



Norges
Geotekniske
Institutt
Norwegian
Geotechnical
Institute



NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK

*Jim Bogen
Hallvard Berg
Frode Sandersen*

FORURENSNING SOM FØLGE AV LEIREROSJON OG BETYDNINGEN AV EROSJONSFOREBYGGENDE TILTAK

Sluttrapport



HYDROLOGISK AVDELING

VASSDRAGSAVDELINGEN

PUBLIKASJON

Nr 21
1993

Omslagsbilde: A: Erosjon i yttersvingsbanke i Slemdalsbekken
Foto: Frode Sandersen (NGI)

B: Terskel av sprengt stein i Rogndalsbekken, Akerhus
Foto: Hallvard Berg



NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK

TITTEL FORURENSNING SOM FØLGE AV LEIREROSJON OG BETYDNINGEN AV EROSJONSFOREBYGGENDE TILTAK Sluttrapport fra prosjektet.	PUBLIKASJON nr 21
	DATO desember 1993
FORFATTERE Jim Bogen, NVE - HM Hallvard Berg, NVE - VV Frode Sandersen, NGI	ISBN 82-410-0206-8
	ISSN 0802-2569

SAMMENDRAG

Prosjektet tar for seg erosjonsprosesser i vassdrag i marine leirområder. Leira på Romerike er valgt som prosjektområde. Det er store variasjoner i erosjonsintensiteten innenfor Leiras nedbørfelt og store variasjoner fra år til år. Graden av erosjon er først og fremst avhengig av hvor bratt bekkeløpets lengdeprofil er i forhold til likevektsprofilen.

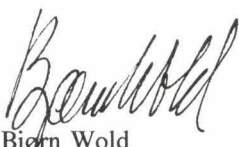
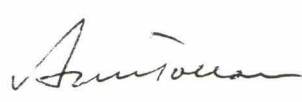
For Leira som helhet er transporten av suspendert materiale i middel ca 73 000 tonn/ år. Dette tilsvarer en erosjonsintensitet på 215 tonn/ km² år. I delfeltene Vikka og Slemdalsbekken, hvor det er etablert målestasjoner, er midlere erosjonsintensitet målt til henholdsvis 141 tonn/ km² år og 1131 tonn/ km² år. Marin leire inneholder fosfor, og stort sett ligger innholdet rundt 0,1%. Algetilgjengeligheten varierer sterkt, fra 5 til 85%.

Sedimenttilførselen fra ravineerosjon ble beregnet for de forskjellige delfeltene ved å utlede en sammenheng mellom erosjonsintensitet og E_p (erosjonspotensiale). Estimer for total sedimenttransport ble basert på verdier for E_p i forskjellige raviner og NIJOS erosjonsrisikokart for overflateerosjon på jordbruksarealer. Tilførselen fra naturlige prosesser og fra jordbruksområder utgjør henholdsvis 55% og 45% av totaltransporten i Leira.

Det ble påvist at store flommer har avgjørende betydning for utviklingen av erosjonsintensiteten i ravineområdet over tid. Flommene fører til senking av erosjonsterskler som i sin tur gjør skråningene ustabile slik at skredhyppigheten øker. Data fra hele dette århundre viser et godt samsvar mellom hyppigheten av skred og flomvannstand. Et unntak er skred i 1970 - årene som skyldes bakkeplanering. Periodene med store flommer og hyppige skred ga tilsvarende stor sedimentasjon på Leiras elvesletter og i Øyerens dybbasseng.

Ulike metoder for erosjonssikring i elver og bekker i leirterreng er drøftet i rapporten. Det er lagt hovedvekt på metoder som kan benyttes i leirraviner med sterk erosjon i bunnen. Aktuelle tiltak er enten sikring av ravinebunnen i hele lengden eller bygging av små terskler som trapper av fallet. Det er søkt å finne metoder og materialer med lave kostnader og minst mulig terrenginngrep. Når erosjonsvernet er solid bygget, kan den aktuelle erosjonsprosessen stoppes. I tillegg til tekniske tiltak i selve elve-/ bekkeløpet er ulike treslags betydning for stabiliteten av skråningene vurdert.

Undersøkelsen i Leira viser at noen få, svært aktive bekker kan bidra med en stor andel til sedimentbudsjettet. Sikringstiltak kan dermed avgrenses til disse områdene samtidig som totaltransporten reduseres vesentlig. Det er foreslått et utprøvningsprosjekt i Slemdalsbekken for å vinne erfaring med en del av metodene med hensyn til konstruksjon, varighet, effekt på sedimenttransporten og miljøkonsekvenser forøvrig.

EMNEORD sedimentbudsjett sedimenttransport erosjon erosjonssikring	ANSVARLIG UNDERSKRIFT Vassdragsavdelingen  Bjørn Wold avdelingsdirektør	ANSVARLIG UNDERSKRIFT Hydrologisk avdeling  Arne Tollan avdelingsdirektør
--	--	--

Kontoradresse: Middelthunsgate 29
Postadresse: Postboks 5091, Maj.
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95
Telefax: 22 95 90 00

Bankgiro: 0629.05.75026
Postgiro: 0803 5052055



NVE
NORWEGIAN
WATER RESOURCES AND
ENERGY ADMINISTRATION

TITLE SOIL EROSION, WATER QUALITY IMPACT AND THE ROLE OF PROTECTION WORKS Final report	PUBLIKASJON no 21
	DATE december 1993
AUTHORS Jim Bogen, NVE - HM Hallvard Berg, NVE - VV Frode Sandersen, NGI	ISBN 82-410-0206-8
	ISSN 0802-2569

ABSTRACT

This project deals with processes of erosion in rivers draining areas of marine clay. The river Leira in Romerike has been selected as a study area. The intensity of erosion is subject to large variations both within the drainage basin and from year to year. The longitudinal slope of the river bed is the main controlling factor.

The annual mean suspended sediment transport amounts to 73 000 tonnes/ yr, corresponding to a specific sediment yield of 215 tonnes/ km² yr. Gully erosion has been subject to special studies in the catchment areas of Vikka and Slemdalsbekken. The mean sediment yield of these two catchments was 141 tonnes/ km² yr and 1131 tonnes/ km² yr, respectively. The phosphorus content in the marine clays was 0.1 % by weight. Bioavailability was subject to a variation from 5 to 85 %.

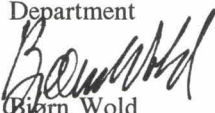
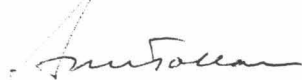
A relationship between sediment yield and potential erosion (Ep) was derived and used to compute the sediment supply from the various sub-catchments. Estimates of the sediment supply from agricultural land were obtained from maps of erosion risk assessment (Norwegian Institute of Land Inventory-NIJOS). The sediment supply from gully erosion and erosion in agricultural areas were found to contribute with 55% and 45 %, respectively, of the total load of the river Leira.

It was shown that major floods are an important factor controlling the long term erosion rates. The floods often lower the local base levels, causing unstable slopes and increased landslide frequency.

Records from this century indicate a correspondence between major slides and severe floods. Slides triggered by levelling of agricultural land during the 1970s are an exception. Periods with high frequency of landslides resulted in high sedimentation rate on the flood plains of the river Leira and in lake Øyeren.

Various methods of erosion control in rivers and streams in the gullied area are discussed. The main emphasis is given to methods applicable in gullies subject to intensive bed erosion. The gully bottom may be secured by erosion control means along the whole length or by construction of small weirs of various types. Priority has been given to methods and materials which keep cost low and disturbance of natural conditions to a minimum. The effect of various tree species on the stability of the gully slopes has also been evaluated.

The Leira survey indicated that a limited number of active gullies may dominate the sediment budget. Erosion control may thus be limited to these areas, but still cause a significant decrease in total load. To gain experience in the methods and actual effects on sediment load, a pilot project in the gully of Slemdalsbekken is suggested.

SUBJECT TERMS sediment budgets sediment transport erosion erosion control	RESPONSIBLE Water Resources Department  Bjørn Wold Director	RESPONSIBLE Hydrological Department  Arne Tollan Director
---	---	--

Head Office: Middelthunsgt. 29
Postal Address: P.O. Box 5091, Maj.
N-0301 Oslo, Norway

Telephone: + 47 2 95 95 95
Telefax: + 47 2 95 90 00
Telex: 56 79 397 NVEO N

Bank Account: 0629.05.75026
Postgiro: 0803 5052055

INNHold

1. INNLEDNING

1.1 Bakgrunn og formål	1
1.2 Framdrift	2
1.3 Finansiering	3
1.4 Kort beskrivelse av Leiras nedbørfelt	3
1.5 Problemstilling og metoder	5

2. EROSJONSPROSESSER I LEIRAS NEDBØRFELT

2.1 Beskrivelse av erosjonsprosessene	7
2.1.1 Avrenning i det naturlige dreneringssystemet	7
2.1.2 Massebevegelse i sideskråninger	11
2.1.3 Overflateavrenning	14
2.1.4 Avrenning i grøftesystemer	14
2.1.5 Underjordisk kanalisert drenering	15
2.1.6 Grunnvannserosjon	15
2.2 Inndeling av sedimentkilder etter erosjonsprosesser	16
2.3 Variasjoner i erosjonsprosessene innenfor Leiras nedbørfelt	17
2.3.1 Forskjellen mellom hovedløp og sideraviner	17
2.3.2 Forskjellen i erosjonsintensitet mellom de ulike ravinesystemene	18

3. SEDIMENTTRANSPORT I LEIRA, VIKKA OG SLEMDALSBEKKEN

3.1 Målemetodikk og måleinstallasjoner	22
3.2 Avløpet ved Krokfoss	24
3.3 Konsentrasjon av minerogent suspensjonsmateriale ved Krokfoss	26
3.4 Suspensjonstransporten ved Krokfoss	27

3.5 Suspensjonstransporten i Slemdalsbekken	28
3.6 Suspensjonstransporten i Vikka	31
3.7 Suspensjonstransporten ved Frogner	31
3.8 Sammenstilling av måleresultatene i forskjellige delfelt	33
3.9 Suspensjonsmaterialets kornfordeling	34
3.10 Fosfortransport og algetilgjengelighet	36
 4. BEREGNING AV SEDIMENTBUDSJETTET	
4.1 Vikkas sedimentbudsjett	38
4.1.1 Bidrag fra de naturlige erosjonsprosessene	38
4.1.2 Bidraget fra jordbruksområdene	39
4.2 Slemdalsbekkens sedimentbudsjett	42
4.1.1 Bidrag fra naturlige erosjonsprosesser	42
4.1.2 Bidraget fra jordbruksområdene	43
4.3 Sedimentbudsjettet i Leira	44
4.3.1 Bidrag fra naturlige erosjonsprosesser	44
4.3.2 Bidraget fra jordbruksområdene	47
 5. LANGTIDSVARIASJONER	
5.1 Langtidsvariasjoner i avløpet	49
5.2 Langtidsvariasjoner i sedimenttransporten	52
5.3 Forløpet av bidraget fra de ulike sedimentkildene sett over tid	54

6. SIKRINGSTILTAK MOT EROSJON (FORBYGGING)	
6.1 Innledning	57
6.2 Erosjonssikring i leirterreng	58
6.2.1 Sikring mot lateral erosjon	58
6.2.2 Sikring mot vertikal erosjon	63
6.2.3 Lukking	69
6.2.4 Sikring mot utglidninger	69
6.3 Virkninger av erosjonssikring	70
6.3.1 Effekt på erosjon, sedimenttransport	70
6.3.2 Effekt på stabilitet, kvikkleireskred	71
6.3.3 Virkning for natur- og miljøinteresser lokalt	72
6.4 Sammenstilling av ulike løsninger	73
6.5 Saksbehandling, gjennomføring	77
6.6 Trær som stabiliserende element i leirskrånninger	79
6.6.1 Innledning	79
6.6.2 Treslagenes egnethet for stabilisering av leirskrånninger	79
6.7 Prioritering av områder for erosjonssikring	81
6.8 Eksempel, plan for tiltak i Slemdalsbekken	83
REFERANSER	85
APPENDIKS	

1. INNLEDNING

1.1 BAKGRUNN OG FORMÅL

Prosjektet ble startet opp høsten 1988, etter initiativ fra fylkeslandbrukskontoret i Akershus og Oslo. Det var satt fokus på avrenning fra jordbruksområder og konsekvensene av dette for forurensningstilstanden i vassdrag og sjøområder. Samtidig var det kjent at leiravsetninger generelt inneholder fosfor og at erosjon i elver og bekker derfor også kan bidra vesentlig til fosforinnholdet i vassdrag.

Ut fra dette ønsket man en vurdering av betydningen av den **naturlige** erosjon i elveløp i forhold til betydningen av erosjon på jordbruksarealer. Samtidig var det ønsket å få vurdert i hvor stor grad forbygninger - i form av erosjonssikring - kunne bidra til å redusere tilførslene av partikler og fosfor til vassdrag og sjøområder. Det er kjent at det er klar sammenheng mellom erosjon i bekker og elver og skredaktivitet, herunder kvikkleireskred.

På et møte 16.08.88 ble det vedtatt å opprette en styringsgruppe til å se nærmere på disse spørsmål. På møtet deltok representanter for fylkesmannens miljøvernavdeling i Oslo og Akershus, Miljøpakke Romerike, Norges Vassdrags- og energiverk (NVE) og Norges Geotekniske Institutt (NGI).

Følgende personer er oppnevnt som medlemmer i gruppen:

Hallvard Berg, NVE Vassdragsavd., Vassdragsteknikk (NVE-VV), prosjektleder.

Jim Bogen, NVE Hydrologisk avd., Miljøhydrologi (NVE-HM)

Leif Mathisen, Fylkeslandbrukskontoret i Akershus og Oslo

Erik Moen, NGI (til 01.02.90)

Frode Sandersen, NGI (fra 01.02.90)

Leif Nilsen, Akershus fylkeskommune (til juni 92)

Kari Fagernes, Akershus fylkeskommune (fra juni 92)

Det ble utarbeidet et mandat for arbeidet og ut fra dette ble arbeidet delt inn i 4 faser:

- Fase 1: Klarlegge betydningen av leirerosjon som forurensningskilde.
- Fase 2: Bestemme sedimenttransporten og dens kilder i de aktuelle vassdrag.
- Fase 3: Utrede alternative tiltak for å hindre erosjon i bekke-/elveløp.
- Fase 4: Utarbeide detaljerte forslag til erosjonssikring i Akerhus med kostnadsoverslag og kvantifisering av forventet effekt.

Leira er valgt som prosjektområde.

1.2 FRAMDRIFT

Det foreligger rapport fra arbeidet i fase 1, datert 01.03.89. Foreløpig rapport fra arbeidet i fase 2 i 1989 ble utgitt 30.01.90.

Endelig rapport fra fase 2 er datert 11.11.1991 (Bogen og Sandersen 1991). Fra delprosjekt 3.1 er det utgitt rapport utarbeidet av Lars Helge Frivold, NLH (Frivold, 1991).

Fase 3 og 4 har pågått i 1991 og 1992. Det avgis separat rapport fra delprosjekt 3.2. "Erosjonssikring i leirområder".

Ulike fagmiljøer har bidratt med delrapporter til prosjektet. De største bidragene har NVE ved Vassdragsavdelingen og Hydrologisk avdeling stått for sammen med NGI. Dessuten har følgende institusjoner bidratt, i alfabetisk rekkefølge:

Akershus fylkeskommune v/ Knut Ørn Bryn, Avløpssambandet Nordre Øyeren (ANØ), Norges Landbrukshøgskole v/Lars Helge Frivold, , Limnoconsult v/ Øyvind Løvstad, Universitetet i Oslo v/ Per Aagaard, University of Exeter (England) v/ Des Walling og Tim Quine.

1.3 FINANSIERING

Prosjektet er finansiert ved støtte fra:

- Statens Tilsynsinstitusjoner i Landbruket (STIL)
- Miljøpakke Romerike
- Akershus fylkeskommune
- Konesesjonsavgiftsfondet

I tillegg har NVE Vassdragsavdelingen stilt personell og midler til disposisjon.

NLVF har gjennom tilskudd til prosjektet "Sedimenters transport og lagring i vassdragene" bidratt til driften av målestasjonene.

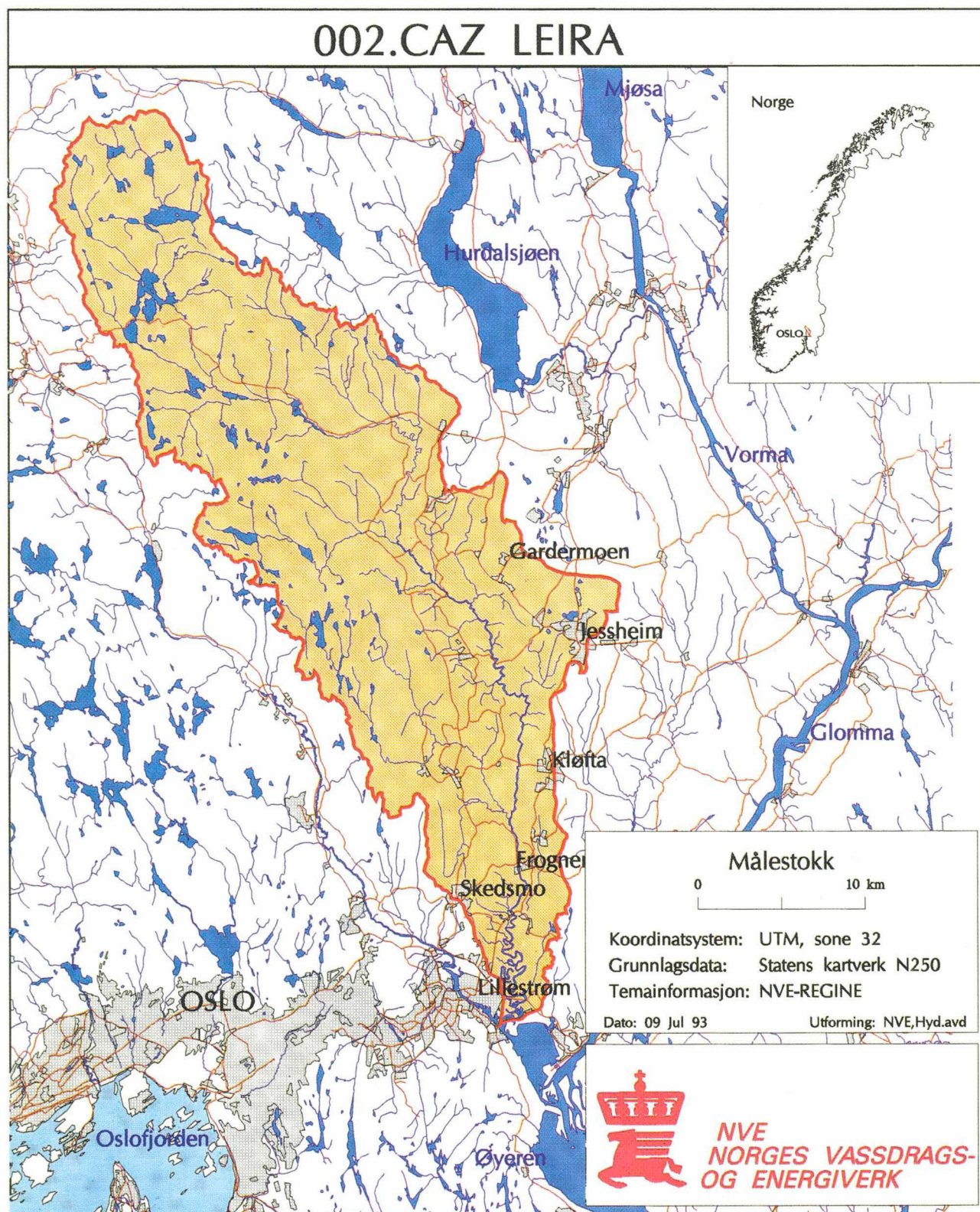
1.4 KORT BESKRIVELSE AV LEIRAS NEDBØRFELT

Leiravassdraget på Romerike er valgt som prosjektområde.

Nedbørfeltet strekker seg fra Lunner i Oppland, gjennom Nannestad, Ullensaker, Gjerdrum, Sørums, Skedsmo og Fet kommuner i Akershus, jfr. figur 1. Ved Lillestrøm løper Leira sammen med Nitelva, like før utløpet i Øyeren. Nedbørfeltet er totalt på 659 km², se figur 1.

Vassdragets øvre deler er preget av skogområder med mange innsjøer og tjern. Ved Maura i Nannestad passeres den marine grense (MG). Nedenfor marin grense på 205 m o.h. er det tildels betydelige løsmasseavsetninger hvor det i perioden etter siste istid er dannet et ravinelandskap. Det alt vesentlige av sedimenttransporten i Leira skyldes erosjon i løsmasseavsetninger bestående av leire, silt og sand.

Det er derfor områdene under marin grense som er gjenstand for undersøkelser med hensyn på erosjon og mulige tiltak i dette prosjektet. Omlag 380 km² av nedbørfeltet ligger under marin grense. Totalt innenfor nedbørfeltet er det oppgitt å være 133 km² jordbruksareal. Det alt vesentlige av dette ligger under marin grense. Av dette igjen er 27 km² bakkeplanert (Akershus fylkeskommune 1991). Det er således fortsatt betydelige områder med raviner, hvor de naturlige prosesser går som før.



Figur 1: Leiras nedbørfelt.

Leira er varig vernet mot kraftutbygging gjennom Verneplan III for vassdrag, der særlig de naturvitenskapelige interesser knyttet til vassdraget var tungtveiende. Romerike landskapsvernområde ligger innenfor prosjektområdet og omfatter blant annet et godt utviklet ravinesystem (Vikka).

Det pågår vannbruksplanarbeid i Leira. Et delprosjekt som tar for seg arealbruk, tilgjengelighet og verneinteresser langs Leiras hovedløp under marin grense er nylig avsluttet. Det er her gjennomført registreringer og utarbeidet en handlingsplan for tiltak, blant annet for å bedre tilgjengeligheten til vassdraget.

Det er flere tettsteder i Leiras nærområde, med Lillestrøm som det største med ca 10 000 innbyggere.

Det er foretatt systematiske vannstands- og vannføringsmålinger i Leira fra 1966 til d.d. Det er to markerte flomperioder, en i forbindelse med snøsmelting i april/mai og regnflommer i september-november. I de siste årene med milde vintre har det også forekommet flommer vinterstid.

1.5 PROBLEMSTILLING OG METODER

Da dette prosjektet startet, var fokuseringen på erosjonsproblemer og konsekvenser med hensyn til forurensning i stor grad konsentrert om jordbruksavrenning.

Det var likevel klart at elveløpserosjonen i visse vassdrag har en betydelig innvirkning på siktedyp og generell vannkvalitet, herunder fosforinnholdet.

I forbindelse med handlingsplanen mot landbruksforurensning var det utført en viss forskningsaktivitet for å utprøve tiltak mot erosjon og forurensning i form av nærings-salter fra landbruksarealer. Et sentralt spørsmål i dette arbeidet blir hvor mye sedimenter og partikkelbunden forurensning som har sitt opphav i andre kilder enn jordbruksarealer og jordbruksaktivitet.

Klager på vannkvalitet rettet seg særlig mot høyt partikkelinnhold og dårlig siktedyp. I dette prosjektet ble det derfor besluttet å knytte vannkvalitet til kvantitative mål på suspensjonstransporten.

