

Miljøfaglige undersøkelser i Øyeren 1994-2000. Erosjon, sedimentasjon og deltautvikling

Norges vassdrags- og energidirektorat

2002

Rapport nr 3 2002

Miljøfaglige undersøkelser i Øyeren 1994-2000. Erosjon, sedimentasjon og deltautvikling

Oppdragsgiver: Prosjektet: "Miljøfaglige undersøkelser i Øyeren" finansiert av Akershus fylkeskommune, Glommen og Laagens Brukseierforening og Norges vassdrags og energidirektorat.

Forfattere: Jim Bogen, Truls Erik Bønsnes, Margrethe Elster

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag: 100

Forsidefoto: Deltaet i Nordre Øyeren, (Fjellanger Widerøe A/S)

ISSN: 1501-2832

ISBN: 82-410-0461-3

Sammendrag: Deltaet i Øyeren har blitt påvirket av vannstandsreguleringer siden 1862. I denne rapporten diskuteres resultatene av undersøkelser som ble igangsatt for å klarlegge de viktigste faktorene som styrer erosjon og sedimentasjonsprosessene, deltautviklingen og virkninger av forskjellige forslag til nytt manøvreringsreglement. Siden 1862 har forskjellige reguleringer gradvis redusert den sesongmessige vannstandsvariasjonen. Under nåværende reglement er det en forholdsvis lang periode med høy og mer konstant vannstand. Utstrekningen av sedimentasjonssonene innenfor deltaområdet har etter hvert blitt redusert. Dette har ført til mer sedimentasjon i de øvre deler av deltaet. Arealet av deltasletten har dermed økt kraftig på grunn av at det bunntransporterte og suspensjonstransporterte materialet ikke føres like langt ut som tidligere.

Emneord: Delta, erosjon, sedimentasjon, miljøvirkninger av vassdragsregulering, manøvreringsreglement, regulert vannstand

Abstract: The delta in the Lake Øyeren reservoir has been affected by water level regulation since 1862. This report discusses the results of investigations carried out to identify the factors controlling the processes of delta erosion and sedimentation and to evaluate the impact of recent changes in the operational directives for power stations. A sediment sampling programme to record the supply and the concentration of suspended sediment in different parts of the delta during peaked and seasonal regulation was initiated in the project. Successive regulation phases have gradually reduced the amplitude of seasonal variations in water stage from the natural range of 8m and resulted in an extended period of high and more constant water level. Local sediment redistribution within the delta has decreased over the years reducing the downstream extent of the sedimentation zone. As a result, a new phase in the delta development was initiated with marked proximal accumulation. The subaerial part of the delta increased rapidly in area as a greater proportion of the suspended load tended to be deposited on the delta plain.

Emneord: Delta, erosion, sedimentation, hydropower development, environmental impact, rules of operation, regulated water level

Innhold

Forord	4
Sammendrag	6
1. Innledning	11
2. Målemetoder og måleprogram	15
3. Sedimenttilførselen til nordre Øyeren	17
3.1 Suspensjonstransporten ved Bingsfoss og Krokfoss.....	17
3.2 Sedimenttransportens langtidsvariasjoner basert på indirekte estimater	21
4. Vannlinjer strømhastighet og bunntransport	23
5. Lateral erosjon i elveløpene	33
6. Sedimentasjon på deltasletten og deltaplattformen	41
7. Kornfordeling på sedimentene i forskjellige deler av deltaet	48
8. Suspensjonskonsentrasjoner, ukependlig og kortidsvariasjoner	57
8.1 Suspensjonsprøver 1996	59
8.2 Resultater av målinger under ukependling i 1996	60
8.3 Suspensjonsprøver 1997	64
8.4 Suspensjonsprøver 1998	64
8.5 Suspensjonsprøver 1999	65
8.6 Sedimentfeller, måleresultater.	76
8.7 Vindmålinger	76
8.8 Ukependling - konklusjon.....	77
9. Vannstandsvariasjoner og endringer i elveløpene. Reguleringen effekt	81
9.1 Regulering av Øyeren	81
9.2 Reguleringenes innvirkning på deltaet i nordre Øyeren	82
9.3 Endringer etter siste reguleringsreglement	91
9.4 Reguleringsalternativ for Øyeren.....	91
10. Sammenfattende diskusjon	97
10.1 Oppsummering.....	100
11. Referanser	101

Forord

Den foreliggende fagrapport representerer avslutningsrapporten for erosjon i prosjektet *Miljøfaglige undersøkelser i Øyeren 1994-2000*. Rapporten er en av seks fagrapporter som til sammen dekker temaene vannkvalitet, erosjon, vannbotanikk, bunndyr, fisk og fugl.

Rapportene danner grunnlaget for hovedrapporten *Miljøfaglige undersøkelser i Øyeren* som oppsummerer de viktigste resultater fra de ulike delundersøkelsene, vurderer disse i sammenheng og gir tverrfaglige konklusjoner basert på en helhetlig vurdering.

Prosjektet *Miljøfaglige undersøkelser i Øyeren* startet i 1994. Undersøkelsene kom i gang etter initiativ fra Akershus fylkeskommune som ønsket større kunnskap om Nordre Øyeren som økosystem - spesielt på bakgrunn av at deltaflaten våren 1991-92 lå tørrlagt. Søknad om fornyet konsesjon for de private deltagerne i reguleringen av Øyeren var ikke sluttbehandlet og fylkeskommunen tok kontakt med Glommens og Laagens Brukseierforening som har hovedansvaret for reguleringen.

Formålet med undersøkelsene var å skaffe basiskunnskap om de naturfaglige sammenhenger, slik at man kan sikre riktig forvaltning og ikke minst anbefale et mer tilpasset manøvreringsreglement som gjør minst mulig skade på naturmiljøet.

Prosjektet har blitt ledet av en styringsgruppe bestående av følgende personer:

Jan Terjer Hanssen, Akershus fylkeskommune, leder av styringsgruppa
Knut Ørn Bryn, Akershus fylkeskommune, sekretær i styringsgruppa (*fram til 1997*)
Knut Bjørndalen, Akershus fylkeskommune, sekretær i styringsgruppa (*fra og med 1997*)
Jon Arne Eie, Glommen og Laagens Brukseierforening
Haavard Østhagen, Norges vassdrags- og energidirektorat (*fram til 1997*)
Jan H. L'Abée Lund, Norges vassdrags- og energidirektorat (*fra og med 1997*)
Åsmund Sæther, Fylkesmannens miljøvernavdeling
Olav Ødegård, Norsk Leca as
Erik Arnkværn, Fylkesmannens miljøvernavdeling (*observatør*)

Styringsgruppa ble i 1997 supplert med følgende:

Arne H. Erlandsen, Energibedriftenes landsforening.

Selve undersøkelseprogrammet har bestått av flere fagfelt og prosjektet engasjerte forskere innen temaene erosjon, vannkvalitet, vannbotanikk, bunndyr, fisk og fugl. Den faglige aktiviteten har vært samordnet i en faggruppe bestående av følgende personer:

Jim Bogen og Truls Erik Bønsnes, Norges vassdrags- og energidirektorat, erosjon
Terje Martinsen, ANØ Miljøkompetanse, vannkvalitet
Bjørn Rørslett, Norsk Institutt for vannforskning, vannbotanikk
Gunnar Halvorsen og Svein E. Sloreid, Norsk Institutt for Naturforskning, bunndyr
Aage Brabrand, Zoologisk museum Univ. i Oslo, fisk
Rolf E. Andersen og Svein Dale, Environmental Consultants AS, fugl

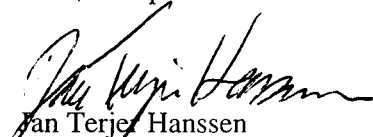
I tillegg har faggruppa bestått av følgende personer:

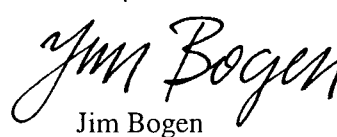
Erik Arnkværn, leder av faggruppa
Knut Ørn Bryn, sekretær i faggruppa (*fram til 1997*)
Knut Bjørndalen, sekretær i faggruppa (*fra og med 1997*)
Jon Arne Eie, Glommens og Laagens Brukseierforening
Kåre Knudsen, Glommens og Laagens Brukseierforening
Gunnar Anderssen, Fylkesmannens miljøvernavdeling
Lars Størset, Direktoratet for Naturforvaltning

Styringsgruppa har engasjert Dag Berge, NIVA for å bistå med en samordning av de ulike fagtemaene og av hovedrapporten.

Fagrapporten er i sin helhet skrevet av forsker Jim Bogen, overingeniør Truls Erik Bønsnes og overingeniør Margrethe Elster, Norges vassdrags- og energidirektorat som også ansvarlig for innhold og faglige konklusjoner. Vi retter en spesiell takk til Gunnar Anderssen som bisto i feltarbeidet og bidro med uvurderlig lokalkunnskap.

Oslo, 23. april 2002


Jan Terje Hanssen
Leder styringsgruppa


Jim Bogen
prosjektleder

Sammendrag

Denne undersøkelsen sikter mot å klarlegge vassdragsreguleringenes virkning på erosjon og sedimentasjon i deltaet i nordre Øyeren. De første reguleringene av Øyeren ble iverksatt i 1862. Siden den første reguleringen har det vært en rekke endringer i manøvreringsreglementet. Virkninger av forslag til nytt manøvreringsreglement er vurdert på bakgrunn av en omfattende analyse av virkningene fra tidligere reguleringer. Betydningen av langtidsvariasjoner i vannføring, sedimenttransport og andre variable som påvirker deltautviklingen er også drøftet. Undersøkelsen inngår i et tverrfaglig program som også omfatter studier av hvordan reguleringene innvirker på vannkvalitet og biologiske forhold. Endringer i erosjons- og sedimentasjonsprosessene kan i sin tur påvirke levestandardene for fugl, fisk, bunndyr og vannvegetasjon og forårsake nye endringer som kan påvirke vannkvaliteten.

Deltaet bygges ut av sedimenter som tilføres fra Glomma, Leira og Nitelva. Sedimenttilførselen til deltaet varierer sterkt fra år til år. De største mengdene tilføres fra Glomma hvor suspensjonstransporten ved Bingsfoss ble målt til ca 500 000 tonn i middel for årene 1995 - 1999. I 2000 ble suspensjonstransporten målt til 1 420 000 tonn. Bunntransporten i samme periode er anslått til å være av størrelsesorden mellom 75 000 og 150 000 tonn.

Den årlige midlere suspensjonstransporten i Leira og Nitelva inn i Øyeren er estimert til henholdsvis 90 000 tonn og 18 000 tonn. Undersøkelser av langtidsvariasjonene basert på analyser av borkjerner antyder en viss økning av suspensjonstransporten i perioden 1967 til 1991 sammenlignet med perioden 1934 til 1967. Årsaken kan ha sammenheng med flomhyppighet og økt tilgang på sedimenter på grunn av endringer i jordbrukets driftsformer i denne perioden. Store flommer øker erosjonsaktiviteten i leirterrenget og bidrar til større suspensjonstransport i disse periodene. Målingene fra Glomma viser at liknende langtidsvariasjoner i suspensjonstransporten også forekommer i dette vassdraget.

Samspillet mellom vannføringen i innløpselvene og vannstanden i Øyeren er avgjørende for fallet på vannlinjene i deltaområdet. Reguleringen av vannstanden har derfor innvirkning på hvor det tilførte materialet sedimenteres og hvordan deltaet utvikles. Fallet på vannlinjene har betydning for strømhastigheten som også er en viktig variabel i erosjon og sedimentasjonsprosessene i deltaet. Før de første reguleringene ble iverksatt i 1862, var deltaet karakterisert ved store sesongmessige vannstandsendringer. Forskjellen i vannstand mellom flommen om våren og lavvannstand om vinteren, var opp mot 8 m. I lange perioder i løpet av året lå vannstanden lavere enn under dagens forhold. Dette førte til at det tilførte materialet sedimenterte over et større område. Dette sedimentasjonsområdet hadde utstrekning fra Glommas innløp og ned til den daværende deltafronten ved overgangen til dypbassenget. Det bunntransporterte materialet som sedimenterte i de øvre deler av deltaet under høy vannføring og vannstand om våren ble videretransportert da vannstanden i Øyeren sank utover ettersommeren. Stadig skiftende manøvreringep praksis de siste 100 år tenderte mot å holde vannstanden konstant over

en lengre periode om sommeren og redusere den sesongmessige variasjonen. Sedimentasjonsområdet ble mindre etter hvert som reguleringene reduserte vannstandens høydevariasjon. Samtidig er det gjennomført tiltak som senker vannstanden under store flommer. Etter 1945 er høydevariasjonen mindre enn 2 m og store deler av sommeren og høsten faller ikke vannstanden under HRV, den høyeste regulerte vannstand (101.34 m).

I 1960 årene ble det dannet en øy i Glommas hovedløp (Midtbankeøya/ Flatsand). Øya oppstod på grunn av en betydelig akkumulasjon av sedimenter i dette området. Dette er sannsynligvis en langtidsvirkning av reduksjonen i sedimentasjonsområdet for bunntransporten og en konsekvens av at videretransporten av materiale stadig har avtatt siden de første reguleringene ble iverksatt. Like nedstrøms dette området er det en markert reduksjon av median korndiameter på bunnmaterialet fra mellom 0.3 - 0.5 mm til 0.063 - 0.125 mm. Denne raske reduksjonen tyder på at dette er et hovedsedimentasjonsområde for bunntransportert materiale under nåværende manøvreringsreglement og vannføringsforhold. En liknende reduksjon i kornstørrelse er registrert i de to andre elveløpene. Det er dermed sannsynlig at det også forekommer en viss sedimentasjon i disse løpene, men den har ikke vært tilstrekkelig stor til at det har blitt dannet nye øyer. På bakgrunn av bunnprøver og bunntransportmålinger fra elveløpene kan det skisseres et kart over beliggenheten av sedimentasjonssoner for forskjellige vannstander i Øyeren under nåværende reguleringspraksis, se fig. 9.4

Utover på deltaplattformen (se fig. 9.2) avtar korndiameteren ytterligere. Midlere kornstørrelse 1.5-2 km nedstrøms Årnestangen ligger i siltfraksjonen. En yttergrense for middelkornstørrelse i sandfraksjonen, dvs fraksjoner på 0.063 mm, ligger derfor i dette området. En lignende yttergrense for sedimentasjon av sandfraksjoner er også påvist i de andre løpene, men i noe varierende avstand fra deltasletten. På plattformen sorteres sandfraksjonene ut, slik at bunnmaterialet i løpene videre utover domineres av siltfraksjoner. Antageligvis lå yttergrensen for sandfraksjoner noe lenger fremme under de tidligere reguleringene med større nedtapping i deler av året. Under naturforhold ble sannsynligvis sandfraksjonene ført helt frem mot dypbassenget.

Etter flommen i 1967 ble det gjennomført endringer ved utløpet av Øyeren som skulle gjøre det mulig å holde vannstanden lavere under de høyeste flommene. Dermed vil de høyereliggende områder av deltasletten oversvømmes mer sjelden enn tidligere og den vertikale oppbygningen av de høyereliggende deler av deltasletten reduseres.

Generelt sett har den gradvise innsnevringen av vannstandsvariasjonene ført til at sedimentasjonsområdet for suspensjonstransporten er endret. Materiale som tidligere ble ført ut på deltaplattformen da vannstanden sank utover sommeren, vil nå sedimentere på de distale deler av deltasletten. Fordi vannstanden ikke senkes under kote 101.34 m vil selv mindre vannføringsøkninger kunne oversvømme de laveste deler av deltasletten. Videretransport av sedimenter ved lavere vannstander ble også redusert. Sedimentasjonsområdet ble mindre etter hvert som reguleringene reduserte vannstandens høydevariasjon. Dette har medført at deltaet bygges raskere opp til det subaerile nivået og vokser fremover i et grunt område over plattformen. Deltasletten

bygges derfor raskere ut enn under naturtilstanden, samtidig som framføringen av sedimenter til plattformen og deltafronten er redusert.

Tre prosesser har avgjørende innvirkning på erosjonen av elvebreddene langs løpene i deltaet. Dette er den direkte skjærpåvirkningen fra det strømmende ellevannet, frostpåvirkning av materialet langs elvebredden og grunnvannserosjon.

Skjærkreftene vil øke med fallet på vannlinjene (dvs. energigradienten) langs den aktuelle elvestrekningen. Dette innebærer at en sterkt stigende vannføring på lav vannstand om våren kan ha en spesielt stor eroderende virkning. Målinger viser at gradienten er større under lav vannstand og vannføring om våren enn under store flomvannføringer med høy vannstand i Øyeren. Frostens virkninger kan imidlertid ha stor betydning for skjærfastheten i materialet og dets motstandsdyktighet mot erosjon. Hvis nedtappingen av Øyeren starter i desember, blir større deler av skråningene langs elvebreddene eksponert for frost i en lengere periode enn hvis nedtappingen starter i mars. I kalde vintre kan da 0°-isotermer trengje lenger inn i massene og utsette større deler for frostbevegelse og dannelse av islinser. Når telen går ut av jorda om våren, vil større områder bli oppbløtt og kan dermed lettere eroderes av ellevannet.

Frostens virkninger fører dermed til at skjærpåvirkningene fra vannmassene lettere fører til omfattende erosjon. Det er imidlertid et samspill mellom de forskjellige prosessene. Hvis ikke materialet hele tiden fraktes vekk på grunn av skjærpåvirkningen fra de strømmende vannmassene, vil ikke frosten trengje inn til nye områder.

Grunnvannserosjon oppstår når vannstanden senkes raskt, slik at det dannes en høy grunnvannsgradient. Dette fører til et overtrykk i sedimentene langs kanten, fordi trykket ikke blir kompensert av et tilsvarende mottrykk fra ellevannet. Overtrykket reduserer skjærfastheten i skråningen og kan forårsake utglidninger.

Under flommen i 1995 sedimenterte 400 000 tonn på deltasletten. Mesteparten av dette er suspensjonsmateriale og utgjør noe over halvparten av suspensjonstransporten som ble målt ved Bingsfoss under flommen. Kulminasjonvannstanden i Øyeren under flommen i 1995 var på 104.39 m. I 2000 ble det målt en høyere suspensjonstransport ved Bingsfoss enn i 1995, men fordi maksimumsvannstanden i Øyeren ikke var høyere enn 102.5 m i 2000, sedimenterte dette materialet på lavere nivåer.

Målingene av suspensjonstransporten viser en stor økning i senere år. Den viktigste effekten en slik økning i tilførsel av suspensjonsmateriale vil ha på deltaet er en raskere oppfylling av laguner og bakevjer slik at mangfoldet i deltaets mikroformer reduseres. En økning av sedimentasjonen i disse områdene kan også bety større tilgang på løst konsoliderte sedimenter for resuspensjon under bølgepåvirkning, slik at turbiditeten generelt kan bli større. Tilførselen av bunntransportert materiale er også en viktig faktor for deltautbyggingen. Tilgangen på bunntransportert materiale varierer sannsynligvis lite med tiden siden det finnes et stort tilfang på materiale i Glommas hovedløp. De store flommene er imidlertid avgjørende for hvor store materialmengder som bringes i transport og tilføres Øyeren.

I denne rapporten er konsekvensene av følgende reguleringsreglement drøftet:

- Den gjeldende praktiseringen av reglementet da naturreservatet ble opprettet i 1975 (0-alternativt) innebar en gradvis nedtapping av Øyeren fra 1. desember fram til siste halvdel av februar og en sommervannstand som ikke skulle underskride kote 101.34.
- Etter at Bingsfoss kraftstasjon ble satt i drift, ble det innført en praksis der nedtappingen hadde et jevnere forløp fra 1. desember og fram til minimum i begynnelsen av april. Dette førte til at vannstanden ble liggende lavere utover vinteren enn tidligere. Dette var den gjeldende praktiseringen av reglementet fram til 1996.
- I 1996 ble det innført et prøvereglement som skulle holde vannstanden på 101.34 m fram til ca 1. mars. Årsaken til dette var at Øyeren skulle være islagt før nedtappingen startet. Det ble også åpnet for ukependling av vannstanden med en amplitude på 0.7 m.
- I det såkalte fuglealternativet er det ønske om å starte nedtappingen i desember og senke vannstanden jevnt gjennom vinteren. Minimumsvannstanden foreslås redusert til ca kote 99 og med en senere oppfylling enn i de andre forslagene. I august og september senkes vannstanden noe under kote 101.34 for å tørrelegge mudderbankene.

De største materialmengdene tilføres ved høy vannføring som sammenfaller med oppfyllingen av Øyeren i mai/ juni. Mye av dette materialet sedimenterer i elveløpene inne i selve deltaområdet og på deltasletten. Når vannstanden senkes i vinterhalvåret blir det videretransportert utover plattformen i motsetning til en sen nedtapping som innebærer at mindre materiale videretransporteres. En slik reduksjon i videretransport, med utstrakt bankedannelse i løpet, øker omfanget av den laterale erosjonen. En tidlig nedtapping vil øke videretransporten og dermed redusere mulighetene for lateral erosjon. En økning i bunntransporten på grunn av økt materialtilførsel inn i deltaområdet vil ytterligere forsterke bankedannelsen. Under alternativet med sen nedtapping vil dette derfor gi større konsekvenser i form av økt erosjon.

Sen nedtapping slik det ble praktisert i prøvereglementet, fører til en endring i pålagring av bunntransportert materiale i deltaet i forhold til den tidligere senkning av vannstanden fra 1. desember (jfr. Bingsfoss-praktiseringen). Det antas at Midtbankeøya/ Flatsand vil forflyttes eller bygges ut i oppstrøms retning. Videretransporten av materiale i elveløpet blir mindre ved sen nedtapping, slik at belastningen på sidekantene kan bli større. Sen nedtapping av vannstanden kan imidlertid vær gunstig for utviklingen av laguner i deltaet.

Hvis vannstanden holdes høy gjennom vinteren vil omfanget av frostpåvirkning blir mindre. Sen nedtapping motvirker inntregningen av frost i elvekanterne og reduserer faren for dannelse av islinser og ødeleggelse av jordstrukturen. Dette gir større motstandsdyktighet mot erosjon og fører sannsynligvis til at erosjonsintensiteten langs elvestrekninger med bratte siltige skråninger også blir mindre.

Et manøvreringsreglement som medfører sterkt stigende vannføring på lav vannstand om våren kan føre til mye erosjon, siden skjærkrefter øker med fallet på vannlinjene.

Pendlingsforsøkene viste at en endring i vannstanden på 0.7 m/uke, til en viss grad vil påvirke partikkelkonsentrasjonen i deltaområdet. Dette gjelder spesielt ved Nordhagen som ligger ved utløpet av det grunne Svelle, men også ved målepunktene i Nitelva og Leira hvor konsentrasjonsendringene er mest markerte. De høye partikkelkonsentrasjonene i Svelle synes altså i mange situasjoner å være større enn i de nedre deler av deltaområdet. Årsaken til dette er sannsynligvis at større arealer eksponeres for bølgeerosjon i gruntvannsområdet. Rask nedtapping fører til et overtrykk i bunnsedimentene slik at den kritiske skjærspenningen for erosjon blir mindre. Dette innebærer at vind eller strøm lokalt kan forårsake høyere suspensjonskonsentrasjoner enn hva som ellers ville vært tilfelle. Modellberegninger av skråningsstabiliteten langs de bratte kantene ved Fautøya viste imidlertid at en pendlingsamplitude på 0.6 m/uke ikke er tilstrekkelig stor til å medføre utrasninger i det aktuelle materialet.

Deltaet er et dynamisk system hvor erosjon og sedimentasjonsforholdene stadig skifter. Hovedkonklusjonen i denne undersøkelsen er at reguleringenes innvirkning på vannstanden i Øyeren og gradienten på vannlinjene har avgjørende betydning for erosjon og sedimentasjonsprosessene i deltaområdet. Deltautviklingen er imidlertid også påvirket av samspillet mellom mange andre variable. Endringene i deltaområdet har derfor ikke alltid direkte sammenheng med reguleringene, men kan skyldes tilfeldige variasjoner i en av de mange faktorer som påvirker prosessene. Vannføring og sedimenttransport påvirkes av jorderosjon på dyrket mark eller av klimatiske endringer i det hydrologiske regimet. Slike endringer kan i seg selv få konsekvenser, men de vil bli forskjellige alt etter hvilket manøvreringsreglement som velges.

1. Innledning

Prosjektet «Miljøfaglige undersøkelser i Øyeren» ble igangsatt av Akershus fylkeskommune i samarbeide med GLB våren 1994 og fokuserer på vassdragsreguleringenes virkning på miljøforholdene i deltaet. Studier av erosjon og sedimentasjon er et av seks delprosjekt som inngår i undersøkelsene. De øvrige delprosjektene omfatter undersøkelser av fugl, fisk, bunndyr, botanikk og vannkjemi. Denne rapporten oppsummerer undersøkelsene av ”erosjon og sedimentasjonsprosessene på deltaet i Nordre Øyeren”.

Det fokuseres blant annet på endringer i tilknytning til innføring av nytt manøvreringsreglement av Øyeren. I perioden fram til og med 1995 ble Øyeren regulert etter reglementet som ble innført i 1934. Praktiseringen av reglementet ble imidlertid noe endret i forbindelse med opprettelsen av Bingsfoss kraftstasjon i 1977/1978. I 1996 ble det innført et prøvereglement som innebærer at sommervannstandens nivå på 101.34 m (4.80 m) holdes ut over vinteren fram til gruntområdene er islagt eller til 1. mars.

Prøvereglementet åpnet også for ukependling av vannstanden i opp til 3 uker og kunne bare utføres etter 10. august. Under pendlingene kunne vannstanden variere med opp til totalt 0.7 m, mellom kote 101.74 (5.20 m) og kote 101.04 (4.50 m), men slik at vannstanden ikke senkes med mer enn 0.10 m pr døgn. Undersøkelsene ble igangsatt i 1994 for at det skulle gis anledning til å undersøke forholdene i to sesonger under det gjeldene reglementet. Deretter ble målingene konsentrert om forsøk i tilknytning til det nye reglementet.

For å få en forståelse av hvordan reguleringen påvirker erosjon og sedimentasjonsprosessene, er det viktig å skille naturlige variasjoner fra menneskeskapte endringer. Det er derfor nødvendig å ha innsikt i de viktigste variable som styrer deltautviklingen og hvordan forholdene i deltaet stadig er utsatt for endringer. Siden den første reguleringen i 1862, har deltaet blitt påvirket av stadige endringer i manøvreringsreglementet. Ved å dokumentere virkningene av gjennomførte reguleringer, kan en bedre forutsi fremtidige endringer med større sikkerhet.

Delta-avsetninger dannes der materialførende elver løper inn i innsjøer eller i havet. Strømhastighet og gradient avtar, slik at materialet sedimenteres. Sedimentene som tilføres fra elvene er sammensatt av suspendert- og bunntransportert materiale. Suspensjonsmaterialet består av finfordelte partikler som svever i vannmassene mens det bunntransporterte materiale er sammensatt av sandfraksjoner og grovere partikler som ruller i kontakt med bunnen. Materialet fra disse transportprosessene avsettes på ulike steder i deltaet. Det bunntransporterte materialet sedimenterer der strømhastigheten avtar i elveløpene eller på munningsbankene. Suspensjonsmaterialet sedimenterer på deltasletten, i bakevjene, på plattformen og i dypbassenget, men i mindre grad i selve elveløpet.

I elver med stor materialtransport er bunnen bevegelig. Elven kan erodere i løsmassene slik at elveløpet senkes, eller løpet kan heves på grunn av sedimentasjon. Det oppstår en likevekt når det er en balanse mellom erosjon og sedimentasjon. Elvens strømhastighet, bunnmaterialets kornstørrelse og elveløpets fall er blant de viktigste variable som kan påvirke denne likevekten. Likevekten på en gitt strekning er avhengig av at materialet som tilføres fra områdene oppstrøms kan føres videre nedover. Hvis materialet akkumulerer på visse steder i elveløpene, kan elven grave i sidene og endre retning. Når elven løper inn i en innsjø, vil vannstanden i innsjøen danne sedimentasjons- og erosjonsbasis. Vannstanden er derfor avgjørende for hvor materialet sedimenteres. Vannstanden i innløpsområdet har derfor stor betydning for hvor materialet pålagres. Ved høy vannstand bremses strømhastigheten opp slik at sedimentasjonsområdet forflyttes oppover i elveløpet. Ved en senkning av vannstanden føres sedimentene lenger ut i deltaområdet. Vannlinjenes gradient innvirker på strømhastigheten og er derfor viktig for erosjon og sedimentasjon i deltaet. På grunn av sesongmessige variasjoner og endringer fra år til år vil likevekten etableres som et gjennomsnitt av varierende forhold. Dette innebærer at det stadig oppstår lokale endringer i erosjons- og sedimentasjonsaktiviteten i elveløpene og på deltaet.

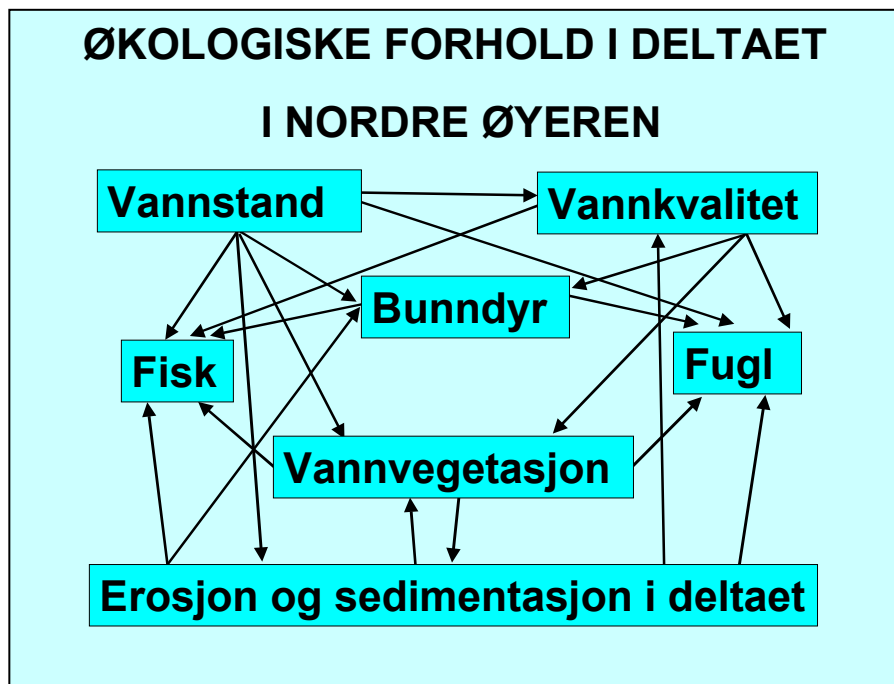


Fig. 1.1. Vannstandvariasjonenes innvirkning på erosjons- og sedimentasjonsprosessene vil i sin tur forårsake nye endringer som kan påvirke vannkvaliteten og de biologiske forhold.

Vannstandvariasjonene innvirker på erosjon- og sedimentasjonsprosessene, vannkvalitet og biologiske forhold. Endringer i erosjon og sedimentasjonsprosessene vil i sin tur påvirke leveforholdene for fugl, fisk, bunndyr og vannvegetasjon. Vannkvaliteten vil også påvirkes, se fig. 1.1.

Av tidligere undersøkelser som behandler hydrologiske forhold i Øyeren deltaet, kan nevnes Thyssen (1976), som undersøkte erosjon og sedimentasjon i deltaet. Pedersen (1981, 1994) undersøkte fluvialgeomorfologiske forhold med vekt på deltaets historiske utvikling de siste 200 år. Ree (1984) undersøkte deltaet som grunnvannsreservoar. Andersen (1992) vurderte erosjonsforholdene i deltaet, og Gjerde (1998) har behandlet Øyerens geologi. En analyse av utviklingen i Øyerens vannstandsforhold i perioden 1852 til 2000 er gitt av GLB (2000). Den første publiseringen av erosjon og sedimentasjonsundersøkelsene inngår i samlerapporten fra prosjektet "Miljøfaglige undersøkelser i Øyeren", se Bogen og Bønsnes (1998).

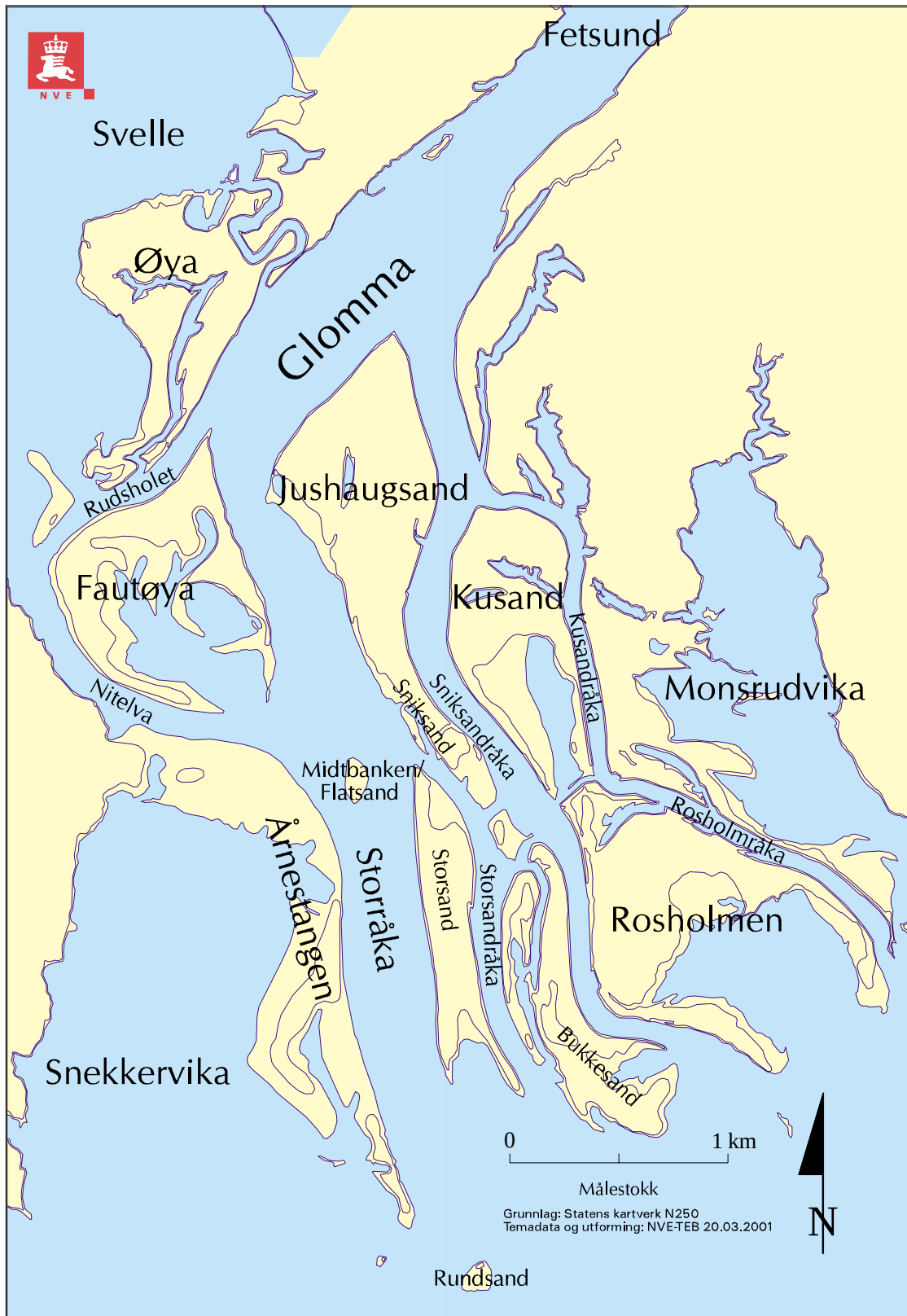


Fig. 1.2. Oversiktskart over deltaområdet.

2. Målemetoder og måleprogram

For å måle suspensjonstransporten inn i Øyeren ble det opprettet en målestasjon ved Bingsfoss. Fra tidligere undersøkelser var det allerede etablert en målestasjon ved Krokfoss i Leira. Begge målestasjonene er utstyrt med automatprøvetakere hvor en vannprøve på ca 1 liter pumpes opp fra 2 til 4 ganger pr. døgn. Prøvetakingen følger NVEs standard som er beskrevet av Bogen (1986). Dette omfatter bl. a. at automatprøvetakeren tar prøver fra et område av elven med turbulent strømningstilstand. Prøvene analyseres med hensyn på organisk og uorganisk materiale etter en prosedyre beskrevet av Bogen (1992). Organisk materiale er definert som glødetap ved 480 °C. Eventuelt krystallvann i leirmateriale er inkludert i måleresultatene. Disse målestasjonene har registrert tilførselen av suspensjonsmateriale til deltaområdet i årene 1994 til 2000.

NVEs målemetoder inkluderer alle fraksjoner som befinner seg i suspensjon på det aktuelle målestedet. Dette innebærer at fraksjoner fra 0.45 mikron til 500 mikron inkluderes i prøvematerialet. En del av prøvematerialet vil derfor bestå av sandpartikler. Denne prosedyren avviker i mange tilfelle fra hva som er vanlig i vannkvalitetsmålinger. I slike målinger inkluderes ikke de groveste fraksjonene i prøvene. I studier av erosjon og sedimentasjon i vassdragene har imidlertid de grove fraksjonene en avgjørende rolle.

For å undersøke hvordan korttidsreguleringer påvirker erosjonsprosessene i magasinet ble det gjort flere felteksperimenter. Partikkelkonsentrasjonen i tilløpselvene og i utløpet av deltaområdet i Glomma ved Rundsand ble målt under perioder med ukependling samt i referanseperioder i årene 1996 til 1999, se oversiktskart fig 8.1. I tillegg til målinger ved de permanente stasjonene ble det opprettet nye målepunkter i Nitelva ved Lillestrøm, i Leira ved innløpet til Svelle og i Glomma ved Fetsund. For å registrere eventuell nedstrøms erosjon i Svelle er det tatt prøver ved Nordhagen. Ved disse stasjonene ble det tatt en manuell prøve pr. døgn. Under pendlingene kan det oppstå erosjon i deltaområdet som fører til at mer materiale bringes i suspensjon. Dette ville i så tilfelle registreres ved at suspensjonskonsentrasjonen øker utover gjennom deltasystemet. Under referanseperiodene er det ingen styrt pendling av vannstanden i Øyeren. Kraftverkene ble da kjørt i henhold til manøvreringsreglementet uten pendlinger. I 1998 ble en av referanseperiodene lagt til hevningen av vannstanden i Øyeren i slutten av april.

I 1998 ble det i tillegg satt opp sedimentfeller ved utløpet av Storråka (Glomma), Sniksandsråka og Kusand/ Rosholmsråka. Felleriggene er sammensatt av en rekke sylindriske oppfangningsenheter som henger fritt i vannmassene på forskjellige dyp (1 m, 2 m og 3 m under overflaten). Sedimentfellene gir et integrert bilde av sedimentmengden som er i suspensjon i vannmassene i måleperioden. Materialet i fellene ble analysert med henblikk på organisk og uorganisk materiale. I et utvalg av disse prøvene ble det også foretatt kornfordelingsanalyser med Laser –Coulter, modell 240.

