tall er de overslag og skjønn som ble gjort i 1995 umiddelbart etter flommen. Noen tall har vært revidert i årene etter flommen etter som de faktiske kostnadene til reparasjon er blitt tilgjengelige. Noen av de opprinnelige anslag har måttet bli revidert i ettertid på grunn av langtidsvirkninger som ikke var forutsett.

Statens naturskadefond yter erstatning for naturskader som ikke dekkes gjennom alminnelige forsikringsordninger. For jordbrukets vedkommende, utenom utbetalinger fra Statens naturskadefond, vil skadetallene bli aggregert opp fra en analyse av enhetsskader på skadeutsatte arealer knyttet til vannstand og vassføring i løpet av flommen.

Enkelte økonomiske konsekvenser er holdt utenfor vurderingen:

- Tap som ikke er dekket av noen forsikringsordning men som er reelle for den skadelidte.
  Dette angår i første rekke skade på objekter som eierne med vilje ikke har forsikret. Slike skader er ikke registrert, og eventuelle estimat ville være beheftet med stor unøyaktighet. Denne kategorien kan anses som en ekstrem form for egenandel.

- Tap som er påført enkeltpersoner i form av forsinkelser og tapt arbeidstid.
  Slike indirekte kostnader kan muligens anslås rent økonomisk, men da bare for noen sektorer. Slike estimat er ikke inkludert i denne rapporten.

Arbeidet er konsentrert om såvidt mulig å etablere reelle kostnader som kan uttrykkes i kroner. Dette innebærer at skader som ikke nærmere kan kvantifiseres i pengebeløp, dermed ikke er tatt med. Dette gjelder følgende kategorier:

- Miljøskader.
  Dette vil generelt omfatte naturvern, friluftsliv, vannkvalitet og estetiske verdier. Noe av dette vurderes i et separat HYDRA-prosjekt (Mi-prosjektet, se kapittel 3).
- Konsekvenser for liv, helse og personlig sikkerhet.
  Dette omfatter både fysiske skader og psykiske påkjenninger, enten det gjelder de umiddelbare følger eller langtidsvirkninger.

Analysen av data om flomskade etter flommen i 1995 har vært konsentrert om representative prediktorer for skade, først og fremst vannstand eller vassføring. Målsetningen er å kunne bruke disse prediktorene til å estimere skader i en annen lokalitet og ved en annen flom enn den i 1995. Skadebildet er sammensatt, og de forskjellige aspekter er ikke like klart og entydig knyttet til disse primære prediktorene alene. En første tilnærming kan for noen av de vanlige skadetyper være tilstrekkelig ved hjelp av vannstand eller vassføring, så som bygninger. Detaljundersøkelser av konkrete skadetilfeller kan vise at andre hydrologiske og hydrauliske variable også spiller en rolle. Flommens varighet og den lokale vannhastighet er blant de som det må tas hensyn til for å forklare noen av skadene, for eksempel på veiene. Ytterligere komplisert er det for deler av infrastrukturen der noen av de registrerte skadene skjedde på grunn av flommer i sideelvene og derfor ikke helt og holdent kan relateres til forholdene i hovedvassdraget.

5.3 Bygninger

5.3.1 Datagrunnlag

Kostnadstall er mottatt fra Norsk Takstallianse med erstatningsbeløp for bygninger i én kommune, Åsnes. Dataene er basert på spørreskjema som Norsk Takstallianse har sendt ut til takstmennene som ble engasjert etter flommen på Østlandet i 1995. Det har vært benyttet omtrent 60 takstmenn for hele den berørte regionen. Arbeidet deres har vært konsentrert over et begrenset tidsrom. Det er grunn til å vurdere dette datagrunnlaget som pålitelig og av ensartet kvalitet.

Oversikten for Åsnes kommune omfatter 232 skaderapporter. Dataene er fordelt på bygningstype som vist i tabell 5.

Den viktigste analysen har vært å se på skadeomfanget i forhold til vannstand. Dessuten er kategorien boliger vurdert med hensyn på alder og kjellertilstand. Noen av bygningstypene er det svært få av i utvalget og er derfor ikke blitt nærmere analysert. Dette gjelder hovedbygninger, fritidsbygg, forsamlingshus, næringsbygg og aldershjem.

Boligene representerer den kategorien av bygninger som har størst andel av totale skadeutbetalinger og som det derfor er spesielt viktig å finne en skadefunksjon for. Skadebeløpet er sammenholdt med den relative vannstanden i hver bolig. De tilsendte dataene har hatt golvhøyde i første etasje som utgangsnivå. Dette er blitt justert slik at sammen-ligningen går ut fra et nivå som er 2.5 meter lavere enn golv første etasje og som svarer til golv i kjeller, eventuelt fundament på hus. Det viser seg at dette nivået er et godt nullpunkt for analysen, selv for boliger uten kjeller. Grunnen er at det normalt vil være en form for fundament under boligen, og at denne går et stykke ned under første etasjen noenlunde tilsvarende en kjelleretasje.

Skade på boliger øker som ventet med økende vannstand. I figur 1 er det vist en linje som angir den gjennomsnittlige størrelsen på skaden ved en vilkårlig vannstand. Denne linjen uttrykker at den forventede flomskaden er 1240 kr pr cm vannstand over et basisnivå på 250 cm under 1. etasje gulv.

Varighet på flommen kan ha spilt en rolle for skaden på noen av boligene ved at skadebeløpet øker jo lenger periode huset berøres av flomvannet. Men selv ved lengre perioder med flomvann vil ikke skadeomfanget nødvendigvis være maksimalt. Skadene kan ha blitt redusert hvis mottiltak er satt inn på et tidlig nok stadium. Dette er en iakttakelse fra takstmennene uten at det er nærmere dokumentert.

Innbo og løsøre inngår i noen av skadetakstene. Dette avhenger av hver enkelt forsikringsavtale.

Alder eller byggeår er ikke en tilfredsstillende variabel til å estimere skadekostnader på boliger. De fem periodene som er vist i tabell 6 gir ingen signifikant sammenheng. Den mest markante forskjellen oppnås i stedet ved å dele dataene i to, grovt sett om boligen er satt opp før eller etter annen verdenskrig, se figur 15. Skadene på førkrigsboligene er henimot vilkårlige sett i forhold til

Tabell 5 Flomskadede bygninger i Åsnes

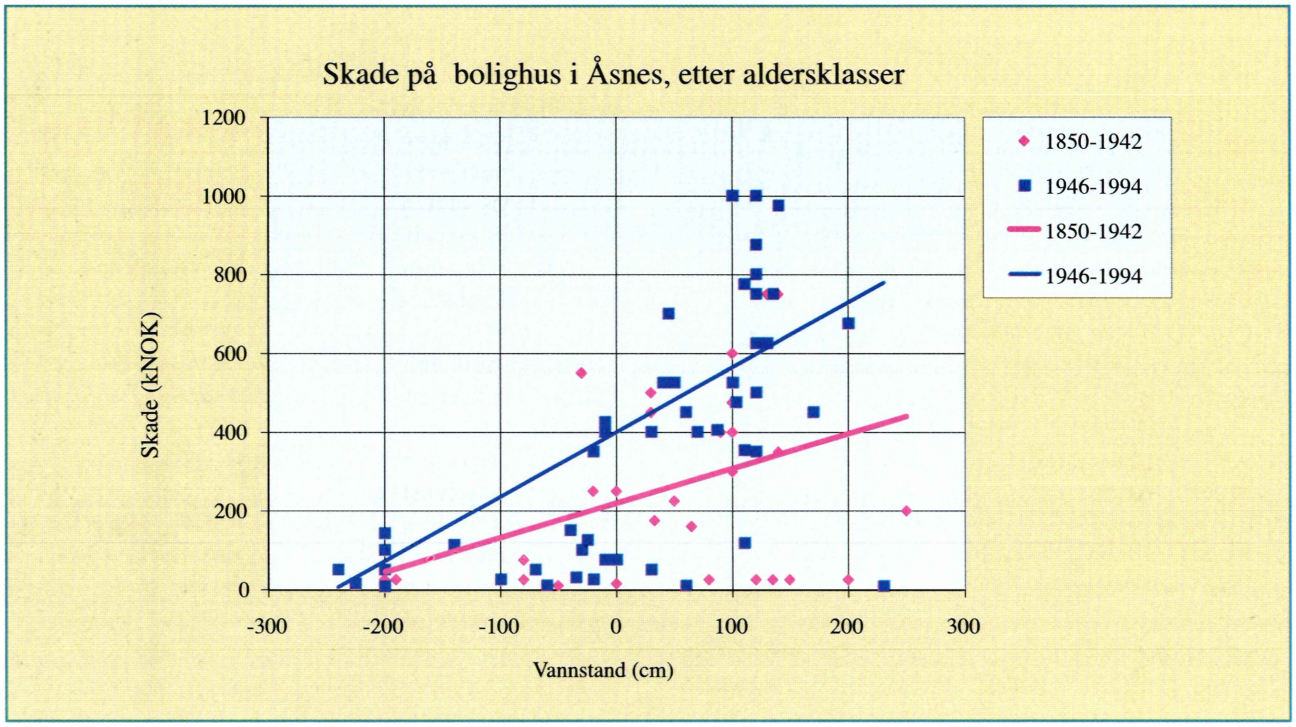
Tabell 5 Flood damaged buildings in Åsnes (the analysed sample

Bygningstype *Type of building*	**Antall** *Number*	**Total skade** *Sum damage kNOK*	**Gjennomsnittlig skade** *Average damage kNOK*
Bolig/*Residence houses*	86	29969	348
Hovedbygning/*Farm residences*	4	1615	404
Driftsbygning/*Barns*	29	4192	145
Garasje/*Garages*	15	439	29
Andre uthus/*Other outbuildings*	86	4600	53
Fritidsbygg/*Holiday homes*	6	1023	171
Forsamlingshus/*Assembly halls*	2	575	288
Næringsbygg/*Industrial buildings*	2	875	438
Aldershjem/*Senior homes*	2	725	363
Totalt/*Sum*	232	44013	190

vannstanden. Middelverdien for skade på etterkrigsboligene, har derimot en langt klarere sammenheng med vannstanden samtidig som den gjennomsnittlige skaden er høyere enn for de eldre boligene.

Noen informasjon om boarealet, utformingen, tilstanden eller andre fysiske trekk ved boliger ligger ikke inne i dataene. Tilstanden på en bygning er vanskelig å kvantifisere. Fullverdien kunne ha vært et godt mål på tilstand, men denne informasjonen er fortrolig fra forsikringsselskapene. Utførelsen og byggematerialene spiller en rolle. Eksempelvis, hvis det benyttes innvendig trepanel, så anses alt panelet som totalskadet og det må rives selv om vannet bare berører den nedre delen av veggen. Hvis det derimot benyttes plater i indre vegger, så er det tilstrekkelig å fjerne de nedre 60 cm over golvet.

Det har en viss betydning for skadenivået på en bolig om det finnes kjeller og om denne er utbedret. Boliger med innredet kjeller har generelt hatt større skader enn de med uinnredet kjeller, som igjen viser større skadebeløp enn de uten kjeller (tabell 7, figur 16). Av de tre



Figur 15 Innflytelse av byggeår på boligskader i Åsnes

Figure 15 Effects of construction year on damage to residential houses in Åsnes.

Tabell 6 Flomskadete boliger i Åsnes sortert etter byggeår

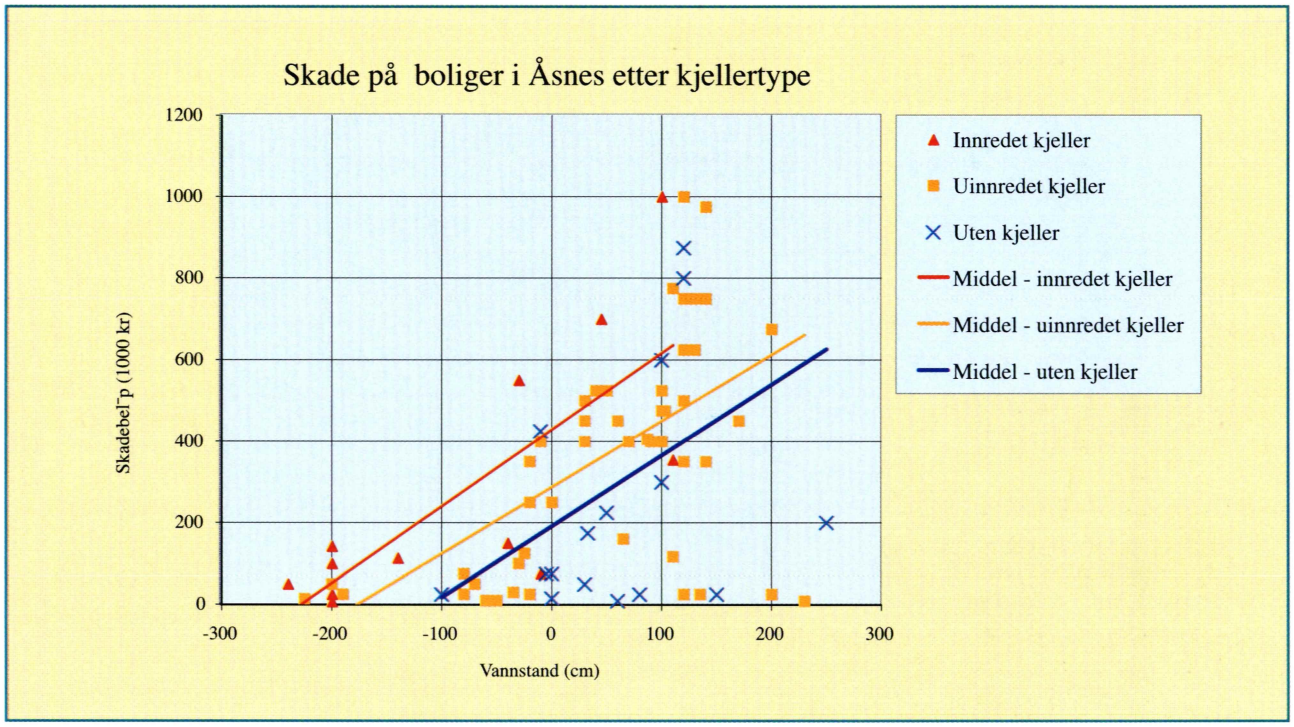
Tabell 6 Flood damaged buildings in Åsnes classified by construction year

Byggeår for boliger *Construction year*	**Antall** *Number*	**Total skade** *Sum damage kNOK*	**Gjennomsnittlig skade** *Average damage kNOK*
Før/*Before* 1900	19	4425	233
1901-42	14	3760	269
1946-60	16	8542	534
1961-80	15	3764	251
1981-94	18	7998	444
Udaterte/*Undated*	4	1480	370
Alle/*All*	86	29969	348

middelverdiene som er avmerket, er det spesielt innredet kjeller der det er en rimelig korrelasjon mellom skadenivå og vannstand. For de to andre tilfellene, uinnredet eller ingen kjeller, har de viste middel-verdiene en mindre signifikant sammenheng.

Tre typer jordbruksbygninger er vurdert sammen. Det gjelder bygninger som i data-materialet er benevnt som driftsbygning samt garasje og andre uthus. Det er sannsynligvis en god del overlapping mellom disse tre betegnelsene. De forskjellige takstmenn har stått fritt med hensyn til ordvalget og har ikke nødvendigvis vært innbyrdes konsekvente. Sistnevnte kategori er en samlebetegnelse for bygninger med ganske varierende formål og størrelse. Det er den mest tallrike blant de tre typene jordbruksbygninger i datasettet fra Åsnes og fordeler seg i alder som angitt i tabell 8.

En fordeling av uthus på driftsbygninger og garasjer er gitt i tabell 5. Skadene på alle tre typer jordbruksbygninger er vist i figur 17. Vannstanden er slik som oppgitt i datamaterialet, dvs relativt til golv i første etasje. Bildet for disse typene bygninger er mer uklart enn hva tilfellet er for boliger. Hovedobservasjonen er at skadenivået åpenbart er langt lavere enn for boliger. Det er derimot svært liten sammenheng med vannstand, og dette er vurdert til ikke å være statistisk signifikant.



Figur 16 Innflytelse av kjeller på boligskader i Åsnes.

Figure 16 Damage to residential houses in Åsnes after the flood in 1995.

Tabell 7 Skade på boliger i Åsnes etter kjellertilstand.

Tabell 7 Damage to houses in Åsnes by basement status

Kjeller-tilstand for boliger *Basement status*	Antall *Number*	Total skade *Sum damage kNOK*	Gjennomsnittlig skade *Average damage kNOK*
Med kjeller/*With basement*	68	24395	359
Uinnredet	12	3266	272
Innredet	56	21129	377
Uten kjeller/*Without basement*	18	5574	310
Alle/*All*	86	29969	348

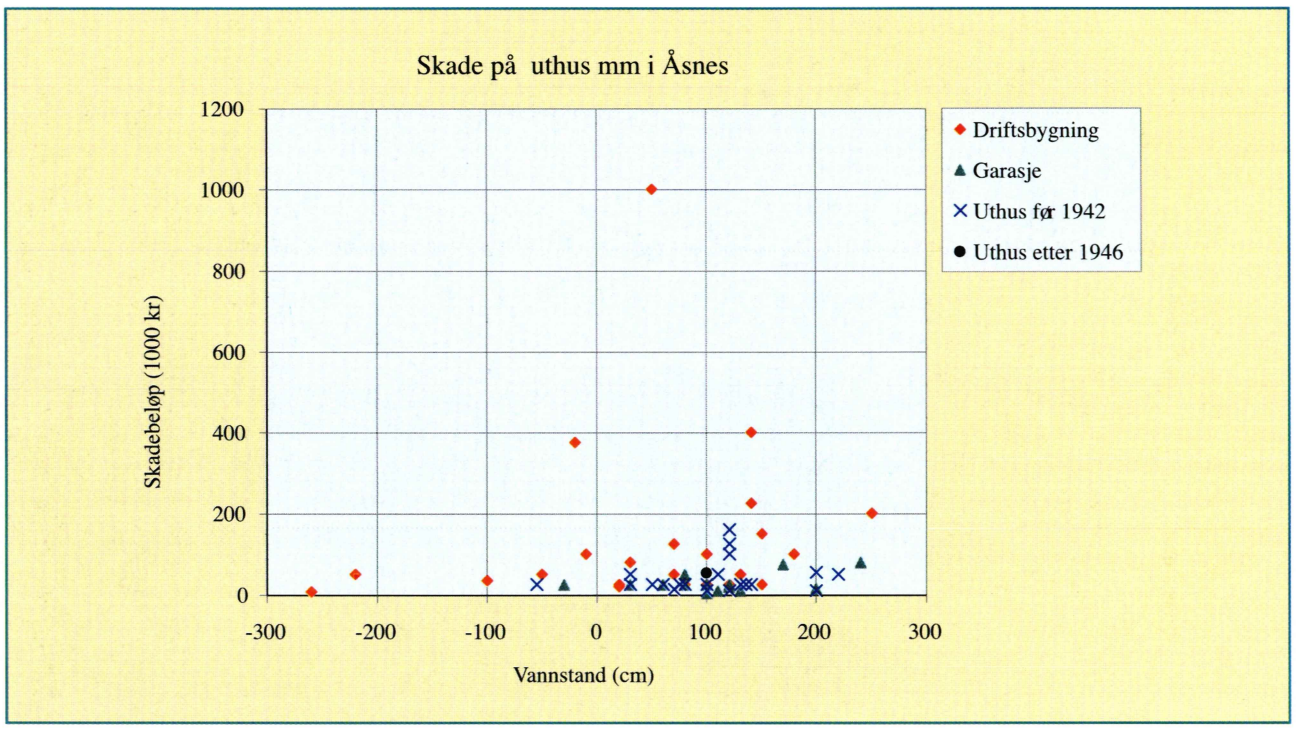
5.3.2 Skadefunksjon

Generelt er det ikke mulig å få fram entydige kurver over kostnader (erstatningsbeløp på bygninger) som funksjon av vannstand. De viktigste konklusjonene er:

1. Det vil med sikkerhet oppstå skade på enhver bygning som har vært utsatt for flom.
2. Skadeverdien på en bygning øker proporsjonalt med den maksimale vannstand som opptrer i løpet av flommen hvis denne vannstanden overstiger fundamentet.
3. Skadeomfanget er større i hus med kjeller enn uten. Skade under golvnivået i første etasje kan være knyttet til kjeller eller til grunnmur.
4. Hus bygd i forskjellige perioder har ulike skadenivå slik at det kan forventes høyere utbetaling for nyere hus enn for gamle. Dette er mest tydelig for bygninger oppført etter 1945.

Framgangsmåten som foreslås nedenfor vil gi et statistisk forventet nivå på den totale flomskaden i et distrikt ved en gitt flomstørrelse:

1. Anta et gjentaksintervall for flommen og en tilhørende maksimal flomhøyde i et gitt distrikt.
2. Finn antallet bygninger som rammes av den antatte flomstørrelsen i distriktet og hvordan disse bygningene er fordelt med hensyn på relativ vannstand over fundament.



Figur 17 Skade på driftsbygninger, garasjer og uthus i Åsnes

Figure 17 Damage to outbuildings in Åsnes

Tabell 8 Flomskadede uthus i Åsnes

Tabell 8 Flood damaged barns, garages and other outbuildings in Åsnes

Byggeår *Construction year*	**Antall** *Number*	**Total skade** *Sum damage kNOK*	**Gjennomsnittlig skade** *Average damage kNOK*
Før/*Before* 1942	31	1308	42
Etter/*After* 1942	50	3140	63
Udaterte/*Undated*	5	152	30
Alle/*All*	86	4600	53

3. Finn den midlere skade som oppstår på et bolighus når nivået på vannet (flomtoppen) er gitt i forhold til fundament (1240 kr skade pr cm vannstand over fundament for boliger).
4. Finn forventningsverdien av flomskaden på boliger i dette arealet som produktet av antall hus ved en gitt relativ vannstand og den midlere skade ved denne vannstand. Den totale skaden for hele distriktet er summen for alle husene ved de forskjellige vannstandene.
5. Finn flomskaden på andre bygninger etter skjønn, et felles gjennomsnitt på kr 50 000 pr bygning.

I denne framgangsmåten er det underforstått at verdien og dermed den potensielle flomskaden på hus er uavhengig av lokalitet (distrikt, kommune, avstand fra elva) slik at det er samme blanding av verdifulle og mindre verdifulle hus overalt. Hvis denne antagelsen ikke holder, så må verdi eller skadeforhold justeres etter skjønn.

5.4 Vei

5.4.1 Datagrunnlag

Erstatningen fra Samferdselsdepartementet etter flommen i 1995 var på totalt 43.8 million kroner. Skadene kom i alt vesentlig i to fylker, Oppland og Hedmark. Det er innhentet skadeestimat på både riks- og fylkesveier i disse to fylkene (tabell 9). Anslagene ble laget i 1995 umiddelbart etter flommen og er noe høyere enn den erstatningen som ble gitt. I denne rapporten blir estimatene heller enn de faktiske erstatningene lagt til grunn for de generaliserte skadefunksjonene. Dette er mest konsistent med framstilling av skade på andre sektorer.

Av totalbeløpet (65.1 million kroner) er det bare skadene på riksveiene (42.4 million kroner) som inngår i erstatningen fra Samferdselsdepartementet. De tilsvarende skader på fylkesveier (22 million kroner) blir kompensert via fylkeskommuner men er registrert av de respektive veikontor da ansvaret for vedlikehold ligger på Statens vegvesen. Skader på kommunale veier er ikke eksplisitt gitt, men inngår i den videre betegnelsen "Kommunale anlegg" sammen med annen kommunal infrastruktur.

I kostnadsfunksjonen er det valgt å se på riksveier og fylkesveier under ett. Det er ikke klart om den ene typen er mer kostbar enn den andre å reparere etter en flom. På den ene siden er det naturlig å forvente at riksveiene vil være mer utsatt for flom siden de er hovedårer mellom landsdelene og gjerne er lagt til de viktige dalførene langs med de store elvene. Til sammenligning er fylkes-veiene lokale forbindelser som ofte ligger lenger vekke fra elva og derfor utsettes i lavere grad for flomfare.

Et annet forhold trekker i motsatt retning. Riksveiene er riktignok i snitt mer kostbare å bygge, men de holder til gjengjeld en høyere standard slik at de er bedre egnet til å motstå erosjon og setning på grunn av flomvann. Fylkesveiene har svakere drenering og er dermed mer sårbare.

De indirekte kostnadene som er anført (10 million kroner), skyldes nødvendig utbedring på veier utenfor selve flomområdet på grunn av ekstra påkjenning mens E-6 var stengt. Trafikken gjennom Gudbrandsdalen måtte omdirigeres til alternative veier som ikke var dimensjonert for en slik belastning.

Det må tas hensyn til to størrelser ved etablering og bruk av skadefunksjoner, nemlig hvor lang strekning av veien som utsettes for skade i forbindelse med flom og hvor stor andel av denne veistrekningen der det faktisk oppstår skader. Den første vil kunne estimeres ut fra vassføringen og den tilhørende vannstand. Det kan antas at skade er mulig hvis vannstanden når opp i fyllingen under veidekket. Det er ikke funnet dekning i data fra 1995 til å nyansere dette ved å påvise en sammenheng med vannstand i forhold til veidekkets nivå.

Av en gitt veistrekning er det bare en del som er sårbar for flom, nemlig der hvor veien er plassert på elvebrinken. Selv om mange av hovedveiene går langs med elva, vil det normalt være stor variasjon i høyden over elveleiet og den horisontale avstanden vekk fra elva. I 1995 var det flere veistrekninger et stykke fra elva som ikke ble varig skadet selv om de ble satt under vann. Disse veiene kunne gjerne være midlertidig ubrukbare når de var mettet med vann men krevde ikke noen reparasjon etter at de tørket ut igjen.

Normalt vil det være lagt plastring ut mot elva for veier som ligger lavt nok og nær nok vannstrengen. Skade som oppstår der det finnes plastring kan være et resultat av to forhold, enten at plastringen er underdimensjonert eller at utførelsen ikke holder den rette standard overalt. Det har vist seg at et lokalt svakhetspunkt i beskyttelsen kan være tilstrekkelig til å danne kimen for skade over en lengre strekning.

Skaden på veiene skyldes enten setninger eller utvasking. Setninger skjer når grunnvannsnivået kommer høyt nok i opp veikroppen så som i bærelaget 20-30 cm under dekket. Setningene vil typisk nok forverres jo lenger veien står under vann.

5.4.2 Skadefunksjon

Som en forenkling blir den foreslåtte skadefunksjonen basert på følgende størrelser:

1. Skadeutsatt veistrekning.
   Dette er den veilengden der den maksimale vannstand når opp til veidekket. Denne lengde øker med

økende vannstand og vassføring. Den kan bestemmes fra kart eller en terrengmodell.

2. Statistisk forventet skade pr km av skadeutsatt vei. Dette er anslått til 0.36 million kr pr km, en forventningsverdi der det er inkorporert to sannsynligheter eller middelverdier. Den ene er den midlere andel av den utsatte veistrekning der det faktisk er oppstått skade som vil kreve reparasjon. Den andre er den midlere enhets-kostnaden som egentlig knytter seg til reparasjon av skadd veilengde.

Betingelsen for utvasking er at veien er i nærheten av elva slik at vannmassene har anledning til å grave ved høye nok hastigheter. Utvaskingen vil også være størst der det ikke er beskyttelse i form av plastring av skråningene eller der hvor det er en svakhet i plastringen. Den kombinerte effekten av disse to skademekanismene tilsier også at det vil være vanskelig å finne en god korrelasjon mellom skadeomfanget og vannstanden.

Det er usikre tall fra Oppland og Hedmark for flommen i 1995 med hensyn på lengden av den skadde veistrekningen i forhold til den flomutsatte der vannstanden i elva nådde opp til veidekket. Hvis den flomutsatte strekning i begge fylker er noenlunde lik, så vil den skadde andelen være omtrent 16%. Det må antas at denne sannsynligheten for skade er den samme uansett lokalitet. Denne antakelsen innebærer at graden av underdimensjonering eller mangelfull utførelse er uavhengig av hvor flommen finner sted og hvilken veistrekning som er berørt.

Selve kostnaden med å reparere skaden forutsettes å være proporsjonal med den skadde veilengden. Denne enhetskostnaden er i realiteten også en variabel på grunn av noe ulikt omfang av skade langs den samme veistrekningen. Veikontorene hadde i 1995 et første estimat med en fast enhetspris. Oppgavene fra Oppland for flommen i 1995 gir en gjennomsnittskostnad for reparasjon på 2.27 million kr pr km vei for den faktiske skaden.

Den foreslåtte forventningsverdien på 360 000 kr pr flomutsatt vei følger direkte fra tallene for Hedmark fylke. Det samme tallet framkommer ved å ta 16% av 2,27 million kr pr km for Oppland fylke, som er produktet av andel skadd vei og pris pr km skadd vei.

Denne enkle formelen har innebygd en stor usikkerhet som skyldes at skadene på vei egentlig ikke kan estimeres ved hjelp av den ene prediktoren, vassføring eventuelt vannstand i hovedvassdraget. Flere vesentlige tilfeller av skade oppsto i 1995 som en konsekvens av sideelver der vassføringen plutselig økte kraftig på grunn av lokalt store nedbørmengder. Dette førte til betydelige lokale skader der en vei har krysset sideelvene, til dels i forbindelse med bruer.

Naturlig nok var ikke sammenfallet av vassføring i sideelv og i hovedvassdrag i 1995 noen tilfeldighet, men det er likevel ikke mulig å gi en entydig sammenheng mellom de hydrauliske forhold i de to elvene. Eksempelvis, når det gjelder katastrofen på grunn av den lokale flommen i Moksa, vil ikke vassføring eller vannstand i Lågen være en god prediktor. Lignende tilfeller forekom flere steder i 1995 i begge de to dalførene. Det foreslåtte skade-nivået på 360 000 kr pr km er derfor basert på de totale skade-tall og inkluderer dermed skader på grunn av tilstanden i sideelver. Anvendt på en annen vassføring vil denne enkle kostnads-funksjonen innebærer at skadene som sideelvene volder antas å være proporsjonale med skadene som skyldes hovedvassdraget.

5.5 Jernbane

5.5.1 Datagrunnlag

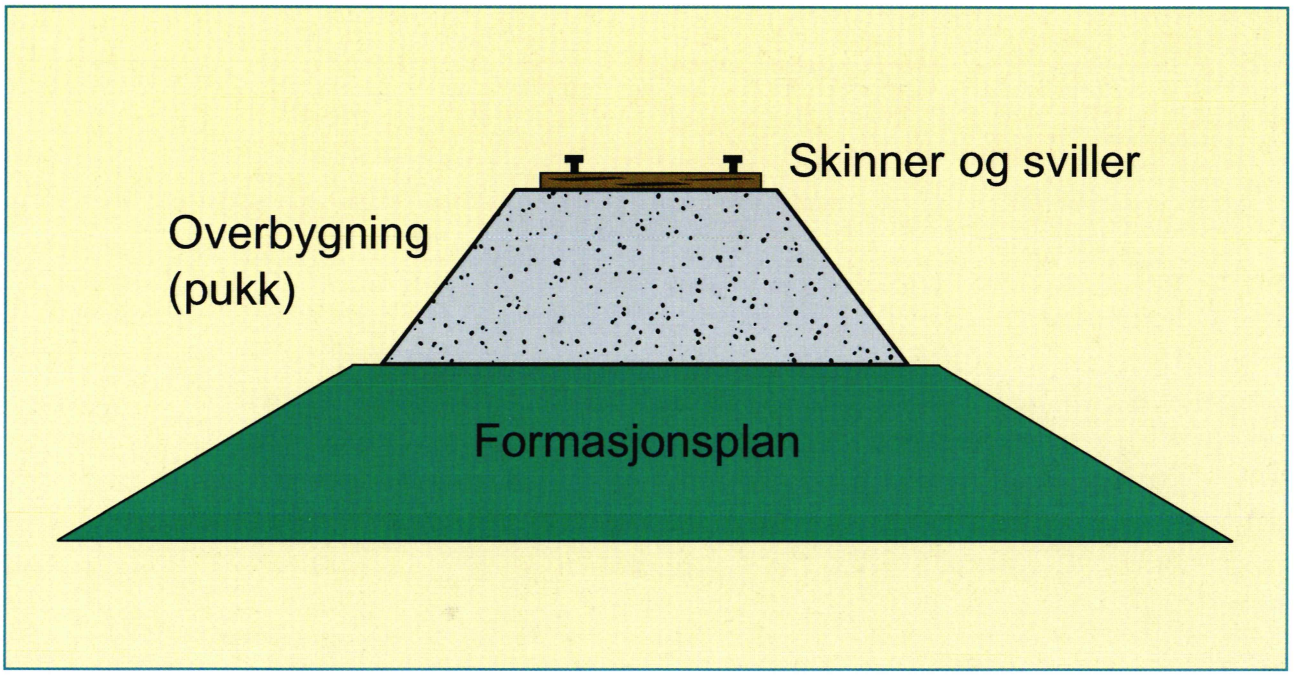
Jernbaneverkets rapporterte kostnader er forbundet med tiltak i etterkant av flommen. Erstatningen har vært for en nødvendig utbedring av banelegemet.

Overbygningen er den øverste delen av banelegemet og består av et lag med ballast, dvs pukk, som vanligvis er 0.5 meter tykt. Skinner og sviller ligger oppe på overbygningen. Ballasten i overbygningen må være drenerende, og Jernbaneverket stiller en del krav til kornstørrelse og sammensetning. Formasjonslaget er det nest øverste laget og dermed fundament for overbygningen (figur 18). Dreneringsgrøfter og stikkrenner er lagt i tilknytning til formasjonslaget.

I enhver flom vil vannstanden vis a vis jernbanelinjen variere, avhengig av hvor mye høyere traséen er enn elva. I 1995 har vannstanden enkelte steder nådd opp til toppen av overbygningen slik at både sviller og skinner er oversvømmet. Skadene og kostnadene de har medført har vært størst der hvor vannstanden har vært høyest og i kombinasjon med at vannet har stått høyt over en lenger periode.

Flommen i 1995 medførte på enkelte strekninger ubetydelige erosjonsskader der hvor vannstanden bare steg og sank uten at det var noen merkbare lokale vannhastigheter. Bane-legemet på slike strekninger ble ikke vasket ut. Utbedringen har dermed bestått av å bruke maskiner til pakking av underlaget for skinnene. I de tilfeller der vannet har stått over skinnegangen har det også vært nødvendig å rense pukklaget for slam.

Kostnadene som skyldtes flommen på Rørosbane Nord var 4.8 million kroner i 1995 og 5.6 million kroner i 1996. I et normalår uten flom vil det utføres vedlikehold med samme utstyr og framgangsmåte som beløper seg til 1.5 million kroner. Derfor vil merkostnadene som utelukkende skyldes flommen beløpe seg til anslagsvis 3.3



Figur 18 Skjematisk snitt gjennom jernbanetrasé.

Figure 18 Schematic cross section through railroad.

million kroner og 4.1 million kroner henholdsvis for 1995 og 1996.

Skaden vil relativt sett være omtrent den samme så lenge vannstanden ikke når opp i overbygningen. Utbedringen vil nemlig være begrenset så lenge det ikke har oppstått noen utgraving (erosjon). Den vesentligste kostnaden består i at pakkemaskinen kjøres for å reparere pukklaget. Dermed er flomskaden på jernbane lite følsom for flommer som har en vannstand mellom skinner og formasjonsplan. Tilsvarende kan skadene antas å være noenlunde konstante om maksimal flomvannstand er høyere enn stikkrennene som går gjennom formasjonsplanet.

5.5.2 Skadefunksjon

For jernbane er det derfor mulig å benytte en enkel funksjon som vil gi et estimat over skadene som vil bli voldt. Det er tilstrekkelig å forholde seg til vannstanden som en trappetrinnsfunksjon.

Hvis vannstanden er lavere enn det såkalt formasjonsplanet, vil det ikke oppstå noen skade. Hvis vannstanden kommer opp i formasjonsplanet men uten å være oppe i pukklaget, da vil det måtte påregnes at den eneste utbedring som kreves er opprensking av stikkrenner. Kostnadene på reparasjon anslås til kr 60 000 pr stikkrenne.

Hvis vannstanden kommer opp i overbygningen, da vil det være nødvendig etterpå å sørge for at pukklaget er forskriftsmessig pakket. Dette gjøres med en spesiell maskin som har en gitt kostnad pr skift og dermed pr km av jernbanesporet. Pakkmaskinen koster kr 40 000 pr skift. Den pakker omtrent 1500 m pr time, dvs 12 km pr skift. Gjennomsnittskostnaden for pakkemaskinen blir dermed kr 3 300 pr km.

Hvis vannet blir stående over svillene, da vil også varigheten på oversvømmelsen få en betydning. Denne tilstoppingen av pukklaget kan påregnes hvis det har stått under vann i et døgn eller mer. Da vil det avleire seg finstoffer i pukklaget som vil forhindre den nødvendige dreneringen vekk fra skinner og sviller gjennom overbygningen. I så fall kreves det at pukklaget renses i tillegg til at det pakkes. Dette er også en maskinell prosess der det kan regnes med en enhetskostnad på 2000 kr pr meter.

De totale flomkostnadene som kan forventes for jernbaneverket kan dermed estimeres på følgende måte:

1. For den banelengden der vannstanden når opp i formasjonsplanet: 30 000 kr pr km.

2. For den banelengden der vannstanden når opp over formasjonsplanet og inn i overbygningen (pukklaget) hvis det ikke forventes erosjon eller tilslamming: Minste tilleggskostnad på 45 000 kr pr km.

3. For den banelengden der vannstanden når opp over formasjonsplanet og inn i overbygningen (pukklaget) hvis det er fare for erosjon eller tilslamming: Maksimal tilleggskostnad på 250 000 kr pr km.

Estimatet over totale skader vil dermed avhenge sterkt av en vurdering av forløpet av en eventuell flom. Denne usikkerheten er dermed basert på de fysiske forhold som eksisterer på stedet og kan ikke bestemmes rent statistisk. Skadepotensialet er større der det er sideelver som kan forårsake utvasking av brukar og banelegeme samt av tilførsel av slam. Dette forbeholdet ble også påpekt i avsnittet ovenfor om skade på vei.

5.6 Flom- og erosjonssikringstiltak

5.6.1 Datagrunnlag

Oversikten over skade på anlegg som NVE har ansvaret for, er tatt fra en NVE-rapport (NVE 1996). Det er sett på tre typer av tiltak med hensyn på om de har fungert som forutsatt og om skader på tiltak har ført til skade på andre objekter. De konstruktive tiltakene er delt inn i tre typer:

- Forbygningsanlegg
  Elveskråning som er erosjonssikret for å hindre utgraving av elvekanten.
  Skadene på forbygningsanlegg står for henimot halvparten av de totale kostnadene.

- Flomverk
  Voll ved elvekanten for å beskytte et bestemt areal mot oversvømmelse.
  Skader på flomverk er mer enn 50% av det registrerte totalbeløpet.

- Senkningsanlegg
  Elveløp som er senket for å hindre oversvømmelse samt å bedre dreneringen, ofte bygget i forbindelse med flomverk.
  Senkningsanlegg er fåtallige, og skadebeløpet er også ubetydelig sammenlignet med de to andre kategoriene.

Disse tiltakene skiller seg fra andre skadeobjekter i at de er oppført i den hensikt å verne mot vannet og selv kunne motstå en spesifikk flomvassføring. Dimensjoneringskravene for de anleggene som ble berørt i 1995 har vært en flom med et gjentaksintervall på mellom 30 og 100 år, men det er ikke oppgitt hva som er den faktiske dimensjonerende flom for hvert enkelt anlegg. Flommen på Østlandet var flere steder høyere enn dimensjonerende flom. Dermed er det ikke mulig å generalisere skadetallene for å estimere skaden som ville ha oppstått for andre flomstørrelser.

Noen tiltak har fungert etter hensikten. De har vært utsatt for flommen uten at de har blitt skadet selv. I tillegg har disse funksjonsdyktige tiltakene også gitt det planlagte vern av de områdene og objektene som skulle beskyttes. Unntaket er flomverk som har blitt overtoppet men for øvrig er intakte.

Andre tiltak har ikke fungert som planlagt. Det har oppstått skade på selve konstruksjonen som har måttet bli reparert. Her er tiltakene sortert med hensyn på om det har vært skade på bakenforliggende områder eller om disse har vært skadefrie. I denne rapporten er skade på andre objekter inkludert i de andre kapitlene og tas ikke med i sammenheng med skade på sikringstiltak. For denne sektoren er det dokumentert hvilke kostnader som er gått til reparasjon og hvilke som er gått til vedlikehold. Utbedring av skade på selve anlegget er definert som reparasjon, mens opprenskning i elva anses som vedlikehold. Denne forskjellen er relevant for NVE i forbindelse med sitt ansvar for anleggene, men begge kostnadstyper er å regne som direkte skade i en mer overordnet sammenheng som HYDRA-prosjektet er. Tallene som presenteres her vil derfor være kombinasjonen av begge typer utlegg. Lignende data er ikke tilgjengelig for de andre skadetypene som inngår i denne rapporten.

Kostnadene for sikringstiltak mot flom og erosjon er sammenfattet i tabell 11.

Lengde på skadde flomverk og senkningsanlegg er tilgjengelig, men er ikke tatt med i analysen da funksjonsdyktigheten er tapt om bare en del av et slikt anlegg er skadd.

Skadeomfanget på de enkelte anlegg er trolig avhengig både av den lokale vannstand, vassføring, vannhastighet, og varighet på flommen. Dataene om kostnader gir derimot ingen mulighet for å spesifisere omfanget av skade som funksjon av disse hydrauliske variable. Tallene for gjennomsnittlige kostnader er dermed en første tilnærming.

Tabell 11 gir et grunnlag for å estimere skader på sikringstiltak, men bare ved den faktiske flom som forekom i 1995. Skadeomfanget vil ikke være proporsjonalt med vassføring eller vannstand fordi anleggene er dimensjonert for en viss flom. Forutsetningen ved bygging av anlegg er at de holder for vassføringer som ikke overskrider den dimensjonerende, og at de ikke forventes å tåle større vassføringer. I realiteten er det sannsynlig at noen anlegg er sterke nok til å stå imot en vassføring som er enda høyere, mens andre muligens ikke har holdt selv ved dimensjonerende. En første tilnærming i tråd med denne forutsetningen er at anlegget holder med 100% sannsynlighet opp til dimensjonerende flom, og tilsvarende at det mister sin funksjons-dyktighet med 100% sannsynlighet når vassføringen overskrider dimensjonerende flom.

Tabell 11 Skade på anlegg for flom- og erosjonssikring. Alle skader i millioner kr.

Tabell 11 Damage to flood protection works. All damages in mill NOK

	Forbygnings-anlegg	Flomverk	Senknings-anlegg	Totalt
Totalt antall anlegg/*Total number of affected works*	407	59	12	478
Total lengde av anlegg/*Total length of affected works (km)*	333	134	37	504
Antall skadde anlegg/*Number of damaged works*	80	33	3	116
Lengde av skadde anlegg/*Total length of damaged works (km)*	22			
Skadekostnader/ *Damage costs*	34	39	0.6	74
Skadeforekomst: andel av totalt antall/ *proportion damaged works (%)*	20	56	25	24
Skadeforekomst: andel av total lengde/ *proportion damaged length (%)*	7			
Gjennomsnittlig kostnad pr skade/*Average cost per damage*	0.43	1.18	0.20	0.64
Gjennomsnittlig kostnad pr km skadet lengde/ *Average cost per damaged km length*	1.55			

5.6.2 Skadefunksjon

I 1995 kan det antas at alle anlegg for flom- og erosjonssikring ble utsatt for en vassføring minst så stor som dimensjonerende flom, på grunn av at flommen hadde et gjentaksintervall på over 100 år. Denne enkle begrepsmodellen er det mulig å nyansere ved nærmere granskning av data fra 1995. Et utgangspunkt for en noe bedre estimering ville først være å finne en statistisk framstilling av den reelle motstands-evnen til anleggene. Resultatet må uttrykkes som en usikkerhet eller sannsynlighet for at anlegg vil bli skadd hvis de utsettes for en bestemt vassføring.

Framgangsmåten ved å estimere forventet flomskade i et vassdrag er dermed som følger:

1. Angi vassføringen som skal legges til grunn for estimatet.
2. Ved å sammenligne med den antatte vassføring finn den lengde av hver anleggs-type som utsettes for en flom minst så stor som dimensjonerende. Dette er de skadeutsatte lengdene.
3. Multipliser totallengden av skadeutsatte anlegg med sannsynlighetene for skade i % av lengde eller % av antall fra tabell 11 for å bestemme hvor stort omfanget av flomskade forventes å være.
4. Multipliser det forventede skadeomfanget med gjennomsnittskostnadene fra tabellen i kroner pr tilfelle eller pr km.

5.7 Skader på jordbruksareal

5.7.1 Datagrunnlag

5.7.1.1 Oppdeling i strekninger

Glomma mellom Kongsvinger og Alvdal er delt opp i 29 strekninger basert på de lokale fallforholdene i elva. Informasjonen er hentet fra NVEs digitale elvenivellement og digital midtlinje. Strekningene er vist i figur 19. Figuren viser vannlinjeprofilet for normal vannstand og kulminasjonsvannstanden under flommen i 1995.

5.7.1.2 Vanndyp

En forutsetning for beregning av vanndyp er et det foreligger detaljerte høydedata og data om arealbruken langs vassdraget. Detaljerte høydedata er her definert som høydedata som tilsvarer kvaliteten for detaljert høyde i FKB-data fra Statens kartverk. Det foreligger detaljerte terrengmodeller for seks ulike delstrekninger i Glomma. Flomdyp er beregnet kun for disse områdene fordi det landsdekkende høydegridet (se kap. 8.3.1) ikke antas å ha tilfredsstillende nøyaktighet.

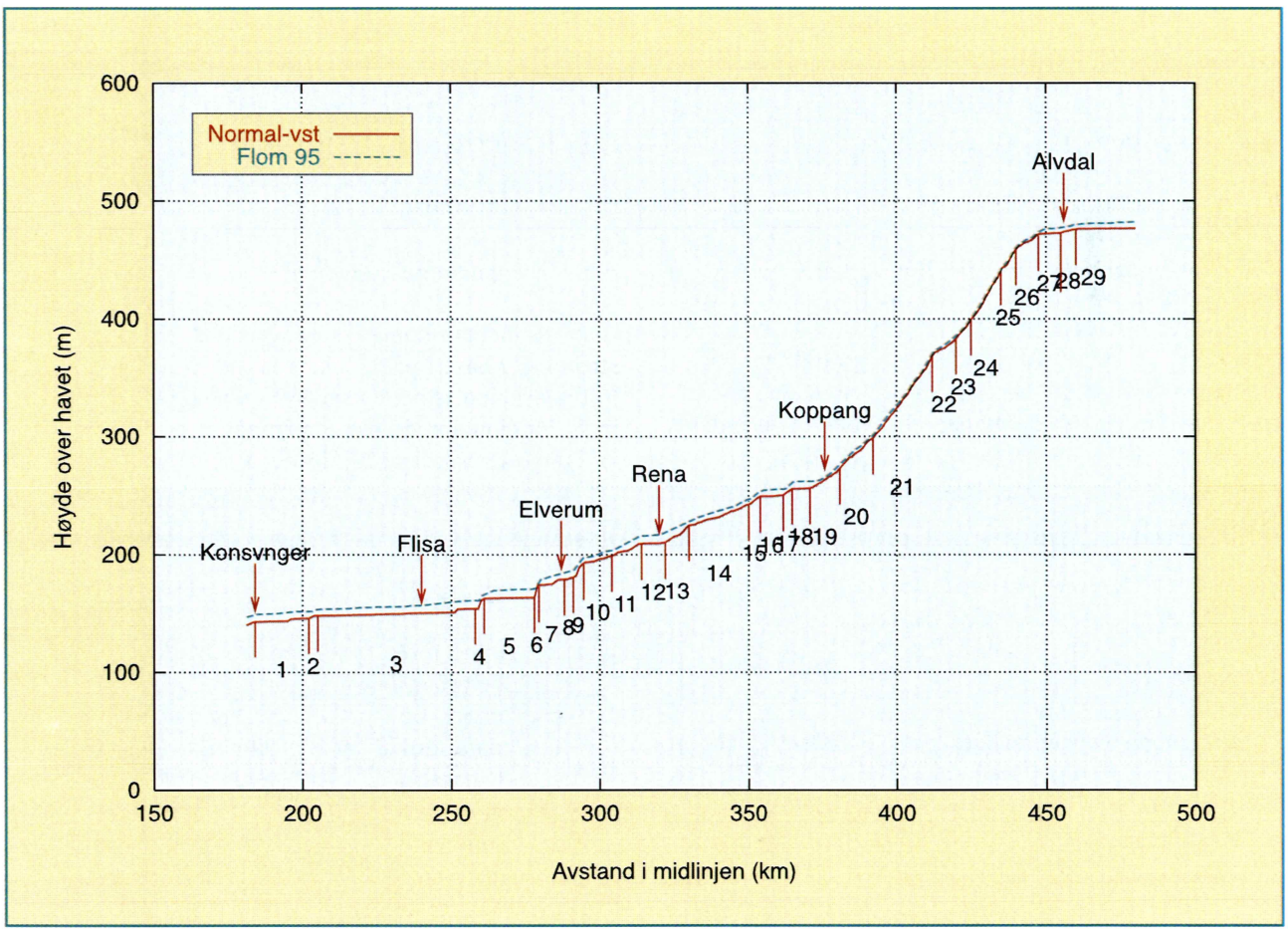
Flomdypet er beregnet ved å ta differansen mellom terrengmodellene og høyden fra flomgriddet. Flomgriddet er beregnet på bakgrunn av observerte flomvannstander

i 1995. Disse punktverdiene har blitt knyttet sammen ved å foreta en lineær interpolasjon mellom punktene. Deretter har det blitt generert en flate mellom punktene slik at dataene blir representert som et grid (se kapitlene 7 og 8). Usikkerheten i dette datasettet er først og fremst knyttet til at det noen steder er langt mellom observasjonspunktene. Et annet problem er et at det ofte kun er registrert punkthøyder ved foten eller toppen av dammer og fosser. Dette kan gi problemer når det skal interpoleres lineært mellom punktene. Feilen vil i stor grad avhenge av avstanden til nærmeste nedstrøms punkt og fallhøyden i elven på den aktuelle strekningen. På sikt kan det være aktuelt å legge inn denne informasjonen for å forbedre datasettet.

Etter at det har blitt generert en differanse mellom flomflaten og terrengmodellene, blir det beregnet gjennomsnittsverdi, maksimumsverdi og minimumsverdi for hvert enkelt polygon som er definert som jordbruksareal i digitale markslagskart (DMK) – det blir beregnet statistikk innenfor hvert enkelt jordbrukspolygon basert på differansen mellom flommen i 1995 og den detaljerte terrengmodellen som verdi. Disse egenskapene er fremstilt i tabell 2 i vedlegg A. På grunn av få observasjoner av kulminasjonsvannstanden under flommen på noen strekninger, har den lineære interpolasjonen gitt svært store dybder i noen områder og lav vannstand andre steder. Området like nord for Rena sentrum (strekning 13) og nedstrøms Strandfossen i Elverum (strekning 8) har fått beregnet midlere dybde på ca 5.5 m. I forhold til flomforløps-kurvene (figur 20) og opplysninger mottatt under befaring, er dette svært lite troverdig, og vannstandene er justert ned ca 2 m. I Messelt-området i Storelvdal (område 17) er middeldybden beregnet til knapt 1 m. Imidlertid ble det av grunneiere opplyst at vannet stod høyt over riksvegen under flommen, slik at dette ikke kan være riktig. Her er middeldypet for jordbruksarealet justert til 3 m.

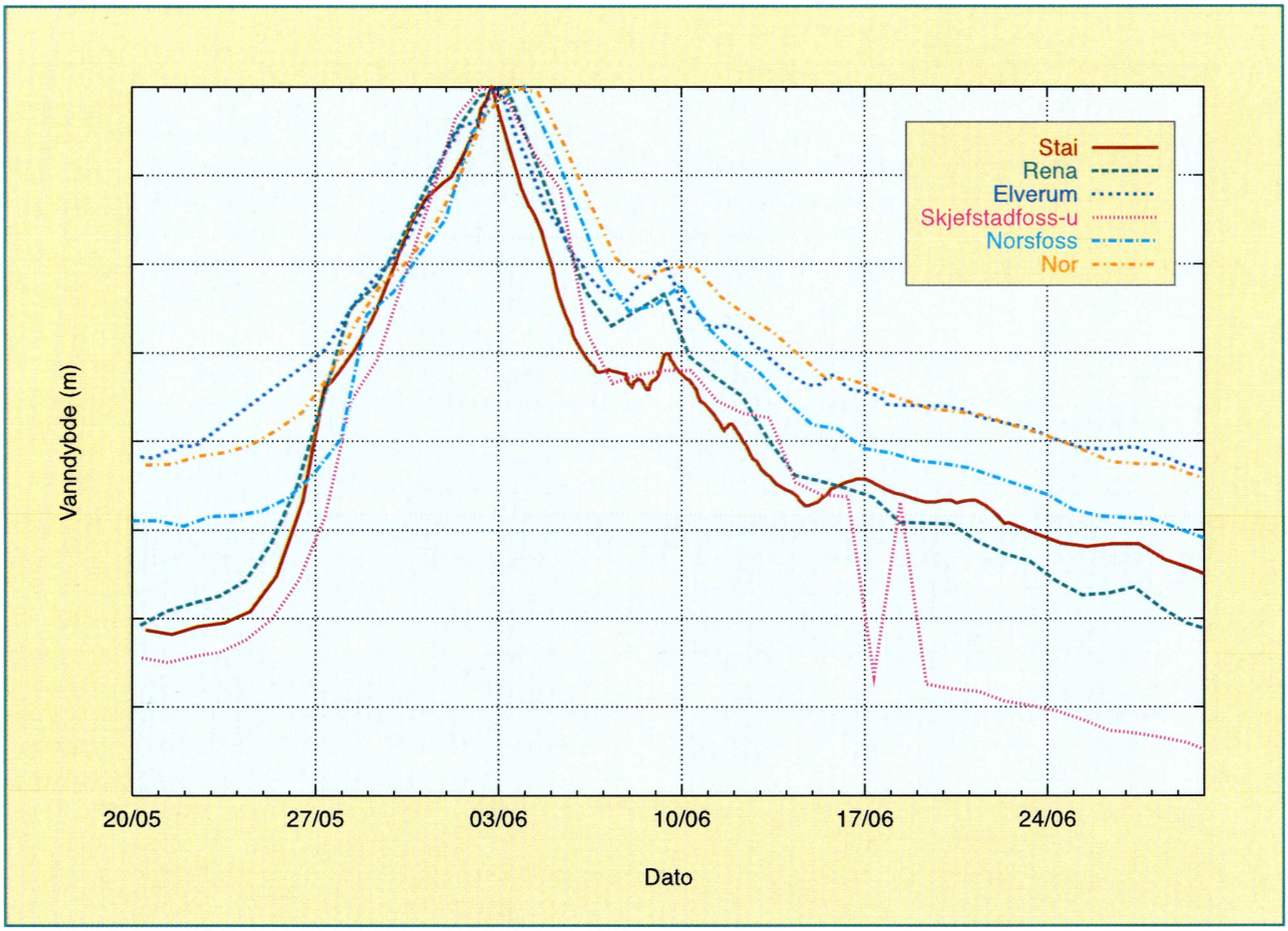
5.7.1.3 Jordbruksarealer

Det foreligger informasjon om jordbruksarealer fra DMK. Av de arealene som inngår i analysen er det bare de polygonene som har temakode fulldyrket, overflatedyrket jord og gjødslet beite som inngår. I forbindelse med flommen i 1995 ble utstrekningen av flommen digitalisert fra flybilder. Dette datasettet ble brukt til å avgrense analyseområdet. Ved å ta en "overlay" mellom dette datasettet og DMK, finner man hvilke landbruksarealer



Figur 19 Inndeling i elvestrekninger.

