Rapport nr. 16

Virkninger av effektregulering på erosjon og sedimentasjon i vannkraftmagasiner

Effekt-regulering – Miljø-virkninger og konflikt-reduserende tiltak

Effektregulering – Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak

FoU-prosjektet Effektregulering – miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak er et prosjekt under Norges Forskningsråds Effekt-program. Prosjektet startet i 1996 og planlegges sluttført i år 2000.

Økt kraftutveksling med utlandet aktualiserer økte effektinstallasjoner og endret kjørestrategi i eksisterende og i nye kraftverk. Prosjektet fokuserer på miljøvirkninger av økt døgnregulering som synes å bli den mest aktuelle formen for effektregulering i Norge.
Særtrekk ved effektregulering er raskere endringer i de fysiske forholdene i vassdraget enn de vi er vant med ved dagens kraftverksdrift. Slike endringer vil påvirke vassdragsmiljøet på en ny måte og vil i mange tilfeller kreve nye tillatelser fra myndighetene.
Vi har så langt lite systematisert kunnskap om miljøvirkninger knyttet til døgnregulering og annen effektregulering av kraftverk.

Hovedmålsettingene for prosjektet er derfor å:

- oppgradere kunnskapen om miljøvirkninger av effektregulering
- utvikle avbøtende tiltak som kan redusere eller eliminere negative virkninger

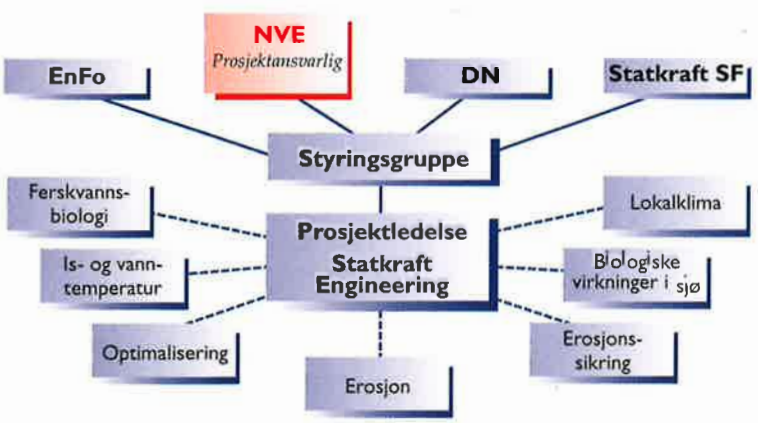
Gjennom økte kunnskaper vil utbyggere og forvaltning få et bedre grunnlag for å vurdere miljøkonsekvenser ved effektregulering og for å vurdere effektiviteten av avbøtende tiltak.

Prosjektet vurderer miljøvirkninger av effektregulering i innlandsvassdrag med vekt på virkninger i små og mellomstore innsjøer/magasin. Som eksempelvassdrag er valgt deler av Tokke-reguleringen. To delprosjekter tar i tillegg for seg mulige virkninger av økt effektregulering på biologiske forhold i fjorder.

Norges vassdrags- og energiverk (NVE) er prosjektansvarlig. Det er i tillegg etablert en styringsgruppe for prosjektet som består av representanter for Direktoratet for naturforvaltning (DN), Energiforsyningens fellesorganisasjon (EnFO), Statkraft SF og NVE. Daglig prosjektledelse utføres av Statkraft Engineering as.

Prosjektet er inndelt i seks delprosjekter knyttet til innlandsvassdrag og to delprosjekter knyttet til fjord. Delprosjektene knyttet til innlandsvassdrag dekker fagområdene: is- og vanntemperatur, erosjon, erosjonssikring, lokalklima, biologi og optimalisering med hensyn på teknikk, miljø og økonomi. Fjordprosjektene omfatter problemstillinger knyttet til effektregulering og virkning på fisk og algevekst.

Utførende institusjoner er: Universitetet i Bergen, Det norske meteorologiske institutt, Norsk institutt for vannforskning (NIVA), NVE, Statkraft Engineering og Universitetet i Oslo.



Ytterligere informasjon om prosjektet og publikasjoner i serien Rapport fra Effektregulering – Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak får du ved å kontakte:

Prosjektleder Elise Førde
Statkraft Grøner as
Postboks 400
1327 Lysaker

Tlf : 67128000
Fax: 67128212

e-mail: elf@statkraftgroner.no
http://www.statkraftgroner.no/project/effekt

Forsidefoto: Vegard Pettersen

EFFEKTREGULERING – MILJØVIRKNINGER OG KONFLIKTREDUSERENDE TILTAK

Delprosjekt 1.4 erosjon og sedimentasjon

TITTEL: Virkninger av effektregulering på erosjon og sedimentasjon i vannkraftmagasiner The impact of diurnal peaked regulation on erosion and sedimentation in hydropower reservoirs.	**RAPPORT NR. 16**
PROSJEKTANSVARLIG: Randi Pytte Asvall **DELPROSJEKTLEDER:** Jim Bogen	**INSTITUSJON:** Norges vassdrags- og energidirektorat
FORFATTERE: Jim Bogen, Truls Erik Bønsnes	**INSTITUSJON:** Norges vassdrags- og energidirektorat

SAMMENDRAG:
Virkninger av effektregulering på erosjon og sedimentasjonsprosesser i Vinjevatn i Tokke kraftverk har blitt undersøkt ved felteksperimenter. Det ble gjennomført felteksperimenter med målinger og registreringer av erosjon og sedimentasjon under effektregulering. Tilsvarende målinger ble også gjennomført i fire referanseperioder med normal sesongmessig regulering. Undersøkelsene viste at effektregulering med stor døgnamplitude i kombinasjon med sterk vind førte til mer erosjon sammenlignet med referanseperiodene med normal sesongmessig regulering. De forskjellige faktorene som har betydning for omfanget av erosjon forårsaket av effektregulering i forskjellig type magasiner er diskutert i rapporten.

ABSTRACT:
The impact of diurnal hydropower peaking on erosion and sedimentation processes in the Vinjevatn hydropower reservoir in the Tokke scheme in southern Norway has been studied in field experiments. During the experiments, the power stations were operated for some time in peak regulation mode. In the following reference period the mode of operation was normal seasonal regulation. It was observed that peaked regulation during periods of strong wind led to heavier erosion when compared with seasonal regulation in the reference periods. The various factors affecting erosion caused by peaked regulation in different types of hydropower reservoirs are discussed.

EMNEORD: Effektregulering, vannkraftreservoarer, erosjon, sedimentasjon.

Oslo, januar 2001

Jim Bogen
Delprosjektansvarlig

Elise Førde
Prosjektleder

ISBN 82-91904-17-0
ISSN 0809-5825

INNHOLD

FORORD 4

SAMMENDRAG 5

SUMMARY 7

1. INNLEDNING 9

1.2 Metodikk i erosjonsprosjektet 11

1.3 Karakteristikk av magasinet. 13

2. EROSJON OG SEDIMENTASJON I MAGASINET 16

2.1 Grunnvannserosjon, ras og utglidninger 16

2.2 Bølgeerosjon og undergraving av sideskråninger 18

2.3 Partikkelbevegelse og sedimentasjon. Modellberegninger 25
2.3.1. Grunnleggende likninger 25
2.3.2. Topografisk beskrivelse av magasinet og vannføringsberegninger 26
2.3.3. Beregninger av partikkelbevegelsen 27
2.3.4 Betydningen av fnokking i sedimentasjonsprosessen 29

2.4 Deltapålagring under vekslende vannstand 34

3. FORSØKSKJØRINGER I VINJEVATN 37

3.1 Forsøkskjøring 1997 37
3.1.1 Effektkjøring 1: 17/9 – 29/9 37
3.1.2 Referanseperiode 1, 30/9 – 14/10 41

3.2 Forsøkskjøring 1998 41
3.2.1 Referanseperiode 2, 19/1 – 19/2 41
3.2.2 Referanseperiode 3, 17/8 – 25/8 41
3.2.3 Effektkjøring 2, 25/8 – 10/9 42
3.2.4 Referanseperiode 4, 10/9 – 16/9 43

3.3 Diskusjon av måleresultatene 43

3.4 Sammenfattende vurdering 52

4. EFFEKTREGULERING I MAGASINER, GENERELL DRØFTING 55

4.1 Langtidsvirkninger av effektregulering i Vinjevatn 55

4.2 Undersøkelser fra andre magasiner 56

4.3 Klassifisering av norske magasiner. 58

5. EFFEKTREGULERING I ELVELØP 62

6. OPPFØLGENDE UNDERSØKELSER 63

7. REFERANSER 64

Forord

Denne rapporten omhandler virkninger av effektregulering på erosjon og sedimentasjon i magasiner og er en del av prosjektet "Effektregulering – miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak". De andre delprosjektene som er knyttet til innlandsvassdrag dekker fagområdene is og vanntemperatur, erosjonssikring, lokalklima, biologi og optimalisering med hensyn på teknikk, miljø og økonomi. Effektprosjektet ble gjennomført i perioden 1996-2000 med støtte fra Norges forskningsråd, Enfo, Statkraft, Direktorat for naturforvaltning og NVE.

Delprosjektet om erosjon og sedimentasjon i magasiner er utført ved seksjon for Miljøhydrologi, Hydrologisk avdeling i NVE av Jim Bogen og Truls Erik Bønsnes. Halfdan Benjaminsen, Margrethe Elster, Hans Christian Olsen og Fred Wenger har bidratt i prosjektet. Eva Skarbøvik har gitt innspill til kapittelet om fnokking i sedimentasjonsprosessene.

Jim Bogen

Delprosjektleder

Sammendrag

Målet for dette prosjektet er å klarlegge hvordan effektreguleringer karakterisert ved raske og hyppige vannstandsendringer innvirker på erosjon og sedimentasjonsforhold i reguleringsmagasiner. Studier av erosjon i reguleringsmagasin er ett av seks delprosjekter i FoU prosjektet "Effektregulering – miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak".

Deler av Tokkeverkene i Telemark med Vinjevatn ble valgt som studieområde for vurdering av effektreguleringers innvirkning på innsjøer. Vinjevatn er et av flere reguleringsmagasin i Tokkeverkene som ble regulert på 1950 og 1960 tallet. Magasinet har et volum på 11.2 mill m^3, en total lengde på 7.5 km og et maksimumsdyp på ca 30 m. Virkningen av effektregulering er undersøkt ved forsøkskjøringer og med målinger av sedimentkonsentrasjonen i innløpselver og utløpet av Vinjevatn, målinger av suspensjonsmaterialets bevegelser i magasinet med sedimentfeller og feltundersøkelser av erosjonsprosessene.

Under effektkjøringen i september 1997 pendlet vannstanden mellom kote 462.5 og kote 465.5 Målinger av partikkelkonsentrasjonen i tilførselselvene ga hovedsakelig verdier mellom 0 mg/l og 4 mg/l. I utløpet av magasinet økte imidlertid konsentrasjonen til 18 mg/l. Det ble målt suspensjonskonsentrasjoner på opp mot maksimalt 470 mg/l i skyllesonen langs strendene.

Det var betydelig mer erosjon og resuspensjon av partikler i magasinet under denne effektreguleringen enn i referanseperioder med normal kjøring av kraftverket. Sedimentfellene registrerte en akkumulasjon på mellom 1.0 g/døgn m2 og 2.5 g/døgn m2 på forskjellige nivå og lokaliteter i magasinet. Til sammenlikning ble det målt fra 0.03 g/døgn m2 til 0.5 g/døgn m2 under referanseperioden

Det blåste en relativt sterk vind i både effekt- og referanseperiodene i 1997. Den maksimale vindstyrken ved Nes var på 12 m/s i effektreguleringsperioden og 14 m/s i referanseperioden. Dette ga stor bølgeaktivitet i begge perioder.

Den relativt høye erosjonen under effektkjøringen er funnet å ha sammenheng med at sedimenttilførselen fra grunnvannserosjon og bølgeerosjon var større under effektregulering enn under ordinær sesongregulering.

Rask endring i vannstand gir et forhøyet porevanntrykk som ikke kompenseres av et mottrykk fra vannet under nedtapping. I den bratte skråningen mellom Vassenden og Nes førte dette til grunnvannserosjon og utglidninger når vannstanden pendlet under kote 463.5.

I de deler av reguleringssonen hvor bunnen skråner med lavt fall, er det også et forhøyet porevanntrykk som fører til redusert friksjon mellom sedimentkornene under nedtappingsfasen. Dette gir en lavere kritisk erosjonsgrense under bølgepåvirkning av sedimenter i skyllesonen langs strendene under effektregulering. Et større område ble eksponert for bølgeerosjon og tilgangen på eroderbare sedimenter ble større under effektreguleringen.

I 1998 pendlet vannstanden under effektkjøring hovedsakelig på høy vannstand mellom kote 463.5 og kote 465.5. Under forsøkene ble det målt vindstyrker på omkring 5 m/s i alle periodene. Til tross for at det var lite vind, ble det iakttatt at erosjonen i bakveggen på strandplattformen ved Sandnes forløp raskere enn under ordinær sesongregulering. Dette ble antatt å ha sammenheng med at grunnvannserosjon også bidro aktivt i tillegg til undergraving ved bølgeerosjon. Sedimentasjonen i

fellene under perioden med effektregulering var imidlertid av samme størrelsesorden som under referanseperiodene, mellom 0.03 g/døgn m2 og opp til 1.5 g/døgn m2 som maksimum.

Med en sedimentasjonsmodell er det beregnet hvor mye av erosjonsmaterialet som beveger seg gjennom magasinet og er i suspensjon ved utløpet. Ved 20 °C og 3 m senking av magasinvannstand viser beregningene at 48% av kornfraksjoner på 6 mikron som kommer fra det vestlige terskelbassenget vil være i suspensjon ved utløpet. Den tilsvarende restsuspensjonen for materiale som transporteres gjennom hele magasinet er på 15%. Ved 4 °C viser beregninger under tilsvarende forutsetninger en restsuspensjon på henholdsvis 66% og 38%. Det er foretatt tilsvarende beregninger for partikkelstørrelser i intervallet fra 63 mikron og ned til 1 mikron.

Under effektreguleringen ble det også iakttatt erosjon i deltaområdet til den største tilløpselven, Smørkleppåi. Pålagring av bunntransport under sterkt varierende vannstand synes å føre til økende instabilitet i deltaområdet. Under høy vannstand kan bunntransporten stoppe i løpene og forårsake løpsendringer. Ved lav vannstand under en påfølgende nedtapping vil deltaet eroderes. Effektregulering synes derfor å føre til økt instabilitet i tilløpselvenes delta.

Langtidsvirkninger av effektregulering i Vinjevatn er diskutert. Instabiliteten i deltaområdene vil være en vedvarende prosess så lenge det tilføres bunntransportert materiale fra nedbørfeltet. Bølgeerosjonen vil imidlertid vaske ut materiale fra de grunne områdene slik at blakkingen vil avta etter hvert. Hyppig pendling opp mot HRV (kote 465.5) vil sannsynligvis føre til en raskere erosjon av utsatte områder som Sandnes. Grunnvannserosjon vil erodere kraftig i strandplattformen mellom Vassenden og Nes ved pendling under kote 463.5. Døgnpendling mellom kote 463.5 og 465.0 vil sannsynligvis føre til minst skader. Det kan imidlertid ikke utelukkes at det også vil oppstå aktiv grunnvannserosjon i dette intervallet under langvarig effektregulering. Områdene ved Sandnes er antagelig mest utsatt og bør undersøkes nærmere.

De viktigste faktorene som har betydning for grunnvannserosjon i norske magasiner er diskutert. Grunnvannserosjon kan bli et problem i alle magasiner med glasifluviale, glasilakustrine og resente fluviale avsetninger. Reguleringshastigheten har betydning for erosjonsintensiteten og reguleringshøyden er avgjørende for hvilke områder som eksponeres for erosjon. Vanlige sesongreguleringer vil også oftest føre til utvasking av finmateriale. Tilgangen på erosjonsmateriale er derfor mindre i den reguleringssonen som har vært mest benyttet tidligere. I magasiner med en vedvarende høy sedimenttilførsel fra nedbørfeltet, vil det stadig være tilgang på nytt materiale for resuspensjon. Magasinets bunntopografi og spesielt størrelsen på grunne arealer er også viktig i denne sammenhengen. I dype basseng med små arealer over bølgebasis, vil bølgebevegelsen ha mindre betydning for erosjon og resuspensjon.

Det bør være et viktig mål i eventuelle oppfølgende undersøkelser å sørge for at det foreligger nok kunnskap til å kunne evaluere forholdene i de forskjellige sedimentasjonsmiljøene i norske vassdrag. Dette innebærer mer kunnskap om sedimenttilførsel og erosjonsforhold i aktuelle regulerings magasiner.

Summary

The aim of this project is to investigate the impact of diurnal hydropower peaking on erosion and sedimentation processes in reservoirs. The project is part of the multidisciplinary programme: "The environmental impact of hydropower peaking and possible conflict–reducing measures" funded by a consortium of several institutions.

The Tokke scheme in Telemark in Southern Norway was selected as a study area and Vinjevatn chosen for the field measurements; it is one of several reservoirs included in the Tokke scheme in the 50's and 60's. The regulated volume is about 11.2 mill. m^3, 7.5 km in total length and the deepest basin is ca. 30 m . During the experiments, the power stations at either end of the reservoir were operated for fourteen days in peak diurnal regulation mode followed by reference periods of seasonal regulation involving slower water level changes. Water samples were collected in the reservoir, in all the inflowing rivers and at the reservoir outlet to determine suspended sediment concentrations. Sediment traps were placed at four locations in the reservoir to measure deposition rates and erosion processes recorded during field inspections. The experiments were repeated the following year.

During the diurnal experiment in September 1997, the water level fluctuated between the 462.5 and 465.5 m contours, near LRW and HRW, respectively. The amplitude of the diurnal fluctuations varied between 1.5 m and 3.0 m. The peaked regulation caused heavy erosion along shorelines and in shallow areas. Suspended sediment concentrations of up to 470 mg/l were recorded in the swash zone along the shores.

The measured concentration of suspended sediments in the inflowing rivers, however, never exceeded 4 mg/l. Sedimentation rates in the reservoir traps were high during the peak regulation period, between 1.0 g/day m2 and 2.5 g/day m2. In the succeeding normally regulated reference period, the water level only fluctuated between the 464.0 and 465.2 m contours, with diurnal changes rarely exceeding 0.5 m. Sedimentation rates were now low, between 0.03 and 1.5 g/ m2.day

The relatively intensive erosion during the diurnal peaked regulation period was found to be the result of both increased sediment supply from groundwater erosion and increased wave erosion compared with the subsequent period of normal seasonal regulation. Wave activity in the reservoir was, however, similar during both these periods with strong winds of up to 14 m/s prevailing throughout.

Peaked regulation creates favourable conditions for groundwater erosion. The rapid drawdown of the water level results in uncompensated porewater pressure in the sedimentary deposits along the exposed shoreline. At some locations this excess porewater pressure caused sheet slides and groundwater spring sapping erosion.

The high sedimentation rates are attributed to a combination of sheet slides, groundwater erosion along steep slopes and intensified wave erosion. The latter was in part due to a lowered critical shear limit in the beach sediments during diurnal hydropower peaking. Even on gentle slopes there is excess porewater pressure at low water levels which reduces grain friction in the swash zone. The drawdown also increased the area exposed to wave erosion and hence the availability of erodible sediments.

During the second series of experiments, in 1998, the peaked diurnal water level fluctuation was less extreme and generally nearer HRW, between the 463.5 and 465.5 m contours. Despite the low wave activity due to wind speeds of less than 5 m/s, active erosion was observed in the headwall of the beach at Sandnes. It was found that both groundwater and wave action were contributing to the

erosion here. Sedimentation rates in the reservoir were however low in both the peaked regulation and reference periods, between 0.03 and 1.5 g/ m2 day.

A sedimentation model was applied to calculate the theoretical proportion of different grain size fractions remaining in suspension at the reservoir outlet. The results indicate that 48% of the 6 micron particles supplied from the western basin remain in suspension at the outlet, assuming a water temperature of 20 °C and a drawdown level of 3 m. The corresponding value for the particles moving through the whole reservoir from the river Smørkleppåi was 15%. The respective proportions of sediment remaining in suspension at 4 °C were calculated as 66% and 38%. The results from similar calculations for other particle sizes between 1 and 63 microns are presented in the report.

Active erosion was observed in the delta area of the main inlet river Smørkleppåi during the peaked regulation experiments. The frequent water level fluctuations caused bed load to be deposited during high water levels, resulting in lateral channel instability on the delta surface and channel incision during drawdown.

The results of the experiments are extrapolated as part of the assessment of long term effects of diurnal peak regulation. It was found that a continuous supply of bed load from the catchment area promotes persistent instability in the delta areas. The high turbidity caused by wave erosion will decrease with time, due to the progressive removal of available sediment. However, in reservoirs with a large allochtonous sedimentation rate such as glacier fed lakes, resuspension rates and concentrations will remain high.

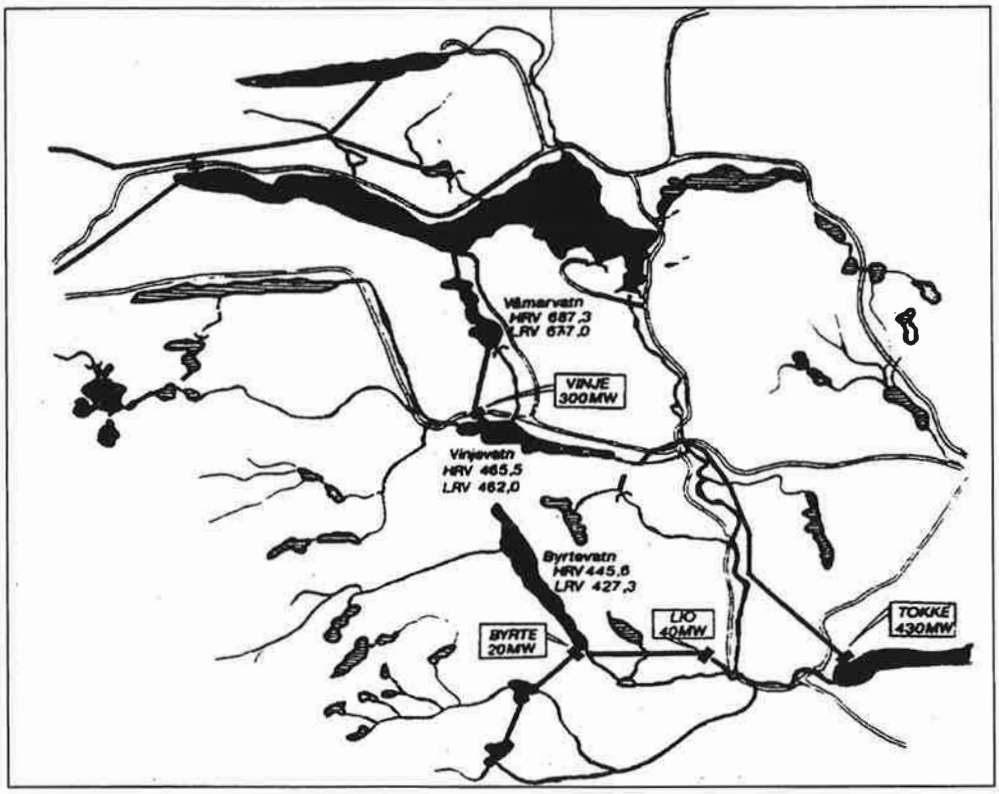
Extensive groundwater erosion in the beach area between Vassenden and Nes will occur during diurnal peaking below the 463.5 m contour. Groundwater erosion activity in general is expected to decrease with time due to exhaustion of available sediment. The least consequences in terms of erosion are anticipated with diurnal peaking restricted to between the 463.5 and 465.0 m contours, although some active groundwater erosion may still occur within this interval with long term diurnal peaking.

The findings from this project have been used to make a preliminary classification of reservoirs in terms of erosion caused by diurnal peaked regulation. Groundwater erosion may cause problems in all reservoirs surrounded by glacifluvial, glacilacustrine or recent fluvial deposits. The intensity of this erosion is influenced by the drawdown rate. The area exposed to erosion depends on the drawdown level. Winnowing of fine fractions also takes place during seasonal regulations, thus there is little sediment available in the most frequently used regulation shore zone. In reservoirs with a sustainable sediment supply from the catchment area, sediment will be availiable for wave erosion and resuspension. The bathimetry of the reservoir and the extent of shallow areas is importent in this context. Wave motion is of minor importance to erosion and resuspension in deep reservoirs.

It is recommended that further investigations of peaked regulation be undertaken to provide sufficient information to evaluate conditions in the various sedimentary environments in regulated Norwegian rivers.

1. Innledning

Som en følge av den nye energiloven og økt krafteksport til utlandet kan det være aktuelt å produsere mer ved kraftverkene over kortere tid av døgnet når prisen er høy. Ved mange kraftverk kan dette gi en situasjon med raske vannstands- og vannføringsvariasjoner på regulerte elvestrekninger eller i magasiner, noe som kan gi miljøvirkninger i vassdragene. Denne rapporten omhandler virkningen på erosjon og sedimentasjon i magasiner. Studier av erosjon i reguleringsmagasin er ett av seks delprosjekter i FoU prosjektet "Effektregulering – miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak". Målsetningen er å oppgradere kunnskapen om miljøvirkninger av effektregulering og å utvikle planløsninger og tekniske løsninger som også tar hensyn til miljøet. De øvrige delprosjektene knyttet til innlandsvassdrag dekker fagområdene is og vanntemperatur, erosjonssikring, lokalklima, biologi og optimalisering med hensyn på teknikk, miljø og økonomi. Effektprosjektet ble gjennomført i perioden 1996-2000 med støtte fra Norges forskningsråd, Enfo, Statkraft, Direktorat for naturforvaltning og NVE. Prosjektet ønsker å belyse vesentlige miljøproblemer, finne grenser for hva som kan tåles og hva som bør unngås og bidra til at utbyggere og forvaltning kan utforme tiltak, tilpasninger i driftsstrategi og planløsninger som kan redusere negative virkninger.



Figur 1.1. Kartskisse over Tokkeverkene.

Målet for dette delprosjektet er å klarlegge hvordan effektreguleringer karakterisert ved raske og hyppige vannstandsendringer innvirker på erosjon og sedimentasjonsforhold i reguleringsmagasiner.

Deler av Tokkeverkene i Telemark ble valgt som studieområde for vurdering av effektreguleringers innvirkning på innsjøer. Vinjevatn er et av flere reguleringsmagasin i Tokkeverkene som ble regulert

på 1950 og 1960 tallet. Kraftverkene ligger i kommunene Tokke og Vinje i Telemark fylke, se fig 1.1. Virkningen av effektregulering er undersøkt ved forsøkskjøringer og med målinger av sedimentkonsentrasjonen i innløpselver og utløpet av Vinjevatn, målinger av suspensjonsmaterialets bevegelser i magasinet med sedimentfeller og feltundersøkelser av erosjonsprosessene. I det følgende er det gitt en kort oppsummering av de viktigste resultatene.

Under en normalkjøring med sesongmessig regulering vil vannstandsendringene forløpe saktere uten en periodisk veksling. Reguleringsmagasiner fylles som regel opp under snøsmeltingen om våren og får også tilsig fra nedbørflommer i løpet av sommeren og høsten. På grunn av stor etterspørsel etter energi i løpet av vinteren, tømmes magasinet og ligger derfor lavt mot slutten av vintersesongen. En effektregulering er en periodisk kortidsregulering hvor vannstanden i magasinet eller på en elvestrekning endres hurtig i løpet av et døgn. Kortidsvariasjonene har sammenheng med endringer i etterspørsel etter energi over døgnet. Vannstandsendringene kan pendle over hele reguleringshøyden fra HRV til LRV eller begrenses til deler av denne. Holmsen (1963), Korbøl (1975), Mosevoll & Thorsethaugen (1976), Nielsen (1977), Bogen (1986), Tesaker & Dahl, (1992) har gitt oversikt over erfaringer med utrasninger og erosjon i norske reguleringsmagasin. Erosjonsprosessene kan grovt sett deles i tre grupper:

1) Utrasning som følge av nedsatt stabilitet i sedimentene

2) Erosjon som følge av at elver og bekker får større eroderende evne.

3) Bølgeerosjon i magasinet.

Målinger viser store sesongmessige variasjoner i suspensjonskonsentrasjonen i utløpselvene. Det er også store variasjoner mellom de enkelte magasinene. I den senere tid har effektreguleringer blitt aktuelt i norske vassdrag. Målet i dette prosjektet er derfor å klarlegge hvordan denne form for regulering påvirker erosjon og sedimentasjonsprosessene. Det er lagt vekt på å analysere prosessene på en slik måte at resultatene vil være overførbare til andre norske kraftverk. Endringer i erosjon og sedimentasjonsprosessene kan forårsake endringer i habitat og påvirke økologiske forhold. Økt erosjon i vassdragene vil også ha direkte miljøvirkninger som kan påvirke forskjellig bruk av vassdraget og verdien som rekreasjonsområde.

Petts (1984) har gitt en oversikt over en rekke forskjellige manøvreringsprosedyrer som kan føre til raske endringer i vannstand og vannføring. Etter regulering har Coloradoelven nedenfor Glenn Canyon dammen i USA fått en døgnvariasjon på over 1.5 meter. Før regulering var døgnvariasjonene langt mindre. Sear (1995) beskriver døgnfluktuasjoner forårsaket av effektkjøring i elven North Tyne i England på opp mot 0.6 meter pr. døgn. Den maksimale vannstandsøkning ved Theun-Hinboun kraftverket i Laos ble vurdert av Løvoll (1998) til maksimalt å være 3 meter/ time, dvs det samme som under en stor flom under uregulerte forhold. Løvoll (1998) viste at effektregulering med rask vannføringsøkning i elveløp kan føre til stor energihelning og kritiske skjærspenninger. Dette kan føre til mer erosjon enn under normale flomforhold.