Undersøkelsene ble koordinert med målingene til Avløpssambandet nordre Øyeren (ANØ). De foretar jevnlig prøvetakinger av vannkvaliteten i området. Dette innbefatter bl. a suspendert materiale. Prøvetakingen er lokalisert på 4 steder i Øyeren, ved utløpet av Glomma (Rundsand), Rud, Fossum/ Fuglli og Solbergåsen. Videre tas det prøver ved samløpet Nitelva/ Leira og ved Bingsfoss. Prøvetakingen i Øyeren og ved samløpet Nitelva/ Leira er basert på stikkprøver (momentanprøver) en gang pr. uke, mens den ved Bingsfoss er basert på ukeblandprøver, se fig 8.1 og 8.2.

Bølgerosjon er også en viktig prosess som kan føre til erosjon og resuspensjon av finfordelte sedimenter langs elvekanten og gruntvannsområder. Bølger kan påvirke bunnen ned mot syv meters dyp. Både vindstyrke og retning er avgjørende for omfanget av bølgerosjon. Det er derfor sett nærmere på vindstyrke/retning under de forskjellige måleperiodene. Vindmålingene som er benyttet er registreringer fra Kjeller og er utført av NILU.

Erosjonsprosessene i deltaområdet ble undersøkt ved feltstudier. Det ble samtidig tatt prøver av bunnsedimentene i de forskjellige deler av deltaet og sammensetningen av materialet i de forskjellige løpene ble kartlagt. Det ble benyttet en Helley – Smith prøvetager til å undersøke hvordan bunntransporten pålagres i forskjellige deler av deltaet.

Det ble også gjort en inngående studie av virkningene etter 1995 flommen. I denne undersøkelsen ble tykkelsen, volumet og kornfordelingen av de avsatte flomsedimentene på deltasletten kartlagt. Det er benyttet eldre kart og flybilder for å klarlegge hvordan deltaets utvikling har vært de siste 175 år. Modellberegninger av vannlinjer i deltaområdet ved ulike vannstander og vannføringer er beregnet som en støtte for betraktninger omkring sedimentasjon i deltaet under forskjellige vannstander. Pedersen (1981, 1994) og Statens kartverk (1994) har også laget oversikter over deltaets utvikling på grunnlag av eldre kart. I denne undersøkelsen er originalkartene analysert på nytt. Resultatene avviker imidlertid ikke mye fra tidligere undersøkelser.

3. Sedimenttilførselen til nordre Øyeren

De viktigste elvene som bidrar med sedimenter til deltaet i Nordre Øyeren er Glomma, Leira og Nitelva. Tidligere målinger basert på slamføringskurver (Pedersen 1981) ga en transport ved Fetsund på 210 000 tonn/ år som et middel for årene 1978 og 1979. NVE startet målinger av suspensjonstransporten i Glomma ved Bingsfoss som en direkte følge av flommen i 1995. I Leira måler NVE suspensjonstransporten ved Krokfoss som omfatter de øvre 180 km² av nedbørfeltet, se fig 3.1. Disse målingene har pågått sammenhengende siden 1989. I den nedre delen er det vanskelig å få tatt representative prøver som inkluderer de groveste fraksjonene i suspensjonsmaterialet, fordi det ikke fins turbulente måleprofiler. Øyerens oppstuvning vanskeliggjør også vannføringsmålinger. ANØs målinger i tilknytning til vannkvalitetsovervåking ga 73 000 tonn/ år som middel for årene 1983 - 1992 ved Frogner (620 km²). Thyssen (1976) målte suspensjonstransporten ved Leirsund (659 km²) med dybdeintegrerende prøvetaker og beregnet årstransporten med slamføringskurver til 100 000 tonn/ år. Bogen, Berg og Sandersen (1993) estimerte en årlig middeltransport på grunnlag av studier av sedimentkilder og målingene i de øvre delene av vassdraget til 95 000 tonn/ år. Overslagene over tilførsel fra forskjellige kilder tok utgangspunkt i situasjonen etter den store flommen i 1987. Tar vi alle målinger i betraktning og korregerer for manglende sandinnhold i vannkvalitetsmålingene kan et sannsynlig tall for middeltransporten i Leira over lang tid settes til 90 000 tonn/ år. Tilsvarende blir transporten i Nitelva 18 000 tonn/ år. Noe sedimenterer i Svelle og føres ikke fram til Glommas hovedløp. Thyssen (1976) anslo på grunnlag av vannprøver ved innløpet og utløpet av Svelle, at 70-75% av suspensjonsmaterialet fra Leira og Nitelva sedimenterer. Mineralogiske analyser viste at Glomma ikke bidrar i særlig grad til sedimentasjonen i Svelle.

På grunnlag av liknende undersøkelser i andre vassdrag er bunntransporten anslått til å utgjøre mellom 10 og 20 % av totaltransporten inn i deltaet, dvs av størrelsesorden mellom 75 000 og 150 000 tonn.

3.1 Suspensjonstransporten ved Bingsfoss og Krokfoss

Måleresultatene viser store variasjoner i transporten ved Bingsfoss fra år til år, se tabell 3.1 og fig 3.2. I løpet av flommen i mai og juni 1995 ble det målt en suspensjonstransport på ca 700 000 tonn. Den laveste årstransporten ble målt i 1996 da det var svært lite nedbør og lav vannføring i Glomma dette året. Totalt i 1997 var suspensjonstransporten på samme nivå som i 1995. Avrenningen var ikke fullt så høy som i 1995, men relativt høye vannføringer utover sommeren og høsten førte til at totalavløpet ikke ble så mye mindre, se tabell 3.1. I 1998 og 1999 ble det målt en totaltransport på henholdsvis 408 000 tonn og 553 000 tonn som også er en betydelig større mengde enn det som ble beregnet av Pedersen (1981). Under vårflommen i



Fig. 3.1. Leira, Nitelva og Glomma drenerer til deltaet i Nordre Øyeren.

2000 ble det målt enkeltkonsentrasjoner opp mot 600 mg/l ved Bingsfoss. Dette førte til at totaltransporten i mai oversteg 700 000 tonn. Vannføringsforløpet i Glomma og Vorma i april og mai 2000 viser at det største tilsiget kommer fra Glomma fram til midten av mai. Det var i denne perioden de høyeste suspensjonskonsentrasjonene ble målt ved Bingsfoss. Det er derfor sannsynlig at de store sedimentmengdene tilføres fra de nedre deler av Glomma. Høye konsentrasjoner og vannføringer utover sommeren og de langvarige høstflommene førte til at totaltransporten og totalt avløp i 2000 ble vesentlig større enn i 1995, se tabell 3.1. Både i 1997 og 2000 ble det målt suspensjonskonsentrasjoner som var vesentlig høyere enn under flommen i 1995, mens det i 1998 og 1999 ble målt konsentrasjoner på samme nivå. Maksimaltransporten i de enkelte årene ble målt i forbindelse med vårflommen, men fordelingen over året har vært noe varierende.

Tabell 3.1. *Vannføring og beregnet minerogen og organisk suspensjonstransport ved Bingsfoss i Glomma. Antall døgn er antall døgn i måleserien.*

ÅR	ANT. DØGN	AVLØP		UORGANISK SEDIMENTTRANSPORT			ORGANISK SEDIMENTTRANSPORT		
		TOT Mill m ³	PR DØG mill m ³	TOT Tonn	PR DØGN Tonn	KONS mg/l	TOT Tonn	PR DØGN Tonn	KONS mg/l
1995	365	22500	61.7	756000	2070	33.6	****	****	****
1996	338	14300	42.3	95100	281	6.65	12400	36.6	0.87
1997	347	19700	56.7	710000	2050	36.1	51100	147.0	2.60
1998	348	22300	64.0	408000	1170	18.3	40200	116.0	1.81
1999	365	22500	61.7	553000	1520	24.6	42800	117.0	1.90
2000	365	27900	78.0	1420000	3960	50.8	65900	184.0	2.36

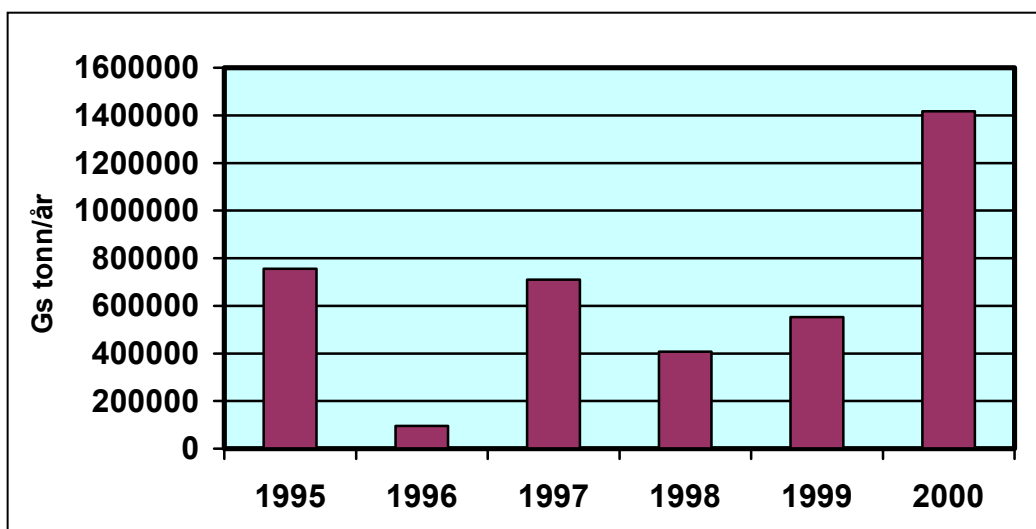


Fig. 3.2. *Suspensjonstransport i Glomma ved Bingsfoss 1995– 2000.*

Ved Krokfoss i Leira viser målingene et middel for tiårsperioden 1990 til 1999 på ca 23 600 tonn/ år. I 2000 ble det målt en suspensjonstransport på 64 300 tonn som er det høyeste i hele måleperioden. Det var transporten under den langvarige høstflommen som bidro til dette. Det er sannsynlig at transporten inn i Øyeren/ Svelle er anslagsvis 100% høyere eller mer. Variasjonene fra år til år vil antagelig ha samme forløp som ved Krokfoss. Dette betyr at suspensjonstransporten inn i Svelle og deltaområdet fra både Nitelva og Leira kan variere mye fra år til år, se tabell 3.2 og fig. 3.3.

Tabell 3.2. *Vannføring og beregnet minerogen og organisk suspensjonstransport ved Krokfoss i Leira. Antall døgn er antall døgn i måleserien.*

ÅR	ANT. DØGN	AVLØP		UORGANISK SEDIMENTTRANSPORT			ORGANISK SEDIMENTTRANSPORT		
		TOT Mill m ³	PR DØG Mill m ³	TOT Tonn	PR DØGN Tonn	KONS mg/l	TOT Tonn	PR DØGN Tonn	KONS mg/l
1990	274	173.0	0.63	33800	123.0	195.0	1450	5.28	8.34
1991	235	218.0	0.93	29700	126.0	136.0	1660	7.07	7.61
1992	239	105.0	0.44	16900	70.6	161.0	1310	5.49	12.5
1993	247	163.0	0.66	19600	79.5	121.0	1080	4.37	6.64
1994	257	250.0	0.97	28400	110.0	114.0	1380	5.38	5.54
1995	308	254.0	0.82	25000	81.1	98.3	1310	4.26	5.16
1996	342	179.0	0.52	12200	35.6	68.0	779	2.28	4.36
1997	365	194.0	0.53	11400	31.2	58.6	790	2.16	4.07
1998	352	306.0	0.87	26200	74.4	85.5	1400	3.98	4.57
1999	365	273.0	0.75	33200	90.9	121.0	1870	5.12	6.84
2000	366	432.0	1.18	64300	176.0	149.0	2540	6.93	5.87

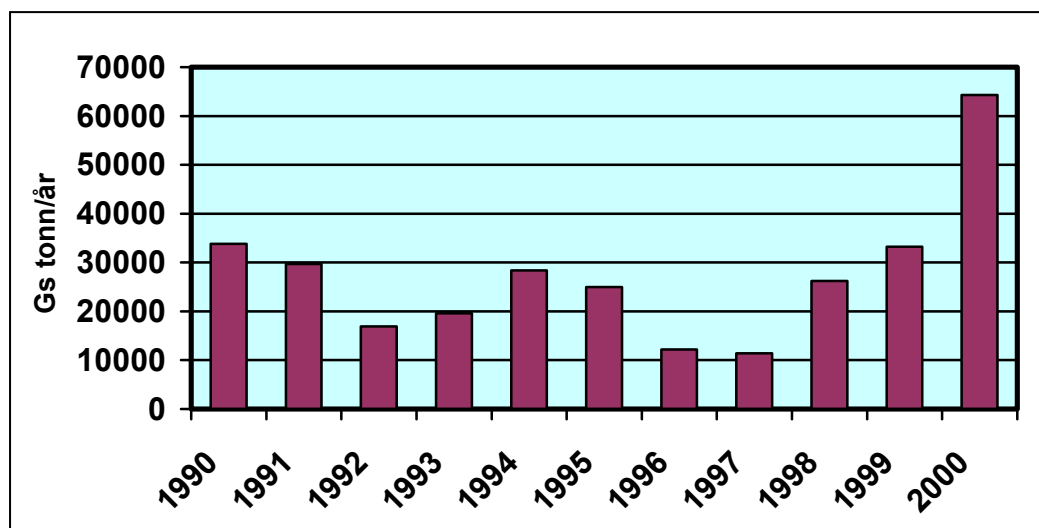


Fig. 3.3. Suspensjonstransport i Leira ved Krokfoss 1990–2000.

3.2 Sedimenttransportens langtidsvariasjoner basert på indirekte estimer

Langtidsvariasjoner i sedimenttransporten kan reflekteres i sedimentasjonen på elvesletter og i innsjøenes bunnsedimenter. I Leira - vassdraget ble flomsedimentene datert med henblikk på å undersøke sedimentasjonen over en lengre periode. Flere profiler med flomsedimenter langs Leiras hovedløp ble datert ved målinger av radioaktivt Cesium (Cs^{137} og Cs^{134}), (Bogen, Berg og Sandersen 1993). Tsjernobyl - ulykken i april 1986 ga et betydelig nedfall av Cs^{137} og Cs^{134} . Cs^{134} har en halveringstid på bare to år, mens halveringstiden på Cs^{137} er på over 20 år. Tsjernobyl - nedfallet kan derfor identifiseres på aktiviteten av Cs^{134} . Under de kjernefysiske spregningene i slutten av 50 årene og begynnelsen av 60 årene var det også et nedfall av begge isotopene, men aktiviteten til Cs^{134} er nå opphørt. Alle profiler har et markert sjikt med høy radioaktivitet som antas å skyldes Tsjernobyl - nedfallet. I årene 1986 - 1990 ble det pålagret materiale med relativt høy radioaktivitet som er tilført fra andre steder i Leiras nedbørfelt. I et visst dyp er ikke sedimentene lenger radioaktive. Disse flomsedimentene er avsatt i tiden før de første kjernefysiske spregningene. Dateringene gir grunnlag for å angi sedimentasjonen innenfor forskjellige perioder. Det er en markert økning i sedimentasjonen på slutten av 80 årene, se fig. 3.4.

Sedimentene i Øyerens dypbasseng ble også undersøkt. Sedimentasjonen i dypbassenget vil reflektere langtidsvariasjoner i sedimenttilførselen til innsjøen. I borkjernene ble det iaktatt en tydelig laminering, som består av en veksling mellom mørke, forholdsvis tynne sjikt og en del tykkere lysere lag av forskjellige nyanser av grått og brunlig til brungrå farge. Det aller meste av kjernematerialet i de øvre 50 cm er meget finkornet hvor ca. 80 - 90 % ligger i siltfraksjonen. På grunnlag av granskningen av lamineringen kan det settes opp diagrammer over årlig sedimentasjon (Bogen og Sandersen 1991).

Flommene i Øyeren kan spores i noen av lokalitetene ved grovere materiale og mektigere lag. På visse lokaliteter mangler flomlagene helt, eller er dårlig markert. Utakt i avrenningen til elvene som kommer inn i sjøen, samt ulike effekter på den store deltaplattformen ved vannstandsvariasjoner kan være årsaken til dette. Ved de lokalitetene der flomlag fra 1934 og 1967 kan identifiseres, er det beregnet en middeltykkelse pr. år for periodene 1934 - 1967 og 1967 - 1990. Selv om datering med laminasjoner og flomlag er beheftet med usikkerheter, så gir det en antydning om en viss økning i sedimentasjonsraten på 1.13 mm (22%) i perioden 1967 - 1990 i forhold til den første perioden, jfr. fig. 3.4. Denne økningen faller sammen med perioden med økt sedimenttilførsel til innsjøen på grunn av bakkeplanering og omlegging av jordbruket. For øvrig synes avløpet å følge langperiodiske svingninger. Hyppigheten av flommer er større i visse perioder og skifter med mer tørre perioder. Dette mønsteret bekreftes også av internasjonale studier. Probst (1989) finner liknende langtidsfluktuasjoner i en rekke europeiske elver tilbake til midten av forrige århundre. Flomperiodene følges av leirskred. Nesten alle registrerte leirskred på Romerike inntraff i tilknytning til en flom. Unntaket er skredene i 1970 årene som ble

utløst i tilknytning til bakkeplanering. Ifølge Bogen, Berg og Sandersen (1993) forårsaker de store flommene endringer i erosjonsbasis i ravinlandskapet på Romerike, noe som i sin tur utløser en økt skredhyppighet. Det er dermed sannsynlig at flomperiodene følges av økt sedimenttransport. Ikke bare på grunn av vannføringsøkningen, men også på grunn av den økte tilgangen på sedimenter som skredene forårsaker.

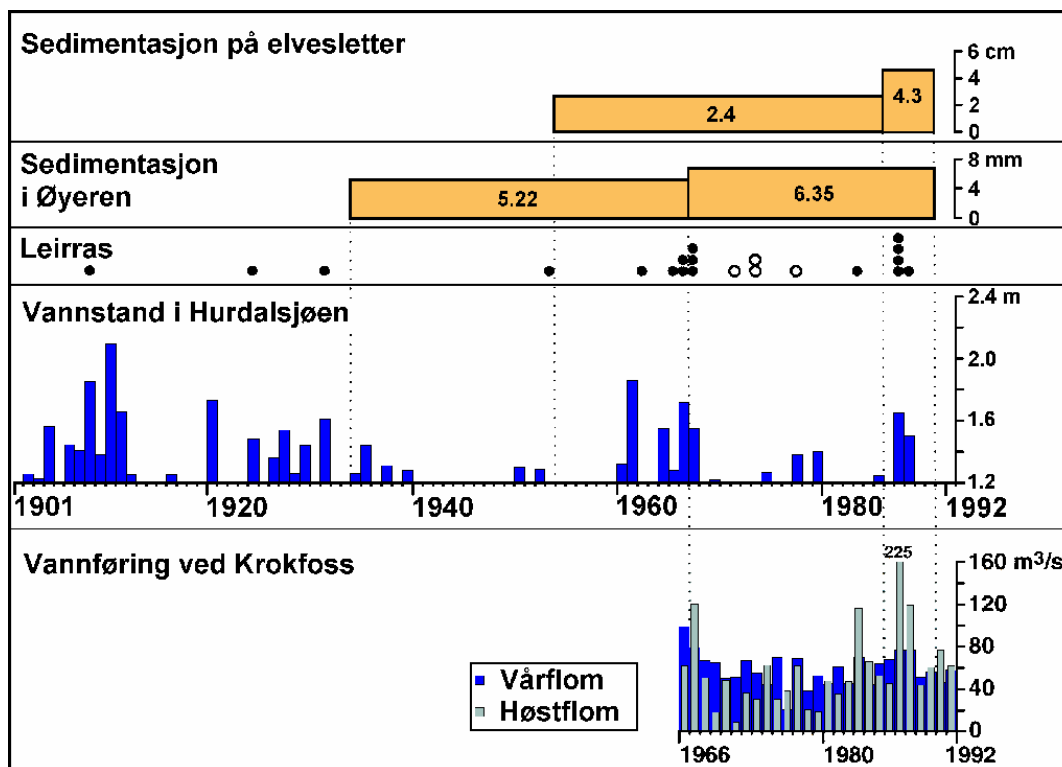


Fig. 3.4. Sammenstilling av data fra sedimentert materiale på elvesletter i Leira og sedimentasjon i Øyeren med flomvannstand og flomvannføring i vassdrag på Romerike. Tidspunktet for større leirskred er indikert med sirkler (Fra Bogen, Berg og Sandersen 1993).

Målinger ved Bingsfoss i perioden 1995 til 2000 viser at suspensjonstransporten kan være svært høy også i perioder uten ekstreme flommer. Måleserien fra Bingsfoss er forholdsvis kort, men omfatter situasjoner med store vannføringsvariasjoner. Måleresultatene fram til nå viser betydelige variasjoner i sedimenttransporten innenfor måleperioden. En del av disse sedimentene kommer fra leirområdene på Romerike, men en betydelig andel tilføres også fra erosjonsprosesser i andre deler av Glommas nedbørfelt. Det ble registrert en betydelig suspensjonstransport under flommen i 1995. Høy transport i de påfølgende årene kan tyde på at det er åpnet nye sedimentkilder, som kan være en følge av forholdene i 1995.

4. Vannlinjer strømhastighet og bunntransport

Vannlinjenes fall (gradienter) har betydning for strømhastigheten og innvirker dermed direkte på vannmassenes skjærkrefter mot bunnen. Sedimentpartiklene bringes lettere i bevegelse når fallet er høyt. Det finnes flere empiriske relasjoner som uttrykker forholdet mellom bunntransport pr. tidsenhet for en gitt kornstørrelse når gradienten og vannføringen er kjent. Relasjonene er oftest utledet på grunnlag av laboratorieforsøk som skal beskrive forholdene i forskjellige typer elver. Ligningene er derfor forskjellige for elvestrekninger med ulike kornstørrelser og gradienter. Meyer Peter (1934) utviklet en ligning som er gyldig for gradienter (S) fra 0.04% til 2% og median kornstørrelser (D_{50}) fra 0.4 mm til 30 mm i usortert materiale. Materialet beveges av skjærspenningen fra det strømmende vannet. Bunntransporten (g_b) i kg/s pr. breddeenheter kan uttrykkes som en empirisk relasjon:

$$(1) \quad g_b = [2.5q^{2/3}S - 42.5D_{50}]^{3/2}$$

Vannlinjenes gradient i deltaområdet påvirkes av vannstanden i Øyeren og vannføring i Glomma. Dette betyr at det ikke bare er vannføringen som er avgjørende for bevegelse av bunnmaterialet i deltaområdet, men også vannstanden i Øyeren på det aktuelle tidspunkt. Målinger har vist at gradienten kan være stor selv under lave vannføringer hvis vannstanden i Øyeren er lav. En høy gradient i innløpsområdet innebærer dermed at den kritiske skjærspenningen for transport blir mindre. Dermed kan det også være en viss bunntransport i perioder med lave vannføringer. Ved høy vannstand i Øyeren stuves vannet opp i de nedre deler av Glomma, slik at vannlinjenes fall og strømhastighet avtar. Under slike forhold føres mindre materiale ut i de nedre deler av deltaet. Samspillet mellom vannstand i Øyeren og vannføringen i Glomma vil dermed være avgjørende for hvor hovedandelen av det bunntransporterte materialet sedimenteres. Når gradienten endres gjennom året, kan dette innebære at bunnmaterialet igjen bringes i bevegelse. Lengere varigheter med lav vannstand kan derfor medføre en høyere videretransport av bunnsedimenter i området selv på lave vannføringer. På noe lengere sikt kan dette medføre at bankesystemer i deltaområdet beveges nedover i elvesystemene. Skisse av deltautbygging under varierende vannstand er vist i fig. 4.1.

Siden pålagringen av bunntransportert materiale spiller en viktig rolle, ble det gjort en rekke bunntransportmålinger i elveløpene. Resultatet av to måleserier fra 1996 er vist i fig. 4.2. Det er store nedstrøms variasjoner. Transporten ble målt til i underkant av 0.5 kg/s ved Fetsund, men øker lokalt opp til 2.0 kg/s i området ved Fautøya. Høye strømhastigheter i området ved Fautøya fører til erosjon og bunnsenkning og er derfor blant de dypeste elvestrekningene i deltaområdet. I elveløpet ved nedre del av Årnestangen var det nesten ikke registrerbar bunntransport. Dette betyr at det meste

av bunntransporten sedimenterer i området mellom Fautøya og Årnestangen på sommervannstand (rundt kote 101.3 m) og moderate vannføringer. Ved økende vannføring og økning i gradienten vil sedimentasjonsområdet forflyttes nedstrøms.

I tilknytning til planlegging av omløpstunnellen ved Mørkfoss etter flommen i 1967 ble konsekvensene av et større fall på vannstanden i Glomma ovenfor Øyeren utredet (Innstilling om sikring mot skadeflom i Glomma- og Lågenvassdragene 29/10-1969). Utredningen viste høyere strømhastigheter og økt erosjon på strekningen Fetsund - Bingsfoss. Foruten faren for erosjon som kunne påvirke broene, ble også virksomheten ved Fetsund lenser berørt ved høyere strømhastighet.

Etter utbedringer som er foretatt ved Solbergfoss siden 1967 er det allerede gjennomført en senkning. Vannstanden under flomkulminasjonen i 1995 var omkring 2 meter lavere enn i 1967, selv med en noe høyere vannføring. Vannstanden var allikevel så høy at øyene i deltaområdet var oversvømmet. På grunn av antatt større strømhastigheter ved en senkning til under nivået på deltasletten (ca 103-104 meter), kan hovedområdet for sedimentasjon i en slik tenkt situasjon forflyttes lenger ned i elveløpet enn i 1995. En slik situasjon kan føre til erosjon og senking av elvebunnen høyere opp i Glomma. Erosjonsterskelen ved Fetsund vil imidlertid beskytte mot en videre senking av elveløpet i området ved broene. Terskelens innvirkning på strekningen videre opp mot Bingsfoss vil være å stabilisere erosjonsbasis, men områdene kan fremdeles være sårbare. Spesielt kritisk kan det være under høy vannføring på lav vannstand i Øyeren, se for øvrig Bogen og Bønsnes 1996. Påkjenningen på elvebreddene på strekningen Årnestangen - Fautøya vil øke i en slik situasjon. Konsekvensen kan bli et gjennombrudd og en forflytning av Glommas hovedløp lenger mot vest. Påkjenningen direkte på terskelkonstruksjonen vil også øke, med større risiko for brudd.

Gradienter på tre delstrekninger i Glomma som ble oppmålt i 1966 og 1967 er vist i fig. 4.3. De ble oppmålt under flomkulminasjonen i Glomma i 1966 og 1967. Det ble også oppmålt en situasjon på stigende flom forut for kulminasjon i 1967 og to situasjoner på høsten 1967. I tillegg er det beregnet gradienter på delstrekningen mellom Fetsund og Årnestangen basert på registrerte vannstander ved Fetsund og Mørkfoss vannmerker ved noen utvalgte situasjoner i 1998 og 1999. Mørkfoss

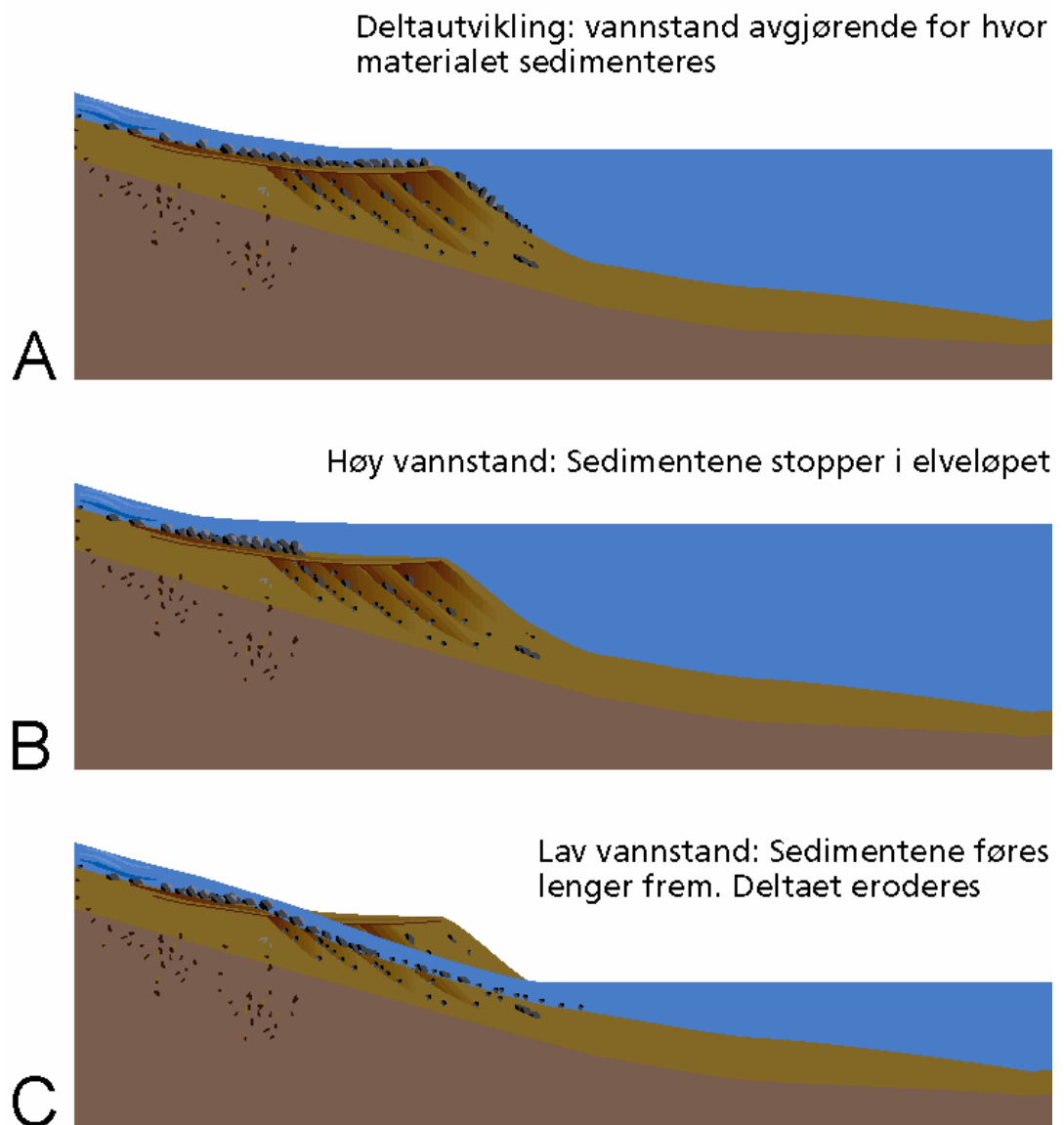


Fig. 4.1. A: Sjiktningen i et stabilt delta som vokser fremover i en innsjø med konstant vannstand.

 B: Under høy vannstand kan bunntransporten stoppe opp i løpet og dermed kan løpsendringer oppstå.

 C: På lav vannstand i magasinet vil deltaet eroderes.

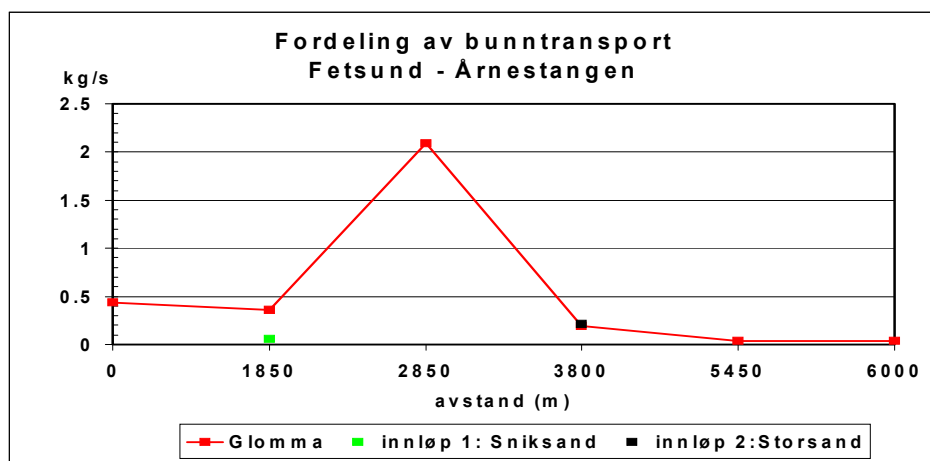


Fig. 4.2. Bunntransport målt med Helley - Smith prøvetager langs Glommas hovedløp fra Fetsund (0 m) til Årnestangen (6000 m). Målinger fra 1996.

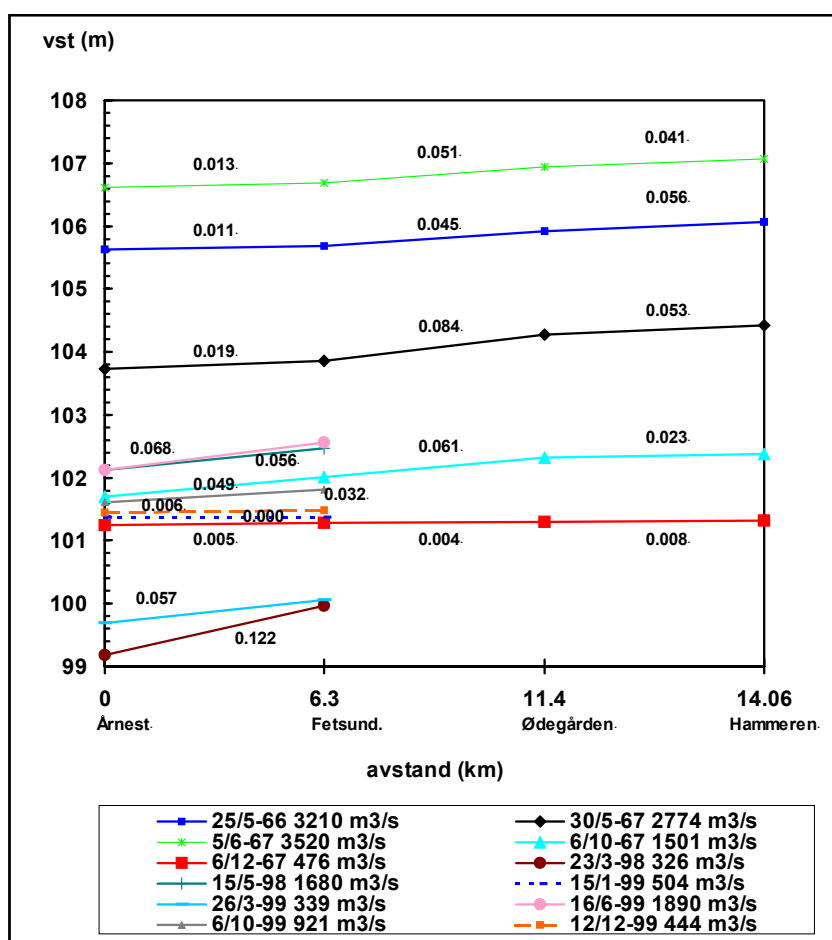


Fig. 4.3. Vannlinjer med gradienter i Glomma fra Årnestangen til Hammeren. Vannlinjene er basert på nivellementer av flomvannstander i 1966 og 1967, to situasjoner senere i 1967 og vannstandsregistreringer fra 1998 og 1999. (Data fra NVE 1968 og 2001).

vannmerke som ligger ved det gamle utløpet av Øyeren ca 25 km syd for Glommas utløp ved Årnestangen. Vindoppstuvning, seicher, og andre faktorer kan imidlertid påvirke vannstandsforholdene i Øyeren slik at Mørkfoss vannmerke ikke er fullt ut representativ for vannstanden i Nordre Øyeren.

På strekningen Årnestangen - Fetsund er det en tendens til lavere gradient når vannstanden nærmer seg 104 m. På denne høyden er det meste av deltaområdet i ferd med å settes under vann. Det er en høyere gradient på strekningen når vannstanden ligger omkring 102 m enn ved 104 m og høyere, selv med mindre vannføring. I en vannføringssituasjon på $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ (6/10-67) og vannstand 101.7 m, er det fall på vannlinjene helt ned til Årnestangen, se fig. 4.2. Den lavere gradienten ved vannstand på 104 m har sannsynligvis sammenheng med at deltaområdet oversvømmes ved ca. 103 m slik at vannmassene fordeles over større areal og ikke begrenses til elveløpene.

På strekningen fra Fetsund og videre opp til Ødegården er det imidlertid en markert økning i gradient for situasjoner med vannstand høyere enn 104 m. Dette gjelder spesielt situasjonen fra 30/5-67 med stigende vannføring. De høye sideskråningene på denne strekningen danner i større grad en begrensning for vannmassene i elveløpet sammenlignet med deltaområdet. Når øyene ikke er oversvømmet er det også en økning i gradient fra Fetsund og oppover som ved vannstand omkring 102 m, jfr fig. 4.3. Gradienten har under denne situasjonen vært jevnt stigende helt nede fra Årnestangen. En sterk endring av gradient kan iakttas når deltaområdet oversvømmes.

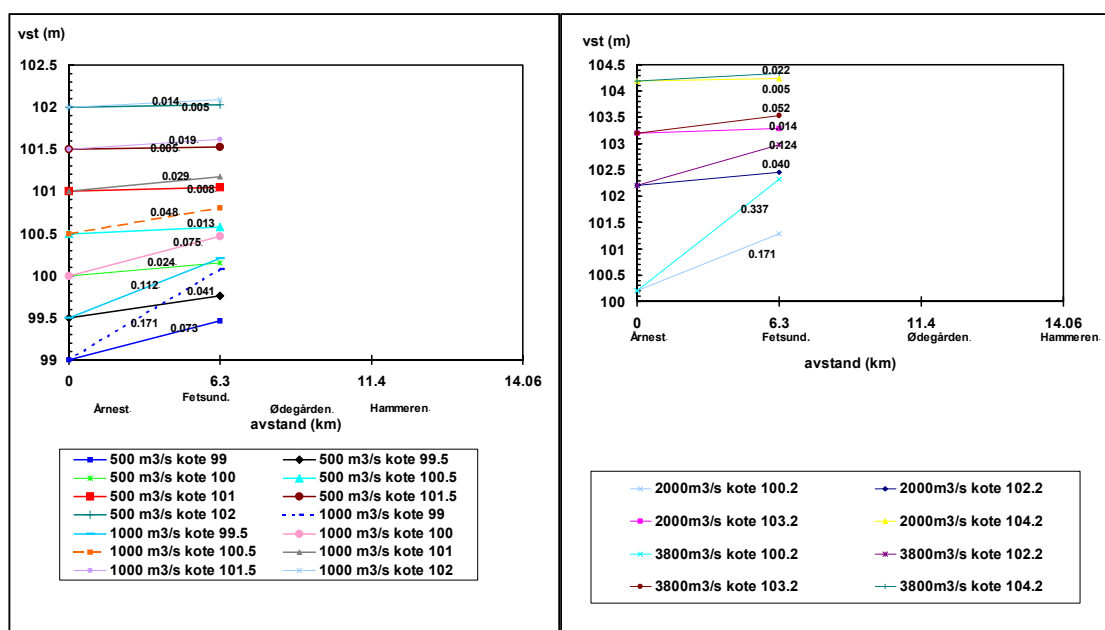


Fig. 4.4 a, b. Beregnede vannlinjer med gradienter i Glomma fra Årnestangen til Fetsund for vannføringer på (a) $500 \text{ m}^3/\text{s}$, $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ og (b) $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, $3800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Basert på data fra 1998 og 1999 ved vannstander i intervallet 101 m til 102 m er det betraktet situasjoner hvor gradienten varierer fra 0 til 0.068 m/km på strekningen Årnestangen-Fetsund. De laveste gradientene ble observert under situasjoner med vannføringer omkring 500 m³/s. Ved vannføringer mellom 1000 m³/s og 1500 m³/s kan det observeres en markert økning i gradienten (0.032 m/km til 0.056 m/km). Ved en vannføring på 1890 m³/s ble det observert en gradient på 0.068 m/km. Ved vannstander på 99.2 m og 99.6 m ble det imidlertid observert langt høyere gradienter på lavere vannføringer, 0.057 m/km ved 339 m³/s og 0.122 m/km ved 326 m³/s. Dette betyr at det kan være en relativt høy gradient i deltaområdet selv på lave vannføringer. Først ved vannstander på omkring 101.5 m ser det ut til at gradienten reduseres til et minimum ved vannføringer på rundt 500 m³/s. Nesten alle eksemplene fra 1998 og 1999 har en høyere gradient enn det som ble beregnet under flomvannføringer i 1966 og 1967.