Undersøkelser i prosjektets fase 2 er også basert på analyser av sedimentbudsjettet for Leiras nedbørfelt. Ved målinger og feltundersøkelser kvantifiseres transporten ut av feltet og bidragene fra forskjellige sedimentkilder. Et sedimentbudsjett er et regnskap over hvor mye materiale som tilføres fra forskjellige sedimentkilder. Resultatene fra prosjektets fase 2 er dokumentert i Bogen og Sandersen (1991).

Tradisjonelt har sikring av elver og bekker mot erosjon først og fremst hatt som formål å hindre skader på økonomiske verdier. I leirområdene er det klar sammenheng mellom erosjon i bekker og elver og utløsning av kvikkleireskred. Det ligger derfor et stort farepotensiale i områder med kombinasjon av aktiv erosjon i bekker og kvikkleire i grunnen. Dette er også motivet for kvikkleirekartleggingen i regi av Statens Naturskadefond.

Etter at det har blitt fokusert mer og mer på sedimenttransporten i elvene som miljøproblem, har spørsmålet om sikring med det formål å redusere sedimenttilførselen til vassdragene også dukket opp. Dette har alltid vært en bieffekt av sikringstiltakene, men har først i de senere år blitt fokusert. Som eksempel kan nevnes omfattende sikringsarbeider som NVE har utført i leirområdene i Helgådalen i Nord-Trøndelag, som har hatt som bieffekt at vannet er blitt klarere og at laksebestanden har tatt seg opp.

Som en del av prosjektet, er det sett på ulike tekniske tiltak for å hindre erosjon i elver og bekker i leirterrenget på Romerike. Det foreligger separat rapport på dette tema, "Erosjonssikring i leirområder". Med tekniske tiltak mener vi her innretninger plassert i elveløpet for å redusere erosjonen. Dette inkluderer bruk av naturlige/ stedlige materialer samt vegetasjonsetablering for å hindre erosjon. Når det gjelder hvilke treslag som er mest aktuelle, skjøtsel av skog osv. vises til rapporten "Trær som stabiliserende element i leirskråninger" (Frivold, 1991), som også er en delrapport i prosjektet. Hovedpunkter fra de to rapportene er gjengitt i kap. 6.

2. EROSJONSPROSESSER I LEIRAS NEDBØRFELT

Prosesser som kan lede til fluvial erosjon i leirterrenget på Romerike kan grovt deles inn i følgende hovedgrupper:

- Avrenning i det naturlige dreneringssystemet
- Massebevegelse i sideskråninger
- Overflateavrenning
- Avrenning i grøftesystemer
- Underjordisk kanalisert drenering ("piping")
- Grunnvannserosjon

En oversikt over disse prosessene, hvor de virker og hvilke faktorer som styrer intensiteten, er vist i tabell 1 side 16.

Omfanget av erosjon er detaljkartlagt langs Leiras hovedløp og i to utvalgte delfelt i ravinlandskapet, hhv. Vikka og Slemdalsbekken.

2.1 BESKRIVELSE AV EROSJONSPROSESSENE

2.1.1 Avrenning i det naturlige dreneringssystemet

Den direkte påvirkningen av det rennende vannet fører til en erosjon i bekkeløpet. Erosjonsintensiteten er i hovedsak bestemt av strømningshastigheten og av motstandskraften løpsmaterialet har mot å bli satt i bevegelse. Når vi betrakter et tverrsnitt av et bekkeløp kan det være naturlig å dele løpserosjonen inn i to hoveddeler, henholdsvis lateral og vertikal løpserosjon.

Lateral (sideveis) løpserosjon

Strømningshastigheten og dermed også erosjonen er størst i yttersvinger, mens det har en tendens til å foregå en sedimentasjon i innersvinger. På sikt kan disse prosessene resultere

i en sideveis forflytning av hele bekkeløpet, slik tilfellet er i et typisk meanderende løpsmønster. Et slikt mønster finnes på lange strekninger i Leira, og da spesielt i de nedre delene nærmest Øyeren.

Erosjonsintensiteten vil også være avhengig av i hvilken grad det foregår massebevegelse (bakkesig) i sideskråningene ned mot bekkeløpet, idet bekkeløpet vil forsøke å opprettholde sitt tverrsnittsareal ved å frakte bort tilført materiale fra skråningene.

Vertikal løpserosjon (bunnsenkning)

Graden av vertikal løpserosjon vil først og fremst være avhengig av løpsgradienten og av bunnmaterialets motstandskraft mot erosjon. Et bekkeløp med en gitt vannføring og kornfordeling av bunnsedimentene, vil med tida prøve å grave seg ned inntil det når et likevektsprofil, eller inntil det er dannet et stabilt dekk sjikt.

Norges Geotekniske Institutt gjennomførte i slutten på 1960-tallet en omfattende studie av problemer vedrørende kvikkleireskred på Romerike (Bjerrum, 1971). I dette arbeidet ble et antall bekker innenfor et nedbørfelt (Hynna) oppmålt for å bestemme løpsgradienten og tilhørende areal av nedbørfeltet. Hver bekk ble klassifisert etter graden av erosjon:

- Bekk som viser aktiv erosjon
- Bekk i tilnærmet likevekt
- Bekk som viser oppgrunning

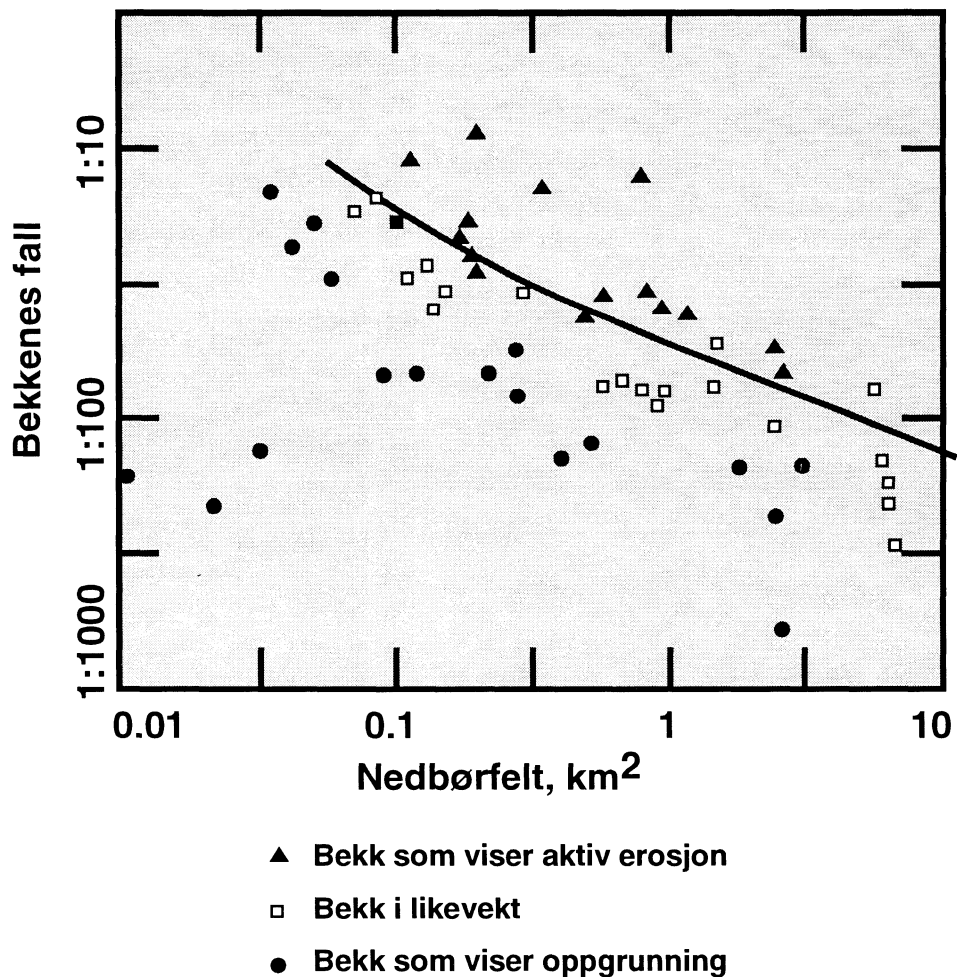
Hver bekk ble avmerket i et diagram som vist i figur 2 på neste side.

På bakgrunn av dette diagrammet var det mulig å trekke en linje som skilte de bekkene som hadde aktiv erosjon fra de bekkene som ikke viste tegn til å grave seg ned eller hvor det foregikk oppgrunning. Denne linjen kan uttrykkes ved følgende ligning:

$$(1) \quad S_k = \frac{0,0116}{A^{0,55}}$$

der S_k er kritisk gradient

A er nedbørfeltets areal i km²

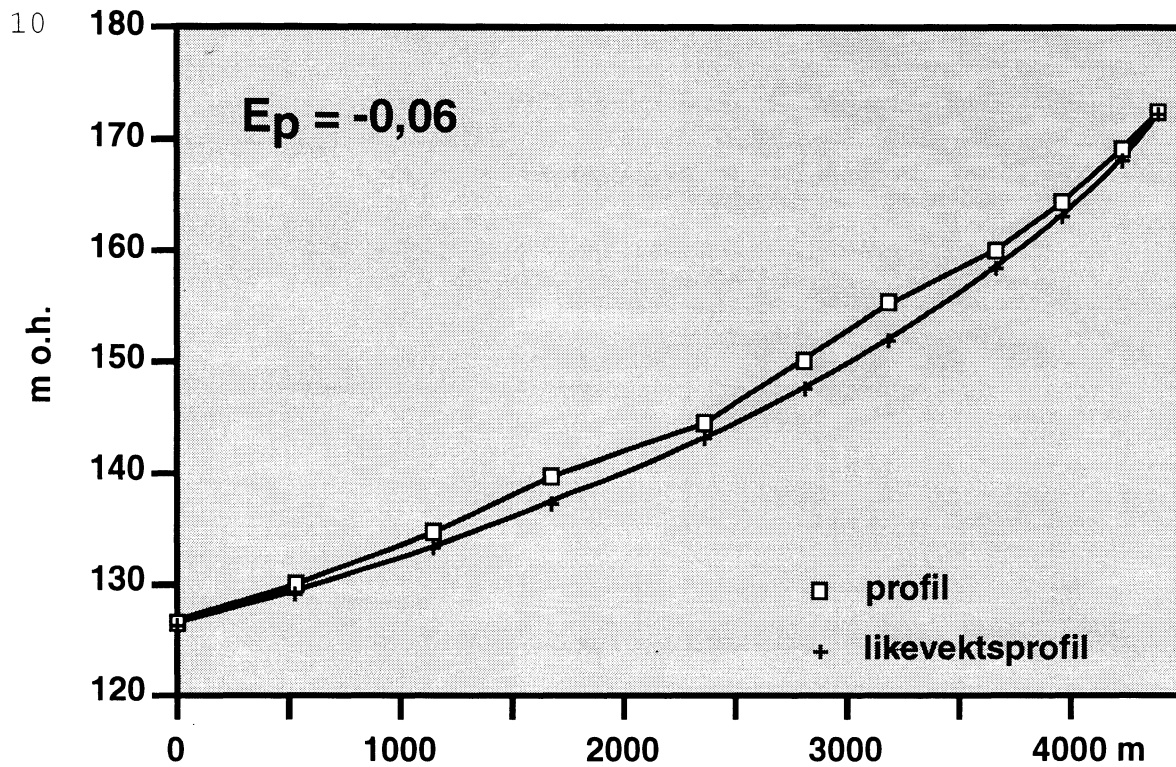


Figur 2: Sammenhengen mellom arealet av nedbørfelt og løpsgradient for bekker med ulik grad av vertikal løpserosjon (Bjerrum, 1971).

I bekker med brattere fall enn denne kurven vil det fortsatt foregå vertikal løpserosjon, og det er også mulig å vurdere hvor stor den potensielle nedskjæringen kan bli.

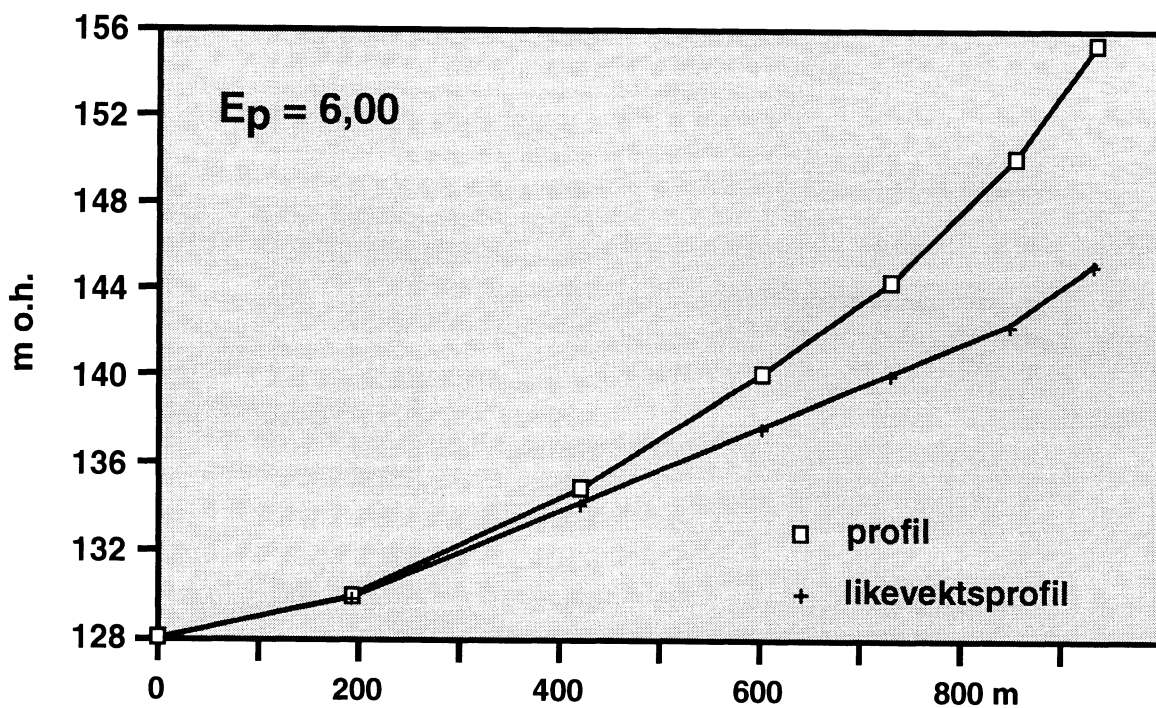
Figur 3 og 4 viser eksempler på lengdeprofiler av to ravinesystemer, hhv. Vikka og Slemdalsbekken, og hvordan disse ligger i forhold til likevektsprofilet. Som grunnlag for profilene er det benyttet økonomisk kartverk med 5 m ekvidistanse. Som vi ser av disse figurene har Vikka langt slakere fall i forhold til likevektsprofilet enn Slemdalsbekken, noe som indikerer at erosjonsprosessene i Slemdalsbekken er mer aktive. Målinger av sedimenttransporten i disse ravinene viser da også klart at dette er tilfellet, noe vi kommer tilbake til i kapittel 3.

Vikka



Figur 3: Lengdeprofil og likevektsprofil for Vikka, en ravinedal der lengdeprofilet ligger nær likevektsprofilet slik at jordsig i kombinasjon med lateral løpserosjon blir den dominerende prosess.

Slemdalsbekken, aktiv



Figur 4: Lengdeprofil og likevektsprofil for Slemdalsbekken, en ravinedal der vertikal og senkning og jordskred dominerer.

På figurene 3 og 4 har vi angitt en E_p -verdi. Denne er et mål for erosjonspotensialet og er beregnet etter følgende formel:

$$(2) \quad E_p = \frac{\sum \Delta h_i L_i}{L}$$

der Δh_i er høydeforskjellen (m) mellom det aktuelle profilet og likevektsprofilet i hvert av punktene som ligger til grunn for profilene, dvs. for hver 5 m-kote. Δh er negativ for de segmentene der løpsprofilet er slakere enn likevektsprofilet.

L_i er lengden (m) av hvert segment på løpsprofilet

L er total lengde (m) av bekkeløpet, $\sum L_i$

2.1.2 Massebevegelse i sideskråninger

Massebevegelse er et samlebegrep for masseforflytning som skjer på grunn av tyngdens påvirkning. Denne prosessen vil føre til en transport av løsmasser nedover skråningen. Dersom det renner en bekk i skråningsfoten vil denne grave i det tilførte materialet og transportere det nedover nedbørfeltet. Dette samspillet mellom massebevegelse i skråninger og fluvial erosjon/transport er den viktigste nedbrytingsprosessen i det norske landskapet når vi ser bort fra glasiale prosesser. Det er vanlig å skille mellom raske og langsomme massebevegelser.

Raske massebevegelser: Skred og utglidninger

Stabiliteten av en skråning er i første rekke avhengig av porevannstrykket og skråningsgradienten. Stabiliteten avtar med økende poretrykk ved f.eks. sterk nedbør eller snøsmelting og med økende gradient. Stabiliteten vil også bli redusert dersom det skjer en undergraving av skråningsfoten som følge av erosjon i et bekkeløp. Dessuten har erfaring vist at menneskelige inngrep som f.eks. snauhogging eller bygging av skogsbilveier i bratte skråninger har gitt opphav til skred.

Figur 5 viser et eksempel på et jordskred forårsaket av undergraving i skråningsfoten.



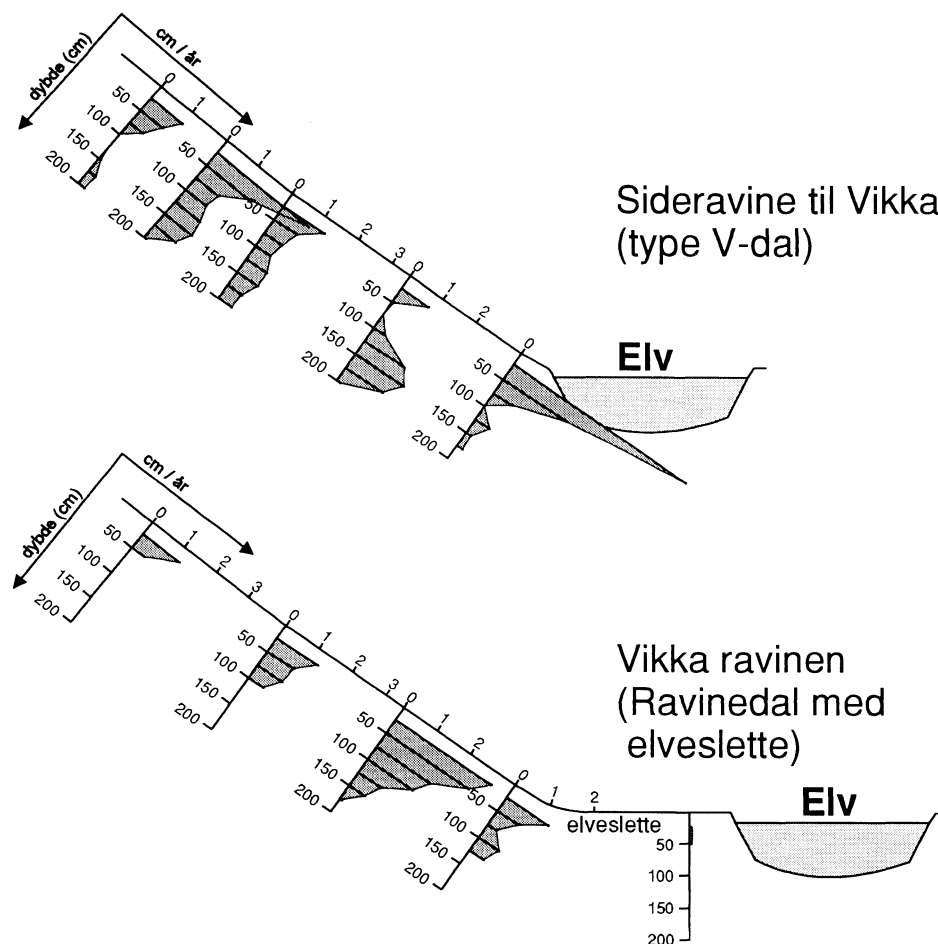
Figur 5: Foto av et skred i en yttersving langs Leiras hovedløp som er forårsaket av undergraving i skråningsfoten.

I de marine leirområdene kan det forekomme store kvikkleireskred bestående av flere 100 000 m³ med løsmasser. Dersom slike skred fyller opp en bekkedal vil sedimentbudsjettet i mange år fullstendig domineres av erosjon i dette skredmaterialet. Det er opplysninger om flere store kvikkleireskred i Leiras nedbørfelt i historisk tid, og det siste skjedde i 1988 ved Sagholen i en sidebekk til Gjermåa. En oppstilling over de største kjente kvikkleireskredene er gitt i en foreløpig rapport fase 2, datert 30.01.90. Flere av de største kvikkleireskredene i Norge har blitt utløst som følge av løpserosjon i en skråningsfot.

Langsom massebevegelse

Væte-/tørke-sykluser og en veksling mellom frysing og tining vil føre til en sakte bevegelse av løsmassedekket nedover skråningen. Denne bevegelsen som kalles bakkesig, er størst i silt- og leirholdige jordarter og øker dessuten med økende skråningsgradient. I de bratte ravinedalene i de marine leirområdene vil bekkeløpene få en stadig tilførsel av løsmasser fra sidene på grunn av bakkesig. For at bekkeløpet skal opprettholde sitt tverrprofil må det foregå en lateral løpserosjon.

For å måle størrelsen på dette siget ble det våren 1990 boret 2 m dype hull langs to profiler i Vikkas nedbørfelt, 5 hull langs hvert profil. I hullene ble det satt ned armerte plastrør. Ved å måle forandringer i helningen på disse rørene, kan bakkesiget beregnes. Målingene så langt indikerer at gjennomsnittlig sig i overflaten er av størrelse 1-2 cm pr. år jevnt avtagende ned til omlag 1-2 m dybde (figur 6). Siget er størst i de bratteste delene av profilet.



Figur 6: Målinger av bakkesig i to skråninger i Vikkas nedbørfelt

Forutsetningen for at det skal bli et bidrag fra bakkesig er at skråningen ned mot bekkeløpet er tilstrekkelig bratt og høy. I beregningene av sedimentbudjettet er det antatt at skråningene må være høyere enn 5 m, og skråningsgradienten må være brattere enn 1:4 for at bakkesiget bidrar i sedimentbudsjettet.

2.1.3 Overflateavrenning

Overflateavrenning utenom det vanlige dreneringsnett vil kunne grave i løsmassedeckket. Denne avrenningsformen er i Norge stort sett begrenset til arealer der det naturlige vegetasjonsdekket er fjernet.

På steder med vegetasjon vil humusdekket og røttene føre til at infiltrasjonen i de aller fleste tilfeller er stor nok til å hindre avrenning på overflaten. I tillegg kan det forekomme overflateavrenning i bratte skråninger under spesielle nedbørforhold, eller i perioder når telen hindrer gjennomstrømning av vann nedover i jordprofilen, men vanligvis vil ikke slik overflateavrenning avstedkomme erosjon.

I Leiras nedbørfelt er overflateavrenningen vesentlig konsentrert til jordbruksområdene, og da særlig i perioden etter pløying om høsten og fram til våren før telen har smeltet. De siste åra har det vært store vinterflommer, og det er under slike flommer observert overflateavrenning med omfattende erosjon på pløyd mark.