I tilknytning til dette prosjektet utførte Pettersen (1998) et litteratursøk på miljøvirkninger av effektreguleringer. Selv om bruk av vannkraftverk til korttidsregulering er vanlig både i USA og Europa, synes det å være begrenset med studier som har undersøkt miljøkonsekvensene av denne driftsformen. Undersøkelsene har oftest rettet seg generelt imot virkninger av vannkraftutbygging og i liten grad fokusert på miljøvirkningene av effektregulering.

1.2 Metodikk i erosjonsprosjektet

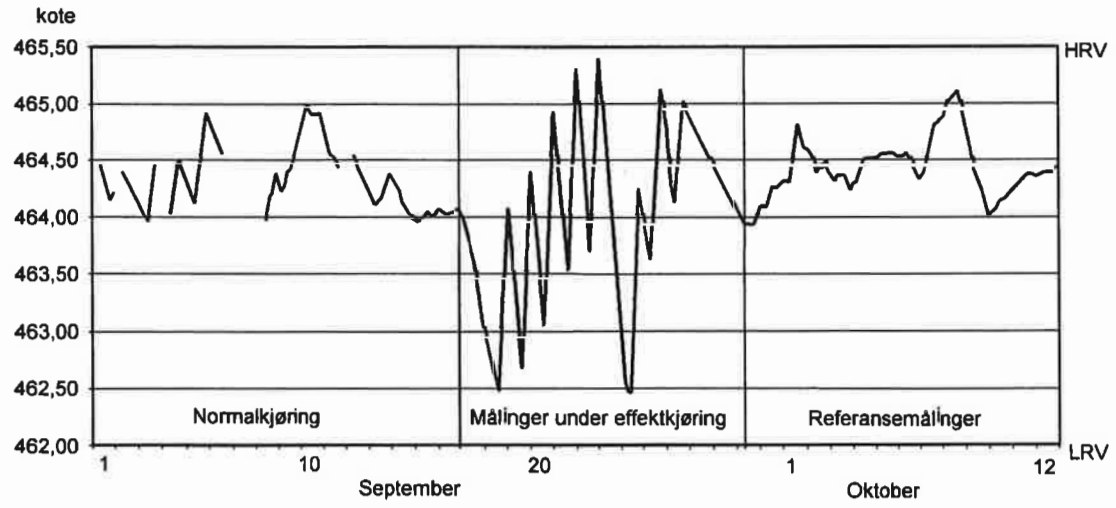
For å klarlegge hvorvidt effektkjøring forsterker erosjonsprosessene i magasinet ble det gjort både felteksperimenter. Dette ble gjort med målinger både under perioder med effektkjøring samt i referanseperioder med normalkjøring av kraftverket som illustrert i fig 1.2. Under forsøkene ble det gjort målinger og registreringer på forskjellige steder i magasinet, se fig 1.3. Sedimentkonsentrasjonen i innløpselvene og i utløpet av Vinjevatn ble målt med døgnlige prøver av partikkelkonsentrasjonen, jfr Førde m. fl (1997, 1999).

I en forsøksperiode kan konsentrasjonene i utløpet ved tidspunkt **t** ($Cs_{ut}(t)$) betraktes som en funksjon av konsentrasjonen i magasinet ved periodens begynnelse ($Cs_{mag}(0)$), konsentrasjonen i innløpselvene ($Cs_{inn}(t)$), konsentrasjon som følge av erosjon i magasinet ($Cs_{er}(t)$) minus konsentrasjonsreduksjonen som finner sted på grunn av sedimentasjon i magasinet (M(t)).

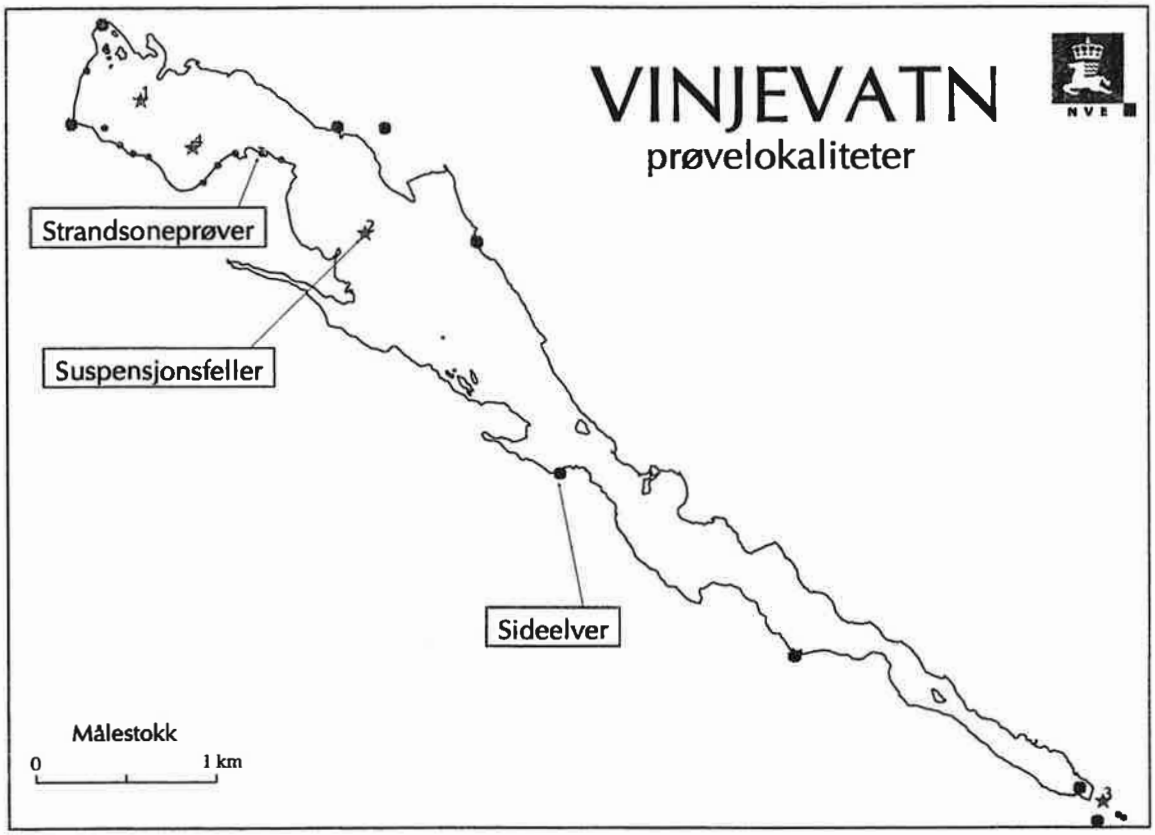
$$(1) \qquad Cs_{ut}(t) = Cs_{mag}(0) + Cs_{inn}(t) + Cs_{er}(t) - M(t)$$

Det er også gjort modellberegninger av partikkelenes bevegelser i magasinet for å finne hvor mye av det suspenderte materialet som sedimenterer i magasinet og hvor mye som holdes i suspensjon helt fram til utløpet.

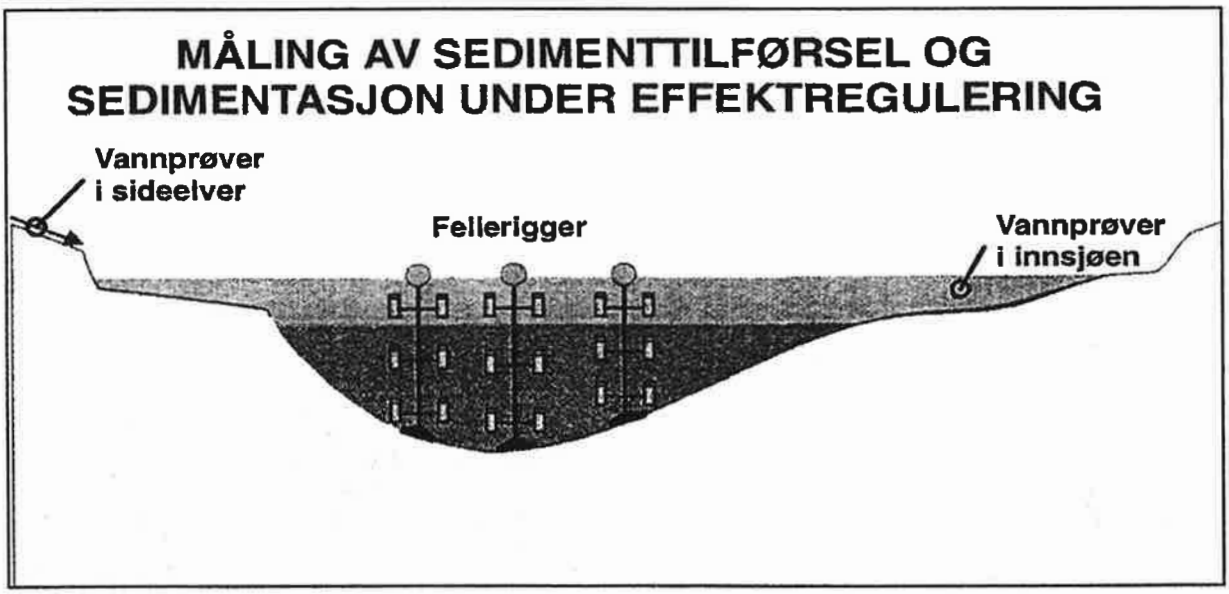
Sedimentenes bevegelser i vannmassene ble målt ved sedimentfeller. Under og etter effektkjøringene ble aktiv erosjon langs magasinet registrert og undersøkt. De forskjellige erosjonsprosessene er drøftet med utgangspunkt i fysiske betraktninger og litteraturstudier. Fellene gir et integrert bilde av materialet som var i bevegelse i vannmassene i måleperioden, se fig 1.4. Felleriggene er sammensatt av en rekke sylindriske oppfangningsenheter som henger fritt i vannmassene på forskjellige dyp.



Figur 1.2. Det ble utført felteksperimenter i Vinjevatn under perioder med effektkjøring og normal sesongmessig regulering. Figuren viser vannstandsvariasjonene høsten 1997.



Figur 1.3. Prøvelokaliteter og lokaliteter for målinger i Vinjevatn.



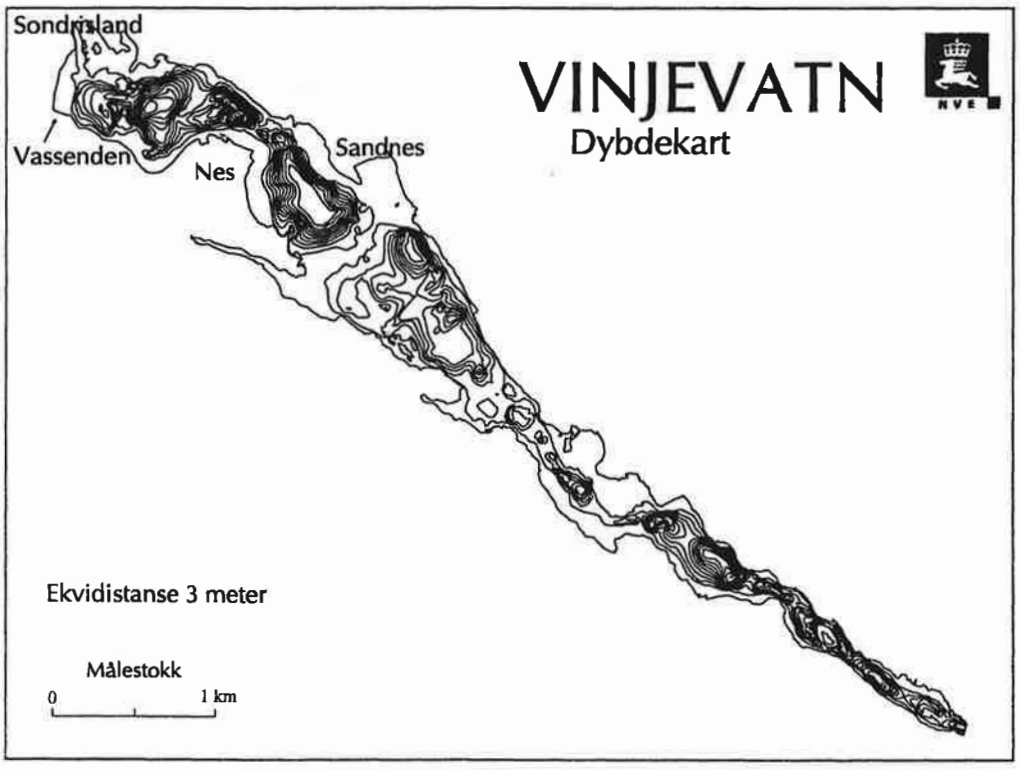
Figur 1.4. Oppsett av fellerigger under måleperiodene.

Sedimentfellene gir et integrert bilde av sedimentmengden som er i suspensjon i vannmassene i måleperioden. Det ble benyttet fellerigger med to rørfeller i nivåene 1 m, 3 m, 5 m og 10 m under overflaten. Materialet i fellene ble analysert med henblikk på organisk og uorganisk materiale. I et utvalg av disse prøvene ble det også foretatt kornfordelingsanalyser med en Laser –Coulter.

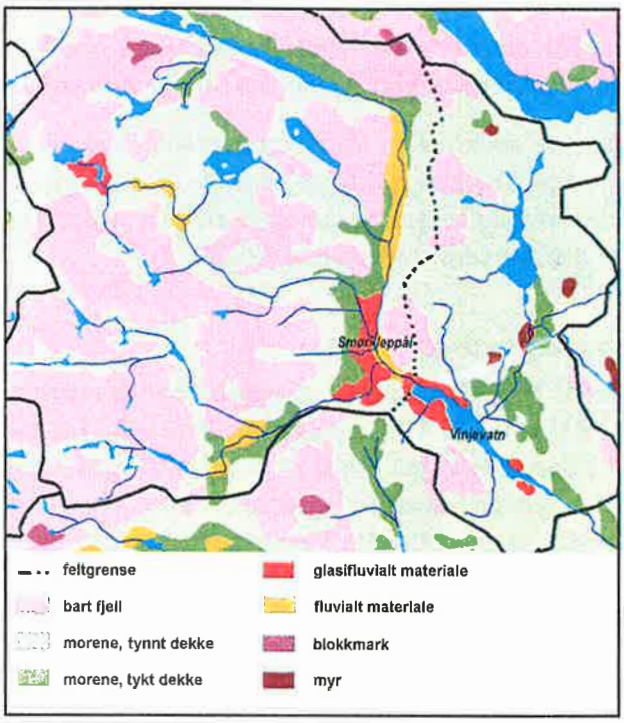
I Vinje og Tokke kraftstasjoner ble det installert automatprøvetakere hvor en vannprøve på ca 1 liter pumpes opp 1 til 2 ganger pr. døgn. I de øvrige tilløpselvene ble det tatt daglige manuelle prøver. Prøvene analyseres m. h. p. organisk og uorganisk materiale etter en prosedyre beskrevet av Bogen (1992). Organisk materiale er definert som glødetap ved 480 °C.

1.3 Karakteristikk av magasinet.

Vinjevatn er inntaksmagasinet til Tokke kraftstasjon. Magasinet har en reguleringshøyde på 3.5 m med HRV på kote 465.5, på LRV kote 462.0 og et magasinvolumet på 11.2 mill m^3. Den naturlige vannstanden var på kote 464.2 Innsjøbassenget består av en rekke glasialt utformede dypbasseng med terskler imellom, se fig 1.5. Det dypeste bassenget ligger rett utenfor Vinje kraftstasjon ved Sandnes hvor det er ca. 30 m dypt. Overføringstunnellen fra Våmarvatn løper inn i Vinjevatn ved Vinje kraftstasjon, rett vest for Sandnes. Inntaket til Tokke kraftstasjon ligger ved dammen helt øst i magasinet. Mellom inntaket og Vinje kraftstasjon er en rekke grunne terskler med et vanndyp mellom 4 m og 5 m under HRV. Tersklene har dermed en begrensende effekt på partikkelbevegelsen ut av magasinet. Totallengde på magasinet fra innløpet ved Smørkleppåi til utløpet er ca 7.5 km.



Figur 1.5 Dybdekart over Vinjevatn basert på opploddinger i 1998.



Figur 1.6 Forenklet utsnitt av kart over løsmaterialet rundt Vinjevatn. Avgrensningen av løsmaterialets utstrekning. Etter Jansen (1986).

Løsmaterialet rundt Vinjevatn består for en stor del av glasifluvialt materiale som ble avsatt under avsmeltingsfasen av siste istid, Jansen (1986), se kart i fig 1.6. Bunnsedimentene i innsjøen består av materiale som er tilført fra elver og bekker i postglasial tid. Dette laget med sedimenter er forholdsvis tynt og har et visst innslag av organisk materiale. De groveste fraksjonene, grus og sand, er avsatt som små delta eller vifter foran elve- og bekkeinnløpene. Det finfordelte materialet, silt og leire, holdes lenger i suspensjon og avsettes som bunnsedimenter i de dypere deler av innsjøen. Bunnsedimenter har i visse områder et stort innhold av organisk materiale. Organiske sedimenter tilføres fra nedbørfeltet rundt magasinet og noe blir produsert i innsjøen. Kornfordeling av bunnsedimenter fra Sondrisland er vist i fig 1.7 a, b. Prøvene er tatt langs 4 profiler ut mot ca 100 –120 m fra stranden ved Sondrisland. Andelen silt og leire i prøvene (materiale mindre enn 63 mikron) utgjør fra 10 % – 50 %. Opp mot 20 % av enkeltprøver inneholder grusfraksjoner.

Strandsedimenter består av materiale som bølgene har frempreparert fra de glasifluviale avsetningene. Dette materialet består for en stor del av grus og sand med svært lite finfordelt materiale.

Holmsen (1963) og Korbøl (1975) har beskrevet erosjon og utrasninger under nedtappinger av innsjøen. Under anleggsvirksomheten i 1961 ble hele Vinjevatn senket ned til kote 461.2 som er 3 meter under naturlig vannstand dvs 1 meter under LRV. Dette førte til økte strømhastigheter flere steder i sjøen og dermed til erosjon i sjøbunnen. Det gikk flere mindre ras langs strendene, samt ras på sjøbunnen. Ras og erosjonsaktiviteten medførte en sterk blakking av vannet. Sikten ble redusert til under 10 cm.

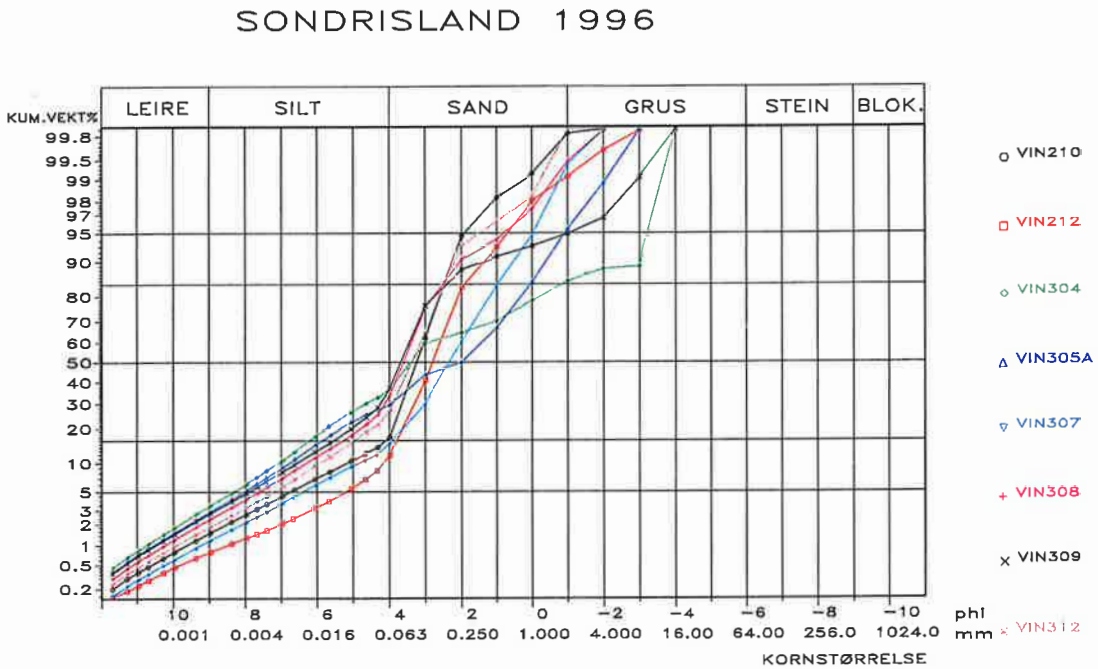


Fig 1.7 a Kornfordeling av bunnmateriale ved Sondrisland.

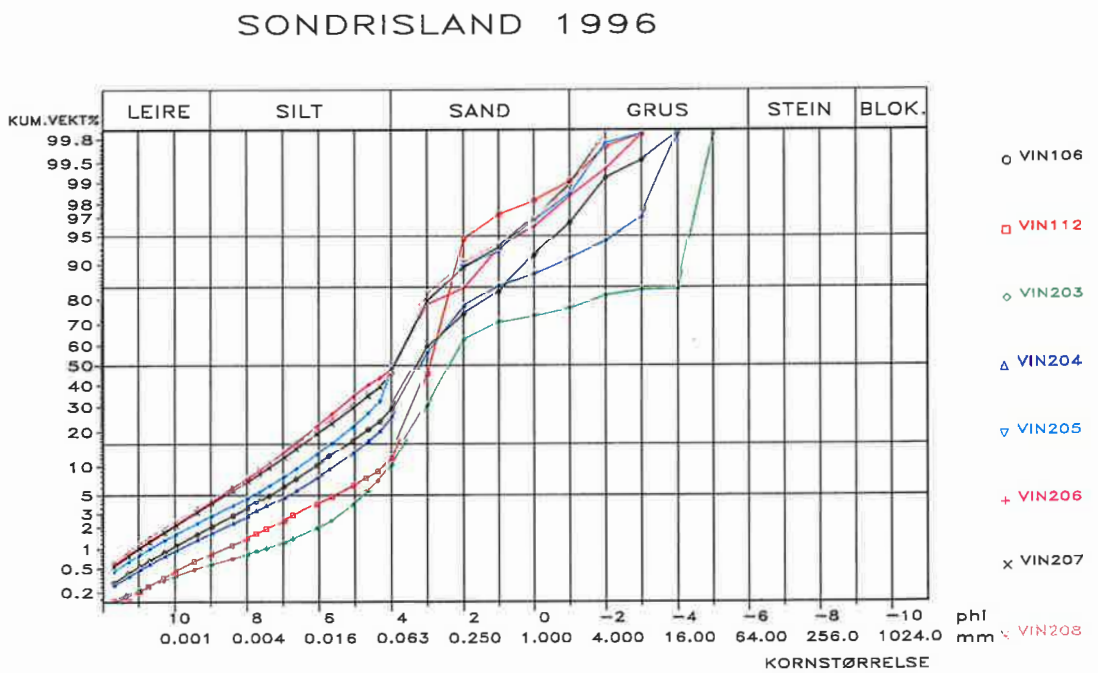


Fig 1.7 b Kornfordeling av bunnmateriale ved Sondrisland.

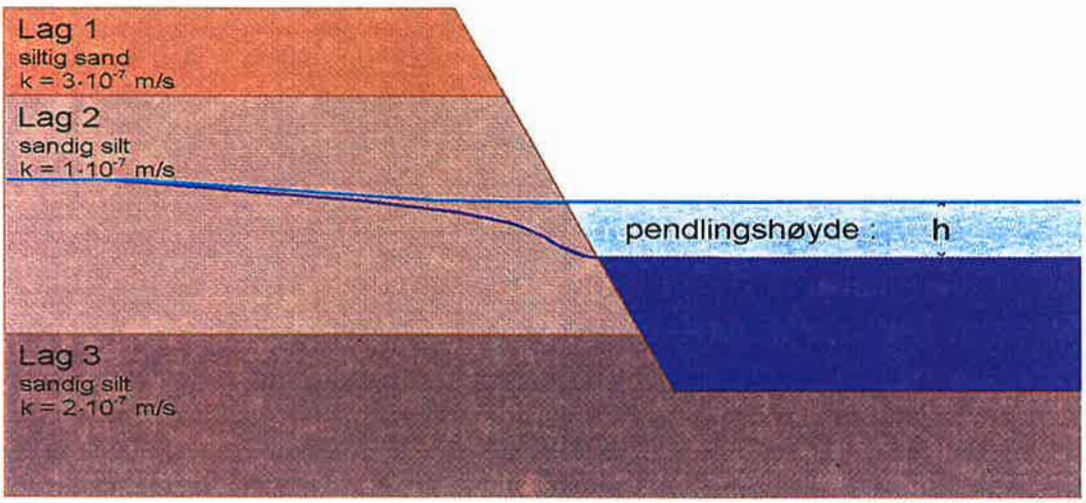
2. Erosjon og sedimentasjon i magasinet

I dette kapitlet drøftes alle faktorer som innvirker på erosjon og sedimentasjonsprosessene med bakgrunn i litteratur og undersøkelser i prosjektet. Det er lagt vekt på å klargjøre effektreguleringenes virkning på de enkelte erosjonsprosessene.

2.1 Grunnvannserosjon, ras og utglidninger

Det har tidlig vært kjent at rask nedtapping av reguleringsmagasiner kan gi erosjon og utrasninger. Holmsen (1921, 1963) har gitt en av de første beskrivelsene av ras i forbindelse med senkning under normalvannstanden. Innsjøen Laugen ble senket 5 meter under normalvannstanden første gang i 1920. Dette førte til så store utrasninger at videre nedtapping måtte stoppes. Det var svært få områder av nedtappingsonen som ikke ble berørt. Rasene spredte seg også inn over den gamle strandlinjen og gjorde skader på veier og dyrket mark. Erosjon som følge av reguleringer har senere blitt beskrevet fra en rekke innsjøer, Korbøl (1975), Mosevoll og Torsethaugen (1976). I Totak ble det beregnet at senkningshastigheten ikke måtte overstige 5 cm i døgnet for å unngå utrasninger, Dahl (1989).

Under en rask nedtapping av vannstanden vil det i bratte skråninger dannes et overtrykk i sedimentene langs kanten fordi trykket ikke blir kompensert av et tilsvarende mottrykk fra vannet i magasinet, se fig 2.1. 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 dannelse av små raviner, deretter utskalkinger, og til slutt redusert stabilitet med større utglidninger. Prosessen benevnes som grunnvannserosjon.



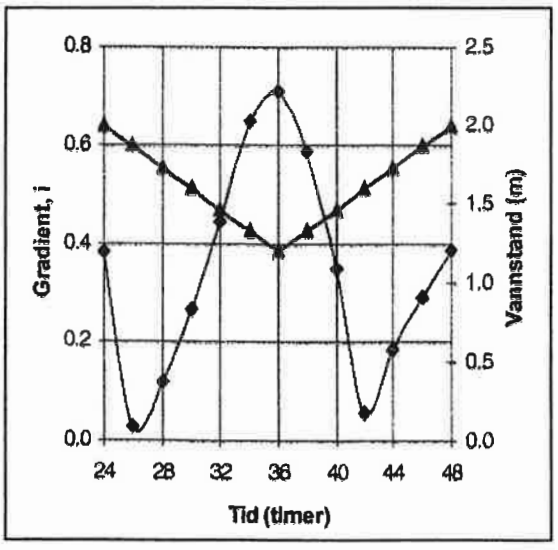
Figur 2.1 Skisse av en skråning hvor det oppstår en bratt grunnvannsgradient på grunn av rask nedtapping av magasinet. Skråningen har flere lag med forskjellig hydraulisk konduktivitet.

Løsmasser rundt innsjøer og magasiner kan være av variabel karakter. 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.

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

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 liten hydraulisk konduktivitet. I leire er imidlertid de kohesive kreftene så store at det kompenserer for overtrykket som skapes av hurtige vannstandsenkninger. 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. Resente delta og elveslettesedimenter har også høyere hydraulisk konduktivitet enn morene. Langs magasiner og innsjøer er det iakttatt at grunnvannserosjon er mest aktiv i finkornede resente deltaavsetninger rundt innløpselvene. Det er også iaktatt grunnvannserosjon i glasifluviale sedimenter langs strendene. Grunnvannserosjon er sjelden iaktatt i morene. Sannsynligvis er pakningsgraden for høy.



Figur 2.2 Grunnvannsgradienten i skråningsfoten (ruter) og vannstandens tidsvariasjon (trekanter) ved vannspeilet i et magasin med døgnregulering.

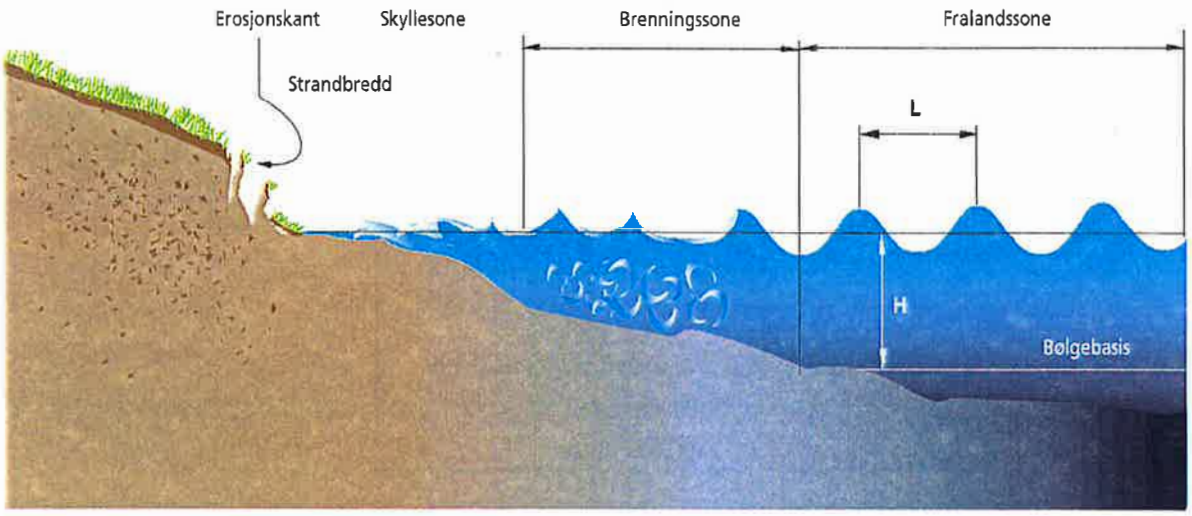
Løvoll, Tuttle og Fritzvold (1999) har i tilknytning til dette prosjektet beregnet skråningsstabiliteten i elveskråninger med grunnvannssig. De fant at elvestrekninger med finsand, silt og leire i elvebredden og en vannstandsendring på opp mot 1 meter over noen timer, kan gi kritiske situasjoner. Fine masser

har en lav hydraulisk ledningsevne sammenliknet med grovere masser. Dette kan føre til en forholdsvis høy grunnvannsgradient i skråningen og dermed stor fare for erosjon og utrasning. Under en effektregulering er erosjonsfaren begrenset til perioder med lave vannstander. I masser med lav hydraulisk konduktivitet tar det en tid før grunnvannsgradienten utjevnes ved raske vannstandsendringer. Løvoll, Tuttle og Fritzvold (1999) viste i et beregningseksempel hvordan grunnvannsgradienten varier under en døgnsyklus, se fig 2.2. Eventuell vegetasjon og undertrykk i den umettede sonen vil øke stabiliteten og motvirke erosjon.