Figure 19 River reach segments



Figur 20 Forløp av flommen i 1995. Kulminasjonsvannstanden satt til 10 m

Figure 20 Flood hydrographs for the 1995 flood. Flood crest set to 10 m.

som var oversvømt i 1995. Fordelen ved å bruke dette datasettet er at det viser hvilke områder som faktisk var oversvømt. Differansen mellom mellom detaljert høyde og flomgridet viser bare hvilke områder som har en terrenghøyde om er lavere enn observert flomhøyde. Det betyr at differansegriddet ikke tar hensyn til hvilke områder som er beskyttet bak flomverk.

5.7.1.4 Andre data

Støtsider for vannstrømmen er en av hovedfaktorene for hvor skadene oppstår, i tillegg til fordeling av vegetasjonsbelter på elvebredden. Støtsideeffekten er karakterisert ved å måle elvestrekningene i 5 km luftlinjer og så dividere dette på avstanden i midtlinjen. Denne egenskapen er kalt svingfaktor. En faktor for fordeling av vegetasjonsbelter har det ikke lykkes å finne, hovedsakelig på grunn av at flybildedekningen utenom de skadede områdene er mangelfull, men også fordi effekten av denne fordelingen er så knyttet sammen med andre faktorer at den ville bli svært komplisert å tallfeste på en objektiv og reproduserbar måte. Tabell 1 i vedlegg A viser egenskapene til elvestrekningene.

5.7.1.5 Flomskadene

Tabell 3 og 4 i vedlegg A viser fordelingen av flomskadene på de enkelte elvestrekningene. Disse dataene er basert på en kombinasjon av åstedsbefaringer og analyser av flybilder. Skadene er beskrevet av Øygarden m.fl. (1996). Skadene på Øksna i Elverum er basert på beregninger vha av terrengmodell. Dataene over omfanget av vekkvasket matjord og sedimentasjon er betydelig mer usikker enn graveskadene. For det første var grunneierne raske til å utbedre sedimentasjonsskadene for å få etablert ny plantevekst. I tillegg hadde både flyfotografering og befaringer hovedfokus på graveskadene. Noen typiske skader er vist i figurene 21, 22 og 23.



Figur 21 Flomskade i Alvdal. Graving på innsiden av innkjørsel på jordet.

Figure 21 Flood damage in Alvdal. Erosion around entrance to field.

Foto: Fotonor.

5.7.2 Regresjonsanalyse

Regresjonsmodellene bygger på en antagelse om at det må være en sammenheng mellom skader, vannhastighet, varighet av oversvømmelse, egenskaper ved elvestrengen og det oversvømmede arealet. Skadebefaringene viste at punkt-skadene oppsto i spesielle eksponeringspunkter (støtsider og åpninger i vegetasjonsbelter) og ved turbulensframkallende terrengformasjoner (trær, steiner, eiendomsdeler o.l.). Skadene fikk her i hovedsak form av langstrakte groper (figur 22).

Vekkvasking av matjord må antas å ha en sterkere sammenheng med vannhastighet og tilstanden på jordoverflaten. Flommen kom på et tidspunkt da åkervekster som korn såvidt hadde spirt eller var i ferd med å spire. Den jordarbeidede delen av jorda hadde da liten fasthet og over store områder ble hele det jordarbeidete sjiktet ført bort. Arealer som kun var harvet mistet dermed mindre jord enn pløyde arealer. Der vannet klarte å slite hull på plogsålene oppstod alvorligere graveskader som erosjonsrenner (nye løp) der massene var spylt vekk ned til gammel elvebunn av stein. Nedstrøms graveskadene ble det gjerne avsatt store sanddyner, særlig i tilknytning til turbulensframkalte skader.



Figur 22 Flomskade på Rustad-området i Elverum. Graveskader framkalt av turbulens i eiendomsdeler.

Figur 22 Flood damage in the Rustad area in Elverum. Erosion caused by turbulence in fences.

Foto: Fotonor.

Skader knyttet til brudd i flomverk artet seg forskjellig avhengig av helningen på elva i området. I Solørområdet var det en kraftig graving i bruddstedet og store sandavsetninger innenfor. Her stoppet skadeutviklingen i hovedsak etter at arealet var fylt opp med vann. Fra Elverum og nordover, der helningen i elva er større, fortsatte imidlertid vannet å renne over arealene så lenge oversvømmelsen pågikk (figur 23).

Varighet av oversvømmelse ved Elverum er gitt i figur 24. Vannstandsaksen er gitt som lokal dybde ved *flomkulminasjon*. Det er også utført kurve-tilpasning. Tilsvarende varighetskurver er beregnet for fem andre punkt (Rena, Stai, Skjefstadfoss, Norsfoss og Nor) (Wathne, Eggestad & Skoglund 1999). Den midlere varigheten for oversvømmelsen på elveslettene er satt til 7 dager nord for Rena og 9 dager for resten. Det er satt et skille her pga utløpet av Rena-elva.

Regresjonanalysen er utført på data for vanndybde som er framkommet ved kombinasjon av terrengmodell (DTM) og flomlinje i tillegg til dataene i første punkt for de områdene hvor disse foreligger. Skadene målt i massevolum pr daa oversvømmet jordbruksareal er brukt som respons-variabel. Denne har da enheten *mm (m3/daa)*.

Skadeformen erosjonsrenner fikk i noen tilfeller et slik omfang at de nesten ble et nytt elveløp eller utvidelse av elveløpet.

Det er en del problemer med dataene på grunn av terreng-modellen. En god del av arealet innenfor oversvømmelsesområdet har fått beregnet negativ dybde. Disse er likevel tatt med i beregningen av arealfordelinger og vanndybder, siden utbredelsen av oversvømmelsene er generert fra andre kilder og ut fra den antakelse at feilene i dybde går like mye i begge retninger.



Figur 23 Flomskade på Øksna i Elverum. Brudd i flomverk med påfølgende vannstrøm over arealet under hele oversvømmelsen.

Figur 23 Flood damage at Øksna in Elverum. Caused by break of levee with sustained flow throughout the flooding event.

Foto: Fotonor.

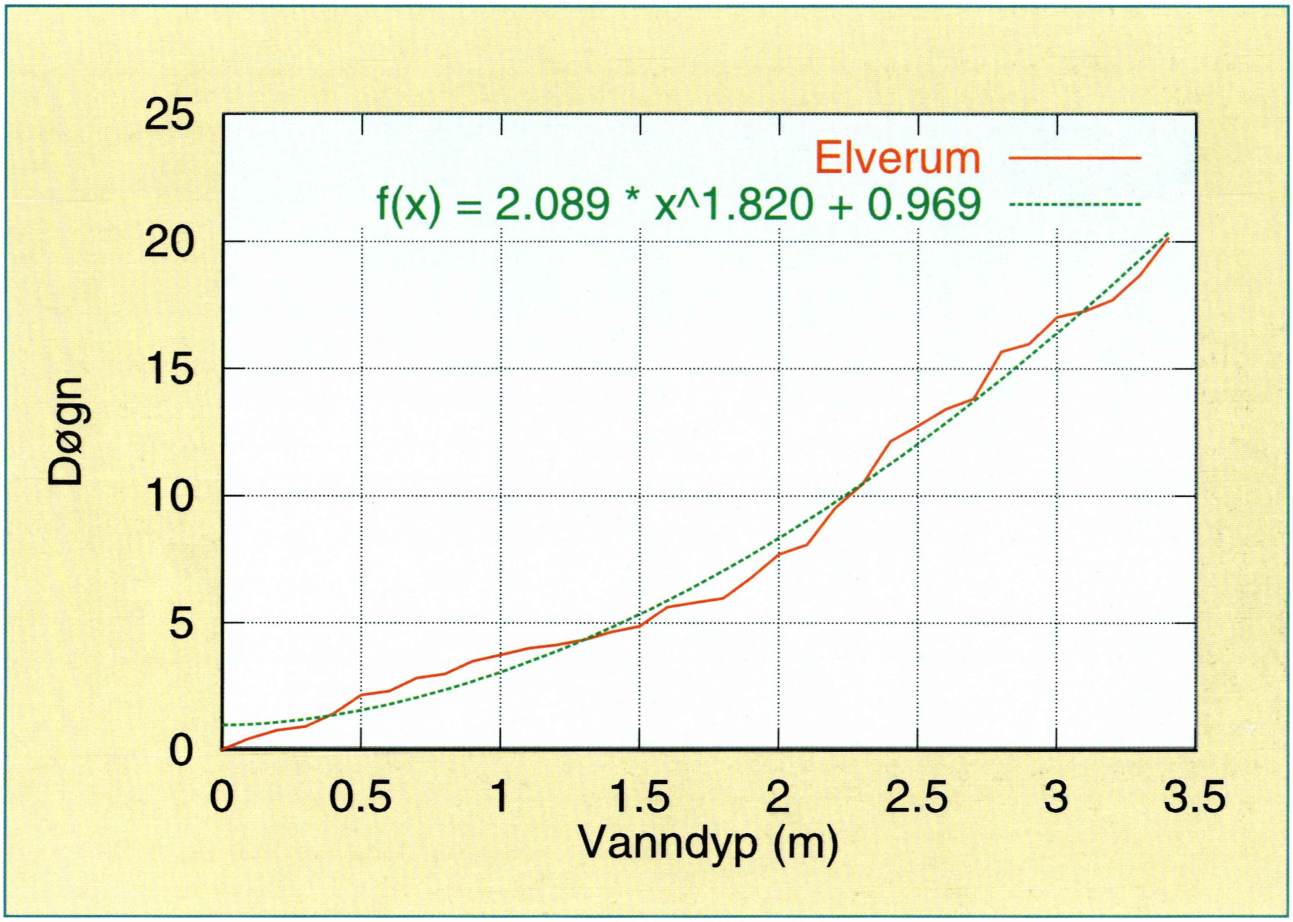
Regresjonsanalysene med responsvariablen *massevolum av skadene dividert på oversvømmet jordbruksareal* på elvestrekningene, viste seg å underestimere skadene på strekninger med store registrerte skader. Det antas at flomskadene er en kombinasjon av samspill-effekter og rene sum-effekter. Variablene er beskrevet i tabell 12.

Det er ikke gjort noe forsøk på å trekke inn variabler basert på jordart. Jorda består i hovedsak av flomavsetninger og variasjonen i tekstur vil med stor sannsynlighet ha mye mindre effekt på erodibiliteten enn andre forhold som arealenes dyrkingshistorie, jordarbeiding, vekstvalg og utviklingsstadiet til vekstene.

Tabell 12 Beskrivelse av parametre anvendt i analysen

Tabell 12 Parameteres used in regression analysis

M_g	Massetap ved graveskader/*Soil loss by point erosion (m3)*
M_v	Massetap ved vekkvasket matjord/*Top soil loss by sheet erosion (m3)*
M_{tot}	Totalt massetap/*Total soil loss (m3)*
M_s	Sedimentert materiale/*Sedimented mass (m3)*
A_{tot}	Totalt oversvømmet areal/*Total inundated area (daa)*
A_j	Oversvømmet jordbruksareal/*Inundated cultivated area (daa)*
A_a	Oversvømmet åpen åkerareal/*Inundated open tilled field (daa)*
A_{flv}	Areal beskyttet av flomvern/*Area behind levees (daa)*
L	Lengde av elvestrekningen/*Length of river reach (km)*
I_n	Helningen i elva/*River gradient (10-3)*
J	Hydraulisk radius. Tverrsnitt av vannstrømmen (A) dividert på den våte omkrets (P), beregnet som Atot/L for hver elvestrekning/*Hydraulic radius (m)*
H_o	Midlere vanndyp på oversvømmet areal/*Average inundated area (m)*



Figur 24 Oversvømmelsens varighet ved Elverum, som funksjon av vanndyp ved flomkulminasjon.

Figure 24 Duration of inundation at Elverum, as function of local water depth at flom crest.

5.7.2.1 Graveskader

Figur 25 viser estimerte verdier mot observerte for regresjonene. Ligningene er:

$$\sqrt{M_g / A_j} = 1.12 J^{2/3} \sqrt{I_n} - 1.65 \qquad (5.1)$$

5.7.2.2 Vekkvasket matjord

Regresjonsanalysen av vekkvasket matjord ga et tilsvarende resultat:

$$(M_v / A_j)^{3/4} = 2.09 J^{2/3} \sqrt{I_n} - 3.56 \qquad (5.2)$$

5.7.2.3 Sedimentasjon

Elvestrekning 17 er holdt utenfor analysen pga at det her er registrert svært store avsetninger, mye mer enn volumet som er registrert gravd ut. Dette kan være en feilregistrering, eller det kan være en effekt av lmsa som munner ut like ovenfor. Forhold ved sidevassdrag er ikke inkludert i analysene.

For sedimenterte masser er det bare omfanget av graveskadene som er signifikant. Sandavsetningene tilsvarer ca 1/3 av graveskadene i volum. Avsetningene er nok noe større i skogspartier enn på åpne jorbruksarealer.

Regresjonsligningene er:

$$M_s / A_j = 0.281 M_g / A_j + 2.91 \qquad (5.3)$$

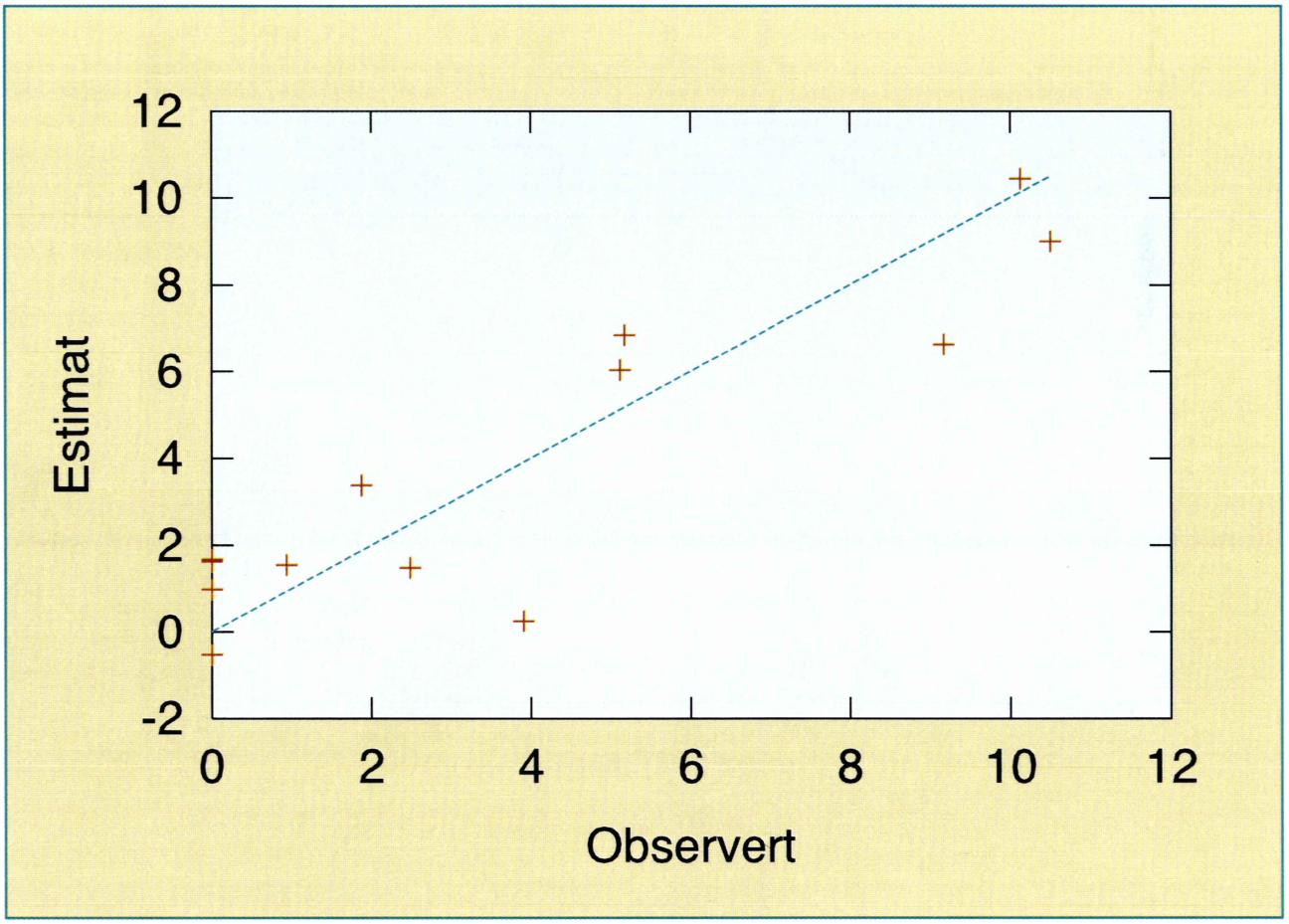
5.7.2.4 Brudd i flomverk

For graveskader som oppstod ved brudd i flomverk er det bare funnet en signifikant variabel volumet av bassenget som ble fylt opp. Se figur 26. Skadene her refererer seg til de som er oppstått på arealene som tilstøter flomverket og ikke skader på selve flomverket.

$$M_g = 3.33 \cdot 10^5 (A_{flv} H_o)^{0.16} - 884000 \qquad (5.4)$$

5.7.2.5 Avlingsskader

Avlingskader kan deles i to grupper:



Figur 25 Graveskader, estimert og observert jordtap.

Figure 25 Eroded mass, estimated and observed loss (m3/daa)

- Avlingsskader i skadeåret og manglende avling inntil arealet er utbedret

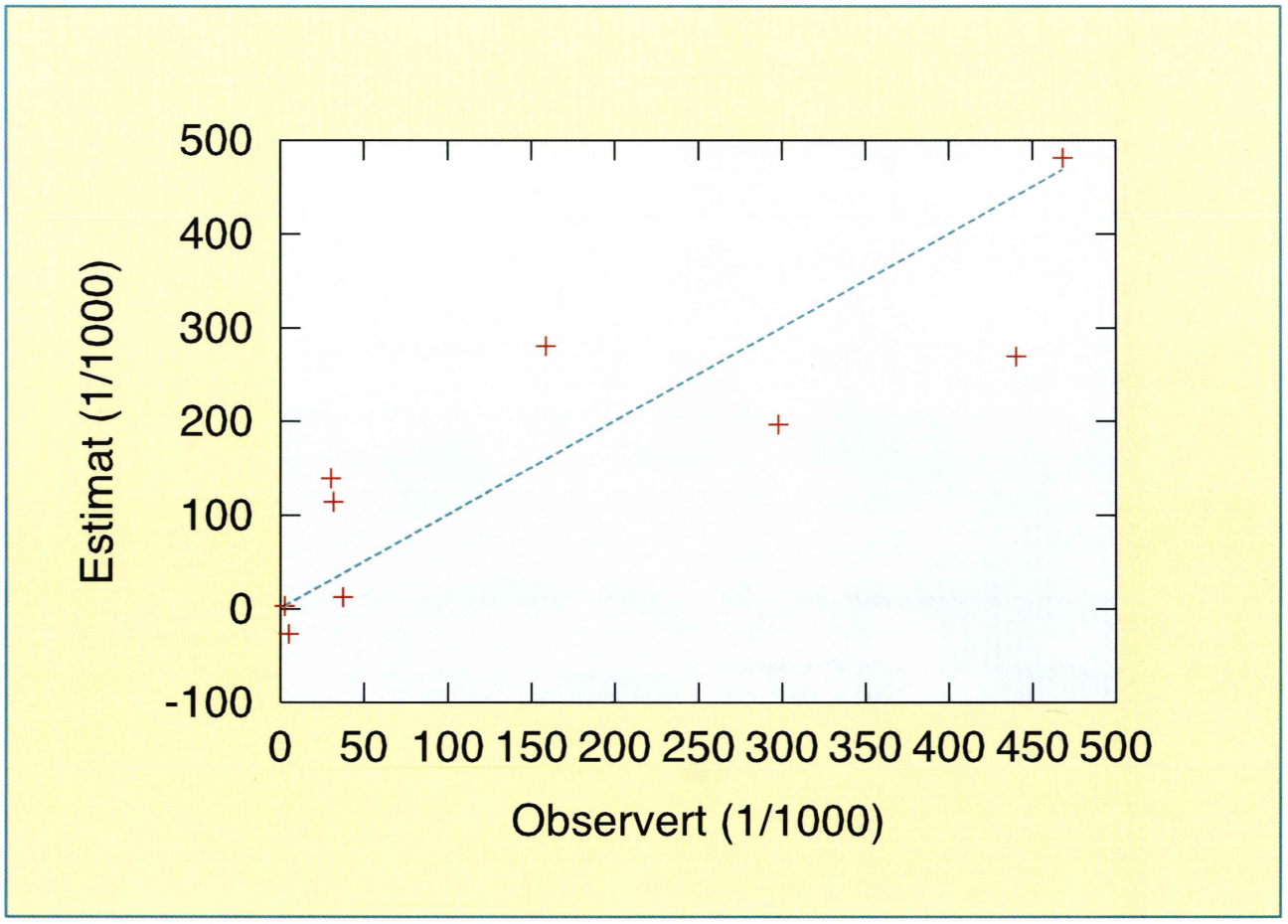
- Avlingsreduksjoner i kommende år som følge av redusert jordkvalitet

Avlingsskader i skadeåret knytter seg i hovedsak til drukning av planteveksten og på engarealer også forringelse av fôrkvaliteten. Ifølge avlingsregistreringer på oversvømmede arealer etter flommen i 1995 (Stabbetorp & Hiitola 1995), varierte skadene mye, men det var ikke noe entydig mønster mellom antall dager oversvømmelse og avlingsreduksjon. Hvor langt veksten var kommet i utviklingen og om det var strømmende eller stillestående vann så ut til å være av betydning. Men det er stor forskjell mellom vekstene, korn hadde på noen arealer klart seg relativt bra med en oversvømmelse på opptil 8-9 dager, mens potet tåler langt mindre (stor utgang etter 1-2 dager oversvømmelse. Eng vokste som normalt igjen etter oversvømmelsene, og andre slått ble relativt bra. Tilleggsgjødsling med nitrogen ga i de fleste tilfeller tydelig positiv effekt på avlingene.

Avlingsregistreringer utført av Jordforsk viste store avlingsreduksjoner på hvete-arealer i Solør, ca 40% ved 4-5 dager oversvømmelse, og ca 35% ved 1-2 dager oversvømmelse.

Arealene med vekkvasket matjord må få gjenoppbygget innholdet av organisk materiale før de er tilbake på opprinnelig avlingsnivå. Jordprøver tatt i Øksna-området antyder et organisk innhold på rundt halvparten av innholdet i uskadet jord. Det tar imidlertid lang tid å bygge opp igjen moldinnholdet dersom det ikke dyrkes en flerårig vekst en periode. Selv da kan det ta 10-20 år og kanskje ennå lenger tid før moldinnholdet er tilbake på nivået før flommen. En grunneier i Storelvdal som fikk store sandavsetninger i en tidligere flom, hevder at det var synlige forskjeller på veksten iallfall i 20 år etterpå, og det var på eng med stor dosering av husdyrgjødsel. Nå er nok situasjonen på arealer med vekkvasket matjord betydelig bedre enn på slike sandavsetninger.

De langsiktige skadene på arealer med graveskader avhenger i stor grad av utbedringsmåten. Dersom ifylte masser har tilsvarende kvalitet som massene som forsvant blir avlingseffektene her noenlunde tilsvarende som arealer med vekkvasket matjord. Imidlertid ble de fleste graveskadene ifylt med tilgjengelige masser som flommen etterlot. Disse massene er i stor grad utvasket



Figur 26 Graveskader ved brudd i flomverk, estimert og observert jordtap

Figure 26 Eroded mass after levee break, estimated and observed loss (m3/daa)

for finstoff. I tillegg måtte disse massene i de fleste tilfeller suppleres med masser fra utmark. For sentrale deler av Østerdalen bestod disse massene for det meste av glasiofluviale avsetninger med lite finstoff. I Nordøsterdal derimot lykkes det for mange å få tak i bresjøavsetninger av bra kvalitet, men transporten ble for noen relativt lang. Utbedringsmassene vil ha stor betydning for plantenes vannhusholdning (lagringsevne og kapillærtransport) og muligheter for å komme seg opp igjen på avlingsnivået før flommen. Det er også av stor betydning særlig for de første årene, hva som gjøres av eventuell jordforbedring i topplaget (innblanding av mold, torv, kloakkslam, grønngjødsling o.l)

Noen grunneiere som har fått et par år med dyrking på slike utbedrede arealer antyder at avlingene i 1997, som var et relativt tørt år, lå på ca 50-60 % av det de ville kunne forvente uten skader, og at avlingene i 1998 med svært god nedbørfordeling kanskje lå ca 10-20 % under. Skadede arealer vil være uegnet for potetdyrking noen år.

Estimering av skadeomfang etter flom på plantevekst forutsetter funksjoner for hvor store arealer som fikk de ulike skadene. Ligningene nedenfor viser resultatene av tilsvarende regresjonsanalyse som for tap av jord, med areal som responsvariabel:

Graveskadet areal A_{gs}:

$$\sqrt{A_{gs}/A_j} = 0.0253J^{2/3}\sqrt{I_n} + 0.39A_j/A_{tot} - 0.000256A_j/L - 0.203 \quad (5.5)$$

Areal med vekkvasket matjord A_{vs}:

$$(A_{vs}/A_j)^{3/4} = 0.0465J^{2/3}\sqrt{I_n} - 0.0677 \quad (5.6)$$

Areal med sedimentasjon A_{ss}:

$$A_{ss}/A_j = 3.95A_{gs}/A_j + 0.0323 \quad (5.7)$$

5.7.3 Skadefunksjoner

5.7.3.1 Jordtap

Basert på regresjonsanalysene er det satt opp tre skadefunksjoner for risikoen for massetap, en for et turbulensframkalt massetap (graveskader), en for vekkvasking av matjord og en for graveskader ved brudd i flomverk.

Viktige momenter for risikoen for graveskader og vekkvasking av matjord, har det ikke vært mulig å trekke inn i analysene av skadeomfanget etter flommen i 1995. Dette gjelder i første rekke vekstvalg og arealtilstand. Selv i områder med mye engdyrking, har omfanget av åkervekster i de mest utsatte områdene langs elva vært stort. Tilgang på vatningsvann, maskintekniske og agronomiske hensyn tilsier at grunneierne dyrker åkervekster nær elva eller på elveslettene generelt. I områder hvor eng dominerer i et belte langs elva bør risikoen for graveskader på eng og åker beregnes hver for seg. Basert på faktorer i den universelle jordtapsligningen (Wischmeier & Smith 1978) kan en sannsynlig korreksjonsfaktor for engarealet være ca 5%.

Ved beregning av risikoen for vekkvasking av matjord bør i hvert fall arealet splittes i eng og åker, selv om regresjonsanalysene ikke ga signifikans for en slik variabel. Basert på (Wischmeier & Smith 1978) kan en slik korreksjonsfaktor for eng settes til ca 3%. Det samme gjelder dersom en betydelig andel av åkerarealet ikke blir pløyd. Ved kun harving kan korreksjonsfaktoren settes til 50 % (ca halvt pløyedyp), men for direktesåing er det noe mer usikkert. Fremdeles ifølge (Wischmeier & Smith 1978) kan 20% være en rimelig korreksjonsfaktor.

Risiko for graveskader på en elvestrekning er:

$$S_{mg} = f_v\left[1.06F(v,t) + 17.0A_j/A_{tot} - 0.0108A_j/L - 8.91\right]^2 \quad (5.8)$$

der $S_{mg} = M_g/A_j$ *(m³/daa)*, f_v er en faktor for vekstvalg. F(v,t) er en variabel som uttrykker den akkumulerte erosjonsfaren i området. Verdien er generert ved å integrere vannhastigheten i løpet av oversvømmelsestiden:

Risiko for vekkvasking av matjord på en elvestrekning:

$$S_{mv} = f_{vj}\left[2.09F(v,t) - 3.56\right]^{4/3} \quad 5.9)$$

der $S_{mv} = M_v/A_j$ *(m³/daa) og* f_{vj} en faktor for arealtilstanden (vekststadium, jordarbeiding).

5.7.3.2 Sedimentasjon

Risiko for sedimentasjon på en elvestrekning:

$$S_{ms} = 0.281S_{mg} + 2.91 \quad (5.10)$$

hvor $S_{ms} = M_s/A_j$ *(m³/daa)*

5.7.3.3 Brudd i flomverk

Risiko for graving ved brudd i flomverk:

$$S_{fv} = 3.33 \cdot 10^5 (A_{flv}H_o)^{0.16} - 884000 \quad (5.11)$$

der $S_{fv} = M_g$ *(m³)*. Dette er en funksjon pr område som er beskyttet av flomverk, og gjelder for gravingen som skjer idet bruddet oppstår og arealet fylles opp uten at vannstrømmen renner over arealet under resten av oversvømmelsesperioden. I slike tilfeller må det beregnes en tilleggsrisiko. I områder hvor vannet ikke strømmer over arealet vil sedimentasjonsskadene i volum tilsvare graveskaden.

5.7.3.4 Avlingstap

Effektene av flomskader på avlinger er relativt kompliserte. Det finnes et utall av kombinasjoner av utbedringsmåter, og mulige jordforbedringstiltak, vekstvalg og dyrkingsteknikker for gjøre det beste ut av situasjonen. Men det foreligger lite av forsøk og registreringer av slike ulike kombinasjoner som baserer seg på en tilsvarende situasjon. Estimering av skadefunksjoner for jordbruksproduksjonen blir i beste fall bli et grovt og svært forenklet skjønn.

På engarealer synes det som om skadene består i vekststans i oversvømmelsestiden pluss forringelse av fôrkvalitet. For korn er det noe mer komplisert, noen sådde i nytt, korn eller annen vekst, mens andre fikk små til store avlingsreduksjoner. På potetarealer måtte det for det meste settes på nytt eller isåes med en annen vekst. Når det gjelder de langsiktige effektene, antas avlingsnivået på arealene med vekkvasket matjord å være 80% av normalen i de første årene og at arealene er tilbake på opprinnelig nivå i løpet av 20 år. På arealer med graveskader forutsettes det at de anvendte utbedringsmetodene i middel betyr ca 40% avlingsreduksjon de første årene og at avlingene er oppe på et nivå tilsvarende 85% av sitt førflomivå i løpet av 30 år. I tillegg har det på flere av de større skadene gått to-tre år før arealene var istandsatt. Det er ikke utenkelig er dette er i overkant optimistisk når sandavsetningene brukes som fyllmassene i gropene, supplert med glacifluviale avsetninger på arealer som opprinnelig bestod av sandig silt eller siltig finsand. Noen steder er det imidlertid foretatt massebytte med tilgrensende areal slik at det er lagt på et ca 0.5 m sjikt på toppen. I slike tilfeller burde det være mulig å komme opp i 90-95 % av opprinnelig avlingsnivå.

Ligningene for risikoen for skadet areal av de ulike skadetypene er:

Areal med graveskader $S_{ag} = A_{gs}/A_j$:

$$S_{ag} = \left[0.0253F(v,t) + 0.39A_j / A_{tot} - 0.000256A_j / L - 0.203\right]^2 \quad (5.12)$$

Areal med vekkvasket matjord: $S_{av} = A_{vs}/A_j$:

$$S_{av} = \left[0.0465F(v,t) - 0.0677\right]^{4/3} \quad (5.13)$$

Areal med sedimentasjon: $S_{as} = A_{ss}/A_j$:

$$S_{as} = 3.95A_{gs} / A_j + 0.0323 \quad (5.14)$$

5.7.4 Kostnader

Svært forenklet og skjønnsmessig kan det settes opp ligninger for kostnader for de enkelte skadetypene for flommen i 1995. Masseprisene er basert på noen grunneieres kostnader ved utbedringer. Disse er entreprenørpriser for vinterarbeid.

Noen arealer ble klassifisert som totalskadet ved skjønnet og taksten beregnet på grunnlag av bruksverdien av arealene. Det viser seg imidlertid at grunneierne også utbedrer slike skader dersom de arronderingsmessig ligger godt til. Alle skadene som dette arbeidet bygger på er reparert. Kostnadsberegningene her er derfor basert på utbedring av alle skadene.

For sedimentasjons-masser forutsettes det at ca 20% har blitt avsatt i en slik avstand at de kan brukes til å fylle i graveskadene. Resten må lesses opp og kjøres vekk. Sedimentasjonsmasser fylles i graveskadene, $k_s \approx 10$ kr/m³.

$$K_s = 0.2\ M_s\ k_s$$

Sedimentasjonsmasser transporteres vekk, $k_t \approx 20$ kr/m³.

$$K_{ts} = 0.8\ M_s\ k_t$$

Graveskadene suppleres med tilkjørte masser, $k_g \approx 25$ kr/m³

$$K_g = (M_g - 0.2\ M_s)\ k_g$$

Tilkjøring av jordforbedring, 5 cm (50 m³/daa), $k_f \approx 50$ kr/m³

$$K_f = 50\ A_{gs}\ k_f$$

Avlingssvikt på oversvømmet areal (inklusive arealer med vekkvasket matjord) er kun basert på korn. Det er noe bedre pris pr fôrenhet på eng, men samtidig er avlingsreduksjonen mindre. Det forutsettes her kornpris $p_k \approx 1.60$ kr/kg, forventet avling $y_k \approx 500$ kg/daa og midlere avlingssvikt $y_0 \approx 50$ %:

$$K_{y0} = (A_j - A_{gs})\ y_k\ y_0\ p_k$$

Avlingssvikt på areal med vekkvasket matjord, år 1-20:

$$K_{yv} = A_{vs}\ y_k\ p_k\ (20 \cdot 0.2/2)$$

Avlingssvikt på areal med graveskader (2 år uten avlinger, kapitalisering med 5% rentefot, avlingspotensial 85% av opprinnelig avlingsnivå oppnås etter 30 år):

$$K_{yg} = A_{gs}\ y_k\ p_k\ [2+30 \cdot (0.4+0.15)/2+0.15/0.05]$$

Ved multiplikasjon av ligningene ovenfor mot hele området framkommer totalbeløp for skade som gjengitt i tabell 13.

Tabell 13 Estimerte skadekomponenter ved jordtap

Tabell 13 Estimated damage soil loss components

Komponent *Component*	Skade *Damage kNOK*
K_s	1 574
K_{ts}	12 595
K_g	23 269
K_f	1 465
K_{y0}	17 269
K_{yv}	3 088
K_{yg}	6 212
Sum	65 472

Dette gir en liten indikasjon på kostnadene, men det må presiseres at arealgrunnlaget for området er mangelfullt og at det er skader som ikke registrert. Kostnader knyttet til punktskader som veger, gjerder, rydding av rask o.s.v. er ikke behandlet i dette arbeidet i det hele tatt.

5.8 Avsluttende kommentarer

5.8.1 Skadekomponenter som ikke er dekket av denne analysen

Ved en sammenligning med tabell 3 er det følgende poster (i million kroner) som ikke omfattes av kostnadsfunksjonene i denne rapporten, når det tas hensyn til skader på jordbruk:

Bygg, museer, skole	31
Kommunale og fylkeskommunale anlegg	65
Avbruddsforsikring	100
NSB inntektstap	54
Strakstiltak: Beredskap, opprydding, forbygging	313
Egenandel privat sektor	100

Til sammen blir dette 663 million kroner. Med andre ord vil 37% av det totale estimatet på 1816 million kroner falle utenom kostnadsfunksjonene.

5.8.2 De viktigste prediktorene

Den viktigste fysiske prediktor er vannstanden. Egentlig er det den relative vannstand som er vesentlig, dvs vannstanden i forhold til de objektene som kan utsettes for skade. Erosjon og utgraving er en følge av vannhastigheten og oversvømmelsens varighet. Denne er i første rekke en funksjon av vannføringen, slik at en større vannføring vil gi en større midlere hastighet i elva. Det er likevel de lokale hastighetene som forårsaker graving. Når det gjelder boliger og infrastruktur synes det ikke å være en klar sammenheng mellom oversvømmelsens varighet og skade.

Klima og værforhold kan ha en betydning spesielt for skade på jordbruk. To viktige variable er årstid og temperatur. Analysen over kan derfor ikke uten videre antas å gjelde for flommer som inntreffer til andre årstider. For øvrig vil sesongbetonte variable så som klima og vær bare ha mindre betydning for de skadetypene som denne rapporten omfatter.

5.8.3 Feilkilder

Det er en rekke feilkilder som kan ha bidratt til unøyaktighet i kostnadsfunksjonene:

- Størrelse og homogenitet på statistisk utvalg
  Dataene for bygninger gir en større sikkerhet for numerisk analyse i og med at utvalget er så stort. Bare i Åsnes kommune var det 86 boliger. Selve bygningene, skade-forholdene og utbedring av skadene er trolig mer standardiserte enn tilsvarende er for offentlige anlegg. I tillegg er utvalget av offentlige anlegg også tallmessig mindre.

- Usikkerhet i estimering av kostnader
  En del av datagrunnlaget er fra de opprinnelige estimatene som ble laget av offentlige etater umiddelbart etter flommen i 1995 for å melde inn ressursbehov til Regjeringen. Disse estimatene har den fordel at de er detaljerte med hensyn på de fysiske skadene som det er sikret en god oversikt over. De tilhørende estimatene av kostnadene derimot er basert på erfaringsgrunnlag og den usikkerhet dette innebærer.

- Inkonsekvens med hensyn på definisjon av skader
  I denne rapporten er det lagt vekt på direkte skader i tråd med forutsetningene som er nevnt i avsnitt 2.1. Enkelte av de etater og organisasjoner som er blitt skade-lidende på grunn av flommen, ser også på indirekte kostnader som like reelle utgifter i sine regnskap etter flommen. Det har ikke vært mulig å utelukke at noen av de kostnadsdata fra den offentlige sektor som er benyttet også inkluderer indirekte kostnader. For den private sektor ligger det ingen mulighet til å få erstattet indirekte tap, så det finnes heller ingen data om det.

- Forenkling av årsaksforhold
  Skader på infrastruktur særlig i Gudbrandsdalen viste at strømningsforholdene i Lågen alene ikke er tilstrekkelig som prediktor av flomskade. Vesentlige skader oppsto på grunn av sideelver som forårsaket store utvaskinger ved kryssing av vei og jernbane. Disse tallene ligger inne i datagrunnlaget slik at kostnadene vil være overestimert i forhold til vassføring eller vannstand i selve hovedelva.

- Senvirkninger av skader
  Enkelte skader på konstruksjoner viser seg ikke før en tid etter flomepisoden. Dette gjelder eksempelvis setninger i fundamenter. Slike senvirkninger har som regel ikke vært inkludert i de opprinnelige estimatene og er kanskje til og med ikke tatt med i de endelige kostnadsoversikter som etatene har over flomskadene.

- Usikkerhet i registrering av vannstand
  Den relative vannstanden har vært svært nøye angitt for hver bygning som har hatt flomskade. Dermed er sammenhengen mellom skadekostnad og den hydrologiske prediktor etablert langt sikrere enn for de andre sektorene. Det mangler en tilsvarende nøyaktig registrering av vannstanden i forhold til hvert enkelt av de offentlige anlegg som inngår i datagrunnlaget. Dette kan måles inn i ettertid, men en slik oppgave har ligget utenfor rammene av dette prosjektet.

6. Flomfrekvensanalyse

6.1 Regional analyse

6.1.1 Grunnleggende begreper

Sannsynligheten for å overskride en gitt vannstand z er:

$$P(Z>z)=1-P(Z\leq z)=1-F_z(z) \qquad (6.1)$$

Dette nivået tilsvarer en spesiell vassføring q som bestemmes ved hjelp av vassføringskurven $g(z)$:

$$q=g(z) \leftrightarrow z=g^{-1}(q) \qquad (6.2)$$

Sannsynligheten for overskridelse av tilhørende verdier av q og z er selvfølgelig identiske, dvs:

$$P(Z>z)=P(Q>q) \leftrightarrow F_z(z)=F_q(q) \qquad (6.3)$$

6.1.2 En regional flomfrekvenskurve for Glomma

I Norge er det flere studier av flomfrekvens bestemt ved så kalte regionale vekstkurver (Wingård m.fl. 1978; Tveito 1993; Sælthun m.fl. 1997) Etablering av disse regionale flomfrekvenskurvene er basert på indeksflom-antagelsen (Dalrymple 1960). Framgangsmåten er todelt. Den første delen går ut på å finne en dimensjonsløs frekvenskurve som representerer flomraten for ulike frekvenser i forhold til en indeksflom (f.eks. midlere års flom). Den andre delen er å finne sammenhengen mellom felt karakteristikker og indeksflommen (midlere årlig flom), slik at man kan forutsi midlere årsflom for et vilkårlig punkt i regionen. I det siste har hovedvekten vært lagt på å finne robuste statistiske regionale estimater for flomfordelinger, så kalte L-moment (Hosking 1990; Vogel & Fennessay 1993), identifisering av fordelinger og skissering av homogene regioner hvor indeksflom-antagelsen holder. Hosking & Wallis (1993) har foreslått metoder for å teste disse antagelsene.

I løpet av de siste årene er det etablert et nytt teoretisk rammeverk som har til hensikt å forstå den stokastisk strukturen på regionale flommer som funksjon av de fysiske forholdene som påvirker prosessen. Dette rammeverket er basert på nye ideer om invarians i skalering (Gupta, Mesa & Dawdy 1994; Smith 1992). Et av nøkkelspørsmålene er å forstå hvordan skalerings-invarians i flommer henger sammen med skalerings-invarians i nedbør (både regn og snøsmelting) og elvenettverkets tredimensjonale geometri (Gupta & Waymire 1996; Gupta & Dawdy 1994; Gupta & Dawdy 1995). Regionale flomfrekvenser er hovedsaklig basert på indeksflom-antagelsen. I den nye skaleringsterminologien er det ekvivalent med så kalt enkel skalering ("simple scaling"). Frekvensanalyser av avløpsdata fra 1960 årene (f.eks. Dawdy 1961, Francou & Rodier 1967) viste imidlertid avvik fra det lineære log-log plottet mellom vassføringens empiriske momenter og romlig skala. Analysene viser m.a.o. at indeksflom-antagelsen ikke alltid holder (Gupta, Mesa & Dawdy 1994; Gupta & Dawdy 1994; Blöschl 1996).

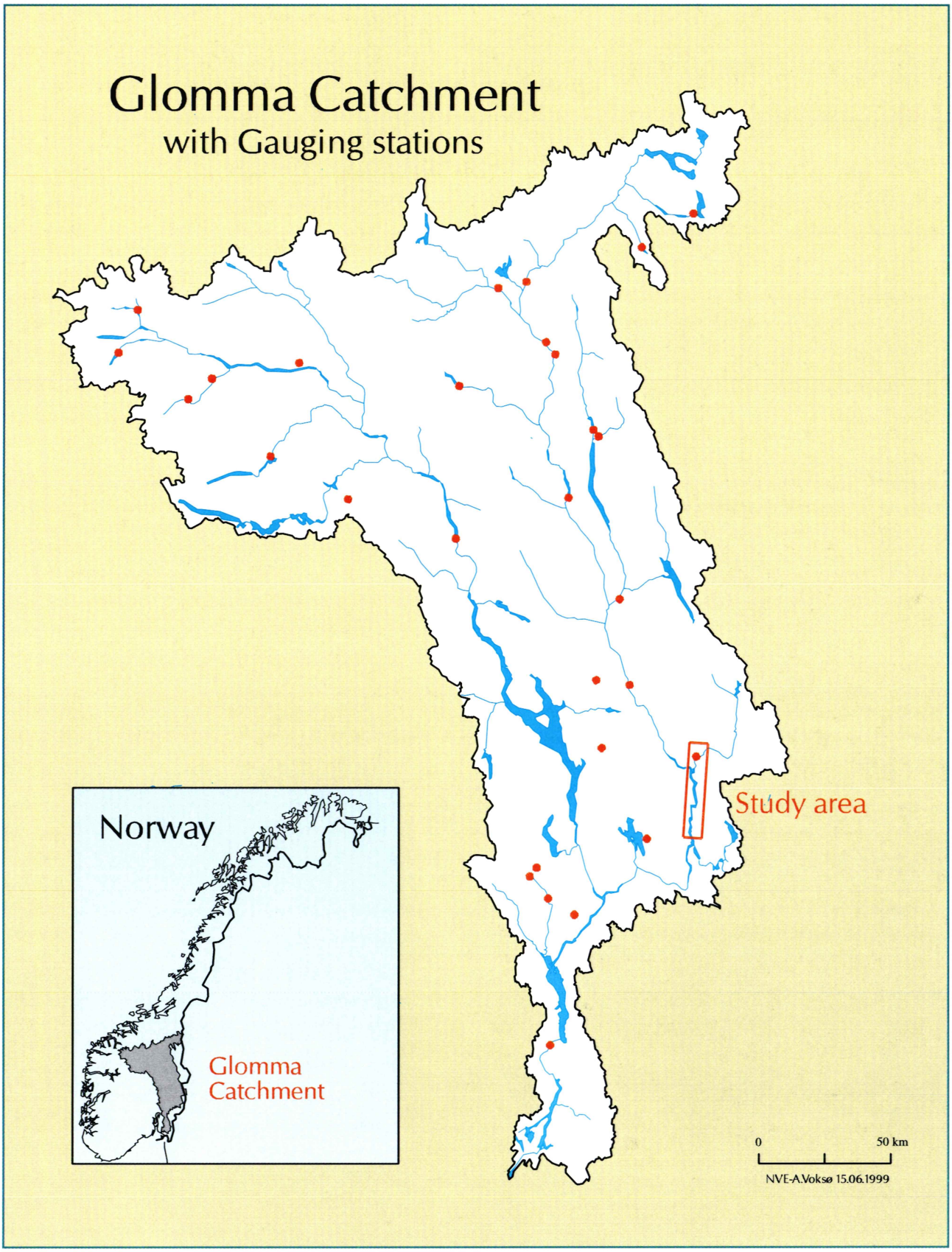
I det følgende presenteres en metode for å etablere regional flomfrekvenskurven utviklet av Gottschalk og Weingartner (Gottschalk & Weingartner 2000). Den tar utgangspunkt i skaleringsegenkapene for regionale flommer uttrykt ved L-momenter og forventede "order statistics". En skaleringsrelasjon som tillater utledning av skalaavhengigheten for L-momenter og L-moment-forholdene er introdusert for "expected order statistics". Disse er brukt for å finne uttrykk for skalaavhengighet for parametrene i General Extreme Value (GEV) fordelingen med Gumbel (ekstremverdifordeling type 1, EV1) som et spesialtilfelle. Tre ulike datasett fra Glomma er brukt (figur 27):

- årlige maksimal-verdier ("annual maximum series" - AMS),
- maksimalverdier over terskel ("partial duration series" – PDS) (gjennomsnittlig tre hendelser pr år)
- samtidige maksimalverdier over terskel ("synoptic partial duration series" - SPDS).

Data er hentet fra 35 stasjoner med daglige målinger over en periode på minst 15 år. I det synoptiske datasettet er flommene utvalgt på basis av de største flommene ved stasjonene i den nedre delen av vassdraget. Opptil åtte dager tidsforskjell er godtatt. Stasjonenes feltareal varierer fra 40 km^2 til 40 000 km^2.

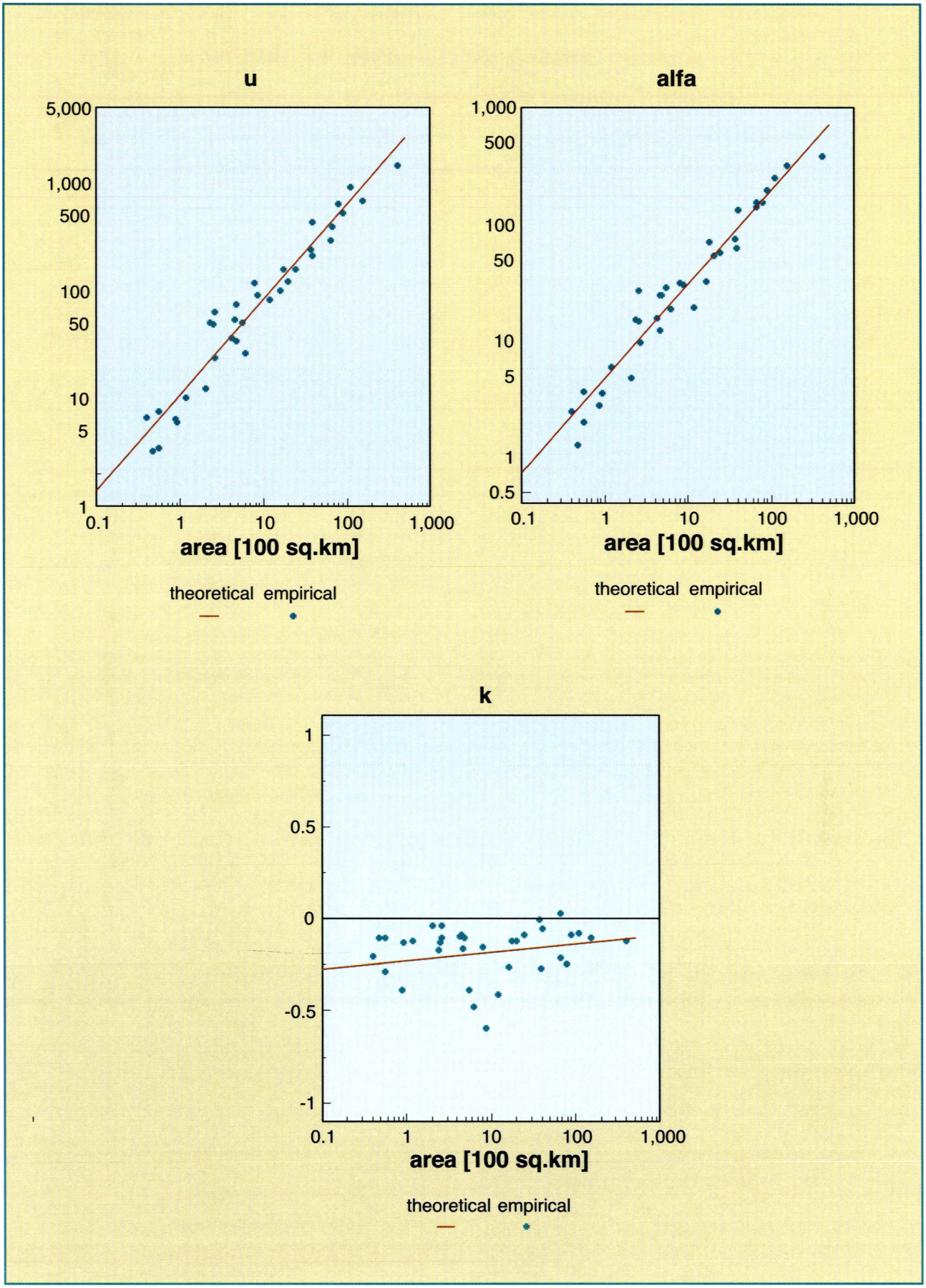
Arealavhengigheten til de tre parametrene u, α og k i GEV fordelingen er vist i figur 28, hvor de uavhengig bestemte parametrene er sammenlignet med teoretisk beregnede parametre med skaleringsmodelellen for PD-serier. De to første parametrene viser tydelig avhengighet. For k, som bestemmer type ekstremverdifordelig, er avhengigheten mindre tydelig. k er uansett alltid negativ, hvilket indikerer en fordeling av Frechét-type. Tabell 14 viser standardfeil ved estimering/beregning av parametre i den regionale skaleringsmodellen.

Den regionale kurven fra PDS-datasettet er illustrert i figur 29. AMS er også brukt for å konstruere den regionale kurven og med bare ubetydelige forskjeller sammenlignet med PDS. Den sistnevnte er basert på flere hendelser og det er grunnen til at den betraktes som mer pålitelig. Den største flommen for ulike overskridelsessannsynligheter og for ulik skala (areal i km^2 delt på 100) er uttrykt som en normalisert verdi med hensyn på indeksflommen (midlere flom). Den normaliserte



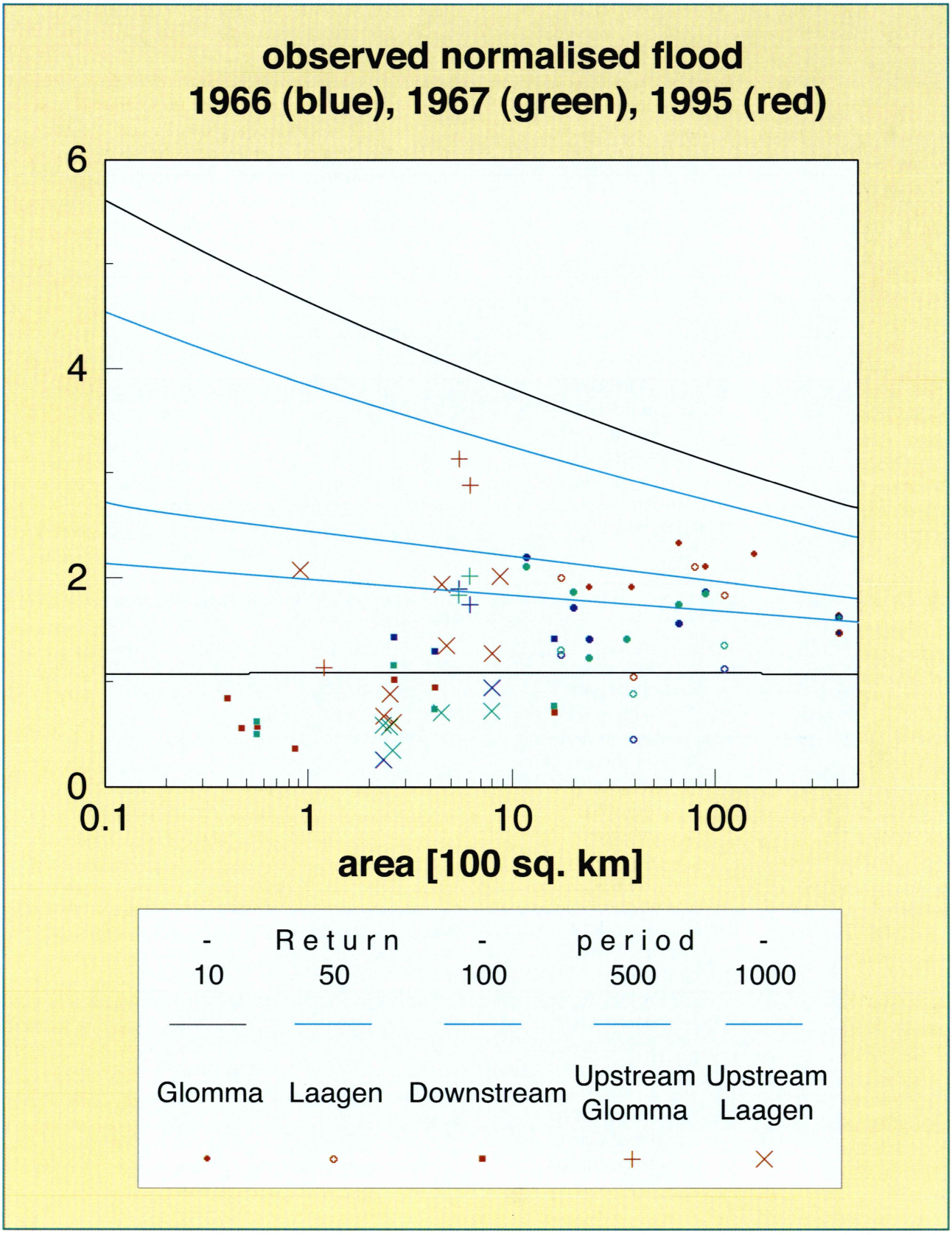
Figur 27 Glommas nedslagsfelt med hydrologiske målestasjoner.