Dessuten er det observert slik avrenning i skredsår inntil det igjen har blitt etablert et vegetasjonsdekke. Det har også blitt observert overflateavrenning innenfor områder med anleggsvirksomhet, f.eks. i nye boligfelt.

2.1.4 Avrenning i grøftesystemer

Det har blitt observert erosjonsskader i forbindelse med omlegging av dreneringssystemet ved bakkeplanering. Erosjonsproblemene oppstår som regel ved utløpet av drenerørrene. Ved dårlig erosjonssikring av utløpene har det vært sett flere eksempler på dannelse av nye raviner inn i de bakkeplanerte områdene.

2.1.5 Underjordisk kanalisert drenering

Det ble under feltbefaringene observert flere eksempler på underjordiske dreneringskanaler med diameter i gjennomsnitt rundt 10-20 cm. Slike dreneringssystemer er beskrevet i internasjonal litteratur, og den engelske termen for denne avrenningsformen er "piping". Bakkesiget vil antagelig føre til at slike kanaler vil lukkes, og i forbindelse med flomsituasjoner er det derfor mulig at det foregår erosjon for å åpne kanalene igjen.

Omfanget av slik underjordisk drenering er ikke kjent, og det er derfor vanskelig å anslå størrelsen på erosjonsbidraget som følge av denne prosessen. Antagelig er bidraget relativt lite i forhold til andre prosesser, og vi har i oppstillingen over sedimentbudjettet sett bort fra dette bidraget.

2.1.6 Grunnvannserosjon

De fleste av sidebekkene som drenerer ut fra Gardermo-sletta ender opp i grunnvannskilder i overgangssonen mellom leira og den overliggende sandavsetningen. I perioder med høyt grunnvannsnivå vil det lett oppstå ustabile forhold med erosjon, og flere av disse grunnvannsravinene viste tegn på aktiv tilbakeskridende erosjon innover i deltaavsetningen.

Det er hovedsakelig sand som vil inngå i erosjonsmaterialet, og sanden som dekker bunnen i store deler av Leiras nedbørfelt skyldes antagelig grunnvannserosjon i Gardermoens sandavsetninger. Kornfordelingsanalyser av suspensjonstransporten viser da også et stort innhold i sandfraksjonen i Vikka, hvor store deler av nedbørfeltet blir utgjort av sand-deltaet ved Gardermoen.

2.2 INNDELING AV SEDIMENTKILDER ETTER EROSJONSPROSESSER

På bakgrunn av de prosesser som kan lede til fluvial erosjon, kan det være hensiktsmessig å dele inn sedimentkildene i tre hovedgrupper slik som vist i tabell 1.

Tabell 1: Inndeling av sedimentkilder etter erosjonsprosesser

Sedimentkilde	Erosjonsprosess	Faktorer som styrer erosjonsintensiteten
Løpsmateriale	Bunnsenkning (vertikal løpserosjon)	Vannføring Lengdeprofil bunnmateriale, dekkstjikt
	Graving i yttersving (lateral løpserosjon)	Vannføring Stabilitet av skråningsfot
Skråningsmateriale	Skred/utglidninger fører til: Erosjon i skredmasser avlagret i løpet	Skråningsstabilitet Undergraving av skråningsfot
	Bakkesig fører til: lateral løpserosjon	Jordart Skråningsgradient
	Erosjon i underjordiske kanaler (piping)	Strømningshastighet Jordart
	Grunnvannserosjon	Grunnvannsnivå Porevannstrykk
	Overflateavrenning i skredsrår	Nedbørsintensitet Jordart
Løsmasser Jordbruksområder	Overflateavrenning	Lengde og helling på skråning Arealbruk Teleforhold Nedbørsintensitet
	Erosjon av grøftevann	Grad av erosjonssikring Vannføring

2.3 VARIASJONER I EROSIJONSPROSESSENE INNENFOR LEIRAS NEDBØRFELT

2.3.1 Forskjellen mellom hovedløp og sideraviner

Langs Leiras hovedløp er punktkilder hovedsakelig lokalisert til yttersvinger der lateral erosjon er den dominerende sedimentkilden. Når vi beveger oss opp i sidebekkene er den vertikale løpserosjon mer intensiv. Dette bidrar til undergraving av skråningsfoten over lengre strekninger, noe som gir opphav til skred og utglidninger i skråningene. Erosjon i skredmasser som avlagres i løpene, blir derfor mange steder dominerende sedimentkilde i de aktive sideravinene.

Denne forskjellen kan forklares ut fra hvilken fase i landskaps-utviklingen de ulike delene av bekkesystemet har kommet i. I det unge, lite utviklete landskap vil man vanligvis finne intensive erosjonsprosesser, mens man i det modne landskapet opplever langt lavere intensitet. Som hovedregel gjelder at graden av utvikling er avhengig av avstanden til erosjonsbasis. Landskapet vil først nå et modent stadium i de nedre delene nær erosjonsbasis. Etterhvert som tiden går, vil denne utviklingen også nå de øvre delene av nedbørfeltet.

Stadiet i landskapsutviklingen vil avspeiles i løpsmønsteret ved at man i det unge landskapet oftest vil finne relativt rette løp. Med tida vil løpsmønsteret utvikles i retning av mere svingete løp, for til slutt å ende opp i et meanderende løpsmønster i et modent landskap.

Disse typene løpsmønster finnes i Leiras nedbørfelt. I de marginale delene av feltet er løpene som oftest rette, mens lengre strekninger får et svingete løpsmønster etterhvert som vi beveger oss nedstrøms. Nedenfor Leirsund finner vi de typiske meandersvingene. Feltundersøkelsene tyder på at løpsmønsteret begynner å bli svingete når den vertikale løpserosjonen blir liten, dvs. når løpet nærmer seg sitt likevektsprofil.

Løpsmønsteret vil være med på å bestemme beliggenheten av sedimentkildene. I meanderende og svingete løp (hovedbekker) vil punktkildene lokalisert til yttersvingene være dominerende. I rette løp (sidebekker) som ennå ikke har nådd likevektsprofilet, vil den vertikale løpserosjonen fortsatt være aktiv, og i disse løpene vil man ofte finne ustabile skråninger som følge av undergraving av skråningsfoten. Dette fører til hyppigere utglidninger og større bakkesig i sideravinene enn tilfellet er med hovedravinene.

2.3.2 Forskjellen i erosjonsintensitet mellom de ulike ravinesystemene

I 1989 og 1990 ble det tatt to prøveserier med konsentrasjonsmålinger av suspensjonstransporten i forskjellige sidebekker under flomforhold. Resultatene av disse prøvene er vist i figur 7 og 8 på de to neste sidene.

Som det fremgår av disse figurene er det stor forskjell i de ulike delfeltene. Rangordningen mellom feltene synes imidlertid å være den samme under de to flommene. Slemdalsbekken skiller seg ut som det ravinesystemet som har den største konsentrasjonen, noe som indikerer at erosjonsprosessene er mest intensive i dette delfeltet.

Feltobservasjonene foretatt i delfeltene Vikka og Slemdalsbekken viste også tydelig at det var store forskjeller i disse feltene med hensyn til intensitet i erosjonsprosessene. I Slemdalsbekken var det tydelig at det fortsatt var svært aktiv vertikal løpserosjon over lange strekninger med undergraving av skråninger og utløsning av tallrike skred og utglidninger. I Vikka var denne prosessen langt mindre aktiv.

Årsaken til den store forskjellen i erosjonsintensitet mellom de ulike ravinesystemene kan bero på flere faktorer. De viktigste årsakene antas å være:

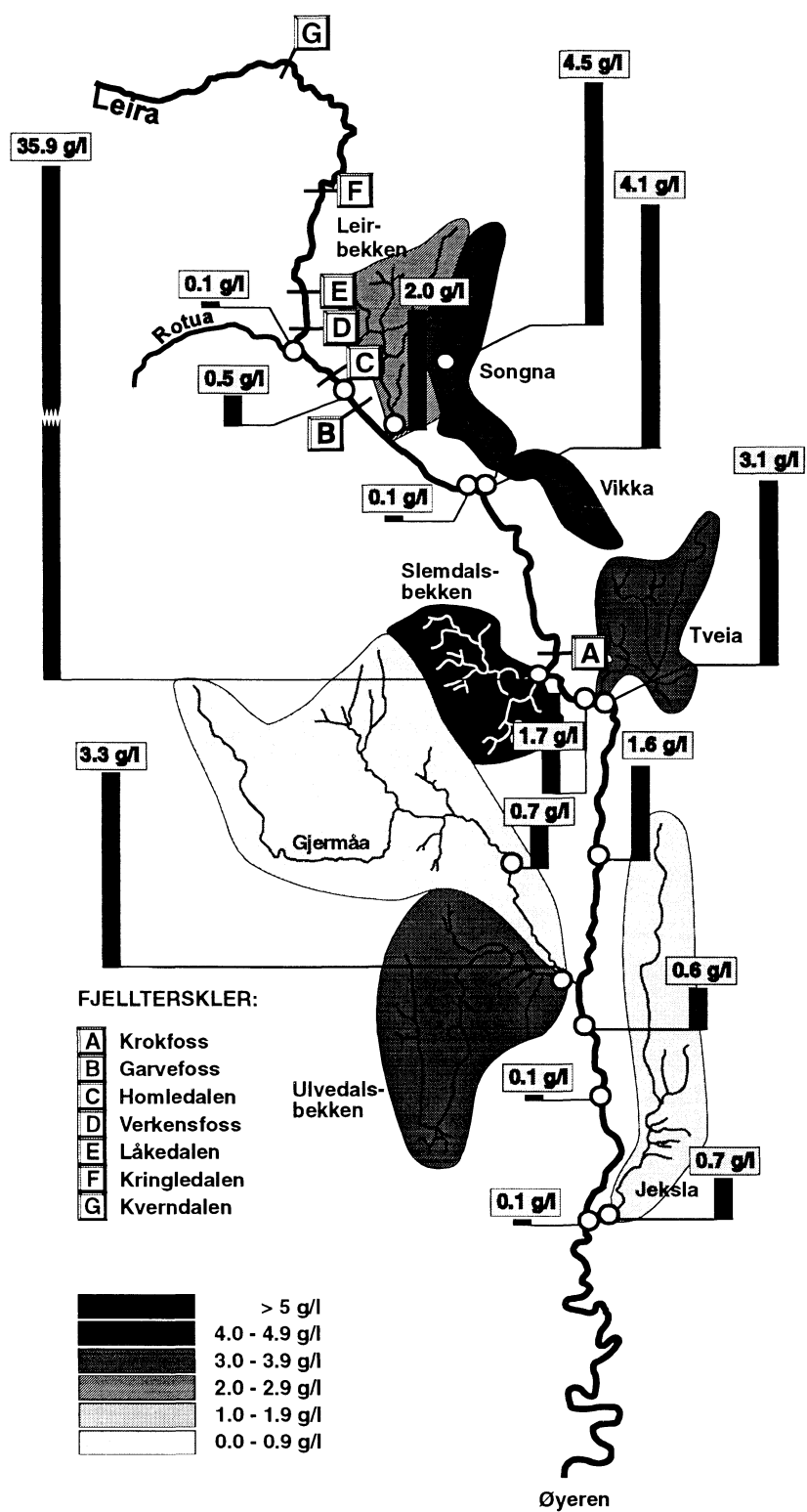
Avstand til erosjonsbasis

For Slemdalsbekken er avstanden til nærmeste nedstrøms erosjonsbasis (Øyeren) ca. 33 km, mens for Vikka er denne (Krokfoss) avstanden kun 6 km. Dette innebærer at landskapsutviklingen har kommet vesentlig lengre i Vikka, som igjen skulle føre til at erosjonsintensiteten er lavere i Vikka enn i Slemdalsbekken. Også for de andre delfeltene synes samme tendens å gjøre seg gjeldende.

E_p -verdier er beregnet for de største delfeltene, og det ser ut som om høye E_p -verdier gjerne er forbundet med felt som har lang avstand til erosjonsbasis (figur 17 side ..).



Figur 7: Konsentrasjon av suspensjonsmateriale ved flommen 31.07.89



Figur 8: Konsentrasjon av suspensjonsmaterialet ved flommen 02-03.02.90

Graden av bakkeplanering

Størstedelen av Vikkas nedbørfelt ble i 1976 utpekt som landskapsvernområde, noe som førte til at all videre bakkeplanering ble forbudt. I Slemdalsbekkens nedbørfelt har det foregått planering helt fram til dags dato. Erosjonsintensiteten vil være størst de første årene etter planeringen, for så å avta gradvis med årene ettersom skråninger og drenering får tid til å innstille seg etter de nye forholdene. Det må derfor forventes at den spesifikke erosjonen fra bakkeplanerte områder er større i Slemdalsbekken enn i Vikka.

I tillegg antas bakkeplaneringen å ha innvirkning på flomforholdene i det naturlige ravinesystemet som ligger nedstrøms. Antagelig vil bakkeplaneringen føre til at avrenningen fra disse områdene skjer raskere, slik at flomtoppen blir konsentrert over et kortere tidsrom med høyere maksimal vannføring. Dette kan gi opphav til større erosjonsintensitet i ravinesystemer der store arealer innenfor nedbørfeltet har blitt bakkeplanert.

3. SEDIMENTTRANSPORT I LEIRA, VIKKA, OG SLEMDALSBEKKEN

Sedimenttransporten er sammensatt av flere komponenter som beveger seg på forskjellig måte etter kornstørrelse og strømningsforhold i vassdraget. Suspensjonstransporten består av det finfordelte materialet sand, silt og leire som holdes svevende i vannmassene av turbulente strømninger. Bunntransporten består av de største partiklene som glir eller ruller i kontakt med bunnen. Bunntransporten beveger seg mye saktere enn suspensjonstransporten. Når suspensjonsmaterialet først er ført frem til hovedvassdraget vil mye av materialet være ute av vassdraget etter noen få timer. Noe kan lagres i løpene underveis og føres ut i løpet av sesongen. Det bunntransporterte materialet kan imidlertid vandre i vassdraget i flere år.

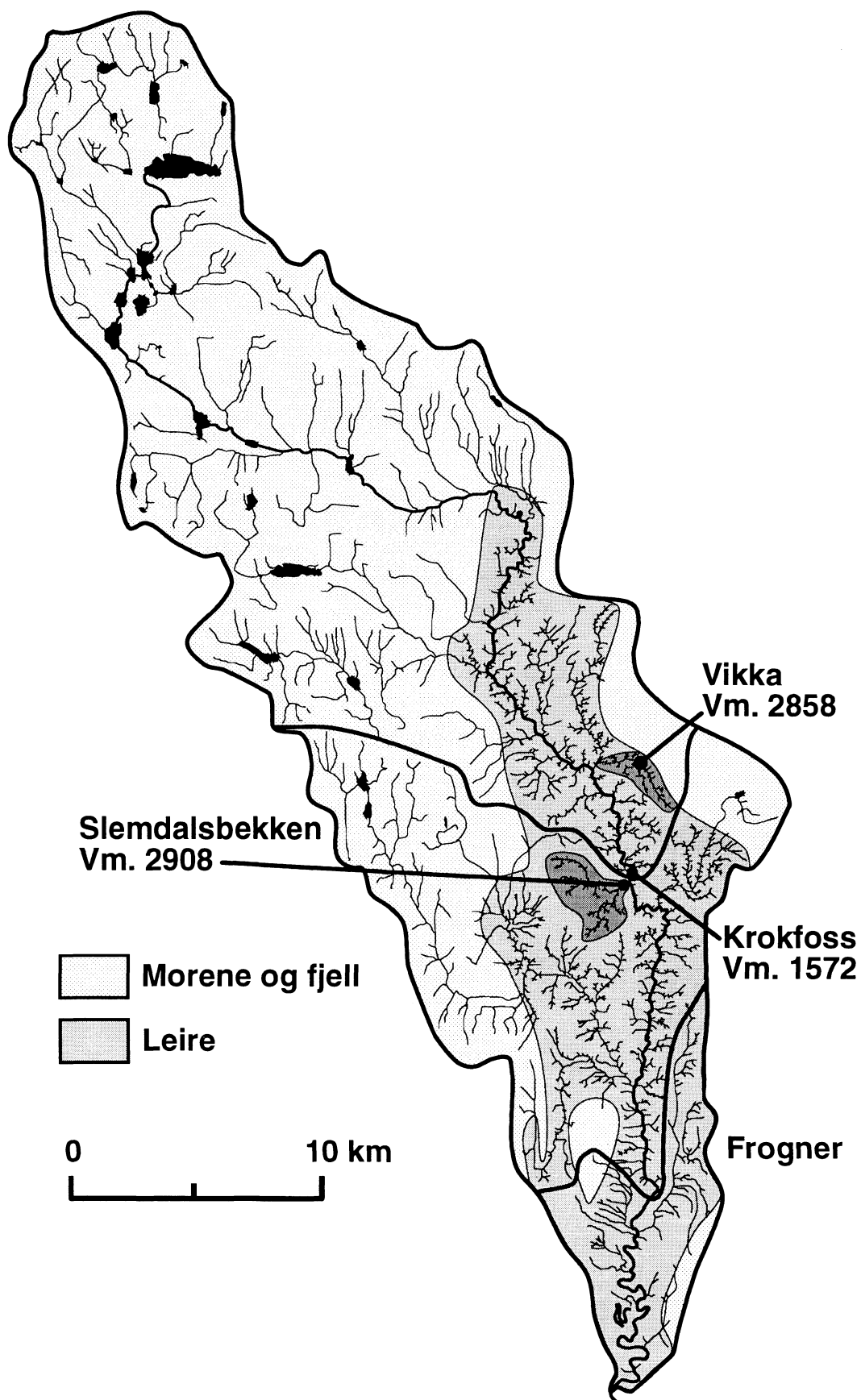
Det bunntransporterte materialet i Leira består for det meste av sandfraksjoner. En dominerende del av sanden kommer fra grunnvannsraviner langs Gardermoplatået og føres ut i Leira gjennom tilløpet Songna.

3.1 MÅLEMETODIKK OG MÅLEINSTALLASJONER

Målestasjonene for sedimenttransport skal kunne bidra til å tallfeste hvor store materialmengder som tilføres fra de forskjellige sedimentkilder og bringes i transport.

I feltundersøkelser ble det etterhvert klarlagt at det er flere ravinetyper i Leiras nedbørfelt. Det ble derfor valgt ut to raviner hvor det ble opprettet målestasjoner (fig. 9). Stasjonen i Vikka skal måle erosjonsintensiteten i en ravine der materialtilførselen fra jordsig er dominerende. Stasjonen i Slemdalsbekken måler aktiviteten i en ravine der skredaktiviteten er høy.

Ved Krokfoss måles transporten i Leiras hovedløp. For å dekke større deler av feltet hadde det vært ønskelig med en stasjon lenger ned i feltet, ved Leirsund eller Frogner. Dette var imidlertid vanskelig av måletekniske grunner.



Figur 9: Målestasjoner for sedimenttransport i Leira, Vikka og Slemdalsbekken. Leirområder med grå skraver.

Målestasjonene er etablert i henhold til prosedyrer beskrevet av Bogen (1986, 1988) og Bogen og Sandersen (1991). Store kortvarige og sesongmessige variasjoner i konsentrasjonen av suspendert materiale gjør det nødvendig med hyppig prøvetaking. Det benyttes derfor automatiske vannprøvetakere som programmeres til å ta 2-4 prøver pr døgn gjennom hele sesongen. Avbrudd i måleseriene har blitt estimert ved hjelp av sedimentføringskurver (se appendiks 1).

Måleperiodene for sedimenttransport er avhengig av isforholdene i elva. Målesystemene tåler ikke lengre perioder med frost. I vintermånedene har det derfor vært visse brudd i måleseriene.

3.2 AVLØPET VED KROKFOSS

Det skilles i denne undersøkelsen mellom nedbørfeltens totale areal, og det arealet under marin grense som er dekket av leire, (tabell 2). Det totale areal er bestemmende for avløpet. Erosjonsintensiteten som er sedimentproduksjon pr flateenhet og tid, er størst i leirområdene. Utenfor leirområdene er sedimentproduksjonen av neglisjerbar størrelse.

Døgnlige middelvannføringer ved Vm 1572 Krokfoss i 1990 er opptegnet sammen med middelerdi og ekstremverdier for perioden 1966 - 1990 i fig.10. Normalt inntreffer de største smeltevannsflommene i månedene april og mai med tyngdepunktet i mai måned. De høyeste vannføringene opptrer under nedbørflommer på sensommer og høst.

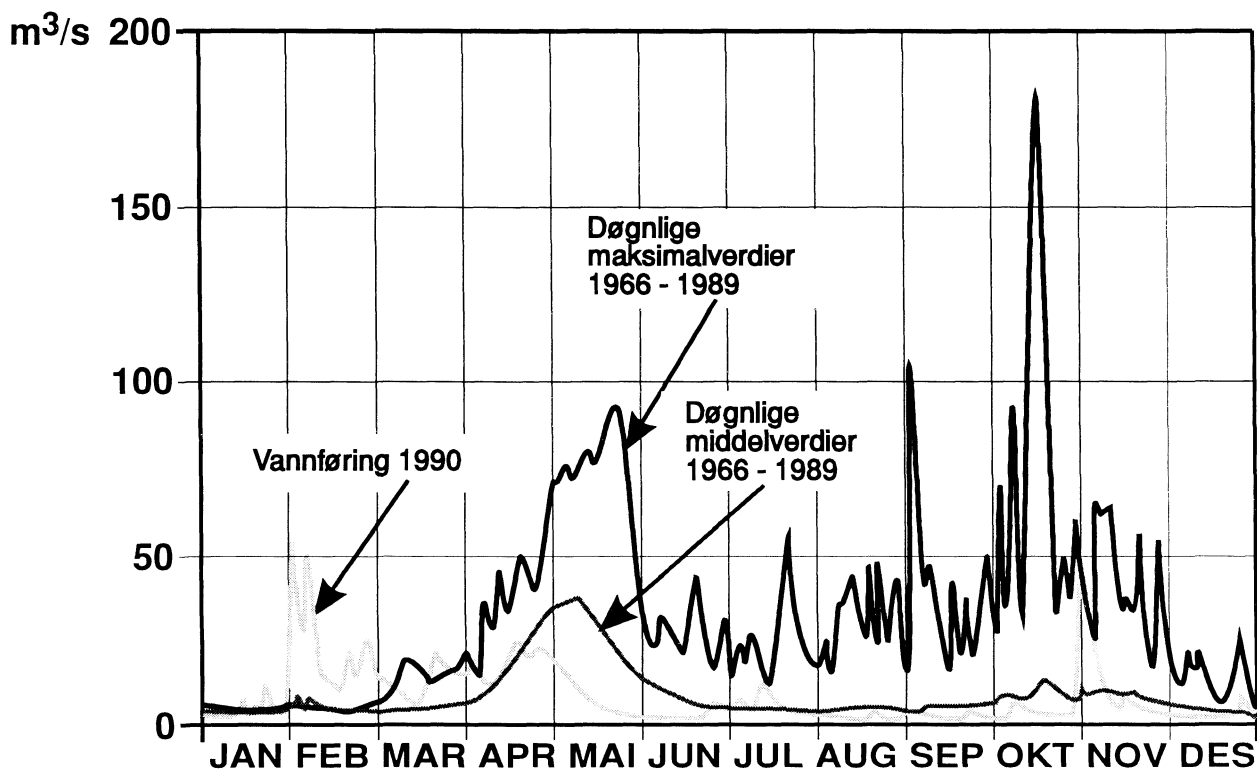
Tabell 2: Arealer av nedbørfelt som drenerer til målestasjoner.