2.2 Bølgeerosjon og undergraving av sideskråninger

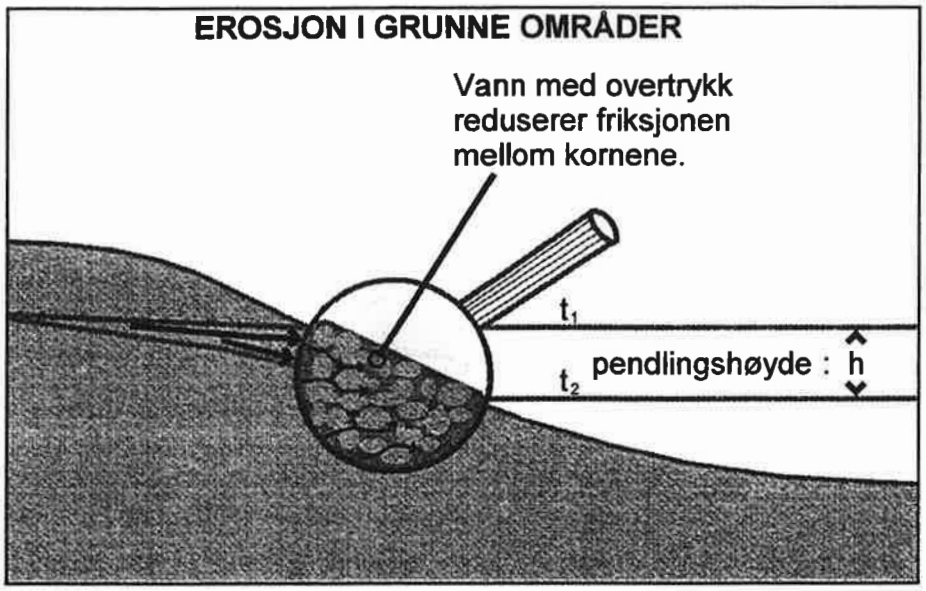
Vind og bølger kan forårsake omfattende erosjon i magasiner. Det er imidlertid forholdsvis få undersøkelser som fokuserer på slike prosesser i vannkraftmagasiner. I det følgende er det hentet en del teoretiske betraktninger fra generelle analyser av kystprosesser og tidevannstrømmer. Disse kan med visse tilpasninger benyttes i vannkraftmagasiner. Vindstyrke og retning er av stor betydning for hvor stor erosjonen blir.

Vinden beveger vannmassene og setter opp bølger og vinddrevne strømmer i magasinet. Bølgebevegelsen påvirker bunnmaterialet helt ned til ca. 7 m. På dypt vann forårsaker bølgene at vannpartiklene beskriver en sirkelbevegelse. Vannpartikler forflyttes derfor ikke i bølgenes bevegelsesretning. Etter hvert som bølgen beveger seg mot grunnere vann, vil bølgelengden avta til bølgen bryter mot stranden. Der bølgene bryter kalles brenningssonen, se fig 2.3. Denne brenningssonen er karakterisert ved at vannbevegelsen blir kraftig turbulent. Materiale fra bunnen virvles opp i vannmassene som så frakter dette oppover i skyllesonen på stranden. Nedskyllet fører imidlertid med seg materiale tilbake. Forholdet mellom oppskyllets og nedskyllets mulighet til å frakte med seg og avleire materiale bestemmer hvordan en strand vil bli forandret.



Figur 2.3 Definisjonsskisse av bølgeerosjon og bølgebevegelse. Terminologi for forskjellige soner er hentet fra Klemsdal 1979, 1999.

Når vannstanden synker, vil bølgebasis og brenningssone forflyttes nedover stranden. Brenningssonen blir som følge av dette liggende lavere og kan påvirke dypere områder. I Vinjevatn betyr dette at bølgebasis da når ned til større områder med ukonsoliderte gytjesedimenter med mye organisk materiale som kan bringes i bevegelse. Hyppige vannstandsendringer under effektregulering innebærer at brenningsonen forflytter seg oftere over strand- og reguleringssonen enn under en sesongmessig regulering. Når bølgebasis blir liggende lavt, kan de dypereliggende deler av magasinet også eksponeres for erosjon.



Figur 2.4 Skisse som illustrerer sedimentpartikler i en strandsone. Rask nedtapping fører til et overtrykk i porevannet mellom kornene.

Partikler som ligger på bunnen vil eroderes når skjærkreftene fra vannmassenes bevegelse blir større enn en gitt grenseverdi. Turbulensen skaper en oppadrettet bevegelse som kan bringe partikler i suspensjon. Kornstørrelsen og friksjonen mellom kornene er også viktige faktorer som har betydning for partikkelbevegelsen. Vanntrykket i porerommet mellom kornene reduserer friksjonskreftene, se fig 2.4. Under en effektregulering senkes vannstanden i magasinet raskt. Dette fører til at porevanntrykket ikke lenger kompenseres av et mottrykk og friksjonen mellom partiklene reduseres. Partiklene kan derfor eroderes lettere av bølgeskyllet under en effektregulering med rask vannstandssenkning enn under en sesongmessig regulering. Under en sesongmessig regulering forløper vannstandsendringene sakte slik at vanntrykket utjevnes. Raske nedtappingsituasjoner inntreffer mer sjelden under denne typen manøvrering.

Bølgebevegelsen setter opp skjærkrefter på bunnen. På en lokalitet med vanndyp **h** er det midlere hydrostatiske trykket **p** på bunnen:

$$p = \rho g h \tag{3}$$

Der **ρ** er vannets tetthet og **g** er tyngdens akselerasjon. For hver bølge som passerer, vil trykket øke Δp over det midlere trykket. Under bølgedalene vil trykket avta tilsvarende $-\Delta p$. Trykkvariasjonen i

sedimentene er derfor i fase med bølgeprofilet. På grunn av trykkforskjellen mellom bølgedaler og bølgetopper vil sedimentene utsettes for et skjærstress som er rettet fra bølgetoppene mot bølgedalene.

Trykkbølgene følger bølgebevegelsen på overflaten og påvirker bunnsedimentene. Thimakorn (1984) har utarbeidet relasjoner som viser sammenhengen mellom skjærpåvirkningene og konsentrasjonen av partikler, C_b på et referansenivå z_o like over bunnen, se fig 2.5. Materialmengden G_b som bringes i suspensjon av bølgenes osillerende bevegelse er:

(4) $$G_b = V\delta\tau(\tau - \tau_c)/2\tau_c^2$$

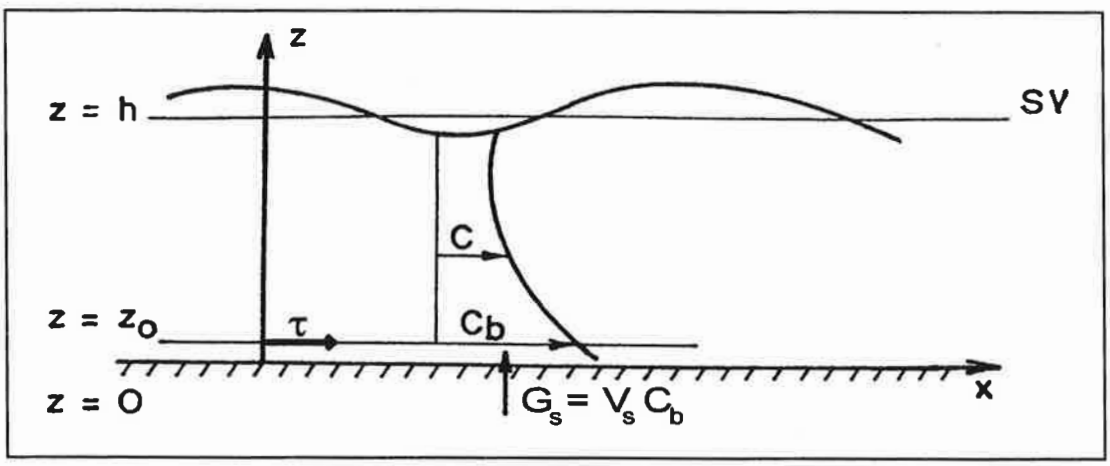
Der V er bølgenes maksimalhastighet ved bunnen beregnet etter Johnson (1965) som:

(5) $$V = \frac{\pi H}{T}\frac{1}{\sinh 2\pi h/L}$$

(6) $$\tau = f_w \rho V^2/2$$

(7) $$\delta = (\pi\nu T/4)^{1/2}$$

Der f_w er friksjonsfaktoren for bølgene mot bunnen. H er amplituden, T er perioden, h er vanndyp og L er bølgelengden, ν er vannets kinematiske viskositet. Verdien av det kritiske skjærstress er bestemt i eksperimenter.



Figur 2.5 Definisjonsskisse av symboler for likninger som beskriver resuspensjonsprosessen forårsaket av bølgebevegelse, etter Thimakorn (1984).

Materialmengden G_b som bringes i suspensjon må balansere den mengden som sedimenterer på en flateenhet på bunnen av magasinet:

(8) $G_s = V_s C_b$

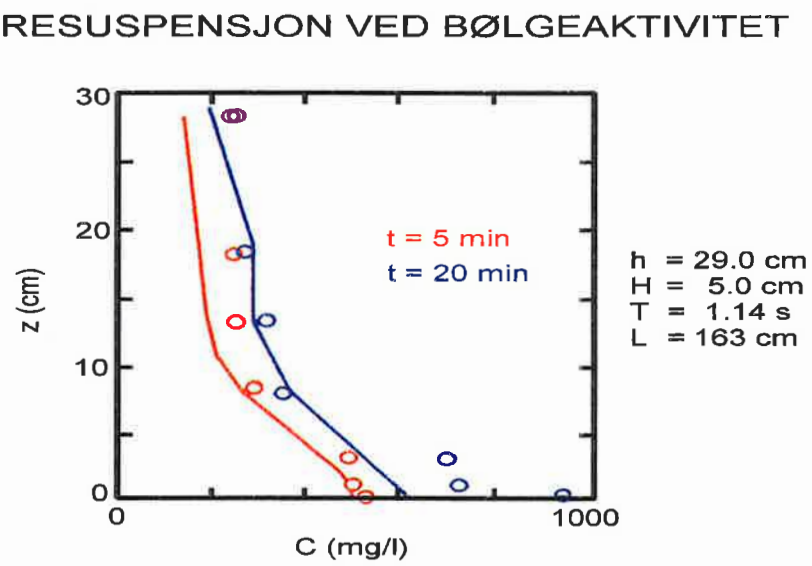
V_s er sedimentpartiklenes fallhastighet.

Kombinasjon av (4) og (8) gir:

(9) $$C_b = V\delta\tau(\tau - \tau_c)/V_s 2\tau_c^2$$

Når vinden blåser vil bølgebevegelsen stadig bringe mer materiale opp i de øvre vannmasser. Thimakorn (1984) har beregnet dette med diffusjonslikningen:

(10) $$\frac{\partial C}{\partial t} = Vs\frac{\partial C}{\partial z} + \varepsilon\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$



Figur 2.6 Partikkelkonsentrasjonen som funksjon av vanndyp. Når vinden blåser bringes materialet i suspensjon. Kurvene viser resultatet av beregninger av partikler i resuspensjon etter tiden t=5 min og t=20 min.

Løsningen av likningen gir konsentrasjon som funksjon C(z, t) av høyde z over bunnen etter tid t og initialkonsentrasjonenen ved bunnen, C_b, se fig 2.6. Analysen gjelder bare fralandssonen og er ikke gyldig i brenningsonen og skyllesonen. Selv om turbulensen er langt kraftigere i disse sonene vil de samme prinsippene gjelde. Dvs konsentrasjonen like over bunnen vil også her være en funksjon av

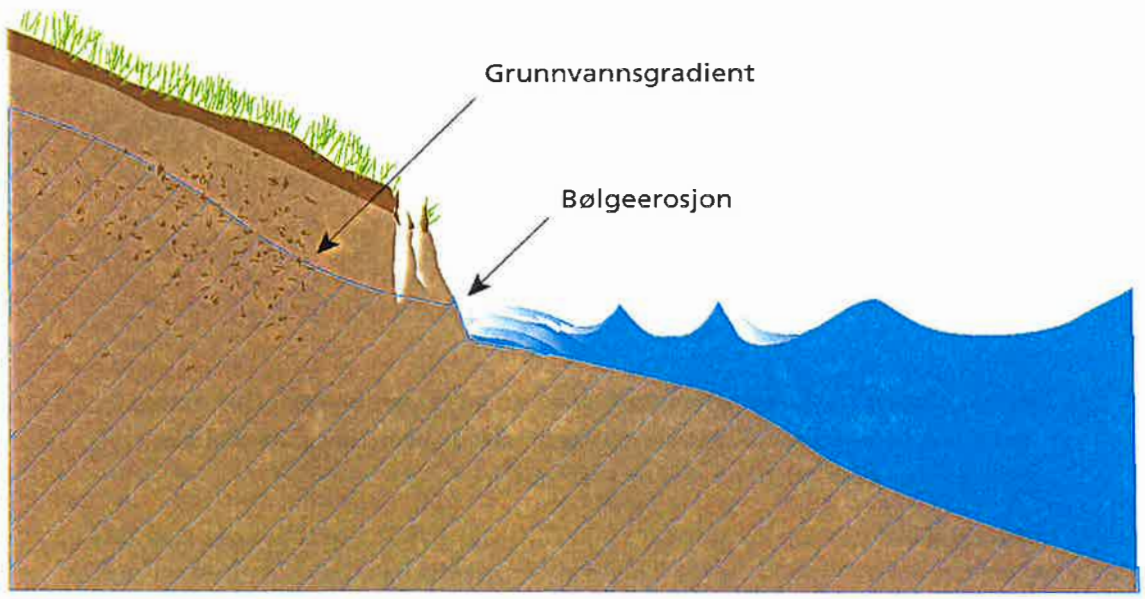
skjærstresset τ som bølgebevegelsen setter opp mot bunnen og det kritiske skjærstresset τ_c som også er avhengig av kornstørrelsen og forholdene på bunnen.

$$C_b = k(V, V_s, \tau, \tau_c) \quad (11)$$

Den kraftige turbulensen i brenningssonen fører til at sedimentpartiklene spres raskere oppover i vannmassene enn det som er tilfelle i fralandsonen. Under en effektregulering med rask vannstandssenkning vil det økte porevanntrykket og den reduserte friksjonen mellom kornene føre til at det kritiske skjærstresset τ_c i likning (4) reduseres. Dette betyr at en lavere bølgeenergi er tilstrekkelig for å sette partikler i bevegelse under en effektregulering.

Thorn (1981) og Kemp og Simons (1984) fant at den kombinerte effekt av strøm og bølger førte til betydelig mer erosjon enn bølger alene. I perioder med både bølger og tidevannsstrøm var det 40 ganger mer erosjon enn i perioder med utelukkende bølger. Det var særlig turbulensintensiteten som økte. Friksjonsfaktoren (f_w) for bølgene mot bunnen ble også betydelig større under motgående tidevannsstrøm, og redusert når tidevannsstrømmen og bølgene hadde samme retning.

Vindens drag på vannflaten forårsaker strømmer. I innsjøer som Vinjevatn er vindstrømmene som settes opp vanligvis svake. De sterkeste strømmene oppstår ved en kombinasjon av gjennomstrømning ved høy driftsvannføring i utløpet og vestlige vinder. Det blir størst erosjonsvirkning ved de grunne områdene og ved tersklene. Store deler av de grunne områdene er dekket av vannvegetasjon. Vannvegetasjonen vil skjerme bunnen mot erosjon, noe som vil øke verdien av det kritiske skjærstresset.



Figur 2.7 Skisse av bølgeerosjon som undergraver skråninger langs stranden på høy vannstand.

Under høy vannstand i magasinet er det iakttatt erosjon av sideskråningene. Skråningene på Sandnes består først og fremst av friksjonsmateriale, dvs sand og grusfraksjoner med begrensede kohesive krefter mellom kornene. Skråninger som består av disse kornfraksjonene vil rase lettere enn tilsvarende skråninger av kohesivt materiale. Når en slik skråning undergraves og blir instabil, vil materiale gli eller rase inntil ny likevekt oppnås. Hvis ikke materialet bindes av vegetasjon eller kohesive krefter, så vil skråningen innstilles til rasvinkel (ca. 36°). I Vinjevatn består materialet i skråningene langs strendene for en stor del av glasifluviale avsetninger med sand og grus. Øvre del av strendene er ofte utformet som en erosjonsplattform i løsmassene. Bølgeerosjon og grunnvannserosjon i løsmateriale i bakveggen på høy vannstand, tilfører materiale til strandområdet, se fig 2.7. På strender med aktiv erosjon i bakveggen, som ved Sandnes, inneholder sedimentene på strandplattformen mye sand.

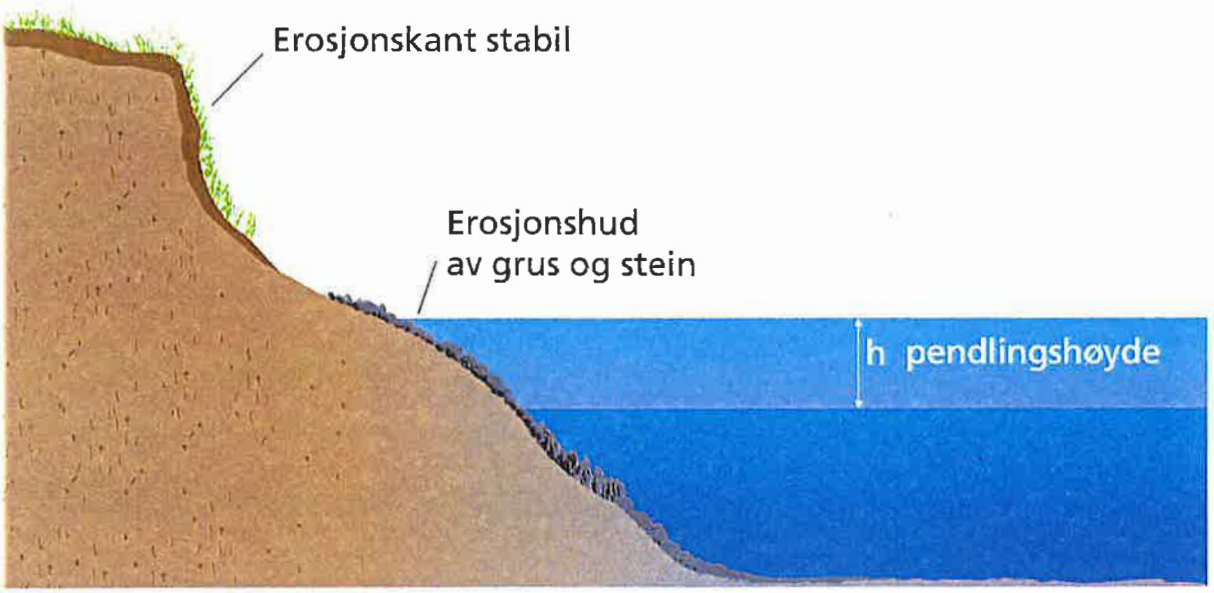
Strandområdet rundt Sandnes er et område hvor bølgene eroderer aktivt i løsmassene under høy vannstand. De hyppige trefallene viser at erosjonen er spesielt intenst i dette området, se fig 2.8. Bølgeerosjon er den viktigste erosjonsprosessen som undergraver brattkanten bak strendene. Sterk vind på høy magasinvannstand er derfor en viktig forutsetning for å få intens bølgeaktivitet som kan erodere brattkantene. Ved effektkjøring på høy vannstand vil grunnvannserosjonen i brattkantene også komme inn som en betydningsfull prosess. Kombinasjonen av bølgeerosjon og grunnvannserosjon

Figur 2.8 Foto av erosjonsskant ved Sandnes umiddelbart etter effektkjøring med maksimalsvannstander opp mot HRV over en lengere periode.

Figur 2.9 Foto av "mangroveskog" ved Sandnes. Bølgeerosjon på høy vannstand har vasket ut materialet mellom trerøttene.

forsterker derfor tilbakerykningen av brattkantene. Vegetasjonen har imidlertid en bindende virkning på materialet og bremser tilbakerykningen. I noen områder graves sanden ut mellom røttene på vegetasjonen slik at strandsonen likner en mangroveskog, se fig 2.9. Bølger og strøm som påvirker strandsonen vil føre materialet bort. Så lenge det tilføres nytt materiale fra bakkanten, opprettholdes en likevekt slik at forholdene på stranden ikke endres. Hvis det etableres erosjonsforbygninger av kanten, vil dette stoppe sedimenttilførselen til stranden. Bølgene vil da etterhvert føre sandfraksjonene bort slik at det ligger tilbake en erosjonshud av grov grus, se fig 2.10.

Noen steder er bakveggen tilgrodd og stabil som på strendene mellom Vassenden og Nes. I slike områder er sedimenttilførselen opphørt eller sterkt redusert. Dette er sannsynligvis årsaken til at disse områdene har en annen karakter. Den finkornige sanden har blitt vasket ut og en erosjonshud av grus og stein ligger igjen. Årsaken til at aktiviteten har avtatt i dette området er sannsynligvis at bølgepåvirkningen er langt mindre enn ved Sandnes. Det er særlig vinder i lengderetningen til Vinjevatn som har betydning i erosjonssammenheng. Disse strendene er mindre eksponert for vind og ligger mer skjermet enn Sandnes. Da Vinjevatn ble regulert, ble HRV hevet noe over naturlig vannstand. Løsmassene på strandlinjen mellom Vassenden og Nes lå antagelig noe lenger frem på dette tidspunket. Etter hvert som bakkanten rykket tilbake ble strandplattformen større. Dette førte sannsynligvis til at bølgeenergien ble for lav til å opprettholde åpne erosjonssår i bakkanten slik at skråningen etterhvert grodde til og ble stabil. Muligens kan effektkjøring på høy vannstand føre til at belastningen blir tilstrekkelig stor og bølgepåvirkningen åpner nye erosjonssår.



Figur 2.10 Utvikling av erosjonshud av grovt materiale langs strendene.

Ved Sondrisland synes jordsig i siltholdige jordarter å være den dominerende prosess. Skråningen er dekket av tett vegetasjon uten omfattende erosjonssår. Når bølgerosjon på høy vannstand transporterer bort materiale fra de nederste delene av skråningen, opprettholdes et vedvarende jordsig. Dette fører til at skråningen rykker gradvis tilbake. Krumningen på trærne som dekker deler av skråningen viser at det er bevegelse i underlaget. Den hydrauliske konduktiviteten i silt er lavere enn i grovere sandfraksjoner. Grunnvannserosjon som følge av effektregulering på høy vannstand vil sannsynligvis være mindre intens enn i områder med sandavsetninger som ved Sandnes. Erosjonsforbygninger av kanten har nå redusert sedimenttilførselen til stranden. Utvasking av sandfraksjonene over tid vil sannsynligvis endre strandmaterialets karakter.

2.3 Partikkelbevegelse og sedimentasjon. Modellberegninger

Det er under visse forutsetninger mulig å beregne hvor mye av det suspenderte materialet som sedimenterer i magasinet og hvor mye som holdes i suspensjon helt fram til utløpet. Likningene som benyttes er de samme som for beregninger av sedimentasjon og oppfylling av reservoarer. I det følgende er det tatt utgangspunkt i effektreguleringssituasjon hvor bølgebevegelse og grunnvannserosjon har ført til en partikkelkonsentrasjon C_d i vannmassene.

2.3.1. Grunnleggende likninger

Partikkelbevegelser i magasiner og sjøer kan beskrives av ligningen (12):

$$\frac{h\partial C_d}{\partial t} = w_s C_d \Phi(w_s)(1-\varphi(w_s)) \qquad (12)$$

Der C_d er middelkonsentrasjonen av partikler med diameter d og fallhastighet w_s i en vertikal mellom w_s og $w_s + \delta w_s$ (Sundborg 1956), w_s er forholdet mellom antall partikler som bringes i suspensjon og sedimenterer. $\Phi(w_s)$ funksjonen uttrykker forholdet mellom suspensjonskonsentrasjonen ved bunnen og middelkonsentrasjonen av partikler med fallhastighet w_s. Denne funksjonen er først og fremst avhengig av partiklenes fallhastighet (w_s), men dybden (h) og strømhastigheten (v) må også tas i betraktning. Forenklet kan funksjonen uttrykkes slik (13), Sundborg (1992):

$$\Phi(w) \approx 10^{\frac{14w(\log h+3)}{v_{max}}} \tag{13}$$

$\varphi(w_s)$ uttrykker hvor mye materiale som eroderes fra bunnen og resuspenderes. Under forutsetning av at det ikke foregår noen resuspensjon, kan φ settes lik 0. Ligningen kan da integreres (14).

$$C_d(t) = C_d(0)e^{-(\frac{w_s\Phi(w_s)t}{h})} \tag{14}$$

Hvis strømhastigheten over den betraktede strekning antas konstant lik v kan vi sette (15):

$$C_d(x) = C_d(0)e^{-(\frac{w_s\Phi(w_s)B\Delta x}{\bar{v}h})} \tag{15}$$

der **B** er bredde på strømningsfeltet og **x** er avstand fra tilløpselv eller sedimentkilde.

Relasjonene kan benyttes til å beregne hvor store mengder av materialet fra forskjellige områder i magasinet som vil holde seg i suspensjon fram til utløpet. Partikkelenes fallhastighet påvirkes sterkt av vannets tetthet og viskositet. Det er derfor nødvendig å beregne fallhastighet ved forskjellige vanntemperaturer.

2.3.2. Topografisk beskrivelse av magasinet og vannføringsberegninger

For å utføre beregninger i Vinjevatn er det nødvendig å beskrive magasinet topografisk. Dette er gjennomført med utgangspunkt i foreliggende dybdekart. Utformingen av magasinet er avgjørende for strømningsforholdene og dermed sedimentasjonsforholdene i de forskjellige delstrekningene av magasinet. Strømningsforholdene påvirkes også sterkt av vannføring og endring i vannstand. I mindre reguleringsmagasin er det ofte driftsvannføringen som er avgjørende for strømforholdene. I tillegg til dette vil det også være kompliserende faktorer som vind, vanntemperatur og sjiktninger som innvirker på strømningsforhold i sjøer.

På grunnlag av dybdekartet er magasinet delt i 29 seksjoner med tilhørende dybdetverrsnitt. Avstand mellom delseksjonene er bestemt av magasinets utforming. På delstrekninger uten store topografiske

endringer er det benyttet større seksjoner. Det er også foretatt en vurdering av hvor stor andel av den totale bredden som inngår i det aktive strømningsfeltet. For å beregne strømhastigheten mellom hver seksjon er det nødvendig å kjenne vannføringen i tverrsnittet mellom seksjonene og tverrsnittsarealet av det aktive strømningsfeltet mellom seksjonene. Vannføringen og arealet endres ved endring i vannstanden. Det er derfor nødvendig å beregne både areal og vannføring ved de aktuelle vannstandene.

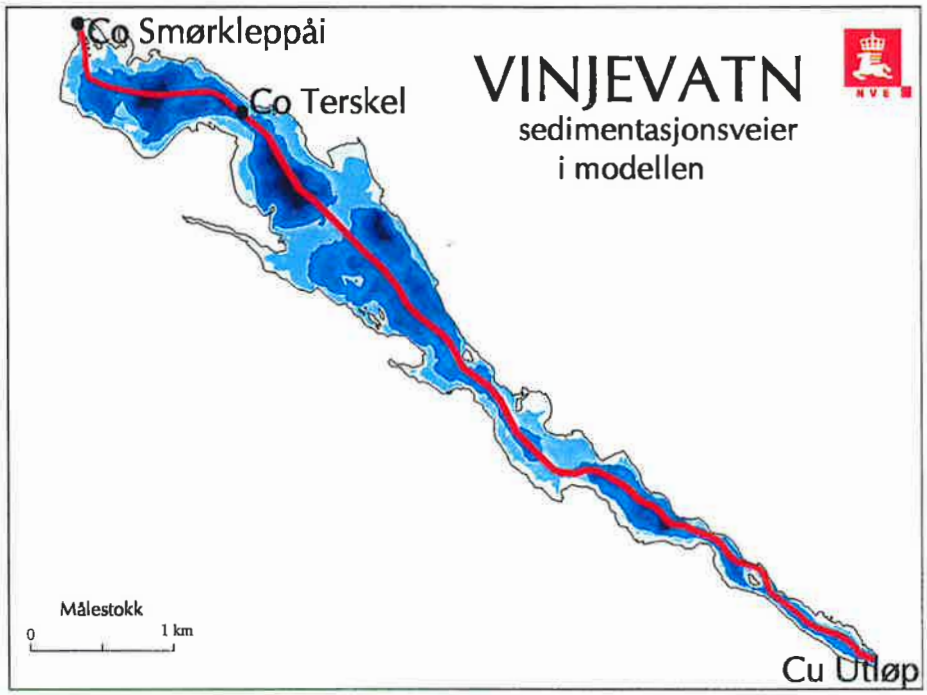
En god beskrivelse av strømningsforholdene blir best ivaretatt ved å benytte en hydrodynamisk strømningsmodell som også tar hensyn til tetthets- og vindsstrømmer. Dette er en mer omfattende og tidkrevende prosess som også må kombineres med omfattende feltundersøkelser. Av praktiske grunner er det derfor gjort noen forenklinger for å beregne strømhastigheten og vannføringen på de forskjellige delstrekningene i magasinet.