Figure 27 The Glomma catchment, with hydrological stations.



Figur 28 Arealavhengigheten for parametrene u, a og k for GEV for Glommas nedbørfelt.

Figure 28 The catchment size dependence for the parameters u, a and k for GEV (Glomma catchment).



Figur 29 En regional frekvenskurve for Glomma for flom normalisert mot midlere flom. Skalafaktoren er uttrykt som areal i km² dividert på arealet på referansefeltet på 100 km². Empiriske data fra flommene i 1966 (blå markør), 1967 (grønn) og 1995 (rød) er også vist.

Figure 29 A regional flood frequency curve for Glomma - normalised against average flood. The scale factor is the catchment area normalised against the reference catchment size of 100 km². Empirical data for the 1966 (blue marker), 1967 (green) and 1995 (red) floods are also included.

Tabell 14 Standardfeil i estimering av arealavhengige regionale parametre i GEV-fordelingen.

Tabell 14 Standard errors in the estimation of scale dependent regional parameters of the GEV distribution

Type dataserie *Data series type*	s_u	s_a	s_k
AMS	166.8	21.2	0.043
PDS	121.1	29.4	0.053

flommen er sterkt arealavhengig; spesielt for lave overskridelsessannsynligheter. Størrelsen på nedbørfeltet har en dempende effekt på den relative størrelsen på en flom. En 100-års flom kan forventes å være 2 ganger så stor som indeksflommen når nedslagsfeltet er 50000 km², men nesten 3 ganger så stor for et nedslagsfelt på 10 km². For 1000-årsflommen er tilsvarende størrelser hhv. 3 og 5 som indeksflommens må multipliseres med.

6.1.3 Overskridelsesannsynlighet for nyere flomhendelser

Empiriske data fra tre hendelser fra SPDS data settet er inkludert i grafen: flommene i 1966, 1967 og 1995. Man kan se at observasjonspunktene i Glomma og Lågen holder sammen, noe som indikerer at flommene i 1966 og 1967 hadde gjentaksintervall i størrelsesorden 50 år i Glomma, men noe lavere i Lågen. 1995-flommen hadde et gjentaksintervall litt høyere enn 100 år i Glomma og rundt 100 år i Lågen. De observerte flomverdiene for det største feltet (vm 2.605 Solbergfoss, 40221 km²) indikerer lavere gjentaksintervall. Gjentaksintervallet er et vel etablert og mye brukt begrep i hydrologien. Man må imidlertid huske at det er knyttet stor usikkerhet til estimering av gjentaksintervallet. Forhåpentligvis vil den regionale flomfrekvenskurven for Glomma som er vist her være et bra verktøy for å estimere gjentaksintervall for hele nedbørsfeltet og minimalisere usikkerhetene. Spredningen i punktene er fremdeles betydelige.

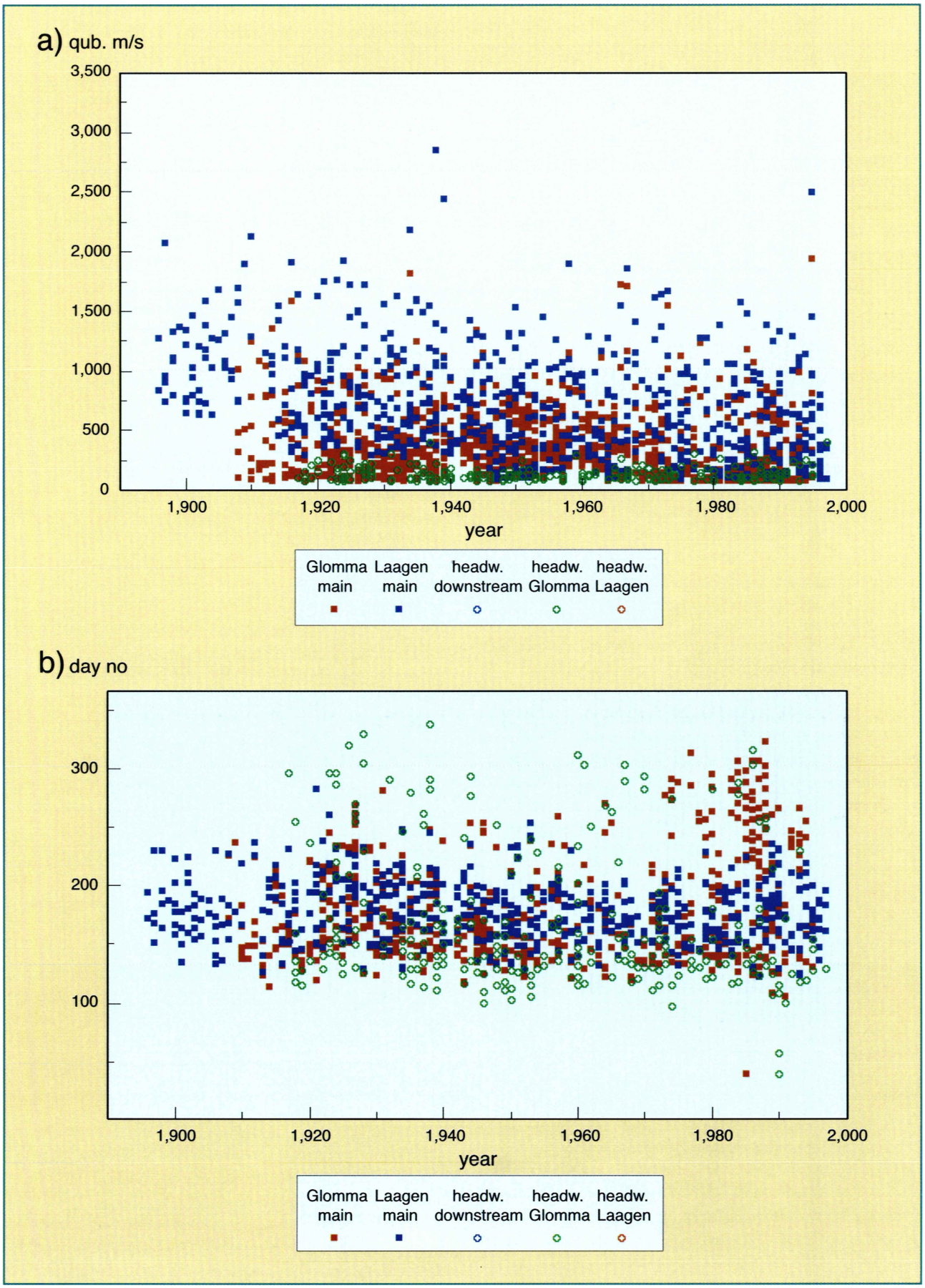
Erichsen (1995) har estimert gjentaksintervallet for 1995-flommen. Han brukte en tradisjonell tilnærmingsmetode og tilpasset en eller flere fordelingsfunksjoner (av et utvalg av 5 teoretiske fordelinger) til data fra Glommas nedbørfelt. Resultatet viste at 1995-flommen var en sjelden flom i sentrale deler av Gudbrandsdalen og Østerdalen med et gjentaksintervall på ca. 200 år. På vestsiden av Gudbrandsdalen er det beregnede gjentaksintervallet 5-10 år. For hovedløpet av Glomma er det korresponderende gjentaksintervallet gitt å være 100-200 år. Når flommen når Øyeren dempes den og gjentaksintervallet er beregnet til 50-100 år. Rapporten understreker at det er store usikkerheter forbundet med beregningene av gjentaksintervall.

Etter å ha understreket betydningen av den store usikkerheten ved estimering av gjentaksintervall for flommer i et område, er det nødvendig å notere seg at dersom 100-års flommen er observert nedstrøms betyr ikke at flommen oppstrøms har det samme gjentaksintervallet. Spredningen i figur 29 viser at flommene i sidevassdrag har varierende, men vanligvis lavere gjentaksperioder. Dette skyldes først og fremst at det ikke er samme værsituasjoner som skaper flommer i småfelt og i store felt.

Det er klart at AM-serier ikke inneholder så mange høye flommer som PD-serier. For mange år hører ikke AM-verdiene til PDS-populasjonen for ekstremhendelser i det hele tatt. Det samme gjelder forholdet mellom PDS og SPDS - PDS har flere ekstremhendelser enn SPDS. For observasjonspunkter nedstrøms i hovedelv er hendelsene nesten identiske for de to datasettene. Når man flytter seg til mindre og mindre felt forsvinner overenstemmelsen gradvis, f.eks. hendelsene som hører til de ekstreme situasjonene i hovedelva hører ikke til populasjonen av ekstremhendelser for små felt.

Hvis det er slik at sannsynligheten for flom har økt bør man først se etter fenomen som påvirker synkroniseringen i tid for flommene i sidevassdragene. Den viktigste komponenten er da skala til værsystemene som forårsaker ekstremhendelser. Endring i temperatur over store arealer i lavtliggende områder og fjell samtidig vil f.eks. føre til snøsmelting og/eller intens nedbør over store arealer. Er slike storskala værsystemer hyppigere nå enn tidligere? En annen viktig faktor kan være endring i sidevassdragenes responstid og transporttid i kanaler slik at konsentrasjonstiden blir lavere. Det øker sjansen for samtidig respons i hele nedslagsfeltet. Det er imidlertid utenfor rammene av denne artikkelen og gå dypere inn på disse spørsmålene. En visuell analyse av den plottede PDS serien, flommenes størrelse (figur 30a) og dagen for flomhendelsen (figur 30b) gir ingen indikasjoner på større endringer i Glomma for de siste 100 årene. Det er likevel en tendens til mer høstflommer i Glomma i løpet av de siste 100 årene. Dette er i samsvar med konklusjonen av effekten av klimaendring på hydrologiske regimer i norske elver (Krasovskaia & Sælthun 1997), men kan også skyldes at vassdragsreguleringene har redusert vårflommene.

En alternativ metode for flomfrekvensanalyse som har oppnådd stor popularitet er den såkalte "derived distribution approach". Tilnærmingen gir mulighet til i integrere kunnskapen om de hydrologiske prosesser som påvirker vassføring, f.eks. finne rekken av hendelser i avløpsprosessen som gir spesiell vassføringsfrekvens. Vassføringsvariabelen er relatert til nedbørdata (som ofte er bedre definert enn vassføringsdata: lengre tidsserier, romlig tettere og mindre påvirket av eksterne forhold), fuktighetsforhold i området og feltets responsfunksjon.



Figur 30 Størrelsen på flommer (a) og dagen for hendelsen (b) i PD-serie.

Figure 30 Flood magnitude (a) and day of the year for the event (b) in PD-series.

Eagleson (1972) var den første som brukte denne tilnærmingen for å finne flomfrekvens. Senere fulgte Carlson og Fox (1976) etter. Bruk av det geomorfologiske enhetshydrogram (Roderiguez-Iturbe & Valdes 1979) som en modell for responser i feltet resulterte i flere studier hvor man utledet flomfrekvensfordelinger. Andre eksempler er Hebson og Wood (1982), Diaz-Granados et al. (1984), Moughamian et al. (1987), Sivapalan et al. (1990) og Gottschalk og Weingartner (1998). Bruk av "derived distribution approach" spiller også en viktig rolle i skalastudier av regionale flommer. Blöschl og Sivapalan (1995) gir en oversikt over aktuelle publikasjoner på dette feltet.

De regionale kurvene i figur 29 er kun utviklet fra observerte data og forståelsen av de fysiske prosessene bak er derfor ikke inkludert. Uavhengig av dette er det et samsvar med andre observasjoner som sier at store felt har en dempende effekt på store flommer. Er "derived distribution function approach" en alternativ tilnærmingsmåte når man skal lage regionale frekvenskurver som den i figuren? Vil en slik metode kunne forutsi innvirkningen av miljøendringer på de regionale frekvensene? Denne tilnærmingen er på nåværende tidspunkt hovedsakelig rettet mot skalering av arealnedbørens fordelingskarakteristikker og i responstid i feltet. Begge disse faktorene ble tidligere utpekt til å være sentrale. Man kan sannsynligvis vinne mye innsikt i responstid og effekten av endringer i miljøet ved denne tilnærmingen. Skalaproblemet og synkronisering av hendelser er mer komplisert. For vårflom i Glomma henger det sammen med felles struktur i forhold til snødekke, nedbør, temperatur og jordfuktighet over større områder. Under diskuteres flere trekk ved denne kompleksiteten, som SPDS-datasettet gjenspeiler.

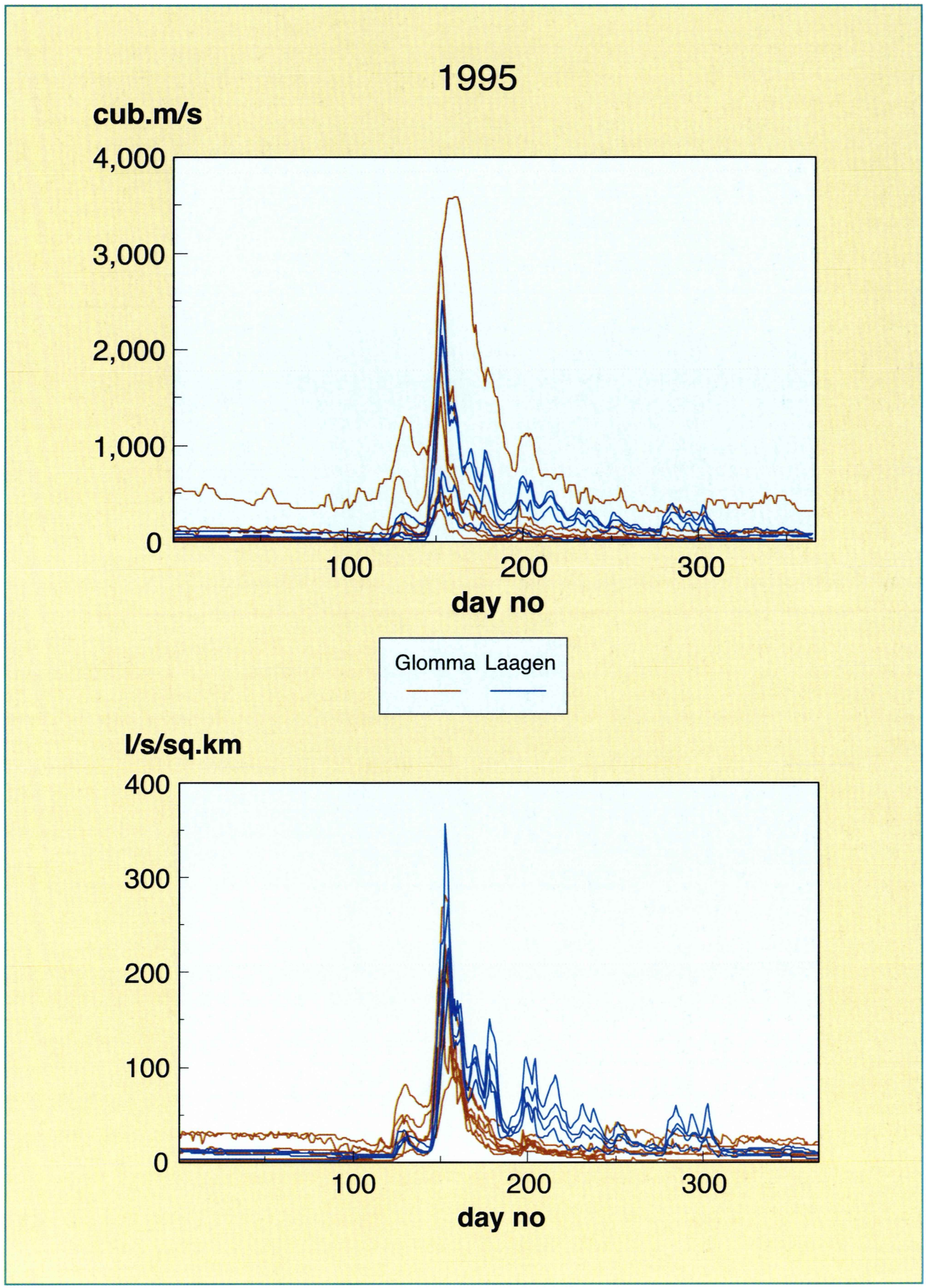
6.1.4 Samtidighet av flomhendelser

Som første skrittet i en slik analyse er det svært informativt å studere de årlige hydrogrammene for mange stasjoner samlet. Figur 31 viser hydrogrammene for flommen i 1995. Det illustrerer hvordan en flom i hovedvassdraget gradvis bygges opp. Flommene i nedre del av Glomma-vassdraget er svært følsomme for synkroniseringen mellom de to hovedgrenene Glomma og Lågen. Muligheten for samtidighet av kulminasjonen i de to grenene bør være en viktig oppgave for videre analyse av flomfare i Glomma. Den romlige korrelasjonen mellom de fleste stasjonene nedstrøms og oppstrøms i SPDS datasettet gir videre innsikt i mønstret i lokalflommene (figur 32). Det er en stor reduksjon i korrelasjon mellom det største feltet og det neste største. Det skyldes igjen effekten av Mjøsa. Videre er korrelasjonen konstant langs hovedgreinene til Glomma og Lågen. Også sidevassdrag oppstrøms i Glomma er godt korrelerte. Det er ikke tilfellet for sidevassdragene i Lågen. På mange måter ligner fordeling av punkter flomhendelsene i figur 29.

Korrelasjonskoeffisienten gir et bilde av den midlere flomsituasjonen. Hva med ekstremflom-situasjonene? Som et forsøk på å illustrere disse er det estimert overgangssannsynligheter for verdier over medianen og 75% og 90% kvantilene. Overgangssannsynligheten gir svar på spørsmål som "dersom flommen på et punkt nedstrøms er over medianen (eller andre kvantiler), hva er da sannsynligheten for flom over medianen oppstrøms?" Resultatet av disse beregningene er vist i figur 33. For sammenligning er også den teoretiske kalkulerte overgangs-sannsynlighet for en normal prosess med kjent korrelasjon tatt med i figuren. Tendensen er klar (selv om det er noe spredning i data p.g.a. statistiske feil, spesielt i 90% verdiene). Hendelsene har større overgangssannsynlighet enn det som kan forventes fra korrelasjonen (figur 32) for hendelsene over 75% og 90% kvantil. En konklusjon man kan trekke er at jo mer ekstrem en hendelse nedstrøms er, desto mer korrelert er den med hendelser oppstrøms. Dette resultatet er til en viss grad i strid med generelle modeller fra sannsynlighetsteorien som vanligvis fastslår at jo mer ekstrem situasjonen er desto dårligere er den korrelert i rommet (se Gottschalk, 1989) .

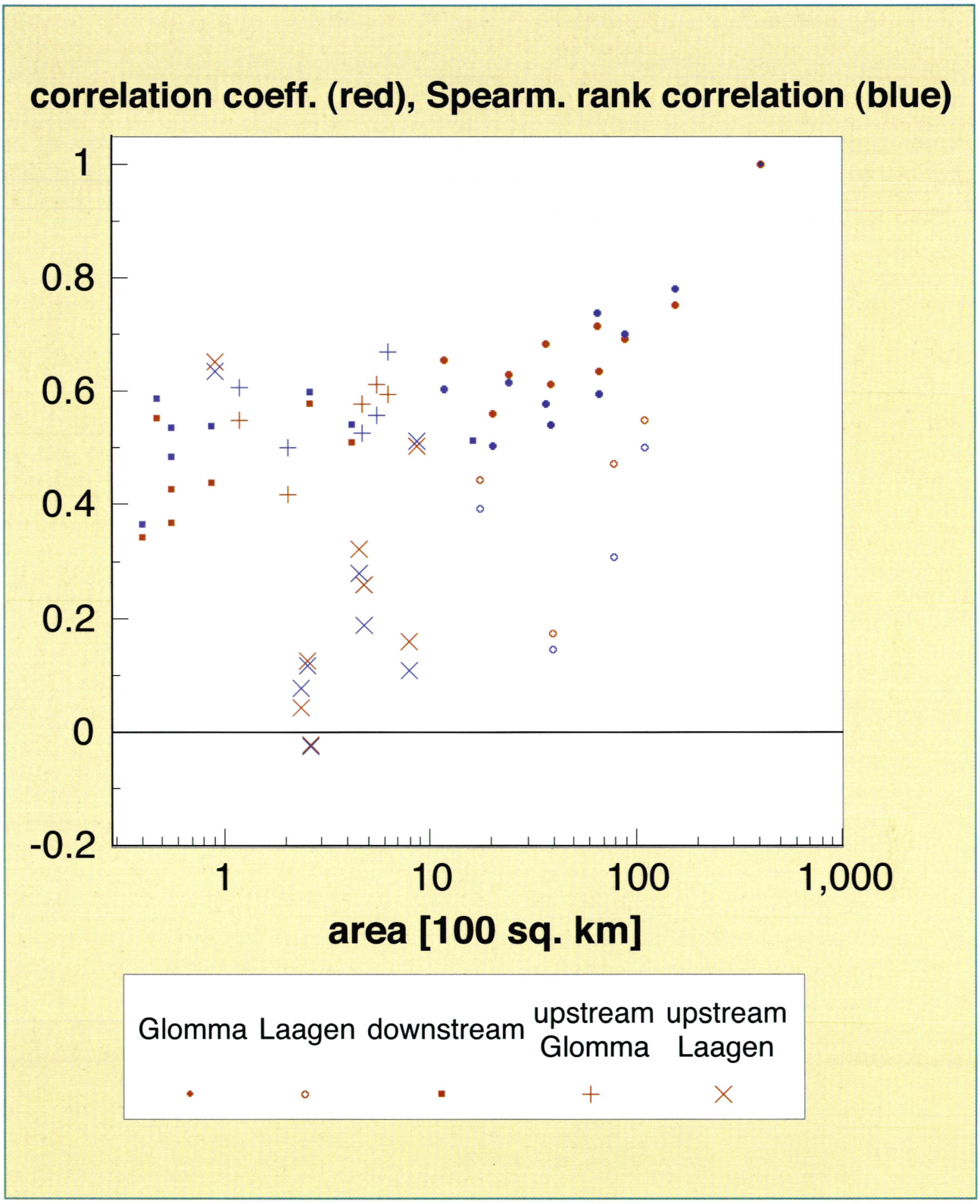
6.1.5 Fordelingsfunksjonen for flomvannstand ved Nor

Ved Nor finnes det en kort observasjonsserie på 10 år (1975-84). Maksimalverdien for 1995 er også tilgjengelig. Gjennomsnittsverdi og standardavvik for årlig maksimum for disse 11 årene er 1564.4 og 541.0. De tre parametrene i GEV fordelingen beregnet ved L-momenter er u = 1313.9, α = 333.9 og k = -0.150. Standardfeil i disse lokalparameterestimatene er beregnet ved såkalt "jackknifing" (Tukey 1958) til å være 39.5, 20.9 og 0.270. Den regionale modellen gir en beregnet middelverdi på 1599.7 og de tilhørende GEV-parametrene blir u = 1405.4, α = 337.0 og k = -0.026. Tabell 14 viser standardfeil for parametrene. Vi ser at for den lokalparameteren u har det lokale estimatet den minste beregnede feilen. For skalaparameteren α har de lokale og regionale beregningene nesten identiske feilverdier. Formparameteren k er klart best estimerete fra den regionale modellen, mens det lokale estimatet har høy usikkerhet som beskrevet av standardfeilen. Resultatene er som forventet. Den korte lokale serien kan hjelpe til med å bedre estimatet av sentraltendens (middelverdi), og også skalaparameter. Formparameteren, som gir fasongen til halen for ekstremverdiene, er i liten grad hjulpet av den korte lokale serien. Her er det regionale datasettet avgjørende for parameterestimatet. Ved å bruke Bayesianske prinsipper kan de regionale apriori-estimatene oppdateres av de lokale for å gi et sett av posteriori-estimat ved å veie i samsvar med den inverse av de respektive standardfeilene. Disse nye verdiene er estimert til u= 1318.7, α=335.5 og k=-0.0289 og de tilhørende standardfeilene 38.0, 14.9 og 0.042. Feilene i beregningen for de to første parametrene er dermed



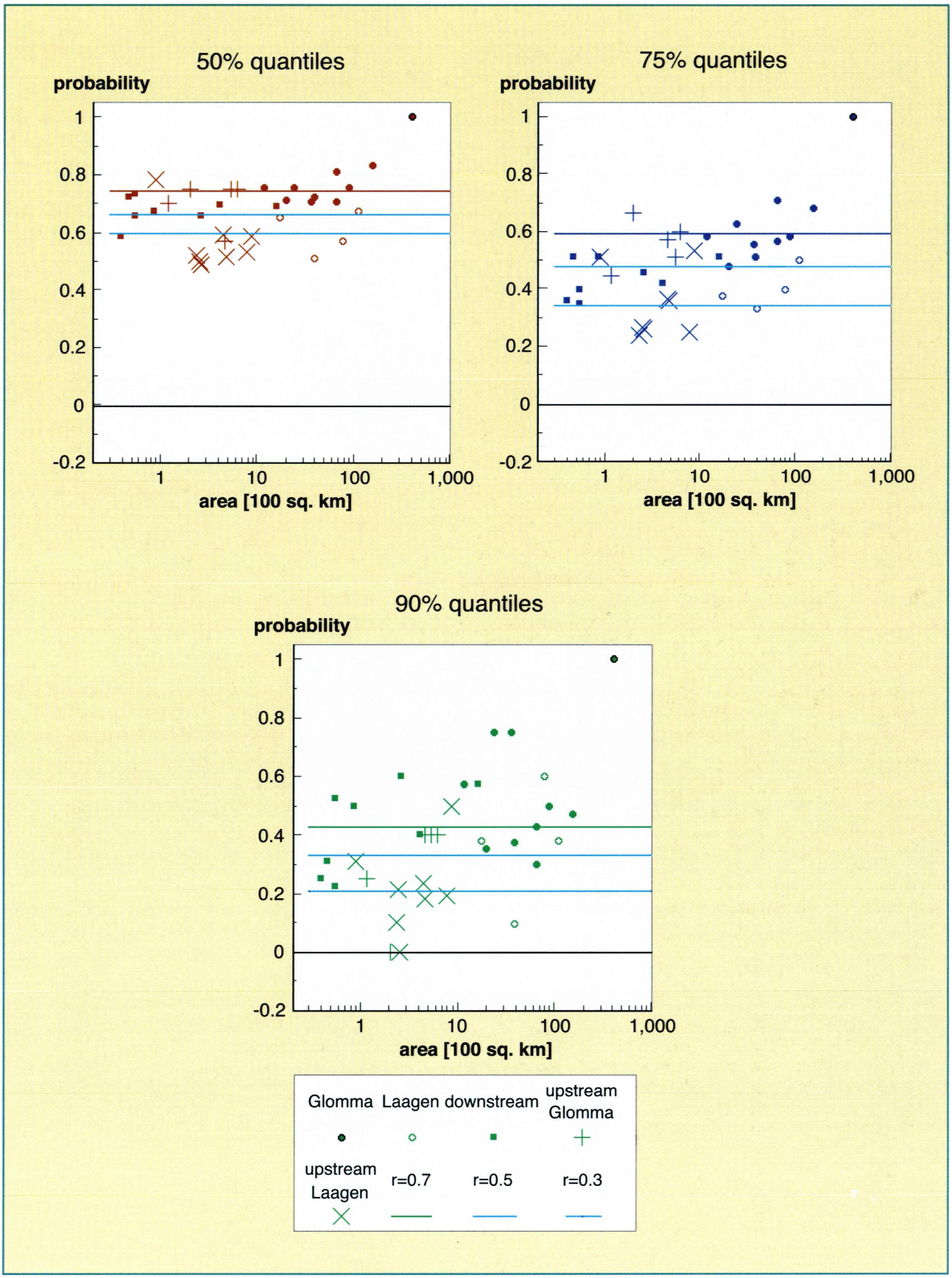
Figur 31 Årshydrogrammer i Glomma for 1995.

Figure 31 1995 hydrographs for Glomma.



Figur 32 Romlig korrelasjon mellom SPDS flommer ved Solbergsfoss (40221 km²) og stasjoner oppstrøms. Vanlig korrelasjon (rød) og Spearman rank correlation (blå)

Figure 32 Spatial correlation between SPDS floods at Solbergfoss (40221 km²) and upstream stations. Ordinary correlation (red) and Spearman rank correlation (blue).



Figur 33 Romlige overgangs-sannsynligheter for median, 75% og 90% kvantiler mellom SPDS flommer ved Solbergsfoss (40221 km²) og stasjoner oppstrøms.

Figure 33 Spatial transition probabilities for the median, 75% and 90% quantiles between SPDS floods at Solbergsfoss (40221 km²) and at upstream stations.

betydelig redusert, mens feilen på den tredje parameteren, k, ikke er forandret i det hele tatt.

Disse nye parameterestimatene brukes videre til å beregne fordelingsfunksjonen for avrenning ved Nor. Ved å bruke transformasjonene i 6.1.1 på vassføringskurven for Nor finner man den statistiske vannstandsfordelingen. Disse to fordelingsfunksjonene er vist i figur 34.

6.1.6 Effekt av usikkerhet i regional frekvenskurve og vassføringskurven

Både parametrene i frekvenskurven og parametrene i vassføringskurven er belagt med feil, og dette vil føre til feil i den estimerte overskridelsessannsynligheten. Sannsynligheten er definert på intervallet [0,1], hvilket betyr at fordelingen av estimeringsfeil også er definert på dette intervallet. Denne fordelingen er symmetrisk for sannsynligheter rundt 0.5, men er mer og mer assymmetrisk mot 0 og 1. Estimeringsfeil blir som regel diskutert med normalfordeling som utgangspunkt - noe som forenkler tolkningen av standardfeilen. Fordelingen for sannsynligheter er imidlertid langt fra normalfordelt, særlig for små overskridelsessannsynligheter. Cramér (1971) gir et uttrykk for beregning av konfidensintervaller rundt estimerte sannsynligheter når disse kommer fra en normalfordeling. Rasmussen (1991) har utledet uttrykk for fordelingen for estimert overskridelsessannsynligheter og tilhørende momenter forutsatt at den underliggende sannsynlighetsfordelingen er en Gumbelfordeling.

Det har ikke vært anledning i det foreliggende prosjektet å studere dette problemet i dybden. En foreløpig analyse er imidlertid foretatt - den mangler en evaluering av gyldighetsområdet. Denne forenklede tilnærmingen er basert på trunkert rekkeutvikling til å beregne feil og bias i sannsynlighetsestimater, se tekstboksen.

Sannsynlighetsestimatet for en vannstand z basert på GEV-fordelingen er gitt som :

$$\hat{p} = \exp\left[-\left\{1-\hat{k}(\hat{q}(z)-\hat{u})/\hat{\alpha}\right\}^{1/\hat{k}}\right]$$

Middelverdi (bias) og variansen (standardfeil) for denne regionale overskridelsessannsynlighet-estimatoren fås ved Taylorrekkeutvikling av ligningen over:

$$E\{\hat{p}\} = (p)_m + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial u^2}\right)_m Var\{\hat{u}\} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial \alpha^2}\right)_m Var\{\hat{\alpha}\} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial k^2}\right)_m Var\{\hat{k}\} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial q^2}\right)_m Var\{\hat{q}\}$$

$$Var\{\hat{p}\} = \left(\frac{\partial p}{\partial u}\right)_m^2 Var\{\hat{u}\} + \left(\frac{\partial p}{\partial \alpha}\right)_m^2 Var\{\hat{\alpha}\} + \left(\frac{\partial p}{\partial k}\right)_m^2 Var\{\hat{k}\} + \left(\frac{\partial p}{\partial q}\right)_m^2 Var\{\hat{q}\}$$

hvor $m = (u_t, \alpha_t, k_t, q(z))$

m.a. de er utviklet rundt de spesifikke verdiene for parametrene på stedet i og vassføringen som tilsvarer en gitt vannstand z.

Uttrykkene for middelverdi og standardfeil inneholder fire ledd, et for hver parameter og et for vannstand/vassføringsrelasjonen. Standardfeilene for hvert ledd (variansleddene) er evaluert foran. For å illustrere effekten av usikkerheteten beregnes standardfeil for to tilfeller - for regional aprior parameterestimering og for posteriori beregning når lokal informasjon er tatt med. Figur 35 viser variasjonen av disse standardfeilene som en funksjon av sannsynlighet, p. I tabell 15 er relativ andel for hver av de fire komponentene evaluert som en funksjon av p.

Den generelle formen på grafen i figur 35 og verdiene i tabell 15 virker rimelig bortsett fra at utslaget av usikkerheten i vassføringskurven kan synes å være for dominerende. Dette må det sees nærmere på. Det er selvfølgelig riktig at de lokalt oppdaterte standardfeilene blir redusert sammenlignet med de regionale og at når denne feilen reduseres blir usikkerhetsbidraget fra vassføringskurven mer dominerende. Usikkerheten i lokalparameteren u dominerer i den sentrale del av fordelingen. Mot halen tar skala- og særlig formparameteren over denne rollen. Usikkerheten i vassføringskurven er lavest i den sentrale deler og øker også mot halen.

6.2 Metodiske problemer ved reguleringer

Vassdragsreguleringer påvirker flomforholdene, først og fremst gjennom reguleringsmagasinene og driften av disse, men også ved overføringer mellom vassdrag. Hovedvirkningene av reguleringer er beskrevet i kapittel 3. Dette innebærer et homogenitetsbrudd i flomseriene - en gitt flom vil ha en annen størrelse etter en regulering. Reguleringer medfører også gjerne en endring i flomregimet. Siden reguleringsmagasinene stort sett er nedtappet før vårflommen og fulle om høsten, reduseres normalt vårflommene mer enn høstflommene.

I de fleste store, regulerte vassdragene i Norge har har det vært en trinnvis utbygging fra tidlig på 1900-tallet og fram til i dag. Det vil derfor ofte være korte dataserier som beskriver dagens flomregime, og flomfrekvensanalyse på enkeltserier krever i utgangspunktet lange serier for å gi pålitelige estimat for frekvens/størrelse på ekstreme flommer. Samtidig bryter forutsetningene for regionale analyser delvis sammen, fordi datasettet blir en blanding av uregulerte seerier og serier med varierende reguleringsgrad. Disse seriene vil dermed ikke representere den samme underliggende populasjon.

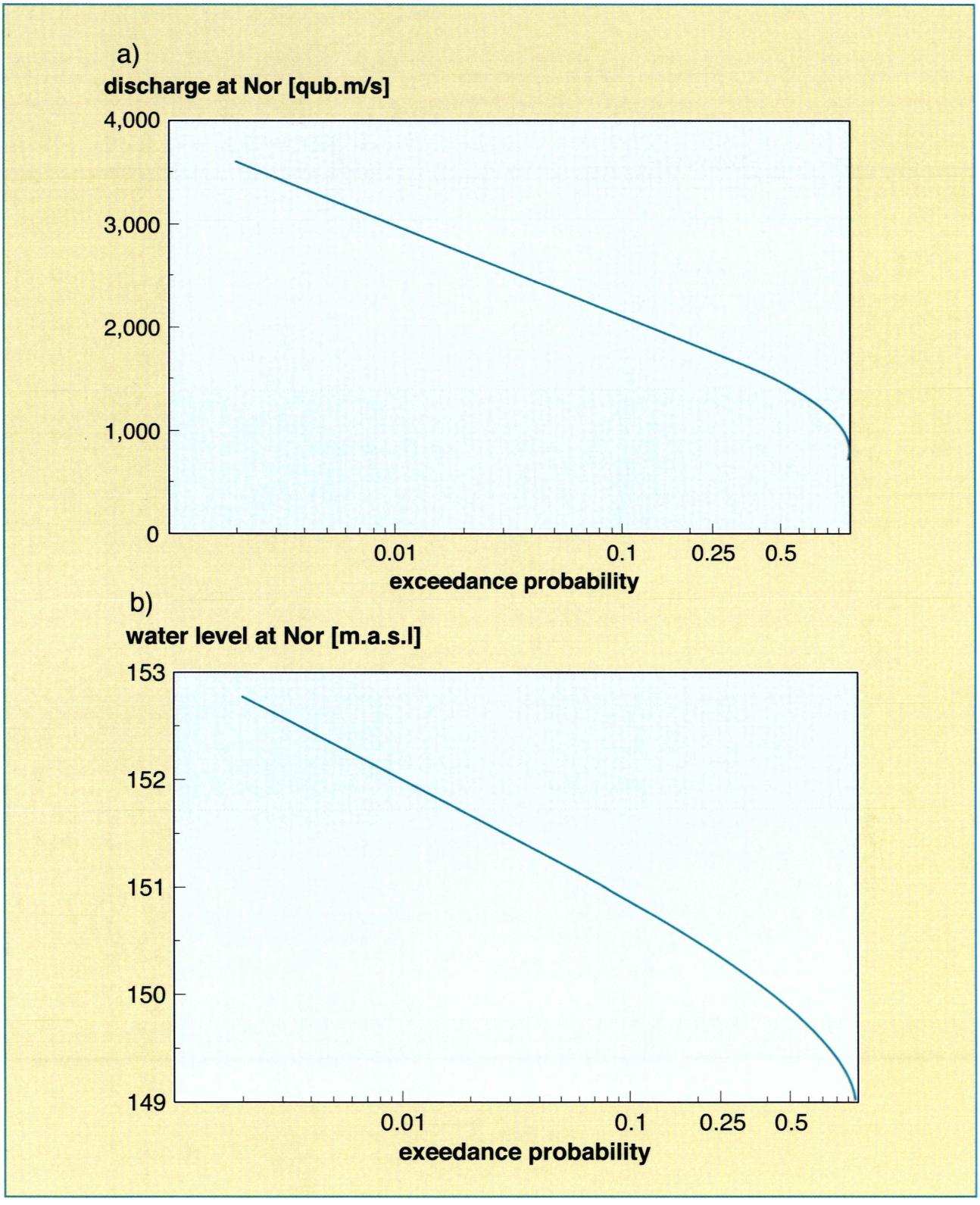
En måte å komme rundt dette problemet er å "tilbakeføre" seriene til uregulert tilstand ved tilsigsberegninger. Dette byr vanligvis på metodiske problemer som slår spesielt ut for flomverdier:

- Differansemetoden benyttet i tilsigberegningen (sentrerte eller usentrerte differanser) slår ut i estimatet av flomtoppen.

Tabell 15 Standardfeil i estimerte sannsynligheter for GEV-fordelingen og den relative betydningen (i %) av usikkerhetene i parametrene i vassføringsfordelingen og i vassføringskurven (q).

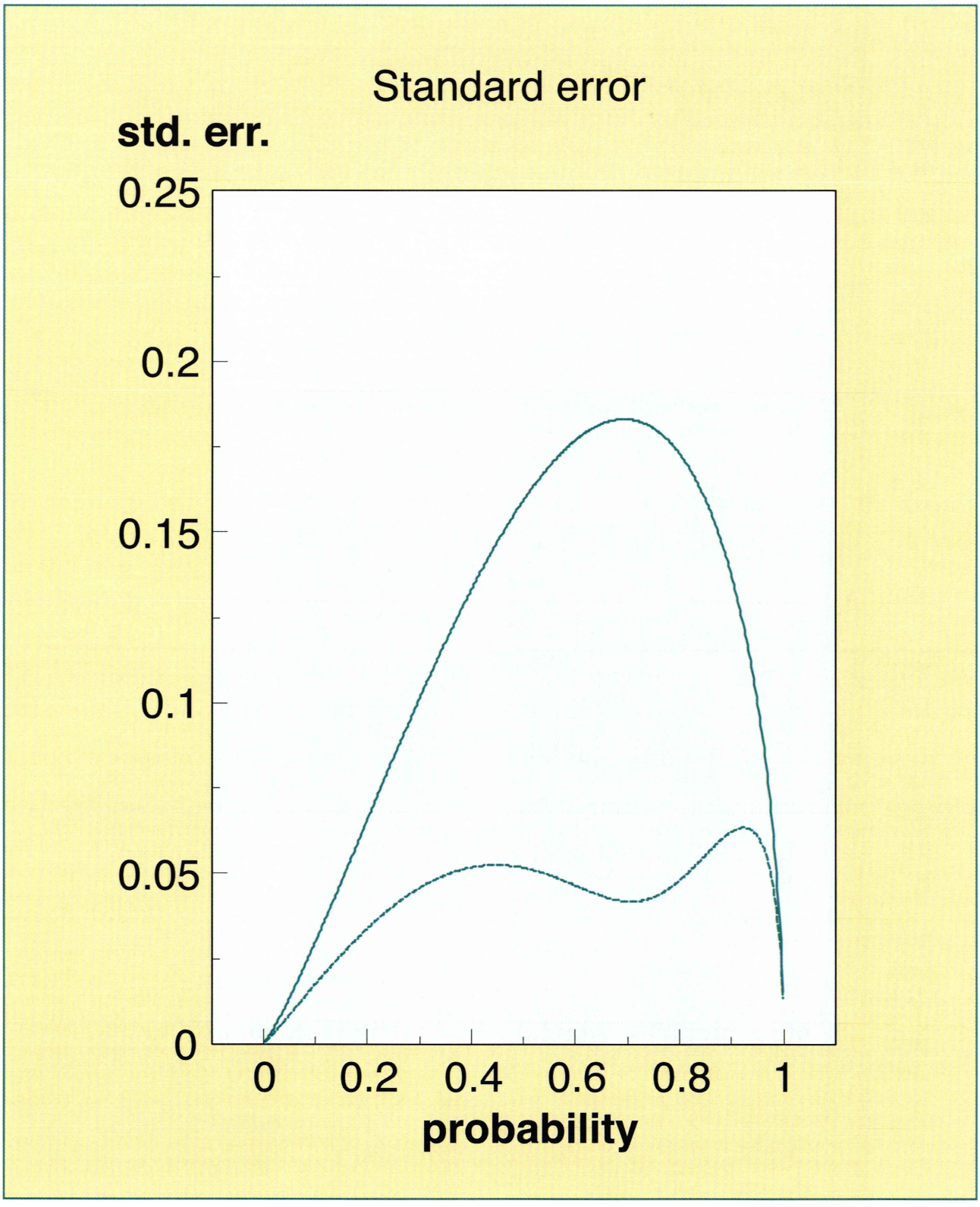
Tabell 15 Standard errors of estimated probabilities of the GEV distribution and the relative role (as percentage) of the uncertainties of parameters in the distribution of discharge and of the stage-discharge relation

Sannsynlighet *Probability*	Standardfeil *std. error*	u	a	k	q
Regionale (apriori) estimat/*Regional (prior) estimates*					
0.002	0.00028	31.4	5.0	3.0	60.7
0.010	0.00173	36.3	4.7	2.2	56.8
0.020	0.00383	39.4	4.5	1.9	54.3
0.050	0.01101	45.1	4.1	1.4	49.5
0.100	0.02420	51.5	3.6	0.9	43.9
0.200	0.05142	61.8	2.9	0.5	34.8
0.500	0.11502	88.9	0.8	0.0	10.2
0.800	0.12278	94.5	0.4	0.0	5.0
0.900	0.10393	70.5	2.2	0.2	27.0
0.950	0.08158	47.5	3.9	1.1	47.4
0.980	0.05397	28.1	5.2	3.3	63.4
0.990	0.03744	19.4	5.7	5.7	69.2
0.998	0.01432	9.1	5.9	12.8	72.2
Estimat oppdatert med lokal informasjon/*Locally updated (posteriori) estimates*					
0.002	0.00023	4.8	3.7	4.2	87.4
0.010	0.00139	5.9	3.6	3.4	87.1
0.020	0.00303	6.7	3.6	2.9	86.8
0.050	0.00836	8.3	3.6	2.3	85.8
0.100	0.01747	10.5	3.5	1.8	84.3
0.200	0.03384	15.1	3.4	1.1	80.4
0.500	0.05155	46.8	2.1	0.1	50.9
0.800	0.04796	65.5	1.4	0.0	33.0
0.900	0.06221	20.8	3.1	0.7	75.4
0.950	0.06080	9.1	3.6	2.0	85.4
0.980	0.04587	4.1	3.7	4.5	87.7
0.990	0.03342	2.6	3.6	6.9	86.8
0.998	0.01348	1.1	3.4	14.1	81.4



Figur 34 Fordelingsfunksjon for a) flomvassføring og b) flomvannstand ved Nor.

Figure 34 Distribution function for a) flood discharge and b) flood stage at Nor.



Figur 35 Estimerte standardfeil for sannsynligheter, basert på regionalt estimerte parametre (heltrukket linje) og på tilleggsinformasjon fra lokale observasjoner (stiplet linje).

Figure 35 Estimated standard error for probabilities, based on regionally estimated parameters (full line) and on addtitional local observations (dashed line).

- Det henter ofte at vassføringsserier fra kraftverk har mangelfulle registreriger av flomtap.
- Reguleringsmagasinet erstatter ofte en naturlig innsjø, med en naturlig flomdempning. Ved en ren tilsigsberegning blir denne dempningen "beregnet bort", og tilsigsflommene vil være større enn de tilsvarende naturlige flommene. For å korrigere for dette må man framregne flommen igjen ("route") gjennom den naturlige sjøen. Problemet i denne sammenheng er at for eldre reguleringer mangler ofte vassføringskurven for den/de neddemte sjøen. For nyere reguleringer er de vanligvis pålagt oppmålt - nettopp for dette formålet. I forbindelse med HYDRA-prosjektet er utløpskarakteristikkene for magasinene i Gudbrandsdalslågen forsøkt gjenskapt slik de kan ha vært før reguleringene (Wathne & Alfredsen 1999).

Man kan imidlertid ofte komme rundt disse problemene, og etablere en lang homogen vassføring/tilssigserie med tilfredsstillende nøyaktighet i flomdataene. Slike serier er verdifulle for å analysere klimaendringer og eventuelle effekter av endret arealbruk (Roald 1999), samt relasjonen mellom flomfrekvens og feltparametre. Operasjonelt, i risikoanalyse, er imidlertid disse analysene av mindre nytte, fordi man da er interessert i flomstatistikk som beskriver dagens situasjon - ikke de uregulerte forholdene.

Selv om man har en lang nok dataserie som beskriver forholdene etter regulering, er man ikke sikret at denne serien er homogen og beskriver stasjonære forhold. En regulert vassdrag er ikke et naturlig system, det er i større eller mindre grad under menneskelig styring, og forutsetningene for denne styringen vil forandre seg over tid. Det er for eksempel nokså sannsynlig at energiloven og liberaliseringen av energimarkedet i Norge har påvirket flomforholdene i regulerte vassdrag.

Når det trass i disse problemene har vært mulig å etablere en regional flomfrekvensanalyse for de regulerte forholdene i Glomma, er det fordi Glomma tross alt er et lavt regulert system som domineres av uregulert tilsig, og fordi det har vært små endringer i reguleringene de siste tredve årene. Man har dermed rimelig lange, tilnærmet homogene dataserier til rådighet.

Det er også viktig å være klar over at selv om reguleringer vanligvis reduserer størrelsen på en flom, kan man ikke uten videre si hvordan frekvensen (gjentaksintervallet) endres. En floms frekvens må ses i forhold til det aktuelle flomregimet. 1995-flommens gjentaksintervall som tilsigsflom vil sannsynligvis være forskjellig fra den observerte flommens gjentaksintervall.

7. Vannlinjeberegninger

7.1 Innledning

I kapittel 3.3 er det redegjort for analyser som er nødvendige for å framstille flomsonekart. Et viktig element i denne sammenheng er vannlinjeberegninger.

Etter at flomfrekvensanalyse er foretatt, må det etableres en sammenheng mellom vassføring og vannstand i det aktuelle området - se kapittel 6.

For elvestrekninger må en ha vannstandsopplysninger med en tetthet som gjør at den faktiske vannflaten gjenskapes med en tilfredsstillende nøyaktighet. Det er vanlig å beregne vannstanden i en hydraulisk modell (vannlinjeberegning). Ved hydraulisk modellering er de grunnleggende inngangsdata vassføring, formen på elveløpet og ruhetstall for de ulike deler av elveløpet. Elveløpet representeres oftest som tverrprofiler som velges ut med tanke på å gjenskape strømningen i elveløpet best mulig. Tverrprofilene skal i prinsippet dekke hele strømningstverrsnittet i flomsituasjoner. Modellen kalibreres ved hjelp av observerte vannstander med tilhørende vassføringer. For noen formål er det vesentlig å simulere et helt flomforløp med bevegelse av flombølgen nedover vassdraget. En benytter da en hydrodynamisk modell der vassføringen varierer med tiden. I tilfeller der det er behov for å gjenskape strømningen særlig nøyaktig kan en bruke to- eller tredimensjonale modeller der strømhastighet og strømretning varierer i samme tverrprofil. For flomsonekart kan det være tilstrekkelig å beregne vannlinjen med en konstant vassføring innenfor et nærmere avgrenset prosjektområde.

Simuleringene gir vannstand ved hvert tverrprofil. Den beregnede vannlinja er generert ved å interpolere lineært mellom tverrprofilene. Til bruk ved utarbeidelse av flomsonekart må man generere en vannflate på bakgrunn av vannlinja.

7.2 Sammenlikning av vannlinjer fra ulikt datagrunnlag

7.2.1 Problemstilling

Det skal studeres effekten av ulikt datagrunnlag på vannlinjen.

Det er valgt ut et område i Glomma, mellom Norsfossen og Flisa tettsted. Bakgrunnen er at det her finnes flere uavhengige datasett. To store flommer er studert: 1966 og 1995. For disse flommene finnes følgende datasett:

- Observerte kulminasjonsvannstander
- Beregnete vannlinjer ved hjelp av hydraulisk modell.
- Beregnete vannlinjer basert på forutsetning om parallelle vannlinjer

Det tas utgangspunkt i at observasjonene fra henholdsvis 1966 og 1995 utgjør en fasit som de andre vannlinjene evalueres i forhold til. Det er interessant å se hvilke utslag det gjør på beregnet vannstand om en har tilgang til tverrprofiler som kan brukes i en hydraulisk modell eller ikke.

7.2.2 Observerte vannstander

Både i 1966 og 1995 ble det nivellert inn flommerker som skal representere kulminasjonsvannstander. Flommerkene vil ofte finnes langt inne på elveslettene, men kan også være nær det strømmende vannet f eks ved bruer. Dette kan ha noe å si for sammenlikningen mellom observerte og beregnete vannlinjer. Ulike effekter vil gjøre seg gjeldende: lavere vannstand i elva i forhold til elvesletta, vannstandsforskjeller mellom yttersving og innersving m.m. Flommerkene må med andre ord evalueres av en person med kunnskaper innenfor vassdragshydraulikk og med informasjon om de lokale forhold.

Figur 36 viser vannlinjer fra en strekning i Glomma oppstrøms Nor, basert på flommerker fra flommene i 1966 og 1995. Observasjonene fra 1995 viser at det må foretas noen valg av "beste punkter" for å få en vannlinje som virker rimelig. I denne omgang beholdes alle punktene.

7.2.3 Hydraulisk modell

Det er i forbindelse med HYDRA-prosjektet "Effekter av flomsikringstiltak på flomforløpet" (F4), satt opp en hydrodynamisk modell ved hjelp av modellverktøyet MIKE 11 for den aktuelle strekningen (Haddeland & Høydal 1999). Denne modellen er brukt til å simulere vannlinjer. Modellen er en-dimensjonal. For å forenkle modelleringen, er det forutsatt stasjonær strømning, hvilket innebærer at en enklere hydraulisk modell som f.eks. HEC 2 kunne vært benyttet.

Følgende tilnærming er benyttet:

Det skal lages flomsonekart for området, basert på data fra flommen i 1966. Det finnes observerte vannstander fra 1966 som kan brukes til kalibrering av modellen. Det gjøres en flomfrekvensanalyse for den aktuelle strekningen. Fra denne velges ut to gjentaksintervall som har vassføring tilsvarende flommene i 1995 og 1966. Uten at det er avgjørende for denne testen, vil gjentaksintervallet ligge henholdsvis omkring 50 og 200 år.

Vassføring er gitt av observert momentanverdi for vannstand ved kulminasjon av flommen i 1966 og 1995 og gjeldende vassføringskurve for målestasjonen 2.393 Norsfoss i nedre ende av området. Tverrprofilene som er lagt inn i modellen, innebærer at det effektive strømningstverrsnitt begrenses av dagens flomverk. De fleste av dagens flomverk var ikke bygget i 1966. Det anses likevel som tilfredsstillende for denne analysen å forutsette at det effektive strømningstverrsnitt ikke var vesentlige større den gang.

Det er benyttet følgende vassføringer:

1966-flom: 2530 m^3/s
1995-flom: 3080 m^3/s

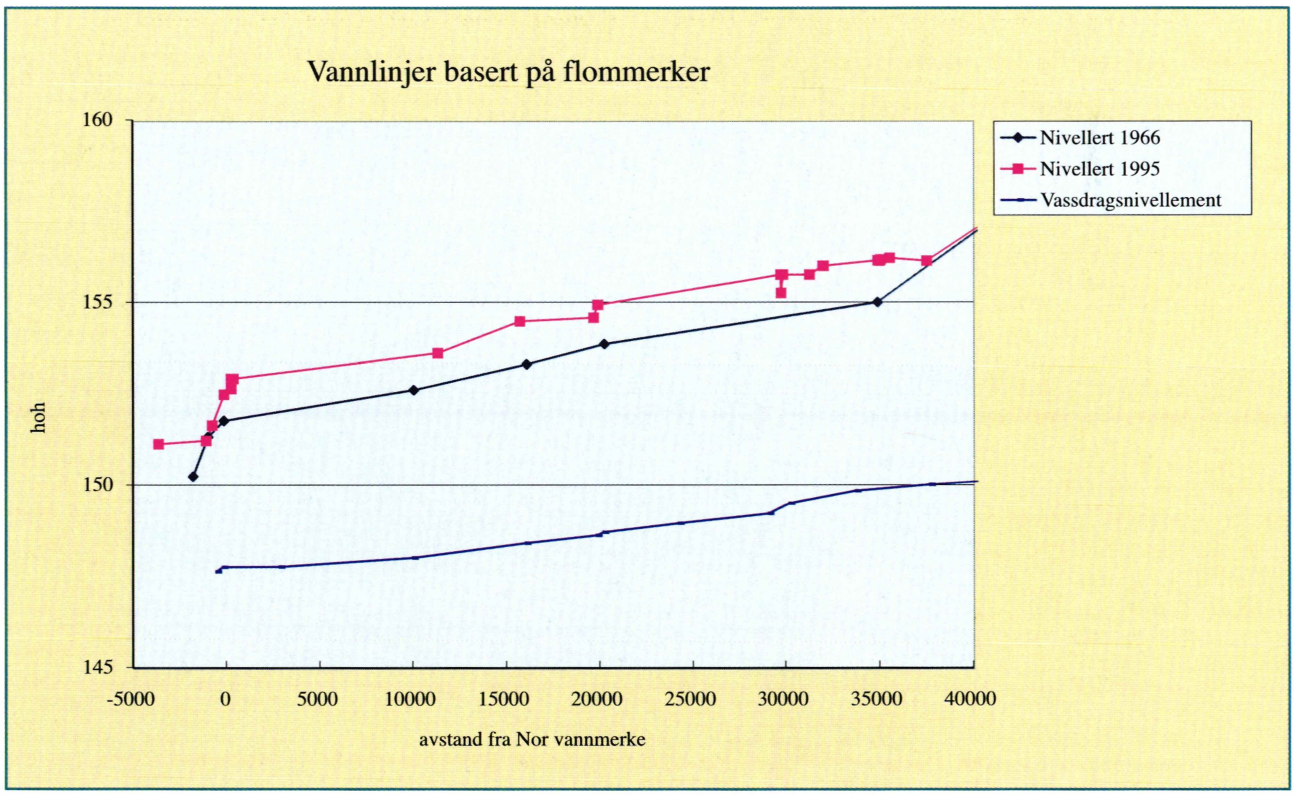
Det forutsettes at det finnes en stor flom å kalibrere den hydrauliske modellen mot, i dette tilfellet observasjoner fra 1966. Vi bruker ikke data fra 1995 til ytterligere tilpasning av modellen. De beregnete vannlinjer framgår av figur 37, der flommerkene fra 1995 og 1966 også er vist.