Areal km2			
Stasjon:	totalt	leire - områder	intensiv jordbruk
2868 Vikka	5	3.6	2
2906 Slemdals- bekken	4.8	4.8	2.8
1572 Krokfoss	418	180	50
Frogner	620	340	100

Den sesongmessige fordelingen av avløpet i perioden med sedimenttransportmålinger 1989 - 1992 skiller seg fra perioden 1966 - 89. I 1990 inntraff flommer i januar - februar. Flommer på denne tiden er også atypisk for lavlandsområdene på Østlandet. I 1991 og 1992 er vannføringen under flommer i november høyere enn de pleier å være på denne tiden av året.

I 1989 var totalavløpet under gjennomsnittet for perioden 1966-1989. Med unntak av august ligger vannføringene i perioden 2. juni til 15. november da suspensjonstransporten ble målt, nær minimum av hva som er observert i 25-års perioden.

Vinterflommen i dagene 31. januar - 8. februar 1990 hadde to maksima; henholdsvis 1. februar med $Q_{maks} = 57 \text{ m}^3/\text{s}$ og 7. februar med $Q_{maks} = 74 \text{ m}^3/\text{s}$. Døgnlige middelvannføring var imidlertid høyest under den første av de to flomtoppene. Målingene kom i gang etter at første flomtopp hadde kulminert. Maksimal vannføring under flommen 19. - 28. februar var $32 \text{ m}^3/\text{s}$. På grunnvannsstasjon 6052-85 Nordmoen var teledypet 55 cm under vinterflommen og overflateavrenning var utbredt. Under flommen i slutten av februar var teledypet 5 cm. Sannsynligvis vil det forekomme infiltrasjon av overflatevann når teledypet er så tynt.



Figur 10: Døgnmiddelvannføringer ved Krokfoss i 1990 sammenlignet med middelvannføringer og maksimalvannføringer for perioden 1966-1989.

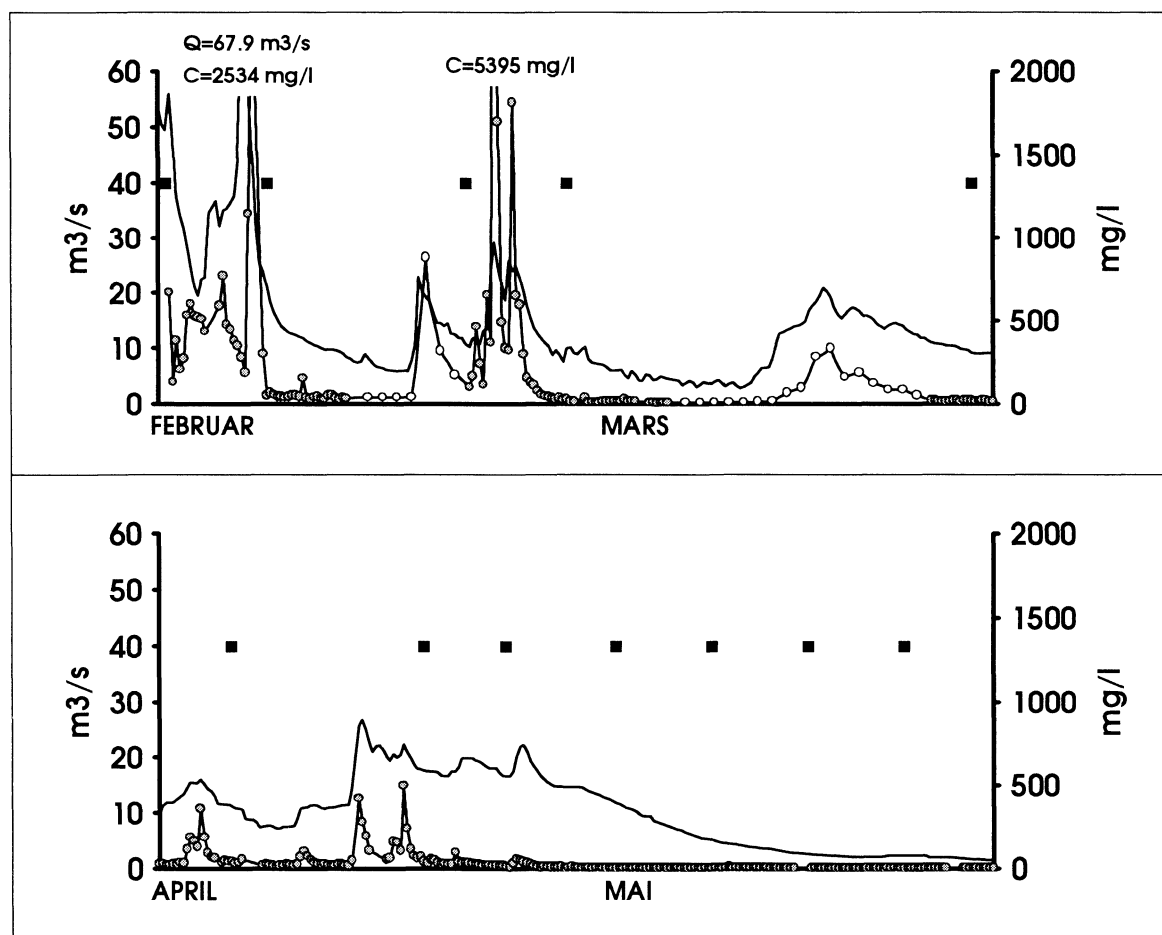
3.3 KONSENTRASJON AV MINEROGENT SUSPENSJONSMATERIALE VED KROKFOSS.

De maksimale konsentrasjonene som er målt ved Krokfoss er 5 395 mg/l. Konsentrasjonen overstiger imidlertid 200 mg/l bare i tilknytning til sterk stigning i vannføring og spesielle episoder, for eksempel skred og utglidninger i nedbørfeltet.

Generelt medfører økning i vannføring høyere konsentrasjon av suspendert materiale. Hvor høy konsentrasjonen er i forhold til vannføringens størrelse varierer imidlertid mye. I tillegg til vannføring vil en rekke parametere av varierende betydning gjennom året bestemme sedimentkonsentrasjonens størrelse. Sedimentmengde lagret i løpet ved lav vannføring, klimatiske faktorer, tele og vegetasjonsforhold, skred og utrasninger er viktige faktorer. Forløpet av konsentrasjon og vannføring i observasjonssesongen i 1990 er vist som et eksempel i fig 11. Nedbørflommen tidlig i februar i 1990 ga stor overflateavrenning mens det ennå var dyp tele i jorda. Under flommen i slutten av februar var teleløsningen kommet langt, og det var et relativt tykt aktivt lag. Selv om denne flommen var langt mindre, var de registrerte konsentrasjonene over dobbelt så høye som under vinterflommen.

Under flomperiodene i mars-april 1990 var sedimentkonsentrasjonen maksimalt 500 mg/l. Etter de første flomtoppene stabiliserte sedimentkonsentrasjonen i slutten av april seg på et jevnt lavt nivå mindre enn 10 mg/l. Selv ved relativt høye vannføringer i overgangen april-mai gikk ikke konsentrasjonen opp.

Det samme mønsteret gjentar seg i 1991. Konsentrasjonene er forholdsvis høye og går opp i 2 000 mg/l under første fase av vårflommen i april. I 1992 er konsentrasjonene under vårflommen enda høyere. Under smelteflommen i slutten av mars er maksimalkonsentrasjonen 6 000 mg/l. I midten av juni i 1991 ble det registrert en uventet høy puls med sedimenter som sannsynligvis er forårsaket av en større utrasning oppstrøms Krokfoss. Midt i en lengre stabil lavvannsperiode ($Q = 1-2 \text{ m}^3/\text{s}$) økte konsentrasjonen raskt fra ca. 3 mg/l til over 850 mg/l, dvs. til høyere nivå enn under den første vinterflommen og under vårflommene i mars-april. Deretter falt konsentrasjonen igjen nesten mot normalt nivå, før en rask men relativt liten økning i vannføring igjen ga en tilsvarende puls med høy sedimentkonsentrasjon. Forløpet kan svare til at massene transporteres ut de neste dagene før det igjen oppstår en stabil situasjon. Ved neste mindre økning i vannføring eroderes de resterende massene i løpet, og konsentrasjonen øker til samme høye nivå.



Figur 11: Konsentrasjon av suspendert materiale (sirkler) og vannføring (heltrukken linje) ved Krokfoss 1990. Lukkede rektangler: tidspunkt for kornfordelingsprøver februar-mai.

Jordskred ut i elveløpet har effekt over tid. Selv om sedimenttransporten etterhvert stabiliseres på normalt nivå ved lav vannføring, vil økt vannføring gi fornyet erosjon i eventuelle gjenværende rasmasser i og langs løpet. Hvor omfattende langtidsvirkningen er, vil bl.a. være avhengig av vannføring, erosjonsintensitet og skredets størrelse. En måned etter utrasningen synes effekten av dette skredet å være borte.

3.4 SUSPENSJONSTRANSPORTEN VED KROKFOSS

En sammenstilling av målingene av suspensjonstransporten ved Krokfoss for alle år med observasjoner er vist i fig 12. Målingene ble igangsatt den 2. juni, altså etter vårflommen

i 1989. Forsommeren var svært tørr i 1989 og flommer av betydning opptrer ikke før i november. Total suspensjonstransport innenfor perioden 2. juni -14. november ble målt til 3 136 tonn. Nå var vårflommen av en viss størrelse i 1989. Anvendelse av sedimentføringskurver til å estimere årstransporten gir en årstransport på 15 871 tonn.

I perioden 2.februar - 2.november 1990 ble det transportert 33 436 tonn materiale i suspensjon i Leira ved Krokfoss. Sedimentregistreringene i 1990 startet etter vinterflommens første flomtopp. Antas suspensjonstransporten å være like stor under de to flomtoppene, gir dette et årlig transportvolum på 39 436 tonn. Ca. 80% av dette ble transportert i februar måned.

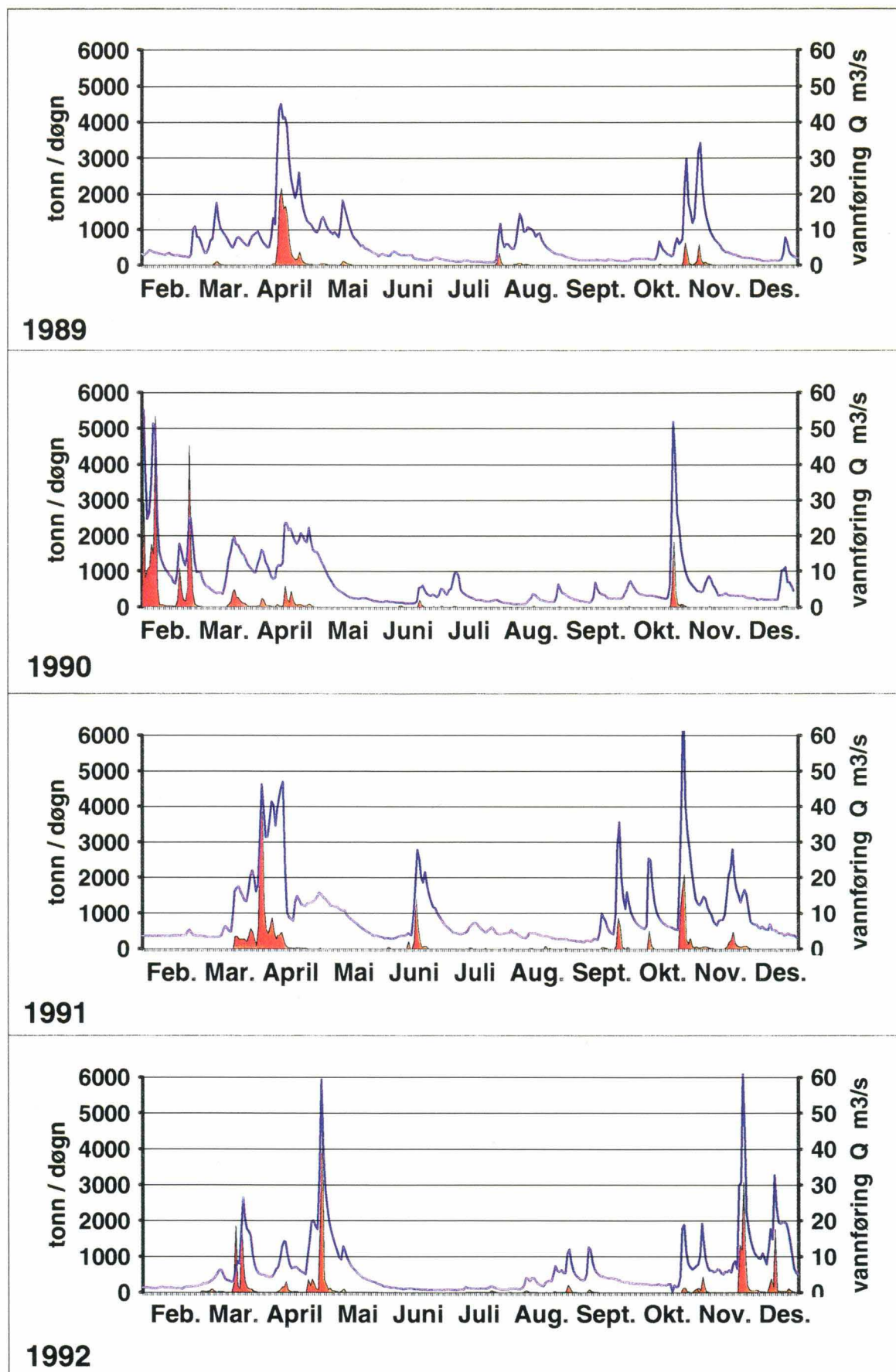
I 1991 var det ingen utpregede vinterflommer i januar - februar. Over halvparten av årets transport ble ført ut av feltet under en snøsmelteflom i begynnelsen av april. Til tross for høye vannføringer i november så nådde ikke transporten opp mot samme nivå som tidligere på året.

I 1992 var materialføringen stor under flommer i mars og april. Under sommer og høst var det forholdsvis liten transport, men i november og desember var det igjen vannføringer av betydelig størrelse. Totaltallet for året ble dermed 28 683 tonn, se tabell 4, side 34.

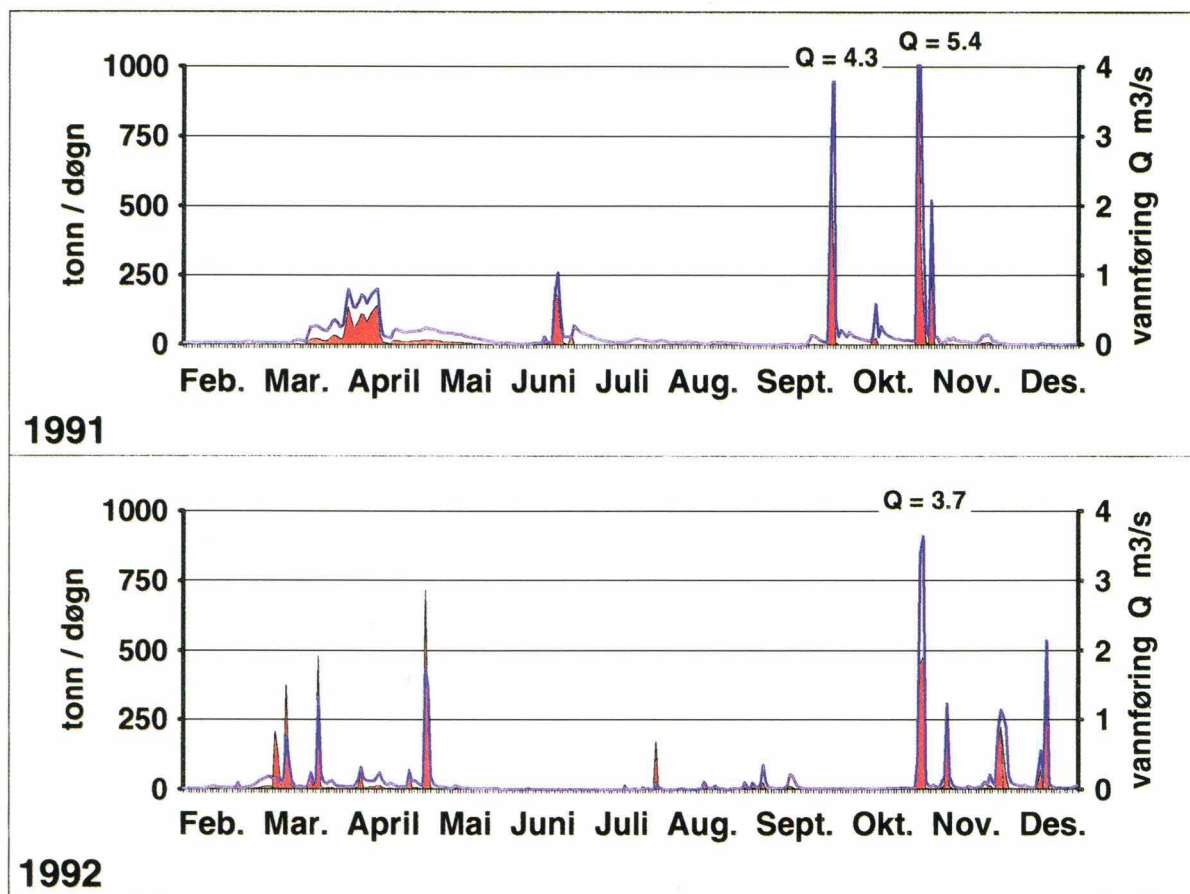
3.5 SUSPENSJONSTRANSPORTEN I SLEMDALSBEKKEN

Målinger og undersøkelser i de første fasene av dette prosjektet viste stor forskjell på erosjonsintensiteten i forskjellige ravineområder i Leira. Slemdalsbekken ble valgt ut som en ravine som er representativ for et område med høy erosjonsintensitet. Det ble derfor opprettet en målestasjon som kom i drift i juni 1991.

I Slemdalsbekken tilføres materiale til elveløpet hovedsakelig fra skred og utglidninger. Suspensjonstransporten blir dermed ikke direkte avhengig av vannføringen. Materiale kan tilføres elveløpet selv under situasjoner hvor vannføringen er svært lav.



Figur 12: Vannføring og suspensjonstransport ved målestasjonen ved Krokfoss i Leira i årene 1989-1992.



Figur 13: Vannføring og suspensjonstransport i Slemdalsbekken i 1991 og 1992.

I perioden juni - oktober 1991 ble det transportert 3 600 tonn suspendert materiale (fig. 13). Siden stasjonen kom i gang så sent, ble vannføringen i månedene før målingene startet, beregnet ut fra en korrelasjon med Krokfoss. Suspensjonstransporten ble estimert ved hjelp av en sedimentføringskurve som ble konstruert for perioden med målinger. Ved etablering av en kurve, ble det bare benyttet måledata for vannføringer over 10 l/s. Kurven gir en suspensjonstransport i vårflommen på 1 972 tonn. Dette gir en totaltransport på 5 572 tonn i Slemdalsbekken i 1991.

I perioden mars - oktober 1992 ble det transportert 3 142 tonn. Imidlertid forekom det en stor flom i november. Årstransporten ble derfor på 5 289 tonn som gir en erosjonsintensitet på 1 131 tonn/km² år i middel. Se tabell 4, side 34.

3.6 SUSPENSJONSTRANSPORTEN I VIKKA

Suspensjonstransporten i Vikka i årene 1989 - 1992 er vist i fig 14. Målestasjonen kom i gang sent på høsten i 1989 og registrerte transporten under en flomsituasjon i november. Første delen av året er estimert med sedimentføringskurver.

I observasjonsperioden 20. april - 21. oktober i 1990 transporteres 109 tonn minerogent materiale i suspensjon i Vikka. Mer enn halvparten av det totale volum ble transportert første måleuka da sedimentkonsentrasjonene i Vikka var spesielt høye, og hele 22 tonn det ene døgnet da konsentrasjonen av suspendert materiale var på sitt høyeste. Avleiringer av flomsedimenter på elvesletten viste at suspensjonstransporten må ha vært betydelig under vinterflommen. Et estimat ved hjelp av en sedimentføringskurve ga en total årstransport på 313 tonn. Dette er antagelig et minimumsestimat.

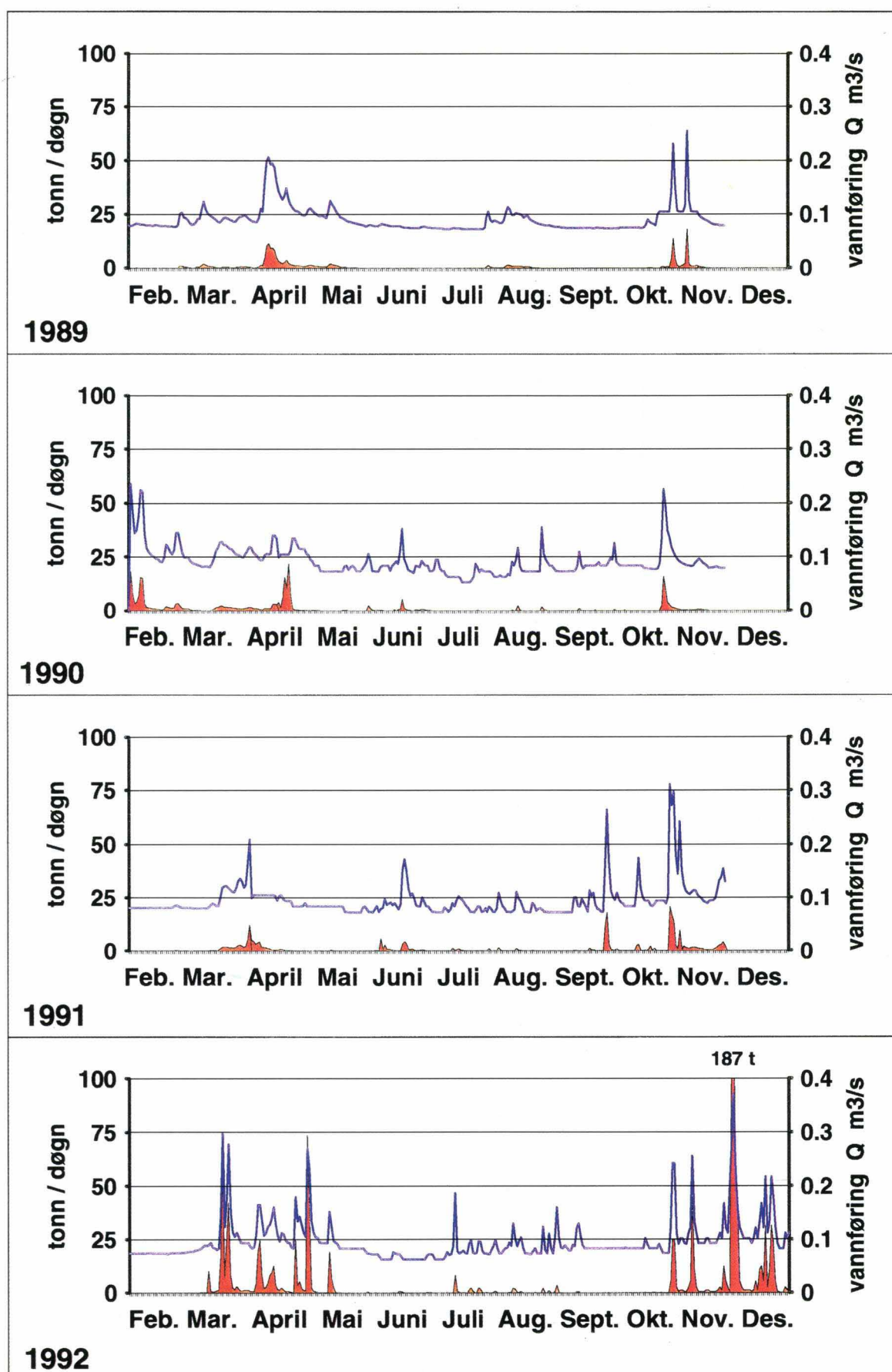
I 1991 foregår den største transporten i tilknytning til høstflommer. Transporten under vårflommen var ikke spesielt stor og årstransporten på 278 tonn blir liggende under verdien for 1990.