Tabell 4.1. Strømhastigheter (m/s) ved Fetsund og Fautøya beregnet ved ulike vannføringer i Glomma og senkning av vannstand i Øyeren med 0 m til 4 m fra 104.2 m.

Senkning av vannstand fra 104.2 m		0 m	1 m	2 m	3 m	4 m
3800 m ³ /s	Fetsund	1.11	1.28	1.41	1.54	1.62
	Fautøya	1.20	1.41	1.56	1.74	1.85
3500 m ³ /s	Fetsund	1.02	1.19	1.31	1.45	1.53
	Fautøya	1.10	1.30	1.47	1.64	1.74
2500 m ³ /s	Fetsund	0.75	0.87	1.01	1.12	1.24
	Fautøya	0.77	0.95	1.09	1.26	1.37
2000 m ³ /s	Fetsund	0.59	0.70	0.81	0.96	1.07
	Fautøya	0.66	0.77	0.88	1.04	1.18
1500 m ³ /s	Fetsund	0.45	0.49	0.63	0.75	0.88
	Fautøya	0.53	0.58	0.67	0.80	0.95

Ved hjelp av en hydraulisk simuleringsmodell (Danish Hydraulic Institute 1998) er det foretatt beregninger av strømhastighet og vannstandsgradienter i Glommas innløp i Øyeren. Den omlag 6 km lange strekningen Fetsund - Årnestangen ble profilert og oppdelt i 15 tverrprofiler. Modellen ble kjørt med stasjonære grensebetingelser, jevn vannstand og vannføring over en simuleringsperiode på 5 døgn.

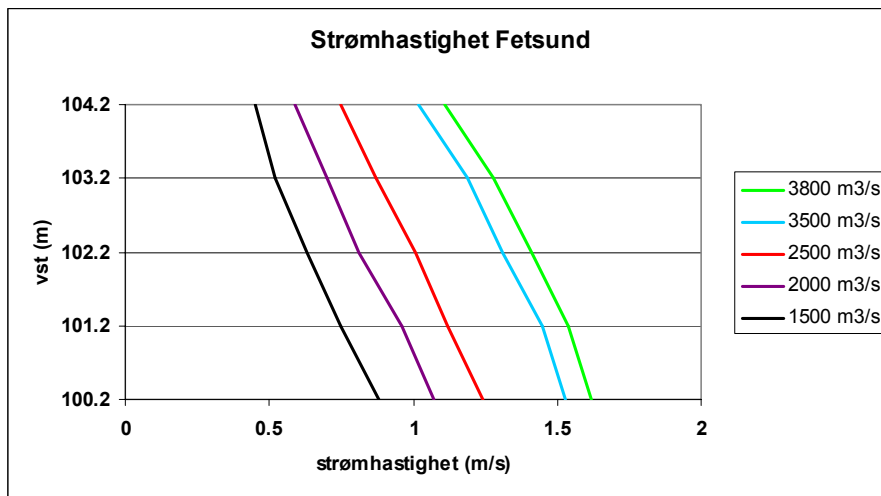


Fig. 4.5 a. Beregnede strømhastigheter (m/s) ved Fetsund ved noen utvalgte vannføringer i Glomma og vannstander i Øyeren.

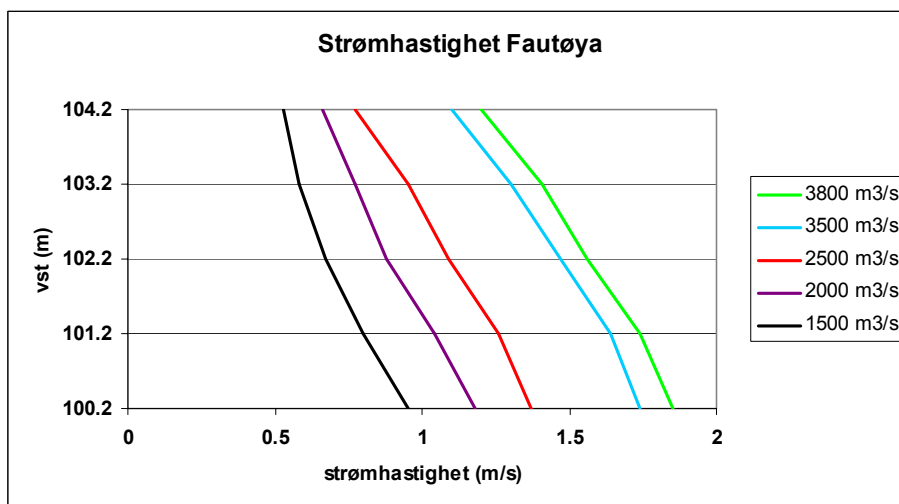


Fig. 4.5 b. Beregnede strømhastigheter (m/s) ved Fautøya ved noen utvalgte vannføringer i Glomma og vannstander i Øyeren.

Gradientene er beregnet for forskjellige senkningsnivå av Øyeren med ulike vannføringer i Glomma. Vannstandsgradientene er simulert for vannstandintervallet 99 m til 102 m med vannføringer på 500 m³/s og 1000 m³/s. Resultatene viser en markert reduksjon i gradienten mellom Årnestangen og Fetsund ved økende vannstand. Det er også en tydelig forskjell i gradienten på samme vannstand mellom vannføringer på 500 m³/s og 1000 m³/s. Modellsimuleringene viser den samme

utflatingen av gradienten med økt vannstand som kan sees ut fra observasjonene av gradienten på samme strekning, se fig. 4.3 og fig. 4.4 a. En ytterligere økning i vannføringen vil gi en økt gradient på de simulerte vannlinjene, se fig. 4.4 b.

Det ble også foretatt hastighetsberegninger i hvert tverrprofil med vannføringer på 3800 m³/s, 3500 m³/s, 2500 m³/s, 2000 m³/s og 1500 m³/s ved Fetsund for forskjellige senkningsalternativ/ vannstander i Øyeren. Utgangspunktet for beregningene er en vannstand i Øyeren på 104.2 m og deretter en senkning på 1 m (kote 103.2), 2 m (kote 102.2), 3 m (kote 101.2) og 4 m (kote 100.2). Med 0 senkning forstås vannstanden i Øyeren ved full tapping gjennom Solbergfossen under de forutsetninger som var under flommen i 1995. I tabell 4.1 og fig. 4.5 a, b er det angitt beregnede strømhastigheter på to steder i Glomma, ved Fetsund og Fautøya. Resultatene viser en økende strømhastighet ved økt senkning og at strømhastigheten er høyere i det smalere profilet ved Fautøya enn ved Fetsund. Vannføringer ved 2500 m³/s og 2000 m³/s gir høyere eller lik strømhastighet ved en vannstandssenkning på henholdsvis 3 m og 4 m sammenlignet med 3800 m³/s uten senkning.

Det er utført strømmålinger med ADCP- instrument på en rekke profiler mellom Fetsund og Årnestangen, se fig. 4.6. Instrumentet måler strømhastigheten ved hjelp av akustiske signaler. Målingene er utført i fire omganger ved forskjellig vannføringer og vannstander i Øyeren. Måleresultatene er benyttet til å beregne hvordan vannstrømmen fordeles gjennom deltaet.

Vannføringsmålinger fra fire situasjoner med ADCP er presentert i tabell 4.2. Fordelingen av vannføringen mellom løpene er relativt jevn under tre situasjoner ved normal sommervannstand, omkring HRV 101.34 m eller noe høyere. Vannføringen varierte mellom 728 m³/s og 1477 m³/s under målingene. Ved lave vannstander om våren avviker imidlertid fordelingen av vannstrømmen mellom løpene noe i forhold til de øvrige resultatene. Det er spesielt Storsandråka som ser ut til å få en større andel av vannstrømmen under de laveste vannstandene. Dette har sannsynligvis sammenheng med hvordan bankesystemene ved Flatsand / Midtbankeøya fordeler vannet på lav vannstand. Fordelingen av vannstrømmen basert på et middel av tre situasjoner med vannstander høyere enn 101.34 m er vist i fig 4.7. Tilførsel fra Nitelva og Leira er ikke medregnet i fordelingen.

Vannføringen i Nitelva og Leira har et annet regime enn i Glomma og prosentandelen av totalvannføringen i Glomma vil derfor variere gjennom året. I de målte tilfellene utgjør bidraget 1-2%. Under målingen i april var imidlertid andelen opp mot 14%. Dette har sammenheng med snøsmelting i lavereliggende områder på Østlandet, slik at det spesifikke avløpet i de mindre nedbørfeltene er større enn i Glomma.

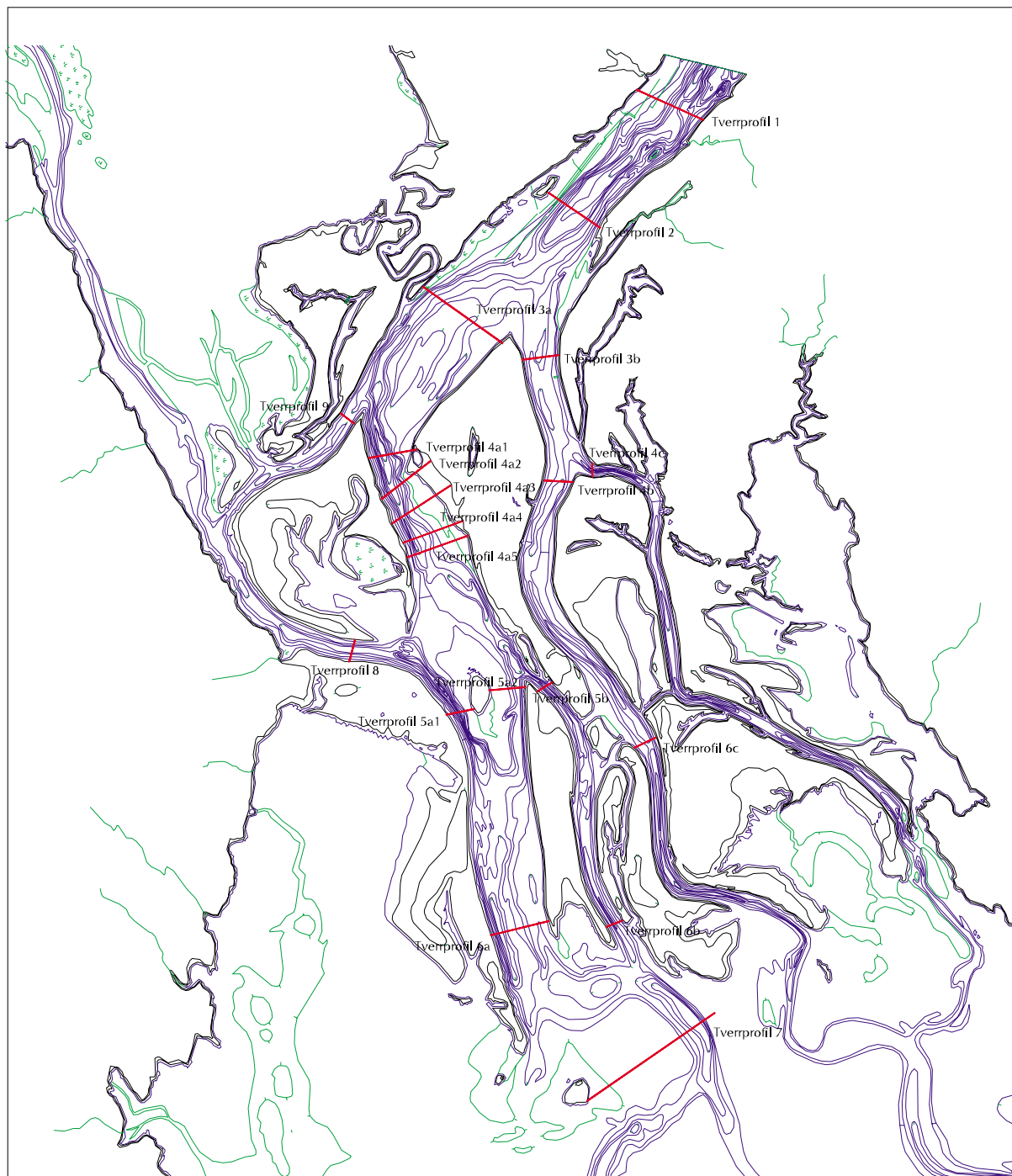


Fig. 4.6. Dybdekart med inntegnede profiler av strømmålinger med ADCP (grunnlagskart 1985).

Morfologien til elveløpene på deltaet er over lange tidsrom tilpasset vannføringen i de forskjellige løpene. Hvis fordelingen mellom de forskjellige løpene endres, så vil det oppstå erosjon eller sedimentasjon og en tilpasning til de nye forholdene. Erosjon langs elvebreddene kan føre til sideveis forflytning av løpene og over tid føre til endringer i fordelingen av vannføringen med en ny tilpasning som resultat. Endringer i erosjonsforholdene kan derfor initieres av rent naturlige årsaker.

Tabell 4.2. *Vannføring og vannstand i Glomma ved Fetsund og prosentvis fordeling av vannføringen mellom løpene i deltaet.*

	<i>Fetsund (Q) / (h)</i>	<i>Storråka</i>	<i>Storsandråka</i>	<i>Sniksandråka</i>	<i>Kusandråka</i>
21.10.96	728 m³/s 101.38 m	52%	18%	22%	7%
24.06.97	1477 m³/s 101.49 m	54%	17%	22%	7%
09.07.97	1082 m³/s 101.97 m	57%	17%	20%	6%
01.04.98	434 m³/s 99.89 m	48%	23%	24%	5%

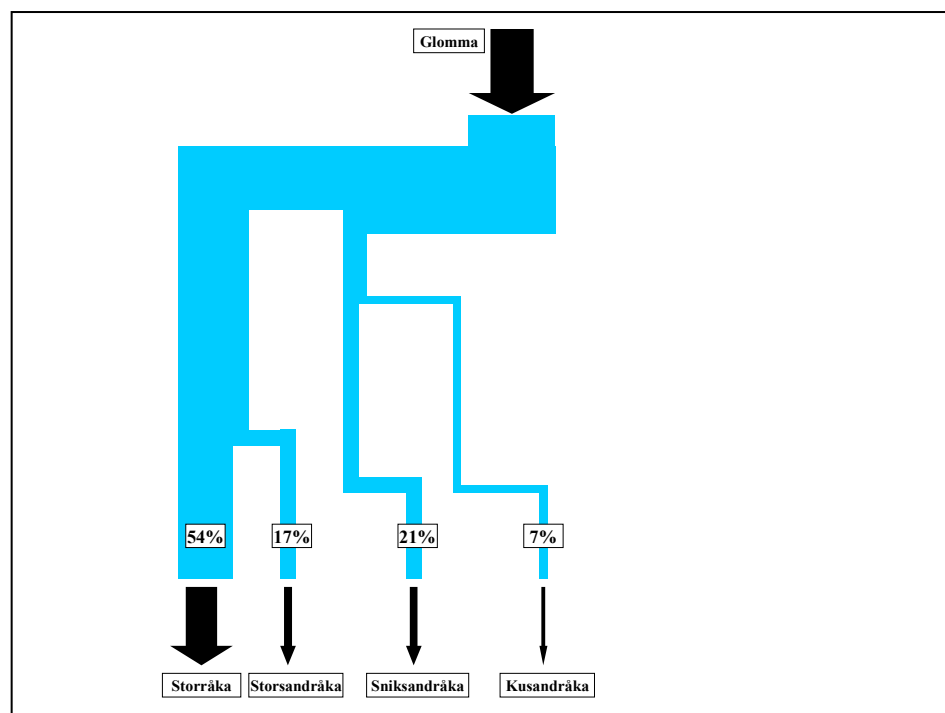


Fig. 4.7. Fordelingen av vannstrømmen i deltaet basert på et middel av tre situasjoner med vannstander høyere enn 101.34 m.

5. Lateral erosjon i elveløpene

Ved lateral erosjon (sideveis erosjon) i elveløpene undergraves bankene slik at løpene forflyttes sidelengs. Tre prosesser har avgjørende innvirkning på erosjonen av elvebreddene langs løpene i deltaet. Det er grunnvannserosjon, frostpåvirkning av materialet langs elvebredden og det strømmende elvevannets skjærpåvirkning og erosjon.

Grunnvannserosjon med skred og utglidninger kan oppstå som følge av raske endringer i vannstanden. Under en rask nedtapping av vannstanden vil det dannes et overtrykk i sedimentene langs kanten av bratte skråninger, fordi trykket ikke blir kompensert av et tilsvarende mottrykk fra vannet i magasinet, se fig. 5.1. Dette overtrykket reduserer skjærfastheten i skråningen og forårsaker små utglidninger ytterst i skråningen. Den høye hastigheten på grunnvannet ut mot skråningsoverflaten kan også medvirke til å fjerne finstoff eller rive løs enkeltkorn fra massene. For ensgraderte sedimenter kan dette resultere i dannelsen av små raviner, deretter utskalkinger, og til slutt redusert stabilitet med større utglidninger. Forskjellige løsmassetyper har varierende egenskaper som er avgjørende for bevegelse av grunnvann og markvann. Dette kan uttrykkes som hydraulisk konduktivitet. Hydraulisk konduktivitet (k) er også avhengig av trykkforhold og viskositet.

$$(2) \quad k = \kappa \frac{\rho g}{\mu} [m/s]$$

Hvor ρ er vannets tetthet, g er tyngdens akselerasjon, μ er dynamisk viskositet og κ er permeabilitet.

Hydraulisk konduktivitet er også avhengig av porerommets størrelse som er betinget av kornstørrelsen. Grove kornstørrelser har høy hydraulisk konduktivitet, mens den avtar i finpartikulært materiale. I sand vil grunnvannsgradienten som forårsakes av en vannstandssenkning utjevnes forholdsvis raskt. Gradienten vil derfor være størst i løsmasser med lav hydraulisk konduktivitet.

I leire er imidlertid de kohesive kreftene så store at det kompenserer for overtrykket som skapes av hurtige vannstandssenkninger. Morener består ofte av usortert materiale med høy pakningsgrad og har derfor svært lav hydraulisk konduktivitet. Glasifluviale sedimenter består av sortert materiale med mye sand og høy hydraulisk konduktivitet. Delta og elvesletter som er avsatt i tiden etter siste istid er forholdsvis løst konsolidert. De har derfor en høyere hydraulisk konduktivitet enn morene og er ofte svært utsatt for denne typen erosjonsprosesser. Vegetasjon og undertrykk i den umettede sonen vil imidlertid kunne øke stabiliteten og motvirke erosjon.

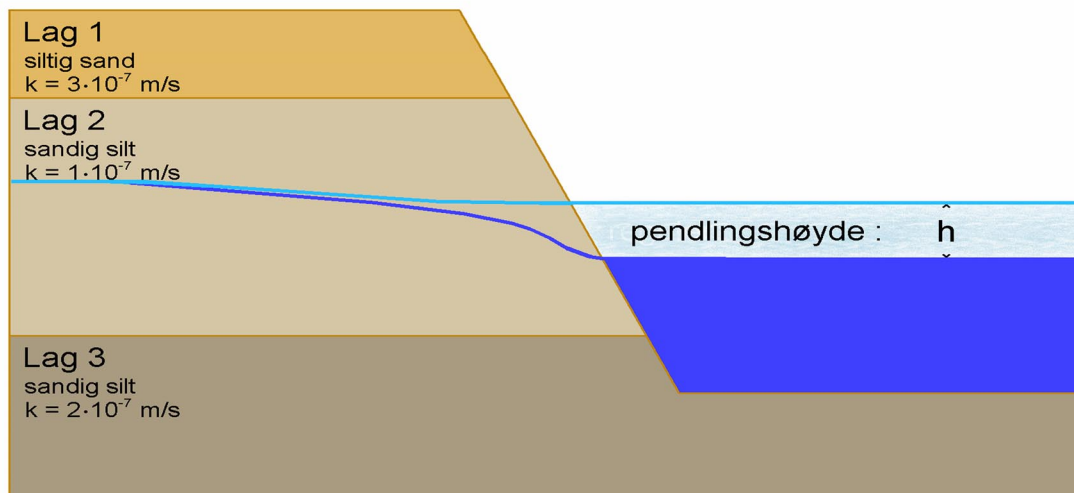


Fig. 5.1. Skisse av en skråning hvor det oppstår en bratt grunnvannsgradient på grunn av rask nedtapping av magasinet. Skråningen har flere lag med forskjellig hydraulisk konduktivitet.

Løvoll, Tuttle og Fritzvold (1999) har beregnet skråningsstabiliteten i elveskråningen ved Fautøya. Beregningene ga som resultat at en pendling på 0.6 m/uke ikke ville føre til erosjon med større utrasninger som følge av grunnvannserosjon alene. I forbindelse med senkningen av vannstanden etter flommen i juni 1995, skjedde det en utrasning ved erosjonskanten på Fautøya. Skredet som ble utløst 27. juni hadde et større volum enn de årlige utrasningene som er iaktatt i området, ca 3 m av kanten gled ut i 15 m lengde. Skredet ser ut til å ha falt ut i en roterende bevegelse langs et glideplan, se fig. 5.2. Instabiliteten som utløste skredet har sannsynligvis sammenheng med den intense erosjonen av skråningsfoten som fant sted i forbindelse med flommen. Flommen kulminerte på 104.39 m. Elvebredden i dette området var derfor helt oversvømmet da vannstanden begynte å synke. Et forhøyd porevannstrykk har derfor bidratt til utglidningen sammen med elvevannets undergraving.

Frostens bearbeiding av jorda ved fryse og tine-prosesser kan ha betydelig innvirkning på elveslettet materialets stabilitet og motstandsdyktighet mot fluvial erosjon. Flomsedimentene som elveslettene er bygget opp av, består av siltige kornstørrelser som lett påvirkes av frost. Når markvannet i jorda fryser, suges det vann inn mot tilfrysingsområdene. Det dannes da islinser som ødelegger strukturen i jorda og bidrar til at den indre friksjonen mellom jordpartiklene blir redusert.

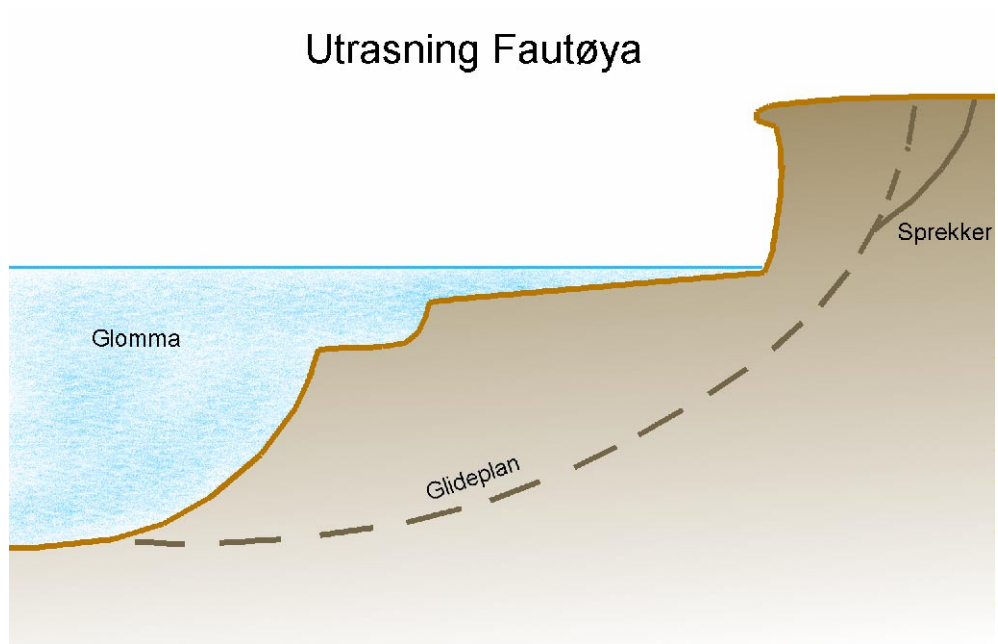


Fig. 5.2. Foto av skredet ved høy sommervannstand 27. juni 1995. Skredet gikk i etterkant av flommen i juni samme år. Skisse av glideplanet for skredet ved Fautøya.



Fig. 5.3. Elveerosjon og frostprosesser ved Årnestangen. Oppbløtt materiale fra frostprosesser flyter ned elvebredden, vannstand kote 99.2. Foto 13. april 1995.

Når telen går om våren, kan jorda være overmettet med vann i de områdene frosten har trengt ned. Skjærstyrken i jorda blir da betydelig redusert og selv påvirkningen fra en moderat vannstandsøkning kan føre til utrasninger. I noen tilfelle er materialet så oppbløtt at det flyter ned elvebredden som en "mudflow", se fig. 5.3. Frostens virkninger fører dermed til at skjærpåvirkningene lettere kan føre til omfattende erosjon. Det er imidlertid et samspill mellom de forskjellige prosessene. Utraste masser blir som oftest liggende foran elveskråningene til det fraktes vekk av den fluviale erosjonen. Dette skjer vanligvis i løpet av den påfølgende vårflommen. Hvis ikke materialet hele tiden fraktes vekk fordi strømforholdene endres, vil ikke frosten trenge inn til nye områder. Utstrakt erosjon av elvebreddene foregår derfor i områder hvor elvebreddene er eksponert for sterke skjærkrefter fra ellevannet, dvs. der hvor elveløpet krummer eller der hvor strømhastigheten styres inn mot elvebredden av andre årsaker. Frostens betydning for intensiteten i erosjonsprosessene medfører at tilgangen på materiale vil være årstidsavhengig. En flom tidlig om våren vil få langt mer tilgang på materiale enn en tilsvarende høstflom.

Hvis nedtappingen av Øyeren starter i desember blir større deler av skråningene langs elvebreddene eksponert for frost i en lengere periode enn hvis nedtappingen starter i mars. Om vinteren kan da 0° - isoterme trenge lenger inn i massene og utsette større deler for frostbevegelse og dannelse av islinser. Når telen går ut av jorda om våren, vil større områder bli oppbløtt og kan dermed lettere eroderes av ellevannet. Høy

vannstand helt frem til mars, vil imidlertid bety at omfanget av frostpåvirkning blir mindre. Dette fører sannsynligvis til at erosjonsintensiteten langs elvestrekninger med bratte siltige skråninger også blir mindre.

Ved Årnestangen har reduksjonen av elveløpets fall ført til sedimentasjon. Dette fører til at tverrprofilets areal avtar. Elveløpenes tverrprofiler er imidlertid tilpasset vannføringen ved breddfull vannstand. En slik situasjon vil inntreffe fra ca 101.5 m i de nedre deler av deltasletten. Når materialet begynner å sedimentere i elveløpet på grunn av endringer i lengdeprofilet, vil vannmassene erodere i elvebreddene for å opprettholde det samme tverrsnittsareal, fig. 5.4. Elvevannet setter opp skjærkrefter langs kantene og undergraver breddene. Skjærspenningen, dvs skjærkraften pr. flateenhet kan uttrykkes som:

$$(3) \quad \tau = \gamma_w RS$$

Der τ er midlere skjærspenningen langs grenseflaten i N m^2 , γ er tettheten av vann, R hydraulisk radius (m) og S er gradient. Den kritiske skjærspenningen er den kraften som er nødvendig for å sette materiale i bevegelse. Den kan beregnes ved hjelp av Shields diagram når strømhastighet, partikkel-størrelse og vannets viskositet er kjent, (Simons og Li 1982). Erosjonen vil være ekstra stor der hvor elvebredden danner en vinkel med hovedstrømsretningen slik at strømmen får en komponent som er rettet inn mot elvebredden. Erosjonsmateriale som er tilført fra frostprosesser og som faller ned foran skråningsfoten på lav vannstand, vil også føres vekk av de strømmende vannmassene. Omfanget av den tilbakeskridende erosjonen er avhengig av at dette materialet føres videre.

Naturlig vannstandsvariasjon i Øyeren før 1860 var betydelig større enn under dagens forhold. Vannstanden sank jevnt utover sommeren og høsten. Allerede i månedsskiftet juli/ august lå middelvannstanden for perioden 1852 til 1861 under dagens HRV på 101.34 m. Når frosten setter inn i november/ desember, lå vannstanden opptil flere meter lavere enn under dagens nivå. Grunnvannet kunne i løpet av denne perioden senkes så mye at det totale vanninnholdet i løsmassene ble lavere enn under dagens forhold på slutten av året. Ved dagens jevne vannstand fra mai til januar, vil grunnvannsnivået i løsmassene på deltasletten få kontinuerlig tilførsel i form av infiltrasjon fra elveløpene og innstilles mot dette nivået. Selvmating fra nedbør vil i tillegg sørge for at grunnvannsnivået blir høyere på slutten av året enn før reguleringene. Dette medfører en større tilgang på vann som kan trekkes mot frostsonen, slik at dannelse av islinser under frostpåvirkning blir langt mer effektiv (Sætersdal 1976). Når isen smelter om våren og elvebreddene utsettes for skjærkrefter fra det strømmende vannet, er det sannsynlig at erosjonen blir mer omfattende enn den var under naturlige forhold. Elvebreddene kan derfor ha vært mindre utsatt for erosjon i forbindelse med vannstandshevning om våren i uregulert tilstand. Det er derfor sannsynlig at utforming av erosjonsplattformer langs elveløpet er et resultat av reguleringene.

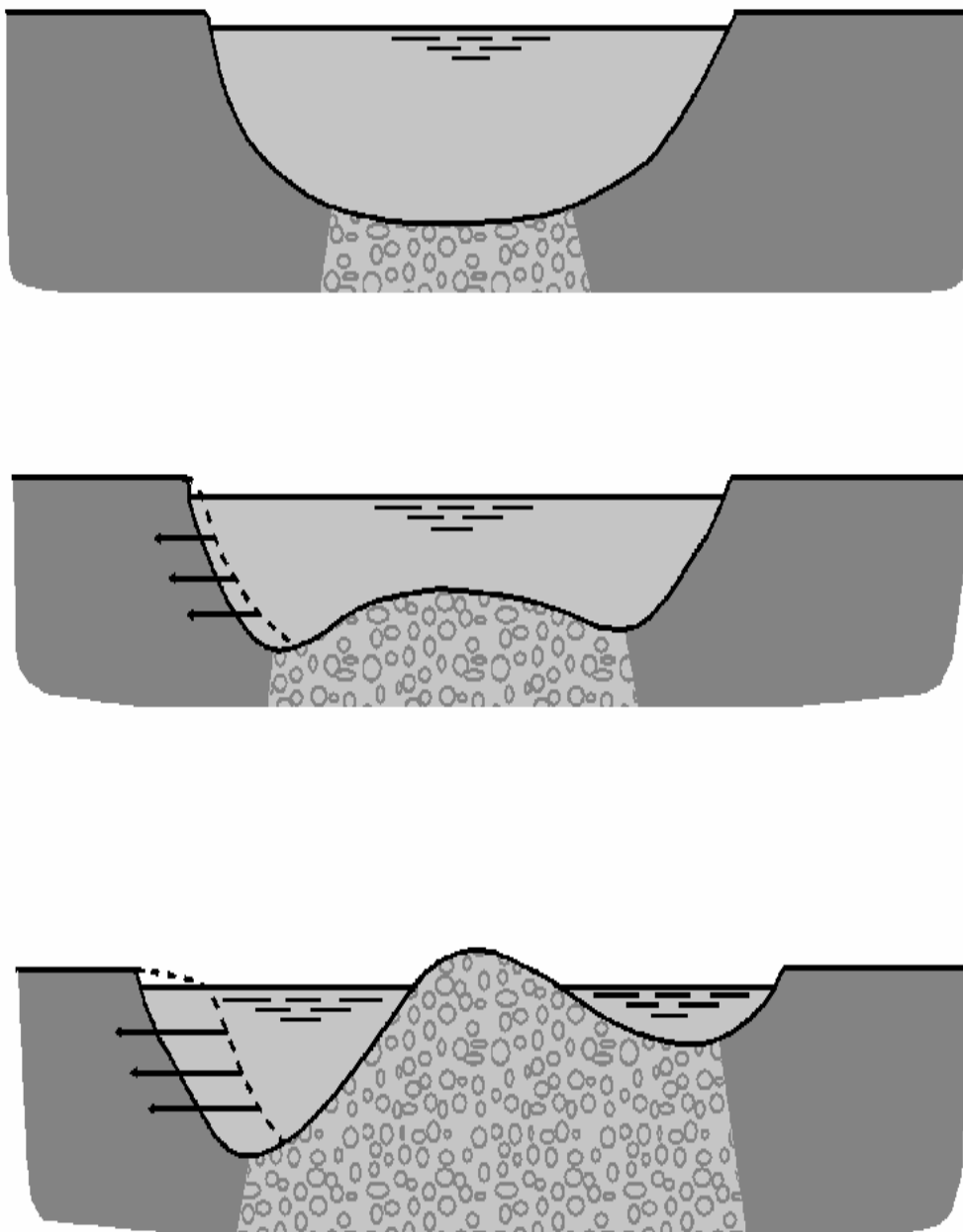


Fig. 5.4. Elveløpets tverrprofil er tilpasset vannføringen. Sedimentasjon i elveløpet fører til sideveis erosjon.

Ved Fautøya og Årnestangen er det dannet erosjonsplattformer i to nivå, fig. 5.5 og 5.6. Det øverste nivået er utviklet i tilknytning til sommervannstanden i Øyeren på 101.34 m. En framherskende vannstand gjennom sommersesongen har konsentrert erosjonsprosessene på et nivå, slik at det er etablert en markert strandsone i dette nivået. På denne måten er det etablert plattformer som er resultatet av at det har pågått en kraftig tilbakeskridende erosjon i vannkanten. Ved senkning av vannstanden i vintersesongen er det etablert en noe mindre erosjonskant ved ytterkanten på plattformen som er dannet ved sommervannstand. Før reguleringene ble

belastningene på strandsonen fordelt over flere nivå. Det ble sannsynligvis ikke danner plattformer av samme type under slike forhold. Pedersen (1994) antok at plattformene er dannet ved en kombinasjon av bølge og elveerosjon. Karter fra 1824, 1860 og 1985 viser at det har vært en tilbakeskridende erosjon på østsiden av Fautøya på mellom 4 m og 7 m som et maksimum i denne perioden. Pedersen (1981, 1994) estimerte at den tilbakeskridende erosjonen i dette området varier fra 0.5 m og opp mot 5-6 m. Registreringer på 1990 tallet viser en noe lavere erosjonshastighet enn dette. Det er mulig at erosjonshastigheten har avtatt, men det kan være store variasjoner fra år til år.

Pedersen (1994) og Gjerde (1998) angir den totale lengden av aktiv erosjon langs løpene og øyene til å være ca 10 km. På de ulike lokalitetene er det forskjellige erosjonsprosesser eller kombinasjoner av disse som dominerer. På sørsiden av deltasletten er det vesentlig bølgerosjon. I elveløpene er det løpserosjon i kombinasjon med frostpåvirkning og grunnvannserosjon som utgjør de viktigste prosessene. På vindutsatte lokaliteter langs løpene kan det også være en kombinasjon med omfattende bølgeerosjon.



Fig. 5.5. Erosjonskanten ved Fautøya på lav vannstand 6. april 1995. den smale erosjonsplattformen ut mot elva er dannet ved vintervannstand, mens den brede plattformen representerer erosjon på sommervannstand.



Fig. 5.6. Erosjonskanten ved Årnestangen på lav vannstand 6. april 1995.
Erosjonsplattformen som er dannet ved sommervannstand er smalere enn ved Fautøya og kanten blir derfor brattere.

6. Sedimentasjon på deltasletten og deltaplattformen

Deltasletten er den subaerile delen av deltaet som bygges opp ved sedimentasjon under flom. Deltaplattformen er de grunne arealene med mudderbanker nedstrøms for deltasletten som strekker seg ned til deltaskråningen og dypbassenget i Øyeren, se fig. 9.2. Det er sannsynlig at de store trekk i deltaets morfologi er utviklet under naturforhold i postglasial tid. Deltaets storformer er utviklet ved erosjon og sedimentasjon over lange tidsrom. Reguleringene har ført imidlertid til betydelige endringer i løpet av de siste 100 år. De opprinnelige avsetningene danner derfor et utgangspunkt for de senere reguleringene.

Vannstandsvariasjonen i Øyeren var betydelig større under naturlige forhold enn under dagens regime. I perioden 1852 til 1861 var det i middel en årlig variasjon på ca 8 m. I dag er den årlige vannstandsvariasjonen redusert til omkring 2-3 m. Det er den store vannstandsvariasjonen under naturlige forhold som har satt sitt preg på deltaets utforming i Øyeren.

Et delta i en innsjø uten store vannstandsvariasjoner utvikles ved at det bunntransporterte materiale føres frem til deltafronten hvor det sedimenteres. Det suspenderte materialet avsettes som bunnlag i det nedenforliggende dypbassenget. Under flom sedimenteres det også suspensjonsmateriale på deltasletten. En stor sesongmessig vannstandsvariasjon fører imidlertid til at sedimentasjonsområdene stadig forflyttes. Materiale som avsettes i elveløpene under høy vannstand vil videretransporteres når vannstanden synker. I Øyerendeltaet ble deler av det bunntransporterte materialet sannsynligvis ført helt fram til deltafronten når vannstanden var lav. Den store deltaplattformen i Øyeren er derfor et resultat av sedimentasjonsforløpet under store vannstandsvariasjoner. Elveløpene i det naturlige deltaet var sannsynligvis brede og grunne og hadde forgrenede bankesystemer. En rekonstruksjon av deltaet under naturforhold er vist i fig. 6.1.

Reguleringene innførte en ny syklus i deltaets utvikling. Innsnevringen av de sesongmessige vannstandsvariasjonene førte til at bunntransporten ikke lenger ble ført frem til deltafronten, men pålagres lenger opp på plattformen. Materialet sedimenteres dermed over et mindre område enn tidligere, slik at deltaet bygges raskere opp til det subaerile nivået. Deltaet vokser nå fremover i et grunt område over plattformen og deltasletten bygges ut raskere enn under naturtilstanden.