Det er relativt bra samsvar mellom observasjoner og beregnet vannlinje for 1995-flommen, kanskje med unntak for nedre del av modellen. I øvre ende av fossen er det avvik mellom observert og beregnet vannstand på ca 65 cm for 1966 og 45-90 cm for 1995-flom avhengig av hvilket punkt som anses mest representativt. En del av dette (ca 30 cm) avviket kan forklares ut fra at hastigheten på vannet i beregningspunktene er betydelig større enn i observasjonspunktene. Midlere hastighet i de nederste profilene er ca 2.5 m/s.

7.2.4 Parallelle vannlinjer

Når en ikke har tilgang til tverrprofiler, kan et alternativ være å basere seg på at vannlinjene for de flommer som skal analysere er parallelle med en kjent vannlinje. Denne vannlinjen kan komme fra vassdragsnivellementene, fra kart eller ved oppmåling i felt på noen utvalgte punkter. Dersom en bruker vassdragsnivellementene vil vannlinjen som regel representerer en relativt lav vassføring. Metoden består i at man definerer en vannstandsstigning i forhold til utgangslinjen. I dette eksemplet er det forutsatt at det finnes en vassføringskurve for et punkt i nedre ende av området. Det er forutsatt samme vassføring som i kap. 7.2.3, men vannstanden er nå tatt fra vassføringskurven for 2.2 Nor vannmerke som ligger like oppstrøms Norsfossen. Resultatet er vist i figur 38.

Det er et avvik mellom beregnet og observert vannstand. Avviket er midtveis mellom Norsfossen og Flisa ca 1.2 m for 1966-flommen og ca 1.5 m for 1995-flommen. Det ser ut til at fallet på flomvannstandene øker noe i forhold til lavvannslinjen omkring 10 km oppstrøms Norsfossen. Dette kan ha sammenheng med en innsnev-



Figur 36 Observerte vannlinjer for en strekning i Glomma oppstrøms Nor for flommene i 1966 og 1995.

Figure 36 Observed water surface profiles for a Glomma reach upstream Nor for the 1966 and 1995 floods.

ring omkring Oppåkersundet sør for Kirkenær (-10 km i figur 38).

Det er ca 70 cm vannstandsforskjell mellom 1966-flom og 1995-flom ved Nor (vannstand henholdsvis 151.66 og 152.36). En vannlinje parallelt med flommen i 1966 vil ligge nær men noe under observasjonene fra 1995 (figur 39). Feilene man får ved å benytte parallelle vannlinjer skyldes i hovedsak forskjeller i hastighetsvariasjonene langs elva på de ulike vannstandene. Denne overslagsmetoden er best for strekninger der elva har en noenlunde konstant bredde. Dessuten vil feilen ved å parallellforskyve vannlinjer være noe større på strekninger der det ved flommer kan oppstå oversvømmelse slik at vannet går ut over sitt normale leie.

Feilene man får ved å benytte parallelle vannlinjer skyldes i hovedsak forskjeller i hastighetsvariasjonene langs elveprofilet på de ulike vannstandene.

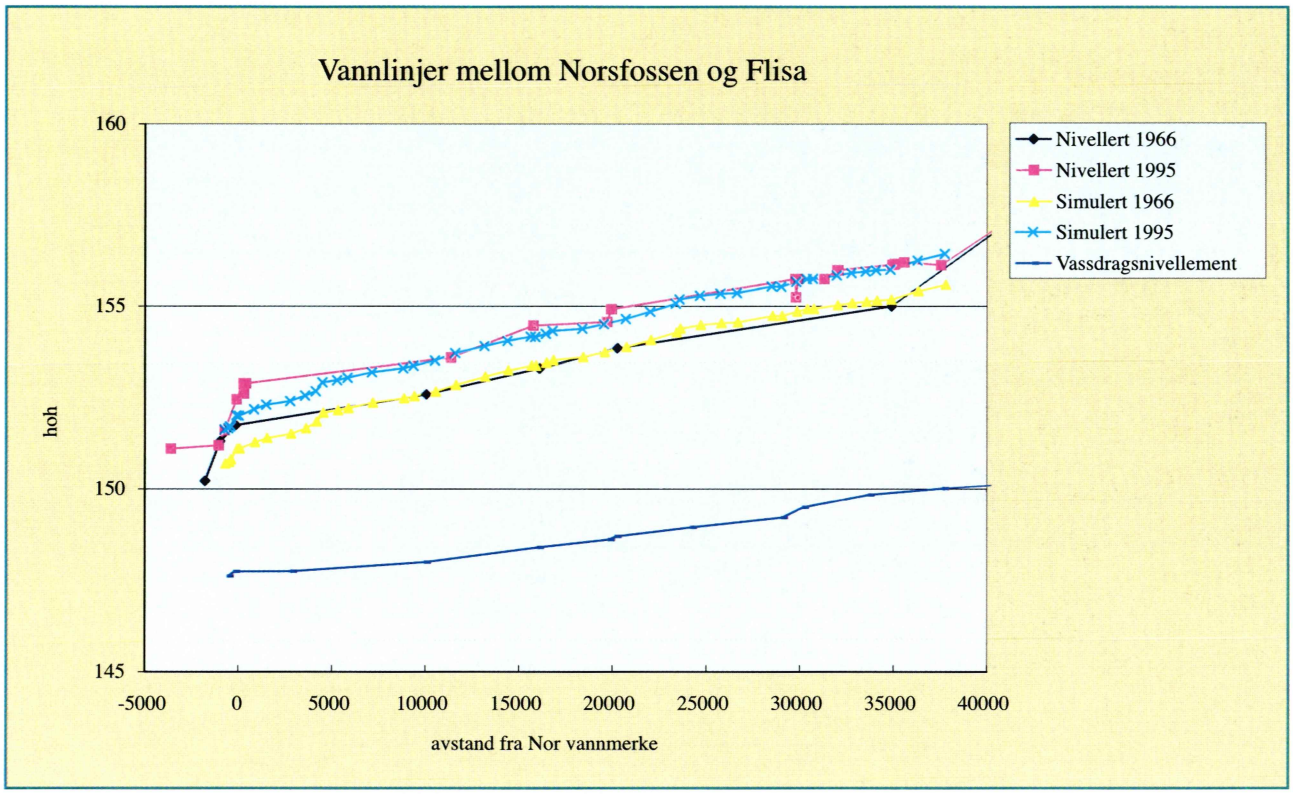
7.3 Nøyaktigheten av beregnete vannlinjer

7.3.1 Studie utført av Hydrologic Engineering Centre

I en studie fra USA er det utført omfattende undersøkelser for å beregne usikkerheten i beregnede vannlinjer (Burnham & Davis 1986).

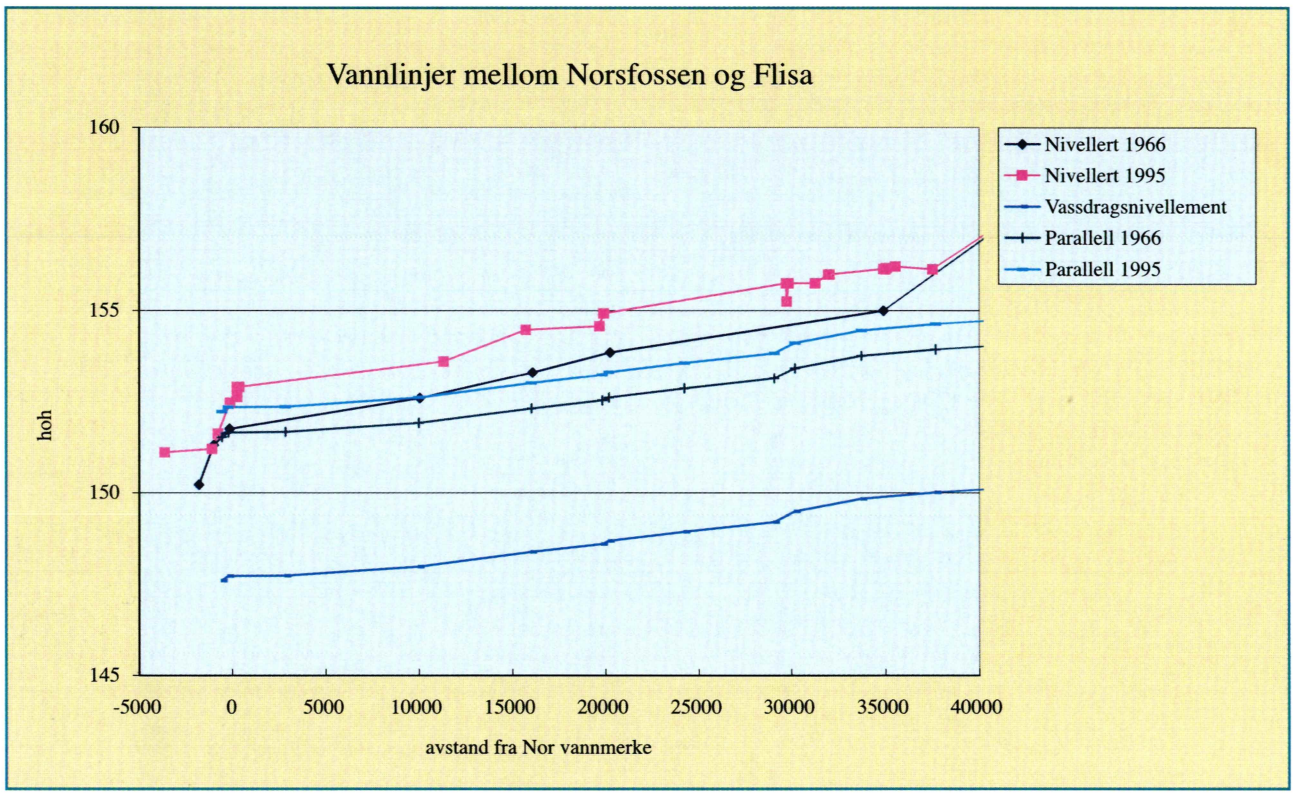
Utgangspunktet for studien var å kunne anslå feilen i beregnet vannlinje som funksjon av unøyaktighet i profilene, Manningtall (*M*) og elvas hydrauliske parametre. Til denne undersøkelsen er HEC-2 brukt. Bare underkritisk strømning er vurdert og økende feil pga bruer, kulverter og lignende er ikke vurdert.

Det ble brukt Monte Carlo analyse for å estimere feilene i vannlinjeberegningene basert på statistiske metoder. Inngangsdataene til vannlinjeberegningene er målte eller estimerte data og har feil i forhold til virkelige verdier. Siden feilene i inngangsdata er ukjent så er også feilen i de beregnede vannlinjer ukjent. Dette problemet blir behandlet i analysen ved å anta at inngangsvariablene er tilfeldig trukket ut fra en populasjon med realistiske datasett. På grunnlag av dette kan det utvikles regresjonsligninger som viser forholdet mellom unøyaktighet i inngangsdata og feil i beregnet vannlinje.



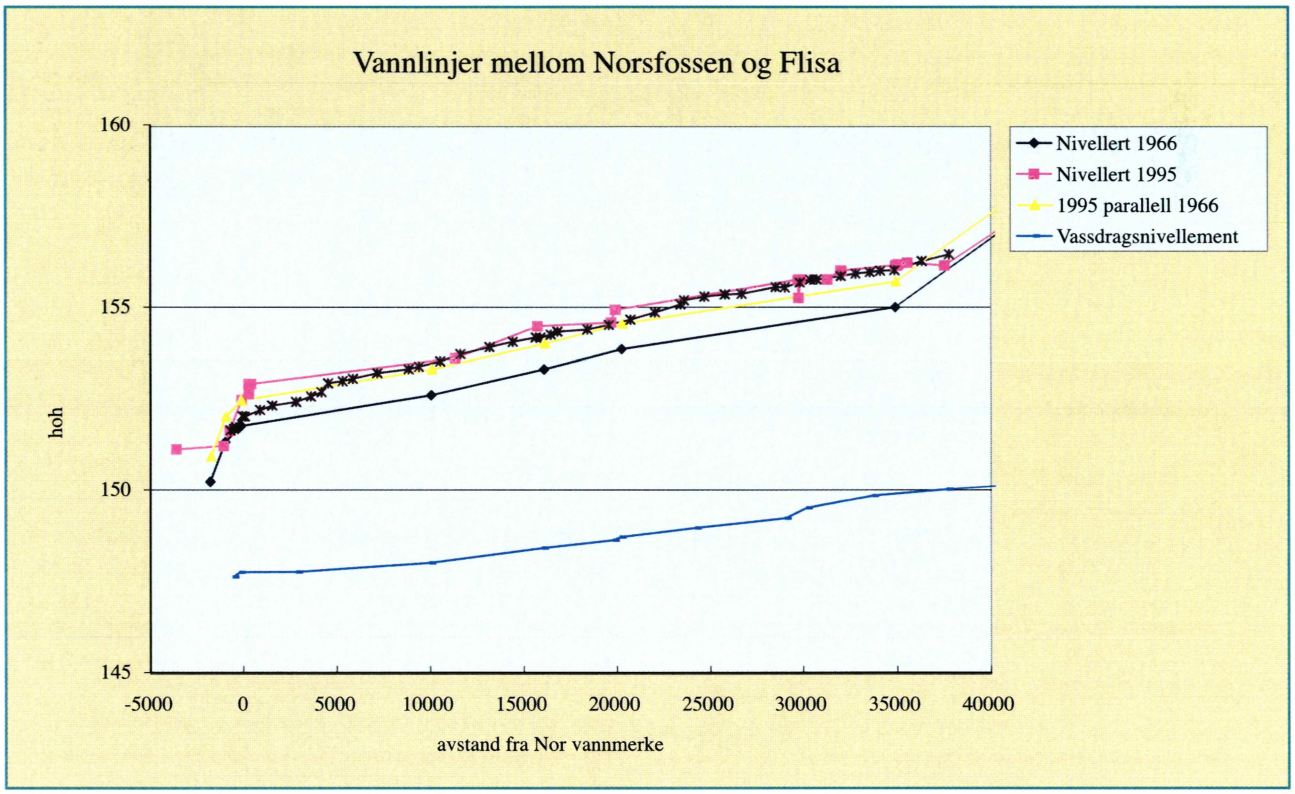
Figur 37 Beregnede vannlinjer for Glomma oppstrøms Nor sammenlignet med flommerker

Figure 37 Calculated water surface profiles for Glomma upstream Nor, compared with flood marks.



Figur 38 Vannlinjer oppstrøms Nor basert på parallellforskyning av normalvannstand.

Figure 38 Water surface profiles upstream Nor based on parallel shift of normal water stage



Figur 39 Vannlinje for flommen i 1995, basert på parallellforskyvning av vannstandene fra 1966.

Figure 39 Water surface profile for the 1995 flood, based on parallel shift of the 1966 flood.

7.3.1.1 Usikkerhet i tverrprofildata

Som grunnlag for undersøkelsene forutsettes det at profiler oppmålt med landmålingsinstrumenter er en nøyaktig beskrivelse av tverrprofilet. Profiler tatt opp fotogrammetrisk og fra kotekart, er basert på landmålingsstandarder i USA.

For topografiske kart gjelder følgende:

- Minimum 90 % av kotene skal ligge innenfor en halv ekvidistanse i forhold de virkelige verdier.
- Alle kotene skal ha maksimalt en ekvidistanse avvik i forhold til virkelige verdier.

Fotogrammetrisk opptak av tverrprofiler forutsettes *også tatt opp i bestemte høydeintervall.* Her er kravet at 90% av punkthøydene skal ha en maksimalt avvik på $^1/_4$ av ekvidistansen i forhold til virkelige verdier, og alle verdier skal ligge innenfor en halv ekvidistanses avvik. Unntaket er at for 5-fot intervallet så skal 90% av punkthøydene ha mindre enn 1 fot avvik og at ingen punkthøyder skal ha et større avvik enn 2 fot.

7.3.1.2 Manningtall

Statistisk materiale om fastsettelse av Manning-tallet M var ikke tilgjengelig da undersøkelsen startet. Det var derfor nødvendig å utvikle sannsynlighetsfunksjoner for bruk i Monte Carlo simuleringen. Ut fra ulike eksperimenter ble det satt et pålitelighetstall for M:

$N_r = 0$	M-verdien er kjent eksakt.
$N_r = 0.5$	Det er lagt ned et stort arbeide i å fastslå M, men det var ikke mulig å kalibrere den helt nøyaktig. Moderat sikkerhet i estimatet av M.
$N_r = 1.0$	M er anslått ut fra bilder eller befaring i felt. Lav sikkerhet i estimatet av M.

Ut fra dette er det utviklet regresjonsligninger for å kunne estimere feilen i den beregnede vannlinjen. En rekke andre hydrauliske parametre som påvirker vannlinjeberegningene er også undersøkt, bla. 100-års flommen, toppvidde av tverrprofilet, middeldybde ("hydraulisk dybde"), og bunnhelningen i elva. De mest signifikante av disse er middeldybde og bunnhelning.

E_{middel}	[m]:	Midlere absolutt feil i beregnet vannlinje
E_{max}	[m]:	Maksimal absolutt feil i beregnet vannlinje
J_D	[m]:	Middeldybde (areal av tverrsnittet som er dekket med vann dividert på toppvidde i tverrprofilet
I	[‰]:	Bunnhelning av elva
N_r:		Pålitelighetsestimat av M etter en skala fra 0 til 1.0 (se over)
S_n:		Ekvidistanse i m

Ut fra dette kan følgende regresjonsligninger for ulike datainnsamlingsmetoder settes opp (konstanter omregnet til det metriske systemet).

Data fra landmåling:

$$E_{middel} = 0.057 J_D^{0.6} I^{0.11} (5.0\, N_r)^{0.65} \quad (7.1)$$

$$E_{max} = 1.66\, E_{middel}^{0.8} \quad (7.2)$$

Data fra fotogrammetriske tverrprofiler der punktene er innmålt i faste høydeintervaller:

$$E_{middel} = 0.057 J_D^{0.6} I^{0.11} (5.0.N_r + 0.328\, S_n)^{0.65} \quad (7.3)$$

$$E_{max} = 1.66\, E_{middel}^{0.8} \quad (7.4)$$

For det spesialtilfellet at M er nøyaktig kjent så er det funnet en bedre regresjonsligning:

$$E_{middel} = 0.02\, I^{0.49} S_n^{0.83} \quad (7.5)$$

Tverrprofildata konstruert ut fra topografiske kart

$$E_{middel} = 0.258\, J_D^{0.35} I^{0.13} (N_r + 0.328\, S_n) \quad (7.6)$$

$$E_{max} = 2.05\, E_{middel}^{0.8} \quad (7.7)$$

For det spesialtilfellet at M er nøyaktig kjent så er det funnet en bedre regresjonsligning:

$$E_{middel} = 0.076\, I^{0.23} S_n^{1.18} \quad (7.8)$$

Eksempler:

a) Hele profilet er målt med landmålingsutstyr slik at formel (7.1) kan benyttes. M er rimelig bra kalibrert, $N_r = 0.5$. Elva har en helning på 1.5 ‰ og en hydraulisk dybde på 3 m. Estimatet av middelfeilen blir 0.20 m.

b) Hele tverrprofilet er tatt ut fra topografiske kart. Formel (7.6) benyttes. Ekvidistanse er 1 m, ellers er parametrene som i forgående tilfeller. Estimatet av middelfeilen blir 0.33 m.

7.3.1.3 Konklusjoner

Tverrprofiler tatt opp fotogrammetrisk og fra topografiske kart gir en rimelig god nøyaktighet. Tverrprofiler som er tatt opp fotogrammetrisk har omtrent dobbelt så god nøyaktighet som profiler tatt ut fra topografiske kart når de er tatt opp med samme ekvidistanse.

God kalibrering av M er avgjørende for å få en god nøyaktighet på den beregnede vannlinjen. Det er derfor viktig å få inn gode kalibreringsdata slik at M kan bestemmes så nøyaktig som mulig.

Selv om de benyttede tverrprofiler er nøyaktige og er til-

strekkelig for å beskrive elvegeometrien, så kan betydelige beregningsfeil oppstå pga. for få beregningstrinn. Det anbefales derfor å legge inn interpolerte tverrprofil (ekstra beregningstrinn) mellom de oppmålte tverrprofil.

7.3.2 Vurdering av resultatene fra Glomma

Studien fra Glomma mellom Norsfoss og Flisa indikerer at parallelle vannlinjer ut fra vassdragsnivellementet ikke gir tilfredsstillende resultat til bruk i flomsonekartlegging. Dersom en har gode data for store flommer ser det ut til at en kan få resultater som ligger nær det en kan oppnå med vannlinjeberegning i hydraulisk modell. Det er også naturlig så lenge en har observasjoner som dekker de flomstørrelse en ønsker å simulere, idet den hydraulisk modellen regelmessig blir kalibrert inn mot de samme dataene. For å gi sikrere svar på forventet kvalitet med de ulike typene datasett er det nødvendig med en serie analyser fra representative vassdrag i Norge.

Hydraulisk simulering viser særlig sin styrke nå en har begrenset med observasjoner. Modellen kan fange opp endringer i strømningsbildet og konsekvensene i form av vannstand ved større vassføringer enn en kan oppnå ved å parallellforskyve i forhold til en observert linje.

Resultatene fra denne testen er knyttet til at man har sikre data for minst ett punkt på strekningen. Dersom en ikke har dette, må man gå via en eller annen form for estimering av vannstand, der et vanlig utgangspunkt ved vannlinjeberegning er enten kritisk dybde eller normaldybde.

I forhold til studien fra USA, kan det være interessant å se hvilke resultater regresjonslikningene derfra vil få, gitt de aktuelle data fra Glomma. Tverrprofilene er i vårt tilfelle dels basert på landmåling i felt, del på fotogrammetrisk definerte punkter. I første omgang er det valgt å bruke likning (7.1) og (7.2), dvs som om alle profiler var basert på landmåling.

Følgende inngangsdata er benyttet:

J_{D1966}:	6.4 m
J_{D1995}:	7.0 m
I:	0.06 ‰
N_r:	0.6 (mye arbeid lagt ned i kalibrering av M, men ikke 'perfekt' tilpasning)

Ut fra dette får vi:

$E_{middel\ 1966}$:	0.26 m
$E_{max\ 1966}$:	0.57 m
$E_{middel\ 1995}$:	0.27 m
$E_{max\ 1995}$:	0.59 m

Det ser ut til at resultatene i kapittel 7.2.3 ligger innenfor de verdier som kunne forventes i henhold til studien fra USA.

8. Flomkart og flomsonering

8.1 Innledning

NVE utarbeidet sitt første flomsonekart på grunnlag av en digital terrengmodell og ved hjelp av digital teknikk for å beregne flomflaten første gang for Leira i 1993 (Krokli & Voksø 1994). Metoden består i å generere digitale terrengmodeller og flomflater og lage differansegrid mellom disse. Det avgjørende for resultatet er hvor riktig terrengmodell og flomflate en får beregnet. I kapittel 8.3 er en gjennomgang og diskusjon av de tilgjengelig metodene i Arc/Info for å generere terrengmodeller.

Å bestemme flomutsatt areal med et gitt gjentaksintervall har vært gjort lenge ved hjelp av manuelle metoder. I USA startet kartlegging av flomutsatt areal for 100-årsflommen for 30 år siden. Den simulerte vannlinjen overføres manuelt til kartet. Linjen blir deretter digitalisert og benyttes i digital kartfremstilling (FEMA 1995). Det planlegges at dette arbeidet skal automatiseres mer og man har satt i gang utprøving av metoder ved USGS (Jones m.fl. 1998). NVE og SMHI utarbeidet sine metoder til å bestemme flomutsatt areal i standard Arc/Info omtrent på samme tid. Ved DHI er det utviklet en kopling mellom simuleringsprogrammet Mike 11 og GIS. Resultatet er en digital presentasjon av flomutsatt areal fra den enkelte hydrauliske simulering (DHI 1994). Den metoden for generering av flomflate som benyttes i NVE bygger på et samarbeid med SMHI og kurs hos DHI i Mike11 og Arc/Info GIS.

8.2 Metodikk

Hensikten med flomsonekart er å identifisere de arealer som er flomutsatt og å presentere resultatet på kart. De flomutsatte arealene ligger langs elva og under den kotehøyden som den aktuelle flommen vil ha. Til analysen trenger en da kjennskap til høyden på terrenget langs elva og vannstanden i elva for den aktuelle flommen.

Kvaliteten på resultatet er avhengig av hvor god terrengmodellen (beskrivelse av terrenget i en rutenettsmodell) er, hvor korrekt vannlinjen er for den spesifiserte flommen og hvor god selve metoden for å trekke de to terrengmodellen fra hverandre er. I den foreliggende analysen er målsettingen å finne sammenhengen mellom kvalitet på terrengmodellen og resultat av flomsoneanalysen. Det er i liten grad brukt simulerte vannlinjer, vannlinjer er beregnet utfra innmålte vannstandspunkter langs elva under flommene i 1966 og i 1995. I tillegg er normal vannstand overført fra manuelle vassdragsnivellement til digitale vannlinjer ved parallellforskyvning. Det vil si at vannlinja beregnet for normal vannstand er hevet en viss antall meter (eks. 3.5 meter) langs hele strekningen. For disse flomsituasjoner er flomsonekart utarbeidet fra 3 terrengmodeller basert på forskjellig høydegrunnlag. Hovedvekten legges på å kunne beskrive kvalitetsforskjell på resultat ved bruk av terrengmodeller utarbeidet fra ulike grunnlag. Terrengmodellen utarbeidet fra detaljert høyde og med bruk av terrenglinjer (se kap. 8.3) regnes som fasit i analysen. Under flommen våren 1995 på Østlandet ble flommen vertikalfotografert så nær kulminasjon som mulig. Disse bildene ble brukt som underlag da Statens kartverk digitaliserte flomlinjen. Utstrekningen av flommen i 1995 er derfor kjent. En sammenligning av flomarealkartet for 1995 flommen og flomsonekartet basert på innmålte flomhøyder fra den samme flommen vil bli kommentert.

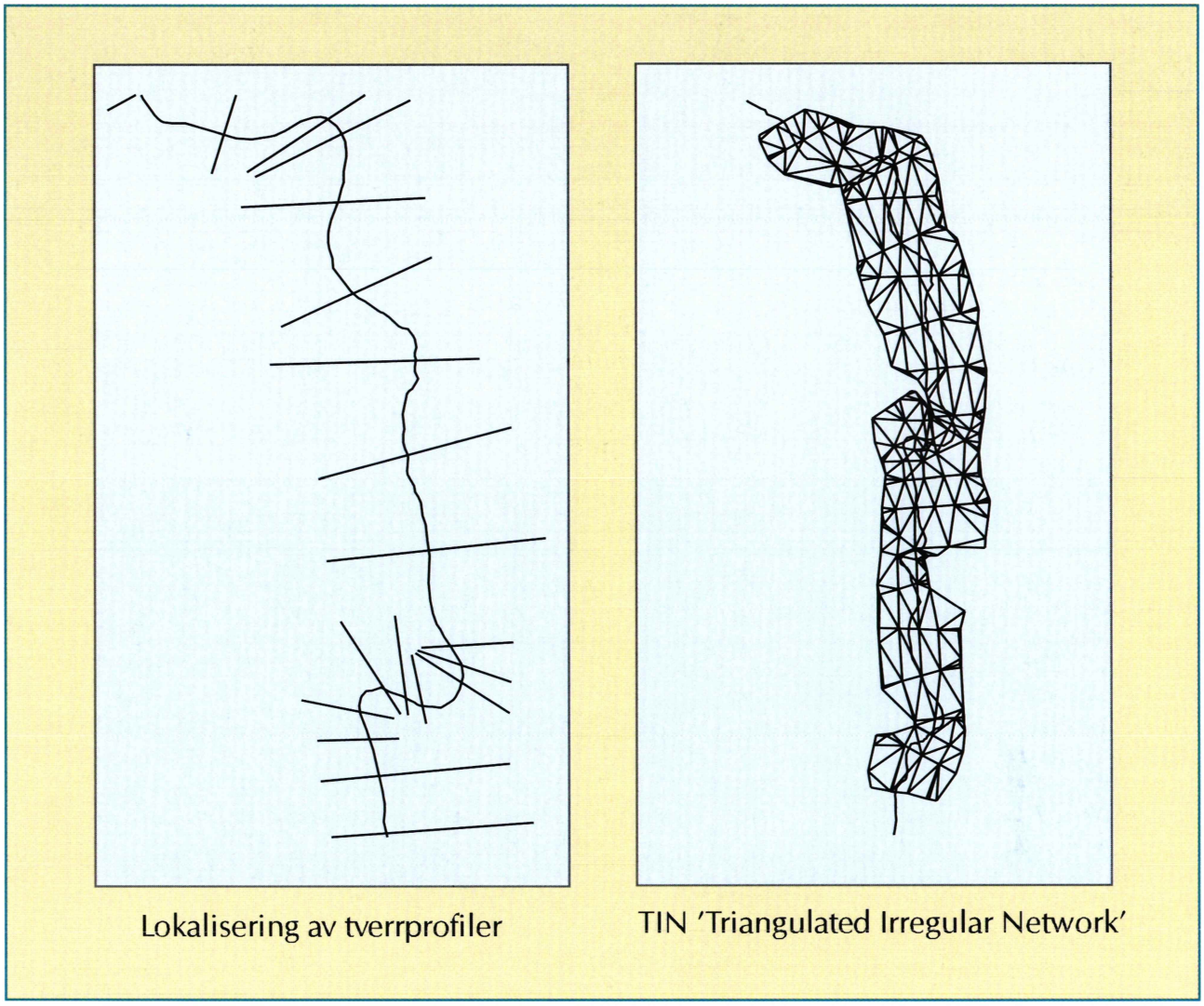
8.2.1 Metoder for generering av vannflater

I analysen er elva representert som en linje med retning nedstrøms. Den er generert som en matematisk midtlinje av den digitale representasjonen av elvebredden ved hjelp av Thiessen-polygoner i Arc/Info. Fra vassdragsnivellementene, observerte eller simulerte vannlinjer hentes vannstander for den aktuelle flomepisoden som stedfestes og knyttes til midtlinja.

Vannlinja som genereres langs midtlinja må utvides til en flate for å finne terrenget langs elva som ligger under den aktuelle vannstanden. Det finnes det ingen automatisk metode for å utvide en linje til en flate der høydeverdiene fra midtlinja knyttes til punkter normalt på linja. Derfor benyttes en halvautomatisk metode.

I elvas lengdeprofil finner man punkter der elvas fallforhold endrer karakter. Linjer legges på tvers av elva slik at endringen i vannstanden er lineær mellom linjene. Antall linjer utvides slik at det er tilnærmet lik avstand mellom linjene. Vannstanden knyttes til tverrlinjene. Den hentes fra de punktene der midtlinja skjærer tverrlinjene. Vannstandsverdiene er interpolerte verdier langs midtlinja mellom kjente vannstandspunkter (nivellementspunkter, observerte eller simulerte flomverdier). Linjene deles opp i linjestykker som er like lange som avstanden i luftlinje mellom tverrlinjene. På dette grunnlaget lages en terrengmodell av TIN-type (kapittel 8.5.4), se figur 40. Dette gir best resultater ved interpolasjon. Metoden er videreutviklet fra tilsvarende arbeid ved Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI) og Dansk Hydraulisk Institutt (DHI).

Problemene i denne del av analysen er knyttet til hvor tverrlinjene skal legges. Tverrlinjene må ikke krysse hverandre da man da vil komme i konflikt med vannstandsverdiene. I en meandrerende elv er dette vanskelig å



Figur 40 Etablering av terrengmodell

Figure 40 Establishing a digital terrain model

unngå. Problemet løses ved å lage et omkransende polygon som avgrenser analyseområdet og sørger for at tverrlinjene ikke skjærer hverandre.

På grunnlag av TIN-modellen lages et regulært høydegrid som beskriver vannstanden i ett belte langs elva ved en spesifisert flomsituasjon. I denne analysene benyttes celler (ruter/pixler i en grid-modell) som er 5x5 meter.

8.2.2 Flomsonekart for ulike vannflater og på ulike terrengmodeller

Grunnlaget for flomsoneanalysen er en digital terrengmodell og et tilsvarende høydegrid som beskriver den aktuelle vannflaten. De flomutsatte områdene er summen av alle cellene der vannflaten er høyere enn terrenget (vannflate – terreng). De cellene som får positiv verdi er areal som er flomutsatt.

Problemene i analysen knytter seg til terrenget bak en rygg (terrenglinjer) eller flomverk langs elva. Slik det blir behandlet i denne analysen blir det arealet betegnet som flomutsatt selv om terrenget ligger bak en beskyttende rygg. Dersom høyden på flomverk eller terrenglinjer er kjent, kan man vise terrenget bak flomverket/terrenglinjen med en egen skravur når flomverkets høyde er over aktuell vannstand.

8.3 Datakilder for generering av terrengmodeller

8.3.1 Datakilder

Flere datakilder kan være utgangspunkt for å lage terrengmodeller. Det mest vanlige er gjennom flybilder og fotogrammetri, men det finnes flere muligheter i tillegg:

- laserscanning fra fly
- optiske- og radarbilder fra fly og satellitt
- landmåling/GPS
- eksisterende kart

I dag blir de fleste dataene avledet fra fotogrammetri, landmåling og digitaliserte høydekurver.

Valget av datakilde og teknikk for innsamling av data er kritisk med hensyn på kvaliteten til terrengmodellen. Dataene som brukes til å lage en terrengmodell bør i tillegg til høydeverdier, inneholde informasjon som beskriver formen på terrenget. Denne informasjonen kalles gjerne terrenglinjer. Terrenglinjer er linjer eller punkter i terrenget som bidrar sterkt til terrengets geometriske form. Eksempler på terrenglinjer kan være rygger, elver og andre former som bryter en ellers kontinuerlig overflate - man forventer en forandring i eksposisjon eller helning ved en terrenglinje.

Uavhengig av hvilken datainnsamlingsmetode som er brukt for å innhente dataene til terrengmodellen, har man i de fleste tilfelle mer data enn nødvendig for å konstruere en god terrengmodell. Mye data betyr at prosesseringstiden øker.

Når man i dag bestiller høydedata fra et kartfirma, får man gjerne produktet levert som punkter og terrenglinjer eller som høydekoter.

Dersom man skal lage terrengmodell uten ny kartlegging, kan man digitalisere eller scanne eksisterende papirkart med koter. Ved scanning blir kotene først behandlet som rasterdata og deretter vektorisert. Ved bruk av høydekoter er det kotetettheten (ekvidistansen) som er avgjørende for kvaliteten til terrengmodellen. Større ekvidistanse gir færre punkter og derfor en grovere terrengmodell sammenliknet med et datasett med mindre ekvidistanse.

For norske forhold er det mest aktuelt å bruke høydekoter fra økonomisk kartverk (5 m ekv.) og hovedkartserien N50 (20 m ekv.). Kvaliteten på en terrengmodell laget fra N50 kart tilsvarer i stor grad kvaliteten til det landsdekkende høydegriddet som Statens kartverk har laget. Dette produktet har en usikkerhet i absolutt høyde på +/- 20 m.

Tradisjonelt er det høydekoter folk tenker på når de tenker på hva som er nødvendig for å lage en terrengmodell, men det kan like gjerne være punkter med kjente koordinater i planet med en høydeverdi. Fordelen med punkter er at de gjerne er jevnt fordelt over et område.

8.3.2 Kostnader for høydegrunnlag

Innkjøp av detaljert høyde er kostbart. Økt konkurranse og ny teknologi innen kartleggingsbransjen har imidlertid medført at prisene på høydedata har sunket betraktelig det siste året. I tillegg har annen teknologi som laser og Insar (Interferometric Synthetic Aperture Radar) for innsamling av høydedata begynt å ta opp konkurransen med de tradisjonelle kartleggingsfirmaene. Omtrentlig kostnad ved innkjøp av høydedata er:

- Fotogrammetri: 4000 - 8000 kr/km^2
- Laserscanning: 5000 kr/km^2
- Insar: 2500 kr/km^2

Prisene for fotogrammetri baserer seg på tilbud innhentet i forbindelse med GEOVEKST-prosjekter.

Pris pr arealenhet for laserscanning er i større grad enn fotogrammetri avhengig av arealet som skal kartlegges fordi det foreligger en startkostnad. Denne kostnaden er uavhengig av størrelsen på det kartlagte området. Erfaringer med laserdata tilsier at kostnadene for laserscannede data sannsynligvis vil bli høyere p.g.a. økt tidsforbruk på etterprosessering av dataene.

Når det gjelder Insar baserer prisen seg på et prosjektforslag som ble forelagt Flomsonekartprosjektet i NVE av NORUT-IT.

8.4 Datagrunnlag for terrengmodellene

Som grunnlag for analysene er det benyttet fem forskjellige høydegrunnlag:

- Nykonstruert høydegrunnlag ved tradisjonelle fotogrammetriske metoder
- Høydegrunnlag fra laserscanning
- Terrengmodell generert fra 5 m koter
- Terrengmodell generert fra 5 m koter og høydeverdier hentet fra elvebredd og veier
- Terrengmodell generert fra 20 m koter fra hovedkartserien N50 i målestokk 1:50 000

Felles for alle høydegrunnlagene var at de i utgangspunktet er representert som punkter og/eller linjer. I analysen er alle dataene konvertert til rasterdata (grid). Det nykonstruerte høydegrunnlaget består av punkter og terrenglinjer med høydeverdi. Punktene ligger med 5 m avstand. Punktverdiene er utelatt der det finnes terrenglinjer. Et avledet produkt her er høydekoter med 1 m ekvidistanse.

Laserdataene er et tilfeldig utvalg av punkter med kjent høydeverdi. I motsetning til gridpunktene fra nykonstruksjonen, foreligger laserdataene ikke som regulære punkter (samme avstand mellom punktene i x- og y-retning).

For Flisa og Trysil fantes det ikke digitale høydekurver fra økonomisk kartverk (ØK) over det aktuelle området. For å få et datagrunnlag tilsvarende ØK ble det derfor plukket ut koter med 5 m ekvidistanse fra nykonstruksjonen. Dette tilsvarer høydekotene slik de ville ha vært i ØK.

Høydekoter med ekvidistanse 20 m (digitalt) er kjøpt inn fra Statens kartverk.

8.5 Metoder for generering av terrengmodeller

Nedenfor følger en kort beskrivelse av ulike metoder for å lage terrengmodeller. Dette er langt fra alle tilgjengelige metoder, men det er lagt vekt på metoder som er tilgjengelige i Arc/Info.

8.5.1 IDW

IDW er en interpolasjonsmetode hvor vektene er omvendt proporsjonal med avstanden (Inverse Distance Weighted). Det betyr at metoden tar hensyn til avstanden fra punktene med kjent høydeverdi når høyden i et nytt punkt skal interpoleres. Søkeradius, evt. antall punkter som skal brukes, styres av brukeren.

Med IDW er det også muligheter for å legge inn terrenglinjer uten høydeverdi. Med denne opsjonen vil rutinen bare tillegge punkter som ligger på samme side som prosesseringscellen vekt ved interpolasjon av høyde i det ukjente punktet. Ulempen med å legge inn terrenglinjer er at eksekveringstiden øker, men resultatet er en bedre terrengmodell.

8.5.2 Kriging

Kriging som interpolasjonsmetode ble opprinnelig utviklet for bruk i gruveindustrien, men har i de senere årene også funnet veien inn i geovitenskapen. De fleste større programpakkene for behandling av geografiske data har implementert rutiner for kriging. I kriging forsøker man å interpolere en overflate best mulig, på bakgrunn av diskrete målepunkt.

Kriging baserer seg på at den romlige variasjonen av en variabel består av tre komponenter:
1. En strukturell komponent
2. En stokastisk tilfeldig komponent
3. Hvit støy

Semivariansen beskriver den romlige avhengigheten mellom prøver tatt langs en strekning. Et plott av semivarians mot avstand kalles et semivariogram. For å kunne bruke semivariansen i forbindelse med interpolasjon må det beregnes en teoretisk funksjon som best mulig er tilpasset den målte semivariansen. Denne funksjonen benyttes så til å bestemme interpolasjonsvekter for ethvert punkt i området mot observasjonspunktene. Kriging er en regneintensiv interpolasjonsmetode. En av fordelene med metoden er at man kan estimere standardfeil på de interpolerte punktene. For nærmere beskrivelse vises til Burrough (1986).

8.5.3 Topogrid

Topogrid er en relativt ny interpolsjonsmetode (Hutchinson 1989). Metoden er spesielt laget for å få en hydrologisk sett mest mulig korrekt terrengmodell. En av forutsetningene for metoden er bl.a. at alle forsenkninger i terrenget blir fjernet i den endelige terrengmodellen dersom de ikke på forhånd er definert som forsenkninger av brukeren.

Det kan brukes både koter og punktdata i denne modellen. I tillegg kan brukeren spesifisere tilleggsinformasjon som f.eks. elver og forsenkninger. Innsjøer kan også legges inn og da får alle cellene i sjøen samme verdi som gjennomsnittet av cellene langs omkretsen. Den generelle ulempen ved bruk av koter til interpolering av terrengmodeller, er at det mangler høydeinformasjon mellom kotene.

Fordelene ved metoden er at den gir gode muligheter for å verifisere den ferdige terrengmodellen. Bl.a. kan man generere datasett som viser de forsenkningene i terrenget som ikke har blitt fjernet ved interpoleringen, samt dreneringsmønster. Ved å sammenlikne dreneringsmønsteret med eksisterende elver og bekker, kan man få et mål på hvor god terrengmodellen er, samtidig som dreneringsmønsteret forteller noe om kvaliteten på dataene som er brukt ved interpoleringen.

Svakheten ved metoden er at den gir et dårlig resultat dersom det er langt mellom kotene, dvs. i flatt terreng. I tillegg kan man noen ganger oppleve at terrenget rundt høydekotene blir forsterket.

8.5.4 Triangulert irregulært nettverk (TIN)

En TIN-modell er i motsetning til de andre interpolasjonsmetodene basert på vektordata. Det vil si at terrengmodellen består av punkter og linjer. TIN-modellen er den eneste av metodene som kan bruke terrenglinjer med høydeverdi direkte i interpolasjonen av terrengmodellen. Slik dataene leveres fra kartprodusentene, dvs. som punkter og terrenglinjer, er dette en gunstig metode å bruke til å lage terrengmodeller.

I en TIN-modell er hvert punkt i inngangsdataene forbundet med sine to nærmeste naboer. Dette medfører at en TIN-modell er sammensatt av mange små trekanter (fasettmønster). På bakgrunn av hver enkel "fasett" kan det beregnes helning, eksposisjon etc. på samme måten som i et regulært høydegrid. Det er vanlig å konvertere en TIN-modell til et regulært høydegrid. Gevinsten ved dette er bl.a. en enklere datastruktur og kortere prosesseringstid.

8.5.5 Pointgrid

Dette er ikke noen interpolasjonsmetode, men en konvertering av punktdata til gridpunkter. Metoden er aktuell å bruke ved konvertering av SOSI-data (SOSI: Samordnet Opplegg for Stedfestet Informasjon - norsk standard for digitale kartdata) som er laget som punktdata. Dersom punktavstanden i SOSI-dataene er f.eks. fem meter, genererer man et grid med cellestørrelse 5 x 5 m og man sitter igjen med en ferdig terrengmodell. Metoden forutsetter at det ikke er "hull" i høydedataene. Er det hull i dataene må pointgrid kombineres eller erstattes av en annen metode.

8.6 Metoder brukt i denne studien

De nykonstruerte høydedataene ble levert som gridpunkter og terrenglinjer. Gridpunkt betyr at leverandøren av høydegrunnlaget har lagt et rutenett over terrenget og beregnet en høydeverdi i hver enkelt rute. For dataene fra Flisa var punktavstanden 7 meter, ellers har den vært 5 meter. Etter at høydeverdien for hver enkel rute ble beregnet, har man tatt ut terrenglinjer. I de enkeltrutene som tilsvarer en terrenglinje har man deretter fjernet høydeverdien. Det betyr at man har en kontinuerlig terrengmodell når gridpunktene kombineres med terrenglinjene.

For å unngå interpolasjon av gridpunktene ble det laget en terrengmodell direkte fra punktdataene med medtoden pointgrid i Arc/Info. Denne terrengmodellen vil inneholde hull der det forekommer terrenglinjer. For å tette hullene i denne terrengmodellen ble det laget en TIN-modell basert på både terrenglinjer og gridpunktene. Denne terrengmodellen ble deretter konvertert til et høydegrid, og hullene i den første modellen ble "tettet" med høydeverdiene i den nye terrengmodellen.

Kotene med 5 m og 20 m ekvidistanse ble konvertert til en terrengmodell med topogrid-rutinen i Arc/Info. Det ble eksperimentert litt med ulik parametersetting av rutinen, men ikke veldig mye. Det kunne vært brukt mer tid på å optimalisere datasettene for topogrid-rutinen. Bl.a. kan man legge inn tilleggsinformasjon om terrenglinjer, høyder fra elver og veier og utstrekningen av innsjøer. Dette er lagt inn i terrengmodellen fra 5 meterskoter for fire områder.

Som en test er forskjellene mellom to terrengmodeller laget med TIN og to terrengmodeller laget med topogrid for dataene fra Trysil og Alvdal undersøkt. Forskjellen mellom de ulike modellene er at høydeinformasjon fra veier er med i en av TIN-modellene og i en modell fra Topogrid, men utelatt i de to andre. Den store forskjellen mellom de to metodene er at TIN lagrer terrengmodellen som vektordata, mens Topogrid lagrer terrengmodellen som raster/grid. TIN modellen bevarer alle høydebærende punkter med sin opprinnelige høydeverdi, mens det med topogrid skjer en interpolasjon (forutsetter at punktene blir brukt som tilleggsinformasjon til koter). Siden det skjer en informasjonsreduksjon ved konvertering fra TIN til grid, er også den opprinnelige høydeverdien i TIN-modellen tatt med i beregningene.

For å undersøke de ulike terrengmodellene mot hverandre, ble standardfeilen beregnet. Punktene som ble brukt ved beregningen er de høydebærende punktene fra veier

Tabell 16 Standardfeil ved forskjellige interpolasjonsmetoder

Tabell 16 Standard error in different interpolation models

Datasett *Data set*	**Standardfeil, Trysil** *Standard error, Trysil m*	**Standardfeil, Alvdal** *Standard error, Alvdal m*
Grid fra TIN	1.27	1.26
Grid fra TOPOGRID	1.07	1.33
TIN	1.23	1.25
Grid fra TIN med tilleggsinformasjon*	0.85	
Grid fra TOPOGRID med tilleggsinformasjon*	1.07	0.96
TIN *	0.25	

* Punktene som er brukt ved beregning av standardfeilen er med i høydemodellen

som er utelatt i to av terrengmodellene. Tabell 16 viser resultatene av beregningen

Nærmere undersøkelser viste at det var stor forskjell på standardfeilen i de ulike terrengmodellene for Trysil. Det viste seg at avviket skyldtes en høydebærende linje som manglet høydeverdi. Ved generering av TIN modellene ble høydeverdien for omrisset av innsjøene brukt, mens det i Topogrid ikke blir tatt hensyn til høyden på omrisset. I Topogrid blir innsjøene tilordnet høydeverdi på grunnlag av en gjennomsnittsverdi på land rundt innsjøen. I stedet for å lage nye terrengmodeller ble standardfeil beregnet på nytt, denne gangen uten de fem punktene som lå rundt innsjøen.

Det er ikke enkelt å trekke noen klare konklusjoner på bakgrunn av tabell 16. For dataene fra Trysil gir Topogrid det beste resultatet, mens det for dataene fra Alvdal er TIN som gir best resultat. Som det framgår av tabellen bidrar de utelatte punktene ikke vesentlig for Topogrid når det gjelder dataene fra Trysil, mens det for Alvdal er større forskjell. Ved beregning av standardfeil for Trysil er det benyttet 1439 punkter, mens det for Alvdal er benyttet 15818 punkter. At standardfeilen for "Grid fra TIN*" og "TIN*" er mindre enn tilsvarende modell laget med Topogrid er ikke overraskende i lys av oppbygningen av en TIN datastruktur.

Ved tilordning av høydeverdi til punktene fra terrengmodellene (TINSPOT og LATTICESPOT i Arc/Info), skjer det en interpolasjon. Det er ikke undersøkt hvordan dette påvirker resultatet ved beregningen av standardfeil, men det framgår av tabellen at det er en differanse mellom estimert og observert høyde selv om høydeverdien beregnes direkte i TIN modellen. Denne differansen skal egentlig være null. Dersom det hadde vært store avvik mellom "TIN" og "Grid fra TIN", kan det skyldes cellestørrelsen som velges ved overgangen fra vektor- til rasterstruktur.

Wise (1998) påpeker at standardfeil er en ufullstendig måte å beskrive nøyaktighet på i en terrengmodell:

1. Normalt er den basert på et begrenset antall punkter

2. Små feil i høydeverdi kan gi store feil ved beregning av terrengparametrer som gradient og helningsretning

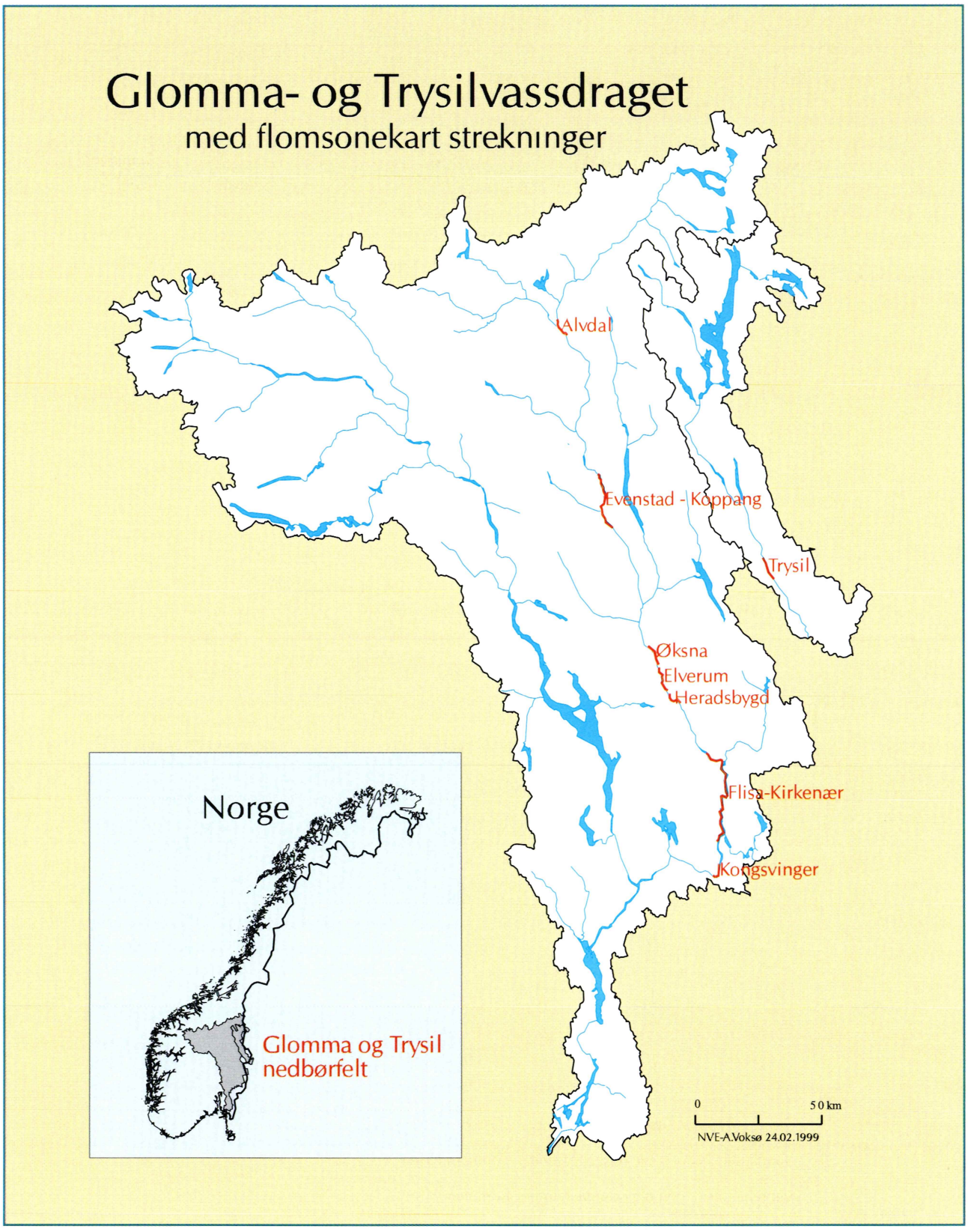
En annen årsak til variasjon mellom de ulike terrengmodellene, kan være måten terrengmodellen er laget på. Dette er mest aktuelt når differansen mellom to terrengmodeller sammenliknes. I dette tilfelle ved bruk av Topogrid og overgangen fra TIN til grid (TINLATTICE i Arc/Info). Begge metodene tillater brukeren å spesifisere origo og gridstørrelse/cellestørrelse, men standardmåten det blir gjort på er ikke den samme. Med TINLATTICE blir origo plassert i forhold til nedre venstre hjørne på TIN modellen. Topogrid plasserer også origo i nedre venstre hjørne i forhold til inngangsdataene (koter, punkter), men her blir utstrekningen av terrengmodellen en _ piksel større i alle retninger, sammenliknet med utstrekningen på inngangsdataene. Dette medfører at man ved å ta differansen mellom terrengmodeller laget med de to metodene, ikke riktig vet om det er den egentlige differansen man beregner, eller om det er differansen mellom nabopunkter.

8.7 Kartgrunnlag og nøyaktighet

Flomsonekart er utarbeidet for ni områder (figur 41) på tre ulike kartgrunnlag for en moderat, en stor og en ekstrem flom i hvert område (tabell 17). Flommene er valgt utfra hva som var tilgjengelig av data for strekningen. I alle tilfelle bortsett fra i Alvdal er flommene beskrevet som parallelle vannlinjer. Hvor mye vannstanden burde heves for å representere en flom med et gitt gjentaksintervall er hentet fra nærmeste vannmerke. Dersom dette ligger langt fra analyseområdet, vil den parallellforskyvningen antagelig ikke ha samme gjentaksintervall i analyseområdet som ved vannmerket. Angivelse av gjentaksintervall for de parallelle vannlinjene er derfor bare en pekepinn og flomsonekartet er ikke riktig for en flom med det gjentaksintervallet. I flomsoneanalysene har hovedhensikten vært å sammenligne resultatene ved bruk av ulike detaljering av terrenginformasjon, og i den sammenheng er det viktigst å velge ut ulike flomstørrelser til analysene. I tillegg finnes det flomlinjer fra 1966 og 1995 basert på observerte flomvannstander. Det er observert for få punkter til at flomlinjen blir riktig for korte strekninger. Spesielt mangler observasjoner i bunnen av fosser og også noen ganger på toppen. For alle elvestrekningene utenom Alvdal er flomlinjer fra 1995 og i noen tilfelle også fra 1966 benyttet. Disse representerer henholdsvis en stor flom (ca. 50 år for 1966) og en ekstrem flom (ca. 100-200 år for 1995). I Alvdal er resultatet fra en vannlinjeberegning utført i HYDRA-programmets F4-prosjekt for alle 3 flomepisodene. Flomkartene er gjengitt i vedlegg B, mens vannlinjene som er brukt i analysene er presentert som grafer i vedlegg C.