Transporten i Vikka i 1992 var betydelig høyere enn de tidligere år. Dette har sammenheng med høye konsentrasjoner 2 000-4 500 mg/l under en rekke vannføringstopper i perioden 15. april - 25. mai og november og desember. Totalt ble årstransporten 1 215 tonn som er betydelig høyere enn tidligere år. Midlere erosjonsintensitet blir 141 tonn/km² år.

3.7 SUSPENSJONSTRANSPORTEN VED FROGNER

Suspensjonstransporten ved Frogner er målt av ANØ fra begynnelsen av 80-årene. Målingene er rettet mot å analysere fosfortransport. De er ikke basert på den samme metodikk som NVEs måleprogrammer. Dette må tas i betraktning ved en sammenlikning av måleresultater fra de forskjellige stasjonene.

Målingene viser en transport som varierer fra 125 595 tonn i maksimumsåret 1983 til 36 360 tonn i minimumsåret 1989.



Figur 14: Vannføring og suspensjonstransport i Vikka i årene 1989-1992.

År	Obs dager	Fosfor tonn	Suspendert tonn	Organisk tonn	Nitrogen tonn	Vannmengde mill m3
1983	50	113	125595	3300		351
1984	51	69	46901	2189		392
1985	32	109	70643	2503		435
1986	48	108	92166	2130		374
1987	39	86	64766	2863	582	511
1988	37	124	99118	2590	459	468
1989	43	43	36360	1076	326	245
1990	52	64	63716	1305	353	304
1991	52	67	66000		670	496
1992	52	73	65000		550	314
Middel		86	73027	2245	294	389

Tabell 3: Årlige tall for suspensjonstransport ved Frogner i Leira. Data fra ANØ.

Midlet for alle år er 73 027 tonn (tabell 3). Dette tilsvarer en midlere erosjonsintensitet i leirterrenget ovenfor på 215 tonn/km² år.

3.8 SAMMENSTILLING AV MÅLERESULTATENE I FORSKJELLIGE DELFELT

Kompletterte målinger for de forskjellige årene og middeltall for alle år er sammenstilt for målestasjonene Krokfoss, Slemdalsbekken og Vikka i tabell 4.

Erosjonsintensiteten varierer mye fra år til år. Variasjonene har sammenheng med flomhyppighet og avrenningsforløp og en rekke andre forhold som innvirker på materialets tilgjengelighet for transport. Måleseriene er for korte til å dekke alle situasjoner, men de gir en indikasjon på hvordan erosjonsintensiteten varierer i de ulike deler av nedbørfeltet.

	År	1989 tonn	1990 tonn	1991 tonn	1992 tonn	Gsv middel tonn	midlere erosjonsintensitet tonn / år / km ²
Krokfoss	målt	3136	33436	30400	27750		
	komplettert	15871	39751	31600	28683	28976	161
Slemdals- bekken	målt			3600	3142		
	komplettert			5572	5289	5431	1131
Vikka	målt	55	109	195	528		
	komplettert	223	313	278	1215	507	141

Tabell 4: Suspensjonstransport og erosjonsintensitet i forskjellige delfelt.

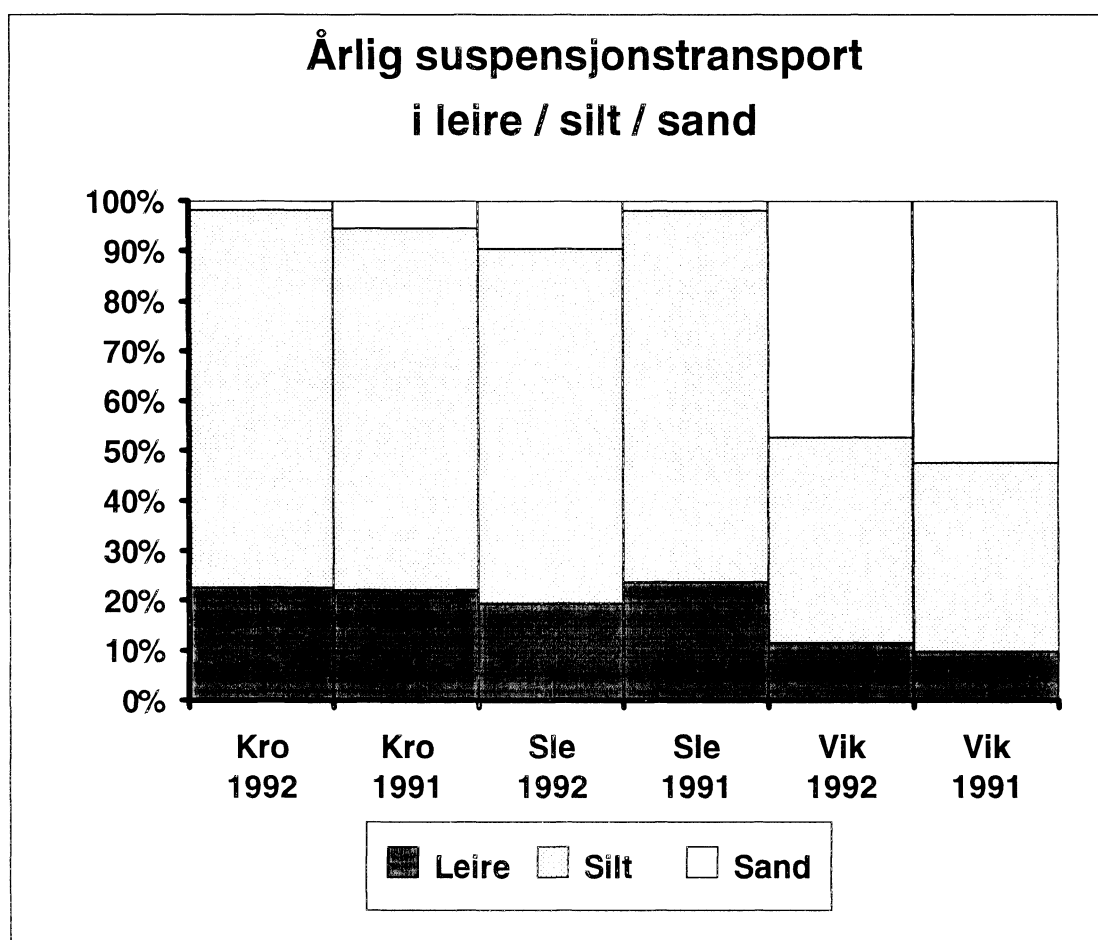
Den dominerende naturlige erosjonsprosessen i Vikka er jordsig i kombinasjon med lateral løpserosjon. Denne prosessen gir en midlere erosjonsintensitet på 141 tonn/km² år og er av forholdsvis moderat intensitet i forhold til den typen raviner som er dominerende i Slemdalsbekkens nedbørfelt. I Slemdalsbekken har en eller flere store flommer forårsaket en senking av erosjonsbasis og medført skred og utglidninger, slik at erosjonsintensiteten blir på hele 1 131 tonn/km² år.

I delfeltet Frogner - Krokfoss kan det på grunnlag av data i tabell 3 beregnes en erosjonsintensitet på 215 t/km² år. Den er større enn i leirområdet ovenfor Krokfoss (161 tonn/km² år). Nedenfor Krokfoss er det et større innslag av instabile skredraviner av Slemdalsbekkens type.

3.9 SUSPENSJONSMATERIALETS KORNFORDELING

På alle tre målestasjonene har det vært innsamlet prøver hver uke for analyse av kornfordeling. En oversikt over kornfordelingen på de forskjellige stasjonene er vist i tabell- og histogramform i fig 15. Kornfordelingen på årlig transport er fremkommet ved at materialtransporten innenfor hver fraksjon er beregnet. Hver kornfordelingsprøve regnes da som representativ for en uke. Materialtransportens størrelse i noen perioder har dermed stor betydning.

Stasjon / %	Leire	Silt	Sand
Kro 1992	22.8	75.4	1.8
Kro 1991	22.2	72.3	5.5
Sle 1992	19.4	71.1	9.5
Sle 1991	23.7	74.4	1.9
Vik 1992	11.6	41.2	47.2
Vik 1991	9.9	37.8	52.4



Figur 15: Suspensjonstransportens fordeling i kornfraksjonene sand, silt og leire i Leira-vassdraget ved Krokfoss, og i ravineområdene Vikka og Slemdalsbekken.

Det er stor forskjell mellom Vikka og de andre stasjonene med hensyn til kornfordeling. I Vikka var de 52,4 % sandfraksjoner i 1991 og 47,2 % i 1992. Vikka og de andre ravinene langs Gardermoplatået ender opp i tilbakeskridende grunnvannsraviner med steile brattkanter i sand. Mye av sanden i elveløpet kommer fra disse ravinene.

I Slemdalsbekken finnes ikke tilsvarende forhold. Nedbørfeltet ligger hovedsakelig i leire og silt med bare små islett av sand. Sandinnholdet overstiger derfor ikke 10% i Slemdalsbekken.

Ved Krokfoss er sandinnholdet enda lavere, maksimalt 5,5 % i 1991.

Suspensjonsmaterialets sammensetning er bestemt av tilførselen fra alle de mindre delfeltene oppstrøms Krokfoss. Mange av disse likner Vikka og Slemdalsbekken. Det er derfor sannsynlig at en overveiende del av sanden kommer fra brattkantene langs Gardermo-plataet.

Det er funnet at kornfordelingen på suspensjonsmaterialet ved Krokfoss endrer seg sterkt gjennom sesongen (Bogen 1992). Dette tyder på at ikke alle sedimentkilder er aktive under en og samme flomtilstand. Vinterflommen i 1990 ga forholdsvis mye sand, opptil 10 - 12 %. Vårflommene gir ofte finfordelt materiale med mye leire og silt og bare 1 - 2 % sand. Regnflommer om høsten gir som regel mer sand.

3.10 FOSFORTRANSPORT OG ALGETILGJENGELIGHET

Marin leire har et naturlig fosforinnhold. Det ble i løpet av 1989 tatt opp 25 prøver fra i alt 6 borhull ned til omlag 3,5 m dybde i Leiras nedbørfelt, og disse ble undersøkt ved Geologisk Institutt, Universitetet i Oslo med hensyn til fosforinnhold og bindingsformer. Fosforkonsentrasjoner ble funnet i området 0,08-0,11% angitt som rent fosfor. En vesentlig del av fosforet er bundet til hydroksyder samt oksyder av jern og aluminium.

Ved fluvial erosjon i den naturlige leira, vil fosfor kunne settes i transport. Tidligere undersøkelser har vist at det aller meste av transporten skjer i bundet form ved at fosforet er knyttet til leirmineralene som går i suspensjon (Brynildsen, 1985 og Krogstad, 1986). Dette gir seg til kjenne ved at sammenhengen mellom konsentrasjonen av total fosfortransport og suspendert minerogent materiale viser en høy korrelasjon.

De aller fleste undersøkelser foretatt i vassdragene på Romerike viser at mengden av fosfor vanligvis ligger i området 0,08-0,12% av suspensjonstransporten. Den gjennomsnittlige suspensjonstransporten pr. år ved Frogner er rundt 75 000 tonn, og dette betyr at den totale transporten av partikkelbundet fosfor i gjennomsnitt utgjør omtrent 75 tonn pr. år.

For å se nærmere på algetilgjengeligheten ble det i løpet av 1990 boret 28 nye hull, og det ble tatt prøver for hver 20 cm ned til ca. 3,5 m dybde. Disse ble sendt Institutt for Jordfag, Norges Landbrukshøgskole for analyse, og resultatene er beskrevet av Krogstad og Løvstad (1990).

Undersøkelsene viste at andelen av biotilgjengelig fosfor i prosent av totalfosfor varierte sterkt, fra 5 til 85%.

Det alt vesentligste av suspensjonstransporten foregår utenom perioden for den mest aktive perioden for algeoppblomstring i juni og juli. Det er knyttet usikkerhet til hvorvidt sedimentert suspensjonmateriale kan utnyttes av alger ved senere anledninger. Det er kjent at bunnsedimentene i grunne innsjøer kan virvles opp i forbindelse med sterk vind med bølgedannelse og i flomperioder. Skarbøvik (1993) fant at det ble avsatt store mengder fosfor i elveløpet mellom Leirsund og Borgen i sommermånedene. Oppstuvning av Leiravannet som følge av høy vannstand i Øyeren er antatt å være årsaken. Gjennomsnittlig fosforinnhold var 650 µg/g i de sedimenterte prøvene. Det meste av dette materialet føres sannsynligvis ut i Øyeren eller Svellet i flomperioder eller når vannstanden synker og strømhastigheten øker.

4. BEREGNING AV SEDIMENTBUDSJETTET

Sedimenttransporten, G_{sv} ved en målestasjon kan skrives som en sum av bidraget fra de forskjellige erosjonsprosessene innenfor nedbørfeltet.

$$(3) \quad G_{sv} = G_j + G_r$$

G_j står for erosjonsmaterialet fra jordbruksområdene, G_r er en samling av materialet som kommer fra naturlige prosesser i ravineområdene og fra erosjon langs elve- og bekkeløp. Med "naturlig" menes her at prosessene ikke er direkte forårsaket av menneskelig virksomhet. Det er imidlertid sannsynlig at avrenning fra f.eks. bakkeplanering, kunstig drenering og liknende indirekte kan forårsake økt erosjon i ravineområdet.

G_r kan deles inn ytterligere i mange forskjellige prosesser.

$$(4) \quad G_r = G_v + G_{skr} + G_g + G_e$$

Der G_v er vertikal løpserosjon, G_e er lateral løpserosjon, G_{skr} er erosjon i skredmasser i løpet og G_g er grunnvannserosjon. Sedimentbudsjettet ved en målestasjon bestemmes ved å beregne eller anslå størrelsen på hvert ledd i likningen.

4.1 VIKKAS SEDIMENTBUDSJETT

4.1.1 Bidrag fra naturlige erosjonsprosesser

Et fellestrekk for sidebekkene i Vikkas nedbørfelt er at skråningene ned mot bekkene er bratte, og at vegetasjonen indikerer aktivt bakkesig. Det er derfor grunn til å tro at lateral løpserosjon for opprettholdelse av tverrsnittet er virksom langs mesteparten av løpsnettets. Benytter vi beregningsgrunnlaget som angitt av Bogen og Sandersen (1991) får vi at lateral løpserosjon som følge av bakkesig i Vikkas nedbørfelt utgjør rundt 75 tonn pr. år.

Langs sidebekkene som drenerer ut fra Gardermo-platået er det flere raviner som viser tegn på intensiv vertikal løpserosjon. Dette ble tydelig demonstrert ved at det i noen av disse ravinene ble observert en markert knekk i løpets lengdeprofil med vertikal høydeforskjell på 1-2 m. Det synes helt klart at erosjonen vil fortsette oppstrøms de

nærmeste årene. Også ravinene på sørsida av Vikka viser tegn på vertikal løpserosjon, men prosessene her er mindre aktive enn på nordsida. Vikka er dekket av et tykt sandlag i bunnen, og det antas ikke å være noen bunnsenkning under normale vannføringsforhold.

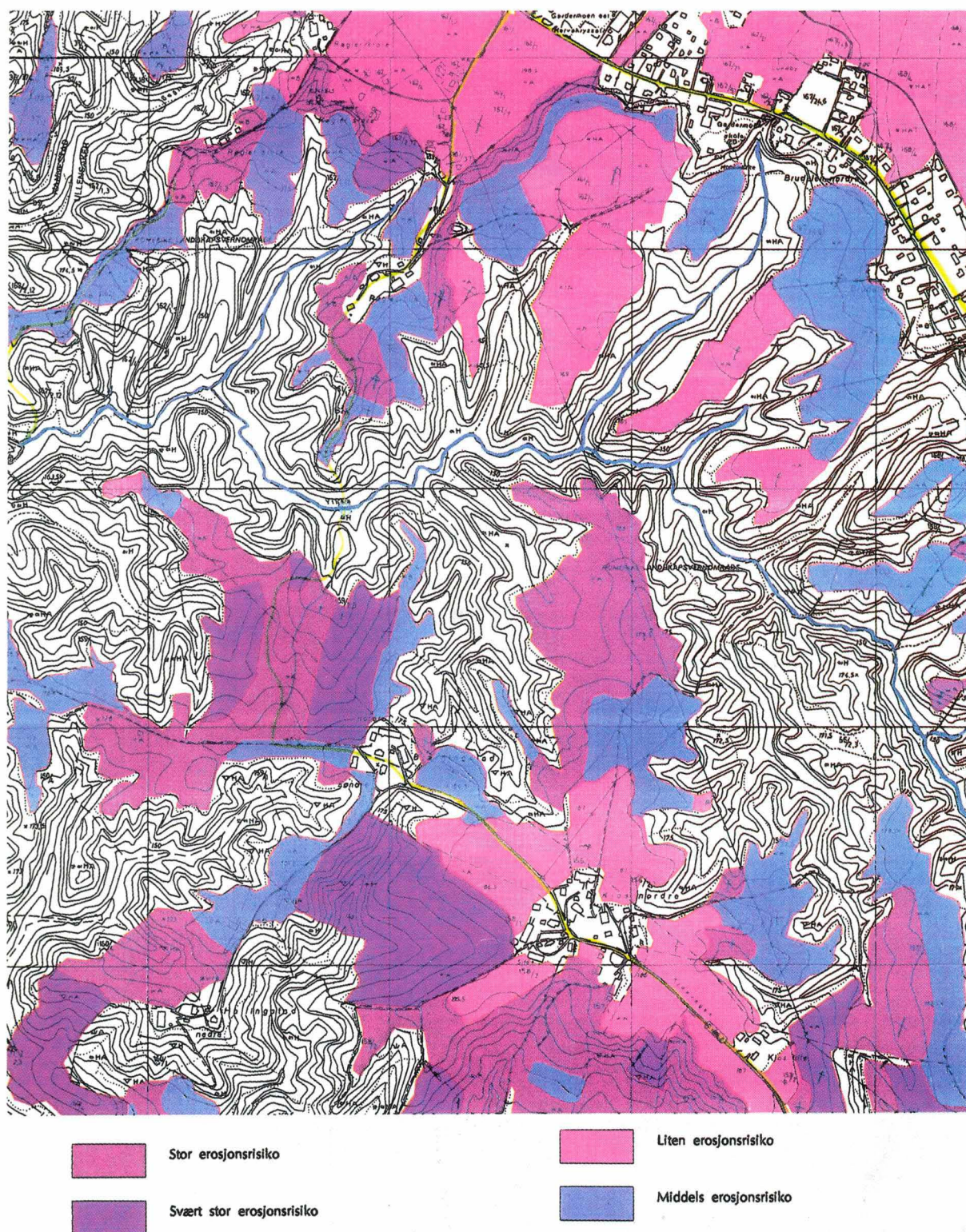
Ved å måle lengden på strekninger med ulik erosjonsgrad, og ved å anta at den gjennomsnittlige bredden på løpet i sidebekkene er 0,5 m, får vi et totalt årlig bidrag fra den vertikale løpserosjonen på 25 tonn (Bogen og Sandersen, 1991)

I den mest aktive ravinen var det også flere tildels store overflate-utglidninger (tilsammen ca. 100 m³) som er et resultat av undergraving av skråningsfoten (fig.38). Det årlige bidraget (nye skred pluss erosjon i skredmasser som er avlagret i løpet) fra disse kildene er anslått til i gjennomsnitt omtrent 25 tonn pr. år, herav utgjør erosjon som følge av overflateavrenning i skredsårene ca. 5 tonn. I tillegg er det 3 punktkilder i yttersvinger langs hovedløpet. Det årlige bidraget fra disse utgjør anslagsvis rundt 10 tonn i året.

Vikka og andre raviner som grenser til Gardermoen-plataet ender opp i grunnvannsraviner. Grunnvannet i sandavsetningene kommer ut i en kildehorisont øverst i ravinene. Et høyt poretrykk i sandavsetningene opp mot en fri skråning gir dermed en instabil situasjon og brattkanten øverst i ravinene eroderes stadig bakover. En del av sanden som føres frem til målestasjonen kommer fra denne erosjonsprosessen. Sanden vandrer i løpene og blander seg imidlertid med andre avsetninger underveis. Den kan dermed ikke skilles direkte fra de andre komponentene i sedimentbudsjettet og vil inngå i løpserosjonen.

4.1.2 Bidraget fra jordbruksområdene

Arealet av fulldyrka områder ovenfor målestasjonen er beregnet til 1,95 km². NIJOS karter over erosjonsrisiko (Klakegg, 1992) viser at store deler av det oppdyrkede arealet har "liten" til "middels" erosjonsrisiko (fig. 16). Hvis vi regner med middeltall på klassene for erosjonsrisiko som henholdsvis 25, 125 og 500 tonn/km², så får vi en midlere erosjonsintensitet på 177 tonn/km². Dette gir en sedimenttilførsel fra jordbruksområdene på 345 tonn.



Figur 16: Utsnitt av erosjonsrisikokart for jordbruksarealene i Vikka ved målestasjonen. Målestokk 1:10 000. Kartfremstilling: Norsk Institutt for Jord og Skogkartlegging. (NIJOS)

Det er to aktive punktkilder i kanten av bakkeplanerte områder på nordsida av Bjørningstad gård i forbindelse med dårlig erosjonssikring av utløpet av grøftevann. Erosjonen fra disse kildene er estimert til å utgjøre ca. 20 tonn pr år under dagens forhold.

Ut fra de vurderinger som er gjort ovenfor, får vi et sedimentbudsjett som vist i tabell 5.

Tabell 5: Sedimentbudsjettet ved målestasjonen i Vikka.

Sedimentkilde	Erosjonsprosess	Årlig bidrag
Løpsmateriale	Bunnsenkning (vertikal løpserosjon)	25 tonn
	Graving i yttersving (lateral løpserosjon)	10 tonn
Skråningsmateriale	Skred/utglidninger fører til: Erosjon i skredmasser avlagret i løpet	20 tonn
	Bakkesig fører til: lateral løpserosjon for opprettholdelse av tverrprofil	75 tonn
	Erosjon av overflatevann i skredsår	5 tonn
Jordbruksområder	Erosjon av overflatevann	345 tonn
	Erosjon av grøftevann	20 tonn
Sum bidrag pr. år:		500 tonn

Ved målestasjonen ble suspensjonstransporten målt til 507 tonn i middel for årene 1989 - 1992. Summerer vi bidragene fra de naturlige erosjonsprosessene får vi 135 tonn pr. år, dvs. 30% av totaltransporten. Arealet av det naturlige leirlandskapet er beregnet til ca. 1,6 km². Dette gir en spesifikk sedimentproduksjon fra naturlige kilder på 84 tonn/km² år. Bogen og Sandersen (1991) beregnet bidraget fra de naturlige kildene til 41% av totalen. Avviket har sammenheng med at erosjonsrisikokartene gir en høyere erosjon i jordbruksområdene enn hva som ble lagt til grunn i 1991.