Strømhastigheten er beregnet ved å benytte en gitt innløps- og utløpsvannføring i magasinet. Differansen mellom inn- og utløpsvannføringen indikerer hvorvidt vannstanden synker eller stiger i magasinet i det betraktede tidsintervall. Ved å dividere totalt overflateareal med vannføringsdifferansen kan endring i vannstand pr tidsenhet beregnes. Ved å dele inn magasinet i flere seksjoner kan vannføringen mellom hver seksjon beregnes. Dette gjøres ved å multiplisere overflatearealet i seksjonen med vannstandsendringen. Vannføringen inn i en seksjon vil være lik vannføringen ut av sekjonen pluss vannstandendring pr tidsenhet i seksjonen. Strømhastighet beregnes ved å dividere vannføringen mellom hver seksjon på tverrsnittsarealet mellom de resepektive seksjonene. Totalt overflateareal og tverrsnittsarealer vil endres ved forskjellige vannstander, så denne beregningen må utføres ved forskjellige reguleringshøyder. Det antas at en vannstandsendring skjer samtidig i hele magasinet.

2.3.3. Beregninger av partikkelbevegelsen

Formålet med beregningene var å få kjennskap til hvor langt partikler av forskjellig størrelse kunne føres med vannstrømmen ved effektregulering av Vinjevatn. Beregningene er utført med betingelser som så langt det var mulig er tilnærmet de rådende forhold under effektreguleringsepisodene. Det er derfor benyttet vannføringer som skal samsvare med den aktuelle manøvreringen. Den aktuelle manøvreringen omfatter selve senkningen av Vinjevatn fra HRV til -1 m, -2 m og -3 m. Ved senkning av vannstanden ble det tatt ut en driftsvannføring på ca. 130 m^3/s ved inntaksdammen til Tokke kraftstasjon. Samtidig var det driftsstans ved Vinje kraftstasjon. Innløpsvannføringen i Smørkleppåi er satt til 20 m^3/s i hele perioden.

Vannføringer og strømhastigheter mellom seksjonene ved HRV, -1 m, -2 m og -3 m er lagt til grunn for å beregne den resterende mengden partikler som holdes i suspensjon ved utløpet. Beregningene viste en generell økning av strømhastigheten ved senkning av vannstanden. Det er gjort beregninger av restsuspensjoner fra forskjellige sedimentkilder. Kilder som ligger forskjellige steder langs magasinet vil ha forskjellige sedimentasjonsveier. Det er vanskelig å etablere en modell som tar hensyn til alle sedimentkilder langs Vinjevatn. Det er derfor valgt å beregne sedimentenes bevegelser fra to steder i magasinet. I den ene simuleringen er det beregnet hvor mye materiale som holdes i suspensjon ved utløpet av magasinet av det som tilføres ved innløpet av Smørkleppåi, se fig 2.11. I den andre simuleringen er det beregnet restsuspensjon ved utløpet av magasinet med utgangspunkt i mengde materiale som passerer terskelen fra det vestlige bassenget av Vinjevatn (vest for utløpet til Vinje kraftstasjon), se fig 2.11. Denne simuleringen illustrerer sedimentasjonsprosessen for materialet fra utrasninger og resuspensjon som oppsto i det vestligste bassenget under effektforsøkene.



Figur 2.11 Kart med sedimentasjonsveier som inngår i beregningene av restsuspensjon i utløpet av magasinet under effektkjøring. Bereningseksempel 1: fra Smørkleppåi til utløpet, beregningseksempel 2: terskel til utløp.

Resultatene av alle suspensjonsberegningene er vist i fig 2.12, fig 2.13 og fig 2.14. Hver kurve representerer en situasjon med senkning av magasinet og viser hvor stor andel av hver kornfraksjon (d) som er i suspensjon ved utløpet relativt til konsentrasjonen i vannmassen ved kildene (C_u/C_o). Det fremgår at de høyeste restsuspensjonene ved utløpet ble beregnet ved den største senkningen. Beregningene er også utført med forskjellig vanntemperatur, 4 °C og 20 °C. Større tetthet og høyere viskositet ved 4 °C gir en lavere fallhastighet enn ved 20 °C. Dette betyr at under ellers like forhold vil det være høyest restsuspensjon ved 4 °C.

Lengden av sedimentasjonsveien har stor betydning for materialmengden som holdes i suspensjon i utløpet. Det er kornfraksjoner større enn 3 mikron som påvirkes mest. Ved 20 °C og 3 m senking av magasinvannstand viser beregningene at 48% av kornfraksjoner på 6 micron som kommer fra det vestlige terskelbassenget vil være i suspensjon ved utløpet, se fig 2.12. Den tilsvarende restsuspensjonen for materiale som transporteres gjennom hele magasinet er på 15%. Ved 4 °C viser beregninger under tilsvarende forutsetninger en restsuspensjon på henholdsvis 66% og 38%, se fig 2.13. Finere partikler holdes lettere i suspensjon og følger vannmassene over lengre avstander uten å sedimentere.

Det er også foretatt beregninger av partikkelbevegelsen ved forskjellige tenkte situasjoner hvor både Vinje og Tokke kraftstasjon er i drift på samme tid. Ved en normal reguleringssituasjon er det mange muligheter for driftskombinasjoner. Senkning og hevning av magasinet viser at kraftstasjonene enten drives med forskjellig effekt eller varighet. Svært ofte er det Vinje kraftstasjon som blir drevet med varierende driftsvannføring og varighet, mens Tokke har en mer sammenhengende og jevn drift. For å

beskrive situasjoner uten effektregulering, er det gjort forsøk med tre forskjellige driftseksempler hvor vannstanden holdes stabil. Dette betyr nødvendigvis at det er et like stort innløp som utløp til magasinet. Eksemplene er imidlertid forenklet noe ved ikke å ta lokaltilsiget i betraktning. Beregningene er foretatt med 35 m^3/s, 70 m^3/s og 128 m^3/s, samme innløp som utløp til magasinet og stasjonær strømning (stabil vannstand) ved henholdsvis HRV, -1 m, -2 m og –3 m.

Stasjonær drift med 70 m^3/s i driftsvannføring ved utløpet og 70 m^3/s inn ved terskelområdet/ Vinje kraftstasjon gir generelt et noe sterkere strømningsfelt gjennom magasinet enn ved eksemplet fra effektkjøringene. Dette betyr at det ved stasjonær drift kan bli en litt større andel av de groveste partiklene (0.012 mikron) i suspensjon ved utløpet enn ved beregningene fra effektkjøringene, se fig 2.14 c. Ved en ytterligere økning av vannføringene (128 m^3/s), vil denne andelen med grove partikler øke ytterligere. Tilsvarende vil det være en reduksjon av gjennomstrømningen ved reduksjon av vannføringene til 35 m^3/s. Disse beregningene beskriver potensiell partikkelbevegelse. Den reelle materialmengden ved utløpet er imidlertid avhengig av hvor mye sedimenter som tilføres fra sideelvene og fra de forskjellige erosjonsprosessene. Endringer i erosjonsintensiteten ved forskjellige manøvreringsalternativer av magasinet er derfor avgjørende for totalmengden av det som bringes til utløpet.

2.3.4 Betydningen av fnokking i sedimentasjonsprosessen

Det er sannsynlig at de finfordelte sedimentpartiklene i Vinjevatn ikke beveger seg som enkeltpartikler, men som større aggregater. Mange partikler kobles da sammen til større enheter. Denne prosessen kalles fnokking. Slike kompliserte forhold omfattes ikke av modellberegningene. Fnokkingen kan innvirke på fallhastigheten og er dermed en ukjent faktor i beregningene, Droppo m.fl. (2000).

I ferskvann er den viktigste årsaken til fnokking høyst sannsynlig biologiske årsaker, og da særlig bakteriell aktivitet. Næringstilgang er derfor viktig for å få fnokking. Det er sannsynlig at en del partikler beveger seg som fnokker under effektregulering. Mye partikler tilføres da fra erosjon i magasinets bunnsedimenter. Dette er materiale som sannsynligvis allerede er aggregert i bunnsedimentene i utgangspunktet.

Det er svært få undersøkelser av fnokker i ferskvann i norske vassdrag. Skarbøvik (1993) påviste fnokker i Leiravassdraget på Romerike. Majoriteten av fnokkene var i størrelsesklassene 6 – 12 mikron (ca. 43 %) og 12 – 24 mikron (ca. 41 %), mens ca. 14 % av fnokkene var 25-61 mikron, og ca. 1 % var over 61 mikron. Det ble funnet mellom 4000 – 7000 fnokker per ml i vannet fra denne elva. Total suspensjonskonsentrasjon varierte med 36 – 85 mg/l.

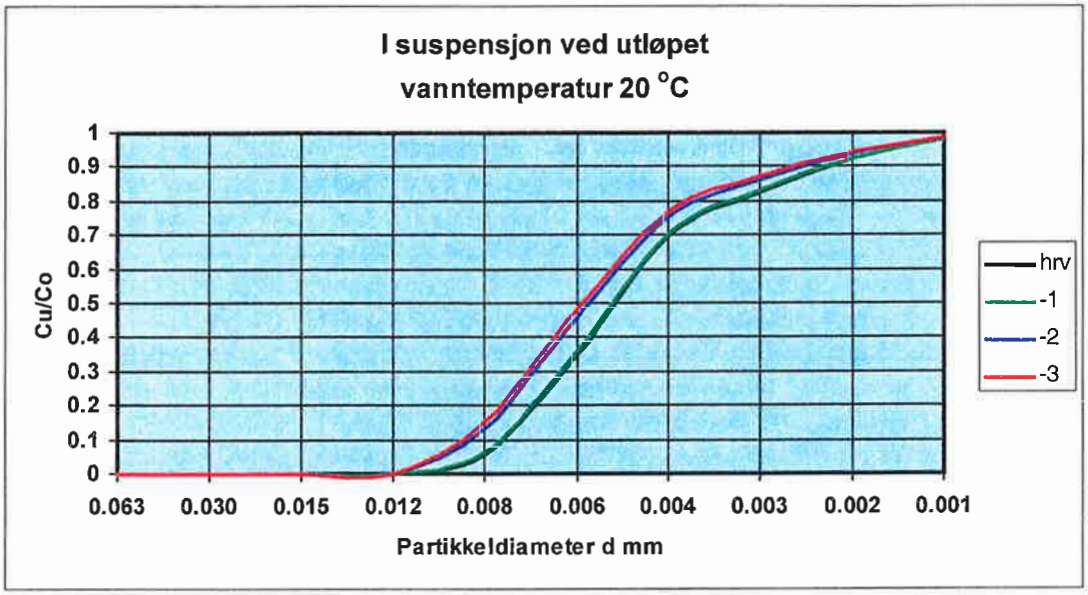
Det har vist seg å være svært vanskelig å måle fallhastigheten på fnokker, bl.a. pga. metodiske problemer. Mange av metodene for å måle fallhastighet av fnokker har basert seg på fnokker produsert i laboratorier. Skarbøvik (1993) utviklet en metode for å måle fallhastigheten til fnokker i en naturlig suspensjon. Metoden er tidkrevende og egner seg ikke til rutineundersøkelser. Det viste seg at i gjennomsnitt var fallhastigheten til fnokkene svært langsom, jfr. tabellen under:

Tabell 2.1 Fallhastigheter til fnokker i naturlig suspensjon

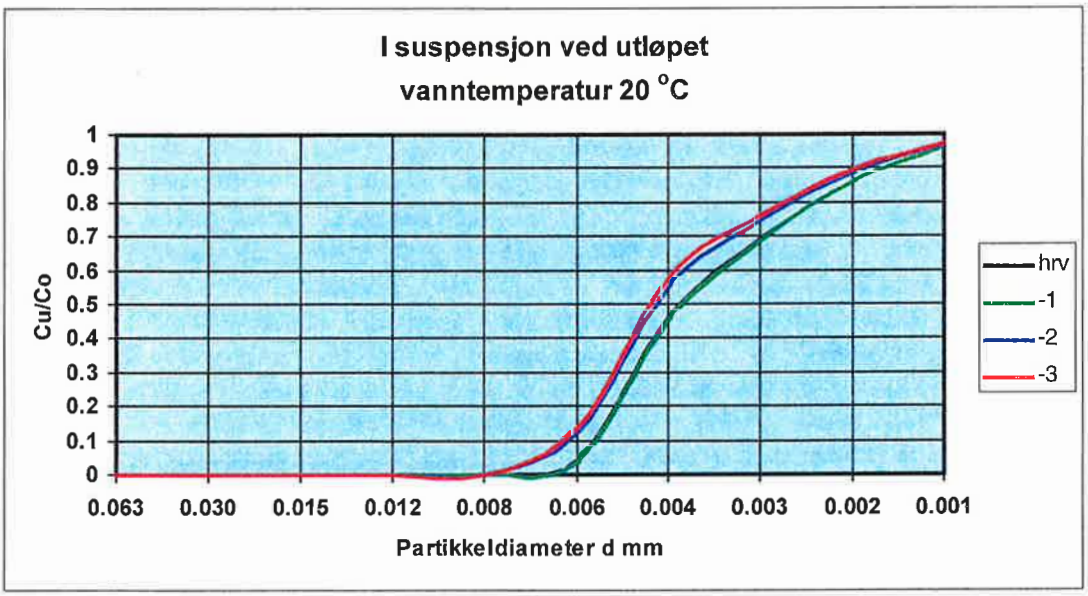
Fnokker med diameter	Faller med følgende hastighet:
16 mikron	0.014 cm/minutt
32	0.022
63	0.065

Imidlertid ble det påpekt at fnokker med samme størrelse hadde høyst ulik fallhastighet, da de er svært uensartede. Noen fnokker består hovedsakelig av organisk materiale og synker svært sakte, mens andre har et høyere innhold av uorganiske partikler og er derfor tyngre. Noe ensartet svar på fallhastigheten til fnokker er derfor ikke lett å gi.

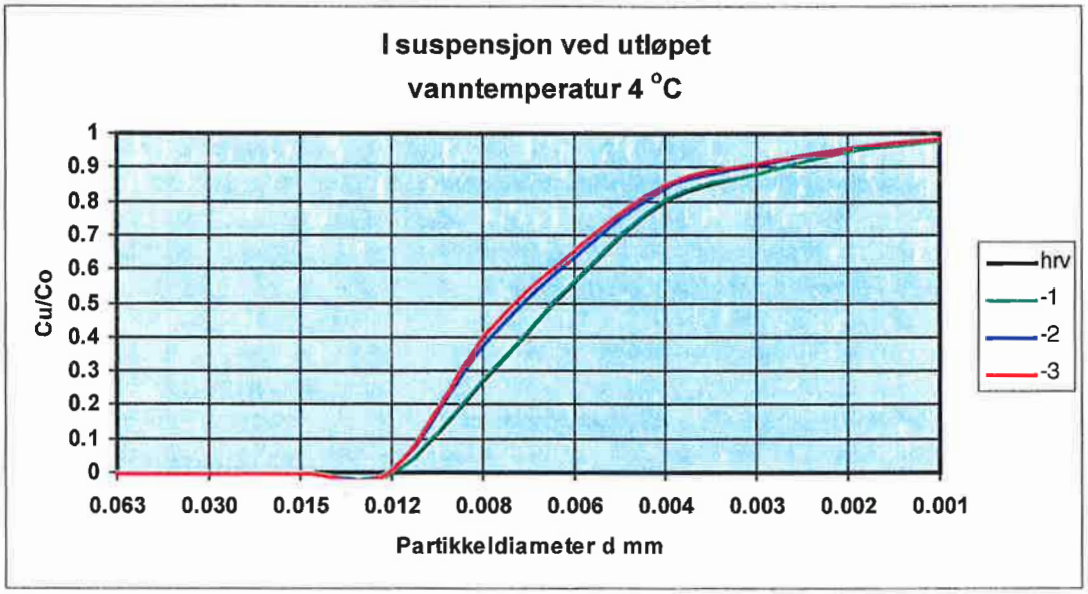
På den annen side viste den samme undersøkelsen at sedimentasjonsraten til en naturlig fnokket ferskvannsprøve var om lag fire ganger større enn tilsvarende prøver som hadde blitt utsatt for ultralyd. Ultralyd benyttes i laboratorieanalyser til å løse opp fnokker. Med andre ord sedimenterer partiklene i gjennomsnitt fire ganger raskere enn det vanlige sedimentasjonsligninger antyder, på grunn av fnokking. Dette kan ha betydning for de sedimentasjonsrater som er beregnet for Vinjevatn ved at noe mer materiale vil sedimentere underveis.



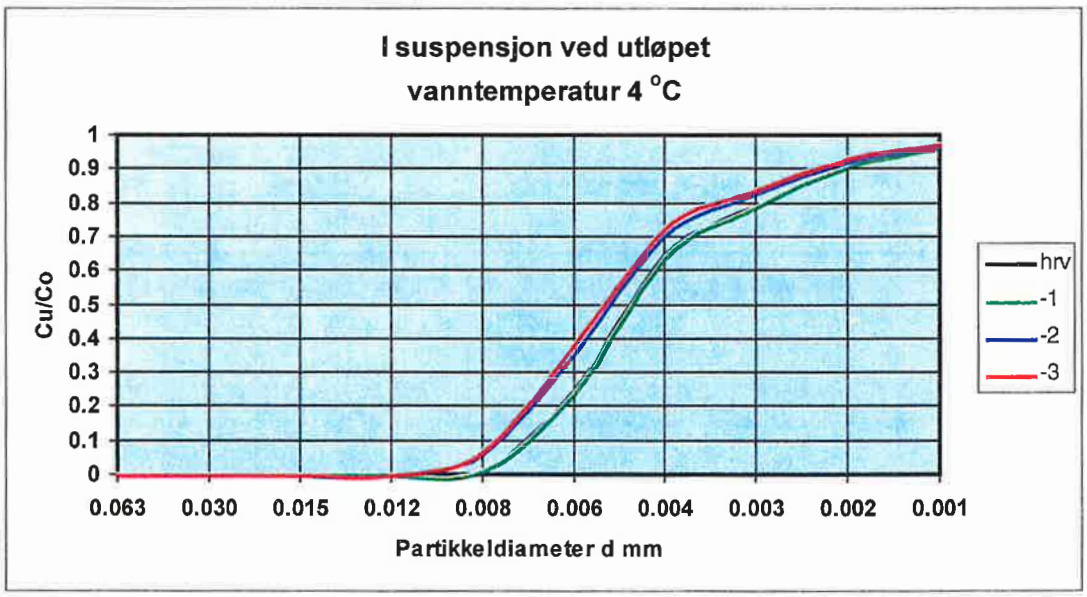
Figur 2.12 a Beregnet relativ restsuspensjon ved utløpet for materialet som passerer over terskelen fra det vestlige bassenget. Nedtapping av magasinet er satt til henholdsvis HRV, -1 m, -2 m og -3 m, (HRV sammenfaller ofte med kote -1 m). Vanntemperaturen er forutsatt å være 20 °C.



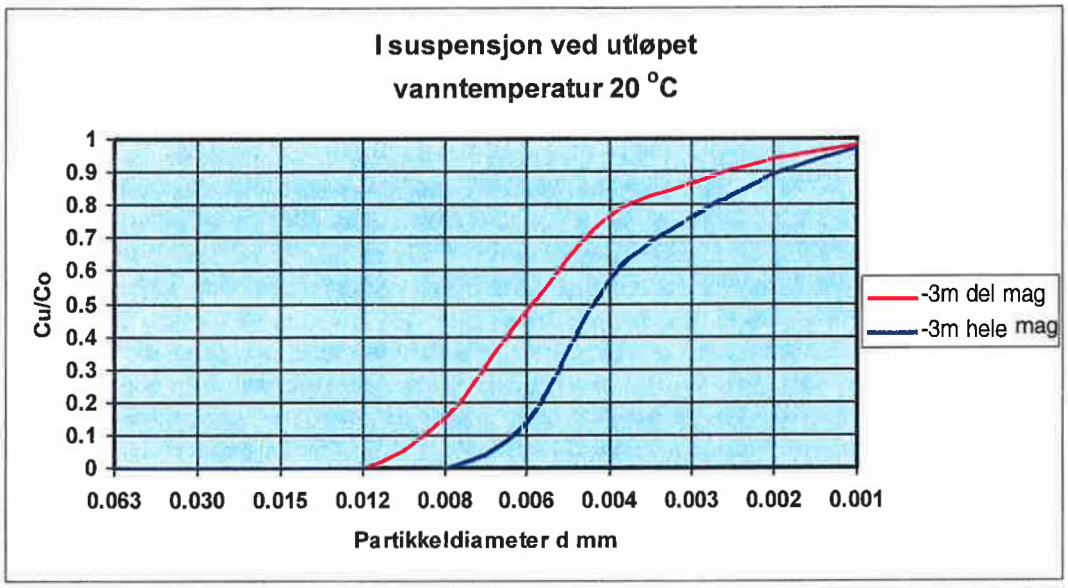
Figur 2.12 b Beregnet relativ restsuspensjon ved utløpet for materialet som tilføres ved innløpet av Smørkleppåi. Nedtapping av magasinet er satt til henholdsvis HRV, -1 m, -2 m og -3 m, (HRV sammenfaller ofte med kote -1 m). Vanntemperaturen er forutsatt å være 20 °C.



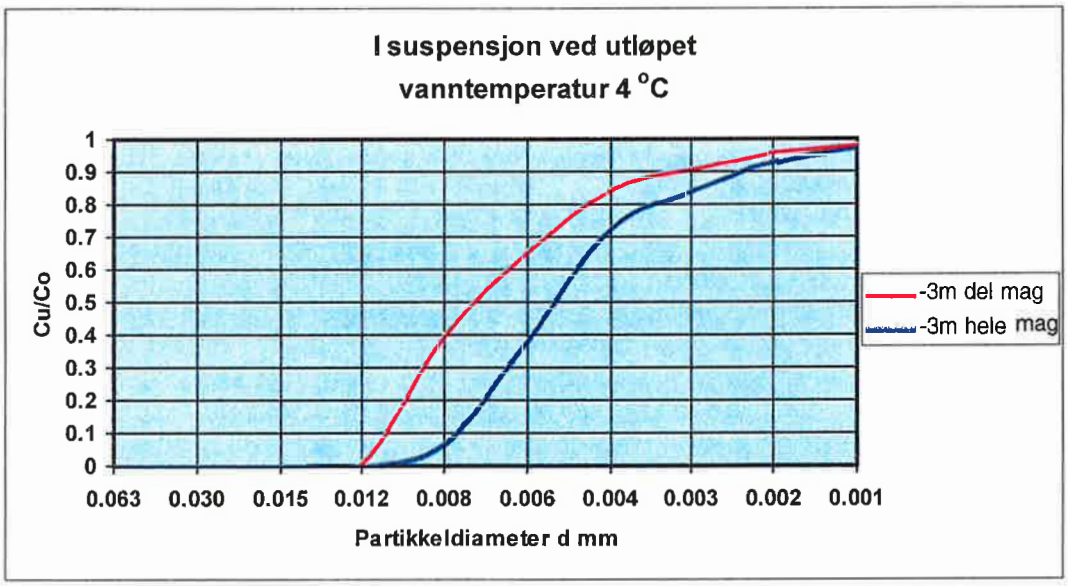
Figur 2.13 a Beregnet relativ restsuspensjon ved utløpet for materialet som passerer over terskelen fra det vestlige bassenget. Nedtapping av magasinet er satt til henholdsvis HRV, -1 m, -2 m og -3 m, (HRV sammenfaller ofte med kote -1 m). Vanntemperaturen er forutsatt å være 4 °C.



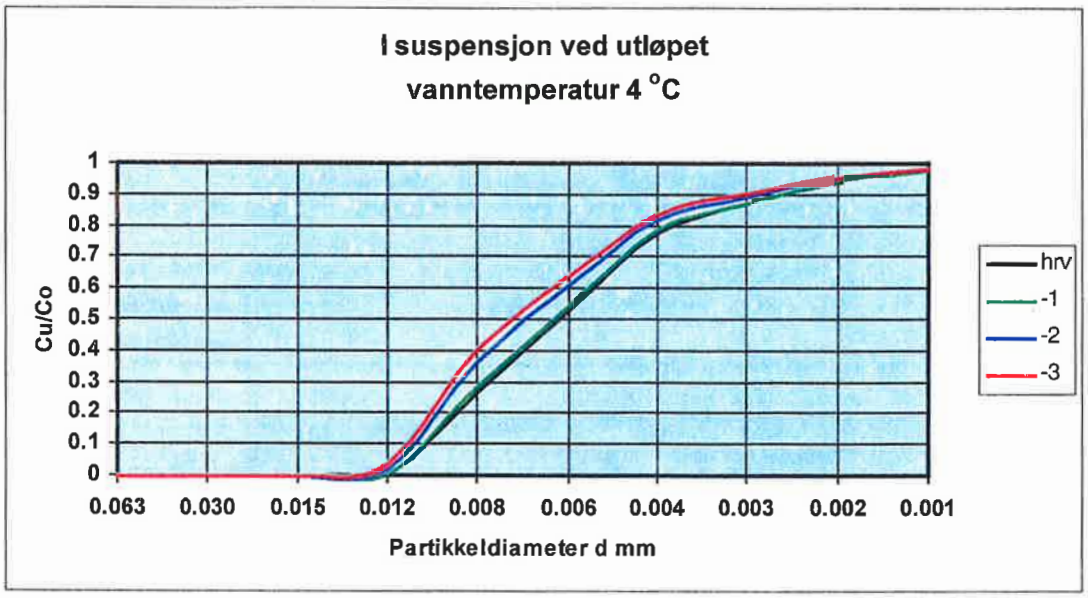
Figur 2.13 b Beregnet relativ restsuspensjon ved utløpet for materialet som tilføres ved innløpet av Smørkleppåi. Nedtapping av magasinet er satt til henholdsvis HRV, -1 m, -2 m og -3 m, (HRV sammenfaller ofte med kote -1 m). Vanntemperaturen er forutsatt å være 4 °C.



Figur 2.14 a Sammenligning av restsuspensjon beregnet ved forskjellige sedimentasjonveier (innløp Smørkleppåi vs terskelen fra de vestlige bassenget), vannstand -3 m og vanntemperatur 20 °C.



Figur 2.14 b Sammenligning av restsuspensjon beregnet ved forskjellige sedimentasjonsveier (innløp Smørkleppåi vs terskelen fra de vestlige bassenget), vannstand -3 m og vanntemperatur 4 °C.

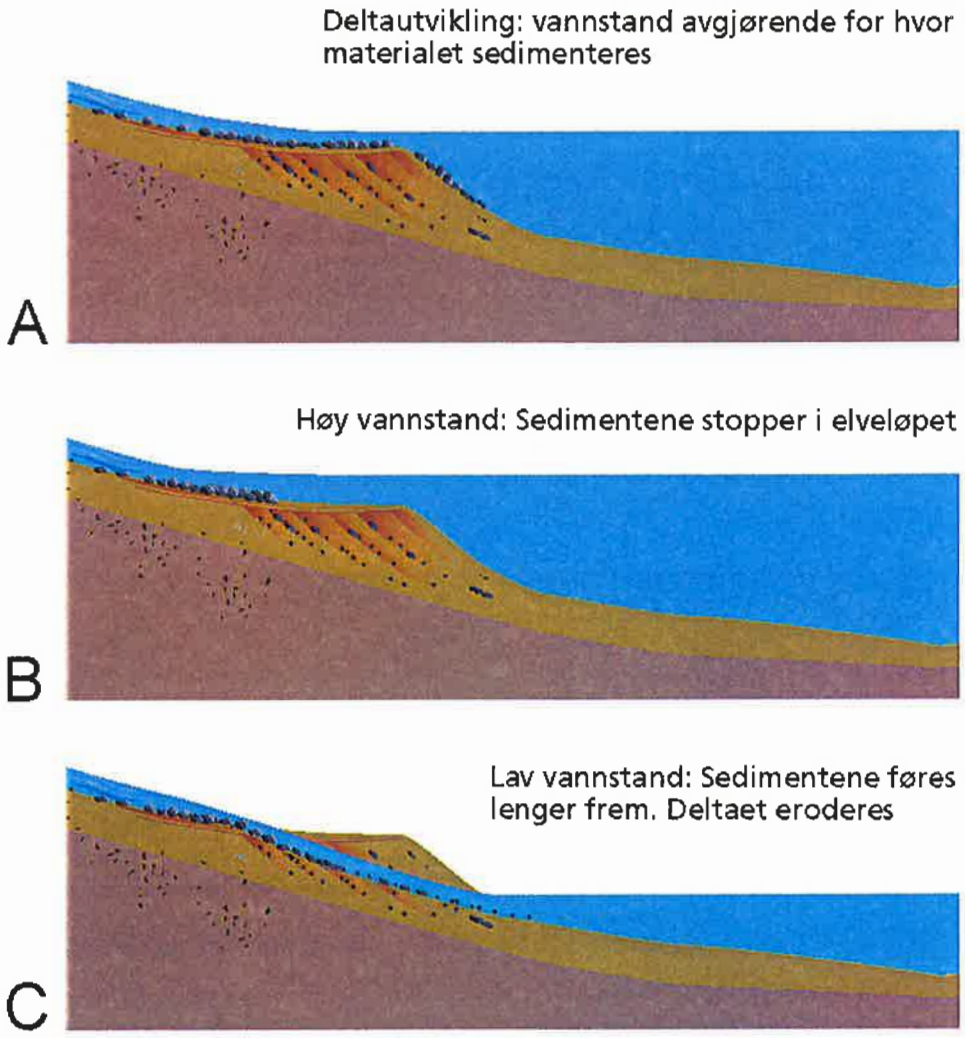


Figur 2.14 c Beregnet relativ restsuspensjon ved utløpet for materialet som passerer over terskelen fra det vestlige bassenget med stasjonær vannstand og 70 m^3/s ved utløpet. Nedtapping av magasinet er satt til henholdsvis HRV, -1 m, -2 m og -3 m. Vanntemperaturen er forutsatt å være 4 °C.