Flomsonekartet utarbeidet på grunnlag av detaljert høyde er regnet som riktig. Resultatet fra flomsonekart utarbeidet på grunnlag av terrengmodell generert fra 5 meters-koter er sammenlignet med flomsonekart fra detaljert høyde og forskjellene er analysert. For fire av områdene er flomsonekart også utarbeidet på grunnlag av en terrengmodell generert fra 5 meters-koter samt punkter på elvebredden og på veiene som har høydeverdier. Analysen skulle også inkludere bygninger i flomsonen, men for Elverum kommune mangler data om bygninger og de forskjellene er derfor ikke analysert for analyseområdene i den kommunen.

Flomsoneanalyse utføres langs elver og på de lavtliggende elveslettene. Hvordan disse blir beskrevet i de ulike terrengmodellene er viktig for resultatet.



Figur 41 Oversiktskart over Glomma og Trysilelva med strekninger som det er foretatt flomsoneanalyse for.

Figure 41 Map of Glomma and Trysil Rivers, showing the reaches where flood zone analysis has been carried out.

Tabell 17 Områdene som er analysert med informasjon om kartgrunnlag og vannlinjer (FKB – Felles KartBase der 5 meters-koter er standard).

Tabell 17 Analysed areas with information on map base and water levels (FKB - standardised map base with 5 m equidistanc.

Område *Area*	**Kommune** *Municipality*	**DTM detaljert høyde** *detailed base*	**DTM 5 meter** *5 m base*	**DTM 5 m m/høyder fra elver og veier** *5 m and add'l info*	**Vannstander** *Water levels*
Flisa	0425 Åsnes	Fotogrammetri	Utdrag fra 1 meter		+ 3.5 m 1966
Kirkenær	0423 Grue	Fotogrammetri	FKB		1995
Trysil	0428 Trysil	Fotogrammetri	Utdrag fra 1 meter	FKB	+ 3 m + 3.73 m 1995
Alvdal	0438 Alvdal	Laserdata	FKB	FKB	10, 50, 100 vannlinjer fra F4 for Folla og Glomma
Elverum	0427 Elverum	Laserdata	FKB	FKB	3 m + 3.9 m 1995
Øksna	0427 Elverum	Laserdata	FKB		+ 3 m + 3.9 m 1995
Heradsbygd	0427 Elverum	Laserdata	FKB	FKB	+ 3 m 1966 1995
Kongsvinger	0402 Kongsvinger	1 meter og laserdata	KB		+ 3 m 1966 1995
Koppang	0430 Stor-Elvdal	Laser	FKB		- 1m 1966 1995

Merknad: + 3 m – Vannstand er hevet parallelt fra vannstand i vassdragsnivellement med de angitte meter

- 1 m – Vannstand er senket 1 meter i forhold til vannstand i 1966

1966 – Vannstand slik den ble observert under flommen i 1966

1995 – Vannstand slik den ble observert under flommen i 1995

Karakteristisk for disse områdene er at de ligger lavest i forholdet til terrenget omkring og store områder kan være relativt flatt. En terrengmodell generert på grunnlag av 1 meters-koter eller punkter i tett grid vil være basert på mye høydeinformasjon om hele området. Det vil som oftest ikke være stor avstand mellom kotene og fra elva vil det være en kote nær elvebredden slik at de laveste punktene kommer med i modellen. Å beregne terrenghøyder gir ikke eksakte svar. Vegetasjon vil ofte ha en høyde som er vanskelig å anslå både ved bruk av tradisjonell fotogrammetri og fra laserdata. Detaljert høyde er basert på mye høydeinformasjon og gir så langt det er mulig en riktig beskrivelse av terrenget. I den foreliggende analysen regnes derfor terrengmodell fra det beste tilgjengelig grunnlag (1 meter eller gridpunkter) for å være fasit.

Terrengmodell basert på koter med 5 meter ekvidistanse er generert på grunnlag av mye mindre detaljert informasjon om høydeforholdene i området. De nærmeste kotene kan være langt fra elva og i flate områder vil det være stor avstand mellom kotene. Høyden i terrengmodellen er fastlagt som en lineær interpolasjon mellom kotene. Mellom kotene vil programmet ikke ha noe høydeinformasjon som kan brukes i genereringen og benytter trenden i fallforholdene i resten av terrenget som rettesnor for hvordan terrenget skal være.

Til bruk i analysen av terrengmodellene er det trukket 2 tverrprofiler over flomslettene i hvert analyseområde. Høydeverdiene fra alle terrengmodeller som er analysert i området (2 eller 3) samt vannstandene ved tverrprofilet for hver flomepisode er hentet fra modellene for hver 5 meter og presentert i en graf for hvert profil. Kartene med plassering av tverrprofilene over flomsletta og grafene er presentert i vedlegg D.

I Alvdal og Koppang (figur 42) gir interpolasjon mellom to koter med samme høyde et søkk i flomsletta som ikke stemmer med virkeligheten. Modellen har ikke informasjon til å fange opp forandringen i landskapet fra den bratte fjellsiden til en flat elveslette. I det øverste tverrsnittet i Øksna finnes det ikke høydekoter mellom 5 meters-kotene på hver sin side av elva. Programmet genererer bunnen av terrenget på bakgrunn av trenden i resten av landskapet som er svakt hellende. Deler av elvesletta er egentlig lavere, men programmet mangler høydeinformasjon til å fange opp de laveste partiene. De samme fenomener ser man i tverrsnittene tatt i Heradsbygda og i Trysil. Den laveste koten mangler i datasettet på tross av at i følge den detaljerte terrengmodellen er terrenget noen steder under den aktuelle 5 meters-koten. Hele området blir derfor liggende oppå det faktiske terreng i følge den detaljerte terrengmodellen og en mister informasjon om de laveste områdene i modellen. Tverrsnittet som er trukket litt lenger ned i utsnittet Øksna viser forbedringen av resultatet når en 5 meters-kote ligger nær elvebredden. Da får terrengmodellen med seg bunnen av terrenget mye mer riktig. Her er forskjellene mellom de to terrengmodellene beskrivelsen av terrenget mellom kotene, der den lineære interpolasjonen mellom 5 meters kotene gir middelhøyden i forhold til riktig terreng i hver rute, slik at alle terrengvariasjonene som er mellom kotene mistes.

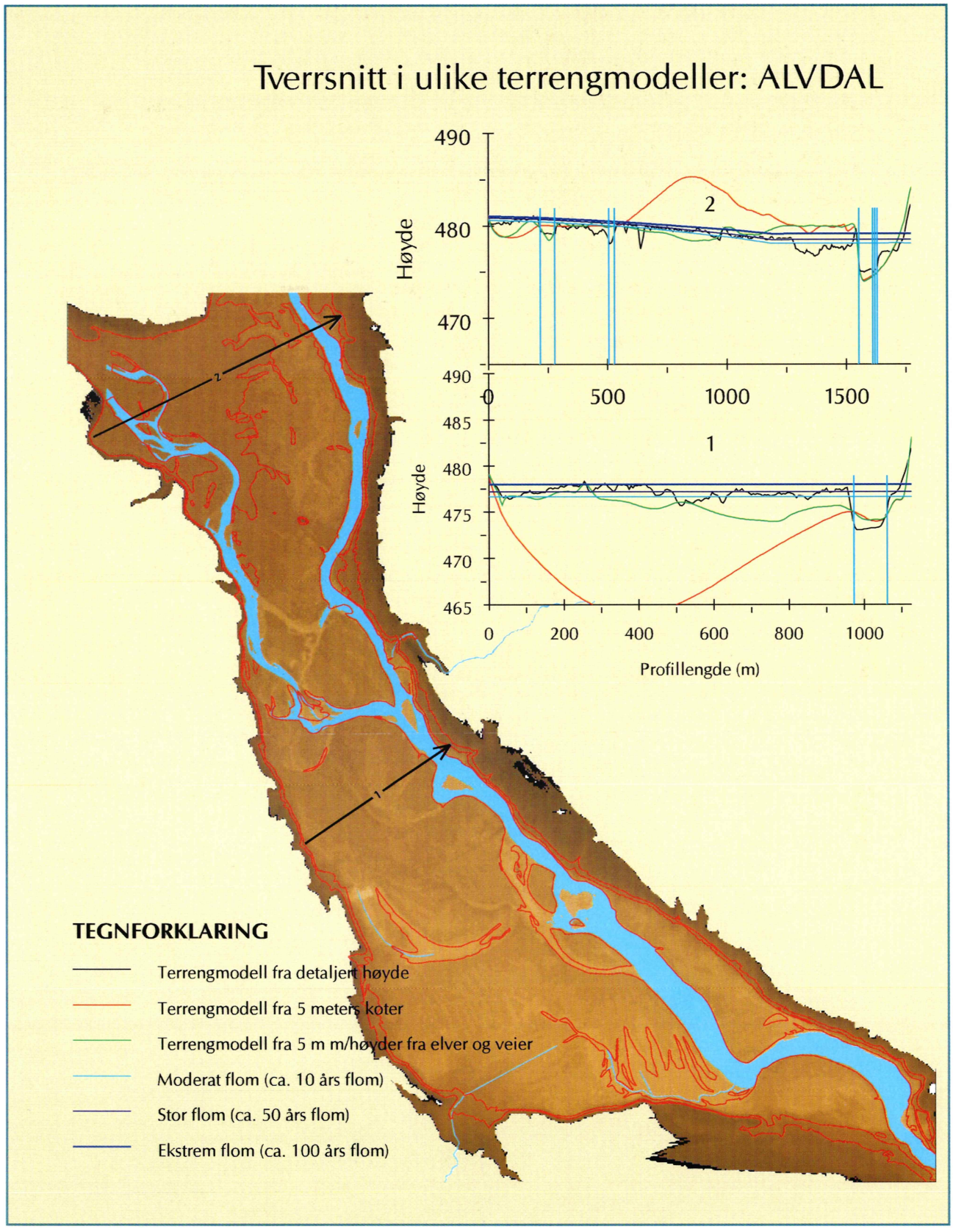
På samme måte som at de laveste områdene ikke kommer med i terrengbeskrivelsen, blir de høyeste områdene undervurdert. Det ser ut som om koller i landskapet mellom 5 meters-kotene blir beskrevet som så vidt over høyden på den nærmeste koten. Dette ser man for eksempel i det øverste tverrsnittet i Flisa og Elverum der kollen blir beskrevet som flere meter lavere enn det som er riktig.

Terrengmodellen fra 5 meter har etter våre analyser dermed tre ulike svakheter i forhold til en modell basert på detaljert høydeinformasjon:

- variasjonen i terrenget mellom kotene beskrives ikke eksakt, men glattes til en jevn høydeforskjell
- de laveste områder blir ikke riktig beskrevet dersom de ligger mellom to 5 meters-koter
- de høyeste områder blir ikke riktig beskrevet dersom de ligger mellom to 5 meters-koter

I det digitale grunnlaget fra den teknisk/økonomiske kartleggingen har elvebredden og veiene høydeverdier i knutepunktene. Disse verdiene er hentet ut fra SOSI-filene som punkter med høydeverdi og benyttet sammen med 5 meters-kotene til en terrengmodell som benytter all standard tilgjengelig høydeinformasjon. Spørsmålet er hvor mye forbedret denne terrengmodellen blir i forhold til utgangspunktet, og om den blir så bra at den kan erstatte terrengmodellen fra detaljert høyde. Den ekstra informasjonen er ikke jevnt fordelt i hele området, men vil variere med hvor det er elver eller veier. Det viser seg også at langs elvene er høydeverdiene ikke jevnt stigende, men samme høydeverdi er gitt på flere punkter. Høydeverdiene på veien er gitt med to desimaler og det ser ut til at de holder den nøyaktigheten. For både elvebredden og veiene er det slik at ikke alle knekkpunker har høydeverdi. Dette innebærer at kvaliteten på terrengmodellene varierer etter hvor det er høydeverdi på veier og elver og ikke etter hvilket kartgrunnlag en bruker.

I Alvdal profil 1 sikrer tilleggsinformasjonen at overgangen mellom dalsiden og elvesletta blir riktig. Det er ikke nok tilleggspunkter mellom kotene slik at terrengmodellen for Alvdal blir lik den fra detaljert høyde. Forskjellen mellom høydeverdien ligger på ca. 2 meter og de fleste steder ligger den detaljerte terrengmodellen høyest, men ikke alltid. I profilene fra Heradsbygd ser en at på elvesletta er det få veier og dermed lite tilleggsinformasjon. Den høydeinformasjonen en får gir at terrengmodellen blir litt lavere og skjærer toppen av terrengmodellen fra detaljert høyde. Men den nye informasjon gir ikke nok informasjon til at en får med de små variasjonene i terrenget. I Elverum er ikke forskjellen



Figur 42 Tverrprofiler på forskjellig høydegrunnlag for Alvdal (uten flomverk).

Figure 42 Transverse profiles from different map bases for Alvdal (without levees)

mellom terrengmodell fra 5 meter og fra 5 meter med tilleggsinformasjon stor. Enkelt punkter gjør at terrenget blir dratt ned, men endringen blir da gjeldene for ett større området enn punktet tilsier. Dette ser en i Elverum profil 2 venstre bredd der terrenget blir trukket ned pga et punkt. I terrengmodellen fra 5 m koter er terrenget beskrevet som lineært mellom kote 180 og 185. Når tilleggsinformasjon benyttes, og som her det bare dreier seg om noen punkter i et søkk, gjør dette punktet at modellen antar at terrenget fra kote 180 til punktet har samme høyde og den trenden i landskapet benyttes til å beskrive landskapet fra punktet til kote 185. For dette området gir dette en like stor feil som slik terrenget ble beskrevet med bruk av bare 5 meters koter. Den største forbedringen er for Trysil. Der var det stor avstand mellom kotene og nærmeste kote var langt fra elvebredden. Det er mange veier langs elvebredden i Trysil som kompenserer for manglende høydekurver. Dette gjør at terrengmodellen fra 5 meter med ekstra høydeinformasjon fra veier og elver blir tilsvarende den fra detaljert høyde i beskrivelsen av terrengformasjonen. Ser man på detaljer er det forskjeller på topper og bunner.

Terrengmodellen fra 5 meter med ekstra høydeinformasjon fra veier og elver er en forbedring fra den reine terrengmodellen fra 5 meters-koter i de områder der det er lite koter. Tilgangen på punkter med høydeverdier er tilfeldig og kan noen ganger gi nye feil. Ingen av områdene har en hatt tilgang på nok punkter til at små terrengvariasjonene mellom 5 meters-kotene er like godt beskrevet som når detaljert høyde benyttes. Eksempel på flomsonekart utarbeidet på forskjellig underlag er vist i figur 3. Eksemplet er Kirkenær ved 200-års flom.

8.8 Flomsonekart fra forskjellig kartgrunnlag

Terrenget ikke blir nøyaktig beskrevet når 5 meters-koter benyttes som grunnlag. Spørsmålet er om dette gir store avvik i de arealer som blir klassifisert som flomutsatt i de ulike flomtilfelle. Er det mulig å si noe om hvor mye kvaliteten reduseres, dvs. prosentvis eller absolutt hvor stor blir feilen i flomutsatt areal (eller flomutsatte bygninger) ved bruk av 5 meters koter? Vil kvaliteten være avhengig av enkelte faktorer? Det kan være faktorer som hvor området er lokalisert i forhold til en 5 meters kote, hvordan er flomvannstanden i forhold til en 5 meters kote eller hvordan høydefordelingen er på elveslettene i forhold til 5 meters kotene. Dette er spørsmål som denne analysen skal prøve å gi noen forslag til svar på. For fire områder analyseres også hvilke resultat en får når en sammenligner detaljert høyde med en terrengmodellen fra 5 meters koter er forbedret med høydeverdier fra elver og veier.

Flomsonene for hvert område for samme flom er sammenlignet ved å slå de sammen som unioner. Nye polygoner som har egenskaper fra begge flomsonekartene blir dannet. Det gir tre ulike klasser som analyseres:

- Polygoner som blir klassifisert som flomutsatt i begge analysene dvs. både når terrengmodell fra detaljert høyde og fra 5 meters-kote blir benyttet. (Tegnforklaring: "I begge analysene") .
- Polygoner som blir klassifisert som flomutsatt bare når terrengmodell fra detaljert høyde blir brukt. Dette er polygoner (arealer) som ikke får klassifikasjon flomutsatt når terrengmodell fra 5 meters-koter benyttes. (Tegnforklaring: "Mangler ved bruk av 5 meter").
- Polygoner som feilklassifiseres som flomutsatt når terrengmodell fra 5 meter benyttes. Disse polygoner (arealer) er ikke flomutsatt, men på grunn av feil i terrengmodellen fra 5 meters koter, feilklassifiseres de som flomutsatt. (Tegnforklaring: "Tillegg ved bruk av 5 meter").

Resultatene presenteres for hver flom i ett søylediagram. Hver søyle representerer ett analyseområde som er delt opp i forhold til sum areal i de tre klassene i dekar. For noen kommuner er også plassering av bygningene i de ulike klassene analysert. Bygningene er representert som ett punkt pr. bygning. Disse er koblet til de klassifiserte polygonene og fått verdi etter i hvilket polygon punktet er lokalisert. Det er benyttet punkter for å unngå at en bygning blir delt og faller i flere polygonklasser. Resultatene fra denne analysen er også presentert i ett søylediagram der hver søyle er delt etter antall bygninger som faller innenfor hver klasse. Analysene er foretatt for tre ulike flommer i hvert område. Vannlinjene for alle analyseområdene er gitt i vedlegg C.

8.8.1 Flomsonekart utarbeidet for en moderat flom

Med moderat flom menes her en flom med ca 10 års gjentaksintervall. Vannstanden ligger for alle områdene 3-3,5 m over vassdragsnivellementet. Resultatet vil avhenge av hvor riktig de laveste områdene er beskrevet for å få registrert noe flomareal i det hele tatt. En terrengmodell som mangler beskrivelse av variasjonen i terrenget i de lavere deler av flomsletta vil gi feilklassifikasjon begge veier.

8.8.1.1 Sammenligning av flomsonekart fra detaljert høyde og fra 5 meters koter

Resultatene av sammenligningen er gitt i figur 43. I Trysil, deler av Øksna og i Heradsbygd mangler de laveste høydeverdiene i terrengmodellen fra 5 meter. Terrenget slik det er beskrevet ligger over denne flomvannstanden i omtrent hele området. Flomsonekartene fra 5 meter mangler i disse tilfelle flomutsatt areal i det hele tatt for denne flomvannstanden, slik at det blir lite eller intet areal i klassen for flomutsatt i begge analysene.

I Flisa er de laveste områdene kommet med, men på grunn av stor avstand mellom kotene, er det bare arealene nær kotene som er lave nok og store deler av arealene blir gitt for høye høydeverdier. Den analyserte flomvannstanden ligger midt mellom to 5 meters-koter (ca. 153.5 m.o.h.) og arealer som egentlig ligger under den aktuelle vannstand er blitt gitt for høye verdier og blir feilklassifisert som ikke flomutsatt.

I Alvdal og Koppang blir effekten av at landskapet er lagt for lavt at elvesletta blir klassifisert som flomutsatt ved alle vannstander. Man får områder feilklassifisert som flomutsatt som egentlig ligger over den aktuelle vannstand.

I Kirkenær, Elverum og Kongsvinger er det forskjeller som skyldes den lineære interpolasjon mellom 5 meters-kotene som gir feilklassifikasjoner. Elveslettene ligger rundt en 5 meters-kote og en kote ligger tett inntil elvebredden. Da ser det ut til at trenden i landskapet blir riktig gjengitt i begge terrengmodellene.

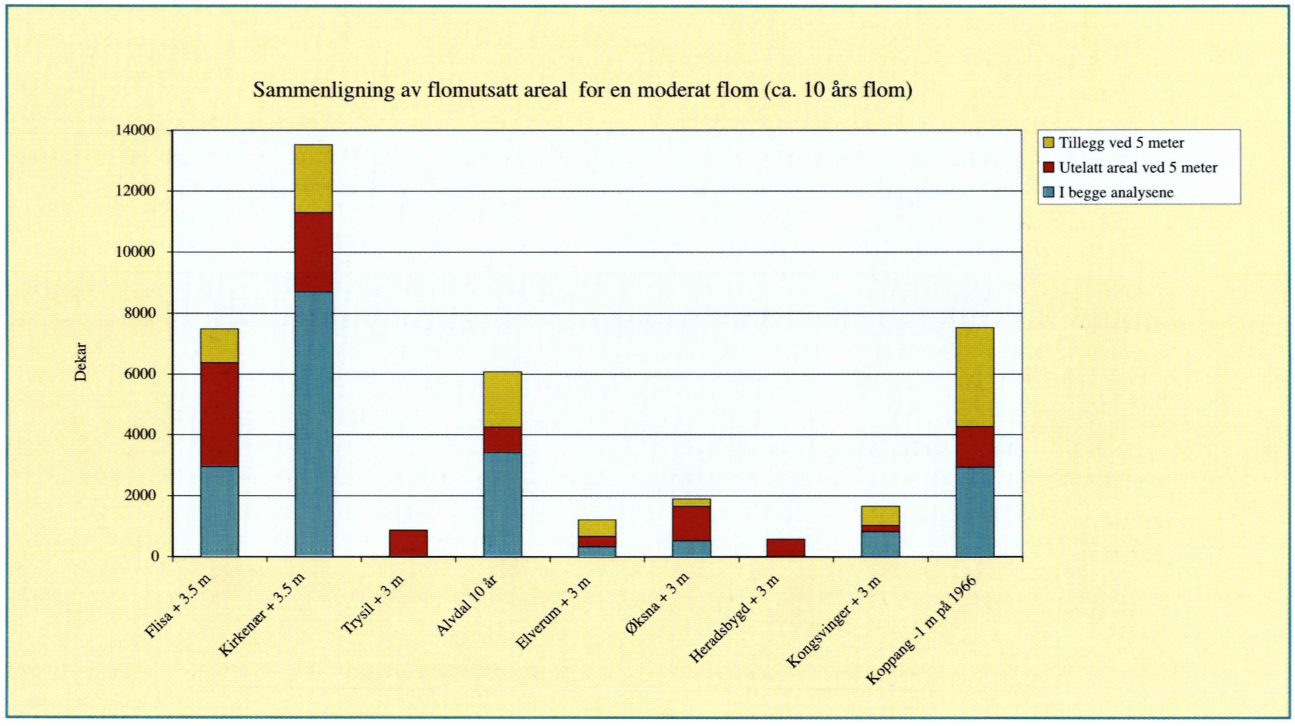
Konsekvenser for flomutsatt areal av å bruke en terrengmodell fra 5 meters koter med tilleggsinformasjon om høydeverdier på elver og veier.

I Trysil er det nok veier med høydeverdi langs elva til å forbedre terrengmodellen slik at klassifikasjonen av flomutsatt areal øker fra 0% til 75% av flomutsatt areal ved detaljert høyde. I tillegg får en noe areal feilklassifisert som flomutsatt. Andel feilklassifisert som flomutsatt blir redusert i Alvdal da elvesletta blir hevet betraktelig. I resten av testområdene er ikke virkningen av å benytte flere høydeverdier på flomutsatt areal ved moderat flom vesentlig.

8.8.1.2 Sammenligning av flomutsatt bygninger ved bruk av terrengmodell fra detaljert høyde og fra 5 meters koter

Det er få bygninger totalt i de områdene som blir klassifisert som flomutsatt ved moderat flom. Andelen klassifisert som flomutsatt i begge analysene er mye mindre ved analyse av areal enn ved analyse av bygninger. Dette kan tyde på at i de sikre flomutsatt areal i de laveste områdene er det få bygninger. Bygninger på elveslettene er lagt på de høyeste områdene og når terrenget er for lavt eller bare kollene er for lave, blir bygninger i disse områdene feilklassifisert som flomutsatt. Dette er hovedårsaken til feilklassifikasjonen i Alvdal, Koppang og Kongsvinger. I Trysil og delvis i Flisa er terrenget for høyt i terrengmodellen fra koter.

Resultatet for bygninger tilsvarer resultatet for flomutsatt areal at de mangler klassifikasjonen flomutsatt. I Kirkenær er forskjellene mellom de to terrengmodellene i beskrivelsen av terrenget mellom to 5 meters-koter. Det ser ut til at terrenget noen steder beskrives for høyt og noen for lavt. Når flomvannstanden er midt i dette området, vil de bygninger som ligger i dette området bli feilklassifisert begge veier.



Figur 43 Avvik mellom forskjellige høydegrunnlag for moderat flom (ca 10 års gjentaksintervall, uten flomverk)

Figure 43 Difference between different map bases for moderate flood (10 year return period, levees ignored)

Når terrengmodellen forbedres med høydeverdier fra elver og veier resulterer det i at færre bygninger blir feilklasifisert som flomutsatt i Alvdal. I Trysil øker andel flomutsatt fra 0 til 50% som er mindre enn økningen i areal. Noe areal blir også feilklassifisert som flomutsatt og på det arealet er det relativt mange bygninger, nesten like mange som innenfor det sikre flomutsatt areal.

8.8.1.3 Oppsummering

For lave flomvannstander blir nøyaktigheten av beskrivelsen av de laveste partier på elveslettene viktige for resultatet av klassifikasjon av flomutsatt areal. I testområdene er forskjellen mellom generert høyde i terrengmodellen fra 5 meter koter og for 5 meter med høydeverdier fra elver og veier sammenlignet med hvordan terrenget blir beskrevet ved bruk av detaljert høyde for de lave områdene så store at slike terrengmodeller ikke anbefales benyttet til flomsonekartlegging for slike flommer. Andelen feilklassifisert flomutsatt areal og flomutsatte bygninger er stor og større enn de som mangler en slik klassifikasjon (figur 43 og 44).

8.8.2 Flomsonekart utarbeidet for en stor flom

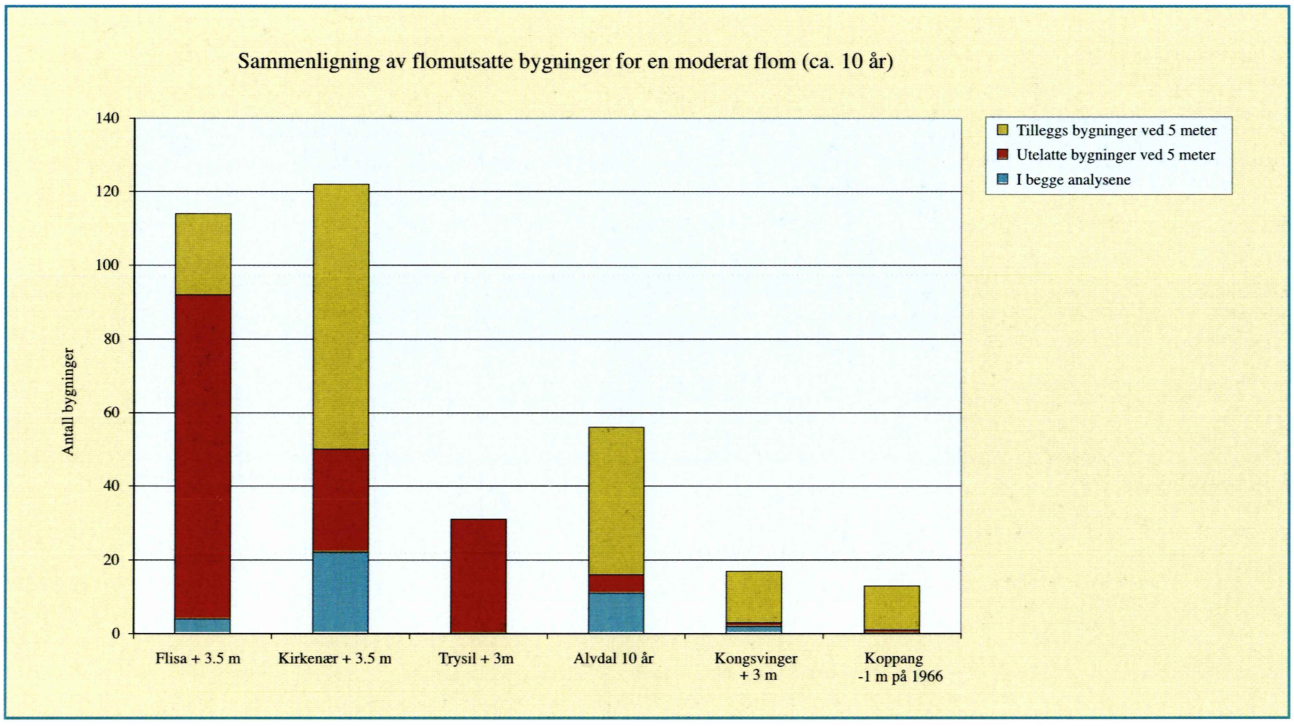
Med stor flom menes her en flom med ca 50 år gjentaksintervall. I noen tilfelle er observerte vannstander fra 1966 benyttet og andre områder er enten simulert (Alvdal) eller parallelle vannlinjer benyttet. Vannstandstigningen over normalvannstand var 4.5 meter i Flisa ved flomkulminasjonen i 1966. Dette er et sprang lik ekvidistansen på kotene og man kan anta at feilene i terrengmodellen fra 5 meters-kotene i de lavere område har mindre betydning.

8.8.2.1 Sammenligning av flomsonekart fra detaljert høyde og fra 5 meters-koter

For Trysil, Øksna og Heradsbygda er fortsatt terrenget for høyt for at noe vesentlig areal skal bli klassifisert som flomutsatt ved bruk av terrengmodellen fra 5 meters-kotene.

I Alvdal og Koppang er det riktig at ved denne vannstanden skal de søndre elveslettene være flomutsatt. Dermed betyr det ikke noe for resultatet at elvesletta er lagt for lavt. Mellom Glomma og Folla lengre nord (Alvdal profil 2) og Koppang profil 2 er noe areal fortsatt for lavt og noe for høyt og dette gir feilklassifikasjoner begge veier.

De deler av elvesletta i Flisa som har fått for høye høydeverdier har verdier som er høyere enn denne aktuelle flomvannstanden. Det gjør at områder som skulle vært klassifisert som flomutsatt ikke blir det. Som det framgår av søylediagrammet er den største feilklassifikasjonen for Flisa utelatt areal.



Figur 44 Flomutsatte bygninger ut fra kart med grunnlag for moderat flom (uten flomverk).

Figure 44 Estimated number of flooded buildings from different map bases for moderate flood (levees ignored).

For Kirkenær og Kongsvinger dekker denne flomvannstanden over forskjeller i beskrivelse av høydeforholdene i de to modellene for de lave områdene. Noen forskjeller er det fortsatt, men det slår omtrent likt begge veier. Det samme gjelder også for Elverum, men der er det så lite areal som blir flomutsatt ved en slik flom at feilklassifikasjonene er relativt store.

Konsekvenser for flomutsatt areal av å bruke en terrengmodell fra 5 meters-koter med tilleggsinformasjon om høydeverdier på elver og veier.

I Trysil og Heradsbygda har forbedringen av terrengmodellen en synlig positiv effekt. Ellers er endringen av klassifikasjon av areal liten, men i positiv retning, dvs andelen korrekt klassifisert øker.

8.8.2.2 Sammenligning av flomutsatt bygninger ved bruk av terrengmodell fra detaljert høyde og fra 5 meters koter

Antallet berørte bygninger mangedobles fra en moderat til en stor flom. Antall flomutsatte bygninger stiger relativt mye mer enn flomutsatt areal. Det indikerer at det er mange flere som tar sjansen på å bygge innenfor flomsonen til en stor enn en moderat flom. Feilklassifikasjon er mye større enn for flomutsatt areal spesielt i Flisa og Kirkenær der det fortsatt er mange bygninger som feilklassifiseres begge veier. I Flisa er terrenget med en stor bebyggelse (Lauta) lagt for høyt i terrengmodellen fra koter, slik at alle disse bygningene mangler klassifikasjon flomutsatt. I Kirkenær er mange bygningene i det usikre området rundt 5 meters-kotene og en del feilklassifiseres begge veier. I Alvdal er deler av arealet mellom Folla og Glomma altfor høyt og over alle flomvannstander. Bygningene i dette området feilklassifiseres som flomutsatt, mens sør for samløpet er terrenget for lavt og bygningene feilklassifiseres som ikke flomutsatt. Andelen bygninger som klassifiseres riktig er ikke bedre enn ved en moderat flom. For Kongsvinger og Koppang er andelen som klassifiseres riktig forbedret vesentlig og det er få bygninger som mangler klassifikasjon flomutsatt, men fortsatt er det en del som feilklassifiseres som flomutsatt.

Ved en forbedret terrengmodell endres forholdene vesentlig for Trysil og noe for Alvdal, men feilprosenten er fortsatt stor.

8.8.2.3 Oppsummering

Analysen viser at denne flommen ikke er stor nok til å dekke over mangler ved terrengmodellen fra 5 meters-kotene for de laveste partiene. De områder der denne terrengmodellen har fått med seg de laveste partiene og terrenget varierer mellom to 5 meters koter gir det beste resultatet (Kirkenær og Kongsvinger). Avstanden mellom kotene har stor betydning for å få beskrevet landskapet riktig. Denne flommen er ikke stor nok til å dekke over feil i terrenget på flomslettene. Forbedringen ved bruk av tilleggsinformasjon er bare vesentlig i de områdene som manglet informasjon om de laveste partiene slik at hele terrenget lå for høyt. Feilklassifikasjonene er også ved denne flommen så store at terrengmodellen fra 5 meters-kotene ikke bør benyttes til klassifikasjon av flomutsatt areal (figur 45). Ved store flommer som her må man kjenne til hvordan terrenget ligger i forhold til kotene og spesielt være oppmerksom på å få med de laveste og de høyeste områdene.

8.8.3 Flomsonekart utarbeidet for ekstrem flom

I denne analysen er vannstanden slik den ble observert ved kulminasjonen av flommen i 1995 benyttet i alle områder bortsett fra i Alvdal, der det benyttes en simulert 100-års flom i både Glomma og Folla. Vannstandsstigningen er over 5 meter i alle områdene i Glomma og 4.5 meter i Trysil.

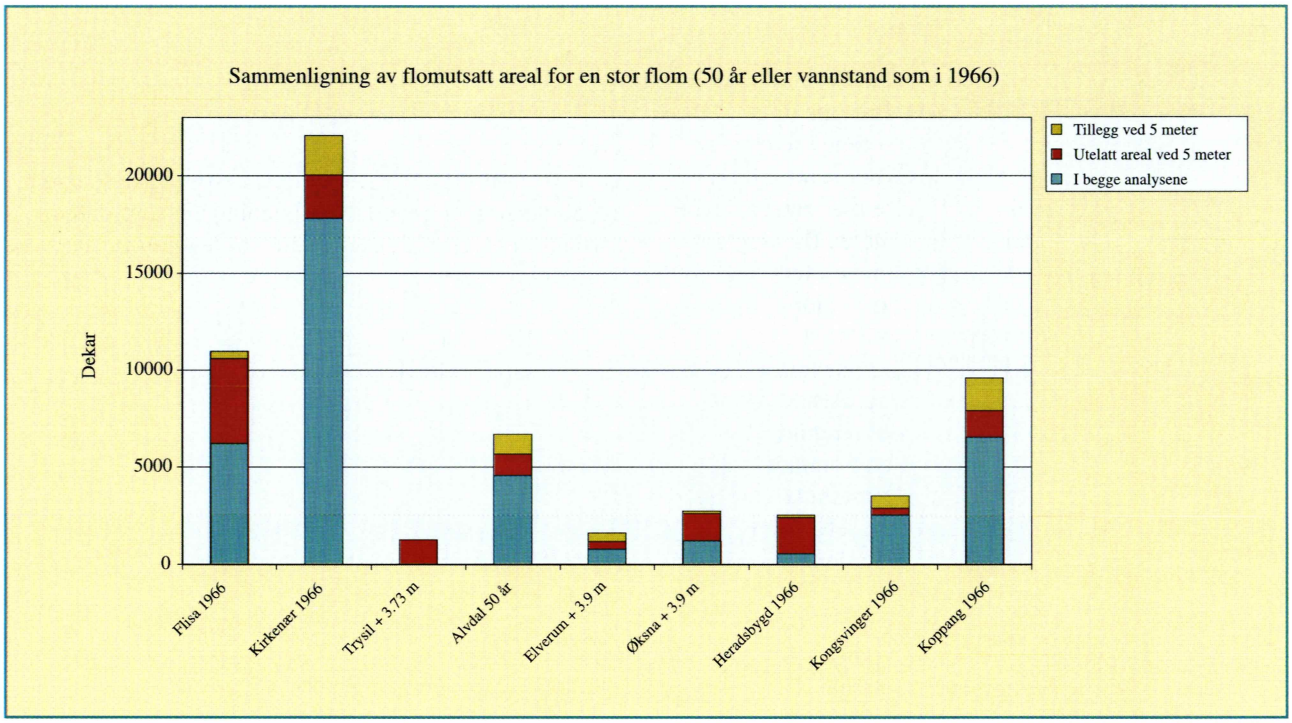
8.8.3.1 Sammenligning av flomsonekart fra detaljert høyde og fra 5 meters-koter

En flom av denne størrelsen dekker over de fleste uregelmessigheter i de laveste partiene. Det som gir feilklassifikasjon er for det meste koller som ligger mellom to 5 meters-koter og som blir lagt for lavt og noen områder som er lagt for høyt pga manglende koter, ligger fortsatt over denne flomvannstanden (Koppang). Kollene skal stikke opp av flomområdet, men blir klassifisert som flomutsatt fordi de har fått for lave høydeverdier i terrengmodellen fra 5 meters-kotene. Denne effekten finnes i tverrsnittene for Flisa, Kongsvinger og Heradsbygd. I resten av områdene i Glomma er feilklassifikasjonene fra ca. 4 – 20 % og stort sett mindre jo større areal som er flomutsatt. Det viser seg også at for de fleste områdene er det mer areal som blir utelatt ved klassifikasjonen enn som blir lagt til.

Trysil og øvre del av Øksna skiller seg ut også her ved at en ikke får med seg beskrivelsen av de laveste områdene Flomvannstanden er under 5 meter og er fortsatt under de høydeverdier som er generert for de laveste områdene for store deler av elvestrekningen. Dermed mangler klassifikasjonen flomutsatt for store deler av områdene.

Konsekvenser for flomutsatt areal av å bruke en terrengmodell fra 5 meters-koter med tilleggsinformasjon om høydeverdier på elver og veier.

Det vesentligste bidrag en forbedret terrengmodell har er i de områder der de laveste partiene mangler, dvs der det er stor avstand mellom kotene og koten nær elvekanten mangler. Ved denne flomvannstanden oppnår en ca. 90% korrekt klassifikasjon i alle områder bortsett fra



Figur 45 Avvik mellom forskjellige høydegrunnlag for stor flom (ca 50 års gjentaksintervall, uten flomverk).

Figure 45 Difference between different map bases for large flood (50 year return period, levees ignored).

Trysil og Øksna ved bare å bruke 5 meters-koter. I Trysil oppnår en det samme når en forbedrer terrengmodellen. Dersom det er tilfelle i Øksna og i tilsvarende områder, kan en si at ved ekstreme flomvannstander og forbedret terrengmodell oppnår en 90% korrekt klassifikasjon av flomutsatt areal.

8.8.3.2 Sammenligning av flomutsatt bygninger ved bruk av terrengmodell fra detaljert høyde og fra 5 meters koter

I Flisa og Kirkenær berører de kollene som mangler (eller er estimert for lave) relativt mange bygninger. Det er ikke unaturlig at det er på slike høydedrag at bygninger blir lagt. Allikevel er korrekt klassifikasjon for begge over 90%, men Lauta i Flisa som er lagt for høyt gir i tillegg feilklassifikasjon flomutsatt på 290 bygninger.

Ved en forbedret terrengmodell endres forholdene vesentlig for Trysil og noe for Alvdal. Da får man at over 85% av bygningene blir klassifisert riktig i begge modellene. Dette er noe dårligere treffprosent enn for flomutsatt areal. Relativt flere bygninger ligger i de usikre områdene.

8.8.3.3 Oppsummering

Ved flomvannstander med en stigning på over 5 meter vil over 90% av arealene blir riktig klassifisert i begge terrengmodellene. I tillegg blir noen areal feilklassifisert som flomutsatt som ikke skal være det. Hvor store arealer det dreier seg om varierer fra 0 til 20% avhengig av hvor mange og store høyder mellom kotene som er underestimert (figur 46).

Dersom en ikke kommer bort i områder der de laveste partiene får generert høydeverdier som er over 5 meter for høye på grunn av manglene koter nær elvebredden og langt mellom de nærmeste 5 meters-kotene, som i Trysil, gir terrengmodellen generert fra 5 meters-koter akseptable svar for store flommer. Disse områdene blir vesentlig bedre modellert når terrengmodellen forbedres med høydeverdier fra elver og veier. Når lokaliseringen av bygninger tas med i analysen, viser det seg at de er lokalisert på de høyeste partiene på elveslettene. Der terrengmodellen fra koter gir for lave høydeverdier får dette relativt sett mer betydning i denne analysen enn når en bare ser på flomutsatt areal (figur 47).

8.8.4 Konklusjon

De vesentligste faktorene i forhold til kvaliteten på resultatet (korrekt klassifikasjon av flomutsatt areal) er knyttet til plasseringen av 5 meters-kotene i forhold til elvebredden og flomvannstigningen. Det som gir best resultat er når det er en 5 meters-kote nær elvebreddene og stigningen i vannstand er over 5 meter. Da programmet benytter trender i helningsforholdene i terrenget for å generere høydeverdier der høydeinformasjon i form av koter eller punkter mangler, vil det være best samsvar i de områder som ikke har knekkpunkter mellom 5 meters kotene. Koller og skarpe overganger fra dalside til elvesletter er slike knekkpunkter som en terrengmodell basert på lite høydeinformasjon mister. I områder der det er stor avstand fra elvebredden til nærmeste kote, mister terrengmodellen de laveste verdiene og selv store flommer fører til vesentlige feilklassifikasjoner av flomutsatt areal.

Bygninger er lokalisert på de høyeste partier. Bortsett fra i de områder der høyder på elveslettene blir definert for lavt og dermed blir liggende under flomvannstanden er samvaret godt mellom de to terrengmodeller for bygninger.

En forbedring av terrengmodellen med høydeverdier fra elver og veier bør gjøres og det fører til størst forbedring i de områder som har stor avstand mellom høydekurvene. Forbedringen er liten for de andre områdene. For ekstreme flommer vil en terrengmodell basert på 5 meters kurver og høydeverdier fra elver og veier gi minst 90% korrekt klassifikasjon av flomutsatt areal og minst 85% korrekt klassifikasjon av flomutsatte bygninger. I tillegg må en regne med fra inntil 10% av areal og bygningene blir feilklassifisert som flomutsatt.

8.9 Teknikker for å kartlegge potensielle skadeobjekter

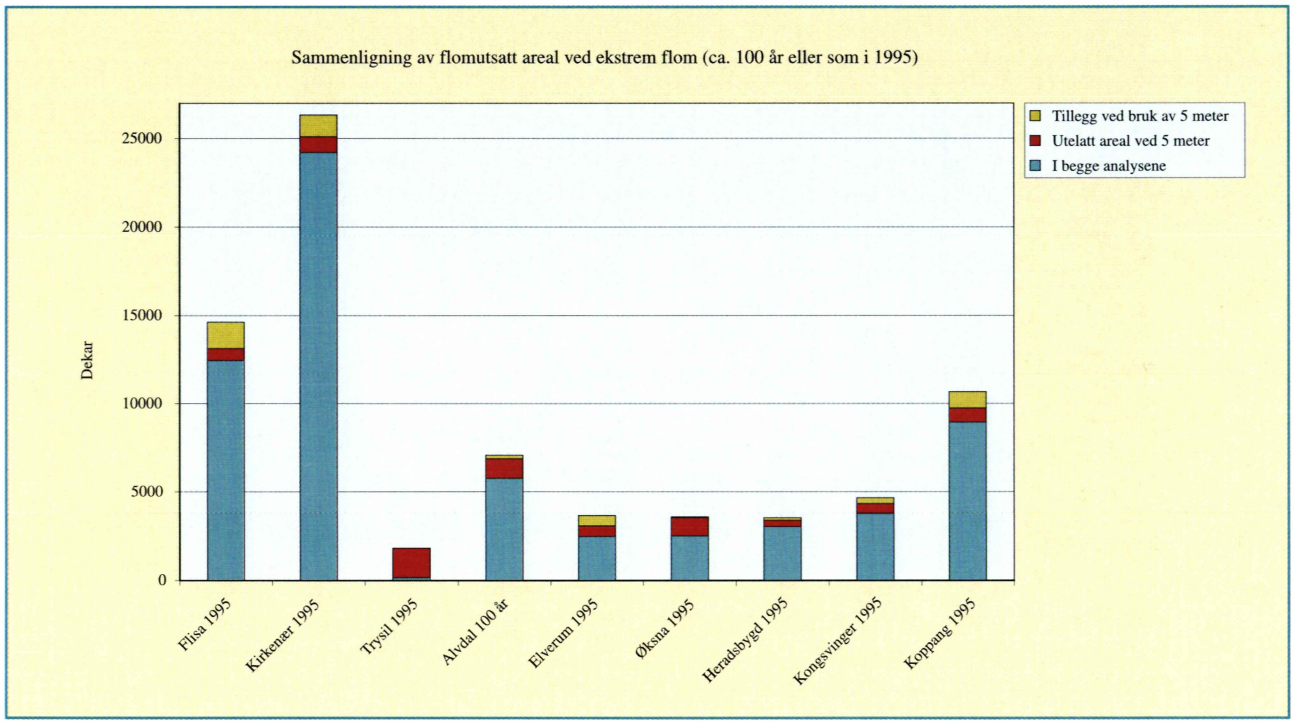
Alle bygningene i Åsnes og Grue kommuner er analysert i forhold til hvor de ligger terrenget og i forhold til de ulike flomvannstandene. Hver bygning er analysert som ett punkt som er generert fra bygningene som flater kartlagt i den teknisk/økonomisk kartlegging i målestokk 1:5000.

For å finne terrenghøyden for hver bygning er digitale terrengmodeller benyttet. På grunnlag av 1 meters høydekurver er det utarbeidet en digital detaljert terrengmodell for området. Hver bygning er plassert i terrengmodellen og høydeverdien for bygningspunktet er registrert.

Det er også generert flomflater på grunnlag av observerte flomvannstander i 1966 og i 1995. Hver bygning har fra dem fått registrert flomvannstanden i 1966 og i 1995. På grunnlag av flomflater og terrenghøyder er flomsonekart generert for både vannstanden i 1966 og 1995. Vanndypet for hver bygning er registrert.

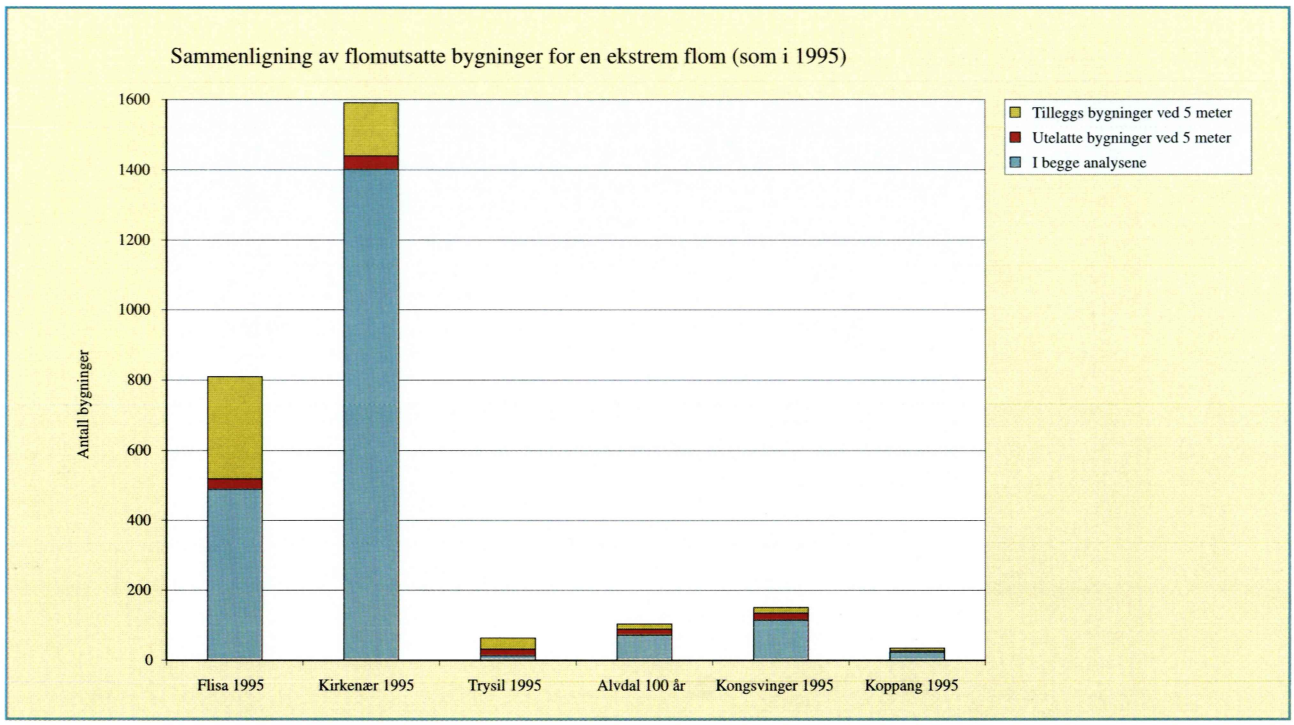
Det er også utarbeidet en mindre detaljert terrengmodell på grunnlag av 5 meters høydekurver. Vanndypet er avhengig av hvor detaljert terrengmodell som er tilgjengelig. For å kunne sammenligne og vurdere nødvendigheten av tilgang på detaljert terrengmodell er flomdypet også registrert for flomsonekart utarbeidet fra terrengmodellen fra 5 meters-koter.

Langs mange av våre vassdrag er det bygd flomverk som beskytter bakenforliggende bygninger mot flommer som er under dimensjonerende høyde på flomverkene. Bygningene i Åsnes og Grue kommuner er kartlagt i forhold til om de ligger bak ett flomverk og i så fall hvilken dimensjonerende høyde det er på det flomverket.



Figur 46 Avvik mellom forskjellige høydegrunnlag for ekstrem flom (ca 100 års gjentaksintervall, uten flomverk).

Figure 46 Difference between different map bases for extreme flood (100 year return period, levees ignored).



Figur 47 Flomutsatte bygninger ut fra kart med grunnlag for ekstrem flom (uten flomverk).

Figure 47 Estimated number of flooded buildings from different map bases for extreme flood (levees ignored).

9. Risikoanalyse

9.1 Økonomisk risiko, bygninger - et eksempel

9.1.1 Vannstand-skade kurve

Objekters (bygninger mm) sikkerhet mot oversvømmelse er direkte knyttet til den topografiske posisjonen. Hvert enkelt objekt i er identifisert ved den absolutte høyde over havet h_i. Fordelingen av sokkelhøyden h_i, for omtrent 3870 bygninger i kommunene Grue og Åsnes er analysert i en 32 km lang elvestrekning i Glomma. For den videre analysen ble den 32 km lange elvestrekningen (26 km i sør-nord retning) delt inn i 18 boligområder (figur 48). Åtte av disse områdene er beskyttet mot flom på størrelse med den i 1916. Elvas helning langs strekning er omtrent 0.08 ‰ ved vanlig vannstand og 0.14 ‰ ved høye flommer (1995-flommen). Det vil si en differanse i vann-nivå på hhv. 2.07 m og 3.52 m mellom avgrensningene nedstrøms og oppstrøms.

9.1.2 Bestemmelse av skade

Et lokalt mål for oversvømmelse er vanndybden $y_i = z - h_i$. Så lenge vannstanden i elva er lav vil y_i være negativ, men når nivået er høyere enn fundamentet på bygningene er y_i positiv. Ved oversvømmelse av et objekt er den eksakte verdien til y_i avhengig av bygningens konstruksjonstype og den lokale topografien. Skadene som skyldes oversvømmelse kan ses på som en funksjon av y_i: jo høyere y_i desto større er skaden. Etter et visst kritisk nivå y_i er skadene totale og vil derfor ikke øke mer.

Oversvømmelse av bygninger er den viktigste kilden til skade ved flom på elvesletter med bebyggelse. Kostnaden på skade for et individuelt hus er direkte proporsjonalt med høyden på det lokale vannivået y (figur 1). Det er betydelig spredning i data, men sammenhengen er åpenbar. Økningen i kostnadene begynner allerede ved negative verdier av y (f.eks. økning i grunnvannsnivået på elvesletta). Det skyldes at en økning i grunnvannsnivå vil ha effekt på sannsynligheten for fuktighets skader, spesielt hvis huset har kjelleretasje. Figur 1 viser takster utført av forikringsselskapenes takstmenn etter flommen på Østlandet i 1995. Som nevnt i kapittel 3 kan det også være andre faktorer enn vanndypet som påvirker skadenivået, men takstdokumentene gir ikke grunnlag for å trekke slike inn i vurderingene.

Sammenhengen i figur 1 lar seg ikke godt beskrive med en deterministisk funksjonssammenheng, til det er spredningen for stor. I stedet kan man bruke en fordelingsfunksjon betinget av høyden y. Skaden på et enkelt hus L' er i dette tilfellet sett på som en stokastisk variabel med sannsynlighetsfordelingen $f_L'(l'|y)$. For lave (negative) verdier av y er sannsynligheten for relative lave kostnader dominerende. Det kommer fram som en J-formet fordeling. For økende verdier av y vil kostnadens tyngdepunkt flyttes bort fra nullpunktet på aksen slik at fordelingen blir klokkeformet. Fordelingen er asymmetrisk med en hale mot høye kostnader (positiv skjevhetskoeffisient). For enkelthets skyld og med tanke på den store spredningen er kostnaden vist som en forventningsverdi $E[l']$ og standardavvik $D[l']$ mot klasser av vannivå i bygningen mot det lokale vann-nivået. Bare to klasser er anvendt, som vist i tabell 18. Denne inndelingen kan eventuelt forfines.

9.1.3 Antall oversvømte objekt

Tekstboksen viser de fordelingsfunksjonen som er benyttet i analysen. Vannivåene på den studerte strekningen er knyttet til vannmerket på Nor. Følgende empiriske sammenheng er benyttet for å beskrive vannlinjen z_L en distanse L meter oppstrøms Nor:

$$z_L = z_{Nor} + L(1.08z_{Nor} - 151.78)\ 10^{-5} \qquad (9.1)$$

I det følgende er alle vanndybder i bygninger vil bli relatert til vannstanden ved Nor z_{Nor} og fordelingen i ligning (3) i tekstboksen uttrykt som $F(y|z_{Nor})$. $F(y|z_{Nor})$ er beregnet for to tilfeller som illustrert i figur 49, nemlig for flommene i 1966 og 1995 med vannivå på

Tabell 18 Oversvømmelsesklasser benyttet i risikoanalysen.