4.2 SLEMDALSBEKKENS SEDIMENTBUDSJETT

4.2.1 Bidrag fra de naturlige erosjonsprosessene

Erosjonsprosessene i Slemdalsbekkens nedbørfelt er langt mer intensive enn tilfellet er i Vikka. Under flommen 31. juli 1989 ble det målt en suspensjonskonsentrasjon på 35,9 g/l. Dette er den høyeste verdien som er målt i Norge, og den er 10 ganger høyere enn hva som ble målt i andre raviner i Leiras nedbørfelt. Store deler av løpsnettets gir inntrykk av å være helt ute av likevekt. Dette gir seg til kjenne ved at lange strekninger viser meget stor vertikal løpserosjon, noe som resulterer i ustabile skråninger med utglidninger.

Av praktiske hensyn ble målestasjonen for sedimenttransport etablert i tilknytning til riksveien. Dette feltet har et areal på 4,8 km². Bogen og Sandersen (1991) beregnet sedimentbudsjettet helt ned til Slemdalsbekkens innløp i Leira, som har et areal på 9 km². Sedimentbudsjettet for målestasjonen gir derfor noe avvikende resultater, men beregningsgrunnlaget er tilnærmet det samme.

Størstedelen av nedbørfeltet har bratte skråninger ned mot bekkeløpene med tydelige tegn på bakkesig. Lateral løpserosjon som følge av bakkesig er beregnet til å utgjøre ca. 200 tonn pr. år.

Det er få markerte svinger i løpsnettets, og dette fører til at omfanget av erosjon i yttersvingsbanker er begrenset. Totalt er bidraget fra denne kilden anslått til å være rundt 10 tonn pr. år.

Erosjon i skredmasser er av stor betydning i Slemdalsbekken. Det ble utløst 4 skred i løpet av et par måneders periode etter uværet i oktober 1987. Det største av disse skredene hadde et volum på nærmere 10 000 m³, og ut i fra rekkevidden av skredet må deler av skredmassene ha bestått av kvikkleire. Volumet av de tre andre skredene var rundt 1 000 m³ hver. Utløsende årsak til skredene antas å ha vært en kombinasjon av undergraving av skråningsfot og oppbygging av porevannstrykk. Bekken vil med årene grave seg nytt løp gjennom skredmassene, og i tillegg vil det i forbindelse med intense regnvær foregå erosjon som følge av overflateavrenning i skredsårene. Antakelig vil det årlige bidraget fra disse kildene utgjøre i gjennomsnitt ca. 250 m³ eller 500 tonn.

Ved siden av store skred har det blitt utløst en rekke mindre skred med volum 1 - 100 m³, spesielt på strekningene med kraftig løpserosjon. Utløsende årsak er både vertikal og lateral løpserosjon. På den mest aktive strekningen med lengde omtrent 1 km ble det observert skred på tilsammen minst 1 000 m³. Det er vanskelig å gi noe sikker verdi på det årlige bidraget fra disse kildene, men trolig er det snakk om minst 1 000 m³ eller 2 000 tonn pr. år i gjennomsnitt.

Av totalbidraget fra erosjon i skredmasser på 2 500 tonn pr. år har vi anslått at erosjon av overflatevann i skredsårene utgjør omtrent 100 tonn pr. år. Bunnsenkningen er estimert til å utgjøre ca. 280 tonn/år (Bogen og Sandersen, 1991).

4.2.2 Bidraget fra jordbruksområdene

Arealet av fulldyrkede områder frem til målestasjonen er beregnet til ca. 2,8 km². Det har foregått langt mer omfattende bakkeplanering i Slemdalsbekkens nedbørfelt enn tilfellet er i Vikka. Erosjonsrisikokartene fra NIJOS viser også at bidraget fra jordbruks-områdene er høyere i Slemdalsbekken. Ved å sette middeltall for klassene slik vi har gjort for Vikka, får vi en gjennomsnittlig verdi på 380 tonn/km² for jordbruksområdene i Vikka som drenerer til målestasjonen. Erosjon som følge av overflateavrenning utgjør dermed ca. 1 060 tonn pr. år. Det ble også observert noen få mindre kilder i forbindelse med dårlig erosjonssikring av drensutløp fra bakkeplanerte områder. Bidraget fra disse kildene er grovt anslått til ca. 10 tonn pr. år.

Summerer vi bidraget fra de ulike sedimentkildene får vi en fordeling av sedimentbudsjettet for Slemdalsbekken som vist i tabell 6.

Arealet av nedbørfeltet ned til målestasjonen er beregnet til ca. 4,8 km². Av dette utgjør jordbruksområdene 2,8 km², dvs. at det naturlige leirlandskapet har et areal på rundt 2 km². Totalt bidrar de naturlige sedimentkildene med ca. 3 000 tonn/år, dvs. 75% av totaltransporten. Dette gir en spesifikk sedimentproduksjon fra naturlige kilder på 1 500 tonn/km² år. Sedimenttransportmålingene i 1991 og 1992 ga et middeltall for totaltransporten på 5 431 tonn. Dette gir en erosjonsintensitet på 2 180 tonn/km² år fra naturlige kilder. Bidraget fra de naturlige kildene utgjør etter dette hele 80% av totaltransporten. Avviket fra overslaget skyldes sannsynligvis at skredvolumene er satt for lavt. En svært høy erosjonsintensitet i denne typen raviner er imidlertid ikke usannsynlig. NVE har i 1992 gjennomført målinger av sedimenttransporten fra et liknende felt i

Gråelva i Trøndelag. De foreløpelige resultatene gir en erosjonsintensitet på hele 7 750 tonn/km² år.

Tabell 6: Sedimentbudsjettet ved målestasjonen i Slemdalsbekken.

Sedimentkilde	Erosjonsprosess	Årlig bidrag
Løpsmateriale	Bunnsenkning (vertikal løpserosjon)	280 tonn
	Graving i yttersving (lateral løpserosjon)	10 tonn
Skråningsmateriale	Skred/utglidninger fører til: Erosjon i skredmasser avlagret i løpet	2400 tonn
	Bakkesig fører til: lateral løpserosjon for opprettholdelse av tverrprofil	200 tonn
	Erosjon av overflatevann i skredsår	100 tonn
Jordbruksområder	Erosjon av overflatevann	1060 tonn
	Erosjon av grøftevann	10 tonn
Sum bidrag pr. år:		4060 tonn

4.3 SEDIMENTBUDSJETTET I LEIRA

4.3.1 Bidraget fra naturlige erosjonsprosesser

Langs Leiras løp dominerer punktkildene. De er i hovedsak lokalisert til yttersvinger og skyldes lateral erosjon.

Typisk for kildene er at de nesten uten unntak skyldes undergraving av bratte skråninger med påfølgende utglidninger av løsmasser. I alt ble det ved feltbefaring observert over 50 punktkilder som ble ansett å være av betydning for sedimentbudsjettet og i tillegg en rekke mindre utglidninger (Bogen, Moen og Sandersen, 1989). Totalt er den årlige sedimentproduksjonen fra disse punktkildene anslått til å være rundt 500 m³ eller 1 000 tonn. Dette utgjør bare 1,0% av den totale transporten i Leira ved Frogner, noe som

indikerer at bidraget fra disse kildene er av liten betydning i sedimentbudsjettet.

Lateral erosjon som følge av bakkesig ble beregnet av Bogen og Sandersen (1991) til å bidra med rundt 500 m³ pr. år.

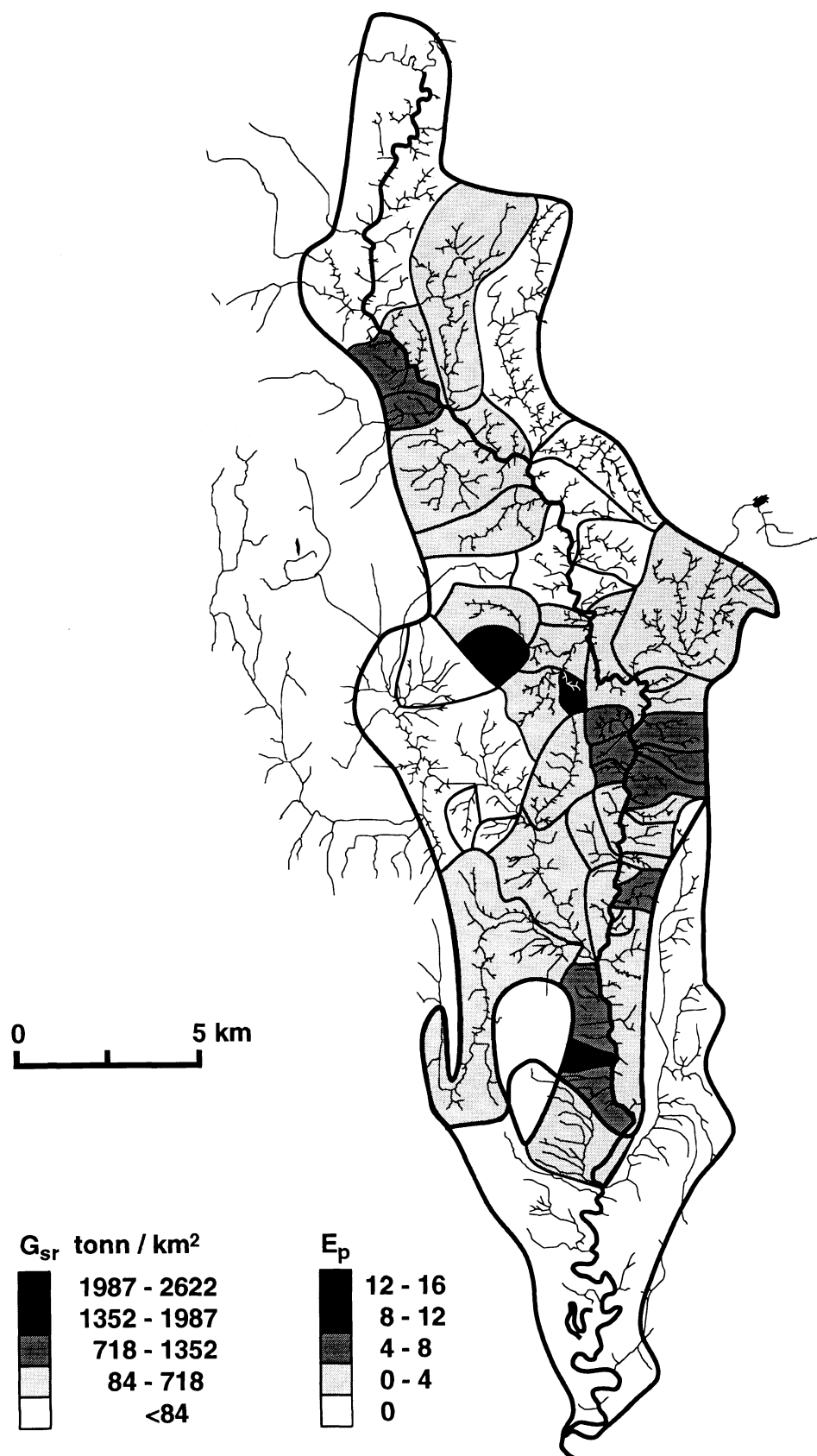
For å vurdere bidraget fra sidebekkene har vi benyttet erosjonspotensialet som et uttrykk for erosjonsintensiteten i ravineområdene og NIJOS beregninger på jordbruksarealene. I beregningen av arealer er det kun tatt med områder under marin grense da sedimentbidraget fra skogsområdene på Romeriksåsen og sanddeltaet ved Gardermoen antas å være ubetydelig sett i forhold til bidragene fra de marine leirområdene.

I felt som Slemdalsbekken med en betydelig vertikal senkning av elveløpet er E_p - verdien beregnet til 6,0. I stabile raviner som Vikka hvor vertikal senkning er begrenset er E_p - verdien 0 eller negativ. Vertikal senkning er her begrenset, og jordsig og lateral løpserosjon dominerer. En beregning av erosjonspotensialet for alle delfelt gir dermed en indikasjon på hvor ravine-erosjonen er mest intens, se fig. 17. Det er en instabil sone med høye E_p - verdier i områdene syd for Krokfoss. Muligens svarer denne linjen til den aggresjonsfronten som er nevnt av Bjerrum (1971).

Målingene fra Vikka og Slemdalsbekken kan benyttes til å anslå erosjonsintensiteten i raviner uten sedimenttransportmålinger. Vikkas representerer en ravine uten bidrag fra vertikal senking av løpet. Hvis vi trekker fra jordbruksområdene får vi en erosjon i ravineområdet på 84 tonn/km². I raviner med større E_p - verdi vil den vertikale senkingen bidra med mer. Vi har forsøksvis benyttet 1 170 tonn/km² år som et mål på erosjonsintensiteten i raviner av Slemdalsbekkens type. En lineær sammenheng mellom de to målte punktene gir en spesifikk erosjonsintensitet G_s på:

$$(5) \quad G_s = 158 E_p + 84$$

Integrasjon over arealene i alle raviner der E_p er beregnet gir en sedimenttilførsel på 36 457 tonn. I de mellomliggende ravineområdene ble sedimenttilførselen beregnet etter en anslått midlere E_p - verdi. Tilsammen gir dette 51 516 tonn. I tillegg kommer erosjon av punktkilder langs hovedløpet som er estimert til 1 000 tonn/år. Anvendelsen av relasjon (5) til beregning av erosjonsintensiteten innebærer at erosjonsprosessene i ravinene i Vikka og Slemdalsbekken betraktes som modeller for de øvrige ravinene i Leira. Som et estimat på erosjonsintensitetens relative størrelsesorden i de forskjellige ravineområdene antas relasjonen å være brukbar.



Figur 17: Erosjonspotensiale E_p og tilsvarende erosjonsintensitet i forskjellige ravineområder i Leiras nedbørfelt. Gråtoneskala indikerer potensiell vertikal løpssenkning. I felt uten rastring vil det ikke være vertikal løpssenkning og jordsig og lateral løpserosjon dominerer.

4.3.2 Bidraget fra jordbruksområdene

Sedimenttilførselen fra jordbruksområdene er beregnet ved å benytte NIJOS kart over erosjonsrisiko og tilordne en midlere erosjonsintensitet til hver klasse slik det er gjort for Vikka og Slemdalsbekken. En oppsummering innenfor hver klasse i alle jordbruksarealene ovenfor Frogner gir 40 614 tonn. I denne beregningen er det lagt til grunn at 10% av arealene i de to klassene med høyest erosjonsrisiko nyttes til grasproduksjon.

Under feltarbeidet ble det observert flere punktkilder fra jordbruksområder i forbindelse med dårlige avslutninger på drenering fra bakkeplanerte områder. Dette gir opphav til ny ravinedannelse innover i jordbrukslandskapet, og i de verste tilfellene ble det årlige jordtapet anslått til over 100 m³ pr. år. I alt ble det registrert 20 relativt aktive erosjonskilder av denne typen. Det årlige sedimentbidraget fra slike kilder er anslått til 2 500 tonn. Dette utgjør ca 2,5% av transporten ved Frogner.

Sammenlagt får vi en årlig sedimenttransport ved Frogner på 95 630 tonn (tabell 7). Dette gir et bidrag fra jordbruksvirksomhet på 45% og fra raviner med elve- og bekkeerosjon på 55%.

Ved Krokfoss ble tilførselen fra jordbruk beregnet til 17 365 tonn ved samme prosedyre (tabell 8). Tilførselen fra ravineområdene ble her estimert til 20 593 tonn. Sammenlagt gir dette 37 958 tonn. De to bidragene utgjør henholdsvis 45% og 55% av totaltransporten.

Erosjonsrisikokartene kan imidlertid gi større estimat på tilførsel fra jordbruk enn hva som kan forventes fra målinger. Erosjonsrisikokartene angir risiko når arealene er fulldyrket. Mange av arealene kan imidlertid ha en lavere utnyttelsesgrad enn hva som er regnet med i estimatet. Tidspunktet for jordbearbeiding og værslaget de enkelte år har også stor betydning. Det er også mulig at en del av materialet som eroderes ved arealavrenning ikke føres frem til måleprofilen i den nedre del av vassdraget, men opplagres i nedre del av skråningene på jordene eller på elvesletter.

Erosjonsmaterialet som tilføres fra elve og bekkeløp kan også være utsatt for lagring.

Lagringsfaktoren er det vanskelig å anslå eksakt. Hovedkonklusjonen som kan trekkes fra beregningen av sedimentbudsjettene er imidlertid at sedimenttilførselen fra ravineområdene er av betydelig størrelse og dominerer uansett over tilførselen fra jordbruksområdene når vi ser vassdraget som en helhet.

Tabell 7: Sedimentbudsjettet ved Frogner i Leira.

Sedimentkilde	Erosjonsprosess	Årlig bidrag
Naturlig erosjon	Erosjon i elve- og bekkeløp i ravineområdet	51515 tonn
	Erosjon langs hovedløp	1000 tonn
Jordbruksområder	Erosjon av overflatevann	40611 tonn
	Erosjon av grøftevann	2500 tonn
Sum bidrag pr. år:		95629 tonn

Tabell 8: Sedimentbudsjettet ved Krokfoss i Leira.

Sedimentkilde	Erosjonsprosess	Årlig bidrag
Naturlig erosjon	Erosjon i elve- og bekkeløp i ravineområdet	20593 tonn
Jordbruksområder	Erosjon av overflatevann	17365 tonn
Sum bidrag pr. år:		37958 tonn

5. LANGTIDSVARIASJONER I AVLØPET

De største årlige flommene i Leira i måleperioden 1966-90 er vist som en del av fig. 20. Det er en markert økning av størrelsen på flommene mot slutten av 80- årene. Det er først og fremst høstflommene som øker. Vårflommenes størrelse har ikke endret seg i denne perioden. Det er mange forhold innenfor Leiras nedbørfelt som kunne tenkes å medføre en økning i flommenes størrelse.

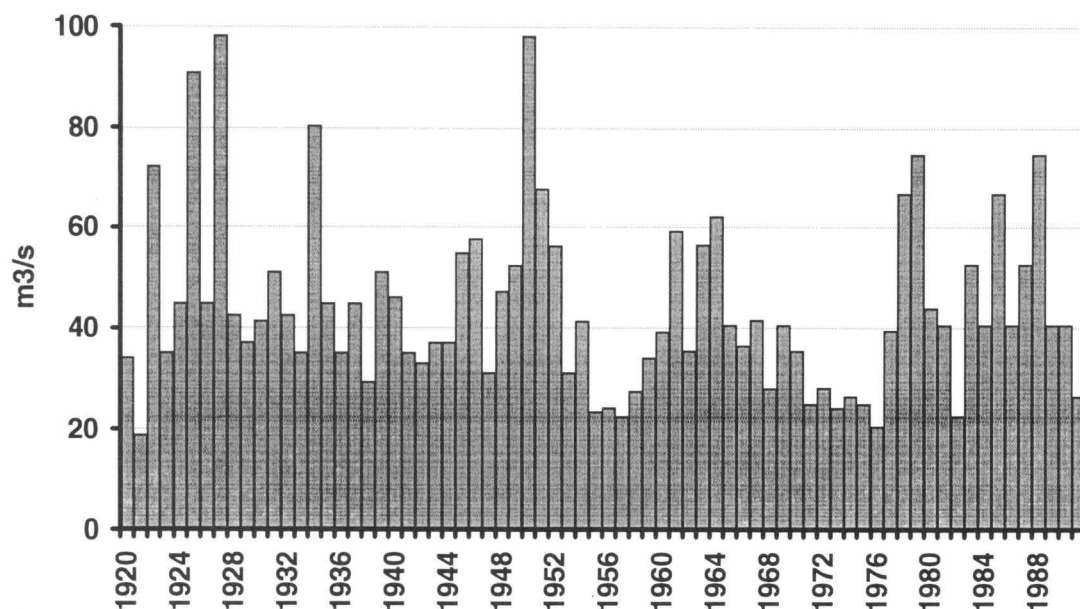
Bakkeplanering og drenering kan også ha ført til at avrenningen forløper raskere slik at flommene ikke lenger dras ut i tid og dempes. Flatehugst og urbanisering fører til raskere avrenning og vil virke på samme måte.

Nå synes imidlertid endringene å ha sin årsak i langperiodiske svigninger.

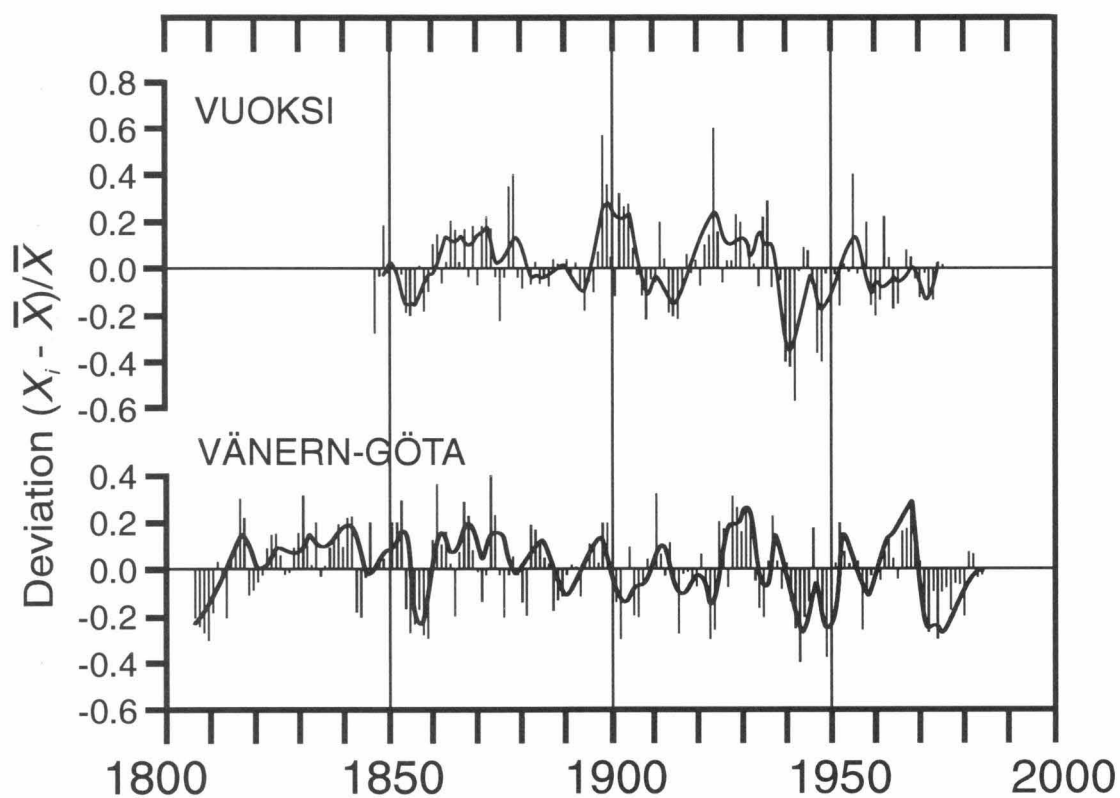
Leiras måleserie er kort. Andre vannmerker på Østlandet med lengre serier viser at perioder med store flommer avløses av mellomrom hvor flomvannføringen ikke når det samme nivå. I Jondalselv ble det registrert markerte store flommer i periodene 1922-34, 1950-53, 1961-64 og 1978-89, fig. 18. I Glomma er også flomvannføringene i 60- årene og i slutten av 80 - årene større enn i den mellomliggende perioden.