2.4 *Deltapålagring under vekslende vannstand*

Foran materialførende elver bygges det opp deltaer eller små elvevifter. Når elvene løper inn i magasinet avtar strømhastighet og gradient, slik at materialet blir avsatt. Suspensjonsmaterialet føres lengst ut og sedimenteres som bunnlag over et større område. Bunntransporten som består av stein, grus og noe sand, blir ofte avsatt som skrålag over bunnlagene. Sjiktningen i et stabilt delta som bygges ut i et vannbasseng med konstant vannstand, vil bli som vist langs et lengdesnitt i fig 2.15 A. Topplagene i deltaet er elvesletteavsetninger, en blanding av sand og silt og grusmateriale som avsettes over skrålagene. Vannstanden i magasinet har stor betydning for hvor materialet pålagres. Når skjærkreftene som settes opp av elvens strømhastighet faller under grenseverdien for bunntransporten vil den stoppe opp i løpet, se fig 2.15 B. Hvis dette inntreffer under en stor flom i Smørkleppåi, vil bunntransporten legge opp en midtbanke i elveløpet. Banken kan etter hvert bli så stor at elveløpet tar et nytt leie. Når vannstanden i bassenget stadig varierer under en effektkjøring, vil området med kritisk skjærstress forflyttes som et resultat av vannstandsendringene. Senkning av vannstanden innebærer en senkning av erosjonsbasis som medfører økt erosjon i deltaområdet. Hvis det inntreffer en stor flom under lav vannstand vil dette medføre ytterligere belastninger (se fig 2.15 C) og at bunntransporten føres lenger ut i deltaområdet. Forholdene under en effektkjøring kan derfor bli mer ustabile med stadige endringer i erosjon og sedimentasjon. Dette får konsekvenser for leveområdene til dyr og planter i deltaområdene. Leveområder som har vært stabile i en periode, vil plutselig kunne eroderes eller overlagres med sedimenter og må koloniseres på ny.

Hyppigheten av løpsendringer vil være avhengig av størrelsen på sedimenttransporten og amplituden på vannstandsvariasjonene. Dekksjiktet i Smørkleppåi består av svært grove steinfraksjoner. Dette materialet skjermer til en viss grad for erosjon under sterk vannstandssenkning. Hvis bunnmaterialet i Smørkleppåi hadde vært mer finfordelt, hadde erosjonen under lav vannstand blitt mer omfattende. Vinjevatn har allerede vært regulert i lang tid, slik at naturlige forhold i stor grad er forstyrret. En omlegging til effektregulering med store vannstandsvingninger vil imidlertid øke instabiliteten sterkt. Figur 2.16 og 2.17 viser Smørkleppåis delta ved lav nedtapping under effektkjøringen 17/9 – 27/9 1997.



Figur 2.15 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.

Figur 2.16 Flyfoto av deltaet ved Smørkleppåi under lav nedtapping av magasinet 18. september 1997.

Figur 2.17 Foto av deltaet ved Smørkleppåi under lav nedtapping av magasinet 18. september 1997.

3. Forsøkskjøringer i Vinjevatn

Måleresultater fra de forskjellige periodene med felteksperimenter og referansekjøringer er diskutert i dette kapittelet. Måleresultatene omfatter data fra sedimentfeller, vannprøver i innløpselvene og magasinet og feltobservasjoner av erosjonsprosesser. I forbindelse med forsøkskjøringene ble det satt ut rigger med sedimentfeller på tre steder i Vinjevatn. Felleriggene ble plassert i det vestlige magasinet ved Sondrisland, i dypbassenget utenfor Sandnes og nedstrøms broen helt øst i magasinet. De to vestlige fellene ble satt ut i 5 nivå, henholdsvis 1 m, 3 m, 5 m, 10 m og 15 m dyp. Nedstrøms broen ble det målt i 4 nivåer, henholdsvis 1 m, 3 m, 5 m og 10 m. Under de tre siste måleperiodene ble det satt ut en fjerde fellerigg i nærheten av Nes/ Vassenden, jfr fig 1.3. Ved denne felleriggen ble det målt i 4 nivåer, 1 m, 3 m, 5 m og 10 m. Fellene ble satt ut første gang i forbindelse med effektkjøring i perioden 16. til 30. august 1997. For å få registreringer fra de forskjellige effekt- og referanseperioder, ble fellene tømt mellom hver periode.

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 og middelvind pr. døgn er presentert med observasjoner fra målestasjonen som ble etablert på Nes og ved Vinjebrui, se fig 3.8 a, b, c.

Under alle referanse- og effektkjøringsperiodene ble det tatt vannprøver for å bestemme suspensjonskonsentrasjon i tilløpselver og bekker som løper inn i Vinjevatn. Det ble også tatt prøver av driftsvannet ved Vinje kraftstasjon, men det foreligger ikke kontinuerlige måleserier. I august og september 1998 ble det også tatt daglige vannprøver av driftsvannet ved Tokke kraftstasjon.

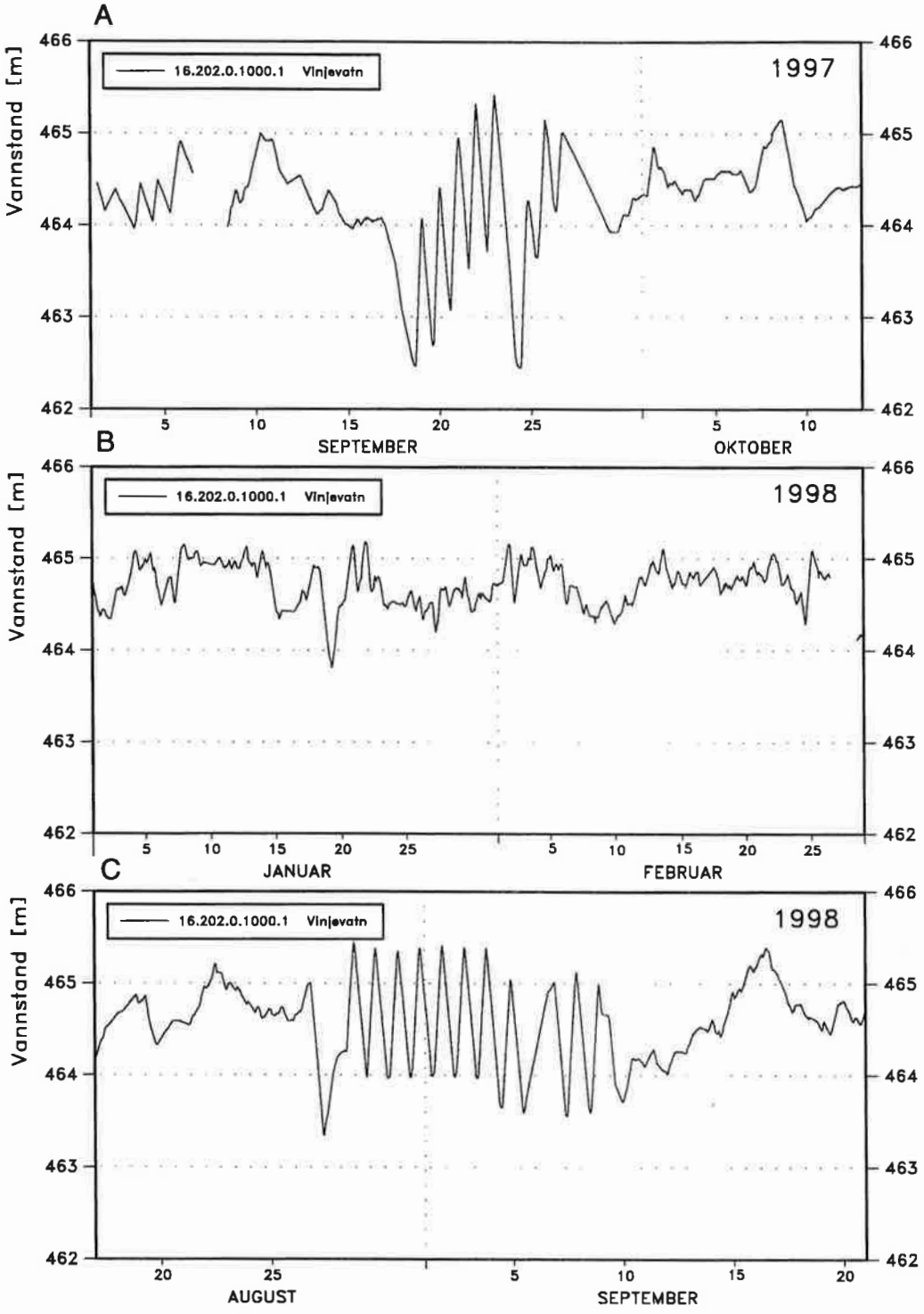
3.1 Forsøkskjøring 1997

3.1.1 Effektkjøring 1: 17/9 – 29/9

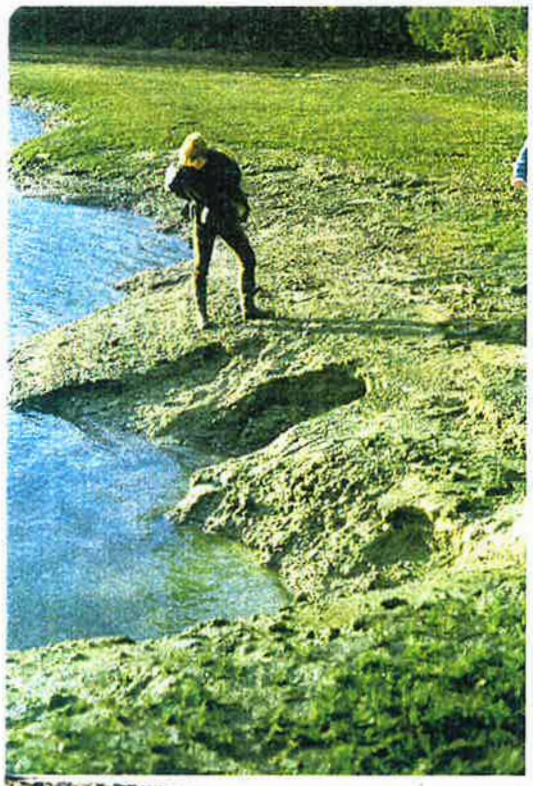
I perioden 17. –29. september 1997 ble det gjennomført prøvekjøringer med effektregulering ved Vinje og Tokke kraftstasjoner. Kraftige døgnsvingninger i Vinjevatn ble oppnådd ved alternerende kjøring av kraftstasjonene.

Prøvekjøringen startet ved å senke vannstanden til kote 462.5 for deretter å pendle med døgnsvingninger på ca 1.5 m. Den første delen av døgnpendlingene pågikk de første fem døgn med ca 25 cm økning av høyeste og laveste vannstand for hver døgnsyklus. Etter fem døgn var kulminasjonsvannstanden ved HRV, kote 465.5. I løpet av de neste 36 timer ble vannstanden senket tilbake til 462.5 m. Den siste delen av prøvekjøringen ble gjennomført i tre trinn. Minimumsvannstandene var på henholdsvis ca 463.7 og 464.2, mens maksimumsvannstanden var på 464.25, 465.2 og 465.0. Pendlingsforsøkene ble avsluttet på kote 464 den 29. september, se fig 3.1 A.

Det ble anvendt sedimentfeller for å registrere sedimentmengdene som var i suspensjon under prøvekjøringsperioden. Fellene ble satt ut 16. september, rett før prøvekjøringen startet, og ble tømt for materiale 30. september etter at prøvekjøringen var avsluttet. Sedimentfellene ble satt ut igjen samme dag for å måle sedimentasjonen i en referanseperiode med normal drift av kraftverkene. Referanseperioden varte fra 30. september til 14. oktober.



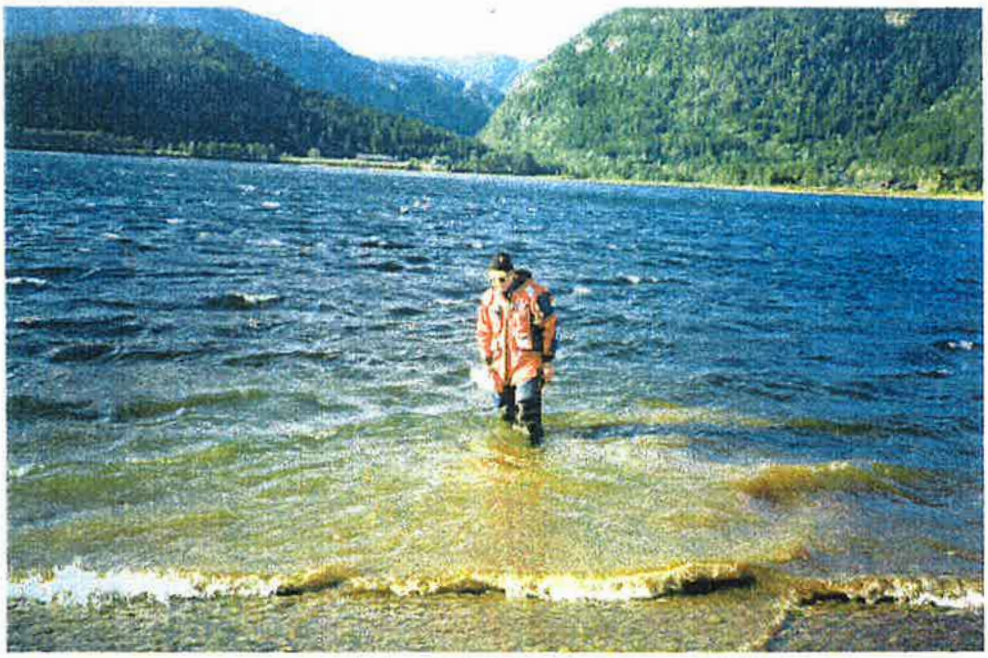
Figur 3.1 Vannstandstandsvariasjoner i Vinjevatn i perioder med felteksperimenter.
A: effektregulering og referanseperiode med normal sesongmessig regulering i 1997.
B: referanseperiode vinteren 1998.
C: effektregulering og referanseperiode med normal sesongmessig regulering i 1998.



Figur 3.2. Grunnvannserosjon og utglidninger mellom Vassenden og Nes. Foto 24. september 1997 ved vannstand ca på kote 462.5.

Figur 3.3. Utglidninger mellom Vassenden og Nes førte til høye konsentrasjoner av suspendert materiale. Foto 24. september 1997 ved vannstand ca på kote 462.5.

Resultatene fra den første prøvekjøringsperioden er vist i fig 3.5 a, b, c. Under effektkjøringen var det stor mobilitet i sedimentene i innsjøen. Ved fellerigg 1 (Sondrisland) ble det målt sedimentasjonsrater fra 1.05 - 2.39 g/døgn m^2. Det ble målt en jevn økning med dypet fra nivå 1 m til 10 m. Ved nivå 15 m bar prøven preg av å inneholde bunnmateriale og ble derfor forkastet. Ved fellerigg 2 (Sandnes) avtar sedimentasjonraten fra 2.41 g/døgn m^2 ved en meters dyp til 1.66 g/døgn m^2 ved 5 meters dyp for så å øke igjen. Ved 15 meters dyp er det målt 2.44 g/døgn m^2. Ved utløpet av Vinjevatn (fellerigg 3) ble det målt størst sedimentasjonsintensitet ved 5 meters dyp 2.12 g/døgn m^2 og lavest ved 10 meters dyp, 1.50 g/døgn m^2.



Figur 3.4 Bølgeerosjon ga høye konsentrasjoner i visse områder av strandsonen under effektreguleringen. Foto ved Nes 17. september 1997, partikkelkonsentrasjon 470 mg/l.

Ved befaringer under effektkjøringen ble det iakttatt sterk blakking av vannet, se bilde fig 3.4. Mellom Vassenden og Nes var det aktiv grunnvannserosjon når vannstanden ble tappet ned under kote 463.5. Da vannstanden var på det laveste 17. september, ble det tatt suspensjonsprøver i skyllesonen ved flere utvalgte steder i magasinet, se kart fig 1.3. Prøvene ble tatt med forskjellig avstand fra stranden langs flere utvalgte profiler. I skyllesonenen på nordsiden av Nes gikk totalkonsentrasjonene opp mot ca 470 mg/l. Noen meter lenger ut fra stranden avtok konsentrasjonen til 160 mg/l. De øvrige resultatene viser konsentrasjoner på mellom 8 mg/l og 80 mg/l. Prøvetakingen ble til en viss grad repetert ved vannstandssenkningen 24. og 25. september, se fig 1.3. På laveste vannstand 24. september ble det iaktatt grunnvannserosjon, aktiv ravinering og utglidninger i området mellom Vassenden og Nes, se bilde i fig 3.2. Erosjonsaktiviteten førte lokalt til forholdsvis høye konsentrasjoner i vannmassene utenfor. Vannprøver viser konsentrasjoner på opp mot 50 mg/l, se fig 3.3. I forbindelse med utrasningene ble det dannet tetthetsstrømmer med høyere konsentrasjoner langs bunnen. Prøver som senere ble tatt ved erosjonskanten i perioden etter 24. september til 13. oktober viser lave konsentrasjoner (mindre enn 3 mg/l), se fig 3.6 a. Noen av prøvene som ble tatt ved

Sondrisland 18. september viser at erosjonen i Smørkleppåis delta ga konsentrasjoner på mellom 13-24 mg/l. Prøver som ble tatt i samme område 19. og 22. september viser konsentrasjoner på 2.5 mg/l, se fig 3.7 b.

Vindstyrken som ble målt ved Nes i denne perioden er presentert i fig 3.8 a. Måleperioden startet med en relativt sterk vind ca 7 m/s og opp mot 12 m/s i kastene. I løpet av perioden avtok vinden til ca 1 m/s. Det ble observert en relativ stabil vindretning fra nordvest i de første dagene av prøvekjøringsperioden. Retningen snudde mot øst i en kort periode med lav vindstyrke.

3.1.2 Referanseperiode 1, 30/9 – 14/10

Under referanseperioden ble kraftverkene kjørt med normal drift uten hyppige og store vannstandsvariasjoner. Vannstanden varierte mellom kote 464 og 465.5, se fig 3.1 A

Resultatene fra den første referanseperioden er vist i fig 3.5 a, b, c. Ved fellerigg 1 (Sondrisland) ble det målt sedimentasjonsrater mellom 0.3 og 0.45 g/døgn m^2 som er markert lavere enn i effektkjøringsperioden. Sedimentmengdene er også jevnere fordelt med dypet enn under effektkjøringen. Ved fellerigg 2 (Sandnes) viser resultatene også lave verdier. Sedimentasjonsratene varierer mellom 0.11 g/døgn m^2 og 0.53 g/døgn m^2 og en tilfeldig variasjon med dypet. Ved fellerigg 3 ble det også målt lave verdier. Sedimentasjonsratene varierer mellom 0.18 g/døgn m^2 og 0.26 g/døgn m^2. Variasjonene med dypet er tilfeldig i likhet med de øvrige målestedene.

Vindstyrken i de første dagene økte fra 2.5 m/s til 8 m/s med opp mot 14 m/s i kastene. Vinden avtok deretter til ca 1 m/s for så å øke igjen mot slutten av perioden, se fig 3.8 a. Det var framherskende nordvestlige vinder i perioder med sterk vind, men retningen dreide mot øst i perioder med svakere vinder.

3.2 Forsøkskjøring 1998

3.2.1 Referanseperiode 2, 19/1 – 19/2

Under referanseperioden ble kraftverkene kjørt med normal drift uten hyppige og store vannstandsvariasjoner. Vannstanden varierte mellom kote 463.8 og 465.2, se fig 3.1 B

Det ble satt ut sedimentfeller ved Sandnes (fellerigg 2) og ved utløpet (fellerigg 3) i denne måleperioden. Isdekke i området ved Sondrisland (fellerigg 3) forhindret målinger i dette området. Resultatene viser lave verdier i denne perioden, se fig 3.5 b, c. Verdiene var spesielt lave ved fellerigg 3 hvor verdiene varierte i intervallet 0.03 g/døgn m^2 og 0.06 g/døgn m^2. Ved fellerigg 2 ble det målt noe høyere verdier, verdiene varierte i intervallet 0.10 g/døgn m^2 og 0.54 g/døgn m^2. Det ble ikke målt noen økning med dypet slik som i prøvekjøringsperioden i august 1997.

Det er ikke registrert vindstyrke og vindretning i denne perioden

3.2.2 Referanseperiode 3, 17/8 – 25/8

Under referanseperioden ble kraftverkene kjørt med normal drift uten hyppige og store vannstandsvariasjoner. Vannstanden varierte mellom kote 464.2 og 465.2, se fig 3.1 C.

Til forskjell fra referanseperiode 1 i september 1997, hvor målingene ble foretatt etter en prøvekjøringsperiode, er disse målingene tatt før en prøvekjøringsperiode. En mulig innvirkning fra forhold som kan oppstå under effektkjøring vil dermed unngås.

Det ble satt ut fire fellerigger under måleperioden. I tillegg til de tre målepunktene som er benyttet tidligere, ble det satt ut en ekstra fellerigg et stykke sørøst for fellerigg 1, se fig 1.3. Resultatene fra referanseperiode 3 er vist i fig 3.5 a, b, c, d. Ved fellerigg 1 (Sondrisland) ble det målt sedimentasjonsrater mellom 0.10 og 0.70 g/døgn m^2. Maksimumsverdien er noe høyere enn i de andre referanseperiodene. De øvrige målingene ligger imidlertid på samme nivå som i de andre referanseperiodene. Sedimentmengdene tiltar heller ikke med dypet slik som under den første prøvekjøringen. Ved fellerigg 2 (Sandnes) ble det målt verdier som ligger på samme nivå som tidligere referanseperioder. Sedimentasjonsratene varierer mellom 0.30 g/døgn m^2 og 0.42 g/døgn m^2. Ved fellerigg 3 ble det målt sedimentasjonsrater mellom 0.17 g/døgn m^2 og 0.24 g/døgn m^2. Ved fellerigg 4 var verdiene også lave, mellom 0.12 g/døgn m^2 og 0.15 g/døgn m^2. Dette er verdier som ligger på samme nivå som de laveste verdiene fra fellerigg 1 som ligger i samme område.

Det ble målt vindstyrke og vindretning ved Nes i perioden 21. august til og med 12. oktober 1998. Vindstyrken i referanseperiode 3 er derfor ikke målt i de første dagene av perioden. Fra 21. august til 25. august ble det målt en vindstyrke som lå mellom 2 m/s og 5 m/s. Maksvinden i perioden var opp mot 9 m/s, se fig 3.8 c. Det var hovedsakelig østlige vinder de første dagene av måleperioden, men vinden snudde mot nordvest i slutten av perioden.

3.2.3 Effektkjøring 2, 25/8 – 10/9

I perioden 26. august til 10. september 1998 ble den andre prøvekjøringen med effektregulering ved Vinje og Tokke kraftstasjoner gjennomført. Døgnsvingninger av vannstanden i Vinjevatn ble oppnådd ved alternerende kjøring av kraftstasjonene. Vannstanden skulle nå pendle på et høyere nivå enn i 1997, mellom kote 465.5 og kote 463.5.

Prøvekjøringen startet ved å senke vannstanden til kote 463.4 for så å heve vannstanden til i underkant av 465.5 (HRV). Fram til 3. september ble vannstanden pendlet med døgnsvingninger på ca 1.5 m mellom kote 464 og 465.4. I den siste delen av perioden ble maks og minimumsvannstanden senket med ca 0.5 m, se fig 3.1 C.

Resultatene fra den andre prøvekjøringsperioden er vist i fig 3.5 a, b, c, d. Det ble ikke registrert like stor mobilitet i sedimentene i Vinjevatn under denne prøvekjøringen. Sedimentasjonsratene ligger på samme nivå som under referanseperiodene. Mindre pendlingsamplitude og pendling som bare omfattet de øverste 1.5 - 2.0 m under HRV har sannsynligvis hatt en innvirkning. Ved fellerigg 1 (Sondrisland) ble det målt sedimentasjonsrater fra 0.16 – 0.28 g/døgn m^2. Ved fellerigg 2 (Sandnes) ligger verdiene mellom 0.48 g/døgn m^2 og 0.69 g/døgn m^2. Den høyeste verdien ble målt ved utløpet av Vinjevatn (fellerigg 3), 1.46 g/døgn m^2 ved 5 meters dyp. Minimumsverdien her var på 0.20 g/døgn m^2. Ved fellerigg 4 ble det målt verdier mellom 0.16 g/døgn m^2 og 0.22 g/døgn m^2. Det ble ikke målt noen økning med dypet slik som i prøvekjøringsperioden i august 1997.

Middelvinden lå mellom 1 m/s og 2 m/s med opp mot 5 m/s i kastene gjennom hele prøvekjøringsperioden, se fig 3.8 c. Retningen vekslet mellom østlige og nordvestlige vinder. Midt i perioden ble det imidlertid registrert retninger fra sydvest.

Under en feltbefaring da vannstanden lå høyt i magasinet, ble det iakttatt en markert erosjon i bakveggen av strandplattformen ved Sandnes. Det ble også iakttatt en viss erosjonsaktivitet nederst langs bakveggen ved Sondrisland. Når vannstanden pendlet ned mot minimum kom grunnvannet ut langs en kildehorisont under det høyeste vannstandsnivået. I denne sonen var strandsedimentene svært oppbløtt og lett å bringe i bevegelse. Det var imidlertid liten bølgeaktivitet under befaringen. Grunnvannsnivået var generelt høyt på grunn av mye nedbør i den forutgående tidsperiode.

3.2.4 Referanseperiode 4, 10/9 – 16/9

Under denne referanseperioden ble kraftverkene kjørt med normal drift uten hyppige og store vannstandsvariasjoner. Det var imidlertid en jevnt stigende vannstand i løpet av perioden, fra ca. kote 464 til i underkant av 465.5 (HRV), se fig 3.1 C.

Resultatene fra referanseperiode 4 er vist i fig 3.5 a, b, c, d. Ved fellerigg 1 (Sondrisland) ble det målt sedimentasjonsrater mellom 0.25 og 0.54 g/døgn m^2. Ved fellerigg 2 (Sandnes) viser resultatene også lave verdier. Sedimentasjonsratene varierer mellom 0.14 g/døgn m^2 og 0.29 g/døgn m^2. Ved fellerigg 3 ble det også målt lave verdier. Sedimentasjonsratene varierer mellom 0.24 g/døgn m^2 og 0.30 g/døgn m^2. Fellerigg 4 hadde verdier mellom 0.12 g/døgn m^2 og 0.26 g/døgn m^2. Variasjonene med dypet er tilfeldig ved alle målestedene.

Det var relativt lite vind som ble målt i denne perioden. Middelvinden varierte hovedsakelig omkring 1 m/s med opp mot 3 m/s i kastene, se fig 3.8 c. Vindretningen vekslet også mellom østlige og vestlige vinder.

3.3 Diskusjon av måleresultatene

Konsentrasjonene fra vannprøvene som ble tatt i tilløpselvene er vist i fig 3.6 a, b. Lokaliteten ved brua over Vinjevatn og ved inntaksdammen representerer restsuspensjonen fra tilførselselvene og eventuell erosjon i magasinet. Det fremgår at det under effektkjøringen og referanseperioden i 1997 ble målt lave konsentrasjoner i alle tilløpselvene. Konsentrasjonene ligger for det meste mellom 0 og 4 mg/l. I utløpet ved brua over Vinjevatn økte imidlertid konsentrasjonen til over 16 mg/l ved lav vannstand under den første fasen av effektkjøringen. Under den samme situasjonen ble det imidlertid ikke registrert tilsvarende konsentrasjonsøkninger nede ved inntaksdammen. Under lav vannstand den 25. september økte også konsentrasjonen ved dammen til ca 8 mg/l, men denne konsentrasjonsøkningen kan være forårsaket av Vingråsbekken som munner ut i nedre del av magasinet, se fig 3.6 a. Konsentrasjonsmålingene langs strendene da vannstanden var på det laveste, viste imidlertid betydelig høyere verdier. I skyllesonene gikk totalkonsentrasjonene opp mot ca 470 mg/l. Noen meter lenger ut fra stranden avtok konsentrasjonen til 160 mg/l. De øvrige resultatene viser konsentrasjoner på mellom 8 mg/l og 80 mg/l, se fig 3.7 a. Ravineringen og utglidningene førte lokalt til konsentrasjoner på opp mot 50 mg/l i vannmassene utenfor, se fig 3.7 c. I forbindelse med utrasningene ble det dannet tetthetstrømmer med høyere konsentrasjoner langs bunnen. Erosjonsaktiviteten avtok betydelig i tiden etter.