Tabell 18 Inundation categories applied in the risk analysis

Oversvømmelsesnivå *inundation level*	**Forventet skade E[l']** *expected damage kNOK*	**Standardavvik D[l']** *standard deviation kNOK*
-2.5 < y < -0.5	48	42
-0.5 < y	412	294

Fordelingsfunksjoner for lokal oversvømmelse i bygninger

I den følgende vil utvalgsfordelingen bli brukt til å representere den kumulative fordelingen av høyde på bygninger $F_H(h)$ (Cramer 1971):

$$F_H(h) = n/N \qquad (1)$$

hvor n er antall verdier fra utvalget h_i som er ≤ h av totalt N verdier.
Når man tar i betraktning alle objektene på en elveslette kan man se på de individuelle vannstandsnivåene i bygningene y_i; i = 1,...,N hvor N er totalt antall objekter (bygninger) som en tilfeldig variabel Y som er avhengig av elvas vannstand z. Den er beskrevet av sin betingede kumulative fordelingsfunksjon (cdf) $F_Y(y|z)$, eventuelt betinget sannsynlighetstetthet (pdf) $f_y(y|z)$.
For en gitt elvestrekning antas at vannivået i elva kan beskrives ved en rektangulær fordeling:

$$f_Z(z) = \frac{1}{z_u - z_d} \qquad (2)$$

hvor z_u og z_d er vann nivået på punkter henholdsvis oppstrøms og nedstrøms i elvestrekningen.
Vannivået i en bygning $y = z - h$ er bestemt som differansen mellom to tilfeldige variable z og h. Dersom det ikke er en systematisk variasjon av bygningenes høydebeliggenheten langs elva kan det antas at vannivået i elva og bygningenes høyde er uavhengige. Ved å anvende kjente elementer fra sannsynlighetsteorien (se for eksempel Springer, 1979) er frekvensfordelingen til y da formelt gitt som:

$$f_Y(y|z_u, z_d) = \frac{1}{z_u - z_d}[F_H(z_u - y)]; \qquad z_d - h_0 \le y < z_u - h_0 \qquad (3)$$

$$f_Y(y|z_u, z_d) = \frac{1}{z_u - z_d}[F_H(z_u - y) - F_H(z_d - y)]; \quad y < z_d - h_0$$

hvor h_0 er den nedre grense til fordelingen av høydebeliggenheten til bygninger. Det følger videre av dette at den utledede fordelingen har en øvre grense lik $y_{max} = z_u - h_0$, m.a.o. det største vanndypet i en enkelt bygning. Det er også verdt å legge merke til at i de tilfeller hvor distansen mellom punktene oppstrøms og nedstrøms er liten går fordelingen (9.3) mot grensen:

$$f_H(y|z_u, z_d) = \frac{1}{z_u - z_d}[F_H(z_u - y) - F_H(z_d - y)] \longrightarrow f_H(z - y) \qquad (4)$$

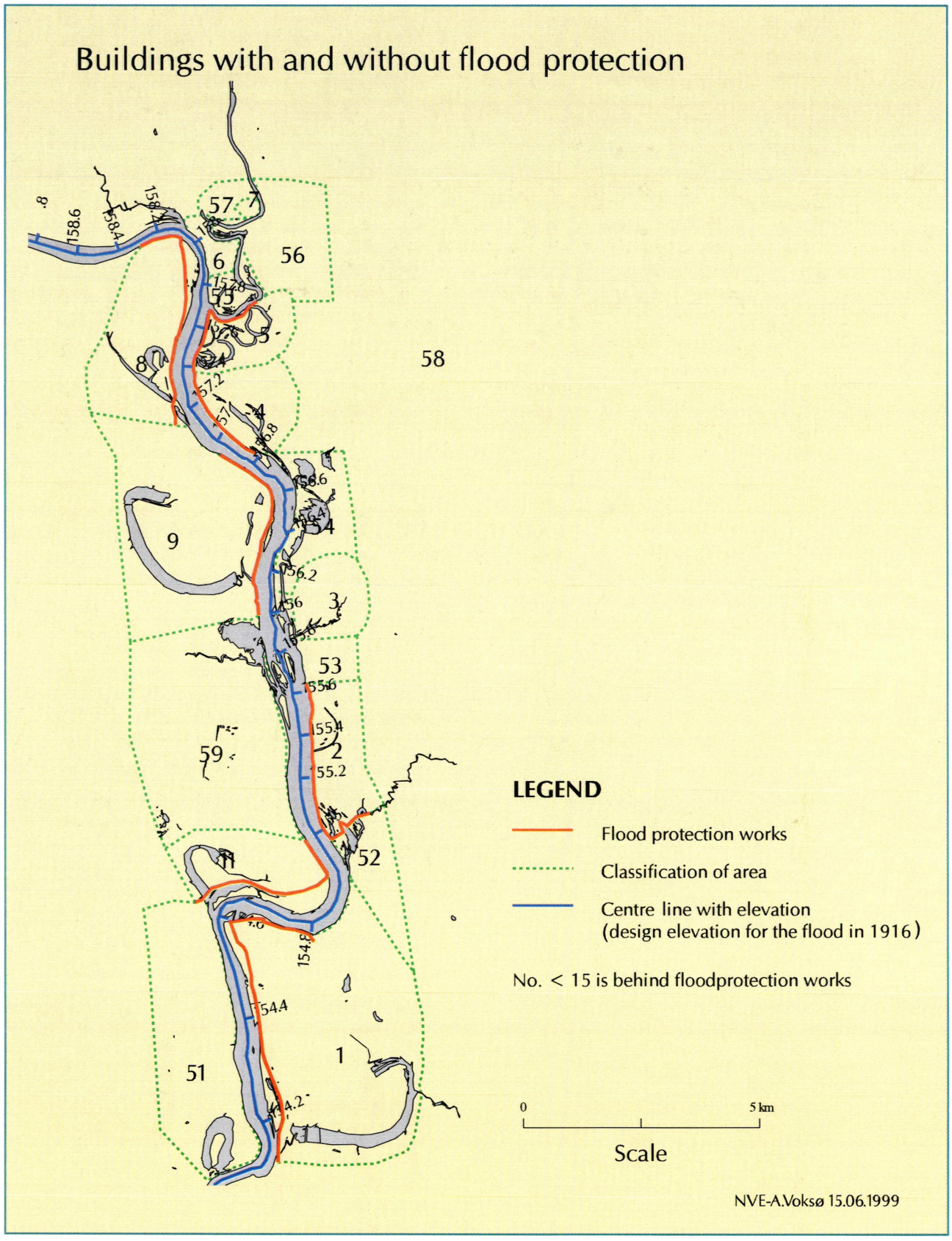
$$for \quad z_u \longrightarrow z_d = z$$

For en gitt verdi av y kan man finne antall hus n (av totalt N) med et lokalt vannivå $Y > y$ (f.eks. $y > 0$):

$$n(y|z_d) = N \int_y^{y_{max}} f_Y(y|z)dy \qquad (5)$$

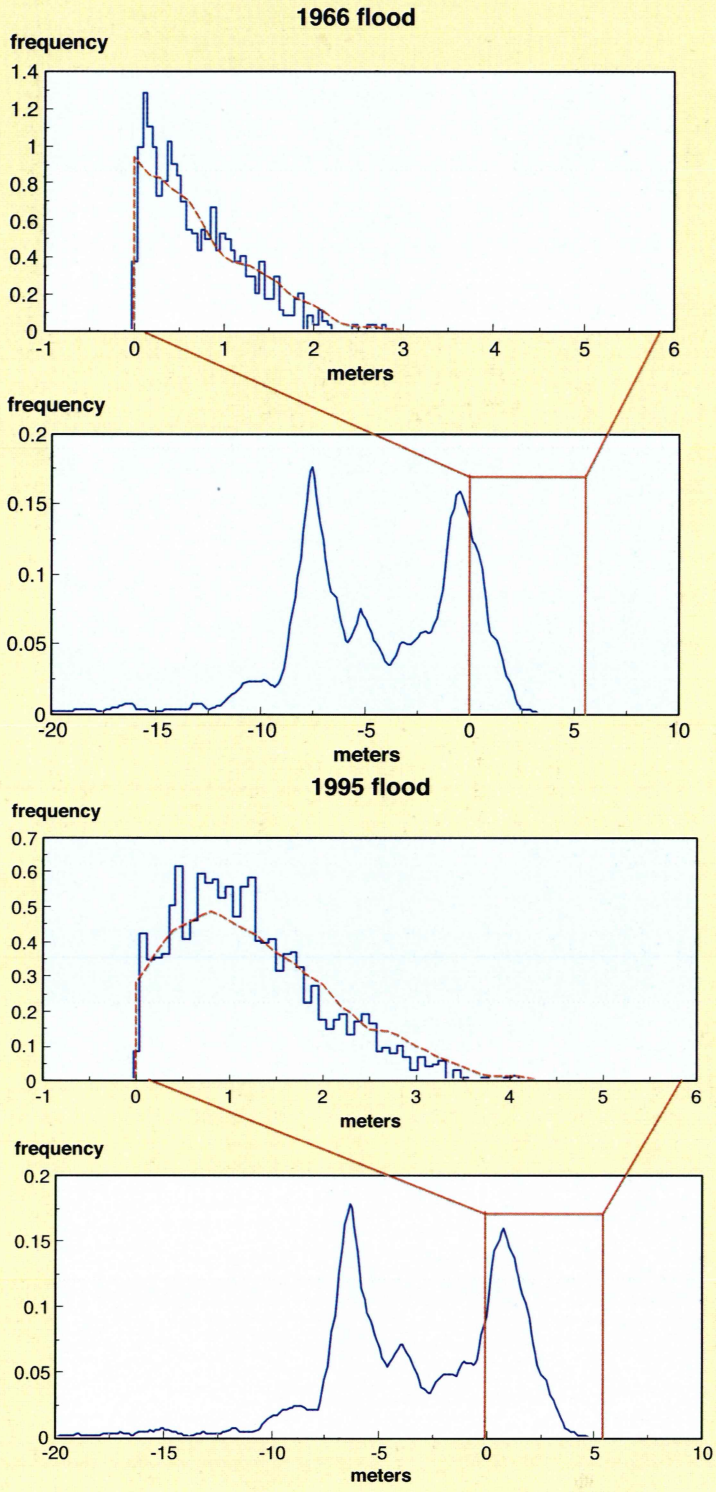
og antall hus Δn innen et intervall Δy rundt $(y|z_d)$:

$$\Delta n(y|z_d) = N f_Y(y|z_d)\Delta y \qquad (6)$$



Figur 48 Kart over det studerte området i Grue og Åsnes.

Figure 48 Map of the study area in the municipalities of Grue and Åsnes



Figur 49. Fordeling for det lokale vannivået y i bygninger for flommen i 1966 (vannstand ved Nor 151.53) og flommen i 1995 (vannstand Nor 152.49). Den øverste grafen viser fordelingen for y > 0. Den heltrukne linja viser kurver utledet fra GIS, mens de stiplede linja viser kurver utledet fra ligning 3. Den nederst grafen viser fordelingen for alle y.

Figure 49 Distribution of the local water level y in buildings for the 1966 year flood (stage at Nor 151.53) and the 1995 year flood (stage at Nor 152.49). Upper graphs show the distributions for y > 0. The full line represents curves derived from GIS calculations, while the dotted line shows curves derived from eq. 3. The lower graphs show the distribution for all y.

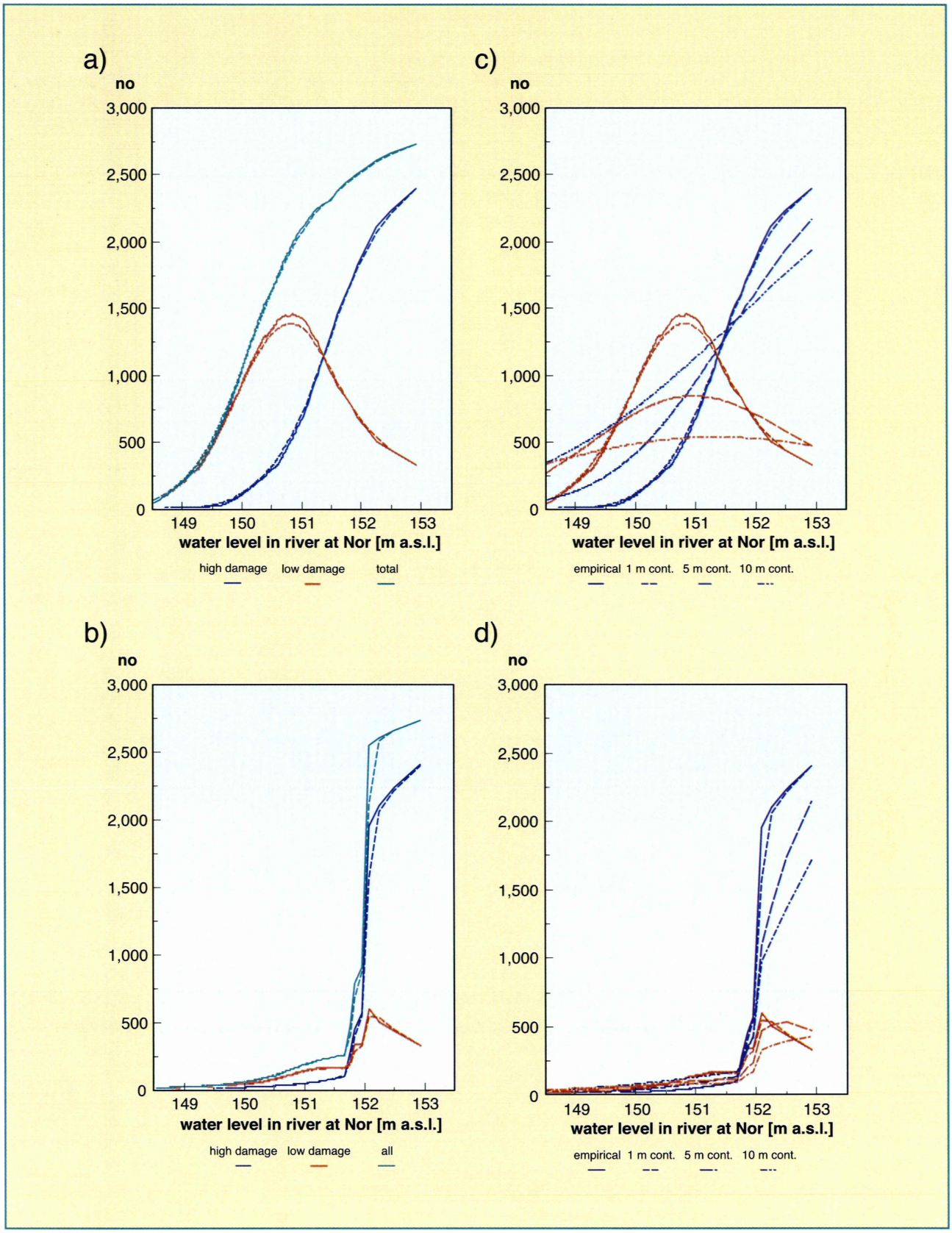


Figure 50 Antall bygninger oversvømt med lav skade (rød kurve), høy skade (blå kurve) og sum av de to (grønn kurve) som funksjon av vannstand ved Nor, z_{Nor}. a) og c) ser bort fra effekten av flomverk, mens b) og d) inkluderer flomverk. c) og d) illustrerer betydningen av nøyaktigheten i kartgrunnlaget.

Figure 50 The number of objects flooded with low (red line) and high damage (blue line) and the sum of the two (green line) as a function of the river water stage z_{Nor}. In a) and c) existing dikes are neglected and in b) and d) their role is taken into consideration. c) and d) illustrates the role of precision in the map data.

Tabell 19 Forvented antall feilklassifiserte objekter for forskjellig kartgrunnlag.

Tabell 19 Expected number of misclassified objects for different map bases.

Vannstand *water level* z_{Nor}	Antall objekter *number of objects*	Type 1-feil/type 1 error			Type 1-feil/type 2 error		
		Ekvidistanse/map contour interval					
		1 m	5 m	10 m	1 m	5 m	10 m
Stor skade, uten flomverk/*high damage, no levees*							
149.0	4	0.5	1	2	2	133	463
149.5	15	2	5	6	11	235	586
150.0	114	26	47	52	36	363	702
150.5	302	39	111	130	70	479	772
151.1	852	111	293	355	131	488	692
Liten skade, uten flomverk/*low damage, no levees*							
149.0	199	33	79	89	54	350	558
149.5	470	72	175	204	107	398	353
150.0	971	132	354	416	151	365	702
150.5	1354	110	446	556	139	314	253
151.1	1333	69	390	520	153	346	274
Stor skade, med flomverk/*high damage, with levees*							
149.0	2	0.2	0.7	0.9	0.3	9	42
149.5	4	0.5	1	2	2	16	56
150.0	15	2	5	6	3	24	69
150.5	28	3	9	11	3	35	84
151.1	54	5	15	20	6	53	101
Liten skade, uten flomverk/*low damage, with levees*							
149.0	18	2	7	8	3	24	41
149.5	30	4	10	12	4	34	47
150.0	43	5	15	18	11	49	54
150.5	77	10	28	33	19	56	56
151.1	152	14	52	63	16	47	51

Nor på hhv. 151.53 og 152.49. I de øverste grafene er kun vanndybder $y > 0$ er tatt i betraktning, mens den nederste grafen viser hele den betingede fordelingen. De siste kurvene indikerer at vannivået er godt under bygningenes fundament (y negativ) for det meste av bebyggelsen. Til sammenligning er fordelingen for positive verdier av y utledet av terrengmodeller i et GIS verktøy. Sammenhengen er svært godt. Det støtter den anvendte statistiske tilnærmelse som er brukt for å utlede fordelingene.

Det er antall bygninger ved et bestemt kritisk lokalt vann nivå som blir brukt når man estimerer flomrisiko. Figur 50 viser antall bygninger i de to skadekategoriene som funksjon av z_{Nor}. Antallet bygninger med lav skade (rød kurve) øker først til et maksimum og synker så ettersom flere og flere bygninger går over i klassen med høy skade (figur 50a). Antallet bygninger med høy skade (blå kurve) øker jevnt, men har en langsom økning for lave vannstander. Kurven for totalskade (grønn linje) er summen av de to andre kurvene og den stiger jevnt.

Figur 50b viser de samme tre kurvene, men med flomverk tilstede. Forholdet mellom de tre kurvene er i hovedsak den samme som i figur 50a, men effekten av flomverket dominerer bildet med en veldig skarp øking i antall skadete bygninger når vannstanden ved Nor passerer intervallet 151.75 og 152.00 m - dvs når flomverkene uten påbygning oversvømmes.

9.1.4 Innflytelsen av usikkerhet i høydebestemmelse for bygninger

Topografisk data for bygninger er beregnet fra kart med ekvidistanse på 1 meter. Kart med ekvidistanse på 5 og 10 meter har også vært brukt for å teste virkningen av presisjon i kartinformasjonen. Standardfeilen i høydedata σ_M kan anslås til 30% av ekvidistansen (Watt & Paine 1992). For å kunne beregne hvor mye nøyaktigheten i høydedata påvirker estimatet av antallet bygninger berørt, benyttes en normalfordelt tilnærming til den empiriske fordelingen av bygningshøyde $F_H(h)$. Følgene av å bruke en normalfordelt tilnærming er også vist i figur 50. Den generelle effekten er at kurvene glattes i forhold til empirisk data. Kurvene basert på 1 m ekvidistanse følger kurvene basert på empiriske data godt, mens nesten alle detaljer viskes ut for data fra kart med 5 og 10 m ekvidistanse. Det kan også noteres at det antas at presisjonen i høydedataene for flomverkene bare er 10% av ekvidistansen. Derfor er virkningen av flomverkene i figur 50d er nokså presist gjengitt for alle tre tilfellene.

Det forventede antall feilklassifiserte objekter er også beregnet (tabell 19). To typer feil forekommer: Den første er når et objekt tilhører f.eks. klassen for bygninger med mye skade, men er klassifisert til å ikke være i klassen (type 1-feil). Den andre er når et objekt ikke tilhører den klassen den er klassifisert til å være i (type 2-feil). Relativt sett er disse feilene størst når antall objekter er lite. Type 1-feil avhenger av antall objekter klassifisert, mens type 2-feil avhenger av antall objekter i utvalget. In grove tall er feilene for kart med 1 m ekvidistanse 10-15%, for 5m 20-30% og for 10m 40-50%.

9.1.5 Vannstand/skade-kurve for flomsletta ved Nor

Antallet n, av totalt N, bygninger som vil bli skadet av flom på et oversvømmet område øker med økende vannstand z i elva er gitt ved ligning (5) og (6) i tekstboksen, samt figur 50. Det antatte antall bygninger med lokal vannstand $\geq y_c$ når vannstand z er $\Delta n(y|z_{Nor})$. Den forventede skade for individuelle bygninger er $l'(y)$ (9.2), og den forventede totalkostnaden $l(y,z)$ er dermed:

$$l(y,z) = \Delta n(y|z)l'(y) \qquad (9.2)$$

Fordelingsfunksjonen til $l(y,z)$ beregnes på grunnlag av (9.2) til:

$$f_L(l|y,z) = f_{L'}(l(y,z)/\Delta n(h,z))/\Delta n(h,z) \qquad (9.3)$$

Den forventede skade $E[L \mid z]$ for et bestemt vannstandsintervall, for eksempel $y > y_c$ beregnes ved integrasjon over det *kritiske intervallet*:

$$E[L|z] = \int_{y_c}^{y_{max}} l\, f_{L'}(l(y,z)/\Delta n(y,z))/\Delta n(y,z)\, dy \qquad (9.4)$$

I det foreliggende tilfellet, når fordelingen av individuelle skadekostnader er forenklet til bare to klasser for respektivt høy og lav skade, kan den forventede skaden beregnes ved:

$$E[L|\zeta] = \begin{cases} n(-2 < y \leq -0.5|z)l'_{low} \\ n(y > -0.5|z)l'_{high} \end{cases} \qquad (9.5)$$

Denne funksjonen, vannstand-skadekurven, er en funksjon av vannstand z_{Nor} ved Nor. Den er vist i figur 51 for høy og lav skade og summen av de to; totalskade (data basert på 1 m ekvidistanse). Den gjenspeiler i hovedsak kurvene for berørte bygninger i figur 50. Forventet feil i antall skadede bygninger er selvfølgelig også relevant for vannstand-skadekurven. En videre kilde til usikkerhet kommer som vist av usikkerheten i estimatene av skadene for individuelle bygninger (figur 1). Tabell 20 illustrerer størrelsen på denne feilen ved dens standardavvik $D[L \mid z]$. Denne feilen er stor bare når kun et fåtall objekter er berørt, men den relative betydningen er reduseres ettersom antall berørte bygninger øker.

Figur 52 gir en illustrasjon av resultatene av denne studien, m.a skadefordelingen og skaderisikoen i det undersøkte området. Kurvene og risikoestimatene beregnet med prosedyrene illustrert ved figur 13. Skadekurven (figur 51) og fordelingsfunksjonen for vannstand (figur 49) gir dermed bakgrunnen for å beregne skadefordelingen. Risikoestimatet er forventningsverdienverdien for skadefordelingen:

$$r = \int_0^\infty l f(l) dl \qquad (9.6)$$

Figur 52 viser tre tilfeller. Den første, illustrert i figur 52a, viser skadefordelingen for en hypotetisk situasjon uten flomverk, men med dagens bygningsmasse. I dette tilfellet synker kurven jevnt fra store skader for lave overskridelsesannsynligheter til moderate og lave skader for høy overskridelsesannsynlighet. Risikoene (midlere årlig skade) er estimert til 50 millioner kroner (NOK). Denne verdien må sees i lys av de høye skadene - opp til 1000 millioner NOK for flom med overskridelsessannsynlighet på 1/1000.

De to kurvene i figur 52b viser situasjonen med eksisterende flomverk. Kurven for 1995 gir skadebeskrivelse relevant for flomåret. Kurven for 1966 er hypotetisk, hvor antall bygninger i området er redusert til det virke-

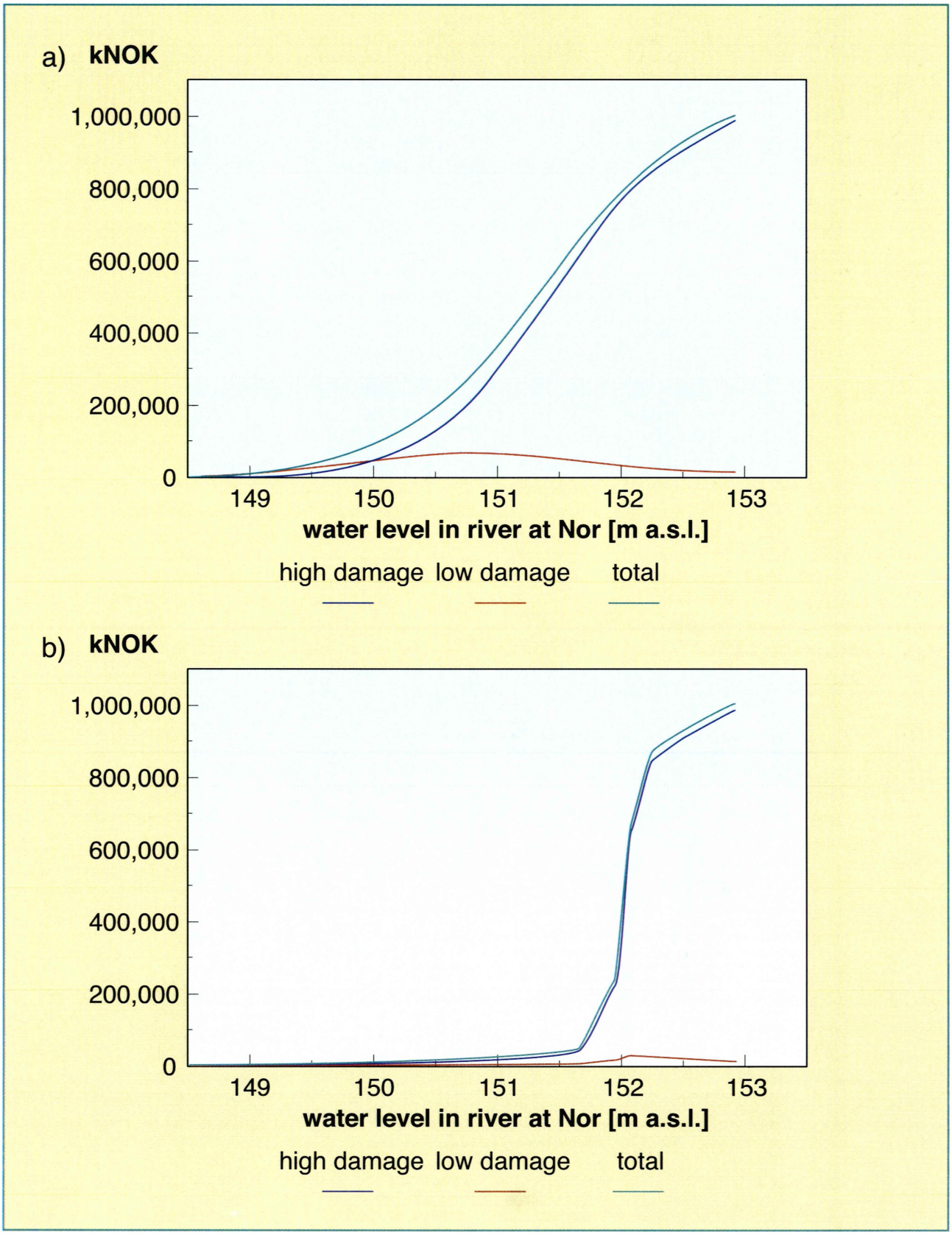
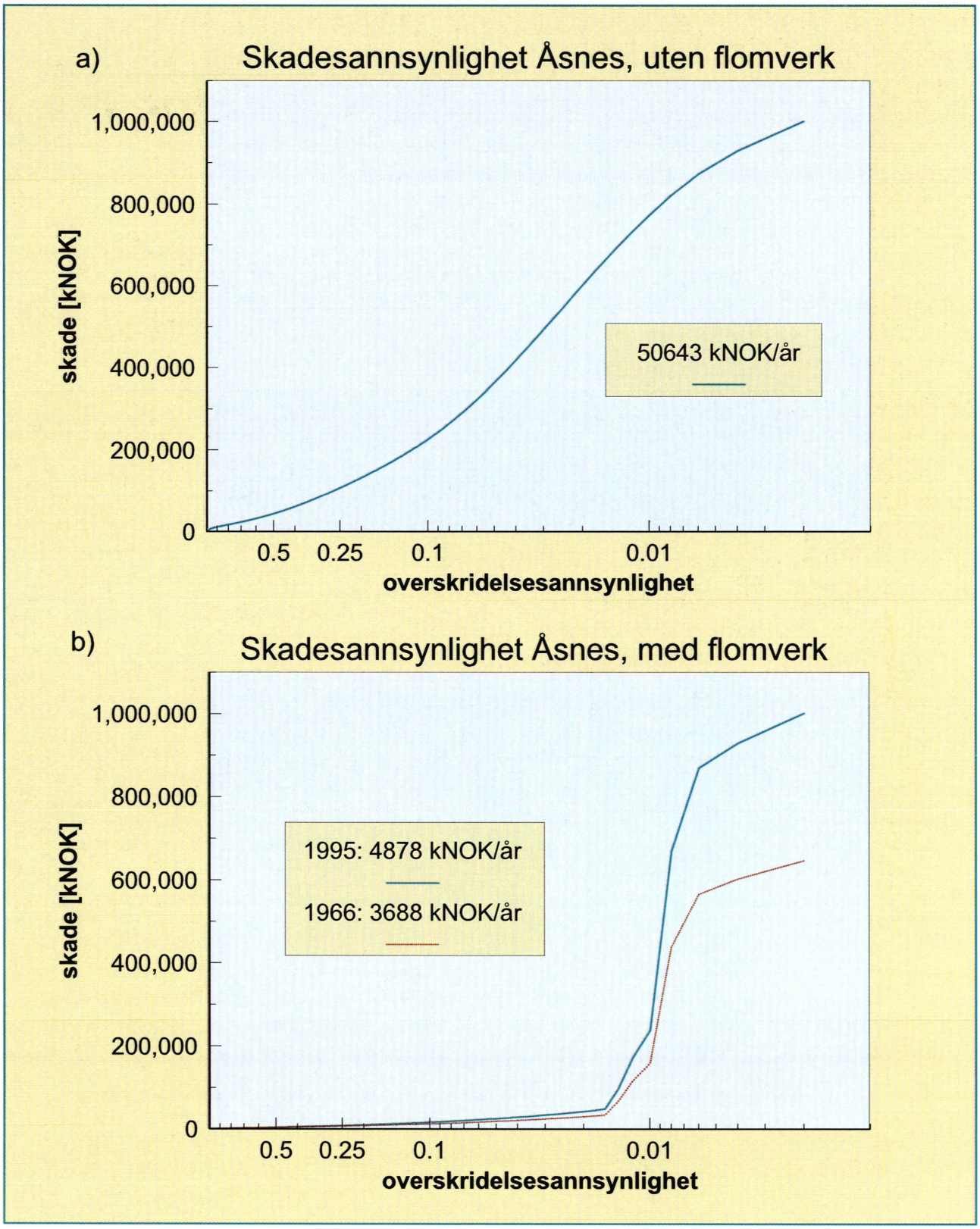


Figure 51 Vannstand/skadekurve for elvesletta oppstrøms Nor basert på kartgrunnlag med 1 m ekvidistanse.

Figure 51 Stage/damage curve for the floodplain upstream Nor based on 1-m contour interval map data.



Figur 52 Fordelingen av skader for flomsletta oppstrøms Nor. Den heltrukne linjen i a) viser forholdene uten flomverk, men med eksisterende bebyggelse. Heltrukken linje i b) viser dagens situasjon med flomverk. Den stiplete linjen viser en hypotetisk situasjon for fordelingen av bygninger slik den var i 1966.

Figure 52 The distribution of damages for the floodplain upstream Nor. The full line in a) shows the case with the assumption that there are no physical obstacles preventing the river water from reaching a building at a certain altitude. The full line curve in b) is for the present (1995) situation when the height of the dikes constructed after the 1967 flood is accounted for. The dashed line shows a hypothetical curve for the number of building that existed in 1966.

Tabell 20. Feil i skadeestimat forårsaket av variabiliteten av skaden på enkeltbygninger.

Tabell 20 Errors in loss estimates due to variability of damage costs of individual buildings

Vannstand *water level* z_{Nor}	**Antall objekter** *number of objects*	**Sum skade E** *Sum damage kNOK*	**Usikkerhet i skadeestimat D** *Uncertainty in estimate kNOK*	**D/E**
Stor skade, uten flomverk/*high damage, no levees*				
149.0	4	1648	588	0.356
149.5	15	6179	1138	0.184
150.0	114	46957	3138	0.067
150.5	302	124394	5107	0.041
151.1	852	350939	8579	0.024
Liten skade, uten flomverk/*low damage, no levees*				
149.0	199	9572	588	0.061
149.5	470	22607	904	0.040
150.0	971	46705	1299	0.029
150.5	1354	65127	1534	0.024
151.1	1333	64117	1756	0.027
Totalskade, uten flomverk/*total damage, no levees*				
149.0	203	11220	832	0.074
149.5	485	28786	1454	0.050
150.0	1085	93662	3396	0.036
150.5	1656	189521	5333	0.028
151.1	2185	415056	8757	0.021

lige antallet det gitte året. På dette tidspunktet var flomverkene av noe mindre omfang enn i 1995, men det er det ikke tatt hensyn til i figuren. Risikoen (midlere årlig skade) for de to tilfellene er 4.9 million NOK respektive 3.7 million NOK. Disse tallene er svært lave sammenlignet til situasjonene vist i figur 52a. Dette er naturligvis pga. at skadene er svært små for vannstander under flomverkenes dimensjonerende vannstand, som tilsvarer flom med 100 års gjentaksintervall (1/100 årlig overskridelsesannsynlighet). Skadene for flommer med høyere gjentaksintervall tilsvarer kurven uten flomverker.

For den eksisterende fordelingen av bygninger, men uten flomverk utgjør risikoen altså 50 mill kr pr år, mens den med flomverk synker til ca 5 mill 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 52 skulle skadene på bygninger vært ca 900 mill kr. Ved hjelp av midlertidig påbygning klarte man å unngå overtopping av de viktigste flomverkene, m.a. Kirkenærverket, og skadene ble av størrelseorden 140 mill kr (kilde: Naturskadepoolen).

9.1.6 Oppsummering av usikkerhetanalyse

Den metoden for regional flomfrekvensanalyse med lokal oppdatering som er presentert i kapittel 6 representerer "state-of-art" når det gjelder å minimere usikkerheten i flomanalyse. Likevel viser det seg i usikkerhetsanalysen at det er de hydrologiske elementene som dominerer:

- usikkerhet i flomfrekvensanalysen;
- usikkerheten i vassføringskurven.

Om dette ikke er direkte uventet, så ser man at i praksis blir gjerne disse usikkerhetselementene neglisjert. Det er god grunn til å fokusere sterkere på disse problemstillingene.

Når det gjelder flomfrekvensanalysen kan usikkerheten først og fremst reduseres ved å introdusere flere observasjonspunkt - ved den gitte metodikken trenger ikke dataseriene nødvendigvis være lange. Nye stasjoner bør lokaliseres til punkt hvor man anser nøyaktigheten for å være utilfredsstillende. Alternativet er metodiske forbedringer ved inkludering av meteorologiske data, det vil si

bruk av metoder som "derived distribution approach" og hydrologiske modeller.

9.1.7 Verifikasjon

Skadeerstatningen utbetalt av Naturskadepoolen i forbindelse med flommen i 1995 i Grue og Åsnes er gitt i tabell 21. Antall skadede bygninger er 535, og sum skadeutbetalinger på bygninger i Åsnes og Grue er 128 millioner kroner (midlere skade 240 kNOK pr bygning). Fra figurene 50 og 52 viser at kurvene for antallet skader og sum skader stiger bratt når flomverkene begynner å svikte, dvs rundt 60-70 års gjentaksintervall uten forsterkninger av flomverkene. Ved dette nivået angir kurvene ca 250 skadetilfeller, og en totalskade på ca 50 millioner kroner (200 kNOK skade pr bygning). Ved 100 års gjentaksintervall øker skadene drastisk, på dette nivået gir kurvene ca 750 skadetilfeller, og en totalskade på ca 250 millioner kroner (330 kNOK skade pr bygning). Ved 200 års gjentaksintervall har samtlige flomverk brutt sammen dersom de ikke forsterkes, og antall skader har økt til 2500, samlet skade til ca 900 mill kr (360 kNOK skade pr bygning). Ved 1995-flommen brøt som kjent noen flomverk sammen, men de viktigste verkene ble reddet ved midlertid forsterkning. Konklusjonen blir dermed:

1. Det viktigste avvikene mellom prediksjonene fra denne risikoanalysen og den observerte skaden blir dermed at skadekurvene er basert på den nominelle dimensjoneringen av verkene - de tar ikke hensyn til at flomverkene vil forsterkes midlertid under en flom.
2. Midlere skadeutbetaling pr bygning faller fint inn i mønsteret fra risikoanalysen.

9.2 Risikoanalyse for andre skadeobjekter

Den metodikken for risikoanalyse som er beskrevet i kapittel 9.1 kan i prinsippet anvendes for alle typer objekter hvor skaden på objektet primært er avhengig av lokal vannstand, $l'(y)$. Dette gjelder enten den generaliserte skadefunksjonen (skade pr objekt, lengde eller areal) er gitt som en kontinuerlig funksjon (figur 1), en trappefunksjon (jernbane, bygninger i kapittel 9.1) eller av/på funksjon (flomverker).

Noe mer komplisert blir det når det er nødvendig å benytte flere skadeprediktorer, som ved skadene på jordbruksareal (kapittel 5.7). Her kommer helning på vannlinjen inn som en viktig prediktor (som indeks for vannhastighet), i tillegg til vannstand/dybde. Kan helningen regnes som konstant over området analysen utføres for, vil helningsleddet være et konstant bidrag i skadeberegningen, og vannstandene følge fordelingen i ligning (9.5), men med en kontinuerlig fordeling over det oversvømte området. Dersom helningen varierer mye i rommet, vil det imidlertid være nødvendig å foreta enten en oppdeling i delarealer med samme helning, eller foreta en punktvis beregning over hele arealet.

9.3 Vurdering av overførbarhet av skadefunksjoner til andre vassdrag

Metodikken beskrevet i kapittel 9.1 er generelt overførbar hvor man kan etablere den nødvendige grunnlagsinnformasjonen (vannstand-vassføringskurver, flomfrekvensanalyse, flomsoneanalyse, generaliserte skadefunksjoner og den romlig fordelingen av skadeobjekter). Disse elementene kan i prinsippet bestemmes a priori for et hvert potensielt oversvømmelsesområde ved kartanalyse, evt. registrering og oppmåling i marken, med unntak av de generaliserte skadefunksjonene. Spørsmålet om overførbarhet blir dermed et spørsmål om overførbarheten av selve skadefunksjonen.

Skadefunksjonene etablert i kapittel 5 stammer stort sett fra skaderegistreinger under Vesleofsen i 1995 - altså en vårflom i et stort Østlandsvassdrag. Det blir dermed både et spørsmål om overførbarhet i rom, sesong og tid. Noen generelle aspekter ved dette er:

Tabell 21 Antall skadede bygninger og sum skade på bygninger i KNOK for Grue og Åsnes for the 1995 flood

Tabell 21 Number of damaged buildings and total damage to buildings (kNOK) for Grue and Åsnes municipalities, 1995 flood.

Kommune *Municipality*	Bolig *Residential house*		Landbruksbygg *Farm building*		Andre bygg *Other buildings*		Alle bygg *All buildings*	
	Antall *Number*	Skade *Damage*	Antall *Number*	Skade *Damage*	Antall *Number*	Skade *Damage*	Antall *Number*	Skade *Damage*
Grue	160	8 767	35	4 365	82	8 983	277	22 115
Åsnes	145	71 545	62	14 330	51	20 348	258	106 223
Sum							535	128 338

9.3.1 Overførbarhet i rom

For bygninger vil overførbarheten først og fremst være et spørsmål om byggeskikk - skadefunksjonen gjelder ikke dersom byggeskikk, hustype eller husstørrelse variere mye fra distrikt til distrikt. Dersom man ikke har informasjon om alder, vil også aldersammensetningen være være av betydning.

I skadefunksjonene for jordskade og avlingsskade inngår det ikke informasjon om avling og dyrkingsmåte. Dette er faktorer som må forventes å være av betydning for graving og erosjon, og de vil etter alt å dømme varierer regionalt. Dessuten er disse skadefunksjonene etablert som regresjonsligninger, det betyr at de ikke nødvendigvis gjelder utenfor det variasjonsområde prediktorene har for kalibreringsområdet. Dette kan ha betydning særlig dersom man gjør beregning for områder med større helning.

De øvrige skadefunksjonene (vei, jernbane og flomsikringstiltak) er sannsynligvis nokså generelle.

9.3.2 Overførbarhet i sesong

Overførbarhet i sesong er sannsynligvis mest problematisk for skadefunksjonene for jordbruksareal. Eroderbarheten og avlingsskadene er klart sesongavhengige. For de øvrige skadefunksjonene er sannsynligvis overførbarheten god. Et spesielt problem kan være vinterflommer med isgang, som føre til andre skadetyper.

9.3.3 Overførbarhet i tid

Skadefunksjonsanalysen for bygninger viser klart at alder på bygninger har en viss betydning. Dette kan skyldes variasjoner i byggeskikk eller at bygningers verdi forringes med tiden. Endringer i byggeskikk, husstørrelse og endring i faste installasjoner må forventes å forandre skadefunksjonen over tid.

Avlingstype og jordbrukspraksis vil endre seg over tid - det må dermed forventes at skadefunksjonene også endrer seg.

For veier og jernbane vil sannsynligvis skadefunksjonene holde seg mer konstant over tid (når man ser bort fra inflasjon). De vedlikeholdes av de respektive etater på et noenlunde konstant nivå.

Referanser

Andersen, B. (1996) Flomsikring i 200 år. 184 p. Norges vassdrags- og energiverk, Oslo. ISBN 82-410-0263-7.

Ashkar, F. & Rouselle, J. (1981) Design discharge as a random variable: a risk study. Wat. Resources Res. 17(3)577-591.

Aven, T. (1992) Reliability and risk analysis. Elsevier, New York.

Bates, C.G. & Henry, A.J. (1928) Forest and stream-flow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado. Monthly Weather Review supplement 30:1-74.

Berg, H., Engen, I.K., Haddeland, I., Høydal, Ø., Skoglund, M. & Traae, E. (1999) Effekter av flomsikringstiltak på flomforløpet. HYDRA-rapport F05, Norges vassdrags- og energiverk, Oslo.

Berger, J.O. (1985) Statistical decision theory and Bayesian analysis. 2: 617 p. Springer, Heidelberg. ISBN 3-540-96098-8.

Blöschl, G. (1996) Scale and scaling in hydrology. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer 132, Technische Universität Wien, Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Wien.

Blöschl, G. & Sivapalan, M. (1995) Scale issues in hydrological modelling: a review. Scale Issues in Hydrological Modelling. Eds: J.D. Kalma & M. Sivapalan. pp 9-48. Wiley & Sons, Chichester.

Bogen, J. & Bønsnes, T.E. (1999) Flommer og sedimenttransport i vassdrag. HYDRA rapport Mi05, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Brabrand, Å., Arnekleiv, J.V., Brittain, J.E., Dolmen, D., Halvorsen, G., Hindar, K., L'Abée-Lund, J.H., Jensen, A.J., Johnsen, B.O., Rørslett, B., Sand, K. & Aass, P. (1999) Virkninger av flom på vannlevende organismer. HYDRA rapport Mi 02, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Burnham, M.W. & Davis, D.W. (1986) Accuracy of computed water surface profiles. HEC Technical Paper 114, Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, Portland.

Burrell, B. & Keefe, J. (1989) Flood risk mapping in New Brunswick: A decade review. Canadian Water Resources Journal 14:66-77.

Burrough, P.A. (1986) Principles of geographical information systems for land resources assessment. Clarendon Press, Oxford.

Carlson, R.F. & Fox, P.A. (1976) Northern Snowmelt Flood Frequency Model. Wat. Resources Res. 12(4)786-794.

Casale, R. & Samuels, P.G. (1998) Hydrological Risks: Analysis of Recent Results from EC Research and Technological Development Actions. 28 p. EC Environment and Climate Programme, Brussels.

Caspary, H. J. (1998) Atmospheric circulation changes across Europe as a driving force for an increasedflood risk in southwest Germany. Proceedings of the Second International Conference on Climate and Water, Espoo, Finland, 17-20 August 1998. Eds: R. Lemmelä & N. Helenius. 1. pp 369-379. Helsinki.

Cramér, H. (1971) Mathematical methods of statistics. 575 p. Princeton Univerity Press, Princeton.

Dalrymple, T. (1960) Flood-frequency analysis. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1543-A, 80 p. U.S. Geological Survey,

Dawdy, D.R. (1961) Variation of flood ratios with size of drainage area. U.S. Geological Survey Professional Paper 424-C:C36, U.S. Geological Survey.

DHI (1994) MIKE11-GIS Reference and Users Guide. Danish Hydraulic Institute, Hørsholm.

Diaz-Granados, M.A., Valdes, J.B. & Bras, R.L. (1984) A physically based flood frequency distribution. Wat. Resources Res. 20(7)995-1002.

Eagleson, P.S. (1972) Dynamics of flood frequency. Wat. Resources Res. 8(4)878-898.

Engler, A. (1919) Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewasser. Mitt. Schweiz. Anst. für das Forstliche Versuchswesen 12,

Erichsen, B. (1995) Frekvensanalyse av 1995 flommen i Glomma, Gudbrandsdalslågen og Trysilelven. NVE Publikasjon 23, 39 p. Norges vassdrags- og energiverk, Oslo. ISBN 82-410-0246-7.

Faafeng, B., Lydersen, E., Kjellberg, G. & Bjerknes, V. (1999) Miljøkonsekvenser av flom - flom og vannkvalitet. HYDRA-rapport Mi 01, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

FEMA (1995) Guidelines and Specifications for Study Contractors. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C. http://www.fema.gov/mit/tsd/DL_SCg.htm.

Fergus, T. (1993) Geomorphological adjustments of the channel after river regulation for hydropower in the Fortun River, Sogn and Fjordane, Norway. Rapportserie

hydrologi 34, 74 p. Geografisk institutt, Universitetet i Oslo, Oslo.

Francou, J. & Rodier, J.A. (1967) Essai de classification des crues maximales observées dans le monde. Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie IV (3), ORSTOM,

Galea, G. & Prudhomme, C. (1994) Notions de base et concepts utiles pour la compréhension et la modélisation synthétigues des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF. Revue des sciences de l'eau 10(1)83-101.

Gilard, O. (1998) Les bases techniques de la méthod Inondabilité. Cemagref Édition Cemagref.

Gottschalk, L., Lundager Jensen, J., Lundquist, D., Solantie, R. & Tollan, A. (1979) Hydrologic regions in the Nordic countries. Nordic Hydrol. 10:273-286.

Gottschalk, L. (1989) Regional exceedance probabilities. Nordic Hydrol. 20:201-214.

Gottschalk, L. & Krasovskaia, I. (1997) Climate change and river runoff in Scandinavia, approaches and challenges. Boreal Environment Research 2(2)145-162.

Gottschalk, L. & Krasovskaia, I. (1999) Risk of flooding - a case study for the floodplain upstream Nor i the Glomma River, Norway. HYDRA-report R01. Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Oslo.

Gottschalk, L. & Sælthun, N. R. (1990) Large scale temporal variability and risk of design failure (Abstract). Annales Geophysicae, EGS XV General Assembly. European Geophysical Society,

Gottschalk, L. & Weingartner, R. (1998) Distribution of peak flow derived from a distribution of rainfall volume and runoff coefficient, and a unit hydrograph. J. Hydrol. 208:148-162.

Gottschalk, L. & Weingartner, R. (2000) Analysing scaling properties in regional floods by expected order statistics and L-moments. Wat. Resources Res. submitted:

Grønlund, A. (1999) Naturgrunnlag og arealbruk i Glommas nedbørfelt. HYDRA-rapport N03, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Grønlund, A., Njøs, A. & Kløve, B. (1999) Endringer i landbrukets arealbruk i Glommas nedbørfelt. HYDRA-rapport N02, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Gupta, V. K. & Dawdy, D. R. (1994) Regional analysis of flood peaks: multiscaling theory and its physical basis. Advances in Distributed Hydrology. Eds: R. Rosso, A. Peano, I. Becchi & A. Bemporad. pp 147-168. Water Resources Publications, Highland Ranch, CO.

Gupta, V.K. & Dawdy, D.R. (1995) Physical interpretations of regional variations in the scaling exponents of flood quantiles. Hydrological processes 9(3/4)347-361.

Gupta, V. K., Mesa, O. & Dawdy, D. R. (1994) Multiplicative cascades and spatial variability of rainfall, river networks and floods. Reduction and predictability of Natural Disasters. Eds: J. Rundle, W. Klein & D. Turcotte. Santa Fe Institute, XXV Addison-Wesley,

Gupta, V.K. & Waymire, E. (1996) Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. J. Geophys. Res. 95(D3)1999-2009.

Haan, C.T. (1977) Statistical Methods in Hydrology. Iowa State University Press, Ames.

Haddeland, I. & Høydal, Ø. (1999) Effekter av flomverk på flomforløpet. HYDRA-notat 5/99. Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Handmer, J.W. (1988) Risk information for floodplain management, Discussion. Journal of Water Resources Planning and Management ASCE 114:120-123.

Harby, A. (1988) Flomskader. Årsak, omfang og mottiltak. En detaljstudie av flommen 3.-4. september 1988.1-99. Institutt for vassbygging, Norges tekniske høgskole,

Hebson, C. & Wood, E.F. (1982) A derived flood frequency distribution using Horton order ratios. Wat. Resources Res. 18(5)1509-1518.

Hosking, J.R.M. (1990) L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. Journal of the Royal Statistical Society B52:105-124.

Hosking, J.R.M. & Wallis, J.R. (1993) Some statistics useful in regional flood frequency analysis. Wat. Resources Res. 29(2)271-282.

Hutchinson, M.F. (1989) A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. J. Hydrol. 106:211-232.

Jaeggi, M. N. R. & Zarn, B. (1990) A new policy in designing flood protection schemes as a consequence of the 1987 floods in the Swiss Alps. International Conference of River Flood Hydraulics. Ed: W.R. White. pp 75-84. John Wiley & Sons, Chichester.

Jain, S.K., Yogararasin, G.N. & Seth, S.M. (1992) A risk-based approach for flood control operation of a multi-purpose reservoir. Wat. Resources Bull. 28:(6)1037-1043.

James, L.D. & Hall, B. (1986) Risk information for floodplain management. Journal of Water Resources Planning and Management ASCE 112:485-499.

Jones, J.L., Haluska, T.L., Williamson, A.K. & Erwin, M.L. (1998) Updating flood maps efficiently; building on existing hydraulic information and modern elevation data with a GIS. USGS Open-File Report 98-0200, 12 p. U.S. Geological Survey, Reston,VA.

Karlsson, P.-O. & Haimes, Y.Y. (1988a) Probability Distributions and Their Partitioning. Wat. Resources Res. 24(1)21-29.

Karlsson, P.-O. & Haimes, Y.Y. (1988b) Risk-Based Analysis of Extreme Events. Wat. Resources Res. 24(1)9-20.

Kite, G.W. (1977) Frequency and Risk Analysis in Hydrology. Water Resources Publications, Fort Collins.

Krasovskaia, I. (1996) Sensitivity of the stability of river flow regimes to small fluctuations in temperature. Hydrol. Sci. J. 41(2)251-264.

Krasovskaia, I., Gottschalk, L., Rodrigues, A. & Laporte, S. (1999) Dependence of the frequency and magnitude of extreme floods in Costa Rica on the Southern Oscillation Index. Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating. Eds: L. Gottschalk, J.-C. Olivry, D. Reed & D. Rosbjerg. IAHS Publications 255. pp 81-89. International Association of the Hydrological Sciences, Wallingford.

Krasovskaia, I. & Sælthun, N.R. (1997) Sensitivity of the stability of Scandinavian river flow regimes to a prediced temperature rise. Hydrol. Sci. J. 42(5)693-711.

Kristensen, S.E. & Voksø, A. (1998) Metodebeskrivelse for flomsoneanalyse med eksempler fra Flisa og Kirkenær. HYDRA Notat 7|98, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Krokli, B. & Voksø, A. (1994) Flomlinjeberegning og flomsonekart for nedre del av Leira (002.CAZ). NVE Rapport 7 1994, 9 p. Norges Vassdrags- og Energiverk, Oslo.

Kundzewicz, Z.W. (1998) Floods of the 1990s: Business as usual? WMO Bulletin 47(2)155-160.

Kuusisto, E., Lemmelä, R., Liebscher, H. & Nobilis, F. (1994) Climate and water in Europe; some recent issues. 36 p. World Meteorological Organization, Regional Association VI, Working Group on Hydrology, Helsinki.

Lambert, J.H. & Li, D. (1994) Evaluating risk of extreme events for univariate loss functions. J. Water Resources Planning and Management ASCE 120(3)382-399.

Lindholm, O., Milina, J., Myrabø, S. & Sægrov, S. (1999) Urbaniserte områders innvirkning på flomforhold. HYDRA-rapport T02, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Loucks, D.P., Stedinger, J.R. & Haith, D.A. (1981) Water Resources Systems Planning and Analysis. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.

Lowrance, W.W. (1976) Of Acceptable Risk. William Kaufmann Inc. Los Altos.

Mandelbrot, B.B. & Wallis, J.R. (1968) Noah, Joseph and operational hydrology. Wat. Resourc. Res. 4(5)909-919.

Mays, L.W. & Tung, Y.-K. (1992) Hydrosystems Engineering and Management. McGraw-Hill, Inc. New York.

Mitsiopolous, J., Haimes, Y.Y. & Li, D. (1991) Approximating catastrophic risk through statistics of extremes. Wat. Resources Res. 27(6)1223-1230.

Moughamian, M.S., McLaughlin, D.B. & Bras, R.L. (1987) Estimation of flood frequency: An evaluation of two derived distribution procedures. Wat. Resources Res. 23(7)1309-1319.

NOU (1996) Tiltak mot flom. Noreges offentlige utredninger 1996:16, 207 p. Statens trykning, Oslo. ISBN 82-583-0404.

NVE (1996) NVEs flom- og erosjonssikringstiltak i Lågen-, Glomma- og Trysilvassdragene. Funksjon og virkning under flommen 1995. Delutredning 5.1 for flomtiltaksutvalget. NVE Rapport 7/1996, Norges vassdrags- og energiverk, Oslo.

NVE (1999) Flomsonekartlegging i USA. Studietur 12-19. November 1998. Ed: E.K. Øydvin. Internt notat Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Otnes, J. & Ræstad, E. (1978) Hydrologi i praksis. Annen utgave: 314 p. Ingeniørforlaget, Oslo.
ISBN 82 524 0036 1.

Paine, J.D. & Watt, W.E. (1992) Flood risk mapping in Canada: 2. Compatible mapping. Canadian Water Resources Journal 17:139-151.

Parett, N. F. (1987) Bureau of Reclamation use of risk analysis. Application of frequency and risk in water resources. Ed: V.P. Singh. pp 411-428. D. Reidel Publishing Co, Boston.

Plate, E. J. (1998) Probabilistic design for flood protection structures. Ribamod - River Basin modelling, management and flood mitigation - Concerted action. Proceedings of the first workshop, Delft, 13 to 15 February 1997. Eds: R. Casale, G.B. Pedroli & P. Samuels. Science, Research and Development EUR 18019 EN. pp 43-56. European Commission, Luxembourg. ISBN 92-828-2002-5.

Rasmussen, N.C. (1981) The application of probabilistic assessment technology to energy technologies. Annual Rev. of Energy 6:123-138.

Rasmussen, P. F. (1991) On the sampling distribution of exceedance probabilities. Water Resources Engineering Risk Assessment. Ed: J. Ganulis. NATO ASI Series 96, 91.

Roald, L.A. (1999) Analyse av lange flomserier. HYDRA-rapport F01, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Rodda, J.C. (1976) Facets of Hydrology. John Wiley and Sons,

Rodda, J.C. (1995) Whither World Water? Wat. Resourc. Bull. 31:1-17.

Roderiguez-Iturbe, I. & Valdes, J.B. (1979) The geomorphologic structure of hydrologic response. Wat. Resourc. Res. 15(6)1409-1420.

Simonovic, S.P. & Mariño, M.A. (1981) Reliability programing in reservoir management 2. Risk loss functions. Wat. Resources Res. 17(4)822-826.