Dette mønsteret bekreftes også av internasjonale studier. Probst (1989) finner liknende langtidsfluktuasjoner i en rekke europeiske elver tilbake til midten av forrige århundre. (Fig. 19). I en undersøkelse av femti elver på forskjellige kontinenter blir det også påvist fluktuasjoner i avløpet i hele dette århundret. Fuktige perioder veksler med tørre i intervaller på 10 - 15 år (Probst et al., 1987).

Vinterflommen som inntraff i februar 1990 var helt spesiell. Så stor avrenning i februar har ikke vært observert tidligere. I følge modellberegninger utført av NVE (Sælthun et. al., 1990) vil imidlertid vinterflommer opptre hyppigere i lavlandsvassdrag på Østlandet i et endret klima som følge av økningen i CO₂-innhold i atmosfæren. I klimascenariet som ligger til grunn for beregningene, forventes det en temperaturøkning på 1,5 til 3,5°C og en midlere nedbørøkning på 7-8%. Det forventes at flomskader og erosjon vil øke sterkt i et slikt klima.



Figur 18: Maksimale årlige vannføringer, Jondalselv.



Figur 19: Glidende middelkurver for avvik fra middelvannføring i Göta elv (Sverige) og Vuoksi (Finland). Fra Probst et. al (1987).

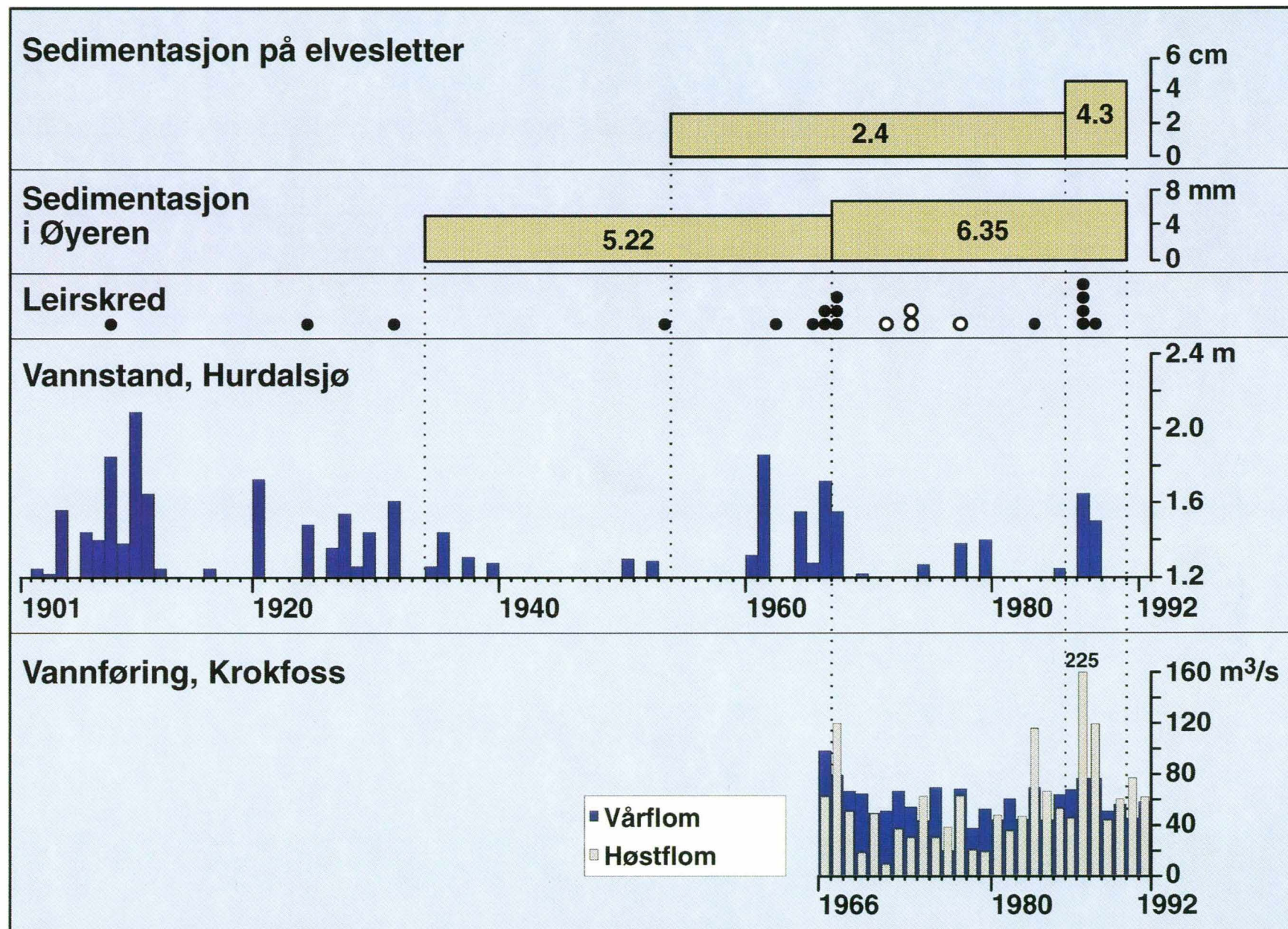


Fig 20 Sammenstilling av data for sedimentert materiale på elveslettene og i Øyeren med flomvannstand og flomvannføring i vassdrag på Romerike. Tidspunktet for større leirskred er indikert med sirkler.

5.2 LANGTIDSVARIASJONER I SEDIMENTTRANSPORTEN

Materialet som transporteres ut i Leira blir ført ut i Svellet i Nordre Øyeren og videre ut i Øyerens hovedbasseng. Noe materiale sedimenteres også på elveslettene i den nedre delen av vassdraget.

Under store flommer kan elven gå over breddene. Under hver flom kan det akkumuleres et lag med flomsedimenter, slik at en sekvens av nær horisontale lag blir bygget opp over tid. Lagene fra hver flom kan være fra noen få mm til flere cm tykke.

Flere profiler med flomsedimenter langs Leiras hovedløp ble datert ved målinger av radioaktivt Cesium (Cs^{137} og Cs^{134}), Walling og Quine 1990, se fig. 20.

Chernobyl-ulykken i april 1986 ga et betydelig nedfall av Cs^{137} og Cs^{134} . Cs^{134} har en halveringstid på bare to år, mens halveringstiden på Cs^{137} er på over 20 år. Chernobyl nedfallet kan derfor identifiseres på aktiviteten av Cs^{134} .

Under de kjernefysiske sprengningene i slutten av 50-årene og begynnelsen av 60-årene var det også et nedfall av begge de to radioaktive isotopene, men aktiviteten til Cs^{134} er nå opphørt. Alle profiler har et markert sjikt med høy radioaktivitet som antas å skyldes Chernobyl-nedfallet. I årene 1986 - 1990 ble det pålagret materiale med relativt høy radioaktivitet som er tilført fra erosjon andre steder i Leiras nedbørfelt. I et visst dyp under overflaten er ikke sedimentene radioaktive. Disse flomsedimentene er avsatt i tiden før de første kjernefysiske spregningene.

Dateringene gir grunnlag for å angi sedimentasjonen innenfor forskjellige perioder. Det er en markert økning i sedimentasjonen på slutten av 80-årene (tabell 9 og fig. 20)

Sedimentene i Øyerens dybbasseng ble også undersøkt. Sedimentasjonen i Øyerens dybbasseng vil reflektere langtidsvariasjoner i sediment-tilførselen til innsjøen. Mye av materialet kommer fra Glomma, men en betydelig del tilføres også fra Romerike, spesielt gjennom Leira og Nitelva (Bogen og Nordseth, 1986).

I borkjernene ble det iaktatt en tydelig laminering, som består av en veksling mellom mørke forholdsvis tynne sjikt og endel tykkere lysere lag av forskjellig nyanser av grått og brunlig til brungrå farge. Det aller meste av kjernematerialet i de øvre 50cm er meget finkornet og ca. 85-90% ligger i siltfraksjonen.

Tabell 9: Sedimentasjonsraten på elvesletter i nedre del av Leira.

Lokalitet	Sedimentasjon i perioden 1954-1985 cm/år	Sedimentasjon i perioden 1986-1990 cm/år
Frogner 1	5.2	7.5
Frogner 2	0.9	3.5
Leirsund	2.6	3.8
Lillestrøm	0.8	2.5
Middel	2.4	4.3

På grunnlag av granskning av lamineringen kan det settes opp diagrammer over årlig sedimentasjon (Bogen og Sandersen, 1991)

Flommene i Øyeren kan spores i noen av lokalitetene ved grovere materiale og mektigere lag. I visse lokaliteter mangler flomlagene helt, eller er dårlig markert. Utakt i avrenningen til elvene som kommer inn i sjøen, samt ulike effekter på den store deltaflaten ved vannstandsvariasjoner kan være årsaken til dette.

På de lokalitetene der flomlag fra 1934 og 1967 kan identifiseres, er det beregnet en middeltykkelse pr. år for periodene 1934 - 1967 og 1967 - 1990. Selv om datering med laminasjoner og flomlag er beheftet med usikkerheter så synes det å være klart at det ikke er noen tegn til ekstrem endring av sedimentasjonsraten i tilknytning til omleggingen av jordbruket på 70-tallet. Gjennomsnittet for samtlige lokaliteter gir imidlertid en viss økning i sedimentasjonen på 1,13 mm (22%) i perioden 1967 - 1990 i forhold til den første perioden (se fig. 20). Denne økningen faller sammen med perioden med økt sedimenttilførsel til innsjøen på grunn av bakkeplanering. For øvrig er det nærliggende å tolke den relativt konstante avstanden mellom laminasjonene i hele dette århundret som et uttrykk for at den naturlige sedimenttilførselen også er av betydning i sedimentbudsjettet. Hvis det utelukkende var jordbruksvirksomheten som forårsaket erosjon av betydning, så ville en økning av tykkelsen på lagene vært å forvente.

5.3 FORLØPET AV BIDRAGET FRA DE ULIKE SEDIMENTKILDENE SETT OVER TID

Erosjonsintensiteten i det naturlige leirterrenget antas i stor grad å være styrt av de store flommene, anslagsvis med gjentakelsesintervall på ca. 30 år. Under ekstreme flommer som tilfellet var i 1987 vil bunnsenkningen være så stor at feltet kommer i ubalanse, og dette resulterer i en økning av erosjonsprosessene de nærmest påfølgende årene. 1987 - flommen er beregnet til å ha et gjentakintervall på 100 år ved Krokfoss (B. Krokli, pers. medd.).

Når det gjelder jordbruksområdene er det også store variasjoner i spesifikk sedimentproduksjon (Lundekvam, 1992). I jordbruksmiljøet er det gjort mye forskning på denne sektoren, og denne viser at spesielt omfanget av jordarbeiding har avgjørende betydning for erosjonsintensiteten. Innenfor Leiras nedbørfelt har det spesielt vært fokusert på betydningen av de omfattende planeringsarbeidene på midten av 1970-tallet, som resulterte i en sterk økning av sedimenttransporten. Det er nå en tendens til at omfanget av ny bakkeplanering er på vei ned, og dette antas på sikt å redusere bidraget fra jordbruket.

Det har også vært en økning i jordarbeiding som følge av omleggingen av driften fra husdyrhold til korndyrking. Takten i denne omleggingen kulminerte i løpet av 1970-tallet. Det er også fra mange hold hevdet at den økte bruk av tunge maskiner er en medvirkende årsak til økningen av jorderosjonen.

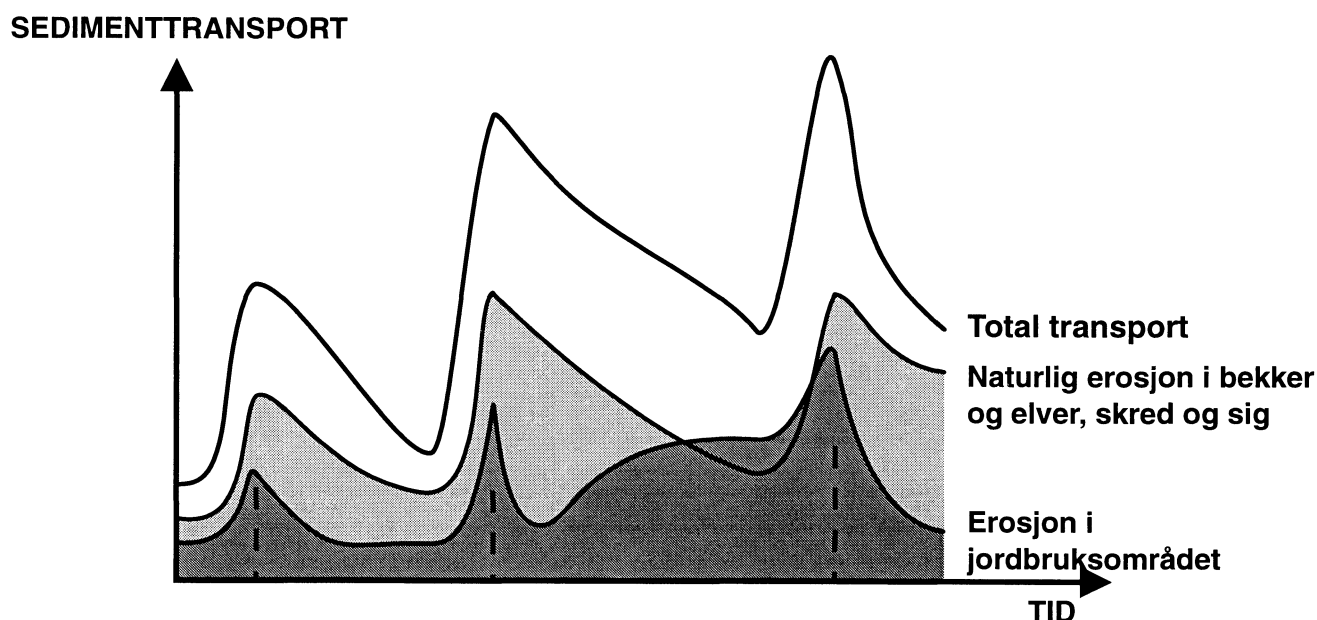
Noe av økningen i sedimentasjonen i Øyerens dypbasseng på 22% i perioden 1967 - 1990 i forhold til perioden 1934 - 1966 kan som nevnt ha sin årsak i omleggingen av jordbruket samt bakkeplanering. Det ble imidlertid også utløst en rekke leirskred i samme periode.

Sedimentasjonen på elveslettene og i Øyeren er tegnet opp sammen med tidspunktet for leirskred og vannføring/vannstand i fig. 20. Siden Leiras måleperiode er så kort, er de høyeste vannstandene (større enn 1,2 m) fra 1901 - 1992 i den nærliggende Hurdalsjøen også tegnet inn i fig. 20. Hurdalsjøen er regulert og avrenningen er derfor ikke representativ for naturforholdene under midlere og lave vannføringer. Flomvannføringerne synes å følge samme mønsteret som beskrevet tidligere. En stor del av leirskredene grupperer seg gjerne i siste del av perioder med hyppige flomvannføringer. Dette svarer til det mønsteret som påvist, med bunnsenking under flommene og

aksellerert erosjon som kan utløse større skred. De fire skredene i årene 1971 - 1977 representerer unntak, men de ble alle forårsaket av bakkeplanering (Bogen, Moen og Sandersen, 1990)

For å anskueliggjøre denne tidsmessige variasjonen i spesifikk sedimentproduksjon har vi konstruert en generell prinsippskisse som viser utviklingen i henholdsvis naturlig terreng og jordbruksland (fig. 21).

Som det framgår av denne skissen vil bidraget fra henholdsvis naturlige og menneskepåvirkete sedimentkilder variere mye fra år til år. I perioder like etter store flommer vil de naturlige kildene dominere, men etter noen år vil det relative bidraget fra jordbruket øke. I den mest intensive perioden med bakkeplanering rundt 1975 da flomaktiviteten var liten, ser vi ikke bort fra at sedimentbidraget fra jordbruket var dominerende.



Figur 21: Skisse av langtidsvariasjoner i sedimenttransporten i et vassdrag med bidrag fra jordbruksområder og ravineområder. Kurvene er hypotetiske og skisserer hvordan sedimenttransporten i vassdraget er en sum av forurensningene fra jordbruksområdene og basistilførselen fra naturprosessene i ravineområdet.

Tabell 10: Erosjonsintensiteten i forskjellige ravineområder.

Slemdals- bekken 1991-92	Vikka 1989-92	Frogner 1983-92	Frogner postglasial tid	Gråelva i Trøndelag 1992
tonn / km² år	tonn / km² år	tonn / km² år	tonn / km² år	tonn / km² år
2180	84	118	4000	7750

Hvis vi betrakter ravinelandskapet over et lengre tidsrom, så er ravineformene i seg selv en dokumentasjon på høy erosjon. Goffeng (1985) har estimert det volumet av masser som totalt sett har blitt fjernet ved erosjon i postglasial tid i Leiras nedbørfelt ovenfor Frogner til 2,5 milliarder m³. Over 8 000 år gir dette 4 000 tonn/km² år i eroderte områder. Sammenholdt med målte tall kan dette tyde på at skredraviner har vært et dominerende element i landskapet i tidligere tider. I den tidlige fasen etter istiden var sannsynligvis forholdene mer å sammenlikne med Gråelva (se tabell 10). Store flommer må imidlertid ha spilt en avgjørende rolle for utviklingen i landskapet, selv i nyere tid.

6. SIKRINGSTILTAK MOT EROSJON (FORBYGGING)

6.1 INNLEDNING

Begrepet forbygging har vært brukt relativt vidt om sikringstiltak i vassdrag. Begrepet har således inkludert sikring mot oversvømmelse ved flomverk, senking eller utretting/kanalisering av elveløp, rasvoller m.v. Denne rapporten er avgrenset til sikring mot **erosjon**, og tiltakene må derfor ikke forveksles med tiltak mot oversvømmelse.

Omtalen av sikringstiltakene er basert på en separat rapport utarbeidet av en egen delprosjektgruppe, "Erosjonssikring i leirområder". Denne rapporten gir en fyldigere beskrivelse av ulike metoder for sikring mot erosjon i elver og bekker i leirterreng. I tillegg foreligger separat rapport angående bruk av trær for å dempe massebevegelsen i leirskrånninger (Frivold 1991).

Tiltak på dyrka mark og tekniske tiltak i forbindelse med bakkeplaneringsarbeider holdes utenfor denne gjennomgang. Det samme gjelder alternative løsninger for å dempe flomtoppene.

Det tas utgangspunkt i de metoder som er i bruk ved NVE Vassdragsteknisk seksjon sin landsomfattende virksomhet. Dette suppleres med løsninger fra liknende problemer i andre land, samt forslag til "nye" løsninger som foreslås utprøvet.

Arbeidet er avgrenset til å gjelde aktuelle tiltak i leirområder. Det tas utgangspunkt i forholdene i Leira-vassdraget på Romerike, men de generelle delene forutsettes å kunne overføres til andre deler av landet. I Leiravassdraget er det i svært liten utstrekning gjennomført erosjonssikringstiltak. I NVEs regi er det kun gjennomført erosjonssikring av to korte parseller (ved Homledal mølle og ved Frogner idr.anlegg). I tillegg er det erosjonssikret i elvekanten i forbindelse med et lite flomsikringsanlegg på Leirsund.

Det knytter seg ulike interesser til erosjon i leirområder som naturlig prosess. Enkelte mener prinsipielt at man ikke bør gripe inn i disse prosessene. Tiltak for bedring av vannkvaliteten bør utfra samme tankegang begrenses til å motvirke menneskeskapte tilførsler, dvs som følge av jordbruksaktivitet, anleggsarbeid m.v.. Utvalget har ikke tatt opp denne diskusjonen. Mandatet tilsier at tiltak skal utredes bl.a. med tanke på maksimal reduksjon av sedimenttilførslene. Utvalget forutsetter dermed at diskusjonene omkring tiltak bør gjennomføres eller ei, føres på et senere tidspunkt.

6.2 EROSJONSSIKRING I LEIRTERRENG

Grunnprinsippet ved erosjonssikring er å tilføre et materiale som tåler den aktuelle påkjenning, enten dette skyldes vannhastigheten direkte, bølgeslag, is eller andre forhold. I leirområdene er det i tillegg vesentlig å ha et tilstrekkelig filter mellom det erosjonsbeskyttende laget og undergrunnen, slik at utvasking av finstoff unngås.

Ved terskelbygging kan vannhastigheten og derved erosjonspåkjenningen reduseres oppstrøms. Behovet for sikring mellom tersklene blir dermed redusert.

Utgangspunktet for valg av sikringsmetode må være hvilken prosess som pågår. Disse prosessene er nærmere beskrevet i kapittel 2.

6.2.1 Sikring mot lateral erosjon

Formål:

Skråningssikring har til hensikt å stoppe sideveis (lateral) erosjon. Derved kan også tilførselen av materiale fra skråningene som følge av skred og utglidninger stoppes. Metoden vil være typisk i yttersvinger, der elva har et meanderende løpsmønster. Ved høye skråninger sikres normalt kun i foten av skråningen. De raske massebevegelsene kan dermed stoppes, mens bakkesiget fortsatt er aktivt. Dette vil imidlertid etter hvert reduseres, ettersom skråningen over tid vil slakes ut.

Generelt:

Før skråningen kles med et erosjonsbeskyttende dekke, må det sørges for nødvendig rydding og eventuelt avplanering av skråningen til en stabil helningsvinkel.

I leirområdene vil det være nødvendig med eget filterlag. Det kan benyttes sand eller subbus i et 15-25 cm tykt lag eller filterduk.

Foten av skråningen representerer et kritisk punkt. Her er påkjenningen stor, samtidig som vegetasjon vanskelig etableres.

Aktuelle materialer til sikringsarbeidene kan være sprengt stein, stein fra grustak, geotekstiler, gabioner, tremateriale m.v.