Sedimentasjonsraten varierte med dypet, men det var vesentlig mer materiale i fellene på alle nivåer i løpet av effektkjøringsperiode 1 sammenlignet med den påfølgende referanseperioden, se fig 3.5 a, b, c. Det var svært lite materiale i tilløpselvene i begge perioder. Tilløpselvene har derfor bidratt lite til sedimentasjonen i fellene. Feltobservasjoner viste at det særlig var tre erosjonsprosesser som var mer

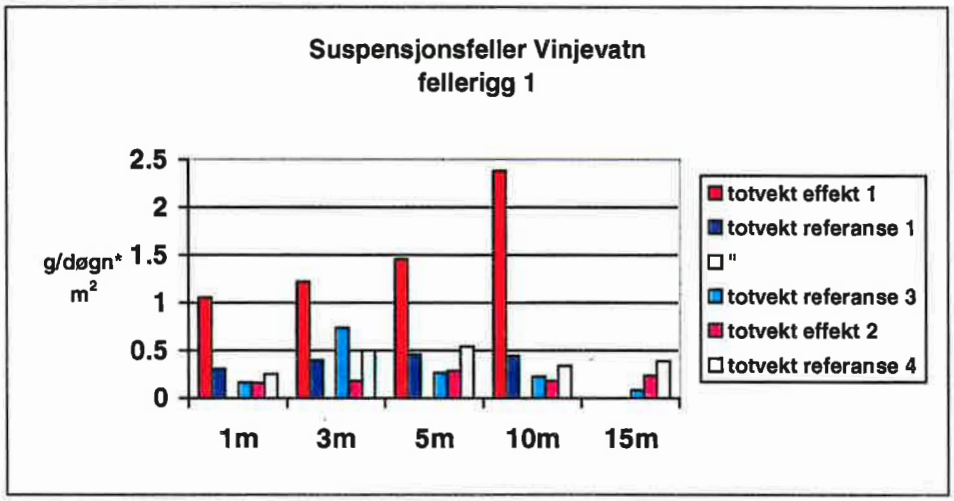


Fig 3.5 a Sedimentasjonsrater fra måleperiodene ved fellerigg 1

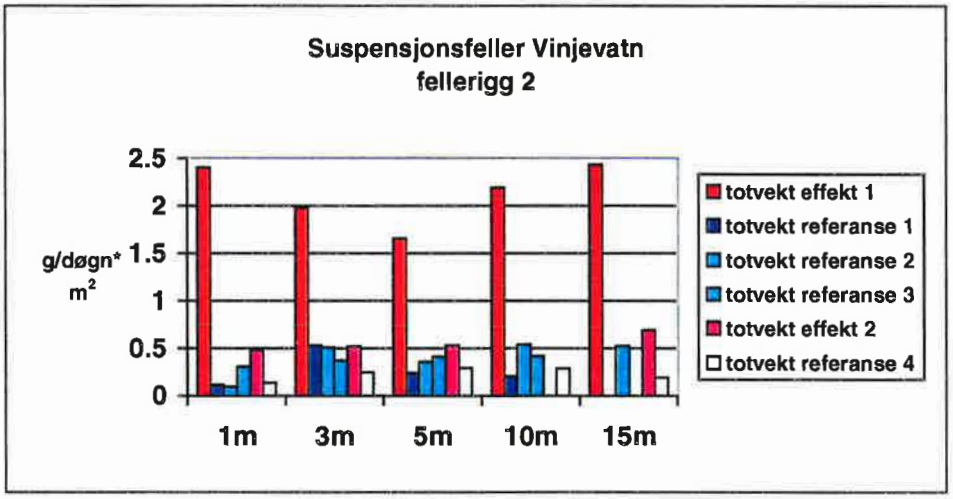


Fig 3.5 b Sedimentasjonsrater fra måleperiodene ved fellerigg 2.

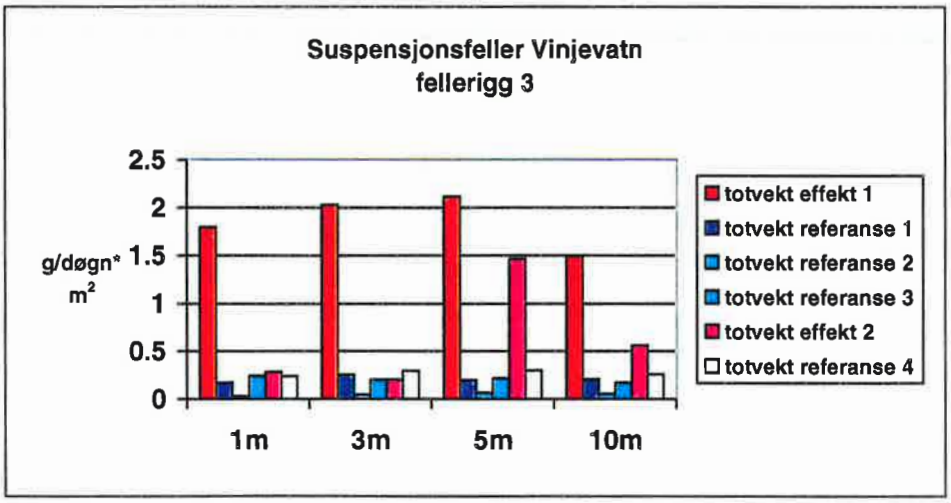


Fig 3.5 c Sedimentasjonsrater fra måleperiodene ved fellerigg 3

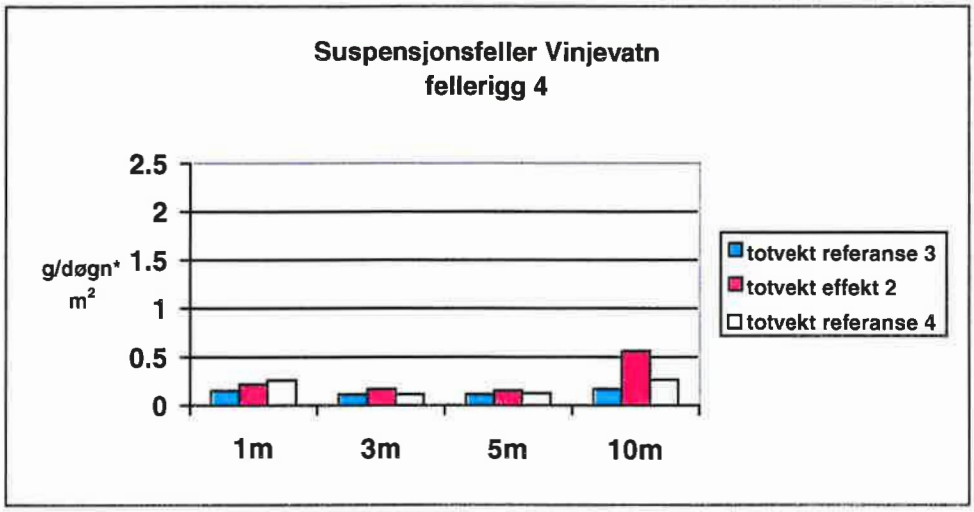


Fig 3.5 d Sedimentasjonsrater fra måleperiodene ved fellerigg 4

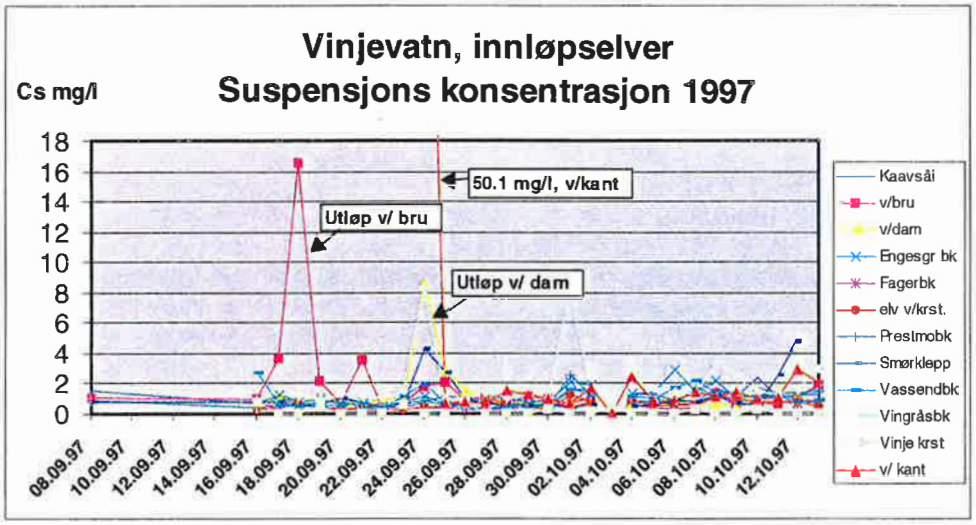


Fig 3.6 a Total suspensjonskonsentrasjon i innløpselver og ved utløp Vinjevatn 1997.

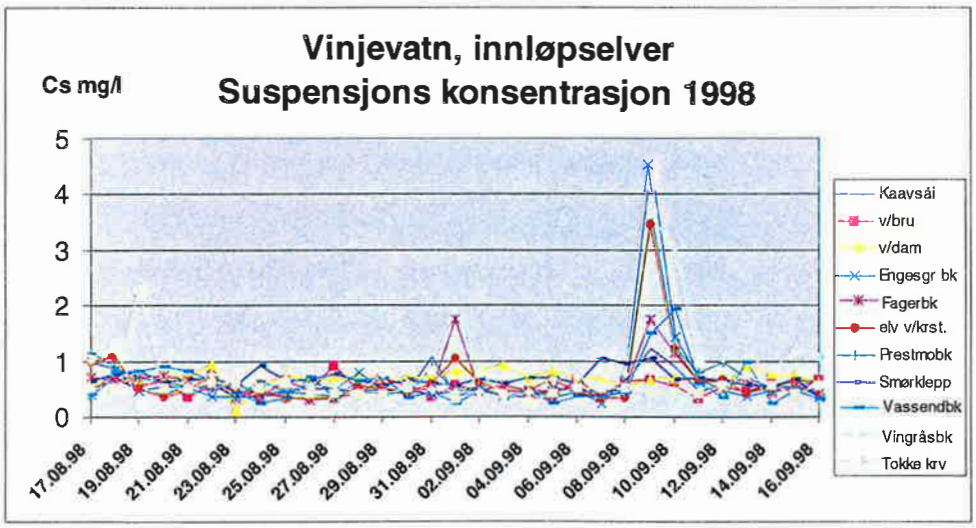


Fig 3.6 b Total suspensjonskonsentrasjon i innløpselver og ved utløp Vinjevatn 1998.

aktive under effektkjøringen enn i den påfølgende referanseperioden. Dette var grunnvannserosjon og utrasninger, erosjon i innløpsdeltaet ved Smørkleppåi og mer intensiv bølgeerosjon.

Til tross for like mye vind i de to periodene, er det nesten ikke materiale i bevegelse i magasinet under referanseperioden. Mye vind under effektkjøringen førte til bølgeerosjon langs strendene i det nedtappede magasinet, noe som førte til at konsentrasjonen av suspendert materiale i overflatevannet økte sterkt. Sammenhengen mellom vindretning og vindhastighet er vist i fig 3.8 a, b. Ved lave vindhastigheter ser det ut til at det er mer tilfeldig hvilken vindretning som blir observert, mens den sterkeste vinden ofte kommer fra vest eller nordvest.

Det finner alltid sted en viss erosjon og utvasking av materiale langs strendene. Når vannstanden pendler vil det bli en økt påkjenning på flere nivå. Samtidig er det påvist at den raske vannstandssenkningen fører til økt porevannstrykk. Dermed vil erosjonsterskelen senkes på grunn av redusert friksjon mellom kornene. Vindstyrke og vindretning er avgjørende for hvor intens erosjonen blir. Sedimentenes karakter og sammensetning er også av stor betydning. Langs strendene i Vinjevatn er det stedvis mye sand, men i de dypere områdene er det også gytjesedimenter som består av mye organisk materiale. Dette materialet har lav tetthet og er lett å bringe i bevegelse. Ved vannstander under kote 464.0 blir disse sedimentene eksponert for erosjon. Bølgebevegelsen kan påvirke bunnen ned til ca 7 m. Dette nivået benevnes ofte som bølgebasis. Ved sterk nedtapping vil derfor bølgebasis forflyttes ned mot dypere områder, se kart på fig 3.10. Under effektkjøring vil disse områdene eksponeres hyppigere for erosjon enn ved en sesongregulering.

Vannvegetasjonen på de grunne områdene skjermer til en viss grad mot erosjon. I følge Johansen og Rørslett (1999) medførte effektforsøkene visse skader på plantesamfunnene. De forventer imidlertid større negative virkninger ved stadig gjentagelse av effektkjøringer.

Etter hvert som magasinet ble tappet ned mot kote 463.5, ble det iakttatt grunnvannserosjon langs ytterkanten av stranden ved Vassenden på sydvestsiden av magasinet. Erosjonen syntes å være forholdsvis aktiv da vannstanden lå nede på kote 462.5. Under nedtappingen den 24. september ble det iakttatt aktiv ravinering. Det gikk også små skred og utglidninger i det samme området. Den 25. september ble ikke vannstanden senket under kote 463.5. Ravineringen opphørte samtidig som skred og utglidninger stoppet opp. Når vannstanden ligger på HRV, vaskes det ut materiale fra de høyereliggende områder av strendene. Ved Sondrisland synes dette å gi opphav til jordsig.

Under laveste nedtapping ble det også iakttatt erosjon omkring Smørkleppåis innløp. Strømningsforholdene på lav vannstand førte til at det ble dannet strømgroper rundt innløpet. Under høy vannstand kan bunntransporten stoppe i løpene og forårsake løpsendringer. Under påfølgende lav vannstand vil deltaet igjen kunne eroderes. Pålagring av bunntransport under sterkt varierende vannstand synes derfor å føre til økende instabilitet i deltaområdet. Alle elvevifter foran innløpselvene i Vinjevatn påvirkes på samme måte. En pendling under høy vannføring i Smørkleppåi kan derfor føre til at bunntransporten i elven fordeles på en svært uregelmessig måte. De grove kornstørrelsene i Smørkleppåi kan imidlertid skjerme for en omfattende erosjon i avsetningene, slik at omfanget begrenses.

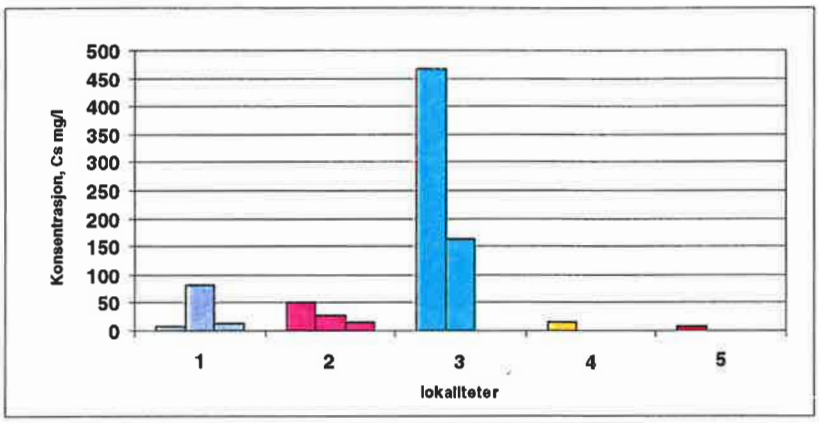


Fig 3.7 a Total suspensjonskonsentrasjon i strandsonen ved Nes. Lokalitet 1 er innerst i vika og lokalitet 5 er ytterst på neset (fig 1.3). Ved hver lokalitet er det tatt opp til tre prøver, innerst på stranden (fra venstre) og ca 10 meter utover i hvert profil. Prøvene er tatt 17 september 1997 under laveste vannstand ved første nedtapping under effektkjøringen.

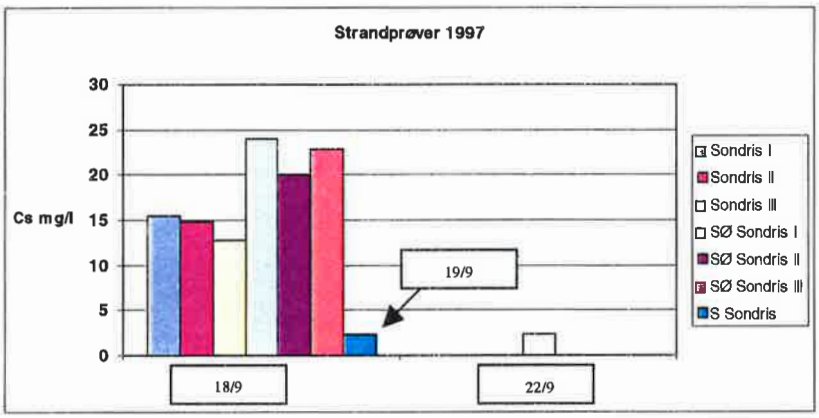


Fig 3.7 b Total suspensjonskonsentrasjon i strandsonen ved Sondrisland og området ved innløpsdeltaet til Smørkleppåi. Det ble tatt seks prøver 18. september, en prøve 19. september og en siste prøve 22. september 1997. Alle prøvene ble tatt på laveste døgnlige vannstand, (se fig 3.1).

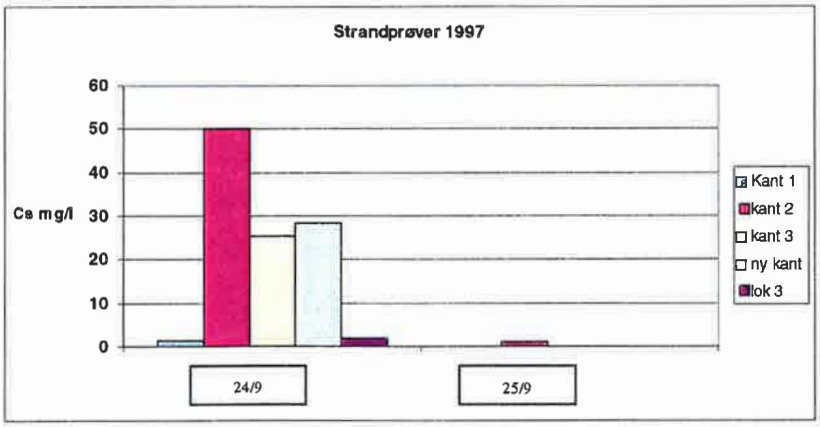


Fig 3.7 c Total suspensjonskonsentrasjon i strandsonen ved Vassenden (kant), lokalitet 3 ved Nes. Prøvene ble tatt 24. og 25. september 1997, (se fig 3.1).

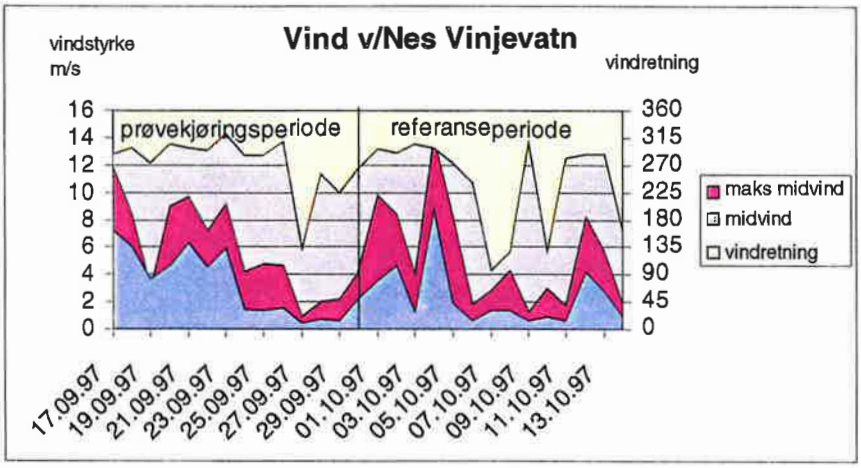


Fig 3.8 a Vindstyrke og vindretning ved Nes september og oktober 1997

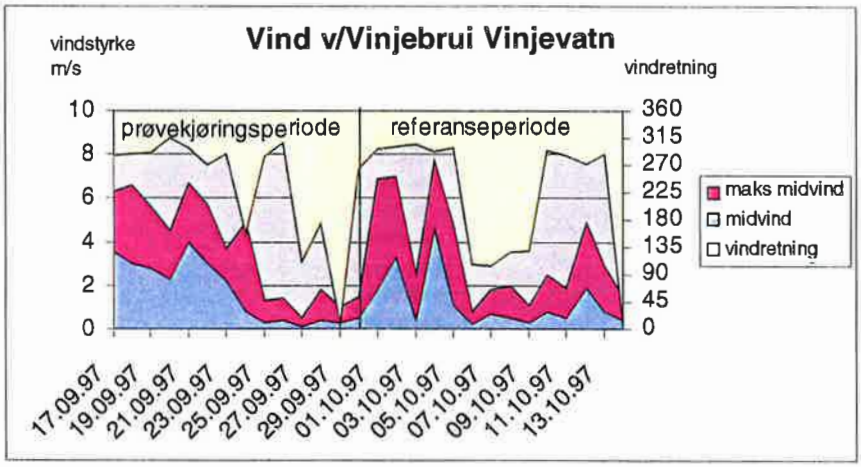


Fig 3.8 b Vindstyrke og vindretning ved Vinjebrui september og oktober 1997

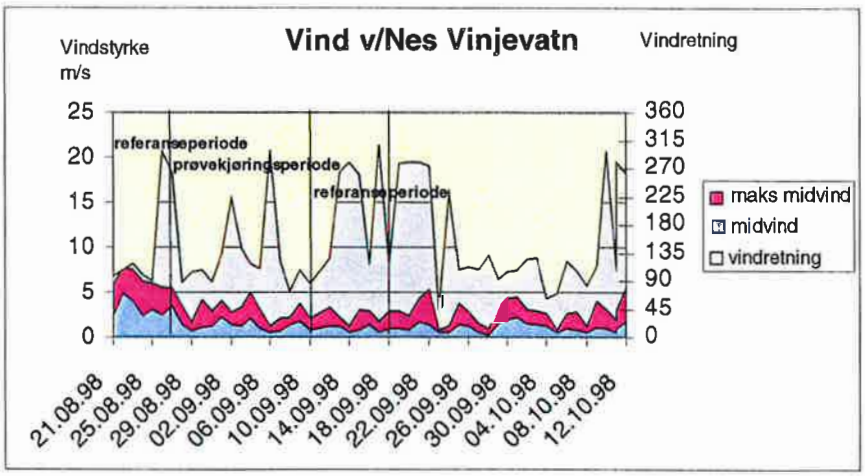


Fig 3.8 c Vindstyrke og vindretning ved Nes august til oktober 1998

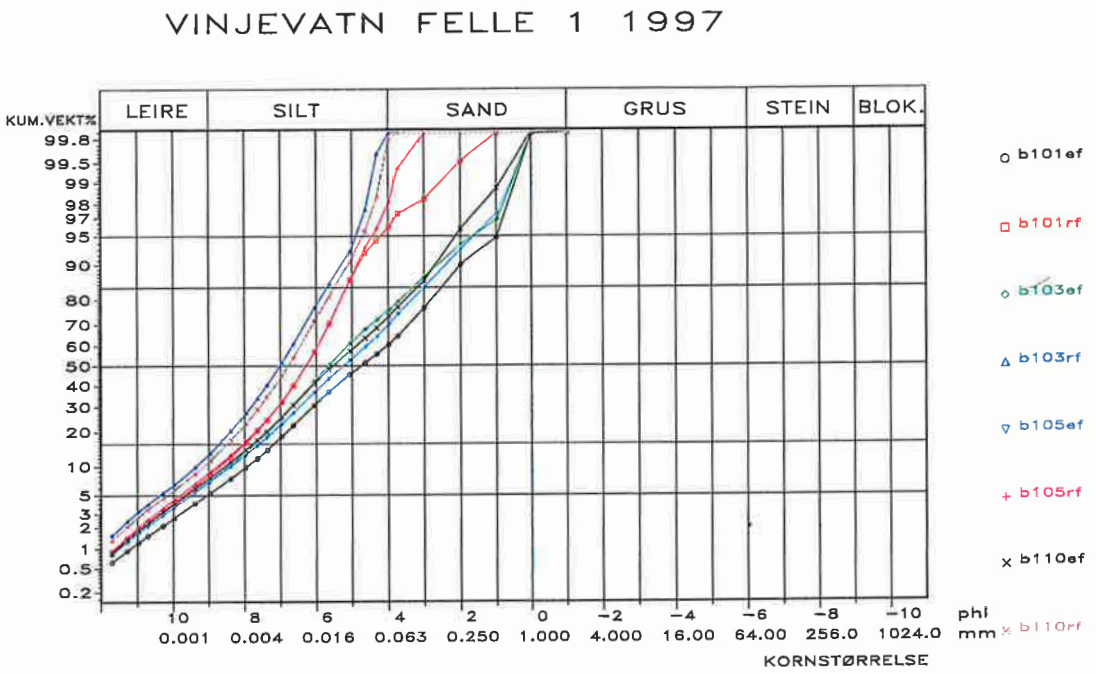


Fig 3.9 a Kornfordeling av materiale fra suspensjonsfelle 1 i 1997, ef:effektkjøring, rf: referanse.

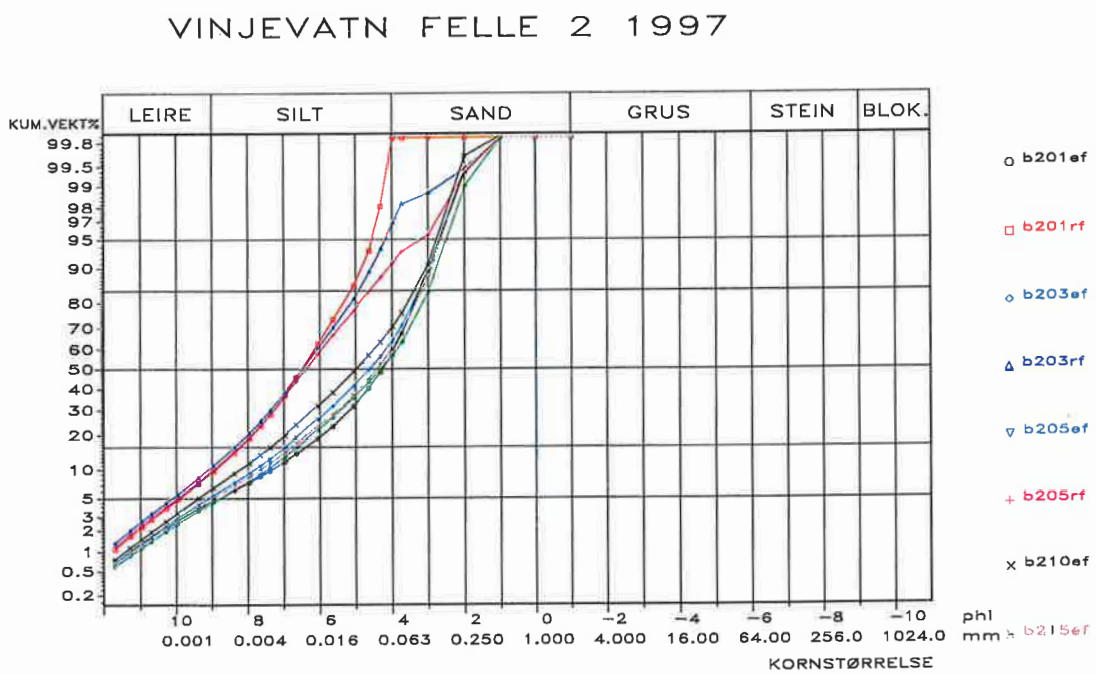


Fig 3.9 b Kornfordeling av materiale fra suspensjonsfelle 2 i 1997, ef:effektkjøring, rf: referanse.

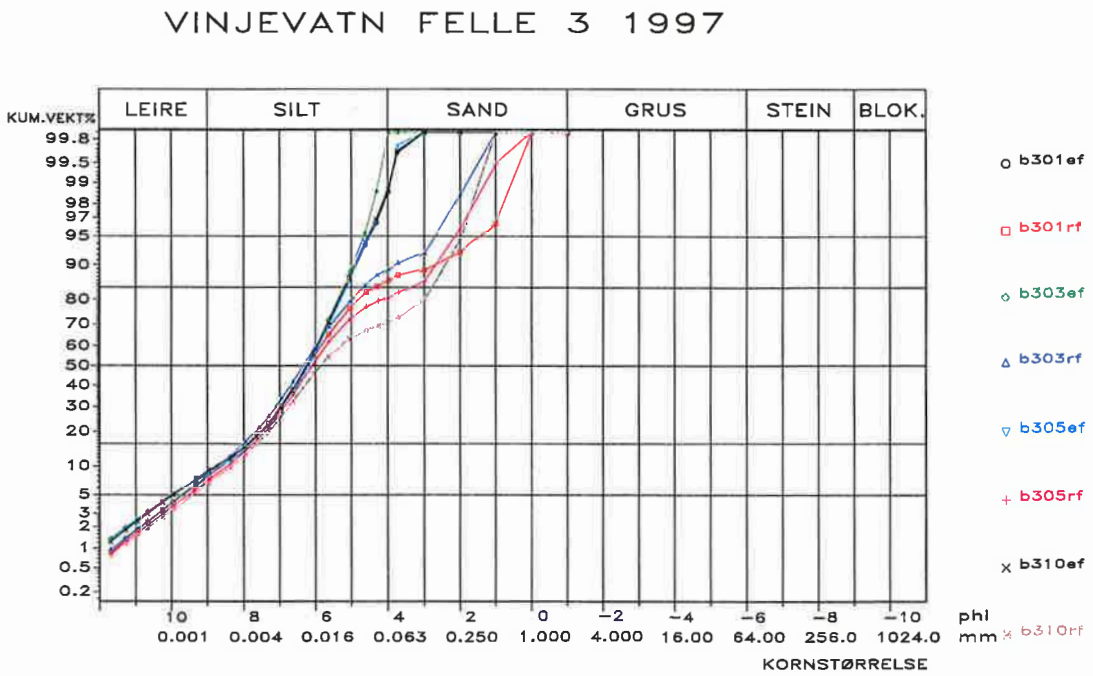
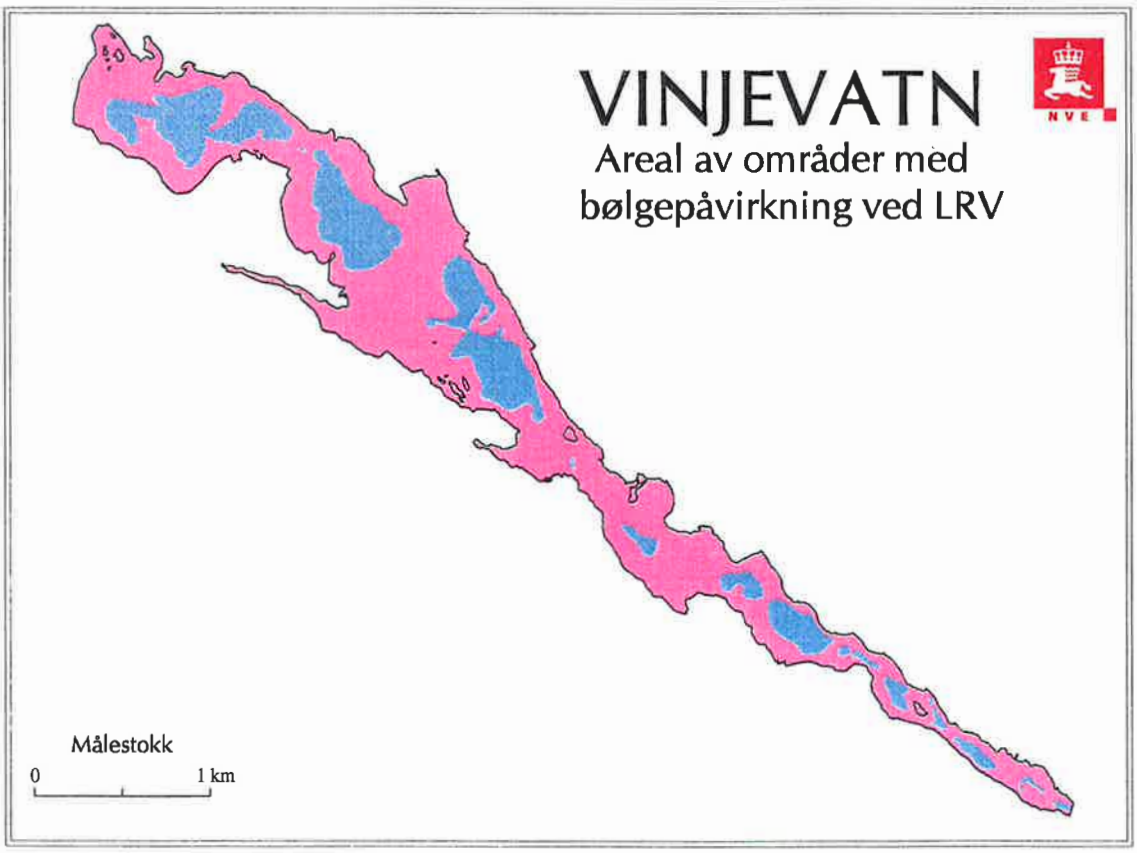


Fig 3.9 c Kornfordeling av materiale fra suspensjonsfelle 3 i 1997, ef:effektkjøring, rf: referanse.