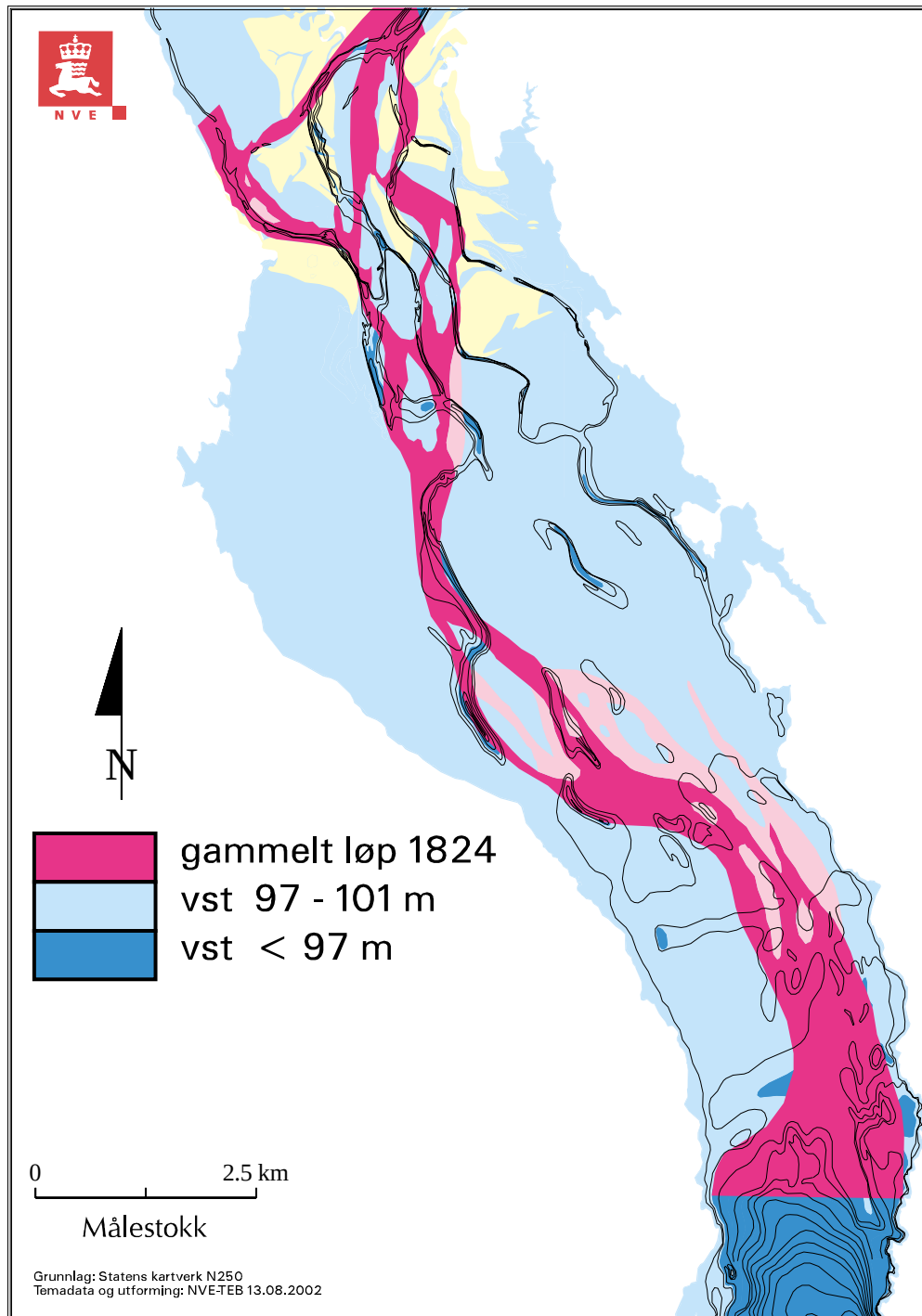


Fig. 6.1. Rekonstruksjon av deltaet under naturforhold.

Deltasletten gjennomskjæres av aktive og oppgitte elveløp som etter hvert blir gjenfylt av sedimenter. De mange viker og laguner er et markert trekk ved deltasletten under dagens forhold. Laguner dannes i deltaområder som vokser raskt fremover i grunne sedimentasjonsbasseng med moderate vannstandsendringer. De dannes ved at leveeområdene langs aktive elveløp bygges raskere fram enn de mellomliggende arealene. Gamle kart fra 1800 tallet viser at laguner ikke var noe fremtredende trekk ved deltaet i naturtilstanden. Mer moderate vannstandsvariasjoner etter at

reguleringene ble innført synes dermed å ha medført gunstige forhold for dannelse av viker og laguner.

Deltasletten bygges opp ved at materiale sedimenteres under flommer. Etterhvert som hyppigheten av høye flomvannstander avtok som følge av reguleringene, har sedimentasjonen og oppbygningen av de høyeste områdene avtatt. Dette har ført til at øyene ikke lenger bygges opp i høyden i samme grad som tidligere. En vertikal oppbygning av deltasletten pågår fremdeles, men er forskjøvet til et lavere nivå. Dette har sammenheng med at reguleringene har senket nivået for den årlige maksimalvannstanden. Som følge av lengre perioder med jevn vannstand, oversvømmes de distale deler av deltasletten over et lengere tidsrom enn tidligere. En kunstig høyere sommervannstand som følge av regulering, fører til et høyere basisnivå for økning av vannstanden i perioder med stor tilsig til Øyeren.

Selv under høy vannstand når hele deltasletten er oversvømmet, vil hovedstrømmen i stor grad følge elveløpene og strømhastigheten avtar raskt fra elveløpet og innover deltasletten. Det sedimenteres derfor mest materiale langs elvebredden, hvor leveene dannes. Vegetasjonen bidrar også til at strømhastigheten avtar. Flomsedimentene består hovedsakelig av de groveste fraksjonene i det suspensjonstransporterte materialet.

Etter flommen i 1995 ble sedimentasjonen av flomsedimenter på deltasletten målt opp. Resultatet er vist i fig. 6.2. Akkumulasjonskartet viser til en viss grad hvordan strømningsmønstret over deltasletten varierte under flommen. De største materialmengdene ble akkumulert langs sideløpene, spesielt i den østre og nedre deler av deltasletten, se fig 6.3. Sedimentasjonsraten ligger her mellom 20 og 30 cm, men avtar raskt med økende avstand fra elvebredden. Kantvegetasjonen spiller også en viktig rolle ved å bremse strømhastigheten. Et luftfotografi av deltaområdet under flommen viser at hele deltasletten er satt under vann. Det er bare toppen av vegetasjonen som er synlig, se fig. 6.4. Langs innersvingen av Glommas hovedløp ved Jushaugsand, ble det avsatt betydelige mengder materiale. Stedvis kan det dreie seg om mektigheter på omkring 1 m. Sedimentasjonen på Midtbankeøya/ Flatsand var også stor. Mesteparten av sedimentene i dette området er antagelig bunntransportert materiale som har blitt avlagret på øya ved overstrømming. Flere større sanddyner, er typiske bunntransportformer, se fig. 6.5.

Etter at vannstanden gikk ned etter flommen ble det flere steder observert at overstrømmingen hadde vært omfattende. Dette gjelder spesielt Årnestangen, Fautøya, Midtbanken/ Flatsand og Kusand, men både på Storsand og flere andre steder var det spor etter høy strømhastighet. I området på innersiden av erosjonskanten på Årnestangen er det akkumulert påfallende lite flomsedimenter med sedimentasjonsrater mindre enn 5 cm i løpet av flommen. Dette er også tilfelle bak erosjonskanten på Fautøya, men avsetningene er stedvis tykkere i dette området. Strømhastigheten har her vært så stor at materialet har blitt ført videre i suspensjon. Høy sedimentasjon øverst i Kusandråka førte sannsynligvis til en gjenfylling i deler av løpet. Deler av hovedstrømmen har tatt veien rett over Kusand. Den høye strømhastigheten førte imidlertid til at det ble avsatt svært lite sedimenter. Da

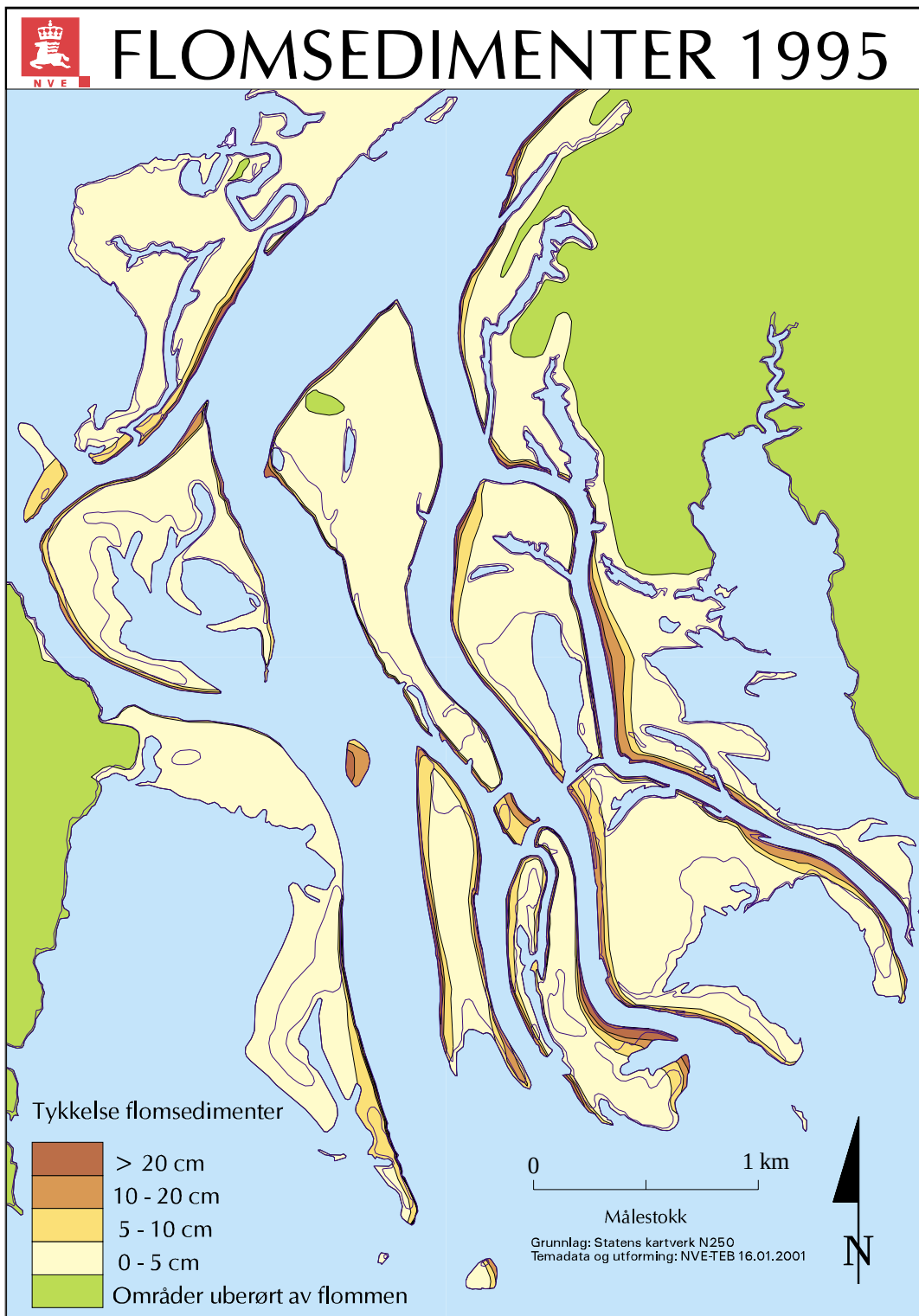


Fig. 6.2. Flomsedimenter avsatt på deltasletten under flommen i juni 1995.

vannstanden sank etter flommen, ble bankeavsetningene i Kusandråka utsatt for kraftig erosjon og gjennomskjæring. Volumberegninger av flomsedimentene i fig. 6.2 ga som resultat en akkumulasjon på ca 400 000 tonn på deltasletten i løpet av flommen, se kart i fig. 6.2. Dette er noe over halvparten av suspensjonsmaterialet som ble målt ved Bingsfoss under flommen i 1995. I 2000 var transporten ved Bingsfoss langt større, men langt lavere vannstander (maksimum 102.5 m ved Fetsund bru) medførte at det meste av dette materialet ble ført videre ut på plattformen. Flomsedimentene består hovedsakelig av suspensjonsmateriale, se kornfordelingskurver i fig. 7.7.

Hvis forholdene ligger til rette for at bunntransporten føres opp på deltasletten kan sedimentasjonen bli stor, samtidig som kornstørrelsene er grove. Når elveløpene er dype vil imidlertid svært lite bunntransportert materiale føres opp på leveene. Dette er sannsynligvis også en årsak til at det var liten sedimentasjon både på Årnestangen og deler av Fautøya hvor elveløpet er svært dypt.

Laguner og bakevjer vil etterhvert fylles av finfordelte sedimenter. Denne prosessen går sakte fordi sedimentasjonsveiene fra hovedløpet og inn i lagunene er lang, slik at materialet sedimenterer i områder utenfor. Under situasjoner med overstrømning, kan materiale føres direkte inn i lagunene. Under slike situasjoner kan lagunene fylles opp raskere. Overstrømning i tilknytning til høy vannstand synes imidlertid å forekomme relativt sjelden under nåværende vannstandsregime.

Samtidig som deltaet bygges opp i vertikalretning, vil elveløpenes sideveis erosjon føre til en stadig utskiftning av materialet i øyene. Sideveis erosjon undergraver bankene i yttersvingene, samtidig som det pålagres materiale i innersvingene. Elveløpene forflyttes på denne måten sidelengs over deltasletten. Denne prosessen går sakte, men materialet i topplaget over hele deltaet kan skiftes ut i løpet av en forholdsvis kort tid sett i geologisk perspektiv. Dette innebærer at alt materialet i den subaerile delen av deltaet etter hvert blir skiftet ut. Dateringer fra andre elvesletter viser alder på fra 200 til 1400 år (Bølviken m.fl. 1993). Det er sannsynlig at den laterale erosjonen i Øyeren deltaet fører til en total utskiftning av materialet på deltasletten innenfor en tilsvarende periode.

På grunn av utbedringer ved Solbergfoss etter flommen i 1967, var flomkulminasjonen i 1995 ca 2 m lavere med en noe høyere vannføring. Oppmålinger av flomsedimenter etter flommen i 1995 viste at de østligste og nederste deler av deltasletten har de tykkeste avsetningene. Høyere vannstander i Øyeren under tidligere flommer førte sannsynligvis til at hovedområdet for sedimentasjon lå lenger opp i deltaet. Det høyeste nivået på deltasletten (ca 106 m) ligger på den øverste delen av Gjushausand i den øvre delen av deltaet. I følge gamle karter er denne delen av deltaet i sin nåværende form dannet etter 1825. De østligste deler av deltasletten og spesielt Rosholmen har ikke gjennomgått like store forandringer siden 1825. Det høyeste punktet på disse øyene er imidlertid fra 1 til 2 m lavere. Dette kan tyde på at hovedområdet for sedimentasjonen av flomsedimenter under høy vannstand før flomsenkningstiltakene lå lenger opp i deltaet.



Fig. 6.3. Flomsedimenter avsatt på deltasletten under flommen i juni 1995.



Fig. 6.4. Skråbilde fra fly av deltaet i Nordre Øyeren fra øst den 6. juni 1995. Vannstand på kote 104.35 Deltasletten er helt oversvømmet. Det er bare toppen av vegetasjonen som er synlig. Foto: J. Bogen og T. E. Bønsnes.



Fig. 6.5. Sanddyner akkumulert fra bunntransport under overstrømming i tilknytning til flommen i juni 1995. Foto 27. juni 1995.

7. Kornfordeling på sedimentene i forskjellige deler av deltaet

Sedimentpartiklenes kornfordeling er en viktig parameter for erosjon og sedimentasjonsprosessene i deltaet. Sedimentene som tilføres fra elvene er sammensatt av suspendert- og bunntransportert materiale. Suspensjonsmaterialet består av finfordelte partikler som svever i vannmassene, mens det bunntransporterte materiale er sammensatt av sandfraksjoner og grovere partikler som ruller i kontakt med bunnen. Materialet fra disse transportprosessene avsettes på ulike steder i deltaet. Det bunntransporterte materialet sedimenterer der strømhastigheten avtar i elveløpene eller på munningsbankene. Suspensjonsmaterialet sedimenterer på deltasletten, i bakevjene, på plattformen og i dypbassenget, men i mindre grad i selve elveløpet. Partikler som er mindre enn 0.18 mm vil bare transporteres i suspensjon. Større partikler ruller i kontakt med bunnen som bunntransport, men partikler i intervallet 0.18 - 0.5 mm kan transporteres både som bunntransport og suspensjonstransport avhengig av strømmingstilstanden. Under lave vannføringer vil materialet rulle langs bunnen. Når strømhastigheten og turbulensgraden er høy, kan mer av materialet bringes opp i suspensjon og føres videre som svevestoff.

Suspensjonsmaterialet som tilføres fra Leira og Nitelva sedimenteres i liten grad på deltasletten eller i laguner og bakevjer i deltaet. De turbide vannmassene fra Nitelva og Leira berører bare de vestligste deler av deltaet etter samløpet med Glomma. Full innblanding inntreffer sjelden før på sørsiden av Rundsand, se fig. 7.1.

Det er oftest høyere konsentrasjoner av finpartikulært materiale i Leira enn ved Bingsfoss i Glomma. I 1999 ble det målt en maksimumkonsentrasjon ved Krokfoss på ca 1300 mg/l mens maksimumskonsentrasjonen ved Bingsfoss 160 mg/l, jfr fig. 8.15, 8.18 og 8.21. Dette er en av årsakene til at vannmassene i laguner og bakevjer i denne delen av deltaet har en lavere turbiditet enn områder som berøres av vanntilførselen fra Leira og Nitelva. Konsentrasjonen i vannmassene vil avta langs en utvalgt strekning (sedimentasjonsvei) i elveløpet med bredde B og dybde h som:

$$(4) \quad C_d(x) = C_d(0)e^{-\left(\frac{w_s \Phi(w_s) B \Delta x}{vh}\right)}$$

$C_d(0)$ er konsentrasjonen ved innløpet til den utvalgte strekningen. Relasjonen viser hvilke variable som innvirker på sedimentasjonsprosessen. Konsentrasjonen $C_d(x)$ faller eksponentielt med avstanden langs sedimentasjonsveien. Konsentrasjonen faller raskere for store partikler med store fallhastigheter w_s (sand), enn for små partikler med tilsvarende lave fallhastigheter (leire), v er strømhastigheten over den utvalgte strekningen. Når strømhastigheten reduseres, så faller også konsentrasjonen raskere. Turbulensens effekt på partikkelbevegelsen er uttrykt ved funksjonen Φ . Hvis turbulensgraden er høy vil partiklene holdes lenger i suspensjon.

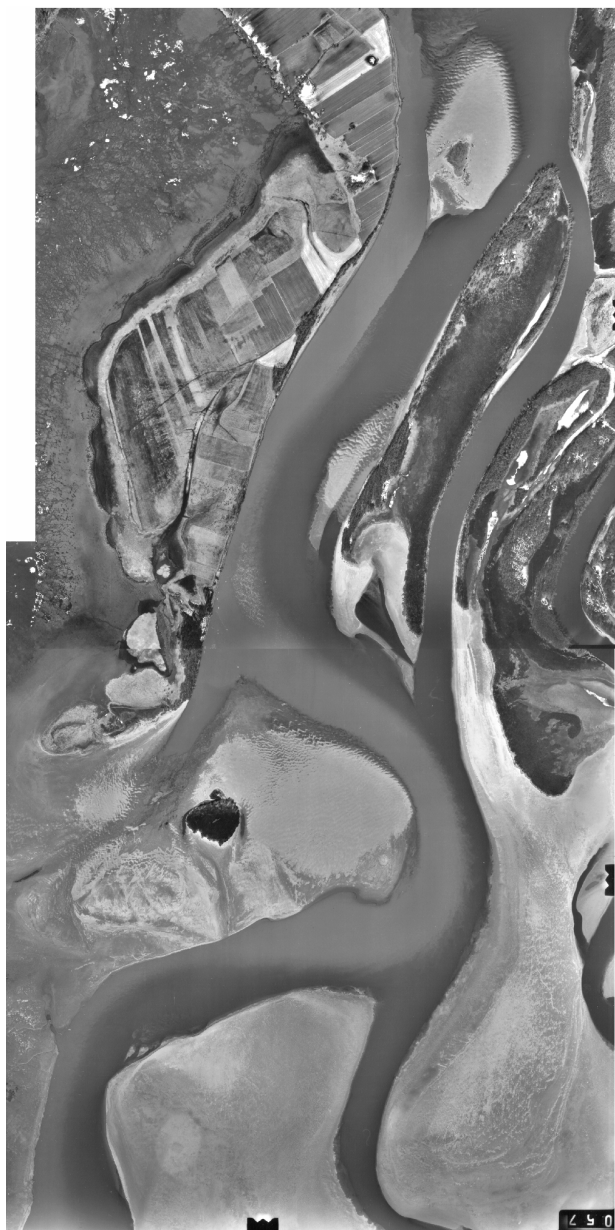


Fig. 7.1. Turbide vannmasser fra Nitelva og Leira berører bare de vestligste deler av deltaet etter samløpet med Glomma. Full innblanding inntreffer sjelden før på sørsiden av Rundsand. Foto: Fjellanger Widerøe 13. april 1995.

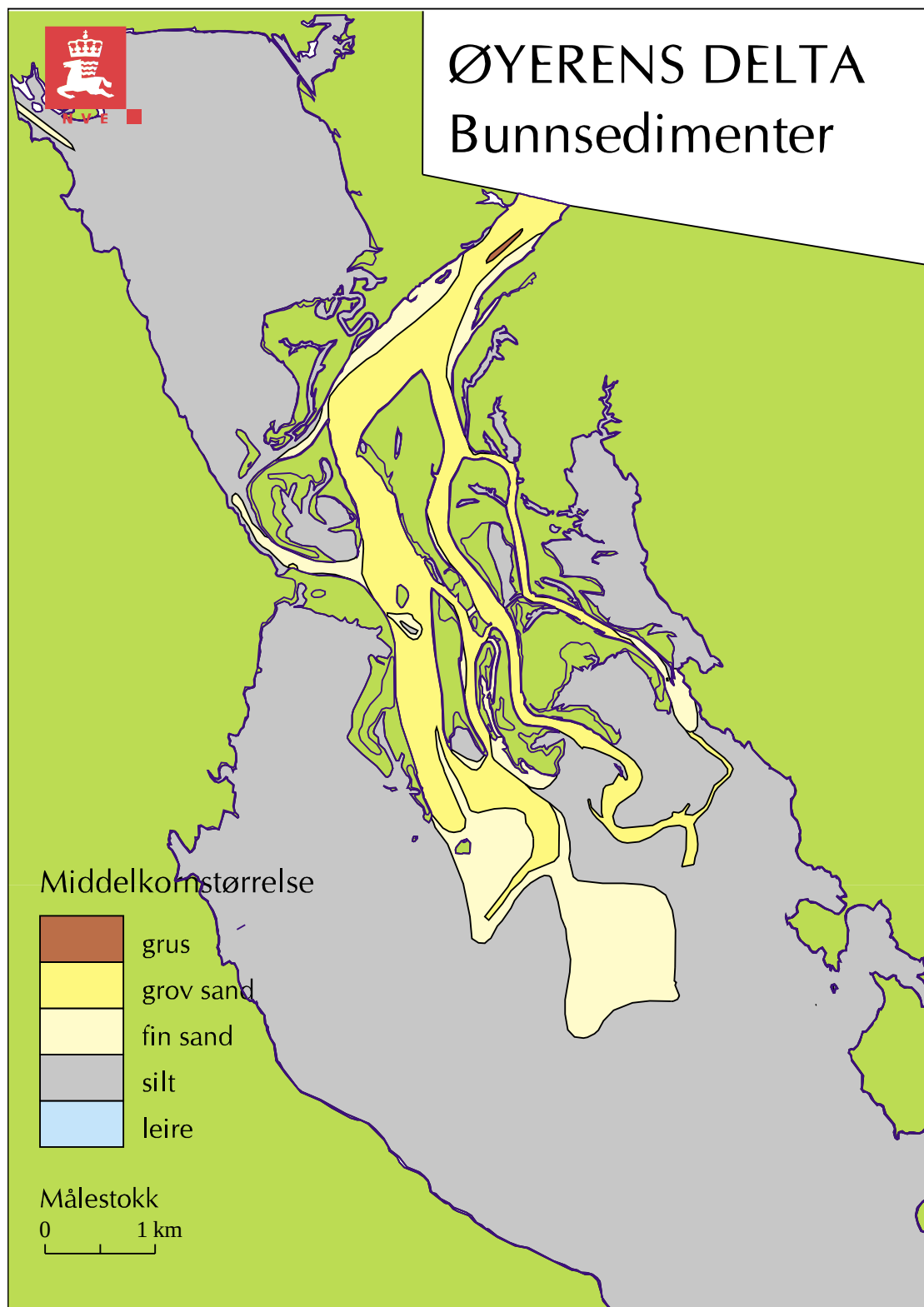


Fig. 7.2. Kart over middelkornstørrelse av bunnmaterialet i deltaområdet.

På grunnlag av alle sedimentprøver som er tatt i deltaet, er det utarbeidet et kart over middelkornstørrelsen av bunnmaterialet. Bunnmaterialet i elveløpene består for det meste av grov sand med innslag av fin sand i visse områder, se fig 7.2. På plattformen, i Svelle, og i bakevjer og laguner ligger median kornstørrelse hovedsakelig i siltfraksjonen. På plattformen sorteres sandfraksjonene raskt ut, slik at bunnmaterialet i løpene videre utover består av silt.

Et mer detaljert bilde av variasjonen i median kornstørrelse innenfor sandfraksjonene er gitt i fig. 7.3. Den gradvise sedimentasjonen fører til at median kornstørrelse reduseres nedover i deltaområdet. Ved Fetsund ligger median kornstørrelse (d_{50}) rundt 0.4 mm. Nedenfor Rundsand er d_{50} redusert til 0.1 mm. Reduksjon i kornstørrelse fra det relativt konstante nivå i Glomma, starter ved Midtbankeøya/ Flatsand. Denne raske reduksjonen, tyder på at dette er et hovedsedimentasjonsområde under nåværende manøvreringsreglement og vannføringsforhold. Reduksjonen i kornstørrelse forløper på omtrent samme måte i alle elveløpene. Kurvene i fig. 7.3. viser at de grovere fraksjonene sedimenteres i løpet før de når fram til deltaplattformen. Det er imidlertid bare i hovedløpet at akkumulasjonen er så stor at det bygges opp en øy.

En plotting av den prosentvise andelen av hver kornfraksjon i Glomma på strekningen Fetsund - deltaplattformen (ca 12000 m) dette viser at det er kornfraksjonene 1.0 - 0.5 mm, 0.5 - 0.25 mm, 0.25 - 0.125 mm som sedimenterer i elveløpet, se fig. 7.4. De øvrige fraksjonene, mindre enn 0.125 mm øker samtidig i relativ andel nedover i deltaet.

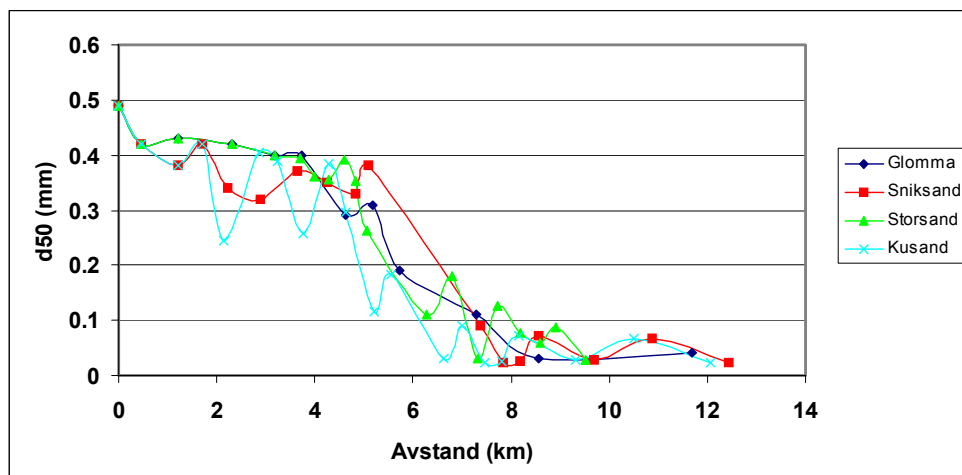


Fig. 7.3. Kornstørrelse i bunnmaterialet i Glomma, Sniksandsråka, Storsandsråka og Kusandsråka på strekningen Fetsund - deltaplattformen. Hvert punkt representerer et middel av 3 - 7 prøver fra et tverrprofil.

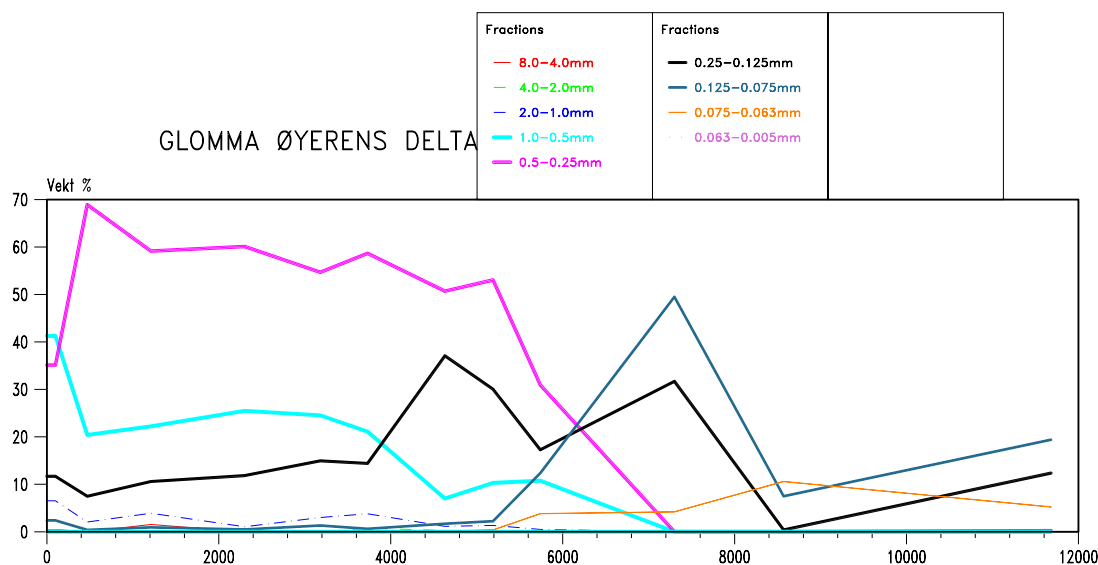


Fig. 7.4. Prosentvis andel av forskjellige kornfraksjonerr i Glomma på strekningen Fetsund - deltaplattformen. Hvert punkt representerer et middel av 3 - 7 prøver fra et tverrprofil.

I bunnmaterialet i Glommas hovedløp fra tverrprofilet ved Gjushaugsand (kurve PC) består middelkurven av alle prøvene av godt sortert sand med 2% grus ($So = 0.86$). I profilet PF ved Årnestangen er middelkurvens median forskjøvet noe mot mindre kornstørrelser. Kurvens hovedform er imidlertid opprettholdt.

Kornstørrelsene i elveløpet ved Midtbankeøya/ Flatsand ble undersøkt i detalj. Det ble tatt prøver av bunnmaterialet langs en rekke tverrprofiler. Resultatet av kornfordelingsanalysene er vist i fig. 7.5. Størstedelen av elvebunnen i området består av sand i fraksjonen 0.5 - 0.125 mm. I den nordøstre delen av elveløpet er det et innslag av grovere sand i fraksjonen 1.0 - 0.5 mm. Dette materialet har sannsynligvis blitt tilført fra nedrast materiale fra erosjonsområdet langs Årnestangen. I et område nedstrøms for Midtbankeøya/ Flatsand oppstår det en bakevje hvor det lokalt sedimenterer siltfraksjoner helt ned til 0.016 mm.

Sannsynligvis tilføres mye av dette finmaterialet fra Leira og Nitelva og fanges inn bak Midtbankeøya/ Flatsand. Forholdene er noe endret fra da grunnlagskartet ble tegnet i 1985 og de 10 årene frem til 1995. Det er ennå ikke tegnet noe nytt kart, men omrisskurven ved HRV i 1995 som er skissert fra et flybilde, viser at Midtbankeøya/ Flatsand har flyttet seg sydover. Denne forflytningen kan ha sammenheng med at nedtappingen fra HRV har foregått tidligere i sesongen i årene etter 1979, jfr. vannstandskurvene i fig. 9.1. Middelkurven fra materialet i sanddynene på Midtbankeøya/ Flatsand ved Årnestangen (kurve L7), er nesten sammenfallende med bunnmaterialet i Glommas hovedløp. Dette kan tyde på at materialet på Midtbankeøya/ Flatsand er avsatt av bunntransportprosesser.

Korfordelingskurver av flomsedimenter på deltasletten og bunnmateriale fra elveløpene og deltaplattformen er sammenliknet i fig. 7.7, 7.8 og 7.9, se fig. 7.6 for lokalisering. En kornfordelingsanalyse av suspensjonsmaterialet ved Bingsfoss under flommen i 1995 viser at materialet består av 7 % leire, dvs. materiale med korndiameter mindre enn 0.002 mm. Suspensjonsmaterialet inneholder imidlertid sedimenter i mange fraksjoner og er dermed dårlig sortert ($So = 2.3$). Sandinnholdet er på hele 32 % (kurve B1). Kurven er sammenlignet med flomsedimenter avsatt på deltasletten i samme periode. Det fremgår at flomsedimentene fra deltasletten er sammensatt av de groveste fraksjonene i Glommas suspensjonsmateriale (kurve F7-F12). Når elvesletten oversvømmes under flom, er strømhastigheten for stor til at finsilt og leire kan sedimentere. Disse fraksjonene føres videre, og fraksjonene grovsilt og sand sedimenter.

I elveløpene i deltaområdet er strømhastigheten så høy at finfraksjonene bare sedimenterer i bakevjer og laguner. Ute på plattformen kan strømhastigheten i perioder være lav. Dette medfører at finfordelt materiale kan blandes inn i sandfraksjonene. Sedimentene i elveløpene på deltaplattformens øvre deler består av finsand med en hale av silt og leirfraksjoner, PF - PI i fig. 7.9 Innslaget av silt øker gradvis utover plattformen. Når suspensjonsmateriale og bunntransportert materiale blandes i løpene, har dette sammenheng med de sesongmessige variasjonene i strømførholdene. Bunntransporten kan bare bevege seg i disse løpene under lav vannstand i Øyeren. Når vannstanden stiger avtar strømhastigheten, og det er bare suspensjonsmateriale som kan tilføres.

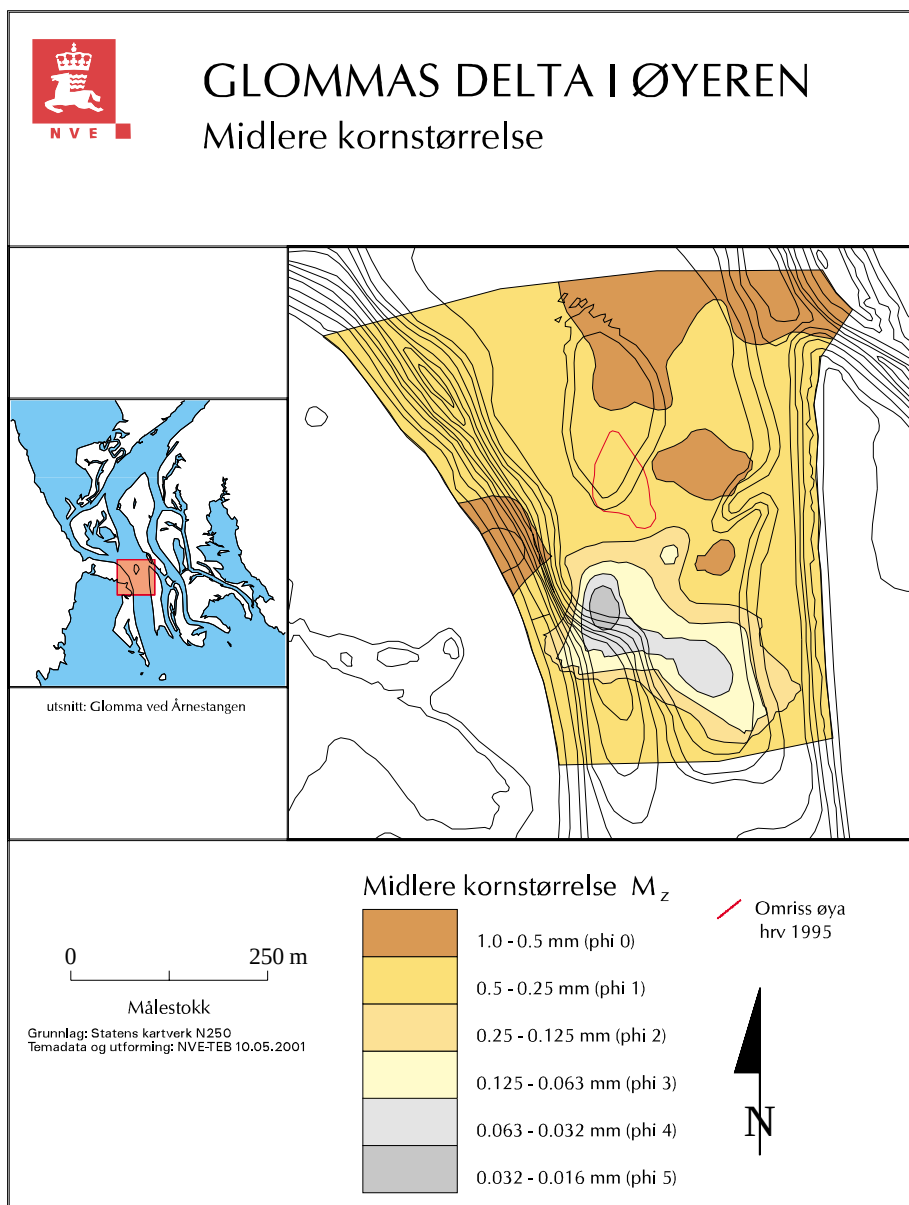


Fig. 7.5. Detaljkart over kornstørrelsene i Glommas hovedløp i en sektor ved Årnestangen. Kartet er basert på 56 kornfordelingsanalyser.

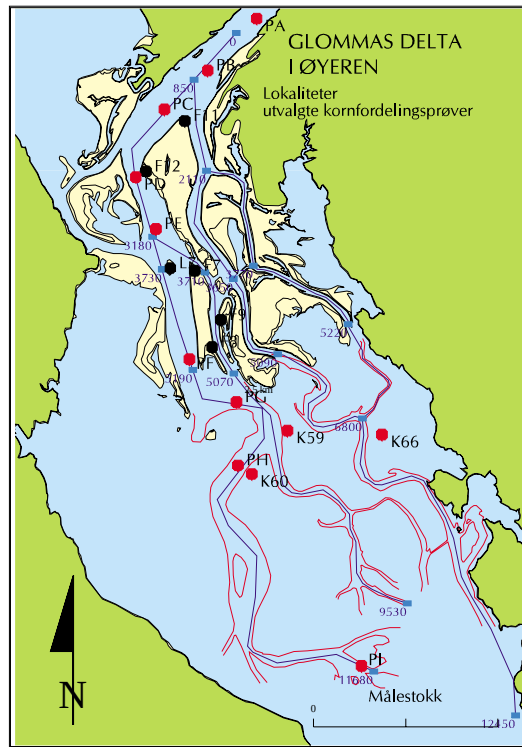


Fig. 7.6. Lokalisering av kornfordelingskurver fra flomsedimenter og bunnmateriale i elveløpene. Dybdekonturen på elveløpene på plattformen er inntegnet etter flybilder fra april 1995.