Sivapalan, M., Wood, E.F. & Beven, K.J. (1990) On hydrologic similarity 3. A dimensionless flood frequency model using a generalized geomorphologic unit hydrograph and partial area runoff generation. Wat. Resources Res. 26(1)43-58.

Smith, J. (1992) Representation of basin scale in flood peak distribution. Wat. Resources Res. 28(11)2993-2999.

Springer, M.D. (1979) The algebra of random variables. John Wiley & Sons, Chichester.

Stabbetorp, H. & Hiitola, K. (1995) Undersøkelser og forsøk i forbindelse med flommen 1995. Technical Report PLANTEFORSK, Apelsvoll forskningssenter.

Starr, C. (1969) Social benefit versus technological risk. Science 165(3899)1232-1238.

Stedinger, J.R. (1997) Expected probability and annual damage estimation. J. Water Resources Planning and Management ASCE 123(2)125-135.

Sælthun, N.R., Tveito, O.E., Bønsnes, T.E. & Roald, L.A. (1997) Regional flomfrekvensanalyse for norske vassdrag. NVE Rapport 14, 81 p. Norges vassdrags- og energiverk, Oslo.

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, 170 p. Nordic Council of Ministers, Copenhagen. ISBN 92-893-0212-7.

Sælthun, N.R. (1999) Flommer, flomsikring og miljø - konflikt eller konsensus? HYDRA-rapport Mi06, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Sælthun, N.R. & Lindholm, O. (1999) Forurensning under flom. HYDRA-rapport Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Sæter, O. (1998) Landskap og estetikk - et kulturelt perspektiv. HYDRA notat 2/1998, 24 p. Norges vassdrag- og energiverk, Oslo.

Tang, W.H., Mays, L.W. & Yen, B.C. (1975) Optimal risk-based design of storm sewer networks. Journal of Environmental Engineering ASCE 103(3)381-398.

Thompson, K.D., Stedinger, J.R. & Heath, D.C. (1997) Evaluation and presentation of dam failure and flood risk. J. Water Resources Planning and Management ASCE 123:(4)216-227.

Tingvold, J.K. (1999) Effekt av vassdragsreguleringer i Glomma og Lågen på flomforhold. HYDRA-rapport F04, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Tukey, J.W. (1958) Bias and confidence in not-quite large samples. (Abstract). Ann. Math. Stat. 29:614

Tung, Y.-K. & Mays, L.W. (1981) Optimal risk-based design of flood levee systems. Wat. Resources Res. 17(4)843-852.

Tveito, O.E. (1993) A regional flood frequency analysis of Norwegian catchments. Institute report series 86, 22 p. Institute of geophysics, University of Oslo, Oslo.

Vogel, R.M. & Fennessay, N.M. (1993) L-moment diagrams should replace product-moment diagrams. Water Resources Research 29:1745-1752.

Wathne, M. & Alfredsen, K. (1999) Effekten av regulering på flomdempning i Gudbrandsdalslågen. HYDRA-rapport F 03, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Wathne, M., Eggestad, H.O. & Skoglund, M. (1999) Samfunnskostnader pga. flomskader i vassdrag. HYDRA-rapport R02, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Watt, W.E. & Paine, J.D. (1992) Flood risk mapping in Canada: 1. Uncertainty considerations. Canadian Water Resources Journal 17:129-138.

Wingård, B., Hegge, K., Mohn, E., Nordseth, K. & Ruud, E. (1978) Regional flomfrekvensanalyse for norske vassdrag. Hydrologisk avdeling, rapport 2-78, 106 p. Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen, Oslo.

Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses. Agricultural Handbook 537, United States Department of Agriculture, Science and Education Administration. Washington, D.C.

Wise, S. M. (1998) Digital Terrain Models - Traps for the Unwary. Proceedings of the 3rd International Conference on GeoComputation, University of Bristol, United Kingdom, 17-19 September 1998. University of Bristol, Bristol.
http://www.geog.port.ac.uk/geocomp/geo98/.

WMO (1995) The global climate system, Climate system monitoring June 1991 - November 1993. WMO-No 819, WMO, Genéve. ISBN 92-63-10819-6.

Yevjevich, V. (1977) Risk and uncertainty in design of hydraulic structures. Stochastic Processes in Water Resources Engineering. Eds: L. Gottschalk, G. Lindh & L. Maré. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.

Yongquan, W. (1993) Solar activity and maximum floods in the world. Extreme hydrological events: Precipitation, Floods and Drought. Eds: Z.W. Kundzewicz, D. Rosbjerg, S.P. Simonovic & K. Takeuchi. IAHS Publ. 213. pp 121-127. International Association of the Hydrological Sciences, Wallingford.

Østdahl, T. & Taugbøl, T. (1999) Miljøtilpasning ved eksisterende og nye flomsikringstiltak - en litteraturstudie. HYDRA rapport Mi04, Norges vassdrags- og energiverk, Oslo.

Østdahl, T., Taugbøl, T. & Dervo, B. (1999) Miljøeffekter av flomforebyggende tiltak - en litteraturstudie. HYDRA-rapport Mi 03, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Østrem, G., Christensen, L., Hansen, R.V., Herfjord, T., Holmquist, J.F., Jonassen, K., Munther, M., Sandøy, S., Stige, L. & Strand, E.L. (1993) Ferskvannstesaurus, en første, foreløpige del av Norsk miljøtesaurus. Ed: G. Østrem. NVE Publikasjon 18/1993, 236 p. Norges vassdrags- og energiverk, Oslo. ISBN 82-410-0200-9.

Øygarden, L., Eggestad, H.O., Standring, W.J.F., Goffeng, G. & Vagstad, N. (1996) Flommen i 1995. Skader på jordbruksarealer langs Glomma og Gudbrandsdalslågen. Jordforsk rapport 40 p. Jordforsk, Ås. ISBN 82-7467-185-6.

Tidligere utgitt i HYDRA-serien

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 Tingvold, Glommens og Laagens Brukseierforening (GLB).

F05 Effekter av flomsikringstiltak på flomforløpet.
Hallvard Berg, Inger Karin Engen, Ingjerd 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 og Børre Dervo, Østlandsforskning.

Mi04 Miljøtilpasninger ved eksisterende og nye flomsikringstiltak – en litteraturstudie.
Torbjørn Østdahl og Trond Taugbøl, Østlandsforskning.

Mi05 Miljøvirkninger av erosjon og sedimenttransport under flommer.
Jim Bogen og Truls Erik Bønsnes, NVE.

Naturgrunnlag og arealbruk (N)

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

N02 Endringer i landbrukets arealbruk i Glommas nedbørfelt.
Arne Grønlund, Arnor Njøs, Bjørn Kløve, Jordforsk.

N03 Naturgrunnlag og arealbruk i Glommas nedbørfelt.
Arne Grønlund, Jordforsk.

N04 LANDPINE - en hydrologisk modell for simulering av arealbruksendringers innvirkning på avrenningsforhold.
Trond Rinde, SINTEF-BM.

N05 Virkningen av arealbruksendringer på avrenningsforhold.
Trond Rinde, SINTEF-BM
Arnor Njøs, Arne Grønlund, Jordforsk.

Skaderisikoanalyse (R)

R01 Economic Risk of Flooding - a case study for the floodplain upstream Nor in the Glomma River, Norway.
Lars Gottschalk, Dept. of Geophysics, UiO
Irina Krasovskaia, Dept. of Earth Sciences, Hydrology, University of Uppsala.

R02 Samfunnskostnader på grunn av flom i vassdrag.
Magne Wathne og Morten Skoglund, SINTEF
Hans Olav Eggestad, Jordforsk.

Tettsteder (T)

T01 Betydningen av lokal-/total overvannsdisponering (LOD/TOD) på flommer.
Svein Endresen, Siv.ing. Svein Endresen AS.

T02 Urbaniserte områders innvirkning på flomforhold.
Oddvar Lindholm, NLH
Steinar Myrabø, Jordforsk
Jadranka Milina, Sveinung Sægrov og Ingrid Selseth, SINTEF.

T03 Lokal og total overvannsdisponering (LOD/TOD) - Beskrivelser av anlegg, erfaringer mm.
Svein Endresen, Siv.ing. Svein Endresen AS.

T04 Skadereduserende kommunaltekniske tiltak med tanke på flom.
Svein Endresen, Siv.ing. Svein Endresen AS og Oddvar Lindholm, NLH.

Vedlegg

Vedlegg A Data benyttet i analysen av jordtapskader

Tabell 1. Egenskaper til elvestrekningene brukt i analysen av jordbruksskader

Elv-str	lengde km	fall norm-vst 10^3	fall flom-95 10^3	areal oversv. daa	areal dyrket daa	åkerandel daa/daa	sving-faktor km/km
1	18	0.19	0.16	3908	2375	1.00	0.84
2	3	0.80	0.59	0	0	1.00	0.93
3	53	0.12	0.15	21247	12523	1.00	0.90
4	3	2.89	1.77	275	163	1.00	0.94
5	17	0.04	0.17	4593	3727	1.00	0.92
6	1.5	3.61	2.79	74	10	1.00	0.88
7	8.5	0.77	0.72	888	445	1.00	0.86
8	3	0.56	0.77	647	351	1.00	0.76
9	3.5	3.68	3.33	305	207	1.00	0.98
10	9.5	0.70	0.75	2683	1793	1.00	0.92
11	10	1.13	1.34	3388	1936	1.00	0.87
12	8	0.09	0.34	2598	1683	1.00	0.93
13	8	1.00	1.00	2024	768	1.00	0.96
14	20	0.94	0.88	1123	831	1.00	0.96
15	4	1.72	1.70	0	0	1.00	0.88
16	8	0.12	0.14	4125	2897	0.40	0.98
17	3	1.77	1.92	1050	552	0.90	0.91
18	6	0.08	0.03	2186	1148	0.60	0.85
19	10	1.20	1.20	5414	2971	0.70	0.86
20	11	2.36	2.19	35	1	1.00	0.95
21	20	3.36	3.38	51	0	1.00	0.92
22	8	1.57	1.84	669	165	1.00	0.85
23	5	3.26	2.97	375	194	0.10	0.00
24	10	4.13	4.18	34	0	0.00	0.93
25	5	3.28	3.69	0	0	0.00	0.80
26	7.5	1.90	1.90	601	312	0.60	0.82
27	7.5	0.11	0.24	2608	2194	0.20	0.90
28	5	0.61	0.49	4014	3127	0.40	0.85
29	12	0.03	0.07	5235	3386	0.20	0.93
Sum	288.0			70149	43759		

Tabell 2: Egenskaper til elvestrekninger med terrengmodell (DTM)

Elv-str	areal oversv. daa	areal dyrket daa	målt dybde m	beregnet dybde m
1	3457	2178	1.66	1.81
3	19255	11464	2.83	2.56
5	3074	2799	2.76	2.78
6	57	8	2.06	2.01
7	728	404	2.34	2.39
8	643	351	3.50	3.50
9	253	170	2.34	2.15
10	2364	1504	2.73	2.82
11	3165	1764	3.68	3.48
12	2480	1646	3.46	3.43
13	1266	657	3.30	3.30
16	3155	2141	2.81	2.75
17	745	361	2.80	3.00
18	2046	1083	2.45	2.30
19	4802	2800	1.30	1.29
20	13	0	1.16	0.00
27	328	234	1.22	0.84
28	3078	2284	1.29	1.05
29	5114	3329	2.44	2.41
Sum	56024	35176		

Tabell 3 Flomskader på jordbruksareal

Elv-str	Jordtap						Sedimentasjon	
	Graving		Vekk-vasking		Sum			
	daa	m³	daa	m³	daa	m³	daa	m³
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	2730	22	4400	24	7130	6	600
3	49	170020	50	15000	99	185020	1220	253500
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	18	62360	50	5000	68	67360	690	154000
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	9	10560	0	0	9	10560	0	0
8	4	9400	90	9000	94	18400	26	5200
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	97	205700	486	74200	583	279900	267	44750
11	130	218140	559	89350	689	307490	576	79650
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	2440	65	8750	66	11190	0	0
14	47	80450	70	10000	117	90450	130	27250
15	22	29920	102	20400	124	50320	122	23100
16	5	7500	15	1500	20	9000	100	5000
17	24	39740	70	13000	94	52740	1040	101200
18	11	16500	100	8000	111	24500	145	14500
19	6	9840	35	5250	41	15090	140	19000
20	48	67600	10	2000	58	69600	14	4900
21	56	53600	90	13500	146	67100	150	10500
22	0	0	0	0	0	0	0	0
23	1	1690	0	0	1	1690	4	1200
24	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
26	46	84260	30	4000	76	88260	53	7350
27	0	0	0	0	0	0	0	0
28	8	15750	86	15210	94	30960	150	35500
29	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum	586	1088200	1930	298560	2515	1386760	4833	787200

Tabell 4 Fordeling av graveskader på skadetyper, m³

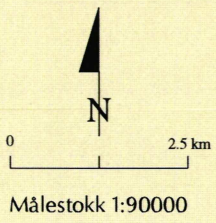
eri: Erosjonsrenne, brudd innløp
gia: Grop inne på arealet
be: Brudd i elvekant
er: Erosjonsrenne, uten brudd i innløp og utløp
bf: Brudd i flomverk
ue: Utvidelse av elvefar
gik: Grop innenfor elvekant
gu: Graving ved utløp
gub: Graving ved utløp, gjennom elvekanten

Elv-str	eri	gia	be	er	bf	ue	gik	gu	gub
2	0	2730	0	0	0	0	0	0	0
3	0	5450	0	0	162410	0	2160	0	0
5	0	0	0	0	52000	0	10360	0	0
7	0	0	0	10560	0	0	0	0	0
8	0	120	0	0	0	0	9280	0	0
10	0	61600	0	59400	79200	0	1540	0	3960
11	0	67480	47100	0	37260	6720	33600	25980	0
13	0	722	0	0	0	0	1718	0	0
14	0	46900	1400	0	0	0	22910	9240	0
15	9000	7700	6150	1800	0	0	5270	0	0
16	0	0	0	0	0	0	7500	0	0
17	0	2340	29920	0	0	0	0	7480	0
18	0	9900	0	0	0	0	0	6600	0
19	0	450	0	0	0	0	9390	0	0
20	33600	0	0	34000	0	0	0	0	0
21	48000	3080	0	2100	0	0	0	420	0
23	0	0	1690	0	0	0	0	0	0
26	46550	3568	19950	0	0	0	14192	0	0
28	0	2328	0	0	0	0	13422	0	0
Sum	137150	214368	106210	107860	330870	6720	131342	49720	396000

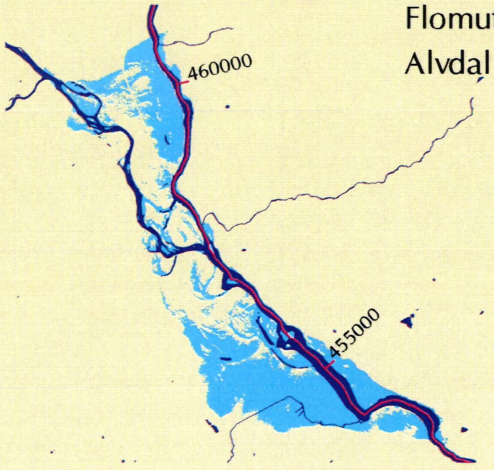
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Alvdal

Vannstand som en 10 års flom

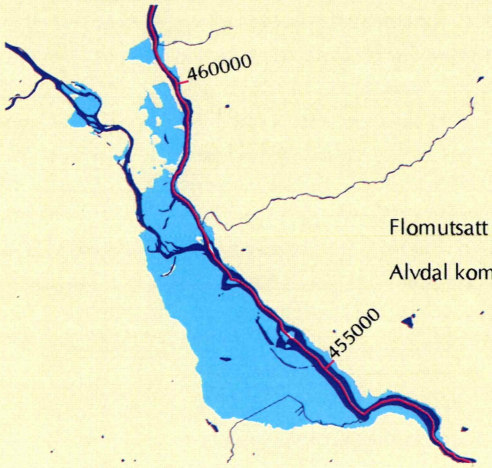


Målestokk 1:90000



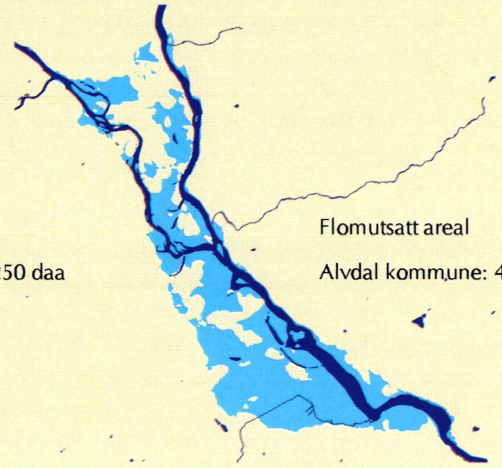
Flomutsatt areal
Alvdal kommune: 4273 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Alvdal kommune: 5250 daa

Terrengmodell fra 5 m koter



Flomutsatt areal
Alvdal kommune: 4749 da

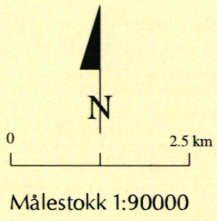
Terrengmodell fra 5 m
med høyder fra elver og veier

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

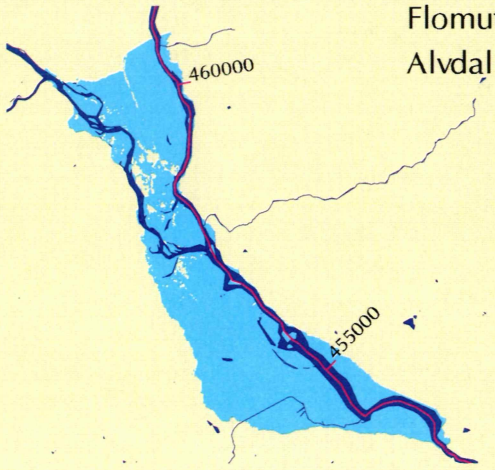
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Alvdal

Vannstand som en 100 års flom

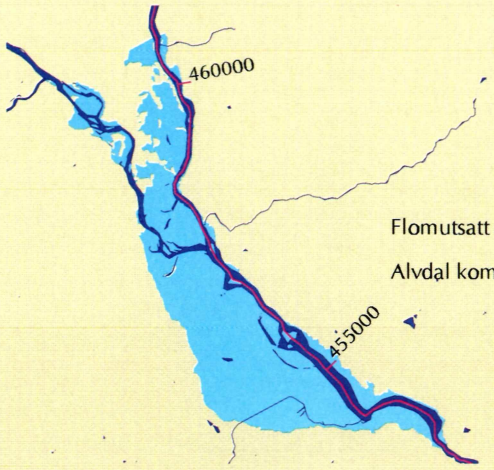


Målestokk 1:90000



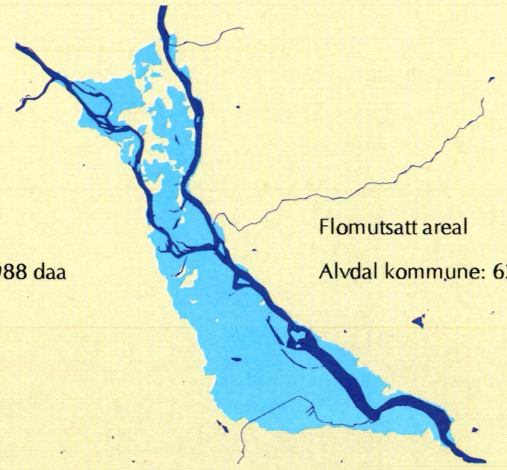
Flomutsatt areal
Alvdal kommune: 6882 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Alvdal kommune: 5988 daa

Terrengmodell fra 5 m koter



Flomutsatt areal
Alvdal kommune: 6295 da

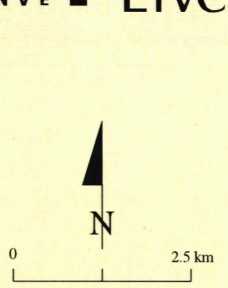
Terrengmodell fra 5 m
med høyder fra elver og veier

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Elverum

Vannstand som en 10 års flom

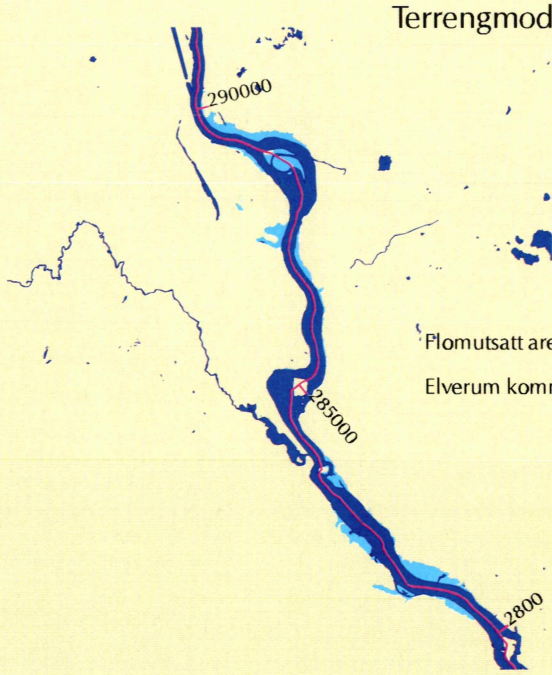


Målestokk 1:90000



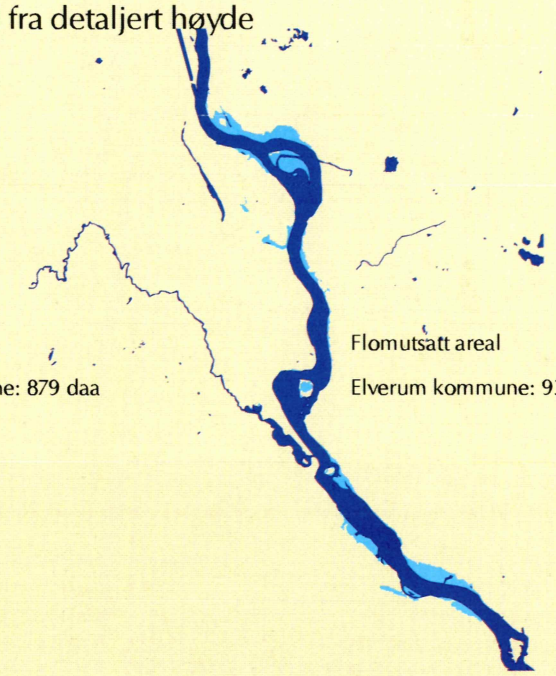
Flomutsatt areal
Elverum kommune: 663 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Elverum kommune: 879 daa

Terrengmodell fra 5 m koter



Flomutsatt areal
Elverum kommune: 932 d

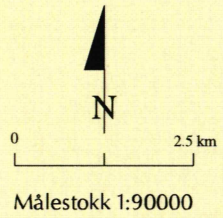
Terrengmodell fra 5 m
med høyder fra elver og veier

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

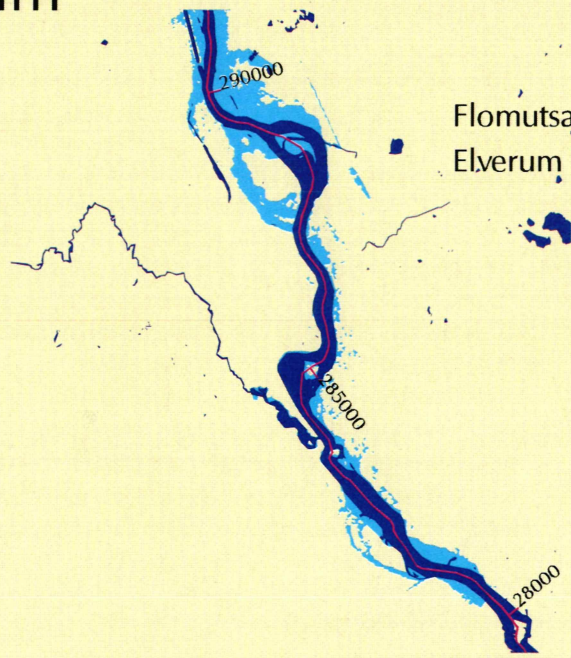
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Elverum

Vannstand som i 1995

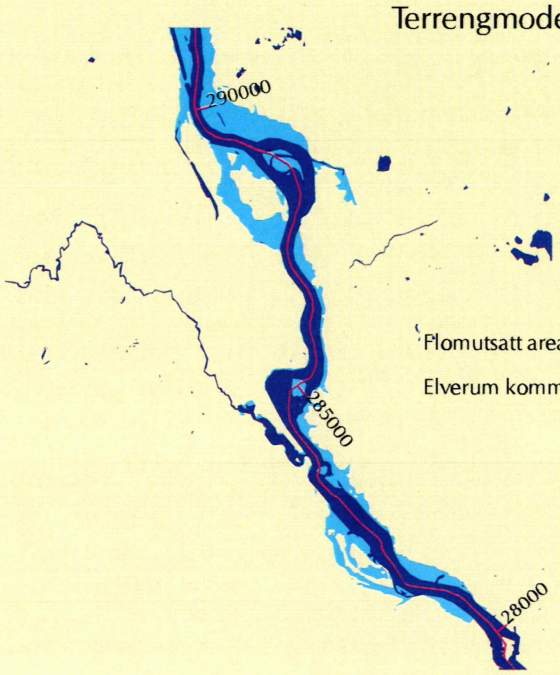


Målestokk 1:90000



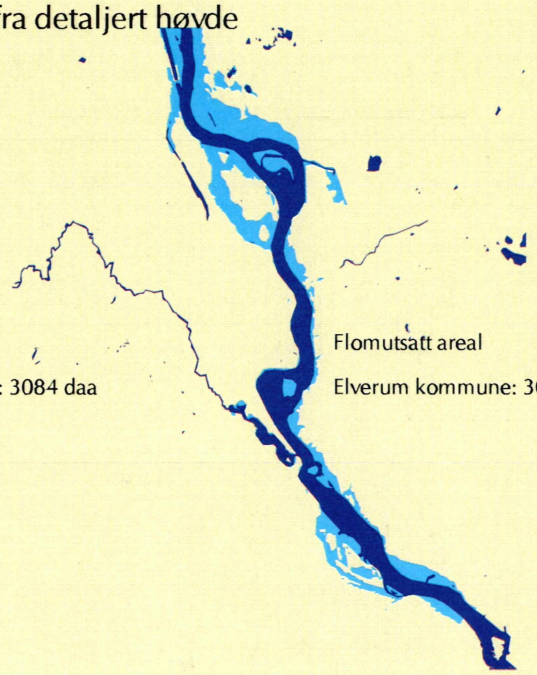
Flomutsatt areal
Elverum kommune: 3088 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Elverum kommune: 3084 daa

Terrengmodell fra 5 m koter



Flomutsatt areal
Elverum kommune: 3070 d

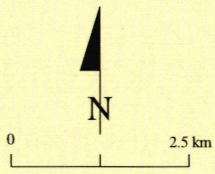
Terrengmodell fra 5 m
med høyder fra elver og veier

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Flisa

Vannstand som i 1995



Målestokk 1:90000



Flomutsatt areal
Åsnes kommune: 38265 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Åsnes kommune: 14173 daa

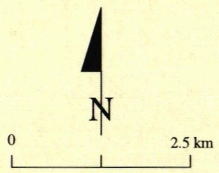
Terrengmodell fra 5 m koter

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 08.10.1999

Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Flisa

Vannstand 3.5 meter over nat.vst.



Målestokk 1:90000



Flomutsatt areal
Åsnes kommune: 17602 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Åsnes kommune: 4109 daa

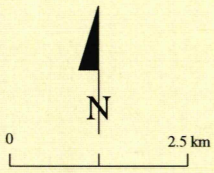
Terrengmodell fra 5 m koter

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 08.10.1999

Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

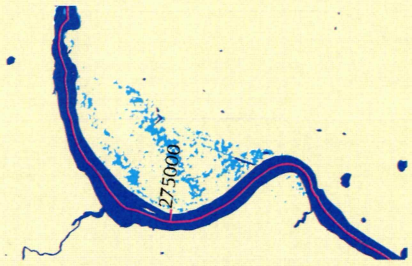
Heradsbygd

Vannstand som en 10 års flom

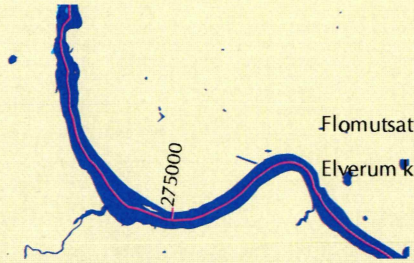


Målestokk 1:90000

Flomutsatt areal
Elverum kommune: 565 daa

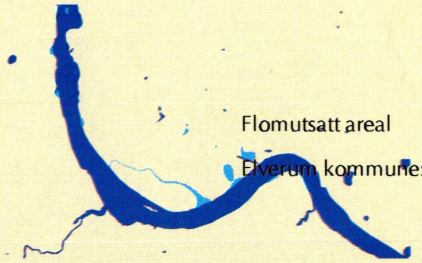


Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Elverum kommune: 19 daa

Terrengmodell fra 5 m koter



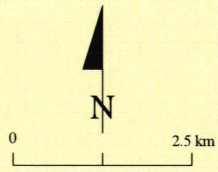
Flomutsatt areal
Elverum kommune: 182 da

Terrengmodell fra 5 m
med høyder fra elver og veier

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

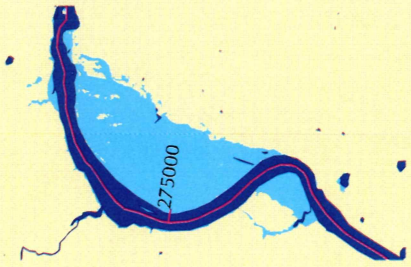
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller
Heradsbygd

Vannstand som i 1995

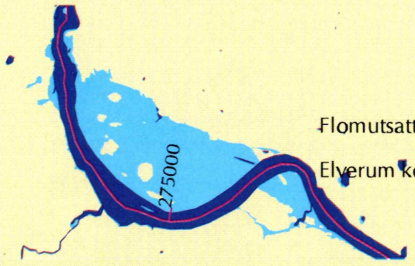


Målestokk 1:90000

Flomutsatt areal
Elverum kommune: 3398 daa

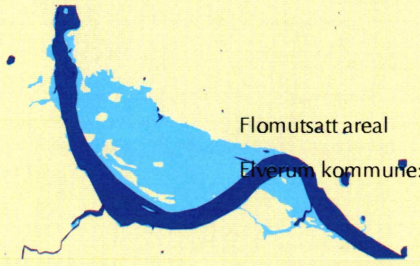


Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Elverum kommune: 3189 daa

Terrengmodell fra 5 m koter



Flomutsatt areal
Elverum kommune: 3199 d

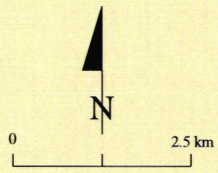
Terrengmodell fra 5 m
med høyder fra elver og veier

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

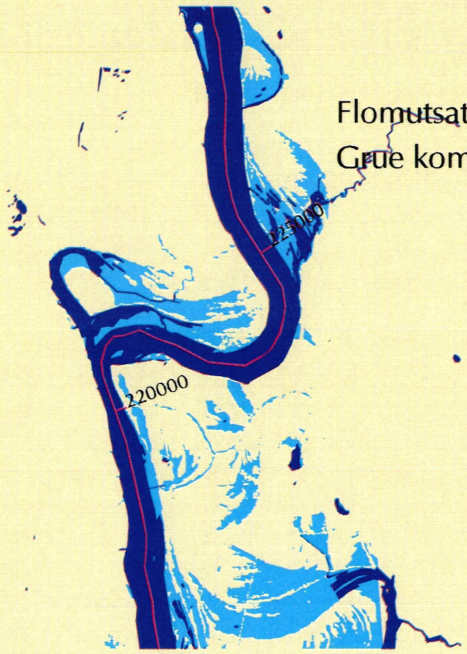
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Kirkenær

Vannstand 3.5 meter over nat.vst.

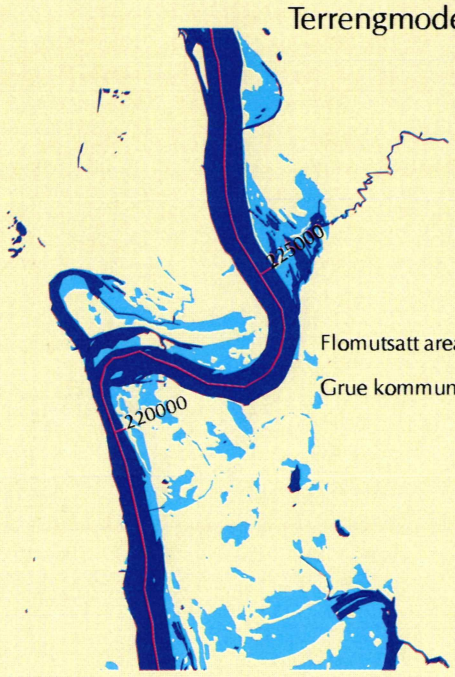


Målestokk 1:90000



Flomutsatt areal
Grue kommune: 17602 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Grue kommune: 11025 daa

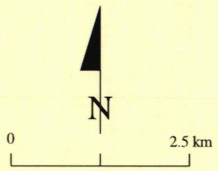
Terrengmodell fra 5 m koter

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

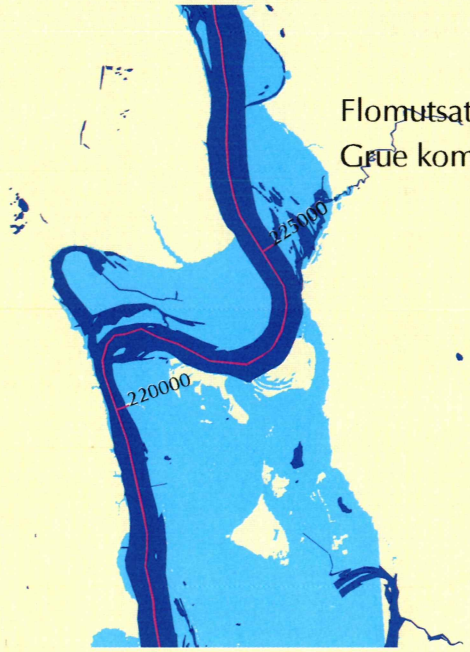
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Kirkenær

Vannstand som i 1995

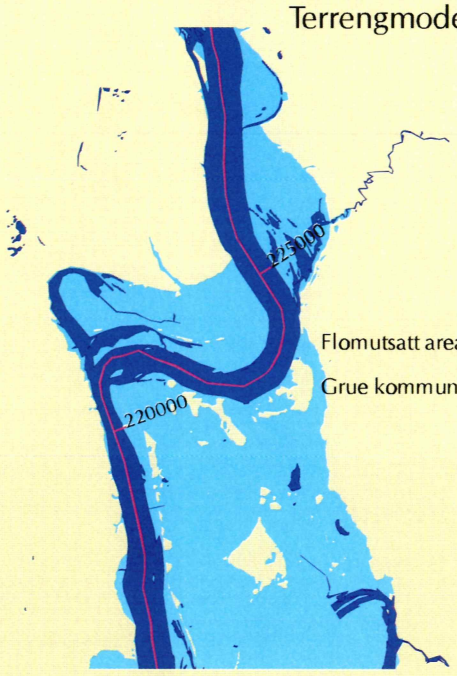


Målestokk 1:90000



Flomutsatt areal
Grue kommune: 38265 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Grue kommune: 25593 daa

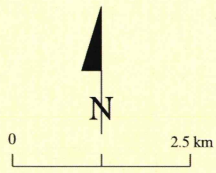
Terrengmodell fra 5 m koter

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Kongsvinger

Vannstand som en 10 års flom



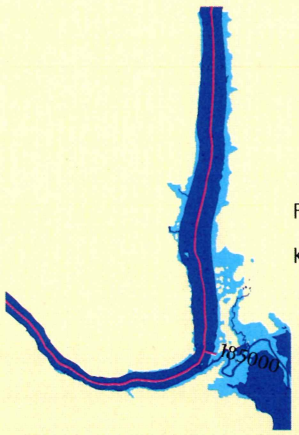
Målestokk 1:90000



Flomutsatt areal

Kongsvinger kommune: 1029 da

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal

Kongsvinger kommune: 1458 daa

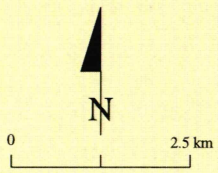
Terrengmodell fra 5 m koter

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Kongsvinger

Vannstand som i 1995



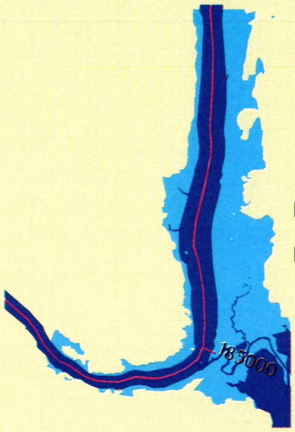
Målestokk 1:90000



Flomutsatt areal

Kongsvinger kommune: 4338 da

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal

Kongsvinger kommune: 4127 daa

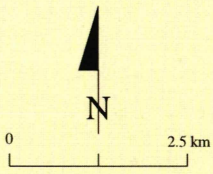
Terrengmodell fra 5 m koter

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

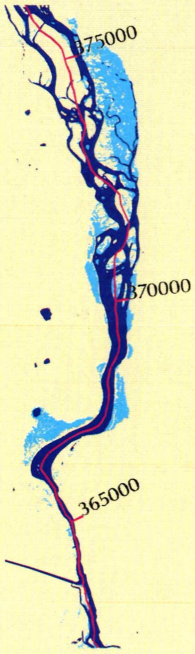
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Koppang

Vannstand som en 10 års flom

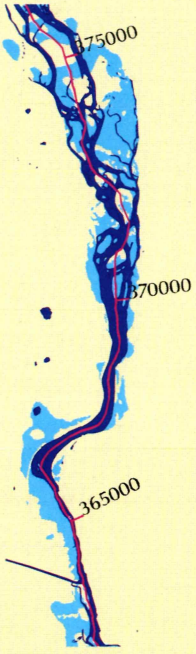


Målestokk 1:90000



Flomutsatt areal
Stor-Elvdal kommune: 4255 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Stor-Elvdal kommune: 6185 daa

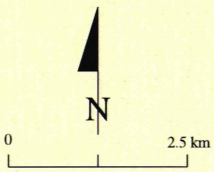
Terrengmodell fra 5 m koter

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

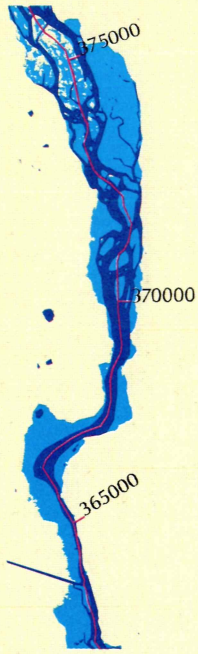
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Koppang

Vannstand som i 1995

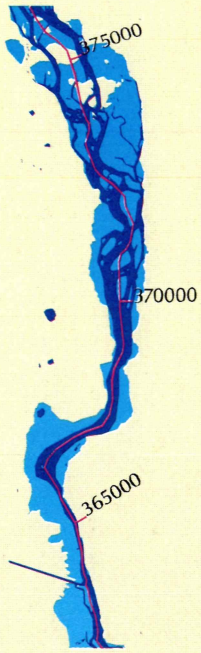


Målestokk 1:90000



Flomutsatt areal
Stor-Elvdal kommune: 9714 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Stor-Elvdal kommune: 9869 daa

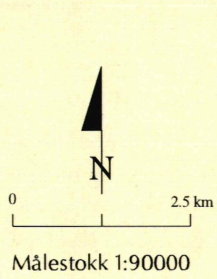
Terrengmodell fra 5 m koter

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

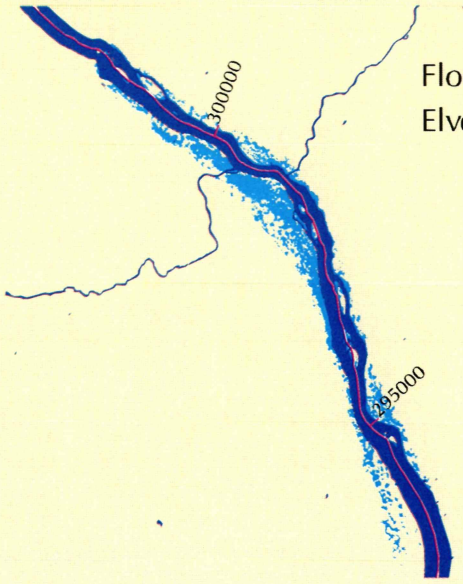
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Øksna

Vannstand som en 10 års flom

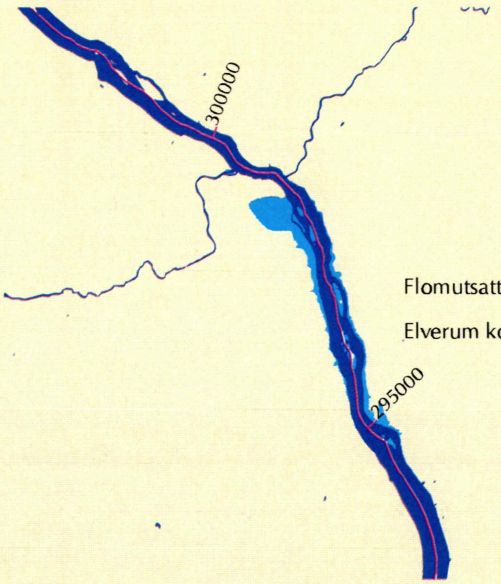


Målestokk 1:90000



Flomutsatt areal
Elverum kommune: 1645 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Elverum kommune: 767 daa

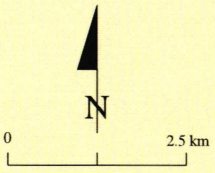
Terrengmodell fra 5 m koter

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

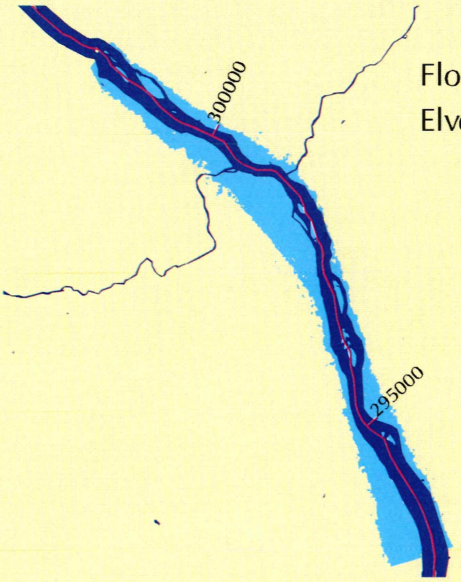
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Øksna

Vannstand som i 1995

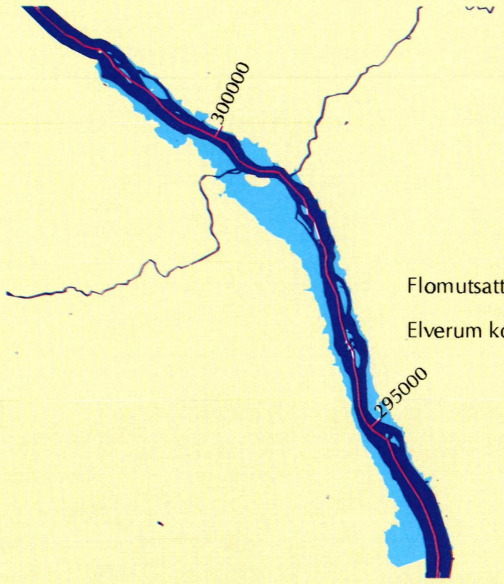


Målestokk 1:90000



Flomutsatt areal
Elverum kommune: 3543 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Elverum kommune: 2576 daa

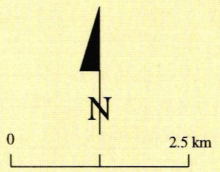
Terrengmodell fra 5 m koter

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

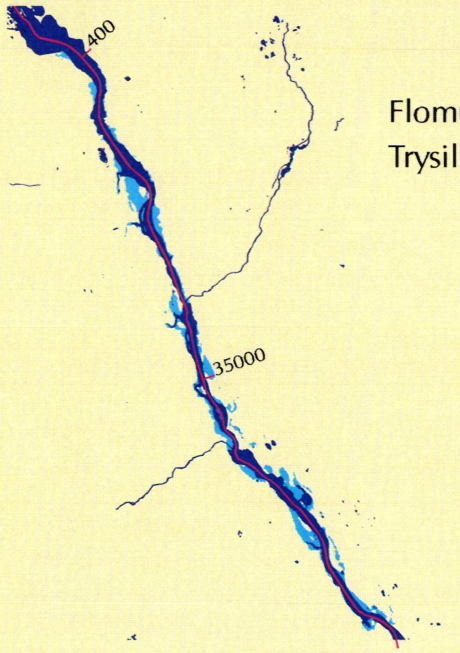
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Trysil

Vannstand som en 10 års flom

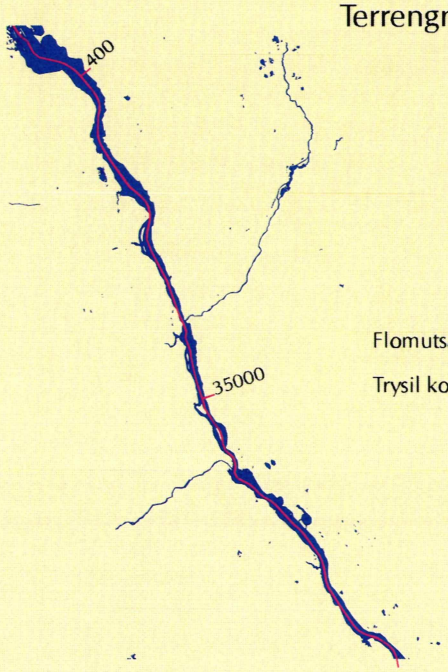


Målestokk 1:90000



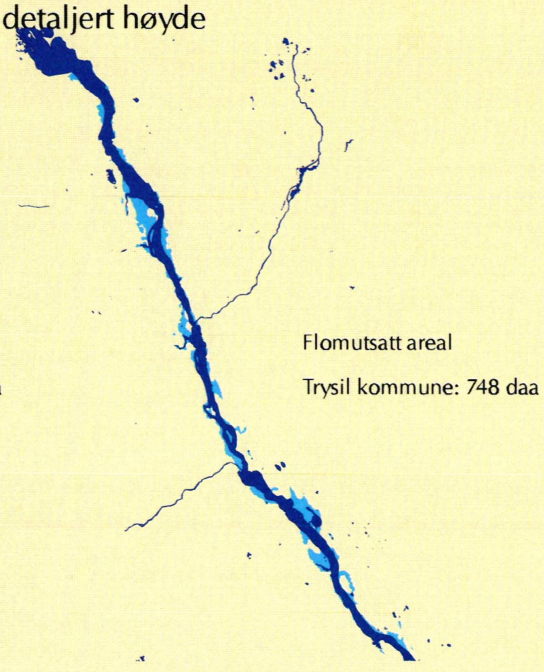
Flomutsatt areal
Trysil kommune: 872 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



Flomutsatt areal
Trysil kommune: 0 daa

Terrengmodell fra 5 m koter



Flomutsatt areal
Trysil kommune: 748 daa

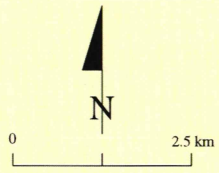
Terrengmodell fra 5 m
med høyder fra elver og veier

Grunnlag: Statens kartverk, Temadata og utforming: NVE-HG 12.10.1999

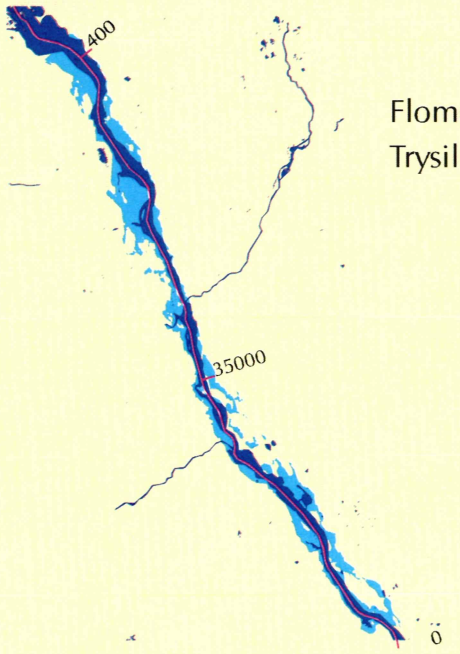
Flomsonekart fra ulike terrengmodeller

Trysil

Vannstand som i 1995

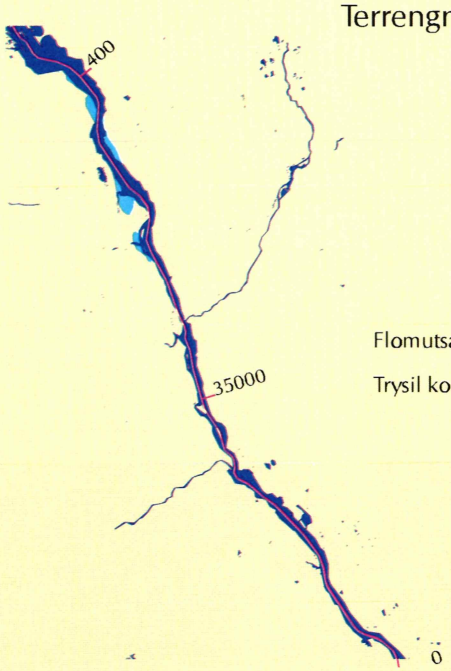


Målestokk 1:90000



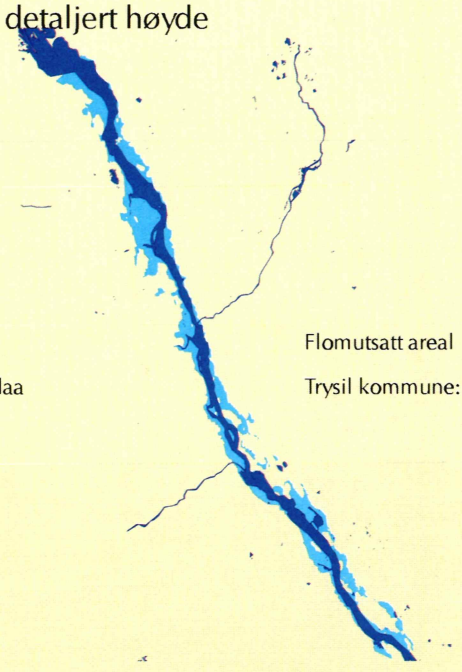
Flomutsatt areal
Trysil kommune: 1837 daa

Terrengmodell fra detaljert høyde



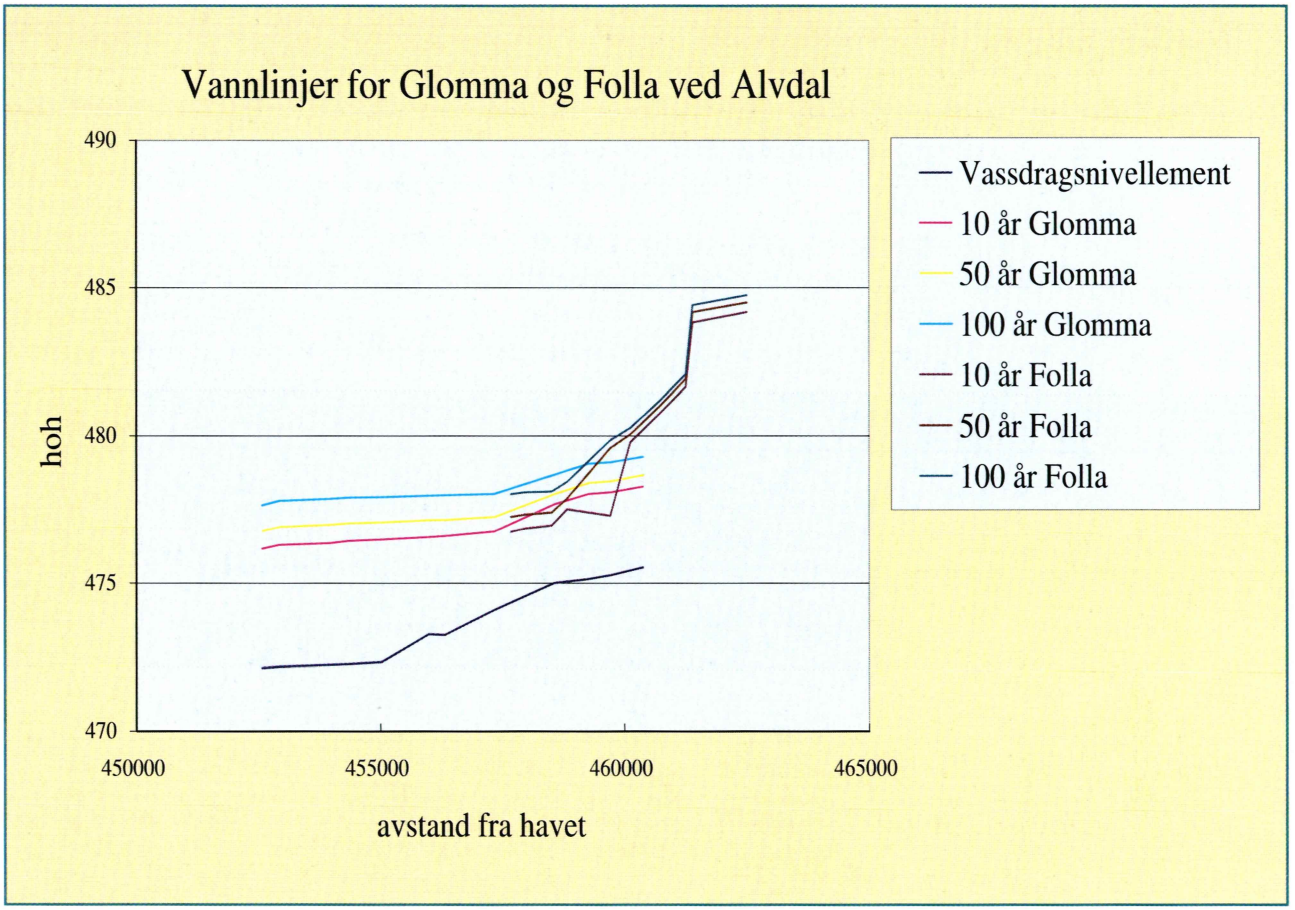
Flomutsatt areal
Trysil kommune: 163 daa