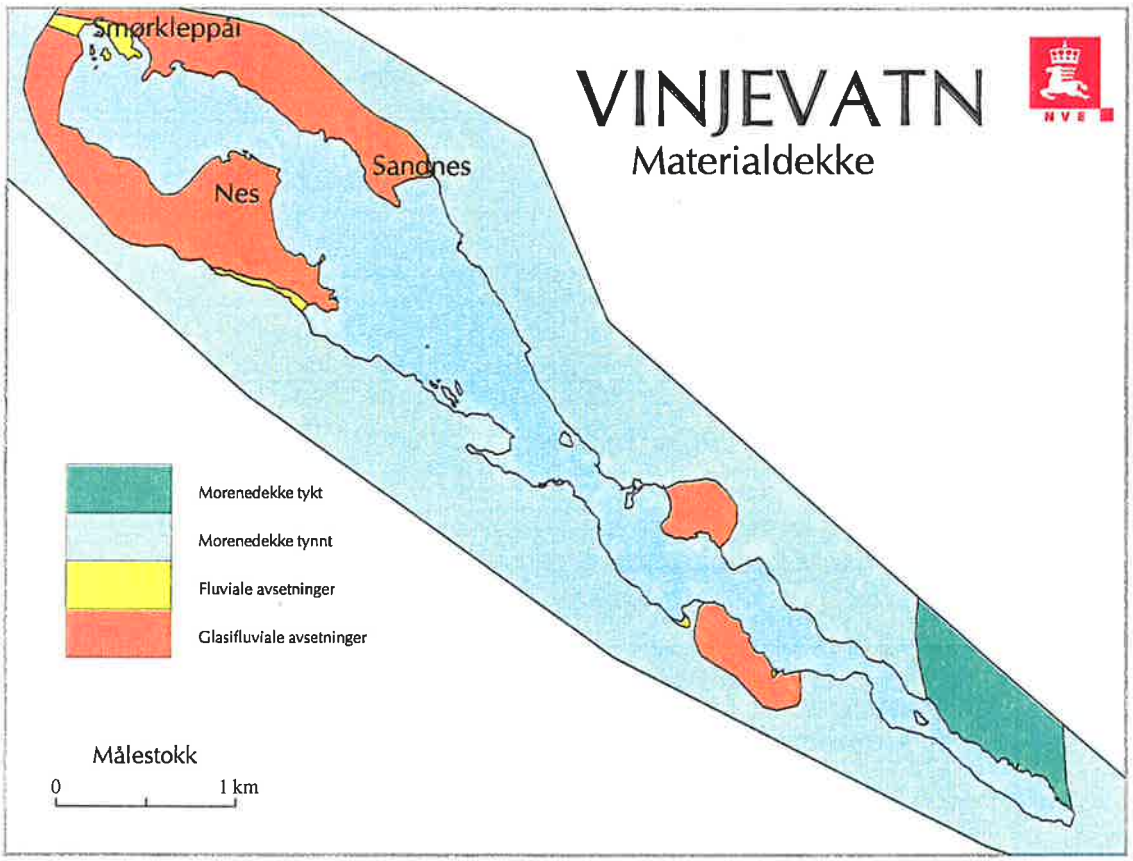


Figur 3.10 Kart over utstrekningen av bølgebasis (rødt felt) under nedtapping til LRV.

Suspensjonsmaterialet i fellerigg 1 og fellerigg 2 hadde en grovere kornfordeling under den første effektkjøringen enn under den påfølgende referanseperioden, se fig 3.9 a, b, c. Forskjellene har sannsynligvis sammenheng med endringene i erosjonsprosesser. Erosjon i innløpsdeltaet ved Smørkleppåi, under lave nedtappingssituasjoner og mer intensiv stranderosjon, kan være viktige kilder til økt innslag av sandpartikler. Restsuspensjonen fra disse kildene er imidlertid mer finfordelt i fellerigg 3 ved utløpet. Under referanseperioden var det lite materiale i bevegelse i magasinet, men erosjon i lokale kilder er en mulig årsak til innslaget av sandfraksjoner i utløpet ved fellerigg 3, se fig 3.9 c.

I 1998 ble det tatt vannprøver, referanseperiode 3 (17. august til 25. august), effektkjøringsperiode 2 (25. august til 10. september) og referanseperiode 4 (10. september til 16. september). Samtlige vannprøver hadde konsentrasjoner under 2 mg/l og bidrar derfor lite til suspensjonskonsentrasjonen i vannmassene i Vinjevatn.

I 1998 viste resultatene fra sedimentfellene lave verdier i effektkjøring og referanseperiodene i forhold til hva som ble målt under effektkjøringen i 1997. Det var spesielt lave verdier under referansperiode 2 som registrerte vinterforholdene i januar og februar, se fig 3.5 b, c. I 1998 ble prøvekjøringen lagt på en høyere vannstand enn i 1997 og det ble hovedsakelig pendlet mellom kote 464.00 og kote 465.50, se fig 3.1 C. Bølgebasis ble derfor liggende høyere, slik at et mindre areal med



Figur 3.11 Løsmasser rundt Vinjevatn. Modifisert utsnitt av kart etter Jansen (1986).

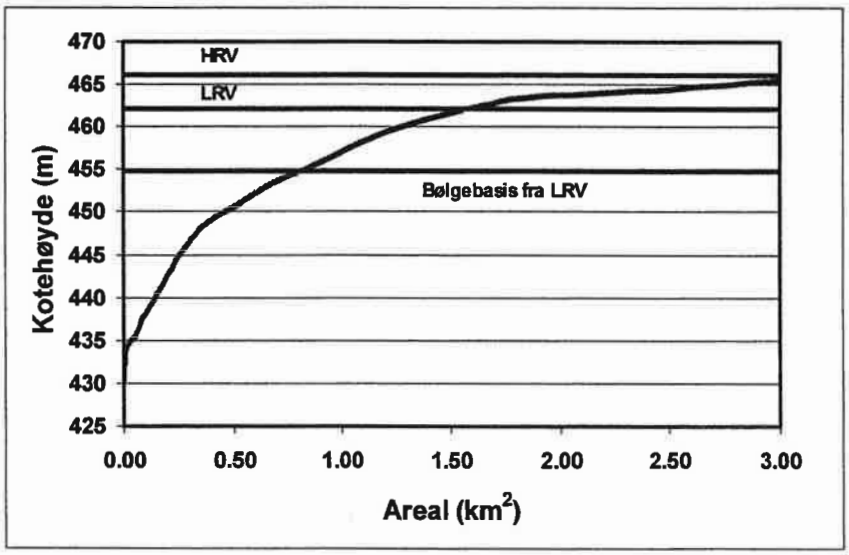
bunnsedimenter ble eksponert for erosjon. Det var også betydelig mindre vind og bølgeerosjon enn under forsøkene i 1997, se fig 3.8 a, b, c. Grunnvannserosjon i bunnsedimenter forekommer hovedsakelig ved vannstander under 463.5 og ble ikke registrert i 1998.

Det var samme mengde materiale i fellene under forsøkene i 1998 som i referanseperioden i 1997. Magasinet ble ikke regulert under kote 463.5 i noen av disse periodene. Årsaken til at den sterke vinden i referanseperioden i 1997 ikke førte til mer materiale i suspensjon, er antagelig at det er mindre sedimenter tilgjengelig for erosjon i de øvre deler av reguleringssonen.

Det var imidlertid markert erosjon av sideskråningene. For å undergrave sideskråninger må vannstanden opp i over 465.0 m. Under effektkjøringsperioden i 1998 pendlet vannstanden over dette nivået i en lengre periode enn i 1997. Dette er årsaken til at det ble iakttatt en mer omfattende erosjon av sideskråninger. Pendlingen foregikk da på et så høyt nivå at grunnvannserosjon sannsynligvis var en aktiv prosess og hadde betydning for erosjon av bakveggen, jfr bilde fig 2.8.

3.4 Sammenfattende vurdering

Erosjonsprosessene som ble iakttatt i effektkjøringsperiodene gir en indikasjon på hva som kan forventes hvis effektkjøring blir en del av normal drift i kraftverket. Deler av løsmassene rundt magasinet består av glasifluviale avsetninger og resente delta rundt innløpselvene, se kart fig 3.11. I denne typen løsmasser kan det ikke sees bort fra at effektreguleringer kan føre til erosjonsskader og grunnvannserosjon.



Figur 3.12 Fordeling av areal for forskjellige dybdenivå.

I Vinjevatn ligger 2/3 av bunnarealet innenfor et nivå hvor bølgene kan påvirke bunnsedimentene (bølgebasis), dvs 7 meter under LRV (kote 462), se dyp-areal (hypsografisk kurve) i fig 3.12. Når vannstanden pendler under en effektregulering, vil dermed betydelige arealer berøres i løpet av en døgnsyklus. I et magasin med færre grunne områder vil bølgepåvirkningen være mindre. Bunnsedimentene i Vinjevatn består for en stor del av finfordelt materiale som stedvis har et stort innhold av organisk materiale. Denne typen materiale bringes lett i suspensjon ved bølgepåvirkning.

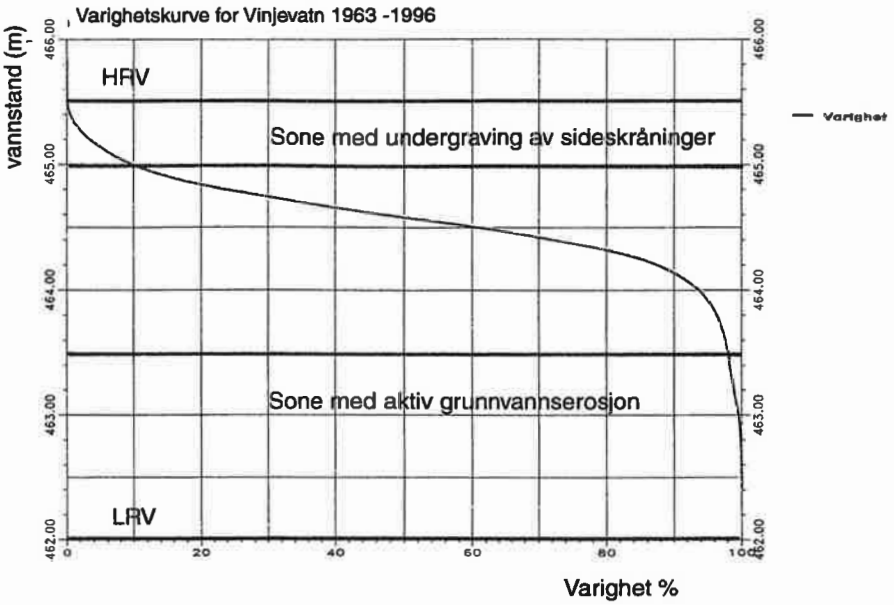
Forholdene ligger til rette for bølgeerosjon, spesielt under perioder med vestlige vinder. Under ellers like forhold vil et reguleringsmagasin med mindre vindpåvirkning være mindre eksponert for bølgeerosjon. Under effektkjøringsperioden i 1997 ble det målt suspensjonskonsentrasjoner på opp mot 160 mg/l til 470 mg/l i skyllesonen langs strendene. Materialet synes imidlertid å sedimentere raskt. Det er en markert konsentrasjonsgradient fra strandkanten og utover, jfr fig 3.7 a. Målingene i utløpet samme dag viser en maksimalkonsentrasjon på ca 17 mg/l. Dette tyder på at mye av materialet sedimenterte i magasinet. Effektkjøringen synes derfor å ha hatt liten innvirkning på forholdene nedstrøms i vassdraget. Lav tilgang på finmateriale, dvs leire og finsilt, har muligens betydning i denne sammenhengen. Utfnokking av finmateriale kan også ha funnet sted, men betydningen av denne prosessen er usikker.

Det er sannsynlig at tidligere reguleringer har betydning for omfanget av erosjon under dagens forhold. Varigheten av de forskjellige reguleringshøyder i Vinjevatn fra 1962 til 1996 er vist i fig 3.13 Dette viser at vannstanden har vært lavere enn kote 463.5 i 2-3 % av den totale perioden fram til og med 1996. Hvis varigheten av nedtapping under kote 463.5 hadde vært lengre, ville grunnvannserosjon, skred og utglidninger i disse nivåene sannsynligvis ha forekommet mer hyppig. Løsmassene hadde sannsynligvis i større grad blitt stabilisert eller fjernet. Det er imidlertid avgjørende hvordan reguleringsmønsteret har vært i forbindelse med lave vannstander. Raske pendlinger gir andre konsekvenser enn nedtapping over tid, eller vedvarende lange vannstander. Varighetskurven viser ikke slike forhold, men gir en oversikt over tidligere reguleringshøyder og et utgangspunkt for en nærmere undersøkelse.

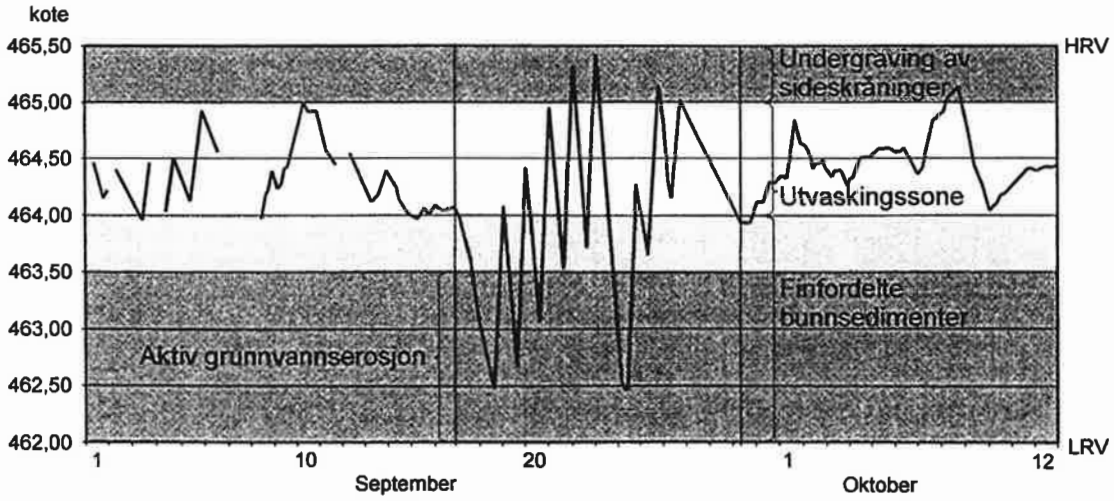
For å undergrave sideskråninger må vannstanden opp i over kote 465.0. Varighetskurven viser at vannstanden har ligget over dette nivået i ca 10% av tidsperioden 1963 til 1996. Lengere varighet med vannstand over kote 465.0 hadde sannsynligvis ført til en raskere utgraving av sideskråningene langs magasinet. Effektkjøring med lengre varighet av vannstander i disse nivåene vil derfor føre til ustabile forhold med mye erosjon.

Iaktagelser under effektkjøringen i 1997 viste at det var en viss erosjon i Smørkleppåis delta under nedtappingene. Dekksjiktet av stein og grove grusfraksjoner i elveløpet synes å ha en begrensende effekt på omfanget av erosjonen. I vassdrag hvor bunntransporten består av sandfraksjoner, må det påregnes mer intensiv erosjon.

Det er sannsynlig at alle de observerte erosjonsprosessene også forekommer i visse situasjoner under normal drift av kraftverket. Grunnvannserosjon har antakelig forekommet i begrenset omfang hver gang vannstanden ble senket under 463.5 m. Under en lengre periode med effektkjøring vil imidlertid erosjonsintensiteten forsterkes og omfanget av aktiv erosjon vil øke betraktelig. En sammenfattende oversikt over erosjonsprosessene ved ulike vannstander er vist i fig 3.14. I henhold til SFTs system for klassifisering av miljøkvalitet i ferskvann Bratli (1995), klassifiseres en vannkvalitet med innhold av suspendert stoff på over 10 mg/l som "meget dårlig". Dette betyr at effektkjøringsforsøkene stedvis førte til en meget dårlig vannkvalitet i magasinet.



Figur 3.13 Kurve som viser varigheten av forskjellige vannstander i Vinjevatn under den regulerte perioden fra 1962 – 1996. Varighetskurven er basert på døgnmidler, raskere vannstandsendringer vil derfor utjevnes.



Figur 3.14 Diagram som illustrerer forskjellige erosjonsprosesser ved ulike vannstander. I utvaskingssonen er finfordelte sedimenter blitt vasket ut. Grunnvannserosjonen er mest aktiv under kote 463.5, men forekommer sannsynligvis også på andre nivå.

4. Effektregulering i magasiner, generell drøfting

4.1 Langtidsvirkninger av effektregulering i Vinjevatn

Langs Vinjevatn er det utviklet en strandplattform med varierende bredde. I området vest for Sandnes er bredden på plattformen mellom 50-100 meter. Funn av steinaldergjenstander og flintavslag i den nåværende strandsonen på vestsiden av Nes viser at plattformen sannsynligvis har oppstått ved bølgeerosjon i løsmassene. Intensiteten på bølgeerosjonen har variert i postglasial tid, men den midlere erosjonsintensiteten kan anslås til 100 meter / 5000 år. Dette gir en tilbakerykning på 0.02 m/ år. Da Vinjevatn ble regulert i 1961 ble HRV lagt til kote 465.5 som er ca. 1 meter over normalvannstand. Dette førte til en intensivering av erosjonen langs strendene. Ved Sandnes bærer området preg av en svært aktiv erosjon. Under effektkjøringen synes erosjonen å være ytterligere forsterket. Dette gjelder spesielt under effektkjøringene i 1998 hvor vannstanden pendlet opp mot HRV i en lang periode. På visse steder ble erosjonen i denne perioden anslått til å være av størrelsesorden 0.3 meter. Det er tidligere pekt på at grunnvannserosjon på høy vannstand kan være en av årsakene til at slik intensivering inntreffer. Det er derfor mulig at en permanent effektregulering med pendling opp mot HRV vil føre til en raskere erosjon av området ved Sandnes enn hva som hadde vært tilfelle med en sesongregulering.

I områder med løsmasser vil det være tilgang på materiale helt til avsetningene er fullstendig utvasket. Dette er prosesser som kan pågå i lang tid framover, avhengig av løsmassenes omfang og egenskaper, værlaget, og hvordan effektreguleringen utføres.

Hvis en permanent effektkjøring iverksettes vil det foregå en tilpasning til de nye forholdene. Etter hvert som bølgeerosjonen vasker ut materiale fra de grunne områdene, vil tilgangen på materiale avta. Blakkingen av vannet vil derfor avta etter en tid hvis det ikke tilføres nytt materiale utenfra. Tykkelsen av finsedimentlaget på bunnen i de dypere delene av Vinjevatn er imidlertid lite undersøkt. Utenfor Sondrisland ble det imidlertid iakttatt et lag med finsedimenter med tykkelse på omkring 1 meter. Dette er sedimenter med stort organisk innhold som er avsatt i postglasial tid. Det må påregnes at det vil gå lang tid før hele dette laget er fullstendig utvasket. Det må derfor forventes en dårligere vannkvalitet og høyere konsentrasjoner av partikler i vannmassene i en relativt lang periode. Vinjevatn ligger i et vassdrag som har begrenset tilførsel av suspensjonsmateriale fra nedbørfeltet. Det er derfor sannsynlig at sonen som påvirkes av bølgeerosjon blir utvasket etter en tid. Under den nåværende sesongregulering har materialet ikke blitt utvasket fra de dypeste områdene av denne sonen fordi vannstanden sjelden har ligget på disse nivåene, (jfr. fig 3.13).

Instabiliteten i deltaområdene vil være en vedvarende prosess så lenge det tilføres bunntransportert materiale fra nedbørfeltet. Under sesongregulering og naturlige forhold kan det også være en viss instabilitet som skyldes vannstandsendringer. Sedimentasjonsområdet for bunntransportert materiale forflyttes i takt med vannstandvariasjonene i magasinet. Ved høy vannstand vil bunntransporten avsettes i de øvre deler av deltaområdet eller i elveløpet. Under lav vannstand kan dette materialet eroderes og forflyttes til lavereliggende områder lenger ut i magasinet. Ved hyppige vannstandsendringer vil denne masseforflytningen foregå hyppigere enn under en sesongregulering med færre og langsommere vannstandsendringer. Deltaet kan derfor bli mer langstrakt med mindre deltaslette over de høyeste vannstandsnivåer. Avsetningene kan bli mer å sammenligne med tidevannspåvirkede delta slik som de kan sees i kystområder i Mellom-Europa og i Nord-Norge.

Materiale i Smørkleppåi er imidlertid så grovkornet at det kan skjerme for videre erosjon. Endringene bir antagelig større i deltaområder med mer finfordelte sedimenter.

Selv om strandområdene som er utviklet på de istidsavsatte løsmassene kan bli tilpasset til en mer vekslende vannstand, må det tas i betraktning at forholdene i disse områdene heller ikke er stabile over tid. Steinlaget som kan iakttas på de fleste strendene rundt Vinjevatn, har sannsynligvis oppstått ved at sanden og finmaterialet er vasket ut. Steinene ligger tilbake som et dekksjikt eller armeringslag, jfr fig 2.10. Muligens har løsmasseavsetningene samme sammensetning i de dypere deler som i den opprinnelige bakkanten. Hvis armeringslaget skades, kan en ikke se bort fra at grunnvannserosjon kan føre til at større erosjonsskader oppstår. Isens påvirkning under regulering om vinteren kan forårsake slike skader. Steiner kan fryse fast i isen og heves når vannstanden stiger. Under en effektregulering vil slike situasjoner oppstå hyppigere enn under sesongmessig regulering. Under ugunstige forhold kan det oppstå erosjonssår som kan initiere ravinedannelse og grunnvannserosjon.

Ved en vedvarende effektregulering med minimum under kote 463.5 vil grunnvannserosjonen i området mellom Vassenden og Nes føre til at deler av strandplattformen eroderes vekk etter en tid. Grunnvannserosjon kan forløpe svært raskt, slik at hele plattformen kunne forsvinne i løpet av noen få år hvis forholdene lå til rette for det.

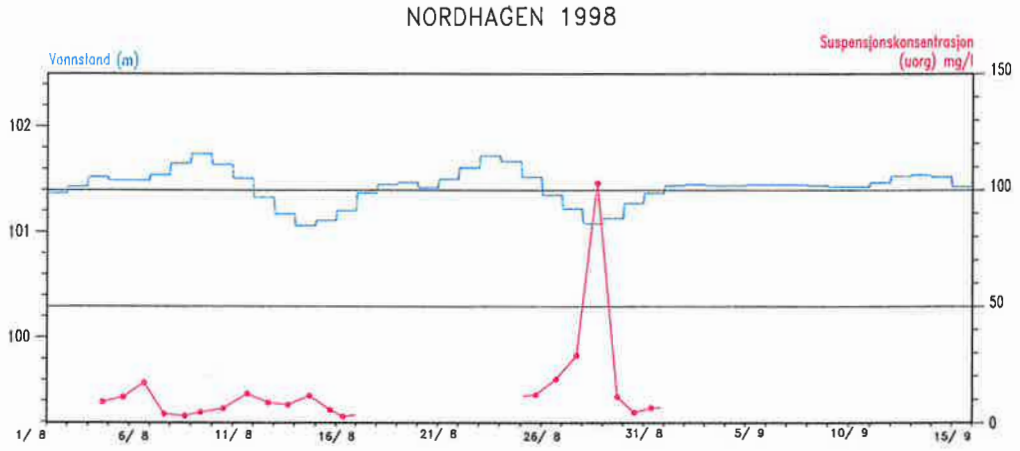
For å minimalisere skader bør en effektregulering holdes mellom kote 463.5 og kote 465.0. Selv innenfor dette intervallet kan en ikke se helt bort i fra at det vil oppstå skader i strandområdene. Erosjonsutsatte områder nær HRV, f. eks erosjonskanten på Sandnes, kan forbygges og stabiliseres. Det er imidlertid vanskelig å forbygge mot grunnvannserosjon i lavere nivå. Før en eventuell permanent effektregulering iverksettes, bør det derfor foretas mer omfattende grunnundersøkelser av de mest erosjonsutsatte stedene.

Instabiliteten og tendensen til løpsforflytning i innløpselvenes delta kan til en viss grad kontrolleres ved kanalisering og terskelbygging. Kanaliseringen vil begrense løpsendringer og tersklene forhindrer en erosjon av deltaet ved lav nedtapping.

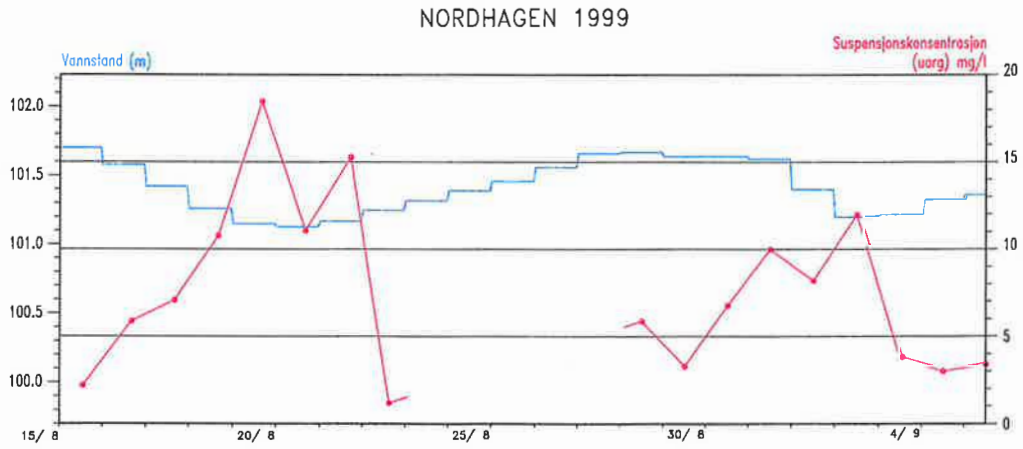
4.2 Undersøkelser fra andre magasiner

Virkningen av kortvarige vannstandsvariasjoner (ukependling) på erosjon og sedimenttransport i deltaområdet i nordre Øyeren ble undersøkt av Bogen & Bønsnes (2000). I løpet av en uke ble vannstanden i Øyeren pendlet med 0.6 meter. Samtidig ble det tatt vannprøver i innløpselvene og i deltaområdet. Det ble også tatt prøver under perioder med normal regulering. Pendlingen påvirket områder i deltaet hvor store arealer er grunnere enn 3 meter. Resultatet av forsøkene i august 1998 er vist i fig 4.1. Partikkelkonsentrasjonen stiger fra et basisnivå på omkring 10 mg/l til over 100 mg/l. Maksimalkonsentrasjonen inntreffer 27. august idet vannstanden når et minimum på kote 101.08. Under den forutgående pendlingen to uker tidligere var det imidlertid ikke registrert en tilsvarende konsentrasjonsøkning. Årsaken er antagelig at det var noe mindre vind i den første perioden. I 1999 ble det også registrert maksimumsverdier i tilknytning til minimumsvannstanden under to pendlingsforsøk, men med lavere verdier enn i 1998, se fig 4.2. Når konsentrasjonsmaksimum inntreffer under laveste nedtapping, viser dette at det forhøyede porevannstrykket under nedtappingsfasen kan medvirke til resuspensjon av partikler. Effekten vil være mest markert i de grunne områdene av deltaet. Det er imidlertid en nødvendig betingelse med en viss vindstyrke som gir bølgeerosjon i nedtappingsområdene.

Veitastrondsvatnet ble regulert i tilknytning til utbygging av Årøy kraftverk. Deltaet i Veitastrondsvatnet er beskrevet av Bogen (1981). Under bygging av omløpstunnelen i utløpet av innsjøen ble magasinet tappet ned. Selv om vannstanden ikke lå under det naturlige lavvannsnivå, ble det likevel omfattende erosjon i deltaet. Årsaken var at vannstanden i innsjøen ble holdt kunstig nede under høy vannføring. Dette førte til et større fall på elveløpet og dermed større strømhastighet og eroderende evne. Etter en kort stund ble store deler av deltafronten erodert bort.