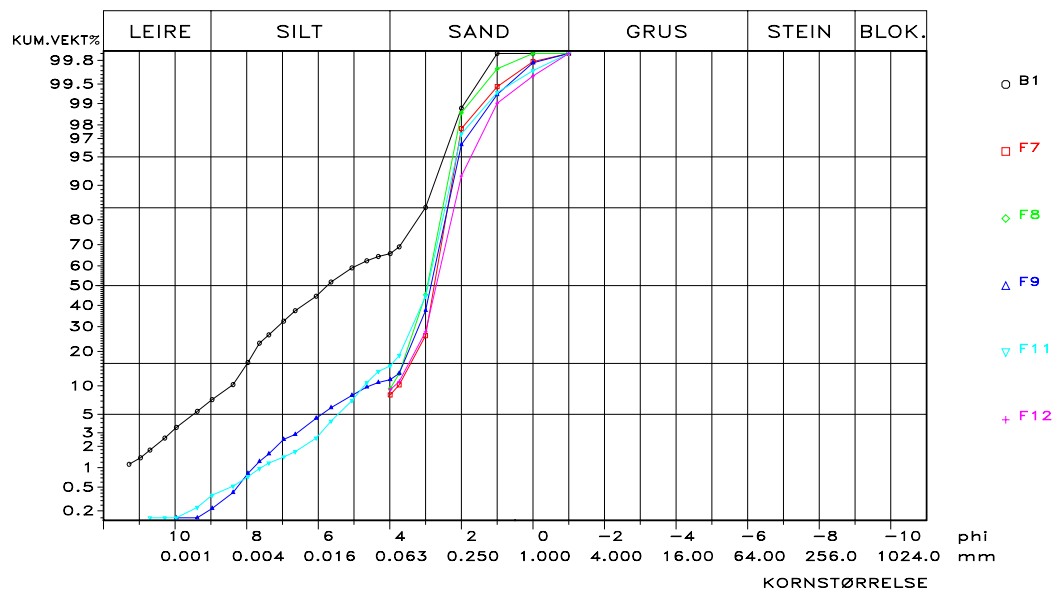


Fig. 7.7. Kumulative kornfordelingskurver fra forskjellige sedimentære avsetninger på deltaet: B1: Suspensjonsmateriale fra Bingsfoss 6/6 1995. F7-F12: Flomsedimenter fra deltasletten.

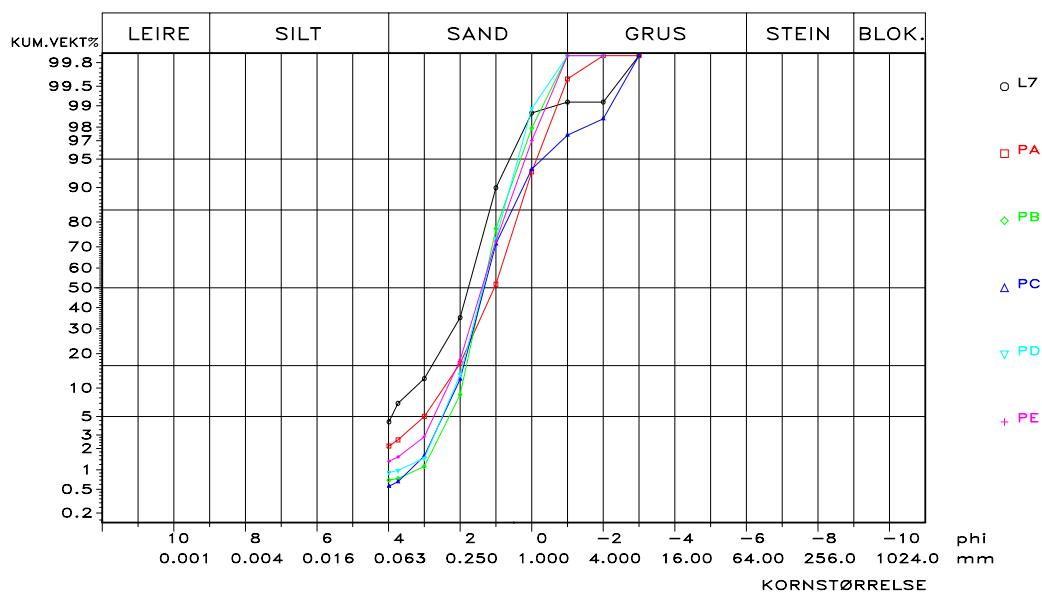


Fig. 7.8. Kumulative kornfordelingskurver fra forskjellige sedimentære avsetninger på deltaet: PA-PE: Bunnmateriale fra hovedløpet (middelkurver).

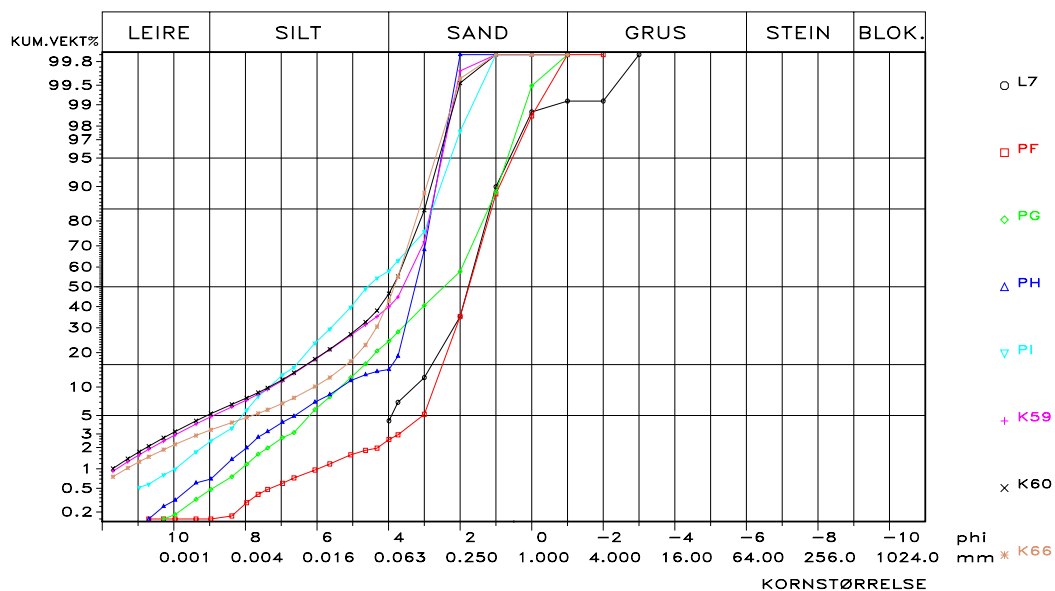


Fig. 7.9. Kumulative kornfordelingskurver fra forskjellige sedimentære avsetninger på deltaet: PF-PG: Bunnmateriale fra hovedløpet (middelkurver). PG-PI: Bunnmateriale fra elveløpene på plattformen. L7: Sedimentprøve fra Midtbankeøya/ Flatsand. K59, K60 og K66: Bunnmateriale mellom løpene på plattformen.

8. Suspensjonskonsentrasjoner, ukependlig og kortidsvariasjoner

Denne undersøkelsen tar sikte på å analysere virkningen av kortvarige vannstandsvariasjoner (ukependling) på erosjon og sedimenttransport i deltaområdet Nordre Øyeren. I prøvereglementet gis det anledning til pendling av vannstanden med 0.7 m i forhold til 30 cm under HRV, kote 101.04 (4.50 m), med maksimal endring på 0.1 m/ døgn. Pendlingene kan ha en varighet opp til 3 uker og må utføres etter 10 august. Under pendlingene kan det oppstå erosjon i deltaområdet som fører til at mer materiale bringes i suspensjon. Dette ville i så tilfelle registreres ved at suspensjonskonsentrasjonen øker utover gjennom deltasystemet. For at en slik effekt skal være merkbar, må eventuelle konsentrasjonsøkninger kunne skilles fra variasjoner som skyldes endringer i bakgrunnskonsentrasjonen i tilløpselvene. Konsentrasjonen i de nedre deler av deltaet ved Rundsand er en funksjon av konsentrasjonen i tilløpselvene og eventuell erosjon eller sedimentasjon i deltaet.

I hver periode med pendling i årene 1996 til 1999 er det derfor gjort målinger av suspensjons-konsentrasjonen i tilførselselvene. I Glomma er det tatt målinger ved



Fig. 8.1. Målestasjoner for vannprøver i Nordre Øyeren.

Bingsfoss og Fetsund. I Leira er det målingene ved Krokfoss og ved innløpet til Svelle. I Nitelva er prøvene tatt ved Lillestrøm. For å registrere eventuell nedstrøms erosjon i Svelle er det tatt prøver ved Nordhagen. Konsentrasjonen i vannmassene ved utløpet av deltaområdet er målt i Glomma ved Rundsand. I 1996 er målingene i deltaområdet basert på ukentlige stikkprøver. I 1997 til 1999 ble måleprogrammet

intensivert med daglige prøver i referanseperioder og perioder med ukependling. I 1998 ble det i tillegg satt opp sedimentfeller ved utløpet av Storråka (Glomma), Sniksandsråka og Kusand/ Rosholmsråka, se fig. 8.1 og fig. 8.2. Som en kontroll ble det også tatt prøver i flere utvalgte referanseperioder. Under referanseperiodene er det ingen styrt pendling av vannstanden i Øyeren. Kraftverkene ble da kjørt i henhold til manøvreringsreglementet uten pendlinger. I 1998 ble en av referanseperiodene lagt til hevingen av vannstanden i Øyeren i slutten av april.



Fig. 8.2. Målestasjoner for vannprøver i Øyeren 1996.

Bølgeerosjon er også en viktig prosess som kan føre til erosjon og resuspensjon av finfordelte sedimenter langs elvekanten og gruntvannsområder. Bølger kan påvirke bunnen ned mot syv meters dyp. Både vindstyrke og retning er avgjørende for omfanget av bølgeerosjon. Det er derfor sett nærmere på vindstyrke/retning under de forskjellige måleperiodene. Vindmålingene som er benyttet er registreringer fra Kjeller og er utført av NILU.

Ved Bingsfoss og Krokfoss er det tatt fra 2 til 4 prøver pr. døgn. Ved de øvrige lokalitetene ble det tatt en manuell prøve pr. døgn i periodene med pendlinger og i referanseperiodene. Sedimentfellene gir et integrert bilde av sedimentmengden som er i suspensjon i vannmassene i måleperioden. Det ble benyttet fellerigge med to rørfeller i nivåene 1 m, 2 m og 3 m under overflaten jfr metodebeskrivelse i kapittel 2.

8.1 Suspensjonsprøver 1996

Lokaliteter der det ble tatt vannprøver er vist i fig. 8.2. Målingene ved Rundsand ved utløpet av Glomma, viser et forløp som ser ut til å være fordelt på tre maksimum, fig. 8.4. Konsentrasjonsøkningen inntreffer i siste halvdel av april når vannstanden i Øyeren er på det laveste i 1996. Suspensjonskonsentrasjonen øker fra et minimum på 0.0024 g/l i slutten av mars til 0.12 g/l i første halvdel av mai. Dette sammenfaller med at Øyeren heves fra vinterminimum til sommervannstand. Konsentrasjonen har igjen stabilisert seg på et minimum i løpet av juni. Målingene ved Rud, Fossum og Solbergåsen viser det samme forløpet som ved Rundsand, men responsen er betydelig dempet i forhold til målingene ved Rundsand, (fig. 8.4 og 8.5).

Målingene i Øyeren viser en liten økning i siste halvdel av august og en noe større økning i månedsskiftet oktober/ november. Målingen på 0.012 g/l (Rundsand) er en relativt lav konsentrasjon, men er markert høyere enn målingene som er foretatt i periodene før og etter. Maksimumsverdien i slutten av oktober er noe høyere, 0.047 g/l. Målingene ved Rud bekrefter det samme forløpet som kan observeres ved Rundsand, men med noe lavere konsentrasjoner. Ved Fossum og Solbergåsen er det ikke tatt vannprøver i denne perioden.

Målingene ved samløpet Nitelva/ Leira viser det samme forløpet som ved Rundsand og de øvrige lokalitetene sørover i Øyeren. Den høyeste konsentrasjonen på 0.21 g/l er målt i første halvdel av april. Etter tre karakteristiske maksimum er suspensjonskonsentrasjonen tilbake på et minimum i løpet av juni, fig. 8.3. NVEs målinger i Leira ved Krokfoss på øvre Romerike, gjenspeiler også denne markerte responsen på suspensjonskonsentrasjon i april og mai. Her er det observert maksimumskonsentrasjoner på 2.15 g/l, fig. 8.3.

Ved Krokfoss var det en liten økning i konsentrasjon den 25. august, hvor det ble målt en konsentrasjon på 0.036 g/l. Nitelva/ Leira har ingen markerte konsentrasjonsøkninger i denne perioden. Dette er sannsynligvis sammenheng med at det momentanprøvetakingen ikke har fanget kortvarige endringer i konsentrasjon.

Suspensjonskonsentrasjonene ved Bingsfoss i april og mai er noe lavere enn det som er observert i Nitelva/ Leira og ved Rundsand. Maksimumskonsentrasjoner på 0.048

g/l er målt i første halvdel av mai. Konsentrasjonene følger det samme karakteristiske forløpet som i Nitelva, Leira og ved lokalitetene i nordre Øyeren. Det er også en tydelig økning i konsentrasjonen i siste halvdel av august og oktober, fig. 8.3.

Tilførsel fra Glomma utgjør omlag 90 % av vannføringen ved Rundsand, mens Nitelva, Leira og lokaltilsiget utgjør de resterende 10 %. På bakgrunn av målinger som er foretatt i tilsigsfeltene, er sannsynligvis mer enn 70 % av suspensjonsmaterialet som er observert ved Rundsand i perioden fra første halvdel av april til månedskiftet mai - juni, tilført fra Glomma og Nitelva/ Leira. Målingene som er foretatt ved samløpet Nitelva/ Leira er sannsynligvis betydelig underestimert fordi resultatene er basert på en stikkprøve i løpet av en periode på 7 døgn. På bakgrunn av målinger som er foretatt ved Krokfoss i samme periode er det grunn til å anta at tilførselen fra Leira har hatt betydelig høyere konsentrasjoner i denne perioden.

8.2 Resultater av målinger under ukependling i 1996

Det ble foretatt to ukependlinger av vannstanden i Øyeren i løpet av 1996. Den første perioden startet 26. august med en vannstand på 101.31 m (4.77 m). Et minimum på 101.06 m (4.52 m) den 31. august og tilbake til 101.16 m (4.62 m) den 3. september. Den andre perioden startet 8. oktober med en vannstand på 101.51 m (4.97 m). Et minimum på 101.15 m (4.61 m) den 12. oktober og tilbake til 101.33 m (4.79 m) den 14. oktober. Den 21. oktober er vannstanden på 101.38 m (4.84 m) før den igjen synker noe.

Det er observert en liten økning i suspensjonskonsentrasjon ved Rundsand den 27. august, med et maksimum på 0.012 g/l. Den 3. september var konsentrasjonen nede i 0.0046 g/l. Økninger i suspensjonskonsentrasjonen kan også observeres i Bingsfoss og Krokfoss. Høyeste suspensjonskonsentrasjonen ved Bingsfoss i denne perioden var på 0.0137 g/l den 26. august. Disse økningene skyldes nedbøraktivitet i området. Konsentrasjonsøkningen ved Rundsand og Øyeren skyldes tilført materiale fra Glomma og Nitelva/ Leira og kan sannsynligvis ikke knyttes til lokale bidrag fra deltaområdet. Under befaringer i deltaområdet i denne perioden kunne det heller ikke påvises områder med aktiv erosjon som var initiert av korttidsnedtappingen.

I den andre perioden med ukependling er det ikke observert økninger i suspensjonskonsentrasjon i Øyeren. Økninger i suspensjonskonsentrasjonen ved Rundsand er ikke observert før 27. oktober. Konsentrasjonen som er observert i løpet av den siste ukependlingen er på 0.0057 g/l, som ikke er vesentlig høyere enn minimumskonsentrasjoner i løpet av sommeren. Konsentrasjonsøkninger den 27. oktober kan snarere knyttes til nedbøraktivitet i området. Vannføringsøkninger med tilhørende økninger i suspensjonskonsentrasjon kan observeres i Nitelva, Leira og Glomma i denne perioden.

Selv om det ikke kunne registreres forhøyde konsentrasjoner eller andre effekter av korttidsreguleringene i 1996, så kan slike effekter bli merkbare på sikt.

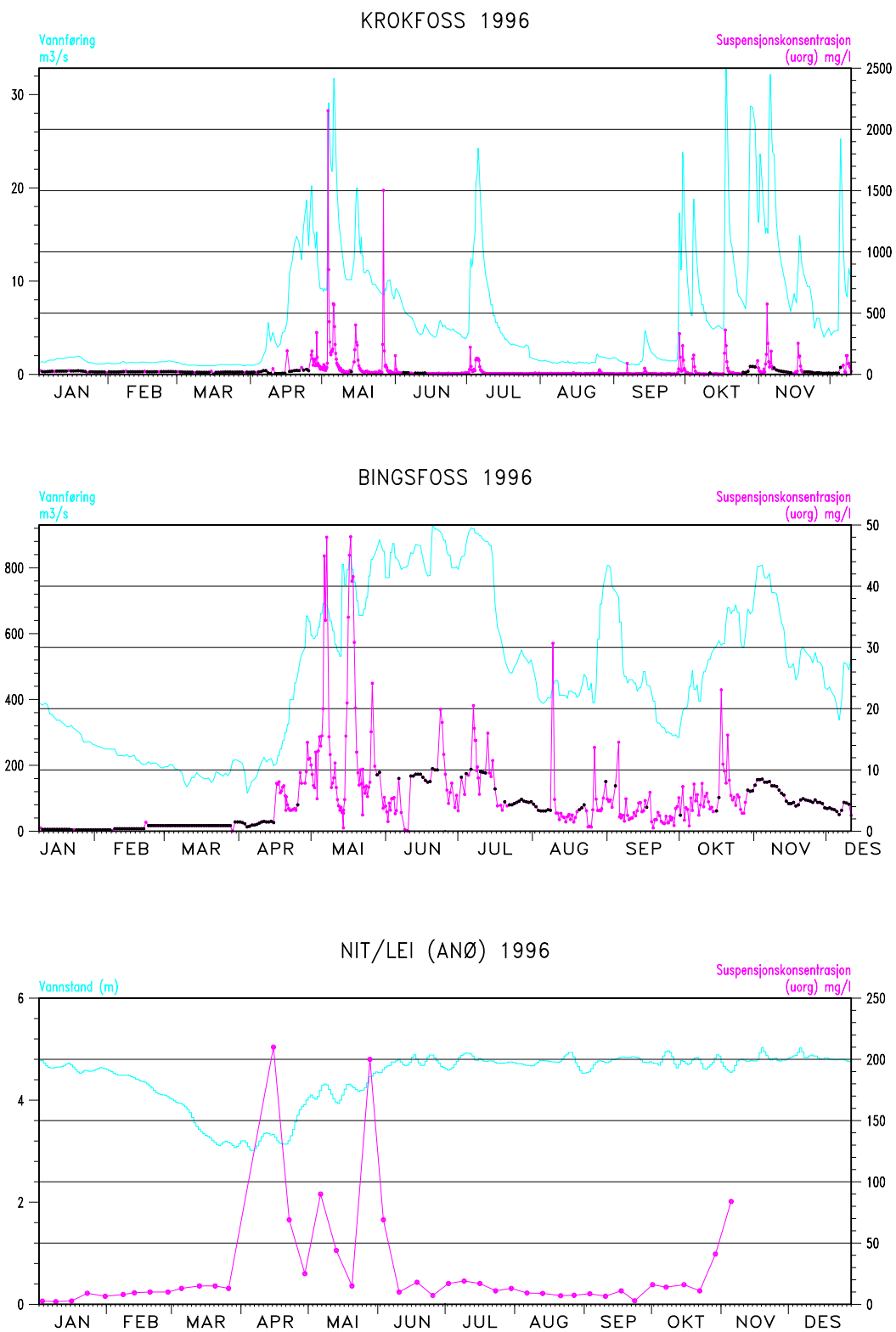


Fig. 8.3. Suspensjonskonsentrasjon ved Krokfoss, Bingsfoss og Nitelva (ANØ) 1996.

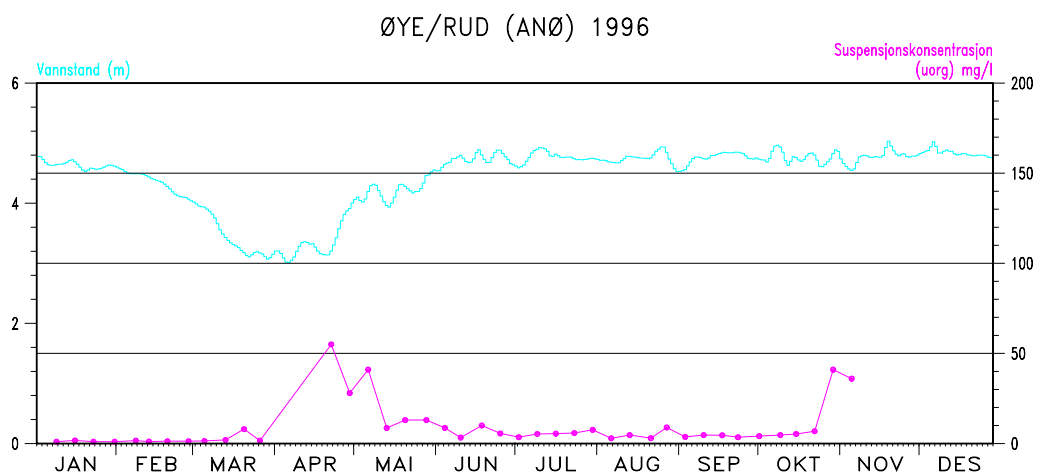
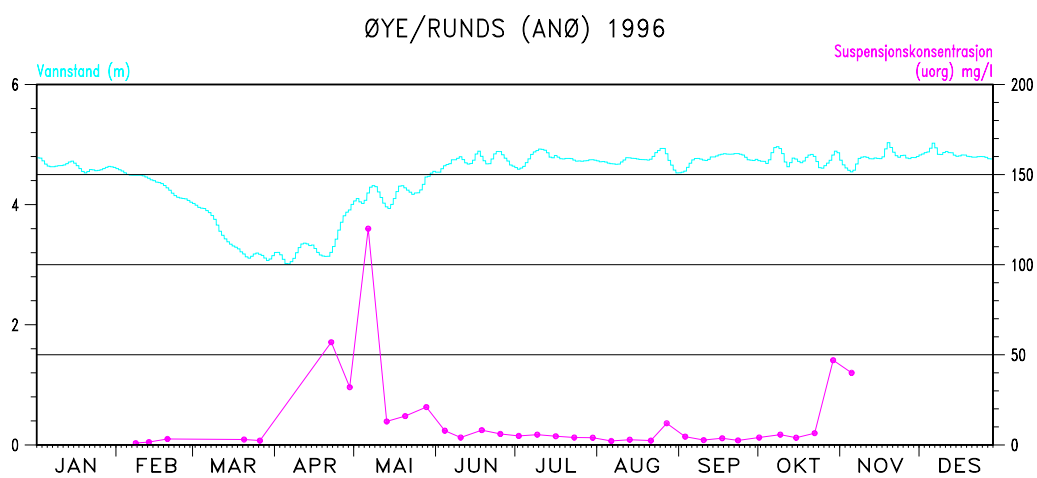


Fig. 8.4. Suspensjonskonsentrasjon ved Rundsand og Rud 1996, (data fra ANØ).

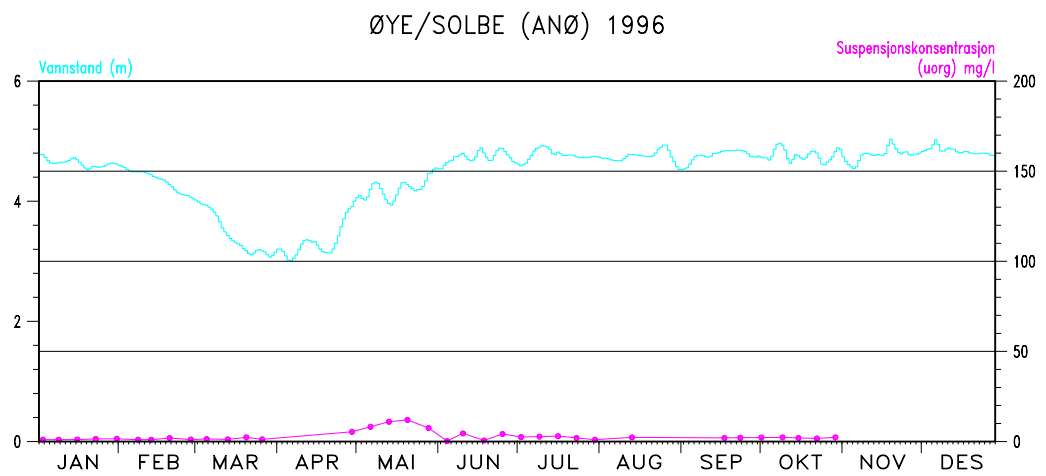
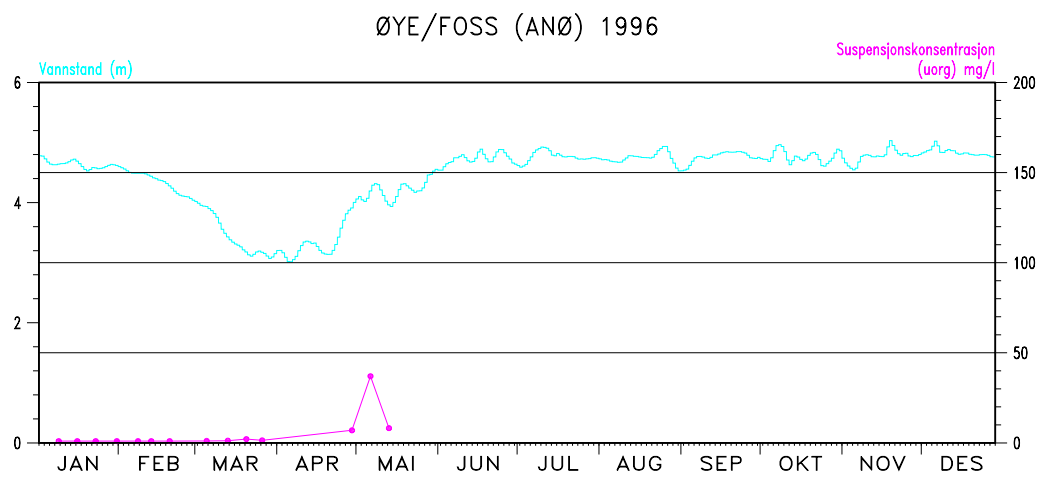


Fig. 8.5. Suspennsjonskonsentrasjon ved Rundsand og Rud 1996, (data fra ANØ).

8.3 Suspensjonsprøver 1997

I 1997 ble det gjennomført to forsøk med ukependling av vannstanden i Øyeren. Den første pendlingen ble foretatt i august og den siste i november. I begge periodene ble det tatt vannprøver ved utvalgte lokaliteter i deltaområdet og i tilløpselvene til Øyeren. I den første perioden ble det tatt daglige prøver fra 12 til 16 august og i den andre perioden fra 24 til 30 november. I tillegg ble det tatt prøver i en referanseperiode fra 8 til 13 september.

Ved pendlingen i august ble det registrert en relativt høy konsentrasjonsøkning i Nitelva. Det er ikke målt tilsvarende høye konsentrasjoner i Bingsfoss eller Krokfoss i samme periode, se fig. 8.6. Ved Fetsund ble det tatt en prøve med konsentrasjoner opp mot 400 mg/l, men denne prøven synes å være noe usikker. Ved de andre lokalitetene Nordhagan, Leira v/Svelle og ved Rundsand ligger konsentrasjonen under 20 mg/l, se fig. 8.7 og 8.8.

Ved pendlingen i november er konsentrasjonene lave ved alle prøvelokalitetene (under 15 mg/l). Mot slutten av perioden ble det imidlertid registrert en konsentrasjon ved Rundsand på ca. 25 mg/l. Denne prøven ble tatt ett døgn etter at vannstanden var på det laveste, se fig. 8.6, 8.7 og 8.8. Målingene i 1997 gir ikke grunnlag for å konkludere med at ukependlingene har ført til erosjon i de nedre deler av deltaområdet. I referanseperioden er variasjonene i konsentrasjon ved Nordhagen og Rundsand av samme størrelsesorden som i pendlingsperiodene. Målingen fra Nitelva i august kan imidlertid tyde på en viss erosjon i dette området. Nitelva løper inn i Svelle ved Lillestrøm. Vannstandspendlingene i Øyeren påvirker Nitelva et stykke oppover og kan dermed forårsake erosjon langs denne strekningen.

8.4 Suspensjonsprøver 1998

I 1998 ble det gjennomført tre forsøk med ukependling i Øyeren. Det ble foretatt to pendlinger i august og en i oktober. Det ble tatt vannprøver i alle periodene. I den første perioden ble det tatt daglige prøver fra 3 til 16 august. Første del av denne perioden fram til 7 august kan betraktes som en referanseperiode fordi vannstandspendlingen ikke ble iverksatt før 8 august. Det ble også tatt prøver under pendlingen i perioden 24 til 29 august og under en pendling i perioden 12 til 18 oktober. I tillegg ble det tatt prøver i en referanseperiode om våren fra 27 april til 5 mai for å dekke vannstandshevningen i Øyeren om våren.

I den første del av perioden steg vannstanden inntil ukependlingen startet ca 7 august. Konsentrasjonene var jevnt synkende i denne perioden inntil vannstanden igjen steg. Suspensjonskonsentrasjonene økte deretter i takt med den påfølgende vannstandshevningen. Forløpet var ikke like markert ved alle lokalitetene i deltaområdet, men tendensen var den samme. Konsentrasjonen var også varierende, med et maksimum på ca 170 mg/l i Leira/Svelle og ca 45 mg/l ved Rundsand. Ved Nitelva og Fetsund ble det målt maksimums konsentrasjoner på ca 35 mg/l, men dette var helt mot slutten av perioden. Ved innløps stasjonene Krokfoss og Bingsfoss var

konsentrasjonene svært lave. Disse stasjonene har imidlertid mangelfulle data i første del av perioden, se fig. 8.9-8.11.

I pendlingsperioden fra 24 til 29 august ble det målt en konsentrasjon i overkant av 100 mg/l ved Nordhagen da vannstanden var på det laveste. Konsentrasjonen var jevnt stigende ved synkende vannstand for så å avta igjen med stigende vannstand. Det er også antydning til tilsvarende forløp ved de andre lokalitetene, men med lavere konsentrasjoner. Det er imidlertid ikke registrert høye suspensjonskonsentrasjoner i innløpselvene ved Krokfoss og Bingsfoss i denne perioden, se fig. 8.9-8.11.

Under pendlingen i oktober ble det målt en markert økning av konsentrasjonen i Nitelva og Leira/Svelle ved senkning av vannstanden. Det var ikke et like tydelig forløp ved Nordhagen, Fetsund og Rundsand. I samme periode ble det registrert konsentrasjoner i underkant av 100 mg/l ved Krokfoss, så noe av materialet ved Leira/Svelle kan ha blitt ført inn fra de øvre deler av vassdraget. Det er sannsynlig at det samme kan være tilfelle i Nitelva, se fig. 8.9-8.11.

Det ble også gjort forsøk på å klarlegge hvordan vannstandssenkningen på etterm vinteren og våren påvirker suspensjonskonsentrasjonen i deltaområdet. Dessverre kom prøvetakingen noe sent i gang, men gir allikevel et ensartet bilde ved alle målepunktene. Resultatene viser en markert reduksjon i suspensjonskonsentrasjonen ved heving av vannstanden i Øyeren. Ved Krokfoss og Bingsfoss er det målt svært høye konsentrasjoner. Opp mot 100 mg/l ved Krokfoss og ca 150 mg/l ved Bingsfoss. Etter hvert som vårflommen avtar synker konsentrasjonene i tilløpselvene. Det er derfor sannsynlig at reduksjonen i partikkelkonsentrasjon i deltaområdet har sammenheng med avtagende konsentrasjoner i tilløpselvene. I tillegg kommer en mulig utynnende effekt. Erosjonen som forekommer i deltaområdet i tilknytning til heving av vannstanden i Øyeren, er ikke like stor som konsentrasjonen i innløpselvene, se fig. 8.9-8.11.

8.5 Suspensjonsprøver 1999

I 1999 ble det gjennomført to forsøk med ukependling av vannstanden i Øyeren. Den første pendlingen ble foretatt i august og den siste i månedsskiftet august/september. I begge periodene ble det tatt vannprøver ved utvalgte lokaliteter i deltaområdet og i tilløpselvene til Øyeren. I den første perioden ble det tatt daglige prøver fra 15 til 22 august og i den andre perioden fra 28 august til 5 september. I tillegg ble det tatt prøver i en referanseperiode fra 26 til 31 mai.

I Nitelva, Leira og Nordhagen ble det målt maksimums konsentrasjoner fra 15 mg/l til 25 mg/l i tilknytning til den første pendlingen i august. Ved Fetsund og Rundsand er det ikke registrert konsentrasjonsøkninger av betydning. Ved Krokfoss var konsentrasjonene lave gjennom hele perioden, under 10 mg/l. Bingsfoss mangler data i denne perioden.

Under den andre pendlingen er mønsteret det samme, men maksimumskonsentrasjonen er lavere, maksimalt ca 12 mg/l.

Under referanseperioden i månedsskiftet mai/juni, varierte konsentrasjonen ved Rundsand mellom ca 30 mg/l og 4 mg/l. Ved Fetsund var det et tilsvarende forløp, men med en maksimumskonsentrasjon på 25 mg/l. Den markerte reduksjonen har sammenheng med en avtagende konsentrasjon i Glomma (Bingsfoss) i denne perioden, se fig. 8.12, 8.13 og 8.14.

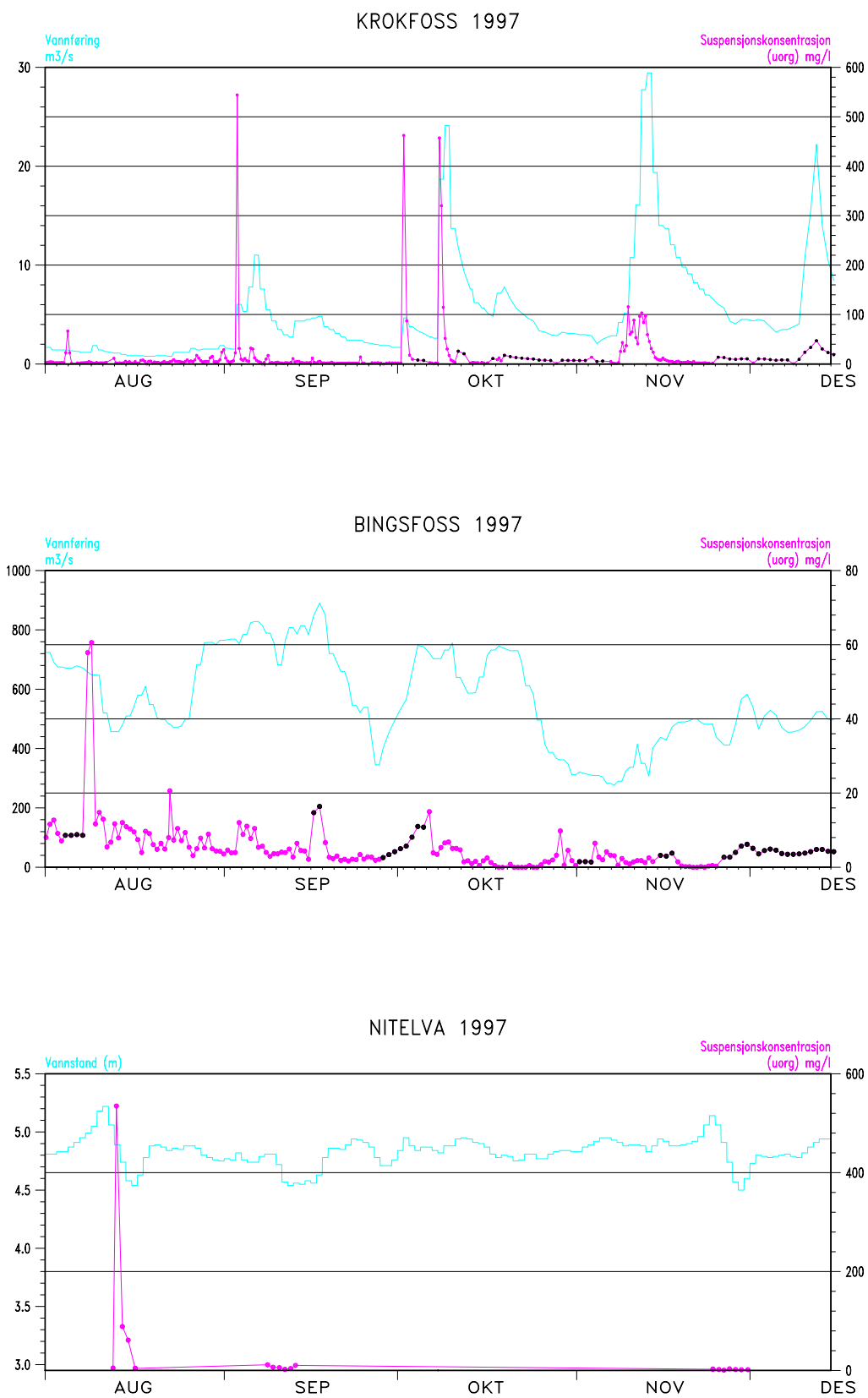


Fig. 8.6. Krokfoss 1997, Bingsfoss 1997 og Nitelva 1997.