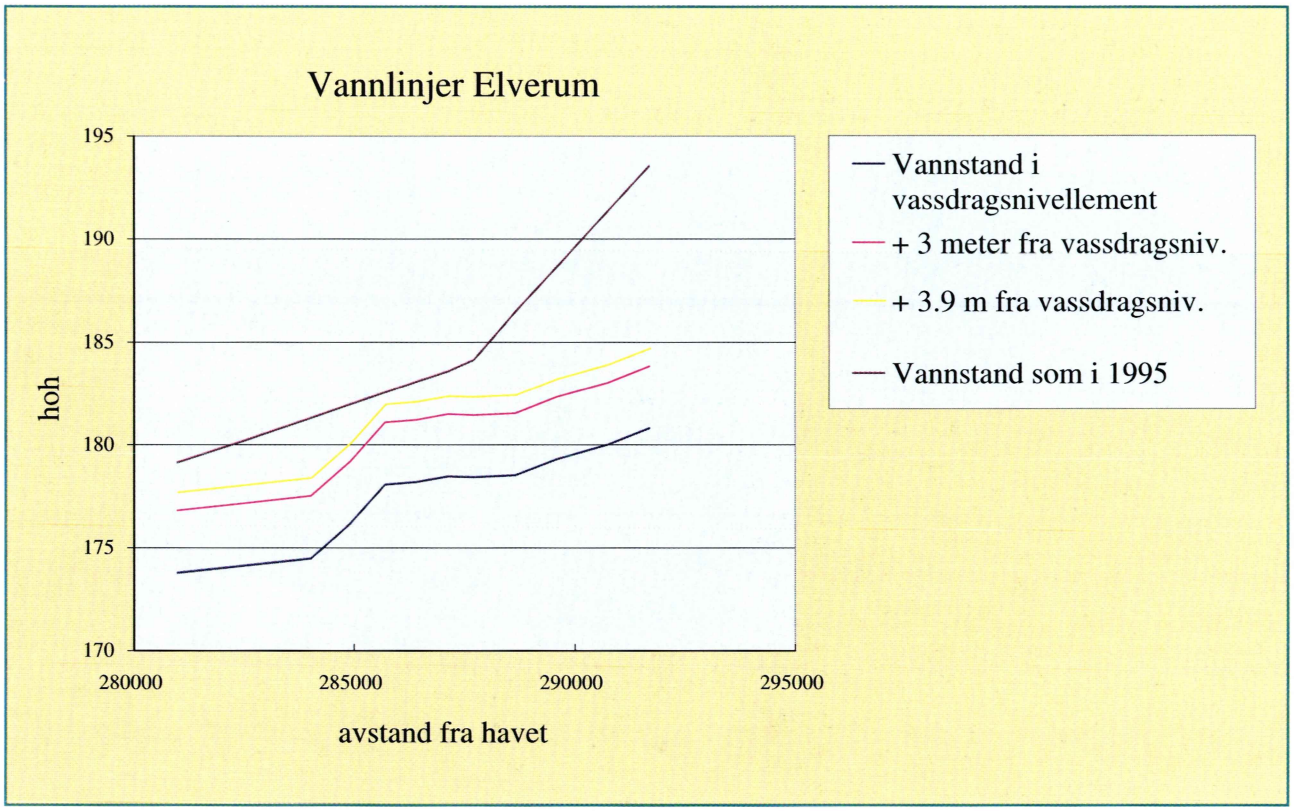
Terrengmodell fra 5 m koter

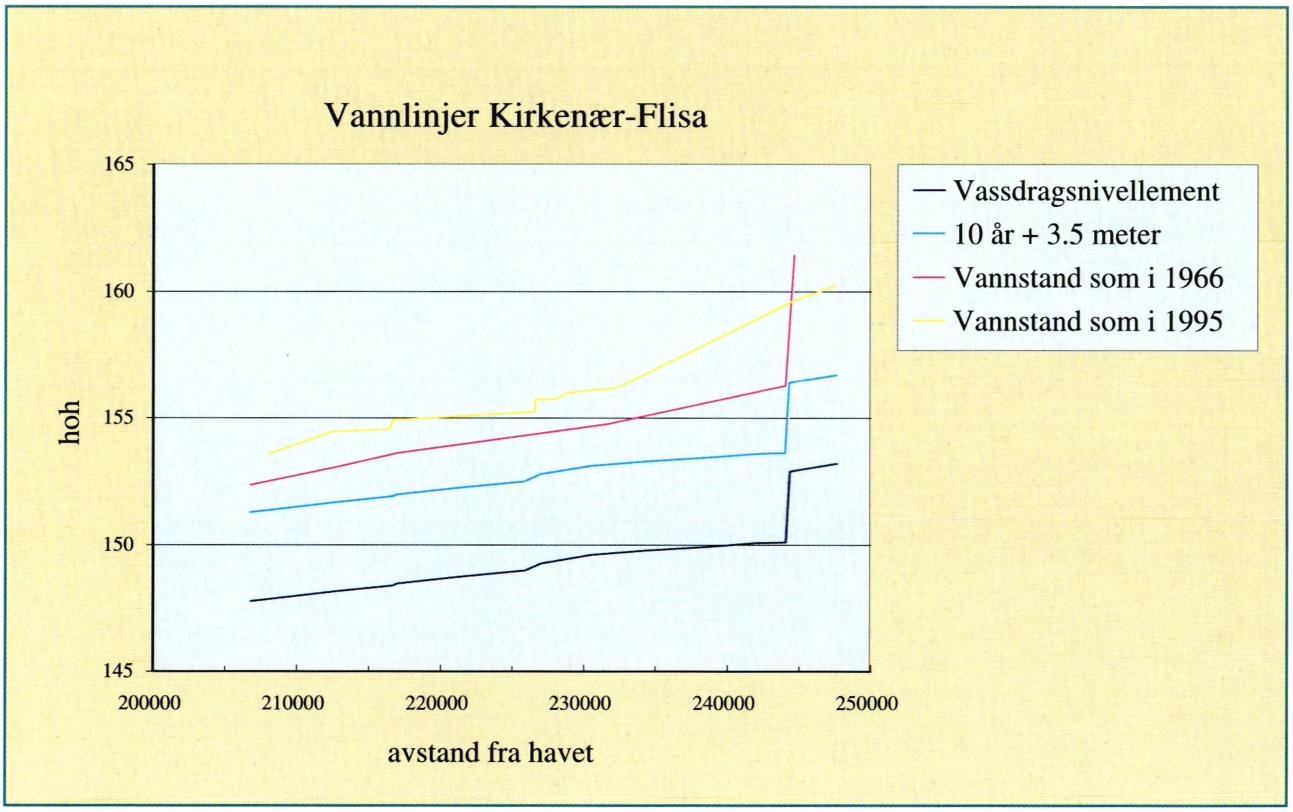


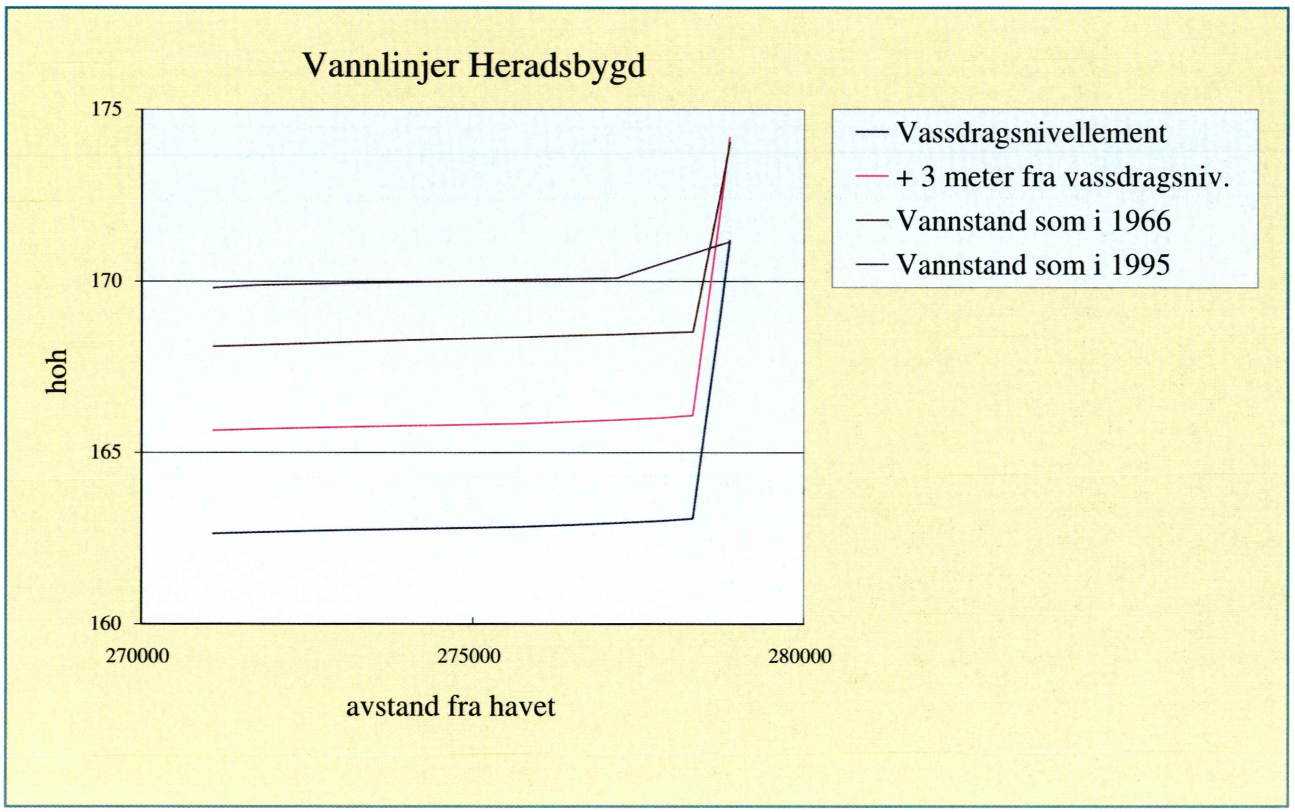
Flomutsatt areal
Trysil kommune: 1768 daa

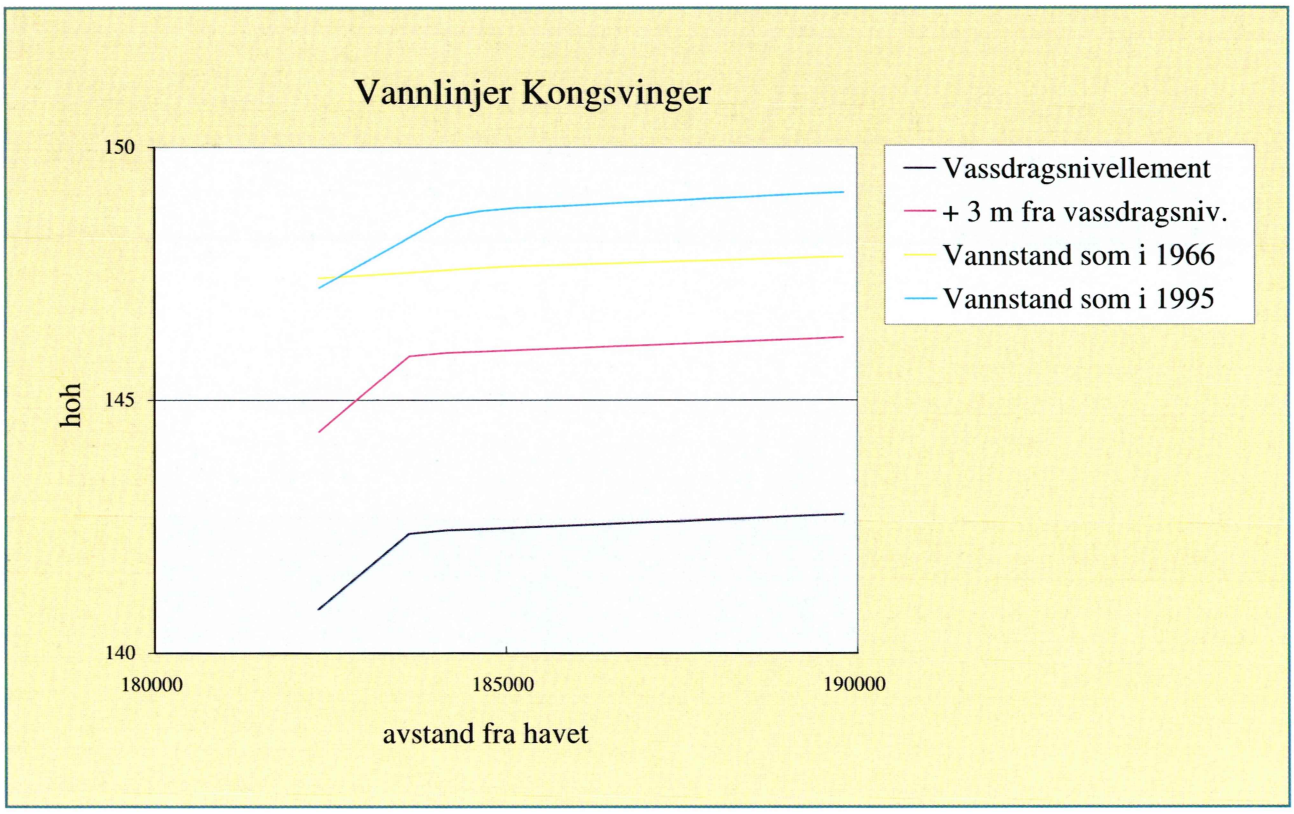
Terrengmodell fra 5 m
med høyder fra elver og veier

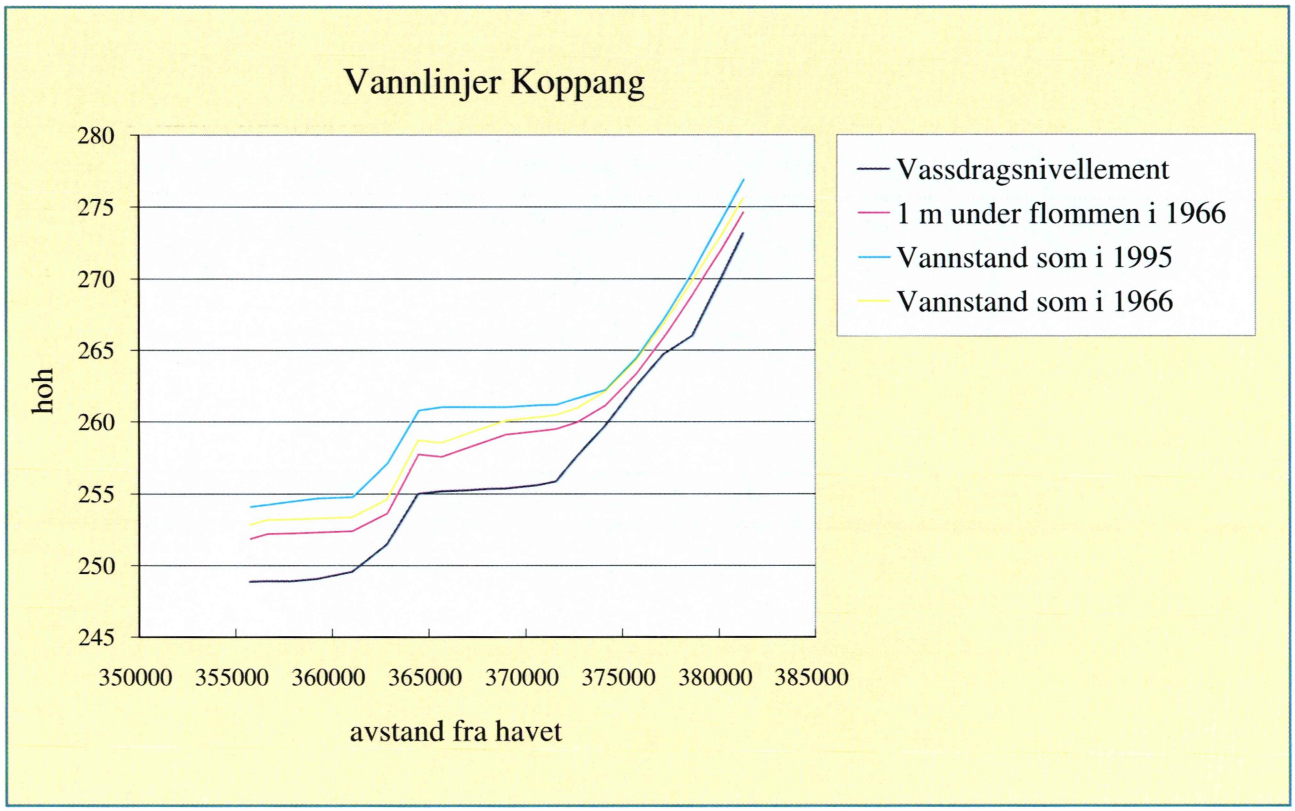

Vannlinjer for Glomma og Folla ved Alvdal
490
485
480
475
470
hoh
450000
455000
460000
465000
avstand fra havet
Vassdragsnivellement
10 år Glomma
50 år Glomma
100 år Glomma
10 år Folla
50 år Folla
100 år Folla

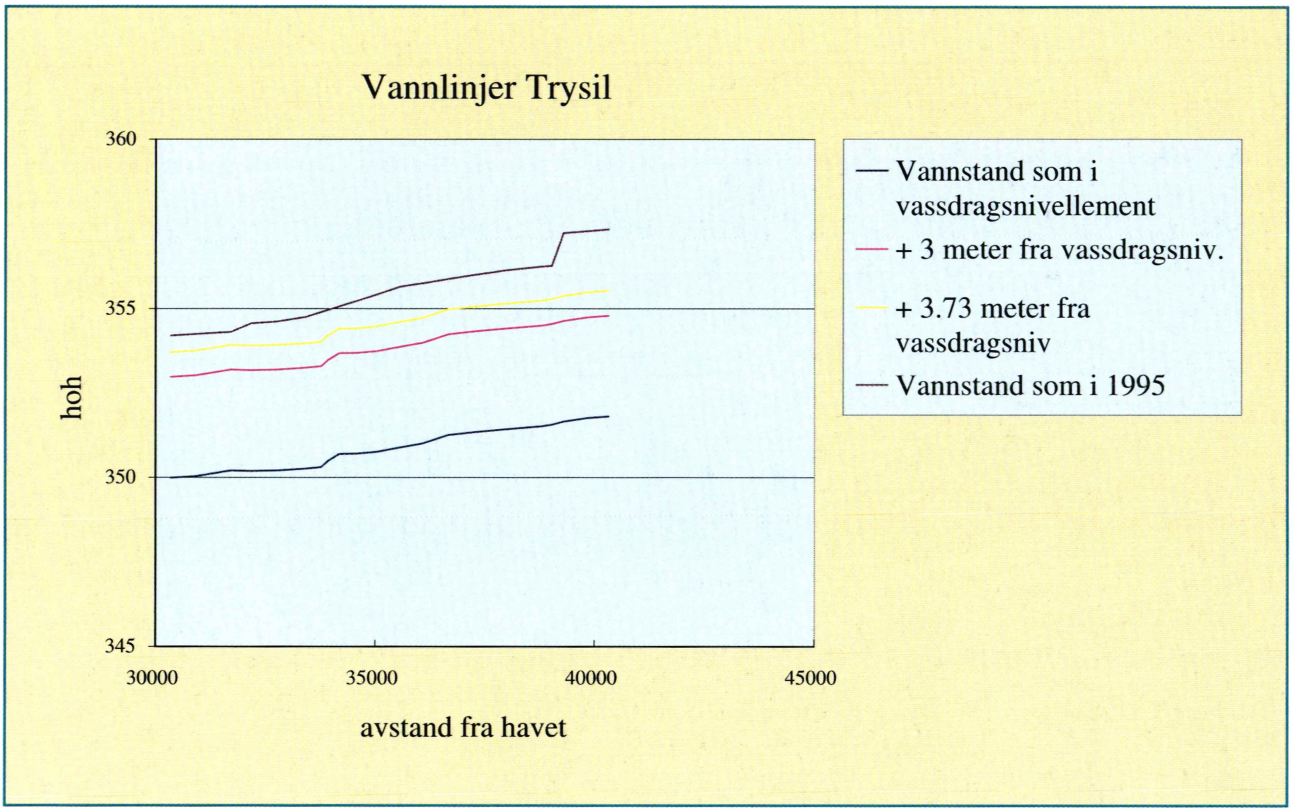

Vannlinjer Elverum
195
190
185
180
175
170
hoh
280000
285000
290000
295000
avstand fra havet
Vannstand i vassdragsnivellement
+ 3 meter fra vassdragsniv.
+ 3.9 m fra vassdragsniv.
Vannstand som i 1995

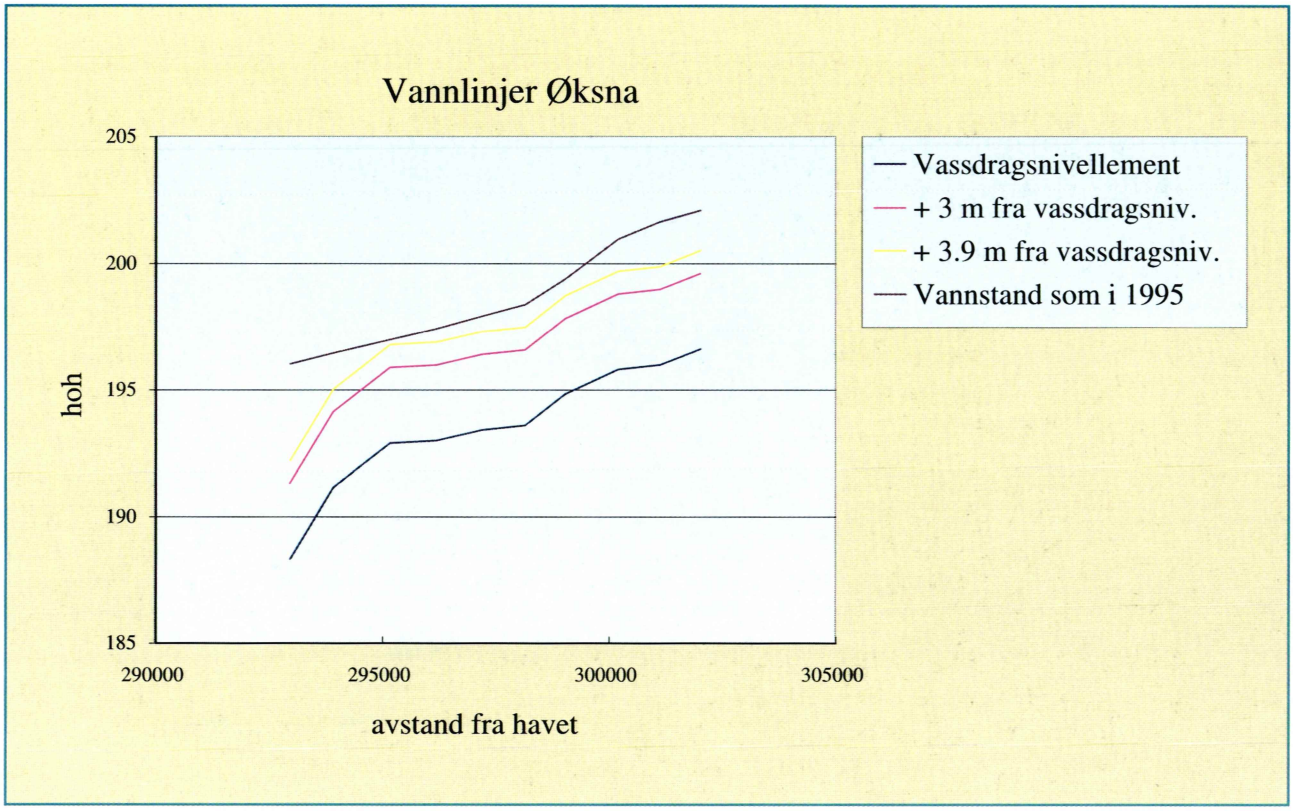

Vannlinjer Kirkenær-Flisa
165
160
155
150
145
hoh
200000
210000
220000
230000
240000
250000
avstand fra havet
Vassdragsnivellement
10 år + 3.5 meter
Vannstand som i 1966
Vannstand som i 1995

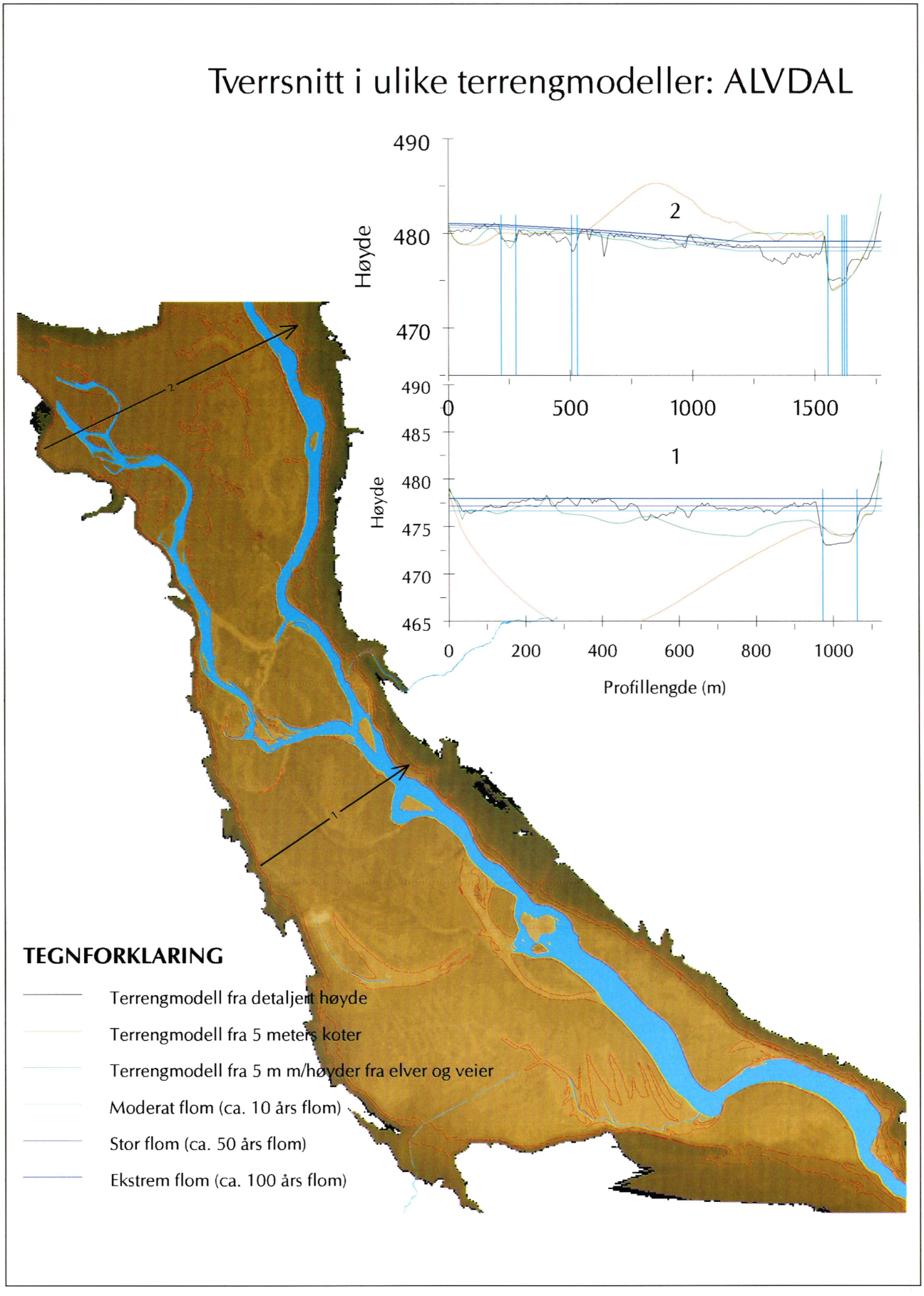

Vannlinjer Heradsbygd
175
170
165
160
hoh
270000
275000
280000
avstand fra havet
Vassdragsnivellement
+ 3 meter fra vassdragsniv.
Vannstand som i 1966
Vannstand som i 1995


Vannlinjer Kongsvinger
150
145
140
hoh
180000
185000
190000
avstand fra havet
Vassdragsnivellement
+ 3 m fra vassdragsniv.
Vannstand som i 1966
Vannstand som i 1995

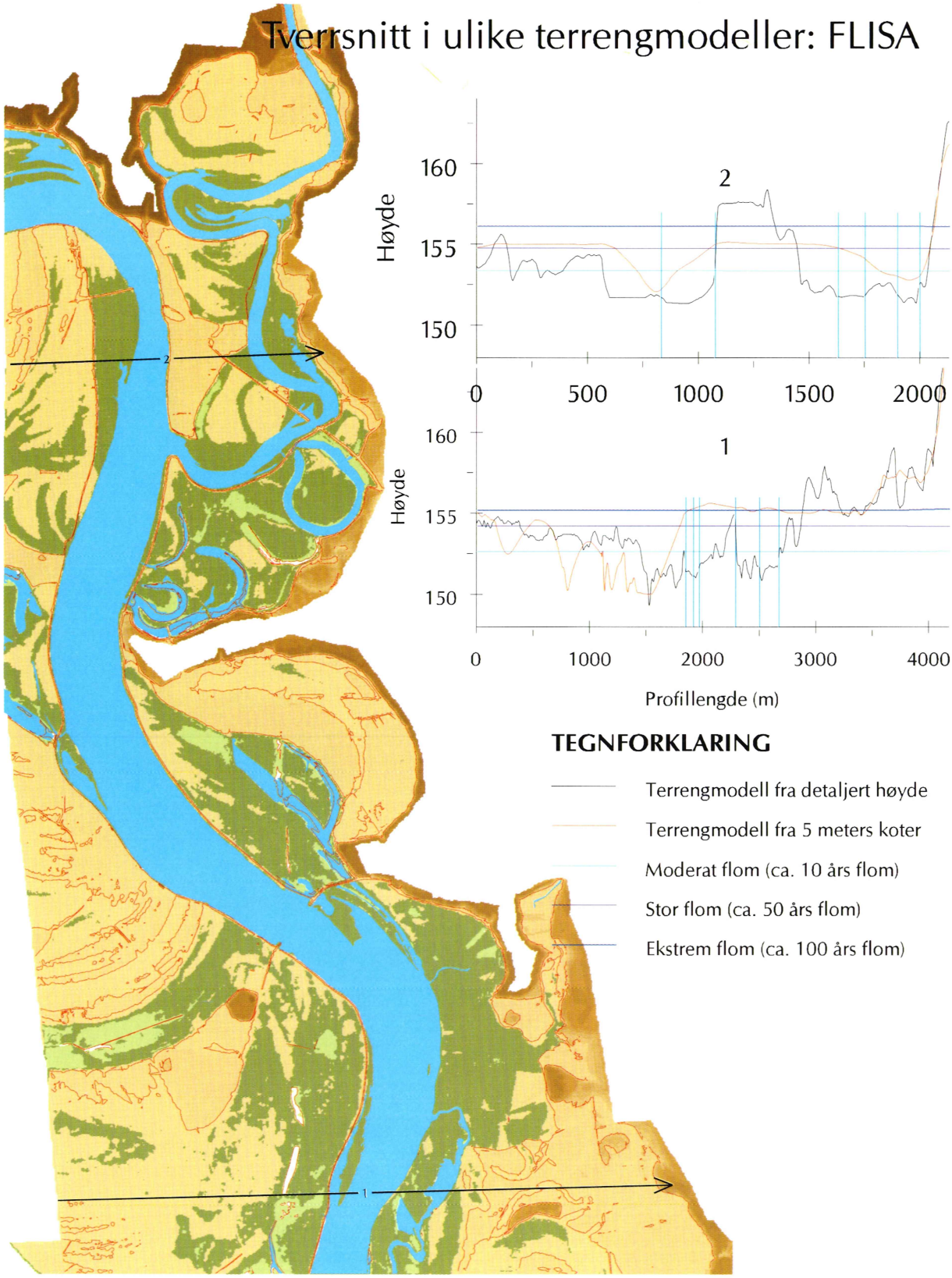

Vannlinjer Koppang
280
275
270
265
260
255
250
245
hoh
350000
355000
360000
365000
370000
375000
380000
385000
avstand fra havet
Vassdragsnivellement
1 m under flommen i 1966
Vannstand som i 1995
Vannstand som i 1966


Vannlinjer Trysil
360
355
350
345
hoh
30000
35000
40000
45000
avstand fra havet
Vannstand som i vassdragsnivellement
+ 3 meter fra vassdragsniv.
+ 3.73 meter fra vassdragsniv
Vannstand som i 1995

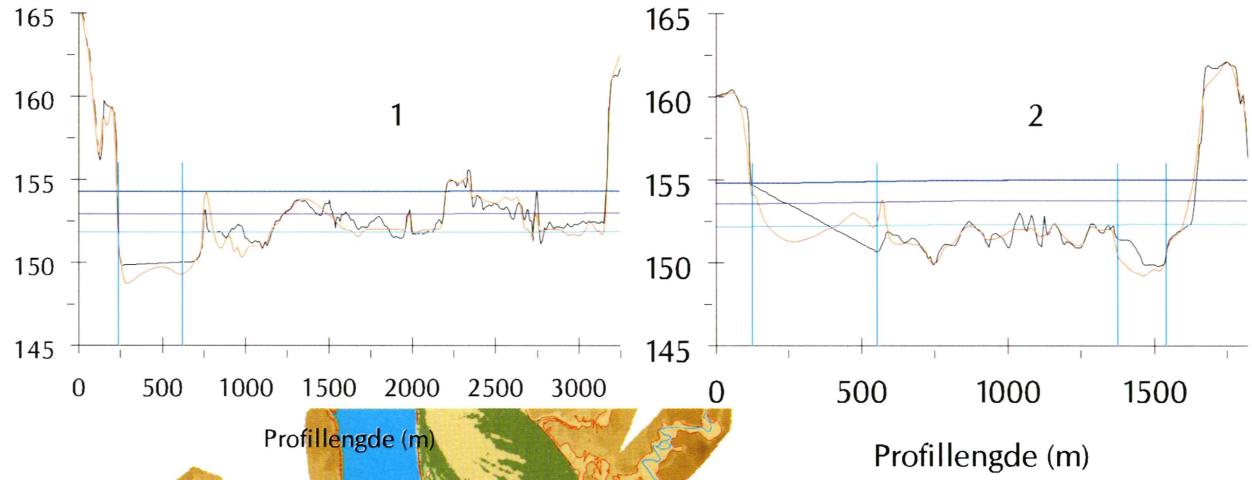

Vannlinjer Øksna
205
200
195
190
185
hoh
290000
295000
300000
305000
avstand fra havet
Vassdragsnivellement
+ 3 m fra vassdragsniv.
+ 3.9 m fra vassdragsniv.
Vannstand som i 1995

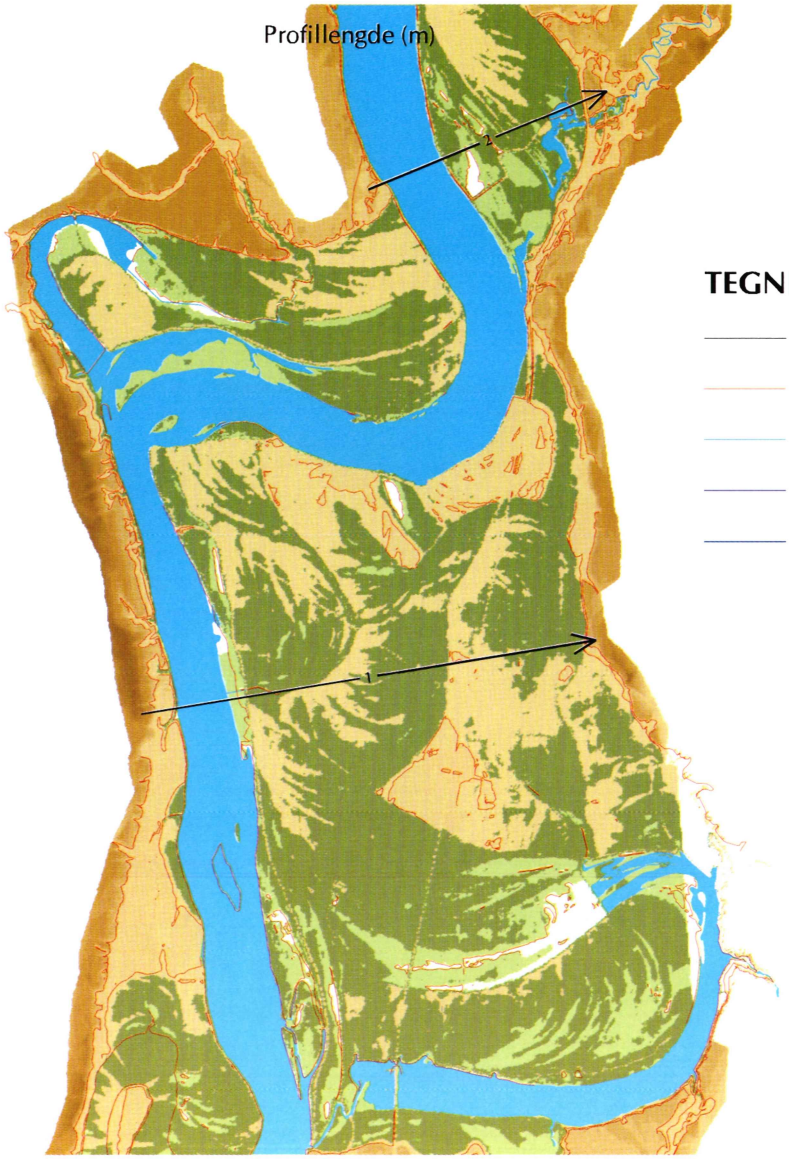

Tverrsnitt i ulike terrengmodeller: ALVDAL
Høyde
490
480
470
2
0
500
1000
1500
Høyde
485
480
475
470
465
1
0
200
400
600
800
1000
Profillengde (m)
2
1
TEGNFORKLARING
Terrengmodell fra detaljert høyde
Terrengmodell fra 5 meters koter
Terrengmodell fra 5 m m/høyder fra elver og veier
Moderat flom (ca. 10 års flom)
Stor flom (ca. 50 års flom)
Ekstrem flom (ca. 100 års flom)

Tverrsnitt i ulike terrengmodeller: FLISA



Tverrsnitt i ulike terrengmodeller: KIRKENÆR

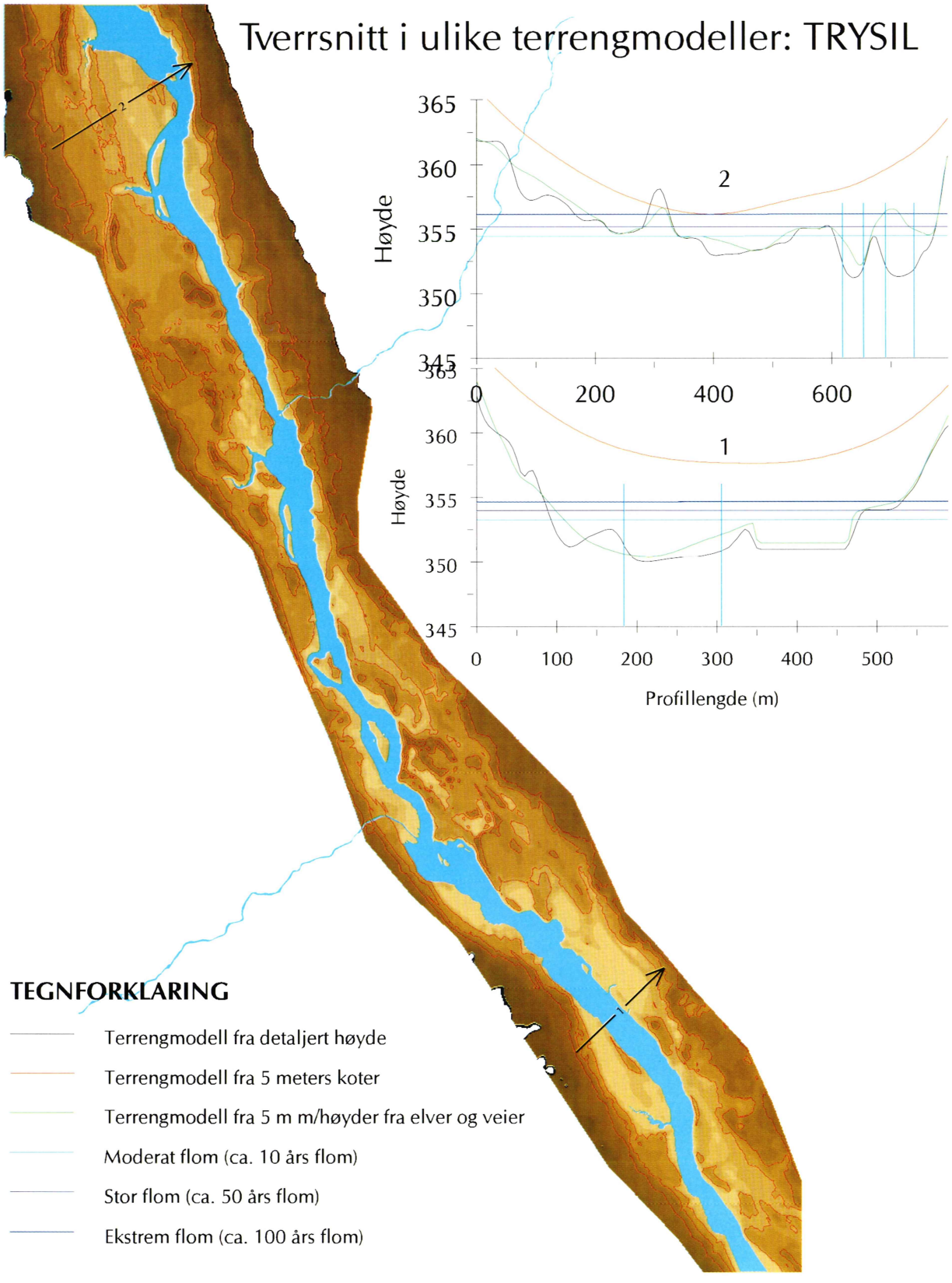




TEGNFORKLARING

- Terrengmodell fra detaljert høyde
- Terrengmodell fra 5 meters koter
- Moderat flom (ca. 10 års flom)
- Stor flom (ca. 50 års flom)
- Ekstrem flom (ca. 100 års flom)

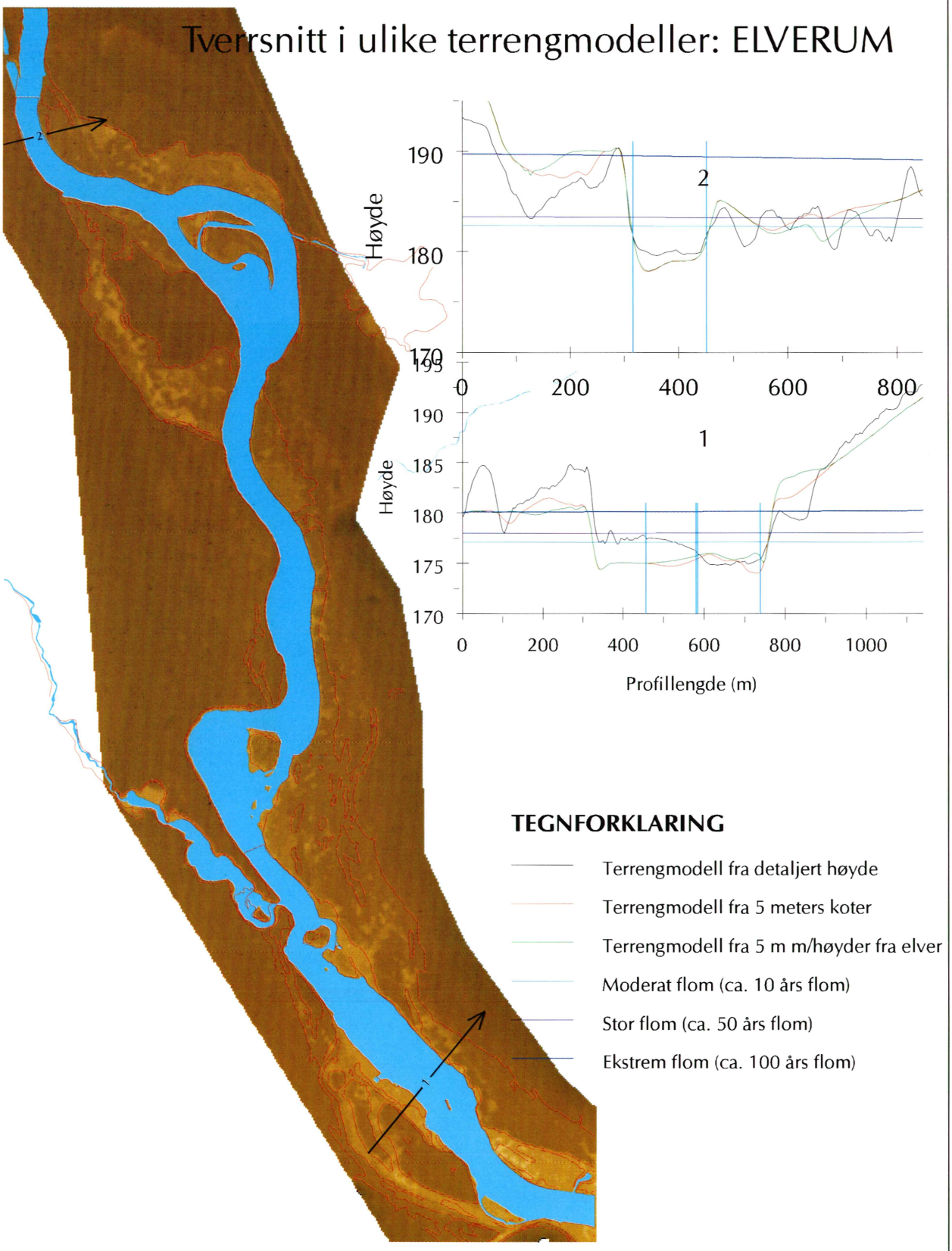
Tverrsnitt i ulike terrengmodeller: TRYSIL



TEGNFORKLARING

- Terrengmodell fra detaljert høyde
- Terrengmodell fra 5 meters koter
- Terrengmodell fra 5 m m/høyder fra elver og veier
- Moderat flom (ca. 10 års flom)
- Stor flom (ca. 50 års flom)
- Ekstrem flom (ca. 100 års flom)

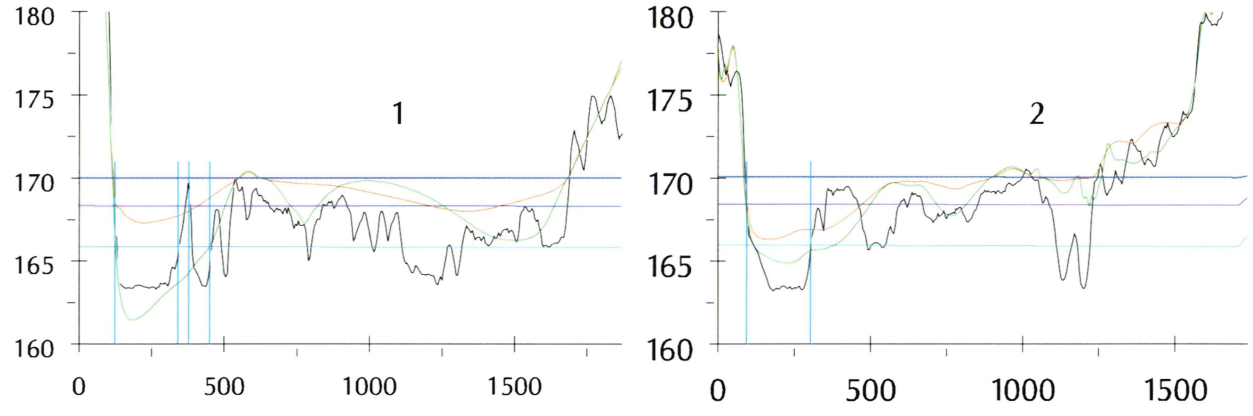
Tverrsnitt i ulike terrengmodeller: ELVERUM



TEGNFORKLARING

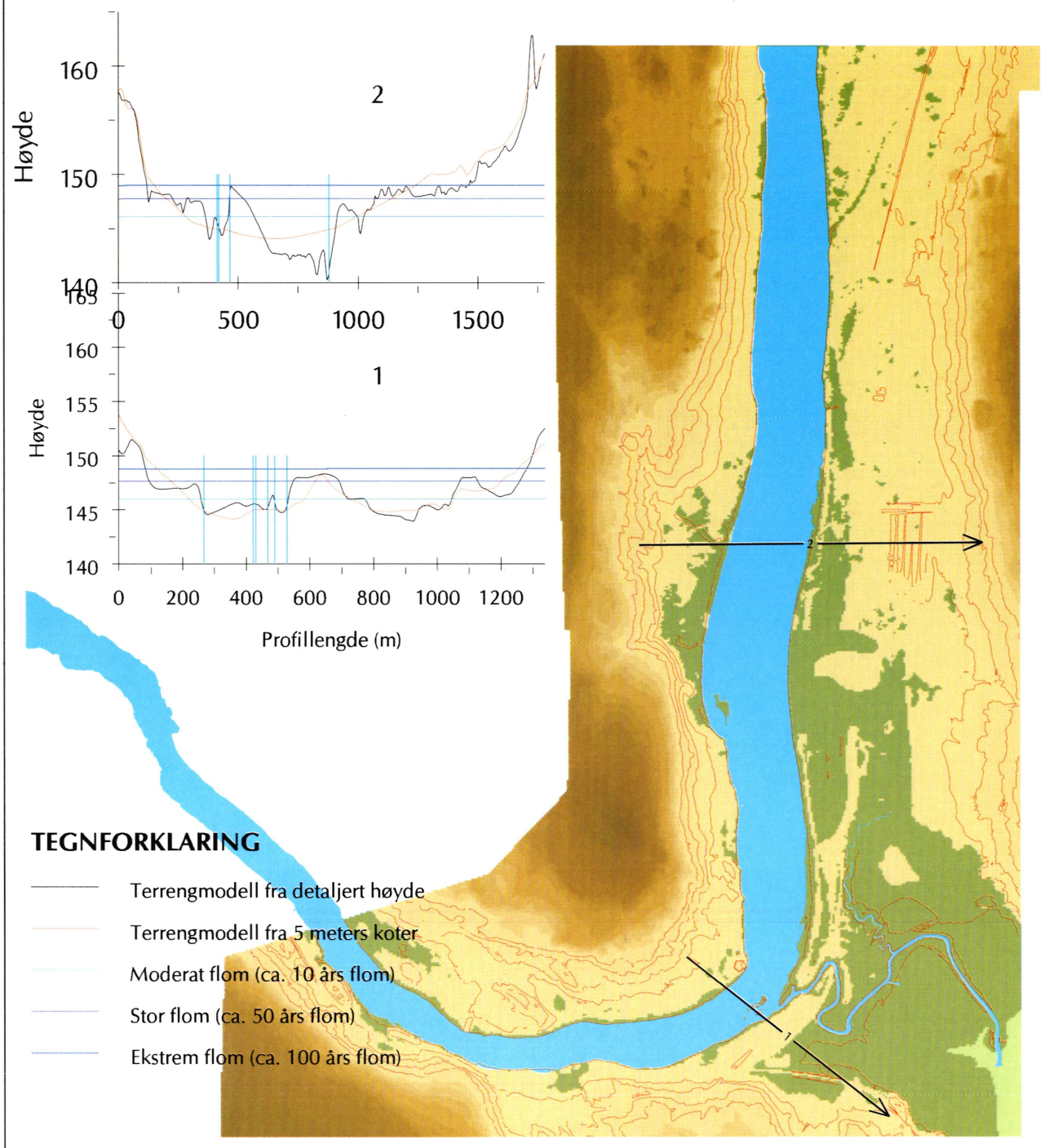
- Terrengmodell fra detaljert høyde
- Terrengmodell fra 5 meters koter
- Terrengmodell fra 5 m m/høyder fra elver
- Moderat flom (ca. 10 års flom)
- Stor flom (ca. 50 års flom)
- Ekstrem flom (ca. 100 års flom)

Tverrsnitt i ulike terrengmodeller: HERADSBYGD

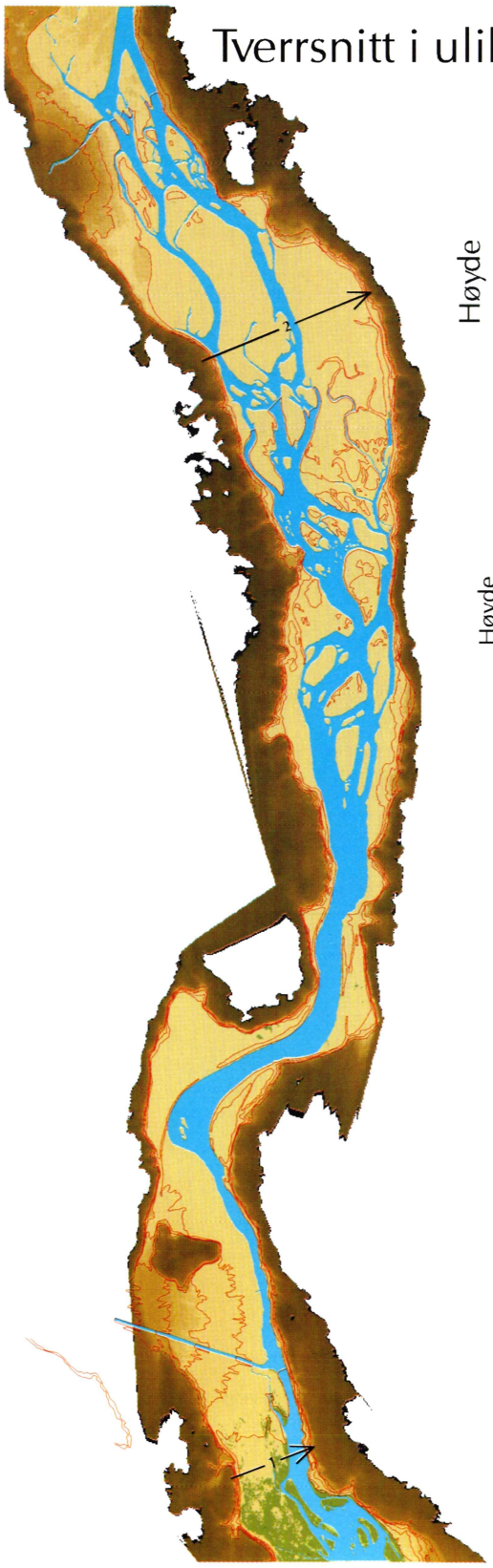


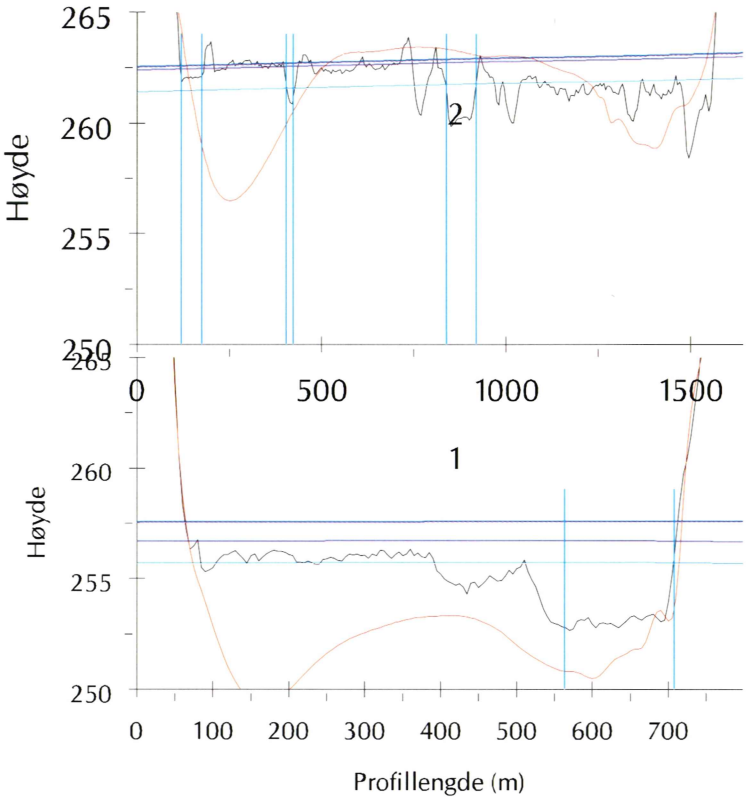


Tverrsnitt i ulike terrengmodeller: KONGSVINGER



Tverrsnitt i ulike terrengmodeller: KOPPANG





TEGNFORKLARING

- Terrengmodell fra detaljert høyde
- Terrengmodell fra 5 meters koter
- Moderat flom (ca. 10 års flom)
- Stor flom (ca. 50 års flom)
- Ekstrem flom (ca. 100 års flom)