Figur 4.1 Målinger av suspensjonskonsentrasjon ved Nordhagen i utløpet av Svelle i Øyeren under ukependlinger av vannstanden i Øyeren august 1998.



Figur 4.2 Målinger av suspensjonskonsentrasjon ved Nordhagen i utløpet av Svelle i Øyeren under ukependlinger av vannstanden i Øyeren august og september 1999.

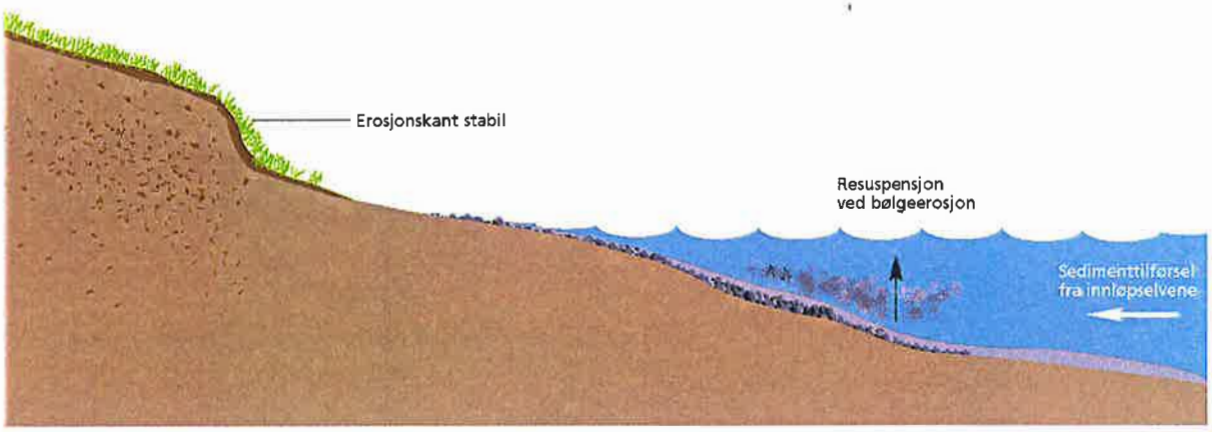
4.3 Klassifisering av norske magasiner.

Erosjonsskader som følge av vassdragsregulering i en rekke magasiner i Norge er beskrevet av (Korbøl 1975, Bogen 1986, Tesaker og Dahl 1992). Erosjonen førte i mange tilfelle til høye partikkelkonsentrasjoner nedstrøms i vassdragene. Selv om erosjon i reguleringsmagasiner erfaringsmessig avtar med tiden vil det være å forvente at endringer i reguleringsmønsteret fører til fornyet erosjon mange steder. Dette kan i sin tur ha konsekvenser for biologiske forhold og bruken av vassdraget i forskjellige sammenhenger. Når miljøvirkningene av en aktuell effektregulering skal evalueres, bør det gjøres undersøkelser i det aktuelle magasinet og tilhørende nedbørfelt. De forskjellige faktorene som er av betydning for erosjonsforholdene kan bedømmes etter visse kriterier som er drøftet i det følgende. Dette er karaktertrekk som kan brukes til å drøfte overførbarhet av undersøkelsene i Vinjevatn til andre magasiner i Norge.

Løsmasser rundt magasinet/ grunnforhold: I et magasin som er utformet i fast berg uten overlagring av løsmasser vil det være lite eller ingen erosjon. Forskjellige typer løsmasser har forskjellig motstandsdyktighet mot erosjon. Resente fluviale avsetninger eroderes lettere enn konsolidert morenemateriale fra istiden. Imidlertid kan erosjon av f.eks bresjøsedimenter med leire og silt tilføre store mengder materiale til et magasin. Når det iverksettes en effektregulering som forårsaker en fornyet erosjon i løsmassene rundt magasinet, kan det i en periode tilføres betydelige mengder materiale. Etter en viss tid vil det imidlertid etableres en tilpasning til nye forhold. Erosjonsintensiteten og blakkingen av vannet vil derfor avta noe med tiden.

Sedimenttilførsel fra nedbørfeltet: Hvis det er en vedvarende sedimenttilførsel til magasinet fra nedbørfeltet, vil forholdene ikke nødvendigvis stabiliseres. Nytt materiale som kommer inn i magasinet vil sedimentere på lokaliteter hvor det kan bli utsatt for resuspensjon, se fig 4.3. I sjøer med sedimenttilførsel fra breer kan det være avsatt forholdsvis tykke lag med bunnsedimenter. I en slik sjø vil det være tilgang på sedimenter for erosjon selv om områdene omkring kan bestå av bart fjell eller tynt morendekke. Et magasin med høy sedimenttilførsel vil aldri tømmes helt for sedimenter eller stabiliseres. Tilgangen på materiale er avhengig av hvor mye som tilføres fra sideelvene. Målinger har vist at norske vassdrag kan klassifiseres i henhold til kildene for sedimenttransporten, se fig 4.4. Hver av klassene har en karakteristisk erosjonsintensitet. Etter karaktertrekkene ved nedbørfeltet som drenerer til Vinjevatn vil verdien ligge rundt 2 tonn/km^2*år. Magasinene må derfor klassifiseres både i henhold til omkringliggende løsmasser og omfanget av vedvarende sedimenttilførsel fra nedbørfeltet, se tabell 4.1. Det er for illustrasjonens skyld ført opp magasiner i forskjellig sedimentologisk miljø i tabellen. Storglomvatn er et typisk eksempel på et magasin hvor sedimenttilførselen er så stor at bølgeerosjonen alltid vil ha tilgang på materiale. I lavlandsvassdrag og i høyfjellsvassdrag uten breer er den årlige sedimenttilførselen ofte svært lav, men kan tilta sterkt under store og sjeldne flommer. Fornyingen av materiale har derfor betydning for hvor raskt utvaskingen vil forløpe.

Suspensjonsmaterialets egenskaper: Sedimentenes fallhastighet har stor betydning for hvor mye materiale som bringes i suspensjon og hvor langt partiklene transporteres i vassdraget. Eventuell fnokking vil påvirke fallhastigheten og ofte føre til raskere sedimentasjon. Suspensjonsmaterialets egenskaper vil også i stor grad innvirke på lysforholdene. Finkornede partikler svekker lyset mer enn grovkornede. Flakige partikler, som f.eks glimmer (biotitt), kan ofte svekke lyset mye, selv i små konsentrasjoner.



Figur 4.3 Nytt materiale kan tilføres fra nedbørfeltet og bli tilgjengelig for bølgeerosjon.

Vindeksponering og strømforhold: Eksponering for vind er viktig for bølgeerosjon. I et magasin i et åpent landskap vil vinden få bedre tak slik at bølgeerosjonen blir intensiv. Magasinets form kan i mange tilfelle ha betydning for gjennomstrømningen og dermed for hvor mye materiale som føres videre i vassdraget.

Magasinets bunntopografi: Magasinets bunntopografi, og spesielt størrelsen på grunne arealer med eroderbare sedimenter, er av betydning for omfanget av erosjon under effektregulering. I et dypt magasin, hvor bølgebasis ikke når ned til eroderbare sedimenter, vil det ikke bringes sedimenter i suspensjon.

Aktuell reguleringshøyde og døgnlig amplitude: Reguleringshastigheten har betydning for erosjonsintensiteten i reguleringssonen ved at en rask nedtapping skaper overtrykk og redusert skjærfasthet i løsmassene. Reguleringshøyden har avgjørende betydning for hvor løsmassene angripes av erosjon. På høy vannstand vil det foregå bølgeerosjon og undergraving av bakveggen på strender og eventuelt grunnvannserosjon eller ras og utglidning når magasinet tappes langt ned.

Magasinets volum: Reguleringshastigheten har betydning for erosjonsintensiteten. Store magasin med stort reguleringsvolum må nødvendigvis ha liten døgnregulering. Magasinets volum får derfor en indirekte betydning for erosjonsforholdene. Kraftverkets slukeevne er også en viktig faktor for døgnreguleringens størrelse.

Tidligere reguleringer: En regulering fører ofte til en utvasking av finmateriale i strandsonen. Effektreguleringer innenfor en sone hvor materialet allerede er utvasket, vil derfor føre til at det bringes mindre materiale i suspensjon. Utvaskingen har vært mest utpreget i de reguleringshøyder som har vært mest benyttet i tidligere reguleringspraksis.

Biologiske forhold: Utbredelse av vannvegetasjon og vegetasjon langs kantene har betydning for omfanget av erosjon.

Isforhold: Isforholdene vil påvirke erosjonsprosessene. Islagte erosjon er ikke utsatt for bølgeerosjon.

Tabell 4.1 *Eksempel på klassifisering av magasiner i forhold til sedimenttilførsel fra nedbørfelt og fra løsmasser rundt magasinet som eroderes under reguleringen.*

Sedimenttilførsel fra løsmasser rundt magasinet	Vedvarende sedimenttilførsel / dominerende kilde i nedbørfelt					
		Lav				Høy
		Lavlandsvassdrag med skog	Høyfjell uten breer	Brevassdrag	Vassdrag i marin leire	
Lav	Berggrunn		***Blåsjø***	***Storglomvatn Styggevatn Rembesdalsvatn***		
	Morene/ glasifluvialt	***Vinjevatn***	***Store Målvatn Devdisjavrre***	***Ustevatn***	***Tyrifjorden***	
	Resente fluviale avsetninger og delta	***Øyeren Randsfjorden Funnebøfjorden***	***Store Målvatn Devdisjavrre Aursunden***	***Storglomvatn Tusbergdalsvatn***	***Øyeren***	
Høy	Leire/ silt	***Vansjø***				

Viktigheten av de forskjellige faktorene som har betydning for erosjonsforhold under effektregulering er vurdert i tabell 4.2.

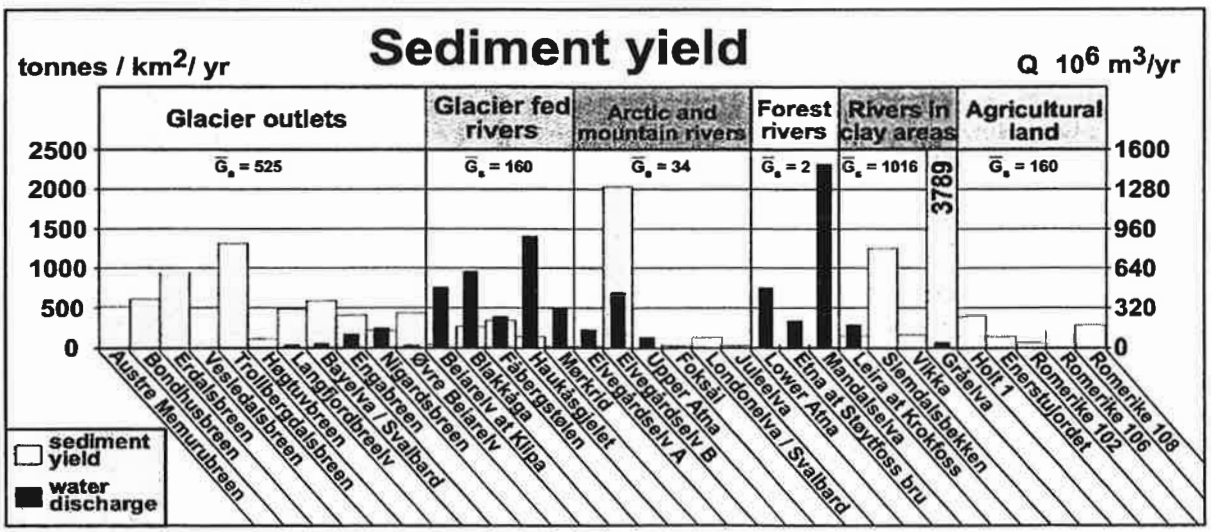
Tabell 4.2 *Oppsummering av faktorer som har betydning for erosjonsforhold under effektregulering.*

Faktorer/ Egenskaper	**Svært Viktig**	**Kan være viktig**
Magasin egenskaper		
• Volum		X
• Bunntopografi/ dybdeforhold	X	
• Vindeksponering/ strømforhold/ isforhold	X	
• Tidligere regulering		X
Vurdering av sedimenter rundt magasinet	X	
Vurdering av sediment-tilførsel fra nedbørfeltet	X	
Vurdering av suspensjons-materialets egenskaper	X	
Planlagt regulering		
• Reguleringshøyde	X	
• Slukevne		X
• Døgnlig amplitude	X	
Biologiske forhold		
• Vannvegetasjon		X

Et eksempel på et magasin med små erosjonsskader som følge av effektregulering vil ha følgende karaktertrekk:

- Magasinet er forholdsvis dypt slik at arealer over bølgebasis har begrenset utstrekning. En hypsografisk kurve (jfr fig 3.12) vil karakterisere magasinets egenskaper i denne sammenhengen.
- Sedimentene rundt magasinet må være av en type som ikke er utsatt for grunnvannserosjon. Det vil si masser med høy konsolideringsgrad som f. eks. morene fra siste istid. Bresjøsedimenter, siltig glasifluvialt materiale og resente deltaavsetninger vil være ugunstig.
- I magasiner med tidligere reguleringer kan finmateriale i strandsonen i stor grad være utvasket. Og strandlinjene er i større grad tilpasset det regulerte vannstandsregimet. Varighetskurver for vannstanden vil gi innsikt i hvordan manøvreringen av magasinet faktisk er utført, (jfr fig 3.13).
- Magasinets reguleringshøyde og reguleringens døgnamplitude har betydning for erosjonsintensiteten. Avhengig av slukeevnen vil magasin med store volum ha mer moderat døgnamplitude under en effektkjøring. Situasjoner med små vannstandsendringer vil begrense grunnvannserosjon og utrasninger i magasinet.
- Begrenset sedimenttilførsel fra nedbørfeltet, dvs lite løsmateriale tilgjengelig for erosjon. I nedbørfelt med stor tilgang på løsmateriale vil det ofte være utviklet delta som er erosjonsutsatt ved effektregulering. Vedvarende sedimenttilførsel fra nedbørfeltet vil føre til en jevn sedimentasjon av partikler på bunnen. Dette fører til at det alltid vil være materiale tilgjengelig for resuspensjon.

I magasin med stor sedimenttilførsel kan konsentrasjonene i tilløpselvene i visse situasjoner overstige konsentrasjoner som er forårsaket av resuspensjon under en effektregulering. Virkningen kan allikevel være ugunstig for biologiske forhold hvis de høye konsentrasjonene kommer på andre tider av sesongen og andre steder enn tidligere.



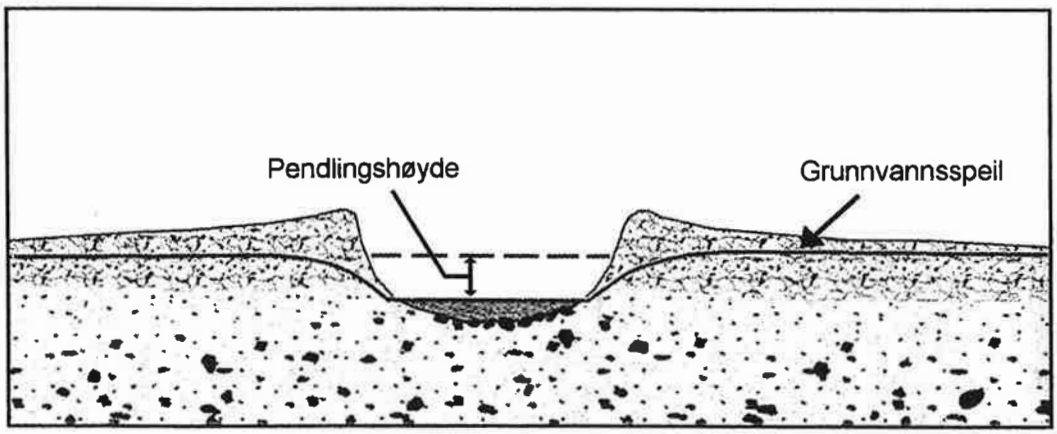
Figur 4.4 Klassifisering av sedimentproduksjonen i vassdrag i henhold til kildene for sedimentransporten. G_s angir middelet av årlig sedimentproduksjon innenfor hver gruppe.

5. Effektregulering i elveløp

Denne rapporten fokuserer hovedsakelig på erosjon som følge av effektregulering i magasiner. I elveløp vil det imidlertid også være spesielle forhold som det må tas hensyn til. Løvoll (1998) viste at effektregulering med rask vannføringsøkning i elveløp kan føre til stor energihelning og kritiske skjærspenninger. Dette kan føre til mer erosjon enn under normale flomforhold. Vannføringsøkningen forplantes nedstrøms som en bølge. Under visse forhold, når vannstandsøkningen oppnår en kritisk verdi i forhold til initialvannstanden, kan bølgen bryte. Dette har sammenheng med at flombølgen som kommer nedover et elveløp hvor det fra før er liten vannføring og lav vannstand, vil ha høyere hastighet slik at det etter hvert dannes en brytende bølge. Når bølgen bryter, vil faren for erosjon være spesielt stor. Hvis ikke elveløpene er tilpasset slike forhold, kan dekksjiktet rives opp og erosjonsskader kan dermed oppstå. Hvis elvene undergraver skråninger som er i kontakt med elveløpet, kan det utløses skred og større utglidninger. Et eksempel på en naturlig brytende bølge er "flash floods" som er naturlige flommer som ofte oppstår i tørre strøk. Etter intens nedbør utvikles det en nærmest vertikal bølgefront som tar med seg mye sedimenter.

Skråningsstabiliteten i elveskråninger med grunnvannsig kan reduseres ved raske vannstands svingninger som er generert av effektregulering, Løvoll, Tuttle og Fritzvold (1999). Fine masser som silt og leire har en lav hydraulisk ledningsevne sammenliknet med grovere masser. Dette kan føre til en forholdsvis høy grunnvannsgradient i skråningen og dermed fare for erosjon og utrasing. Elveslettene langs norske vassdrag er dannet av materiale som er sedimentert under flommer i postglasial tid. Disse flomsedimentene består ofte av ukonsolidert sandig silt. I slike avsetninger kan grunnvannsgradieneten bli høy og elvebreddene blir derfor spesielt utsatt for erosjon, se fig 5.1. Steile skråninger holdes oppe av kapillærkrefter og vegetasjonens bindende virkning. Elveslettemateriale kan derfor være sensitivt for ytre påkjenninger. Grunnvannserosjon kan derfor i kombinasjon med skjærpåvirkningen fra vannets bevegelse føre til mer omfattende erosjon enn normal sesongregulering.

Elveløp med bunnmateriale av grus og stein er ofte brede og grunne. Elvebreddene er ofte lave slik at erosjonsproblemene dermed blir begrenset. I denne typen elveløp kan imidlertid raske vannstandsvariasjoner føre til at konsentrasjonen av suspendert materiale blir høyere enn hva de ville ha vært under en mer langsom endring av vannstanden.



Figur 5.1 Effektregulering av alluviale elveløp.

6. Oppfølgende undersøkelser

Delprosjektet 1.4 "Effektregulering og virkninger på erosjon og sedimentasjon" har fokusert på Vinje/ Tokke som eksempelkraftverk og konsentrert undersøkelsene om virkningene av effektregulering av Vinjevatn. For å kunne utarbeide konsekvensanalyse er det nødvendig å kunne identifisere karaktertrekk ved de aktuelle objektene og vurdere mulige virkninger i forhold til eksisterende kunnskap for liknende magasiner eller elvestrekninger. Et viktig mål i de videre undersøkelser er derfor å sørge for at det foreligger nok kunnskap til å kunne evaluere forholdene i de forskjellige sedimentasjonsmiljøene som er aktuelle i norske vassdrag.

For magasinene betyr dette særlig at det er viktig å få bedre og mer systematisk kunnskap om grunnvannserosjon i forskjellige typer løsmasser. Denne spesielle erosjonsprosessen er lite omtalt i internasjonal litteratur. Den forekommer sjelden under naturforhold, men kan utvikle seg raskt hvis forholdene ligger til rette for det.

Det bør foreligge nok kunnskap til å kunne bedømme omfanget av eventuell bølgeerosjon i det aktuelle magasinet. Bunnsedimentene i noen utvalgte magasiner i forskjellig sedimentologisk miljø bør derfor undersøkes. Mer informasjon om verdier for det kritiske skjærstresset vil også være nyttig i denne sammenhengen. Betydningen av utvasking av finmateriale under tidligere reguleringer klarlegges og det burde kunne bedømmes hvor raskt sedimenttilførselen fra nedbørfeltet vil tilføre nytt materiale.

Klassifikasjonsskjemaet i tabell 4.1 danner et godt utgangspunkt for en systematisering av kunnskap. Det er antagelig magasiner i gruppen "høyfjell uten breer" som bør prioriteres først i undersøkelsene for å komplettere kunnskapen. Undersøkelsene bør også omfatte karaktertrekk ved sedimentene og strømforhold og kanskje også betydningen av eventuell fnokking.

Det bør utarbeides et liknende klassifikasjonsskjema for elveløp som en basis for en utarbeidelse av generelle kriterier som kan benyttes til konsekvensvurderinger av effektkjøring i forskjellige norske vassdrag. Elveløpene kan grovt sett deles i tre: de alluviale løp, løp i immobilt materiale, og elvestrekninger i fast fjell. Erosjonsskader som følge av effektregulering vil antagelig være mest utpreget i den første gruppen.

Forholdene i elveløp med immobilt materiale ligner forhold som vi finner i innsjøer og reguleringsmagasin ved at det kan være mange forskjellige typer løsmasser representert. Langs de alluviale løpene er forholdene mer homogene selv om det kan være store forskjeller mellom forskjellige løpstyper. Smale og dype løp med høye bredder bygd opp av resente flomsedimenter er antagelig mest utsatt for erosjon.

For Vinjevatn spesielt bør det utføres mer omfattende grunnundersøkelser i områdene med glasifluviale avsetninger (se kart fig 1.6) hvis det blir aktuelt å innføre effektregulering. Dette gjelder spesielt området ved Sandnes som muligens også kan være utsatt for grunnvannserosjon ved langvarig pendling nær normalvannstand (pendlingshøyde fra kote 464.0 – 465.0). Bruk av georadar kan være en aktuell metode for å undersøke løsmasser av den typen som er utsatt for grunnvannserosjon.

7. Referanser

Bogen, J., 1981. Deltaet i Veitastrondsvatn i Årøyvassdraget. Kontaktutvalget for vassdragsreguleringer. Univ. i Oslo. Rap. 81/25, 47 s.

Bogen, J., 1986. Erosjonsprosesser og sedimenttransport i norske vassdrag. Utredning av forvaltningsansvar, faglig status og forskningsbehov. (Erosion and sediment transport in Norwegian rivers. River management, responsibilities, status and research requirements). NHK rapport nr 20, 109 s.

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., Bønsnes, T.E., 2000. Erosjon i deltaet i Nordre Øyeren, NVE, HM-notat 09/00.

Bratli, J.L., 1995. Miljømål for vannforekomstene. Veiledning 95:04, Statens forurensningstilsyn, 41 s.

Droppo, I. G., Walling, D. E. & Ongley, E. D. 2000. The infuence of floc size, density and porosity on sediment and contaminant transport, p 141-147 in: M. Stone: The Role of Erosion and Sediment Transport in Nutrient and Contaminant Transfer. IAHS Publ. No. 263, 327pp

Førde, E. , Magnell, J.P., Kvambekk, B., Bogen, J., Brodtkorb,E., Johansen,S., Nordli,P.E., Pettersen,S. 1997. Forsøkskjøring i Vinjevatn september 1997. Virkninger på fysiske og biologiske forhold – foreløpelige resultater. Rapp. Nr 2, Effektregulering – miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak. Statkraft, Høvik, 40 s.

Førde, E. Kvambekk,B., Bogen, J., Brodtkorb,E., Nordli,P.E., Pedersen,T.B. og Magnell, J.P.(red) 1999. Prøvekjøring Vinjevatn august/september 1998. Virkninger på fysiske og biologiske forhold – foreløpelige resultater. Rapp. Nr 7, Effektregulering – miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak. Statkraft, Høvik, 25 s.

Holmsen, G., 1921. Rasene omkring den senkede sjø Laugen i Børsa. Teknisk Ukeblad bind 39, no 45, s 536-538.

Holmsen, G., 1963. Erfaringer om jordskade ved vassdragsreguleringer. NGU 218, 205 s.

Husebye, S., 1993. LRV-Prosjektet: Utnyttelse av vannvolumet under laveste regulerte vannstand i ekstreme tørrår. NVE-Publikasjon 04/93, 51s.

Jansen, I. J., 1986. Kvartærgeologi. Jord og landskap i Telemark gjennom 11 000 år. Beskrivelse til kvartærgeologisk kart i målestokk 1: 250 000. Institutt for naturanalyse 1986, 87 s.

Johansen, S., Rørslett, B., 1999. Effektregulering -Virkninger på vannvegetasjon av prøvekjøringene i Vinjevatn i 1997 og1998. Rapport nr: 11 i Effektregulering-Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak.

Johnson, I. G., 1965. Wave boundary layers and friction factors. Proc. 10th Coastal engineering conference.

Kemp, P. H., Simons, R.R., 1984. Sediment transport due to waves and tidal currents. P 197-206 in: Bruce Denness (ed) Seabed Mechanics, Graham & Trotman, London.

Klemsdal, T., 1979. Kyst, strand og vindgeomorfologi. Forslag til terminologi. Norsk geografisk tidsskrift 33, s 159-171.

Klemsdal, T., 1999. Kystlandskapets landformer og naturmiljø i Norge. Ressurs og miljøgeografi, serie B, fagnotat nr. 11. Geografisk inst. UiO, 33 s.

Korbøl, B., 1975. En undersøkelse omkring utrasninger og erosjon i senkede vann og innsjøer i Norge. NGI rapp. 53601-1, 119 s.

Løvoll, A., 1998. Effektkjøring og elveerosjon –analyser og tiltak. Rapport nr: 6 i Effektregulering-Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak, 35 s.

Løvoll, A, Tuttle, K. og Fritzvold, H. K., 1999. Effektregulering og grunnvannserosjon –analyser og tiltak. Rapport nr: 12 i Effektregulering-Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak, 39 s, 6 vedlegg.

Mosevoll, G., og Thorsethaugen, K., 1976. Erosjonsforhold ved Store Målvatn, Rana. Samlerapport 1973-januar 1976, STF 60 A 76042. Norges Hydrotekniske Laboratorium, 10 s.

Nielsen, S. A., 1977. Erosjonsforhold ved Gjevilvatnet, Oppdal, Samlerapport 1974-1977. SFT 60 A 77063. Norges Hydrotekniske Laboratorium, 36 s.

Pettersen, V., 1998. Innsamling og systematisering av erfaringsdata. Rapport nr: 3 i Effektregulering-Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak, 25 s.

Petts, G. E., 1984. Impounded rivers. Perspectives for ecological management. John Wiley & sons. 326 s.

Sear, D. A., 1995. Morphological and sedimentological changes in a gravel bed river following 12 years of flow regulation for hydro power. Regulated rivers: research & management vol. 10, s 247-264.

Skarbøvik, E., 1993. On the transport of phosphorus and fine grained sediments in rivers. Dr. Scient Avhandling, Geografisk Institutt, UiO. Rapportserie Hydrologi no. 37.

Sundborg, Å., 1956. The river Klaraelven. A study of fluvial processes. Geogr. Annaler. 38, s 125-316

Sundborg, Å., 1992. Reservoir sedimentation. A manual, s 171 - 193 i: Jansson M. B and Rodriguez A. (red.): Sedimentological studies in the Cachi reservoir, Costa Rica. Sediment inflow, reservoir sedimentation, and effects of flushing. UNGI rapp. 81.

Tesaker, E. & Dahl, T. E., 1992. Monitoring of suspended sediment concentration in discharge from regulated lakes in glacial deposits s 269 - 278 i: J. Bogen, D. E. Walling and Day, T. (red.): Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins, IAHS publ. nr. 210.

Thimakorn, P., 1984. Resuspensions of clays under waves. p 191-196 in: Bruce Denness (ed) Seabed Mechanics, Graham & Trotman, London.

Thorn, M. F. C., 1981. Physical processes of siltation in tidal currents. Proc. Conf. Hydraulics modelling in Maritime engineering. Inst of civil engineers, London. pp 65-75

Rapporter utgitt i serien Rapport fra Effektregulering – Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak:

1. Analyse av frostrøykobservasjonar vinteren 1996/97 over Bandak og Våmarvatnet i Tokkevassdraget.
2. Forsøkskjøring i Vinjevatn september 1997 – virkninger på fysiske og biologiske forhold – foreløpige resultater.
3. Innsamling og systematisering av erfaringsdata.
4. Effektregulering – turbiditetsøkning og biologiske virkninger i sjø.
5. Effektregulering – virkninger på laksefisk og bunndyr i elv, og bruk av vassdragssimulatorens habitatmodell.
6. Effektkjøring og elveerosjon - analyser og tiltak.
7. Prøvekjøring i Vinjevatn august/september 1998 Virkninger på fysisk og biologiske forhold – foreløpige resultater.
8. Effektregulering – virkninger på bunndyr og plankton i Vinjevatn.
9. Effektregulering – ferskvannsinnblanding i fjorder og algevekst.
10. Frostrøyk ved Våmarvatnet i Tokkevassdraget vintrane 1996/97 – 1998/99.
11. Effektregulering- virkninger på vannvegetasjon av prøvekjøringene i Vinjevatn 1997 og 1998.
12. Effektkjøring og grunnvannserosjon – analyser og tiltak.
13. Miljøkonsekvenser og metoder for verdsetting.
14. Verknader av ope vatn på lufttemperaturen rundt råker i is.
15. Virkninger av effektregulering på vanntemperatur og is i vannkraftmagasiner og innsjøer.
16. Virkninger av effektregulering på erosjon og sedimentasjon i vannkraftmagasiner.

EnFO

NVE

DIREKTORATET FOR
NATURFORVALTNING

Statkraft