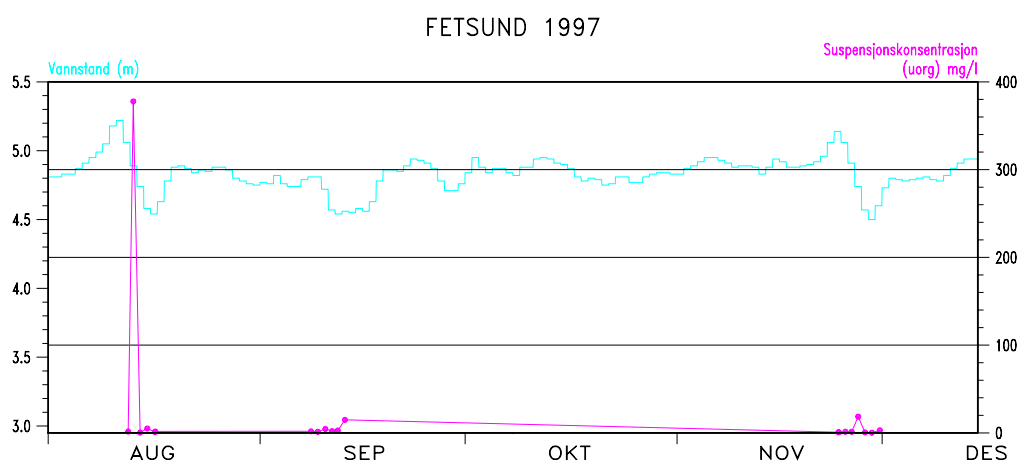
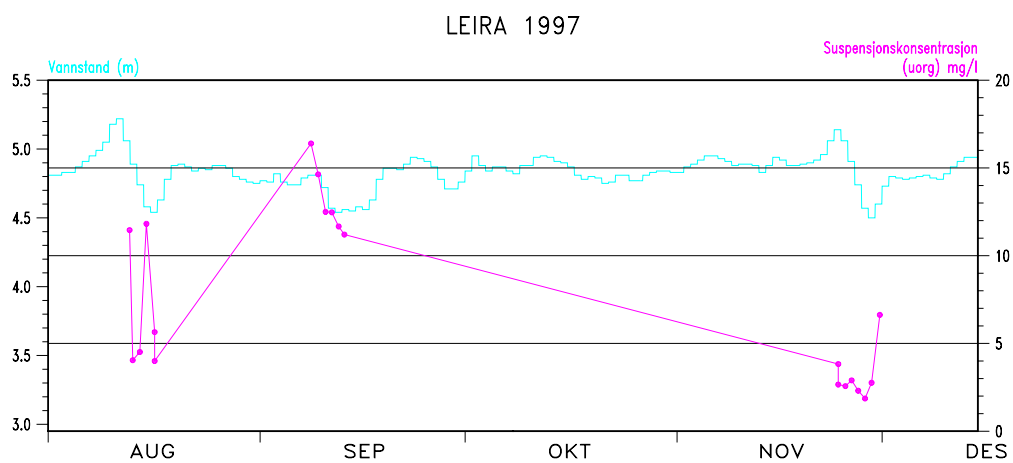


Fig. 8.7. Leira/ Svelle 1997 og Fetsund 1997.

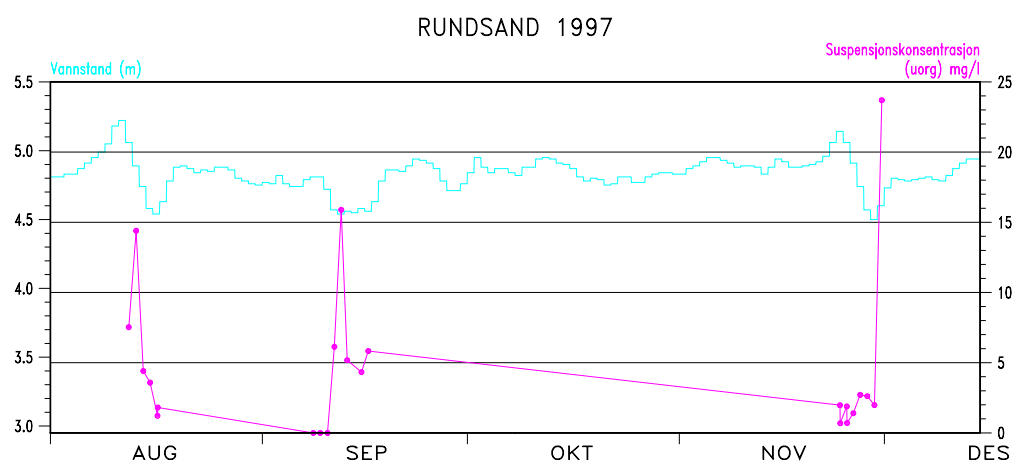
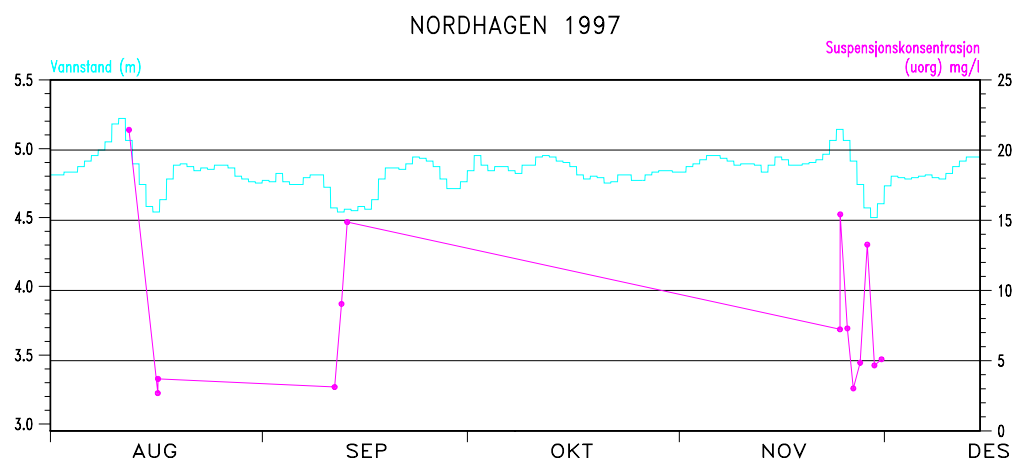


Fig. 8.8. Nordhagen 1997 og Rundsand 1997.

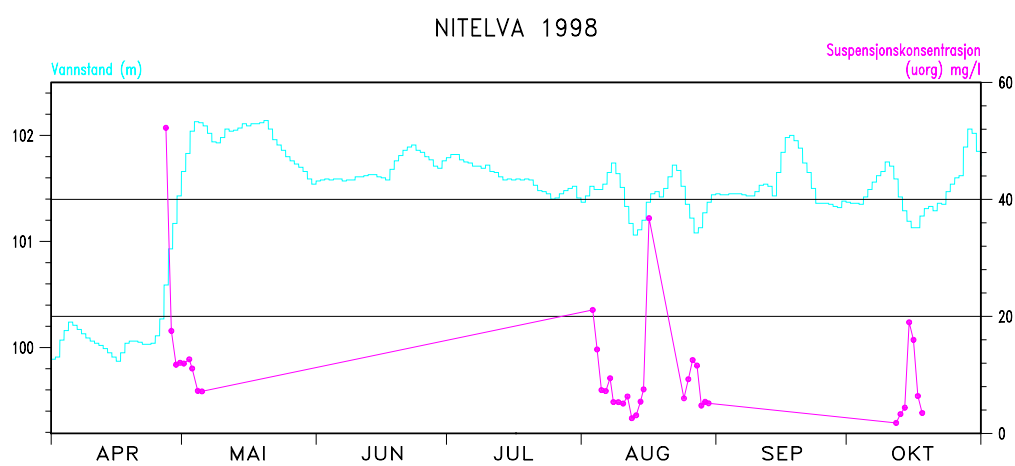
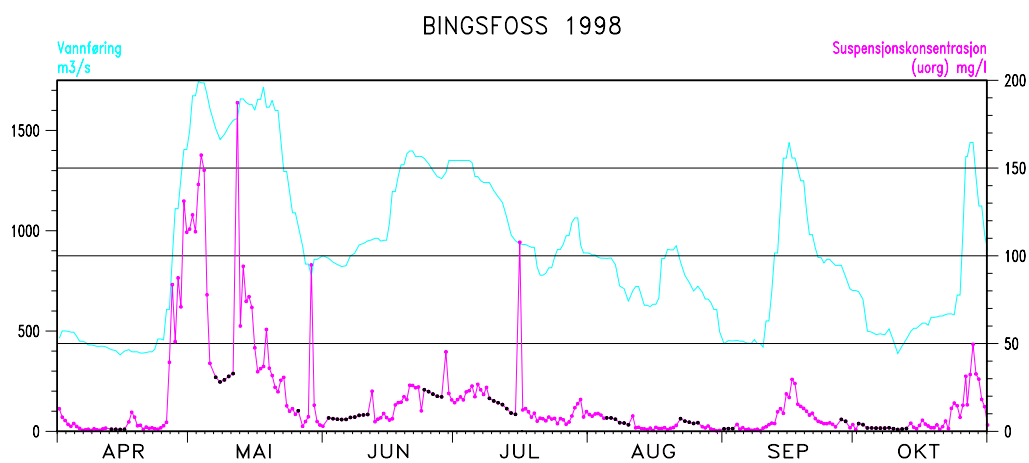
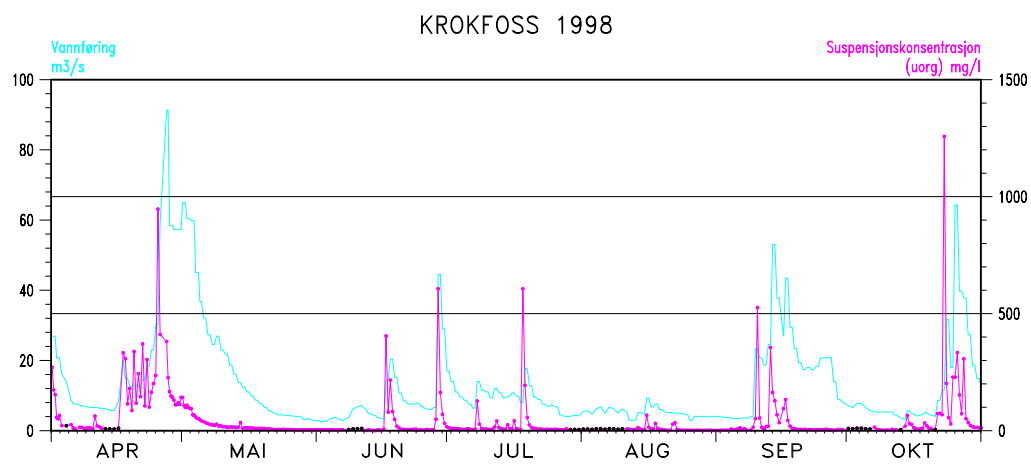


Fig. 8.9. Krokfoss 1998, Bingsfoss 1998 og Nitelva 1998.

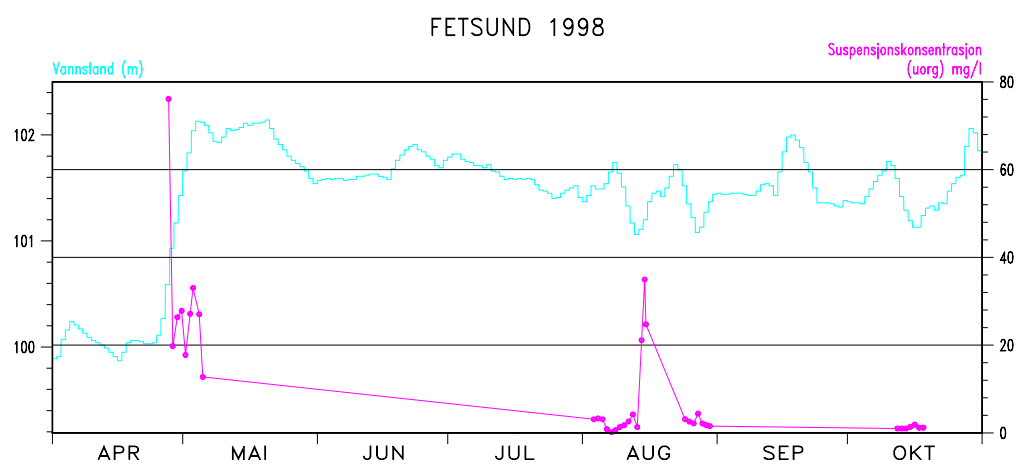
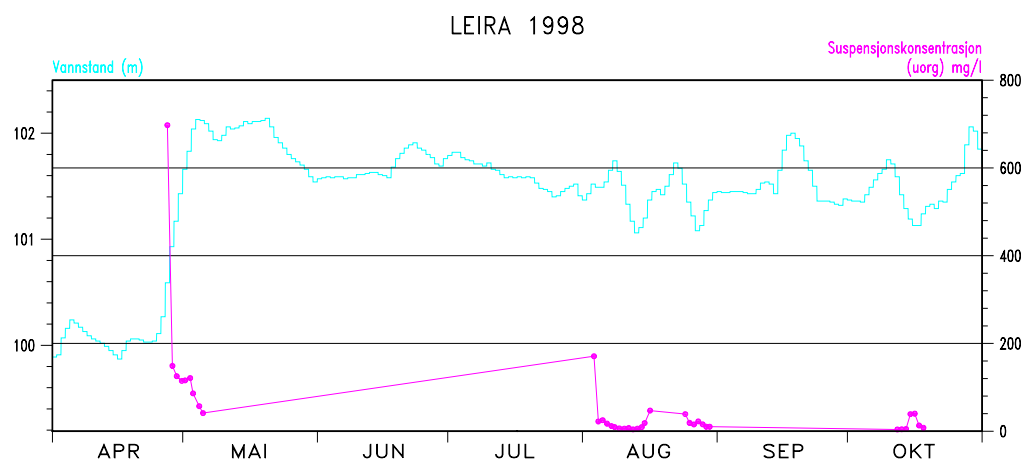


Fig. 8.10. Leira/ Svelle 1998 og Fetsund 1998.

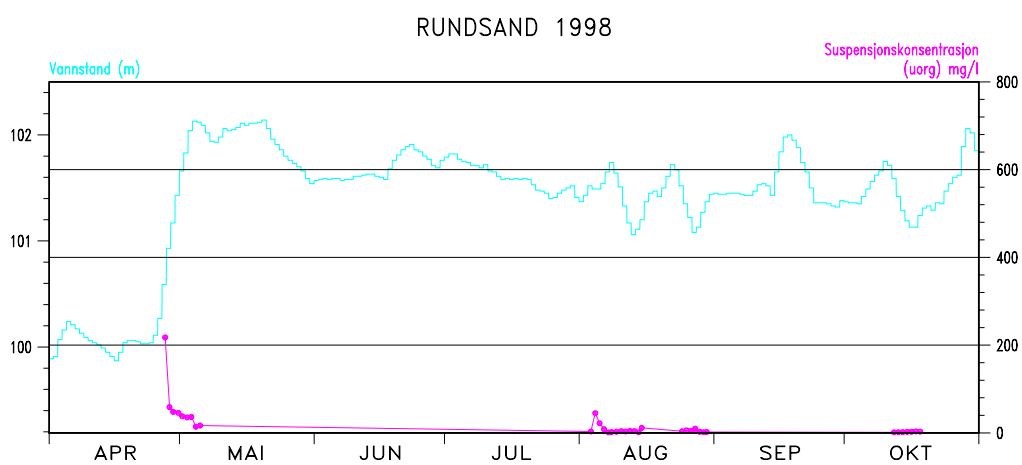
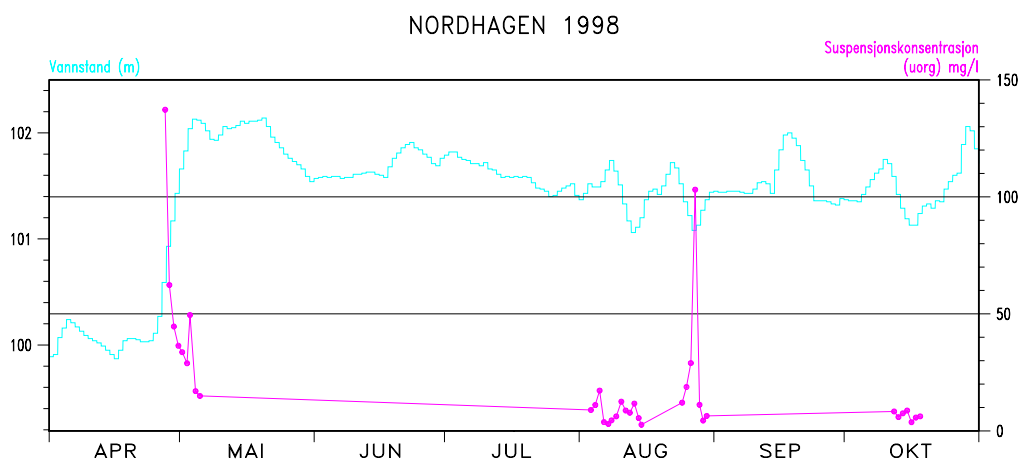


Fig. 8.11. Nordhagen 1998 og Rundsand 1998.

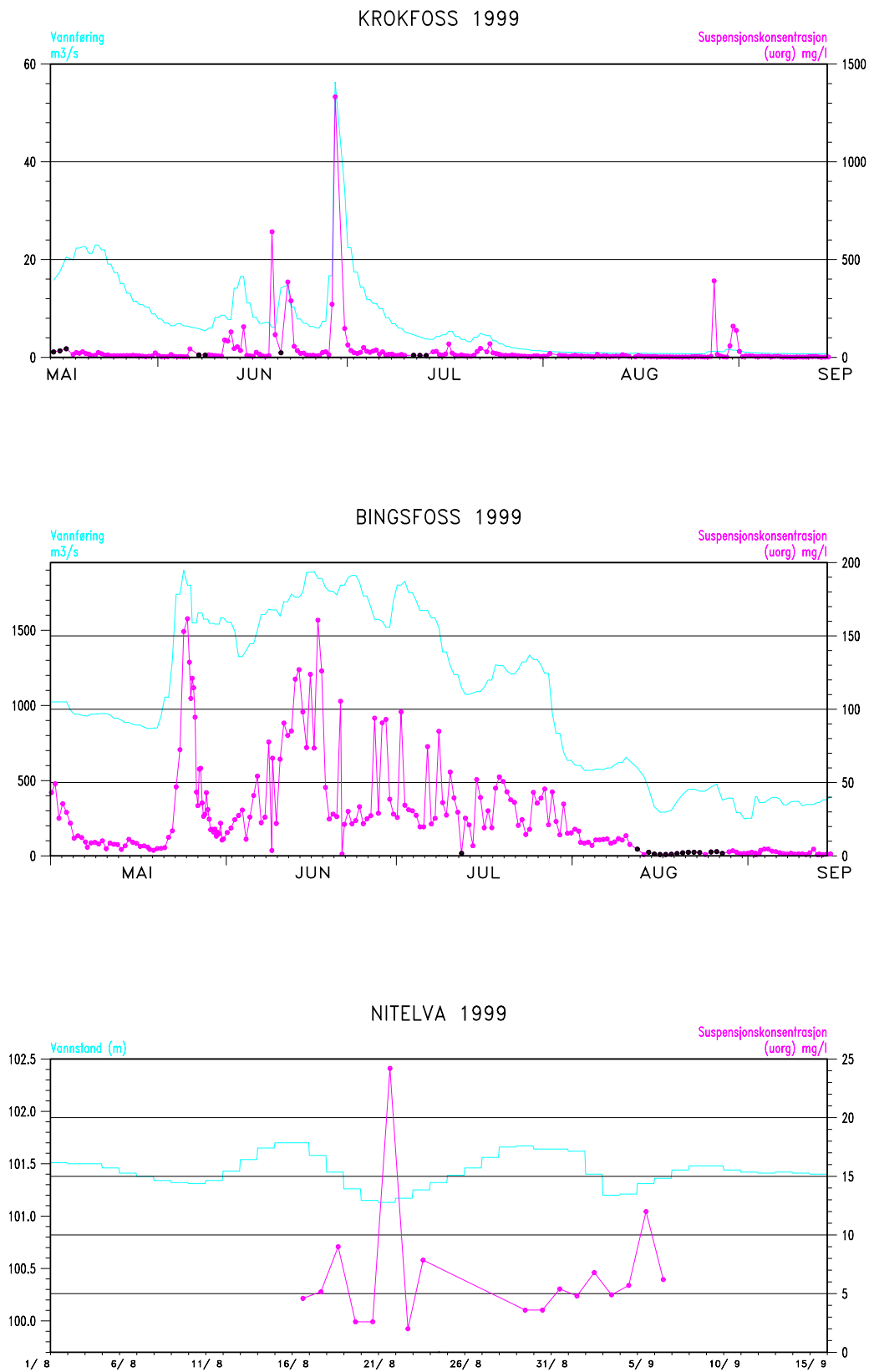


Fig. 8.12. Krokfoss 1999, Bingsfoss 1999 og Nitelva 1999.

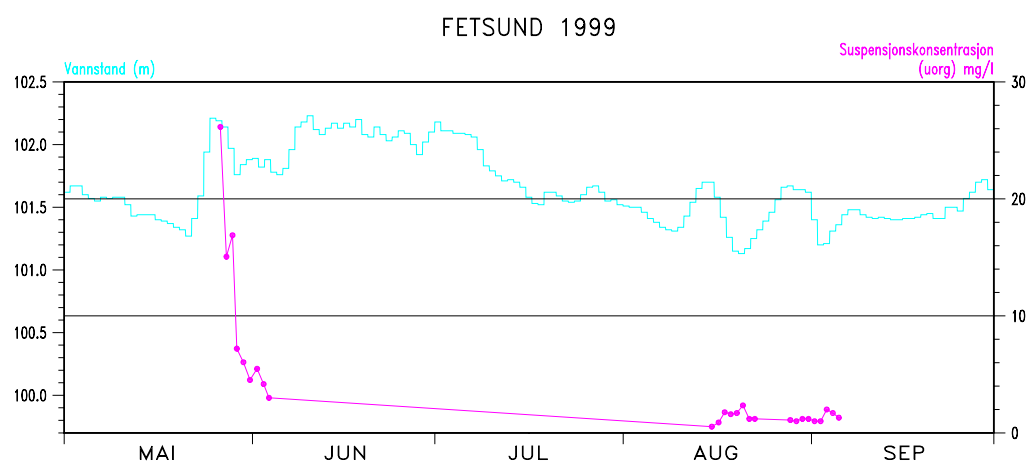
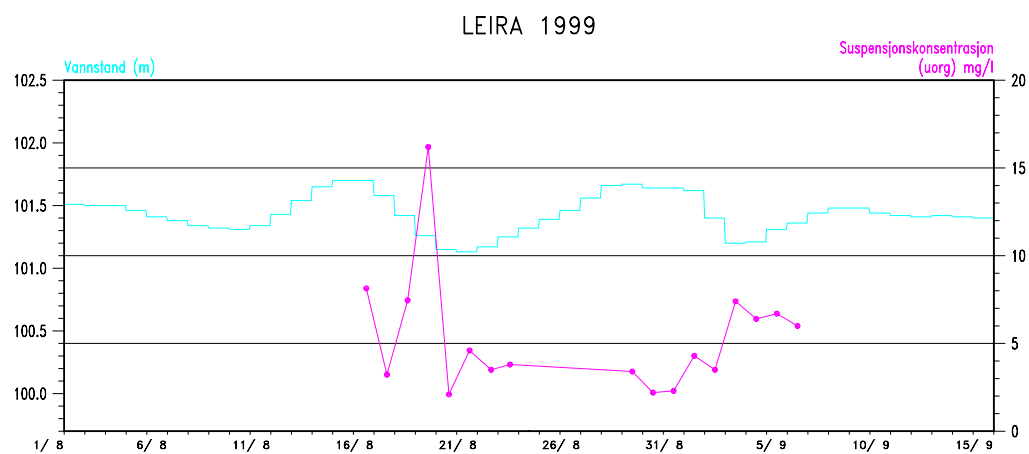


Fig. 8.13. Leira/ Svelle 1999 og Fetsund 1999.

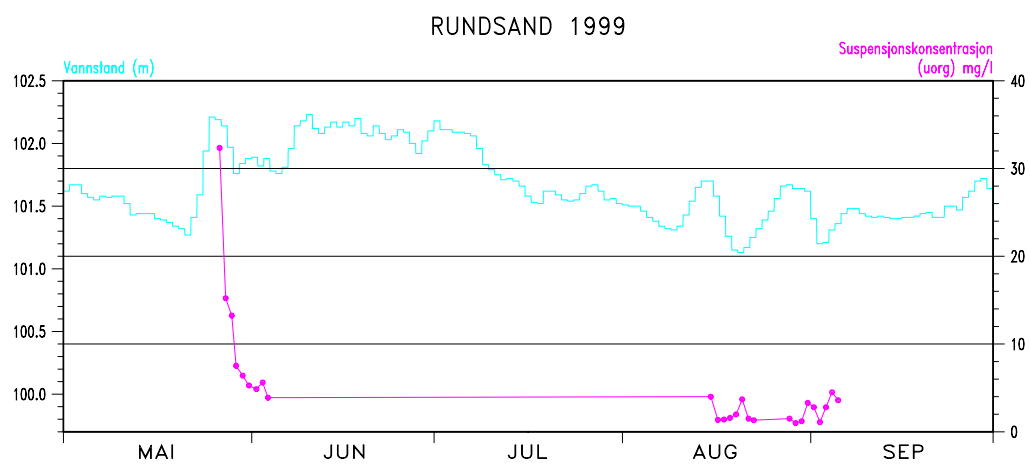
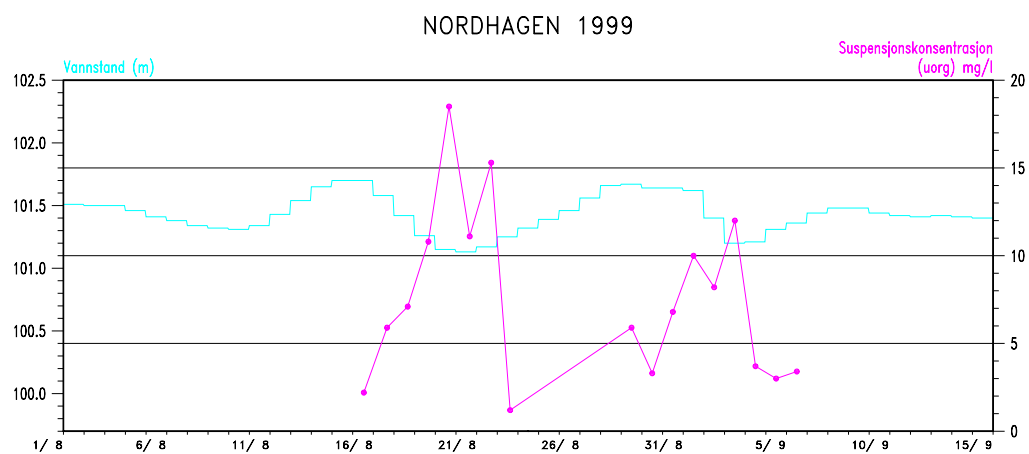


Fig. 8.14. Nordhagen 1999 og Rundsand 1999.

8.6 Sedimentfeller, måleresultater.

I 1998 ble det satt ut rigger med sedimentfeller i hver av de tre hovedløpene nedstrøms deltaområdet. I Storråka (Glomma) ble fellene satt ut i 4 nivå, henholdsvis 1 m, 2 m og 3 m dyp. I Sniksandråka og Rosholmråka ble det målt i 3 nivåer, henholdsvis 1 m og 2 m. Fellene ble satt ut første gang 4 mai 1998 og sto ute fram til 26 september. Fellene ble tømt jevnlig for å få registreringer fra forskjellige referanse og pendlingsperioder. Måleperioder og resultater er angitt i fig. 8.15-8.17. Resultatene er presentert i g/døgn * m² for at resultatene i de forskjellige periodene skal kunne sammenlignes. Sedimentfellene gir et integrert bilde av sedimentmengden som er i suspensjon i vannmassene i måleperioden. Det framgår av resultatene at det er en variasjon med dyptet i tillegg til variasjon mellom periodene.

Det er også stor forskjell på de enkelte lokalitetene. Sedimentfellene ved utløpet av Storråka fanger opp materiale som fra erosjon langs Glomma, Storsandråka og Svelle. Fellene ved utløpet av Sniksandråka og Rosholmråka fanger materiale fra erosjon langs disse løpene i tillegg til det som tilføres fra Glomma oppstrøms deltaområdet. Målingene viser at det i de fleste tilfelle var noe mer materiale i suspensjon i pendlingsperiodene enn i referanseperiodene. Sedimentasjonsratene i pendlingsperiodene var blant de høyeste selv om de i noen tilfeller også var høye i referanseperiodene.

8.7 Vindmålinger

For å kunne vurdere hvorvidt det har forekommet vesentlig bølgeerosjon i løpet av periodene med prøvetaking, er det sett nærmere på vindstyrken i området. Vindstyrke som middelvind pr. time med observasjoner fra Kjeller ved Lillestrøm er registrert av NILU. Vindretningene i de aktuelle periodene viste seg å være svært skiftende, men er ikke analysert nærmere fordi de sannsynligvis ikke er representative for hele området.

1997

I august og september 1997 ble det observert en maksimum vindstyrke på ca 7 m/s i de periodene det ble tatt vannprøver. Referanseperioden fra 8/9 til 13/9 hadde den sterkeste vinden, mens det i pendlingsperioden fra 12/8 til 16/8 ble observert vind opp til ca. 5 m/s. De høyeste suspensjonskonsentrasjonene er målt i Nitelva og Fetsund (usikker) i disse periodene. Ved de andre lokalitetene er den relativt like konsentrasjoner i pendlings og referanseperiodene. I pendlingsperioden fra 24/11 til 30/11 ble det målt vindstyrke med maksimum i underkant av 4 m/s. Det ser ikke ut til at vinden har hatt noen betydelig innvirkning på erosjon og resuspensjon i disse periodene.

1998

Det ble registrert noe sterkere vind over lengere perioder i referanseperioden fra 3/8 til 7/8 (maks ca 5 m/s) enn den påfølgende pendlingsperioden fra 8/8 til 16/8 (maks 5

m/s). Den andre pendlingsperioden omfatter perioden 24/8 til 29/8 ble maksimumsvinden også målt til omkring 5 m/s. Maksimumsvinden i løpet av pendlingsperioden fra 12/10 til 18/10 lå også omkring 5 m/s.

Det var en tendens til synkende konsentrasjoner gjennom referanseperioden og inn i den første pendlingsperioden med en påfølgende tendens til konsentrasjonsøkninger mot slutten av perioden. Vindstyrken fulgte en tilsvarende tendens gjennom denne perioden, men forløpet er ikke så markert at det kan vurderes å ha en klar sammenheng med endringene i suspensjonskonsentrasjonen. I løpet av den andre pendlingsperioden ble det observert en tendens til stigende suspensjonskonsentrasjoner med synkende vannstand. Den sterkeste vinden ble observert da vannstanden var på det laveste, så dette kan ha en sammenheng med økningen i konsentrasjon. Vinden avtok noe mot slutten av perioden. Samtidig ble det observert en reduksjon i suspensjonskonsentrasjon kombinert med heving av vannstand. I løpet av pendlingsperioden i oktober ble det observert et lignende forløp som i den siste perioden i august. Ved enkelte lokaliteter ble det observert en tendens til økende konsentrasjon med synkende vannstand og en påfølgende synkende konsentrasjon ved påfølgende heving av vannstanden.

1999

I 1999 ble det gjort forsøk med to pendlingsperioder 15/8 til 22/8 og 28/8 til 5/9. Det ble registrert noe sterkere vind i den andre pendlingsperioden (maks ca 8 m/s) enn i den første (maks ca 5 m/s).

Konsentrasjonene er relativt lave i begge periodene, med et maksimum i Nitelva på i underkant av 25 mg/l. Konsentrasjonene ser imidlertid ut til å være høyest i den første perioden. Det er ingen klar sammenheng mellom vindstyrke og variasjoner i suspensjonskonsentrasjoner i disse periodene

Det er vanskelig å se noen klar sammenheng mellom vindstyrke (bølgehøyde) og suspensjonskonsentrasjon. I enkelte situasjoner skal man ikke se bort i fra at observasjonene viser resultater som kan tyde på at vinden har en betydning. Det ble observert enkelte situasjoner hvor vinden hadde en økende tendens samtidig med en økning av suspensjonskonsentrasjonen. Ved den påfølgende reduksjon i konsentrasjonene ble det også registrert en lavere vindstyrke. Dette ble registrert samtidig med en vannstandspendling hvor vannstanden først ble senket og så hevet opp til startnivået. Dette kan forklare at det i andre situasjoner ble observert en økning i konsentrasjonen med stigende vannstand kombinert med en mer varierende vindstyrke.

8.8 Ukependling - konklusjon

Som en sammenfattende vurdering for alle årene med målinger kan det konkluderes med at pendlingen av vannstanden i Øyeren til en viss grad påvirker partikkelkonsentrasjonen i deltaområdet. Pendlingene forårsaker imidlertid forholdsvis små endringer i partikkelkonsentrasjonen. Det er spesielt ved utløpet av Svelle (Nordhagen), men også ved målepunktene i Nitelva og Leira hvor

konsentrasjonsendringene er mest markerte. Erosjonen i Svelle synes altså i mange situasjoner å være større enn de nedre deler av deltaområdet. Årsaken til dette er sannsynligvis at større arealer eksponeres for bølgeerosjon i gruntvannsområdet. Under en pendling senkes vannstanden forholdsvis raskt i forhold til normal regulering av Øyeren. I slike situasjoner vil porevannstrykket ikke kompenseres av et mottrykk og friksjonen mellom partiklene reduseres. Partiklene kan derfor lettere eroderes av bølgeskyllet. Resultatene tyder på at konsentrasjonsøkningene bare forekommer i visse situasjoner. Sannsynligvis må vinden være tilstrekkelig sterk og ha en bestemt retning i det aktuelle tidsintervallet for å forårsake kraftig bølgeerosjon.

Lange elvestrekninger i de nedre deler av Nitelva og Leira er også påvirket av vannstandsendringer i Øyeren. Konsentrasjonsøkningen var oftest mest markert under pendlingene i august, men det er også registrert en viss effekt i oktober og november. Det er mulig at grunnvannserosjon kan ha betydning i disse områdene.

Målingene med sedimentfeller bekrefter at pendlingene sannsynligvis påvirker partikkelkonsentrasjonen i deltaområdet. Sedimentasjonsratene i pendlingsperiodene var blant de høyeste av flere perioder med målinger i 1998, selv om forskjellene var moderate. Målingene fra referanseperiodene viser også at pendlingene ikke alltid gir de høyeste konsentrasjonene.

Som en sammenfattende vurdering av måleresultatene kan det konkluderes med at vannstandspendlinger kan øke partikkelkonsentrasjonene og påvirke vannkvaliteten i en periode. De naturlige variasjonene i suspensjonskonsentrasjoner er imidlertid så store at konsentrasjonsendringer som forårsakes av ukependlinger antagelig har liten betydning for deltaets utvikling i et større perspektiv.

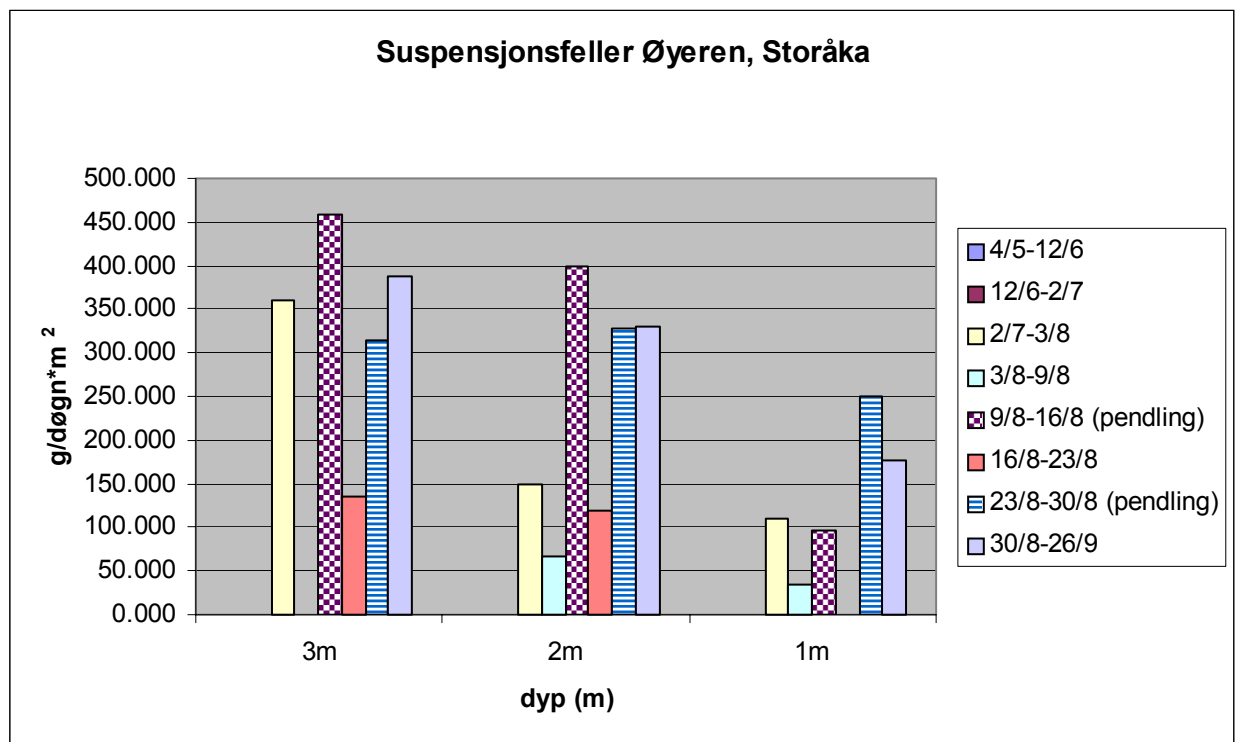


Fig. 8.15. Fellerigger ved utløpet av deltaområdet, Storåka Glomma 1998.

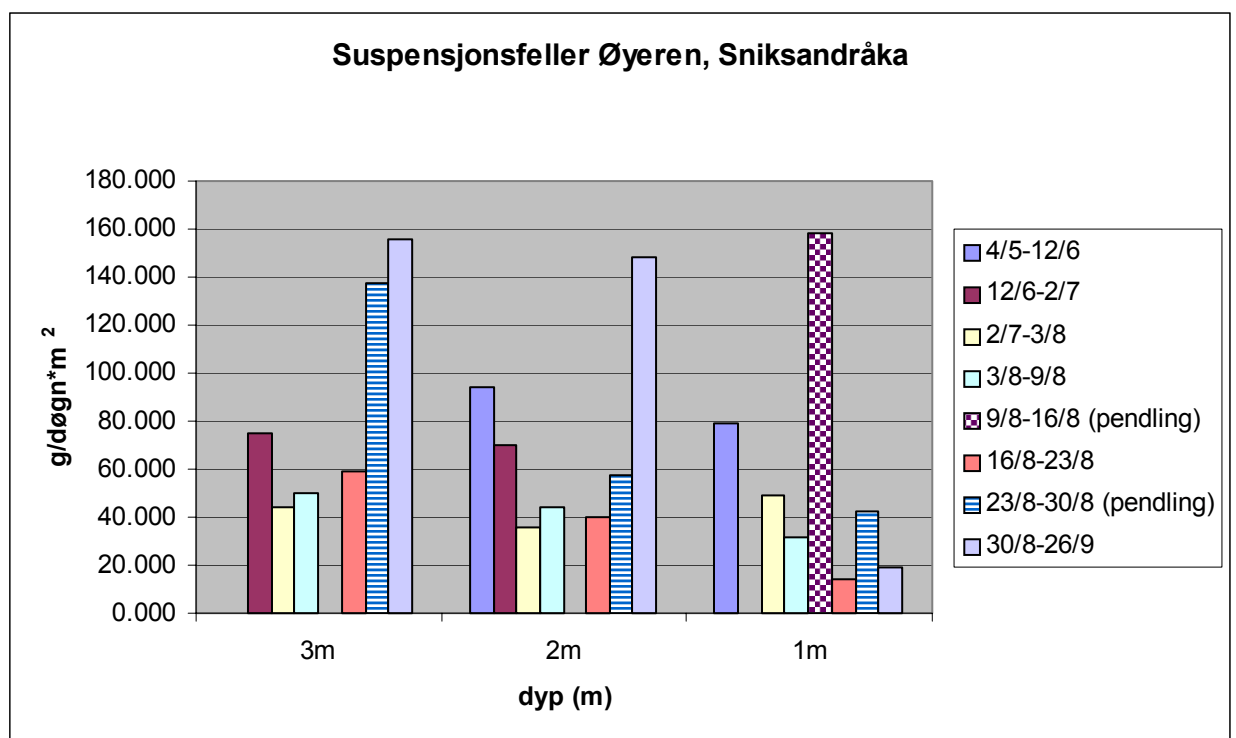


Fig. 8.16. Fellerigger ved utløpet av deltaområdet, Sniksandråka 1998.

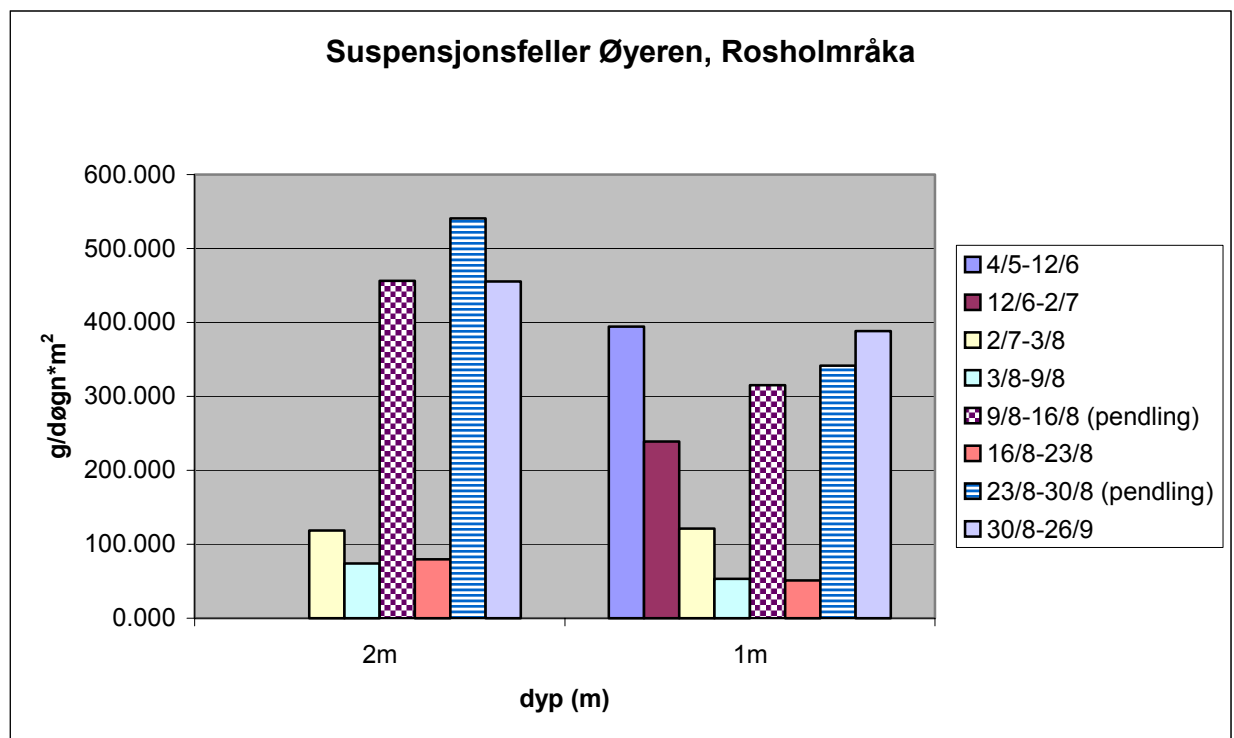


Fig. 8.17. Fellerigger ved utløpet av deltaområdet, Rosholmråka 1998.

9. Vannstandsvariasjoner og endringer i elveløpene.

Reguleringenes effekt

9.1 Regulering av Øyeren

Planer om senkning av Øyeren for å redusere flomskader ble vurdert allerede i 1790 årene, etter flommen 1789 (Storofsen). Vannstanden steg da til en høyde som lå nesten 5 meter over flommen i 1967, eller opp mot 7.5 meter over vannstanden ved flommen i 1995. Utover 1800 - tallet ble det gjennomført mer omfattende undersøkelser. I 1854 ble det etter en kongelig kommisjon igangsatt målinger i utløpselven, samt en del kartlegging. To år senere ble det lagt fram en plan som tok sikte på å redusere vannstanden under en flom på 2800 m³/s. Dette medførte utbedringer ved Mørkfoss og nedenforliggende Vittenbergfoss. Tanken var også å regulere Øyeren ved å løfte lavvannstanden slik at skipsfart og tømmerfløting ble mulig. Arbeidet ble igangsatt i 1857, men ble revidert i forbindelse med en voldsom flom tre år senere, i 1860. Erfaringer fra en ny flom i 1863 førte til større utbedringer enn først planlagt. Arbeidene med utsprenkning av utløpsprofilet inkludert en del supplerende tiltak, ble sluttført i 1869. I forbindelse med arbeidene ble det utarbeidet manøvreringsreglement for Mørkfossdammen i 1865. Denne dammen som ble oppført i 1862, fungerte aldri som den skulle, og ble revet allerede i 1890. Flere flommer i de påfølgende årene satt senkningsproblematikken på dagsorden. Verken i 1895 eller 1910 kom det lenger enn til planleggingsstadiet. I 1914 la en komite fram en betenkning som konkluderte med at en regulering av innsjøer høyere opp i vassdraget kunne oppnå en senkning i Øyeren på 1.5 m. Dette førte til at det ble igangsatt store undersøkelser. På den tiden pågikk det forhandlinger mellom staten og Kristiania kommune, som eide de respektive fallene ved Mørkfoss og Solbergfoss, om felles utnyttelse. Forutsetningen for utbygningen var at vannstanden i Øyeren skulle bli uforandret og at avløpsforholdene skulle bli som ved den gamle Mørkfossdammen. Arbeidene med fellesutbygningen startet opp i 1918 og var fullført i 1924. Etter store skader i forbindelse med en flom i 1927, ble det fra 1928 og i noen år forsøkt med endret manøvrering under flom etter forslag fra Vassdragsvesenet. I 1934 ble det fastsatt et endelig manøvreringsreglement som forble uendret fram til flommen i 1967. Etter denne flommen i 1967, ble det gjennomført endringer ved utløpsprofilet ved Solbergfoss. Utbedringene skulle muliggjøre en større senkning av Øyeren under tilsvarende flommer i ettertid. I forbindelse med opprettelsen av Bingsfoss kraftverk i 1978 ble det igjen foretatt endringer i manøvreringsreglementet. I løpet av 80 årene ble det søkt om revisjon av reguleringsbestemmelsene i Øyeren. Bakgrunn for dette var å ivareta brukerinteressene i vassdraget bedre, og å fjerne bestemmelser som primært var knyttet til fløtningsvirksomheten. Dette er innført som et prøvereglement som ble satt i verk fra 1. januar 1996.

9.2 Reguleringenens innvirkning på deltaet i nordre Øyeren

I naturtilstanden før 1862, var den årlige vannstandsending vesentlig større enn under dagens forhold. I årene 1852 - 1861 var det i middel en årlig variasjon av vannstanden på nesten 8 m fra lavvannstand i februar - mars til høyvann i mai - juni. Det var bare en kort periode i mai, juni og juli at vannstanden lå over det nivået som er fremherskende i de senere reguleringer (HRV, kote 101.34). Vannstanden i Øyeren var jevnt synkende fra noe høyere vannstander om våren enn det som er normalt i dagens situasjon, til flere meter under dagens LRV utover høsten og vinteren (fig. 9.1).

Det var ingen kunstige magasin høyere opp i vassdraget og heller ingen regulering av Mjøsa. Flomtoppene var derfor betydelig høyere. Den naturlige vekst og utvikling av deltaet i Nordre Øyeren har altså først og fremst vært preget av et sedimentasjonsmiljø med store vannstandsendinger. Allerede de første reguleringene førte til en betydelig innsnevring av vannstandsvariasjonene. De senere reguleringene videreførte denne utviklingen og reduserte samtidig perioden med vannstander under kote 101.34 (4.80 m) til perioden januar - april.

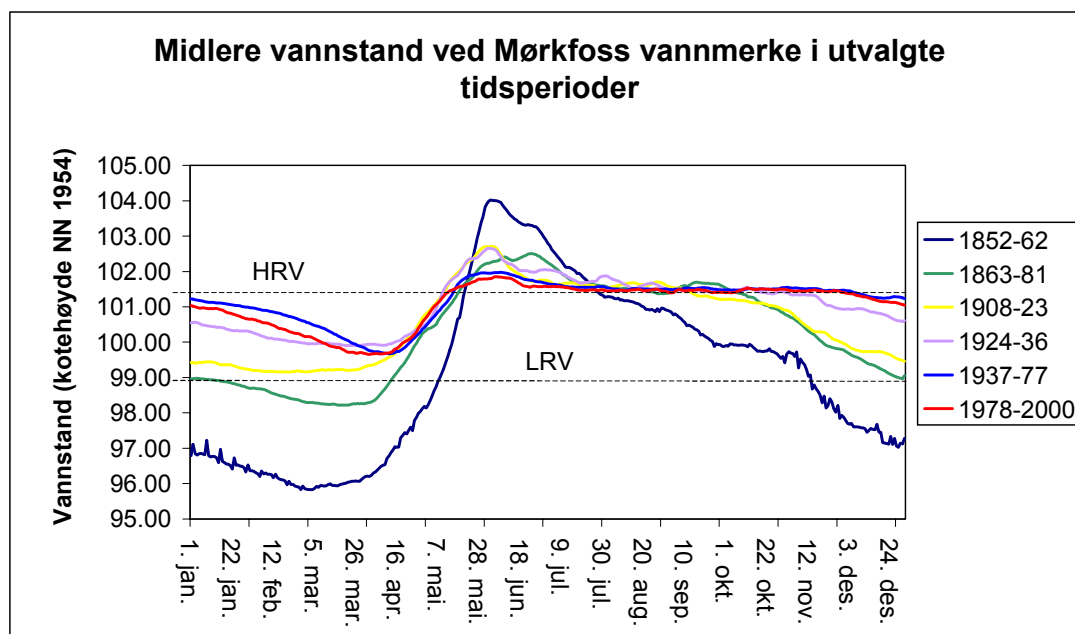


Fig. 9.1. Midlere vannstand i Øyeren i utvalgte tidsperioder. Kurven for årene 1852 - 1861 representerer naturtilstanden uten reguleringer. De øvrige kurvene er fra forskjellige reguleringer med ulik manøvrering.

I den naturlige tilstanden da Øyeren var helt uten reguleringer, ble sannsynligvis mye av det bunntransporterte materialet ført helt frem til deltafronten. Under vårflommen lå sedimentasjonsbasis høyt oppe i deltaområdet. Utover sesongen ble sedimentasjonsbasis så forskjøvet nedover i deltaet, til et nivå som er betydelig lavere enn dagens LRV. Dette førte til en videretransport av materiale utover i sesongen. Det er sannsynlig at mye av det bunntransporterte materialet i Glomma ble ført helt frem til deltafronten under slike forhold. Deltafronten, dvs. toppen av deltaskråningen, lå antagelig nær kote 96. I store deler av året lå Øyeren så lavt at plattformen var tørrlagt, fig. 9.2. Løpene på plattformen fungerte som elveløp, hvor materiale ble befordret helt fram til deltafronten. Hovedformen i deltaet med oppfyllingen av den lange plattformen, kan best forstås ut i fra en slik tolkning. De fleste innsjødelta i Norge og Norden for øvrig har en langt mindre plattform. Dette har som oftest sammenheng med en moderat vannstandsvariasjon i innsjøen. Bøvrass delta i Ottavatn/Vågåvatn er imidlertid beskrevet som et uregulert delta av liknende type, som er utviklet under forhold med store vannstandsvariasjoner. Den subaerile delen av dette deltaet (dvs. den delen av deltaet som er bygget opp over innsjøens normalvannstand) ligger som en forholdsvis liten vifte i øvre del. Plattformen er 9.7 km lang og strekker seg ned til et dypbasseng (Karlsen og Stene (1978), Elster (1987), Elster, Bogen og Ottesen (1996)).

Reguleringene av Øyeren førte til at den fremherskende sommervannstanden ble høyere enn før. Samtidig ble de laveste vannstandene fjernet og hyppigheten av markerte flommer betydelig redusert, se fig. 9.3. Dette kan ha ført til en gradvis heving av sedimentasjonsbasis slik at bunntransporten stopper opp i hovedløpet ved Årnestangen under sommervannstand. Over tid kan dette være årsaken til at det ble dannet en øy i Glommas hovedløp ved samløpet Nitelva og Glomma. Etter tilstrekkelig stor pålagring over lang tid, ble det først dannet et bankesystem som etterhvert ble til en øy. Først i 1970 årene ble den merket inn på kartene. Dannelsen av denne midtbankeøya er sannsynligvis en virkning av at reduksjonen i sedimentasjonsområdet for bunntransporten stadig har avtatt siden de første reguleringene ble iverksatt. Like nedstrøms dette området er det en markert reduksjon av median korndiameter på bunnmateriale fra mellom 0.3 - 0.5 mm til 0.063 - 0.125 mm. Denne raske reduksjonen, tyder på at dette er en hovedsedimentasjonsområde for bunntransportert materiale under nåværende manøvreringsreglement og vannføringsforhold. En liknende reduksjon i kornstørrelse er registrert i de to andre elveløpene. Det er dermed sannsynlig at det også forekommer en viss sedimentasjon i disse løpene, men den har ikke vært tilstrekkelig stor til at det har blitt dannet nye øyer. På bakgrunn av bunnprøver og bunntransportmålinger fra elveløpene kan det skisseres et kart over beliggenheten av sedimentasjonssoner for forskjellige vannstander i Øyeren under nåværende reguleringspraksis, se fig. 9.4.

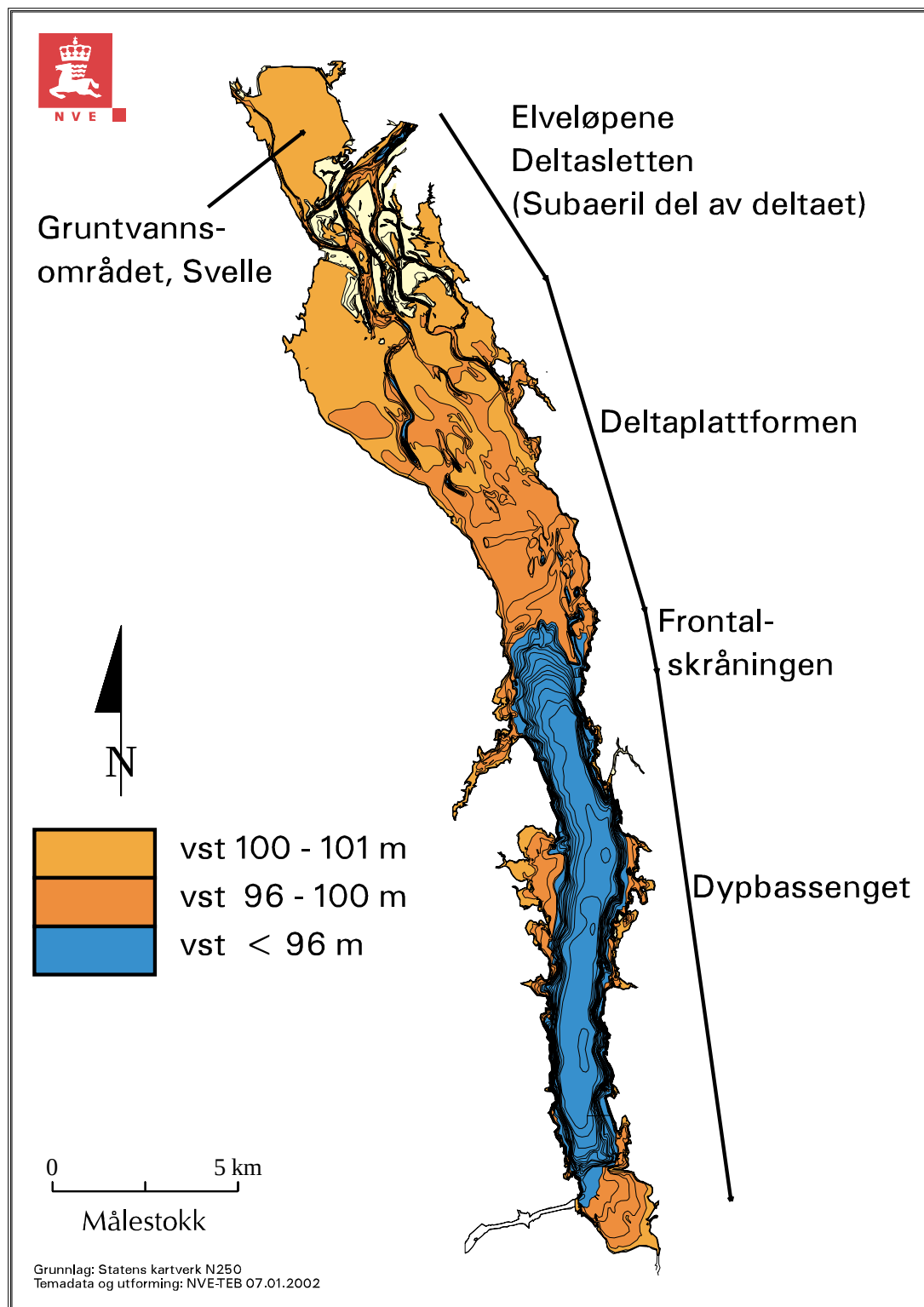


Fig. 9.2. Deltaet i nordre Øyeren med vannstanden på kote 96, slik den må ha ligget under deler av året i naturtilstanden.

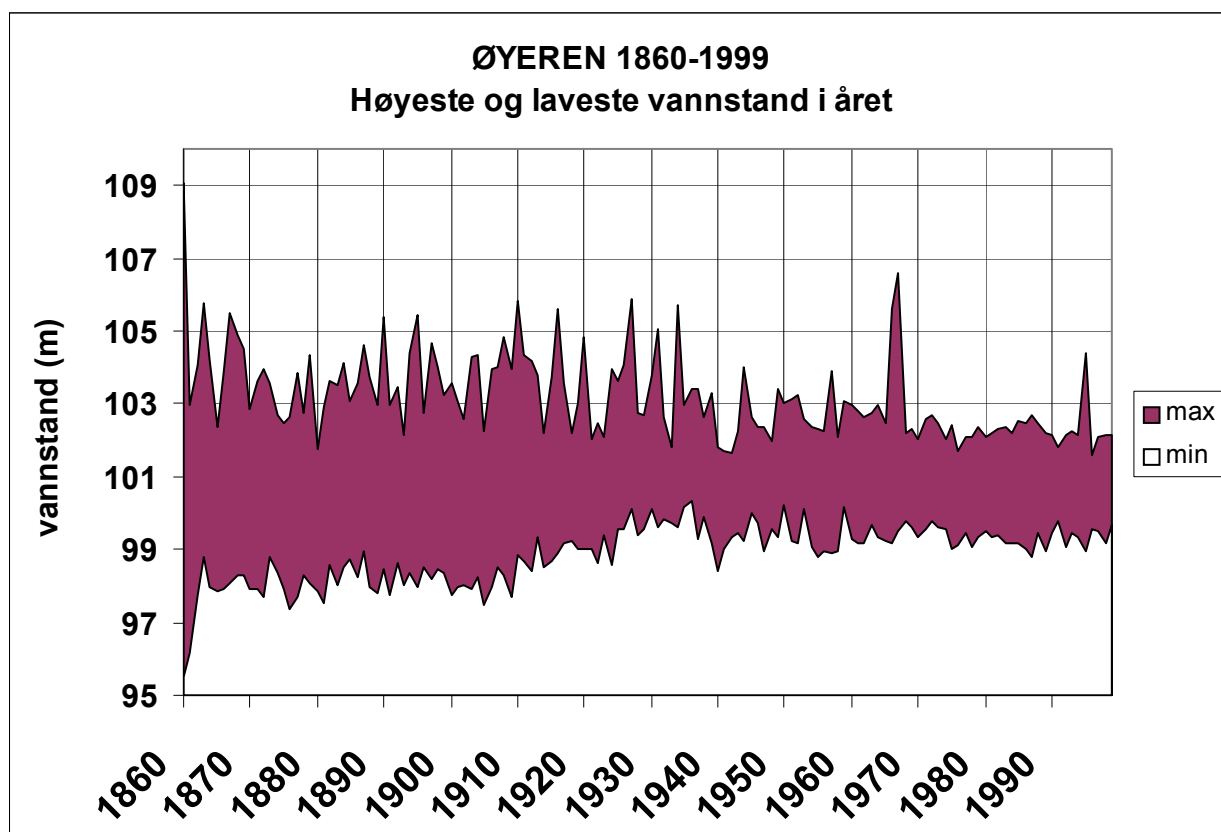


Fig. 9.3. Høyest og laveste døgnmiddel vannstand i året i perioden 1860 - 1999.

Utover på plattformen avtar korndiameteren ytterligere. Midlere kornstørrelse 1.5 - 2 km nedstrøms Årnestangen ligger i siltfraksjonen. En yttergrense for middelkornstørrelse i sandfraksjonen, dvs fraksjoner 0.063 mm, ligger derfor i dette området. En lignende yttergrense for sand er også påvist i de andre løpene, men i noe varierende avstand fra deltasletten. På plattformen sorteres sandfraksjonene ut, slik at bunnmaterialet i løpene videre utover domineres av siltfraksjoner. Antageligvis lå yttergrensen for sandfraksjoner noe lenger fremme under de tidligere reguleringene med større nedtapping i deler av året. Under naturforhold ble sannsynligvis sandfraksjonene ført helt frem mot dypbassenget.

Under høye vannstander fører sannsynligvis oppstuvning til at hovedsedimentasjonsområdet ved midtbanken blir forskjøvet oppover i deltaområdet. Observasjoner fra flommen i 1995 bekrefter dette. Det ble da registrert en betydelig sedimentasjon på strekningen fra Fetsund og ned mot Fautøya.

Når materialet begynner å sedimentere i elveløpet, vil vannmassene etter hvert begynne å erodere i elvebreddene for å opprettholde det samme tverrsnittsareal. Opphopningen av masser i dette området kan dermed være årsaken til den omfattende erosjonen i elvebredden langs Årnestangen.

Etableringen av midtbanken som senere ble til Midtbankeøya/ Flatsand har også ført til at en større andel av vannføringen fra Glomma ledes inn i Storsandråka. Når vannføringen øker, må nødvendigvis tversnittsarealet øke som en tilpasning til de nye forholdene. Dette er sannsynligvis årsaken til den kraftige erosjonen som kan iakttas i elvekanten i de nedre deler av Storsandråka. Den sørøstlige tangen på Storsand er også utsatt for kraftig tilbakeskridende erosjon. I nordenden av Storsand har den kraftige erosjonen også sammenheng med at strømretningen ble rettet direkte mot elvekanten.

Under høyere vannstander enn sommervannstand (101.34 m), er det sannsynlig at det bunntransporterte materialet pålagres lenger opp i hovedløpet. Etter ekstremflommen i 1995 ble det iakttatt en oppgrunning på flere meter på strekningen fra Fautøya og opp mot Fetsund. Denne oppgrunningen kan ha sammenheng med at hovedområdet for sedimentasjon av bunntransporten forflyttes oppstrøms under høy vannstand i Øyeren. Selv om flommene er av relativt kort varighet, så kan materialtransporten være betydelig.

Deltaets vekst fra ca. 1870 til 1985 er vist i fig. 9.5 og 9.6. Situasjonen i 1870 representerer forholdene slik de var før effekten av reguleringene ble merkbare.

Glommas hovedløp lå lenger mot øst, med færre løpsforgreninger. Fautøyas østre del har blitt erodert kraftig, men den har vokst tilsvarende på vestsiden. Arealet av deltasletten har vokst kraftig. Den årlige utbyggingen av deltasletten har forløpt i et raskere tempo de siste 100 år, enn i tidligere tider, jfr. fig. 9.6 og 9.7. Dette har sannsynligvis sammenheng med at reguleringene forskjøv tyngdepunktet i akkumulasjonsområdene fra plattformen til de øvre deler av deltaet. Den delen av bunntransporten som tidligere ble ført nedover i løpene på plattformen, stopper nå lengre opp og bidrar til å bygge opp de nedre deler av deltasletten.

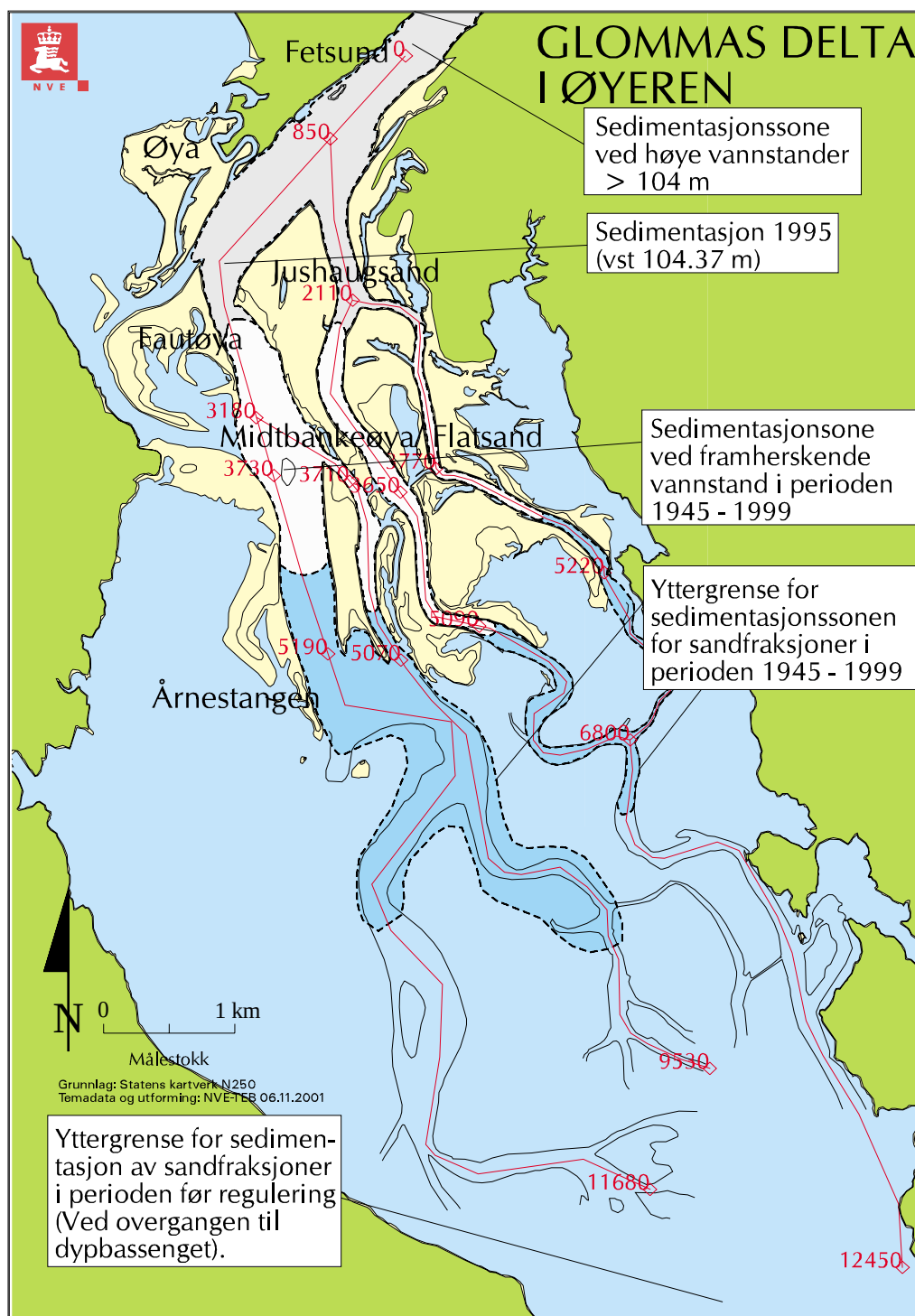


Fig. 9.4. Antatte sedimentasjonsområder ved forskjellige vannstander i Øyeren. De store variasjonene i vannstanden under naturtilstanden må ha ført til en mer utstrakt videretransport enn under de senere reguleringene.

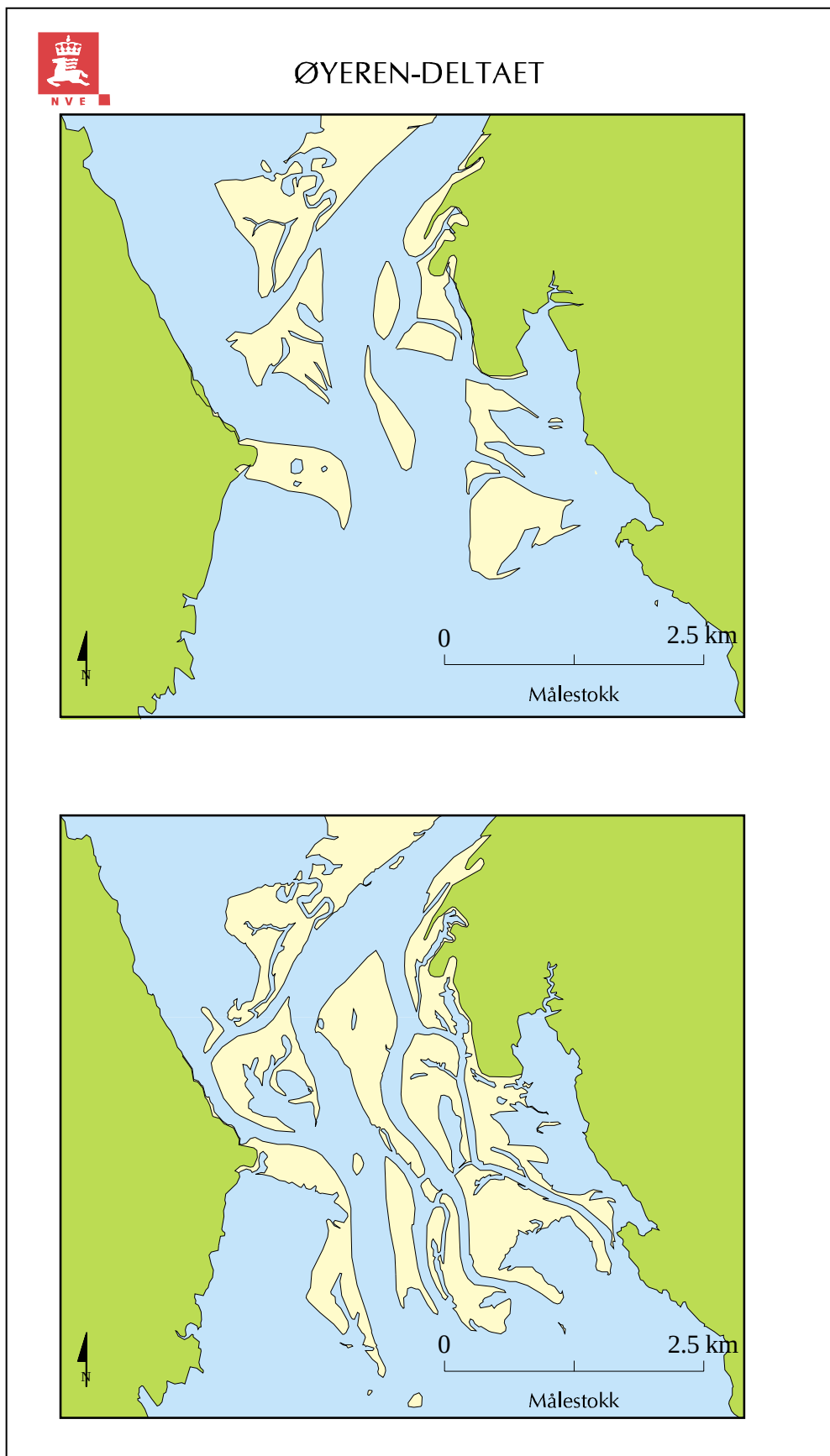


Fig. 9.5. A: Deltasletten etter kart tegnet ca. 1870
B: Deltasletten etter kart tegnet 1985.

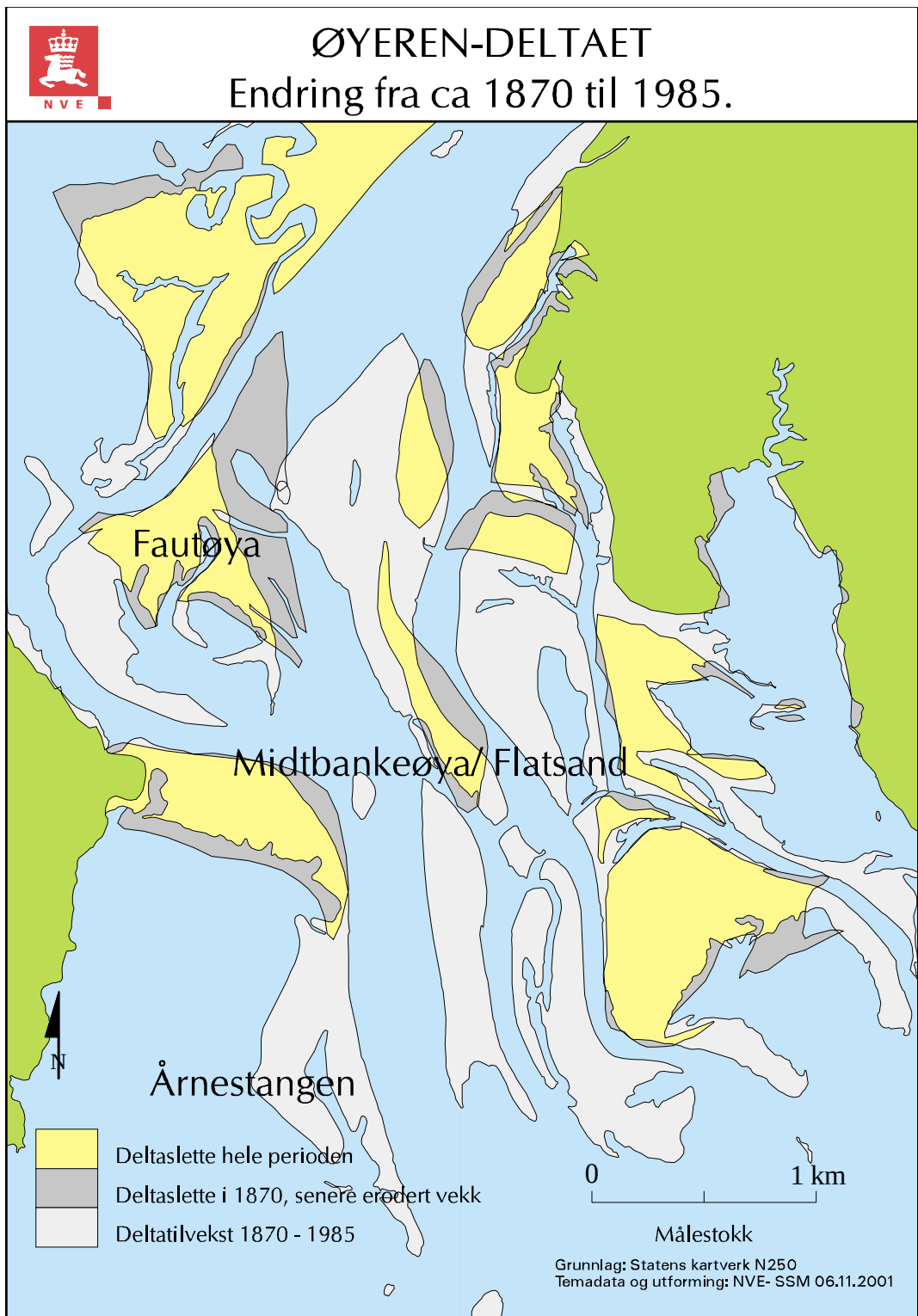


Fig. 9.6. Utviklingen av deltaet i Nordre Øyeren fra 1870 til 1985.

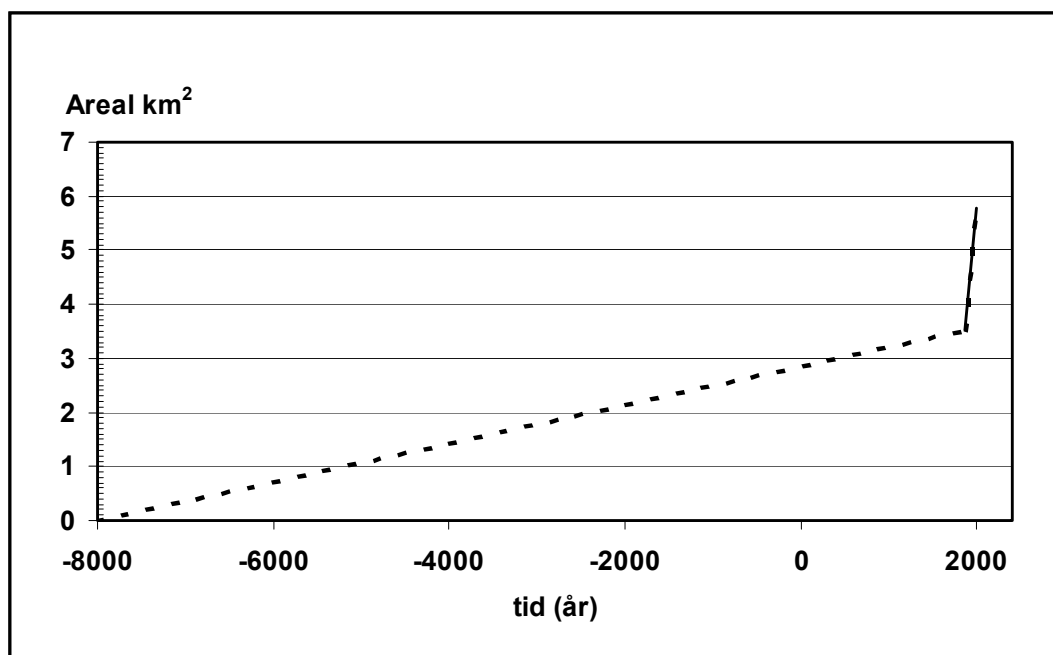


Fig. 9.7. Vekstkurve for deltaslettens areal i postglasial tid (nedstrøms Fetsund). Arealene er tatt fra kartet i henholdsvis 1870 og 1985, ca. kotehøyde 101 m.

Den gradvise innsnevringen av vannstandsvariasjonene som følge av vassdragsreguleringene i perioden 1862 og fram til i dag har ført til at sedimentasjonsområdet for suspensjonstransporten er endret. Den høye sommervannstanden som reguleringen medfører, kan ha ført til lavere strømhastigheter i deltaområdet enn ved lavere vannstander i uregulert tilstand. Materiale som tidligere ble ført ut på deltaplattformen da vannstanden sank utover sommeren, vil nå sedimentere på de distale deler av deltasletten og de øvre deler av plattformen fordi vannstanden ikke senkes under kote 101.34 m. Mindre vannføringsøkninger i Glomma vil derfor oversvømme de laveste deler av deltasletten. Lagunene er sannsynligvis bygd ut som en følge av den økte sedimentasjonen i dette nivået. Det er dermed den hurtige frambyggingen av de karakteristiske langstrakte leveene (jfr kap. 6) i munningsområdet på deltaet som medvirker til dannelsen av lagunene. Bankene på de øvre deler av plattformen bygges sannsynligvis også raskere opp enn før reguleringene startet, jfr. fig. 9.2. Eldre kart viser at lagunene var mindre velutviklet under naturforhold før 1862. Lagunenes hovedform opprettholdes ved at sedimentasjonen i gruntområdet inne i lagunene mottar mindre sedimenter enn leveene.

De store endringene i sedimentasjonsområdet for suspensjons- og bunntransportert materiale er hovedårsaken til at arealet av den subaerile delen av deltaet har økt så sterkt etter at vassdraget ble regulert. Siden de høye flomvannstandene har avtatt i hyppighet, vil den vertikale oppbyggingen av de høyereliggende deler av deltasletten imidlertid reduseres sterkt.

9.3 Endringer etter siste reguleringsreglement

Karter fra 70-årene og senere oppmålinger viser at Midtbankeøya/ Flatsand har forflyttet seg nedstrøms etter at den først dukket opp som en bank på 40 tallet og senere som en etablert øy i løpet av 70 tallet. Denne forflytningen har sannsynligvis sammenheng med overgangen til en ny manøvrering i forbindelse med igangsettelsen av Bingsfoss kraftstasjon og en forrykking av likevekten som er etablert i reguleringsperioden 1945 - 1977. Reguleringen som ble innført i 1977, holdt vannstanden lavere i månedene desember - mars enn hva som var tilfelle i perioden 1945 - 1977. Vannstandsregimet i Øyeren ble dermed endret til en noe lengre varighet på lavere vannstander, jfr. fig. 9.1. Basis for akkumulasjon av bunntransportert materiale ble dermed forskjøvet noe lenger ned i deltaet. Forflytningen av Midtbankeøya/ Flatsand reduserte belastningen på elvebredden ved samløpet Nitelva - Glomma. Dette resulterte i en stabilisering av en tidligere aktiv erosjonskant, og en forflytning av aktiviteten nedstrøms.

9.4 Reguleringsalternativ for Øyeren

Ifølge manøvreringsreglementet fra 1934 skulle det tas sikte på å senke vannstanden med 0.45 m i måneden fra 1. desember og fram til utgangen av mars. I praktiseringen av reglementet før Bingsfoss-utbyggingen var det imidlertid en gradvis nedtapping av Øyeren fra 1. desember fram til siste halvdel av februar. Deretter økte nedtappingshastigheten fram mot minimum ved utgangen av mars og en rask oppfylling under vårfloppen. Sommervannstanden skulle ikke underskride kote 101.34 (4.80). Dette alternativet er betegnet som 0-alternativet som var den gjeldende praktiseringen av reglementet da naturreservatet ble opprettet i 1975, se fig. 9.8.

Etter Bingsfoss førte praktiseringen av reglementet til en jevnere forløp på nedtappingen gjennom perioden fra 1. desember og fram til minimum ved utgangen av mars. Dette førte til at vannstanden ble liggende lavere utover vinteren enn tidligere. Forklaringen på dette var at Akershus energiverk krevde at manøvreringsreglementets punkt om jevn nedtapping fra 1. desember skulle følges punktlig for å oppnå størst mulig fall ved Bingsfoss kraftstasjon. Dette er den gjeldende praktiseringen av reglementet, se fig. 9.9.

I 1996 ble det imidlertid innført et prøvereglement som skulle holde vannstanden høy (sommervannstand) fram til ca 1. mars. Årsaken til dette var at Øyeren skulle være islagt før nedtappingen startet. På denne måten blir bankene dekket av is når vannstanden synker. Bankene blir dermed mindre eksponert for sandflukt under lav vannstand om våren. Prøvereglementet åpnet også for ukependling av vannstanden i opp til 3 uker etter 10. august. Under pendlingene kunne vannstanden variere med opp til totalt 0.7 m mellom kote 101.74 (5.20) og kote 101.04 (4.50), men slik at vannstanden ikke senkes med mer enn 0.10 m pr. døgn. Som en utvidelse av prøvereglementet ble det også foreslått en gytevannstand der vannstanden senkes noe saktere etter vårfloppen i mai /juni enn hva som har vært tilfelle i tidligere reglementer. Det er også foreslått en døgnregulering på 0.10 m rundt kote 101.5, se fig. 9.10.

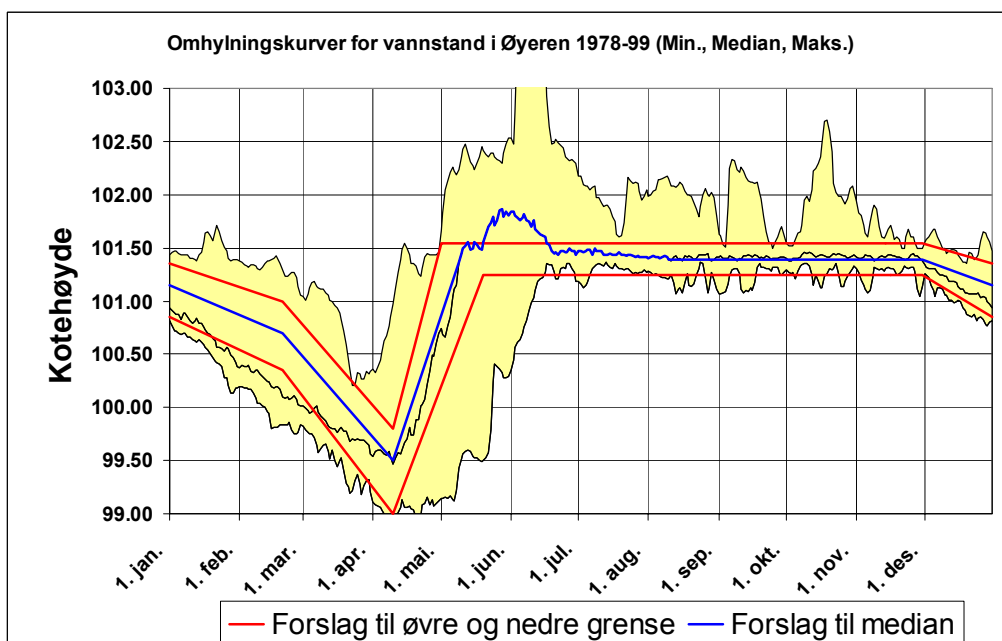


Fig. 9.8. Stilisert skisse av det manøvreringsreglementet som er betegnet som ”0-alternativet”. Reglementet er inntegnet i et diagram med omhylningskurver for vannstander i perioden 1978- 1999. Denne praktiseringen av manøvreringsreglementet fra 1934 ble benyttet i perioden 1945 til 1977 og var det gjeldende reglement da naturreservatet i Nordre Øyeren ble etablert i 1975.

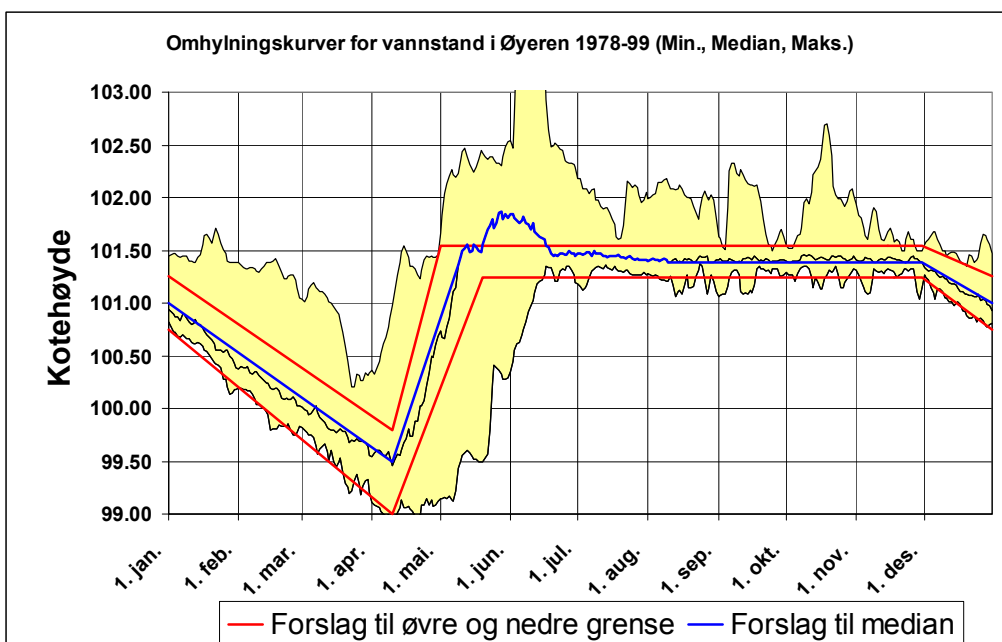


Fig. 9.9. Stilisert skisse av reguleringen etter etableringen av Bingsfoss kraftstasjon. Reglementet er inntegnet i et diagram med omhylningskurver for vannstander i perioden 1978- 1999. Denne praktiseringen av manøvreringsreglementet fra 1934 ble benyttet i perioden 1978 til 1996.

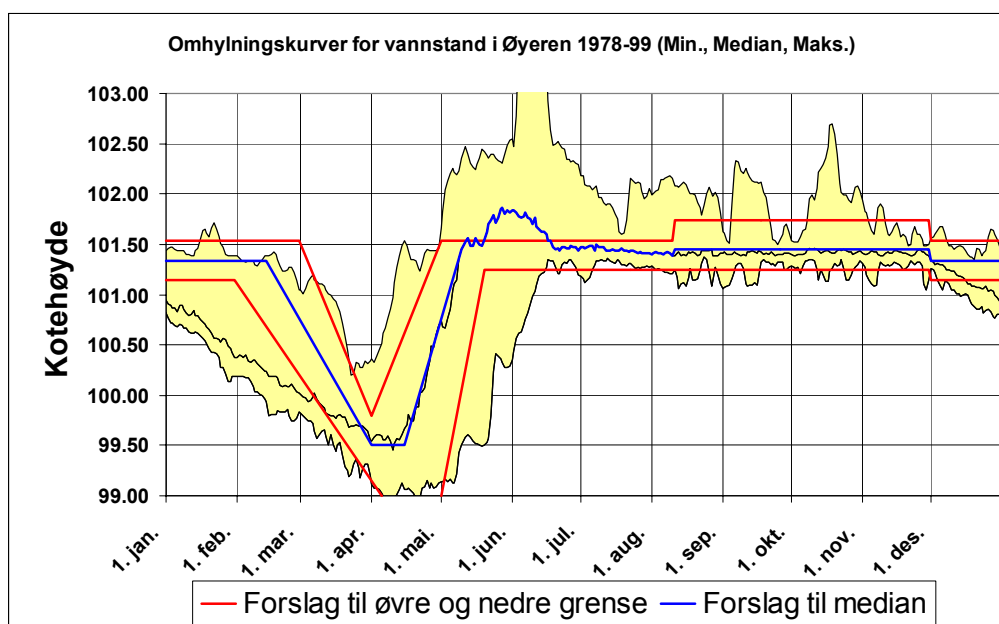


Fig. 9.10. Stilisert skisse av forslag til nytt manøvreringsreglement for Øyeren. Reglementet er inntegnet i et diagram med omhylningskurver for vannstander i perioden 1978 - 1999.

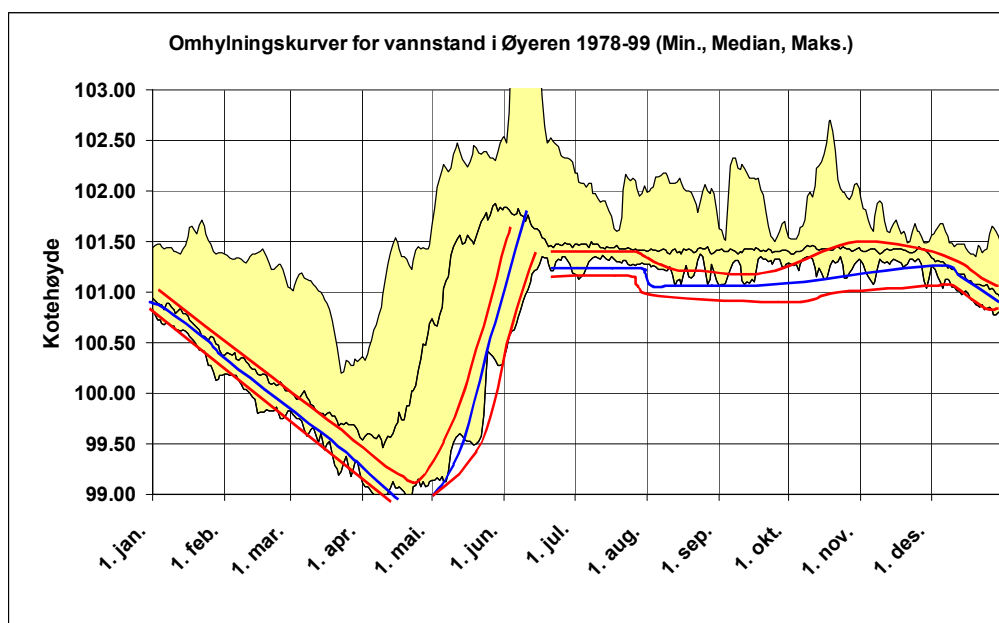


Fig. 9.11. Stilisert skisse av forslag til nytt manøvreringsreglement for Øyeren som tar hensyn til ønskede vannstandsendringer for fugl. Reglementet er inntegnet i et diagram med omhylningskurver for vannstander i perioden 1978 - 1999.

I det såkalte fuglealternativet er det ønske om å starte nedtappingen i desember. Minimumsnivået inntreffer i begynnelsen av april etter en jevn senkning gjennom hele vinteren. I det foreliggende forslaget er det også ønske om å redusere minimumsvannstanden til ca kote 99.0 og en senere oppfylling enn ved de andre forslagene. Det er også forslått at vannstanden senkes noe i august og september i forhold til dagens sommervannstand på kote 101.34 for å tørrelegge mudderbankene på plattformen av hensyn til beitende vadefugler, se fig. 9.11.

Ved innføring av en ny reguleringspraksis (0-alternativet og prøvereglementet) som igjen forkorter perioden med lav vannstand, er det sannsynlig at utviklingen fra perioden etter opprettelsen av Bingsfoss-kraftstasjon i 1977 kan reverseres. Midtbankeøya/ Flatsand vil da antagelig flytte seg, eller bygges ut i oppstrøms retning. Utbygging eller flytting av øya oppstrøms vil også kunne medføre at erosjonsintensiteten igjen vil øke langs de øvre deler av Årnestangen (ved samløpet Glomma/ Nitelva), mens den kan avta noe lenger nedstrøms i det området hvor dagens erosjon er mest aktiv. Videretransporten av materiale i elveløpet blir imidlertid mindre ved sen nedtapping slik at belastningen på sidekantene kan bli større. I prøvereglementet ligger det et forslag som har en noe kortere varighet på lav vannstand enn 0-alternativet. Dette vil sannsynligvis forsterke denne effekten ytterligere.

Tilførselen av bunntransportert materiale er en viktig faktor for deltautbyggingen. Tilgangen på materiale varierer sannsynligvis lite med tiden, siden det finnes et stort tilfang på materiale i Glommas hovedløp. De store flommene er imidlertid avgjørende for hvor stor materialmengde som tilføres.

De største materialmengdene tilføres ved høy vannføring som sammenfaller med oppfyllingen av Øyeren i mai/ juni. Mye av dette materialet sedimenterer i elveløpene inne i selve deltaområdet og på deltasletten. Når vannstanden senkes i vinterhalvåret blir det videretransportert utover plattformen i motsetning til en sen nedtapping som innebærer at mindre materiale videretransporteres. En slik reduksjon i videretransport, med utstrakt bankedannelse i løpet, øker omfanget av den laterale erosjonen. En tidlig nedtapping vil øke videretransporten og dermed redusere mulighetene for lateral erosjon. En økning i bunntransporten på grunn av økt materialtilførsel inn i deltaområdet vil ytterligere forsterke bankedannelsen. Under alternativet med sen nedtapping vil dette derfor gi større konsekvenser i form av økt erosjon.

Frostens virkninger kan imidlertid ha stor betydning for skjærfastheten i materialet og dets motstandsdyktighet mot erosjon. Hvis nedtappingen av Øyeren starter i desember blir større deler av skråningene langs elvebreddene eksponert for frost i en lengere periode enn hvis nedtappingen starter i mars. Høy vannstand helt frem til mars, vil imidlertid bety at omfanget av frostpåvirkning blir mindre. Dette fører sannsynligvis til at erosjonsintensiteten langs elvestrekninger med bratte siltige skråninger også blir mindre. Utstrakt erosjon av elvebreddene foregår i områder hvor elvebreddene er eksponert for sterke skjærkrefter fra elvevannet, dvs. der hvor elveløpet krummer eller der hvor strømhastigheten styres inn mot elvebredden av andre årsaker. Frostens betydning for intensiteten i erosjonsprosessene medfører at tilgangen på materiale vil

være årstidsavhengig. En flom tidlig om våren vil få langt mer tilgang på materiale enn en tilsvarende høstflom. Undersøkelser i andre områder (Gatto 1995) har vist at frostens virkning har avgjørende betydning for hvor mye materiale som utsettes for fluvial erosjon. Det må derfor påregnes at erosjonsomfanget blir større når elvebredden eksponeres for frost over en lang periode slik som i alternativet med tidlig nedtapping.

Materialet som tidligere ble ført ut på deltaplattformen når vannstanden sank utover sommeren, vil nå sedimentere på de distale deler av deltasletten fordi vannstanden ikke senkes under kote 101.34 m. Mindre vannføringsøkninger i Glomma vil derfor oversvømme de laveste deler av deltasletten. Lagunene er sannsynligvis bygd ut som en følge av den økte sedimentasjonen i dette nivået. Lagunenes hovedform opprettholdes ved at sedimentasjonen i gruntområdet inne i lagunene mottar mindre sedimenter enn leveene. Manøvreringsalternativet som innebærer sen nedtapping av vannstanden gir lenger varighet av det konstante nivået som er gunstig for lagunenes utvikling.

Ukependlinger av vannstanden på 0.7 m/uke som er foreslått i det nye forsøksreglementet, fører sannsynligvis ikke til endringer i hovedformen av lagunene, men kan lokalt gi høye partikkelkonsentrasjoner. Pendlingen av vannstanden i Øyeren vil til en viss grad påvirke partikkelkonsentrasjonen i deltaområdet. Det er spesielt ved utløpet av Svelle (Nordhagen), men også ved målepunktene i Nitelva og Leira at konsentrasjonsendringene er mest markerte. Erosjonen i Svelle synes altså i mange situasjoner å være større enn de nedre deler av deltaområdet. Årsaken til dette er sannsynligvis at større arealer eksponeres for bølgeerosjon i gruntvannsområdet. Rask nedtapping fører til et overtrykk i bunnsedimentene slik at den kritiske skjærspenningen for erosjon blir mindre. Dette innebærer at vind eller strøm lokalt kan forårsake høyere suspensjonskonsentrasjoner enn hva som ellers ville vært tilfelle. Under en rask nedtapping av vannstanden vil det dannes en høy grunnvannsgradient med et overtrykk i sedimentene langs kanten av bratte skråninger, fordi trykket ikke blir kompensert av et tilsvarende mottrykk fra elvevannet. Dette overtrykket reduserer skjærfastheten i skråningen og forårsaker små utglidninger. Modellberegninger av skråningsstabiliteten langs de bratte kantene ved Fautøya viste imidlertid at en pendlingsamplitude på 0.6 m /uke ikke er tilstrekkelig stor til å medføre utrasninger i det aktuelle materialet.

Fuglealternativet medfører at nedtappingen starter omkring 1. desember, det samme som har vært tilfelle i årene 1977 til 1996. Det vil imidlertid åpne for et lavere minimum om våren og en noe lavere sommervannstand. En lengere varighet av lavere vannstander vil få en motsatt konsekvens av det som er beskrevet om en heving av vannstanden. Videretransport av materiale vil sannsynligvis tilta noe i forhold til hva som har vært tilfelle i årene 1977 til 1996. Dette kan blant annet føre til en forsterkning av tendensen til forflytning av Midtbankeøya/ Flatsand i nedstrøms retning.

En lavere sommervannstand som basisvannstand kan bety kortere perioder med leveesedimentasjon og dermed en reduksjon i den vertikale oppbygningen som er

viktig for lagunenens utvikling. Små vannføringsøkninger i Glomma vil derfor i mindre grad oversvømme de laveste deler av deltasletten. Fuglealternativet vil føre til at sedimentasjonen på deltasletten vil forflyttes til et noe lavere nivå enn hva det har vært under praktiseringene av manøvreringsreglementet etter 1934. En noe redusert sommervannstand kan føre til at bølgeerosjonen i gruntvannsområdene tiltar noe, men virkningen er sannsynligvis liten.

En lav vintervannstand vil opprettholde omfanget av frostpåvirkning på elvebreddene i deltaområdet på samme nivå eller i noe større grad enn i perioden 1977 til 1996.

10. Sammenfattende diskusjon

Denne undersøkelsen har vært rettet mot å klarlegge vassdragsreguleringenes virkning på erosjon og sedimentasjon i deltaet i nordre Øyeren. Undersøkelser av tidligere og nåværende reguleringers virkninger og felteksperimenter i tilknytning til forsøkskjøringer, har vist at vannstanden i Øyeren og gradienten på vannlinjene har avgjørende innvirkning på erosjons- og sedimentasjonsprosessene i deltaet.

Under naturforhold før de første reguleringene ble iverksatt i 1862 ble sedimentene avsatt over et område med utstrekning ned til den daværende deltafronten ved overgangen til dybbassenget. Det bunntransporterte materialet som sedimenterte i de øvre deler av deltaet under høy vannføring og vannstand ble videretransportert når vannstanden i Øyeren sank utover ettersommeren. Dette sedimentasjonsområdet ble mindre etter hvert som reguleringene reduserte vannstandens høydevariasjon. Over tid kan dette være årsaken til at det ble dannet en øy i Glommas hovedløp ved samløpet Nitelva og Glomma. Etter tilstrekkelig stor pålagring over lang tid ble det først dannet et bankesystem som etterhvert ble til en øy. Først i 1970-årene ble den merket inn på kartene. Praktiseringen av reglementet etter opprettelsen av Bingsfoss kraftstasjon i 1977, holdt imidlertid vannstanden lavere i månedene desember – mars enn hva som var tilfelle i perioden 1945 - 1977. Kart og beretninger fra lokalkjente viser at dette fikk øya til å forflytte seg nedstrøms. Ved innføring av en ny reguleringspraksis som igjen forkorter perioden med lav vannstand, er det sannsynlig at utviklingen kan reverseres. Midtbankeøya/ Flatsand vil da antagelig flytte seg, eller bygges ut i oppstrøms retning. Utbygging eller flytting av akkumulasjonsområdet i oppstrøms retning vil også kunne medføre at erosjonsintensiteten igjen vil øke langs de øvre deler av Årnestangen (ved samløpet Glomma/ Nitelva), mens den kan avta noe lenger nedstrøms i det området hvor dagens erosjon er mest aktiv.

Kornfordelingsanalyser av bunnsedimentene viser at den samme tendensen også gjør seg gjeldende i de andre løpene. Det er en forholdsvis rask reduksjon i korndiameter som indikerer at det også foregår sedimentasjon i disse områdene. Forandringer i reguleringspraksis har innvirket på beliggenheten av sedimentasjonssonene.

De store endringene i sedimentasjonsområdet for supensjons- og bunntransportert materiale som oppsto på grunn av reguleringene, er hovedårsaken til at arealet av den subaerile delen av deltaet har økt så sterkt. Bankesystemene i elveløpene ble endret og det ble bygget opp en rekke nye banker i forskjellige deler av deltaet.

Hvis klimaendringer fører til økt avrenning i vinterhalvåret vil dette gi en økt vannføring inn i deltaet når vannstanden er på det laveste. Dette vil sannsynligvis øke omfanget av erosjon i denne perioden. Det nye reglementet med sen vinternedtapping kan motvirke en slik utvikling.

Tre prosesser har avgjørende innvirkning på erosjonen av elvebreddene langs løpene i deltaet. Det er grunnvannserosjon, frostpåvirkning av materialet langs elvebredden og det strømmende elvevannets skjærpåvirkning og erosjon.

Skjærkreftene vil være ekstra store der hvor elvebredden danner en vinkel med hovedstrømsretningen slik at strømmen får en komponent som er rettet inn mot elvebredden. Skjærkreftene vil også øke med fallet på vannlinjene (dvs. energigradienten) langs den aktuelle elvestrekningen. Dette innebærer at en sterkt stigende vannføring på lav vannstand om våren kan ha en spesielt stor eroderende virkning.

Under en rask nedtapping av vannstanden vil det i bratte skråninger dannes en høy grunnvannsgradient med et overtrykk i sedimentene langs kanten fordi trykket ikke blir kompensert av et tilsvarende mottrykk fra ellevannet. Dette overtrykket reduserer skjærfastheten i skråningen og forårsaker små utglidninger. Beregninger av skråningsstabiliteten langs Fautøya viste imidlertid at en pendlingsamplitude på 0.6 m /uke ikke er tilstrekkelig stor til å medføre utrasninger i det aktuelle materialet.

Frostens virkninger kan imidlertid ha stor betydning for skjærfastheten i materialet og dets motstandsdyktighet mot erosjon. Hvis nedtappingen av Øyeren starter i desember blir større deler av skråningene langs elvebreddene eksponert for frost i en lengere periode enn hvis nedtappingen starter i mars. I kalde vintre kan da 0°-isotermen trenge lenger inn i massene og utsette større deler for frostbevegelse og dannelse av islinser. Når telen går ut av jorda om våren vil større områder bli oppbløtt, slik at det lett kan eroderes av ellevannet. Høy vannstand helt frem til mars vil imidlertid bety at omfanget av frostpåvirkning blir mindre. Dette fører sannsynligvis til at erosjonsintensiteten langs elvestrekninger med bratte siltige skråninger også blir mindre.

Selv om frostpåvirkning har stor betydning for materialets beskaffenhet er imidlertid omfanget av erosjonen et samspill mellom de forskjellige prosessene. Hvis ikke materialet hele tiden fraktes vekk på grunn av skjærpåvirkningen fra de strømmende vannmassene, vil ikke frosten trenge inn til nye områder. Utstrakt erosjon av elvebreddene foregår derfor i områder hvor elvebreddene er eksponert for sterke skjærkrefter fra ellevannet, dvs. der hvor elveløpet krummer eller der hvor strømhastigheten styres inn mot elvebredden av andre årsaker. Frostens betydning for intensiteten i erosjonsprosessene medfører at tilgangen på materiale vil være årstidsavhengig. En flom tidlig om våren vil få langt mer tilgang på materiale enn en tilsvarende høstflom.

Den gradvise innsnevringen av vannstandsvariasjonene som følge av vassdragsreguleringene i perioden 1862 og fram til i dag, har ført til at sedimentasjonsområdet for suspensjonstransporten er endret. Materiale som tidligere ble ført ut på deltaplattformen da vannstanden sank utover sommeren, vil nå sedimentere på de distale deler av deltasletten fordi vannstanden nå ikke senkes under kote 101.34 med unntak av noen uker om vinteren. Mindre vannføringsøkninger i Glomma vil derfor oversvømme de laveste deler av deltasletten. Lagunene er sannsynligvis bygd ut som en følge av den økte sedimentasjonen i dette nivået. Det er dermed den hurtige frambyggingen av de karakteristiske langstrakte leveene i munningsområdet på deltaet som medvirker til dannelsen av lagunene. Eldre kart viser at lagunene var mindre velutviklet under naturforhold før 1862. Lagunenes

hovedform opprettholdes ved at sedimentasjonen i gruntområdet inne i lagunene mottar mindre sedimenter enn leveene. Manøvreringsalternativet som innebærer sen nedtapping av vannstanden gir lenger varighet av det konstante nivået som er gunstig for lagunenes utvikling.

Ukependlinger av vannstanden på 0.7 m/uke fører sannsynligvis ikke til endringer i hovedformen av lagunene, men kan lokalt gi høye partikkelkonsentrasjoner. Ukependlinger kan bare utføres i månedene august til november. Som en sammenfattende vurdering for de fem årene med målinger under pendlingsforsøkene, kan det konkluderes med at pendlingen av vannstanden i Øyeren til en viss grad påvirker partikkelkonsentrasjonen i deltaområdet. Det er spesielt ved utløpet av Svelle (Nordhagen), men også ved målepunktene i Nitelva og Leira at konsentrasjonsendringene er mest markerte. Erosjonen i Svelle synes altså i mange situasjoner å være større enn i de nedre deler av deltaområdet. Årsaken til dette er sannsynligvis at større arealer eksponeres for bølgeerosjon i gruntvannsområdet. Rask nedtapping fører til et overtrykk i bunnsedimentene slik at den kritiske skjærspenningen for erosjon blir mindre. Dette innebærer at vind eller strøm lokalt kan forårsake høyere suspensjonskonsentrasjoner enn hva som ellers ville vært tilfelle. Lange elvestrekninger oppstrøms disse målepunktene er også påvirket av vannstandsendringer i Øyeren. Konsentrasjonsøkningen var oftest mest markert under pendlingene i august, men det er også registrert en viss effekt i oktober og november.

Sedimenttilførselen til deltaet varierer sterkt fra år til år. Undersøkelser av langtidsvariasjonene basert på analyser av borkjerner, antyder en viss økning av suspensjonstransporten i perioden 1967 til 1991 sammenlignet med perioden 1934 til 1967. Årsaken kan bl.a. ha sammenheng med flomhyppighet eller økt tilgang på sedimenter på grunn av endringer i jordbrukets driftsformer i denne perioden. Den viktigste effekten en eventuell økning i tilførsel av suspensjonsmateriale vil ha på deltaet, er en raskere oppfylling av laguner og bakevjer slik at mangfoldet i deltaets mikroformer reduseres. En økning av sedimentasjonen i disse områdene kan også bety større tilgang på løst konsoliderte sedimenter for resuspensjon under bølgepåvirkning.

Tilførselen av bunntransportert materiale er en viktig faktor for deltautbyggingen. Tilgangen på bunntransportert materiale varierer sannsynligvis lite med tiden siden det finnes et stort tilfang på materiale i Glommas hovedløp. De store flommene er imidlertid avgjørende for hvor stor materialmengde som tilføres.

De største materialmengdene tilføres ved høy vannføring som sammenfaller med oppfyllingen av Øyeren i mai/ juni. Mye av dette materialet sedimenterer i elveløpene inne i selve deltaområdet og på deltasletten. Når vannstanden senkes i vinterhalvåret blir det videretransportert utover plattformen i motsetning til en sen nedtapping som innebærer at mindre materiale videretransporteres. En slik reduksjon i videretransport, med utstrakt bankedannelse i løpet, øker omfanget av den laterale erosjonen. En tidlig nedtapping vil øke videretransporten og dermed redusere mulighetene for lateral erosjon. En økning i bunntransporten på grunn av økt materialtilførsel inn i

deltaområdet vil ytterligere forsterke bankedannelsen. Under alternativet med sen nedtapping vil dette derfor gi større konsekvenser i form av økt erosjon.

10.1 Oppsummering

- Sen nedtapping fører til endring i pålagring av bunntransportert materiale i deltaet. Det antas at Midtbankeøya/ Flatsand forflyttes eller bygges ut i oppstrøms retning. Videretransporten av materiale i elveløpet blir imidlertid redusert slik at belastningen på sidekantene kan bli større.
- Sen nedtapping motvirker erosjonseffekter av en mulig klimaendring med økt avrenning i vinterhalvåret.
- Sen nedtapping motvirker inntregningen av frost i elvekantene og reduserer faren for dannelse av islinser og ødeleggelse av jordstrukturen. Dette gir større motstandsdyktighet mot erosjon.
- Sen nedtapping av vannstanden er gunstig for utviklingen av laguner i deltaet.
- Skjærkrefter øker med fallet på vannlinjene. Sterkt stigende vannføring på lav vannstand om våren kan derfor ha en spesielt stor eroderende virkning.
- Beregninger viser at en pendlingsamplitude på 0.6 m/uke ikke fører til betydelige utrasninger langs elvekantene.
- Pendlinger med amplitude på 0.7 m påvirker partikkelkonsentrasjonene i deltaet til en viss grad og kan lokalt gi høye konsentrasjoner. Pendlinger gir sannsynligvis ikke endringer i deltaets hovedformer.
- De langsiktige økningen i tilførselen av suspensjonsmateriale som synes å ha funnet sted, fører til en raskere oppfylling av laguner og bakevjer og kan redusere mangfoldet i deltaets mikroformer.

11. Referanser

- Andersen, Rolf, 1992. Øyerenreguleringen, Nordre Øyeren. Vurdering av erosjonsforholdene. Glommens og Laagens Brukseierforening, foreløpig rapport, ENCO.
- Bogen, J. 1986 Sampling of suspended sediment in streams. p 9 - 25 i: B. Hasholt (red). Partikulært bundet stofftransport i vand og jorderosjon. NHP rapp. nr. 14 1986. KOHYNO.
- Bogen, J., 1992. Monitoring grain size of suspended sediments in rivers. s 183 - 190 in J. Bogen, D.E. Walling and T. Day : Erosion and sediment transport programmes in river basins, IAHS publ no 210, 538 s.
- Bogen, J, og Bønsnes. T, E. 1996. Flomtunnel Øyeren-Oslofjorden. En vurdering av konsekvensene for erosjon i deltaet i nordre Øyeren. NVE - rapp. 10/96, 15 s.
- Bogen, J, og Bønsnes. T, E. 1998. Deltaet i Nordre Øyeren, erosjon og sedimentasjonsprosesser, kap.2 i: Akershus fylkeskommune: Miljøfaglige undersøkelser i Øyeren
- Bogen, J. og Sandersen, F. 1991. Sedimentkilder, erosjonsprosesser og sedimenttransport i Leira-vassdraget på Romerike. Delrapport i forskningsprosjektet: Forurensning som følge av leirerosjon og betydningen av erosjonsforebyggende tiltak. NVE - publ. 20/91, 126 s.
- Bogen, J., Berg,H. og Sandersen, F. 1993 Forurensning som følge av leirerosjon og betydningen av erosjonsforebyggende tiltak. Sluttrapport. NVE - Publikasjon nr. 21, 86s.
- Bølviken, B., Bogen, J., Demetriades, A., De Vos, W., Ebbing., Hindel, R., Ottesen, R.T., Salminen, R., Schermann, O. and Swennen, R. 1993. Final Report of the Working Group on Regional Geochemical mapping. Forum of European Geological Surveys (FOREGS). Geological Survey of Norway (NGU) Open File Report 93.092, 18 p., 6 Appendices.
- Danish Hydraulic Institute 1998, MIKE 11, a modelling system for rivers and channels. Manual.
- Elster, M., Bogen, J. and Ottesen, J. Sediment transport,depositional processes and particle bound elements of the Vågåvatn delta, Norway. Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol. 47
- Elster, M. 1987. Sedimentasjonsforløpet på et suspensjonsdelta. Bøvrå delta i Vågåvatn. Upubl. Hovedoppgave Geogr. Inst. Univ. i Oslo, 87s.

- Gatto, L.W. 1995 Soil freeze - thaw effects on bank erodibility and stability. CRREL special report 95 - 24, 17s.
- Gjerde, H. 1998. Øyerens geologi. En sammenfatning av Øyerens berggrunn, kvartærgeologi, hydrologi, deltaets utvikling og deltaets historie. Upubl. Naturgeografi II (GG113) Geogr. Inst. Univ. i Oslo, 81s .
- GLB. 2000. Vannstandsendringer i Øyeren fra 1852 til 2000. Glommens og Laagens brukseierforening 73 s.
- Karlsen, O.G. og Stene, R. N. 1978 Bøvra i Jotunheimen. En fluvialgeomorfologisk undersøkelse. Kontaktutvalget for vassdragsreguleringer rapp. 78/02. Prosjektledere: J. Gjessing og K. Nordseth.
- Løvoll, A, Tuttle, K. og Fritzvold, H. K., 1999. Effektregrulering og grunnvannserosjon –analyser og tiltak. Rapport nr: 12 i Effektregrulering-Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak, 39 s, 6 vedlegg.
- Pedersen, L. 1981 Glommas delta i Øyeren. En fluvialgeomorfologisk studie med en oversikt over de siste 200 års utvikling. Upubl. hovedoppgave, Geogr. Inst. Universitetet i Oslo.
- NVE, 1968. En vurdering av hastighetsøkninger i Glomma på strekningen Øyeren - Bingsfoss ved forskjellige senkningsalternativer for Øyeren (Upublisert bilag nr. 14 til "Innstilling om sikring mot skadeflom i Glomma- og Lågenvassdragene") NVE, 1968b. Forbygningsarbeider Bingsfoss - Øyeren, kart og profiler. (Upublisert notat, NVE/ Forbygningsavdelingen 30/8- 68).
- NVE, 1976. Bunnforsterking i Glomma ved Fetsund. Upublisert notat, NVE/ Forbygningsavdelingen 8/9-76.
- Probst, J. L. 1989 Hydroclimatic fluctuationsof some European rivers since 1800, s 44 - 55 i: G. E., Petts, H. Møller og A. L. Roux (red) Historical change of large alluvial rivers, Western Europe, J. Wiley & Son.
- Ree, B. 1984 Recent delta deposits as groundwater resources. The Fetsund Delta Aquifer in Lake Øyeren. Rapportserie: Hydrologi Univ. Oslo, 266s.
- Simons, D. B. og Li, R. M. 1982. Bank erosion on regulated rivers. In: R. D. Hey, J. C. Bathurst og C. R. Thorne. Gravel bed rivers Wiley & Sons ltd. 875 pp.
- Sætersdal, R. 1976. Jordarters telefarlighet i: Frost i jord nr. 17 kap. 5. Vegdirektoratet/NTNF 1976.
- Thyssen, R. 1976. Materialbudsjettet i Svellet, nordre Øyeren. Upubl. Hovedoppgave i geomorfologi, Geogr. Inst, Univ. i Oslo. 122 s.
- UNESCO (1978) Nytt fra UNESCO, Norsk utgave av Unesco features. nr. 8/78.

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

Utgitt i Rapportserien i 2002

- Nr. 1 Lars-Evan Pettersson: Totalavløpet fra Trøndelag 1961-2000 (34 s.)
- Nr. 2 Amir Messiha: Avbruddsstatistikk 2001.
Statistikk over avbrudd i leveringen av elektrisk energi til sluttbrukere i Norge (67 s.)
- Nr. 3 Jim Bogen: Miljøfaglige undersøkelser i Øyeren 1994-2000.
Erosjon, sedimentasjon og deltautvikling (100 s.)