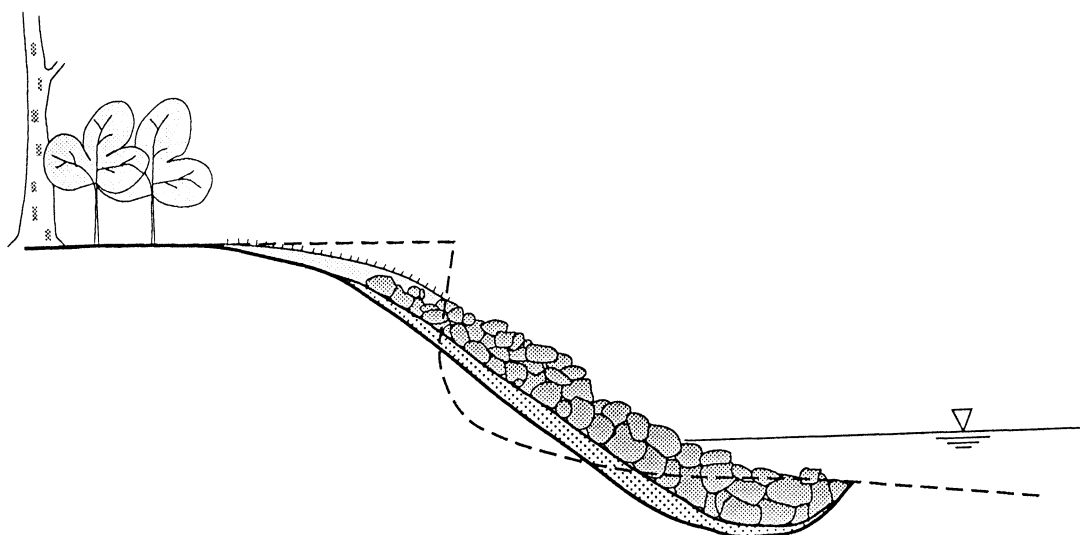
Innenfor prosjektområdet i Leira vil denne forbygningstypen særlig være aktuell i hovedelva, men også i de større sidebekkene, hvor det kun er sideveis erosjon.

Sikring med stein

Det mest brukte materiale i Norge er sprengt stein fra eget steinbrudd. En ulempe er at transporten ofte blir kostbar og at det kreves tunge maskiner for transport og utlegging. Det siste gjelder spesielt i leirområdene hvor grunnforholdene som regel er dårlige. Avhengig av den aktuelle vannhastighet, isforhold m.v., kan mindre kornstørrelser enn stein og mer avrundet materiale enn sprengt masse, gi tilfredsstillende sikring mot erosjon.

Steinen legges ut og ordnes i et lag som dekker skråningen fra elvebunn opp til minimum høyde med middelflom. Ovenfor dette nivå, er det ofte tilstrekkelig med godt tilgrodd skråning evt. geotekstiler el.l.

Prinsippet for denne løsningen er vist i figur 22.



Figur 22: Skråningssikring med stein

I stedet for å tippe massene fra skråningstoppen kan det i mange tilfelle være en fordel å kjøre ut steinlaget på fylling i foten av skråningen. Dette gjelder spesielt ved høye skråninger, og der en ønsker at vegetasjonen i skråningen i størst mulig grad skal beholdes urørt. Et eksempel på dette er vist i figur 23. Eksempelet er hentet fra Rakkestadelva i Østfold og viser situasjonen kort tid etter at anleggsarbeidet var avsluttet.



Figur 23: Erosjonssikring i foten av høy leirskråning. Rakkestadelva, Østfold

Sikring med steinramper (buhner) av sprengt stein

Steinramper som erosjonssikring anlegges i kombinasjon med skråningssikring der strømmen er spesielt sterk eller der det er en svært markert dypål inntil elvekanten, f.eks. i yttersvinger. Steinrampene vil føre til at hastigheten inntil land reduseres og at dypålen flyttes lenger ut i løpet. Dermed kan både erosjonsfaren reduseres og stabiliteten av elveskråningen bedres.

I Leira vil dette tiltaket kun være aktuelt på steder i hovedløpet med ekstra stor erosjonspåkjenning, kanskje også i sideelva Gjermåa.

Tilplanting og tilsåing

Dette kan være aktuelt for skråninger hvor strømhastigheten er beskjedent eller for skråningsdeler som er relativt sjelden utsatt for påvirkning.

Det er imidlertid en grense for hvor store vannhastigheter f.eks. et grasdekke tåler. I litteraturen oppgis denne grensen til 1-1.6 m/s, kortvarig opptil 2 m/s.

Planting kan redusere overflateerosjon og bedre stabiliteten i leirskråninger. Det henvises her til Frivold, 1991.

Sikring med geotekstiler/ synteter

Geotekstiler er et alternativ ved moderate vannhastigheter. Det finnes en rekke fabrikater og kvaliteter. Som regel er løsningen basert på et nett som fylles med jord og tilsås. Det kan brukes alene eller i kombinasjon med f.eks. stein i foten.

Nettet/ folien festes til underlaget med pæler eller plugger.

Sikring med tømmer, faskiner

Der det er vanskelig adkomst, er det særlig aktuelt å benytte lokale materialer. Dette kan f.eks. være tømmer eller faskiner. Faskiner er sammenbuntede kvister. Buntene festes til underlaget med treplugger.

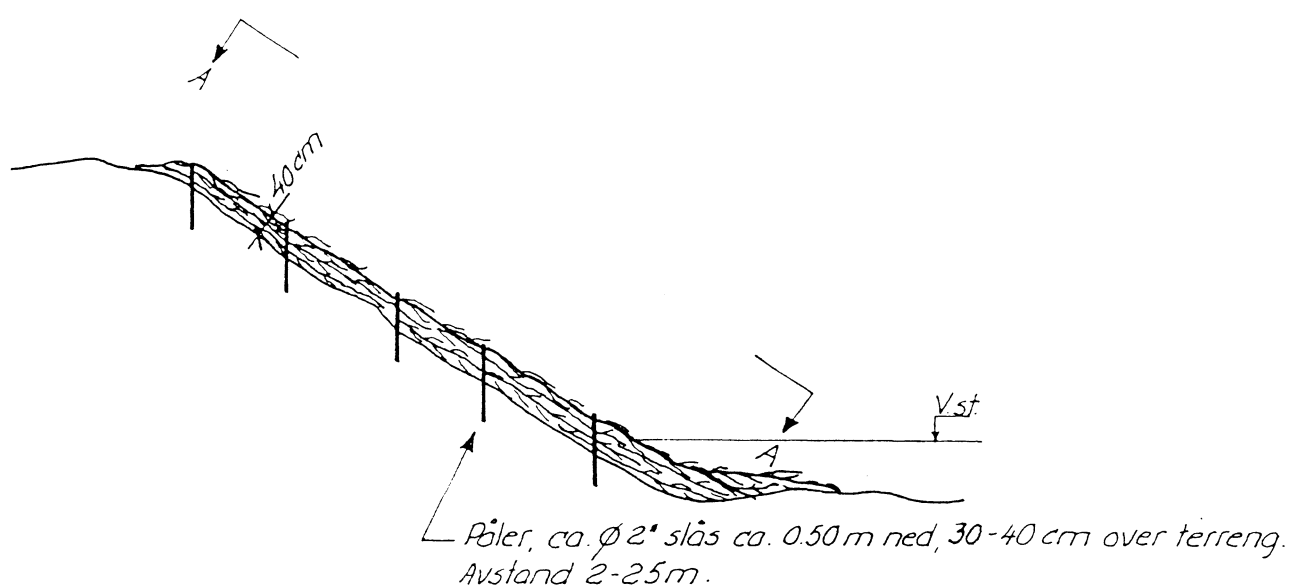
Tømmer kan benyttes både til erosjonssikring og til bedring av stabiliteten i skråningen. Tømmeret må rammes ned i grunnen til en tett vegg. I leirområdene kan det være vanskelig å få tilstrekkelig filter som hindrer utvasking mellom stokkene.

Ved å presse ned stokker med noen meters mellomrom har NVE imidlertid brukt tømmer med hell for å hindre glidninger i leirskråninger.

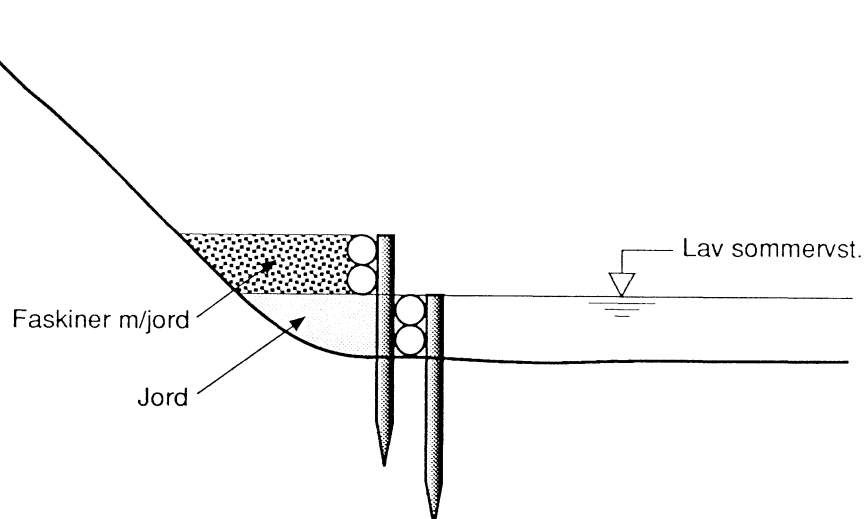
Sikring kun med faskiner er vist i figur 24. I figur 25 er vist en løsning med tømmerstokker lagt på langs, i foten av skråningen. Pæler med noen meters mellomrom hindrer forskyving av stokkene. Tømmer er her lagt opp til normalvannstand. Løsningen kan

kombineres med tilplanting i skråningen, faskiner, evt. geotekstiler. Ytterligere en variant er flettverk, som innebærer å lage et flettverk av kvister rundt påler som er slått ned i foten av skråningen.

Da det foreligger lite erfaringsmateriale for bruk av tremateriale til sikring i leirområder som på Romerike, vil det være aktuelt å få utprøvd ulike varianter av løsninger hvor stedlig tremateriale benyttes.



Figur 24: Sikring av skråning med faskiner.



Figur 25: Sikring med tømmer i foten av skråning.

6.2.2 Sikring mot vertikal erosjon

Formål:

Formålet med bunnsikring er å stoppe erosjon i bunnen, som fører til en gradvis bunnsenking, med påfølgende skred/ utglidninger i skråningene. For å få tilfredsstillende sikkerhet er en avhengig av at ikke elva/ bekken finner seg nytt far på siden av bunnsikringen. Dette oppnås ved også å sikre litt opp fra foten av skråningene. Metoden vil være typisk i mindre sidebekker hvor prosesser som følge av bunnsenking dominerer. Dette er en prosess som totalt står for ca 50 % av sedimenttilførselen til Leira, jfr. tabell 7.

Generelt:

Denne sikringstypen kan innebære full sikring av bunn og sider langs hele den erosjonsutsatte strekning eller en løsning basert på bygging av terskler eventuelt supplert med skråningssikring f.eks. i yttersvinger.

Sikring av bunn og sider

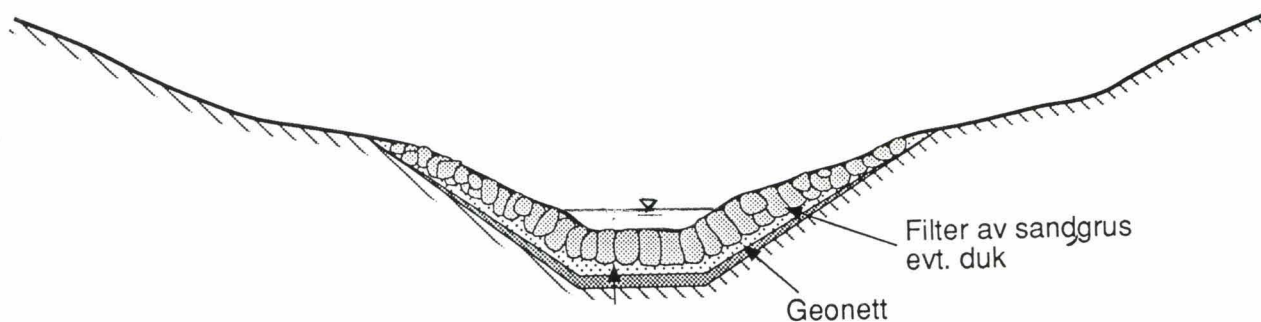
Bunnen av elveløpet/ bekken sikres med et erosjonsbeskyttende lag. Som forbygningsmateriale er det her i landet mest vanlig å bruke sprengt stein. Dersom vannhastighetene tillater det, kan en også benytte grus eller utsortert stein og grus fra grustak.

For å hindre at elva tar seg nye løp på sidene, må også foten av skråningene sikres mot erosjon. For skråningssikring vises til kap. 6.2.1. Svært ofte vil det være naturlig å benytte samme materiale både i bunnen og et stykke opp i skråningene.

Ved moderate vannhastigheter kan ulike typer nett eller duk vurderes. Her finnes det mange varianter på markedet, både i plast (evt. glassfiberarmert) og organisk materiale.

Som ved skråningssikring kan lokalt tremateriale benyttes. Sammenbuntete kvister (faskiner) forankres da til grunnen med trepeler. Denne sikringsmetoden er lite utprøvd, og således beheftet med noe usikkerhet angående effekt, varighet m.v. Metoden kan være aktuell i kombinasjon med bruk av duk.

Figur 26 viser denne type forbygning utført med stein, og med dårlige grunnforhold. Det er lagt geonett som underlag før utkjøring av stein, mens steinfyllinga samtidig tjener som adkomstveg innover i området. Denne metoden vil være aktuell i mange mindre bekker i leirområdene. I figur 27 er vist et eksempel på hel bunnsikring fra en ravine ved Gardermoen.

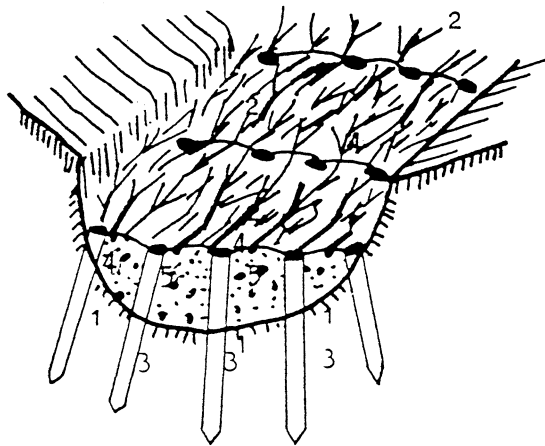


Figur 26: Sikring i bunn og sider med stein.



Figur 27: Bunnsikring med sprengt stein. Eksempel fra ravine nedstrøms Gardermoen renseanlegg.

Figur 28 viser sikring av ravinebunn med en type faskiner. Metoden bør antakelig kombineres med en form for sikring av skråningsfot, f.eks. en rad tømmerstokker.



- 1: ravinens opprinnelige bunn
- 2: faskiner
- 3: stokker, sammenbundet med wire (4)
- 5: stein, grus eller jord

Figur 28: Sikring av ravinebunn med faskiner. (figur hentet fra Hattinger, 1976)

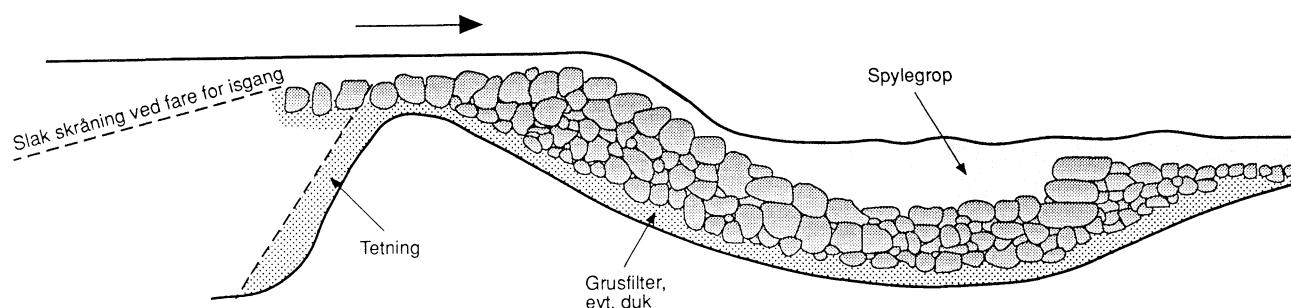
Sikring ved terskler

Hensikten med tiltaket er å redusere fallet/ hastigheten på den aktuelle strekning. Dette kan oppnås ved å bygge opp terskler som trapper av fallet på kontrollerte punkter. Ved dette oppnås redusert påkjenning mellom tersklene, dels som følge av redusert fall, dels ved økt vannførende profil.

Det må sørges for at det ikke oppstår lekkasje gjennom terskelen. Dette gjøres ved å legge et tetningslag på oppstrøms side av terskelen med filter mot selve terskelen. Tetningslaget kan bestå av leirmasser eller en tett duk (foliebelagt fiberduk). For å hindre at vannet tar seg vei på sidene av terskelen, er det nødvendig med erosjonssikring et stykke opp på sidene.

Elveløpet et stykke nedstrøms terskelen vil være erosjonsutsatt som følge av økt hastighet over terskelen. For å begrense utstrekningen av forbygningstiltaket, bør det anlegges en spylegrop nedstrøms terskelen.

Prinsippet for oppbygging av en terskel av sprengt stein med spylegrop er vist i figur 29. Tilsvarende terskel kan bygges opp av gabioner.



Figur 29: Lengdeprofil, terskel av sprengt stein.

Også betong kan brukes i tersklene. I andre land er dette mye brukt. Betongkonstruksjonene blir svært stive, og der fjell mangler blir en svært avhengig av tilstrekkelig forankring. Et eksempel på en utført terskel av sprengt stein i en mindre bekk i leirområdet er vist i

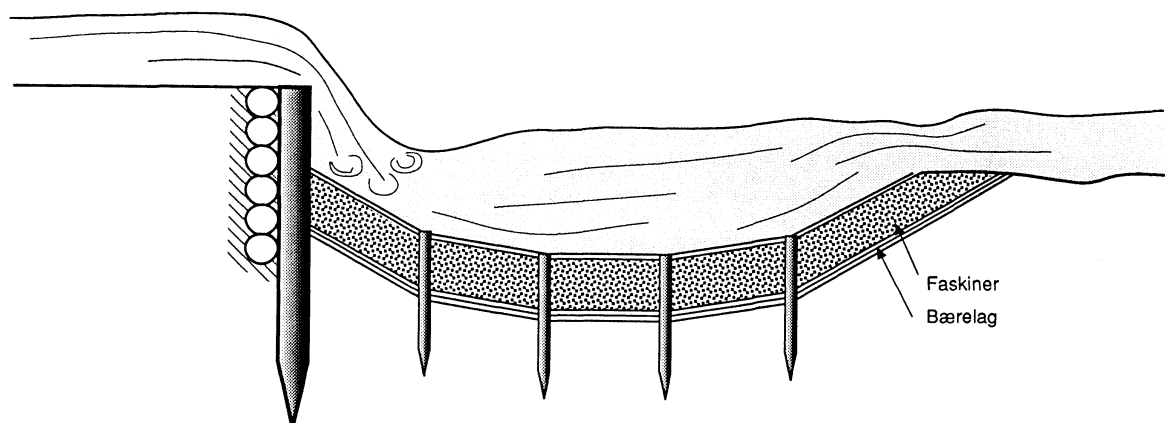
figur 30. Terskelen inngår i en sikringsplan med en rekke slike terskler i Rogndalsbekken i Ullensaker, Akershus.



Figur 30: Eksempel på utført terskel av sprengt stein. Rogndalsbekken, Ullensaker, Akershus.

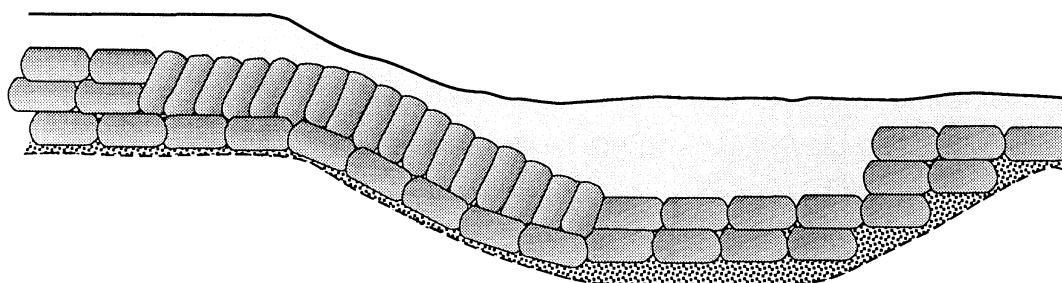
Der det er vanskelig adkomst eller stein av andre grunner ikke er ønsket eller tilgjengelig, kan en bruke stedlig materiale i form av tømmerstokker. Et eksempel med tømmer i selve terskelen og spylegropa kledd med faskiner, er vist i figur 31. En variant vil være å bygge hele terskelen opp av faskiner, da med slakere fall over terskelpunktet. Dette er løsninger som vi anser aktuell i mange raviner med dårlig tilgjengelighet.

Metoden(e) er oss bekjent ikke utprøvd her i landet under liknende forhold som i Leiras ravinesystem, og bør derfor utprøves før en kan si noe nærmere om effekt og varighet over tid. En kombinasjon med bruk av geotekstiler kan også her tenkes.



Figur 31: Terskel av tømmer og faskiner.

Ytterligere en løsning kan være å bruke sekker som fylles med jord på stedet. Jute med innvendig folie, evt. vevd kunststoff antas å være aktuelle materialer i sekkene. Sekkene kan brukes til sikring i bunn av spylegrop, men også til oppbygging av selve terskelen. Dette er vist i figur 32. Det må likevel presiseres at vi ikke kjenner til at sekker er brukt til denne type sikring tidligere og derfor må betrakte slike løsninger som forsøk. Det er behov for å vinne erfaring både med byggemåte og material- / fargevalg.



Figur 32: Terskel av sekker med jord.

6.2.3 Lukking (rørlegging)

Formål:

Redusere erosjon i bunn og sider, bedre arrondering

I jordbruket har det de siste tiår vært drevet utstrakt bekkelukking. Lukkingen har først og fremst hatt til hensikt å bedre arronderingen. Den omfattende bakkeplanering i ravine-landskapet på Romerike har som regel også inkludert bekkelukkinger.

Forutsatt at rørene har tilstrekkelig kapasitet og skjøtene ikke lekker, vil erosjonen i selve vannløpet opphøre. Overflateerosjonen på jordene har imidlertid økt. Utløpet fra rørene er også et kritisk punkt.

Ulike typer rør finnes på markedet. Fleksible rør med tette skjøter har vist seg mest holdbare, men sementrør med muffeskjøter, kan være brukbare når de ligger på frostfri dybde.

Rørlegging anses lite aktuelt som erosjonssikringstiltak i Leira. Miljøhensyn tilsier dette, sammen med fare for tilstopping i flomepisoder og dermed ukontrollert erosjon der vannet finner seg vei. Denne vurderingen kan imidlertid være annerledes i andre vassdrag.

Der veger krysser bekker som er utsatt for bunnsenking, vil det måtte foretas sikringstiltak for å unngå undergraving av vegfyllingen. Dersom dette er gjort på tilfredsstillende vis, vil en samtidig oppnå at bekkeprofilen "henges opp" i et fast punkt. Et stykke oppstrøms kulverten vil derfor denne form for "lukking" ha positiv effekt på erosjonen i bekkeløpet.

6.2.4 Sikring mot utglidninger

Dette dreier seg om tiltak for direkte å bedre stabiliteten av skråninger.

Generelt sett vil en erosjonsforbygning som har en netto tilgang på masser (ballastering) i bekkeløpet gi en øket sikkerhet mot utrasinger i skråningene.

Imidlertid vil en erosjonsforbygning i bekkeløpet ha liten innvirkning på den langsomme massebevegelse som foregår i de øvre 1 - 2 meter av skråningen (bakkesig) og som kan sees på som en forvittringsprosess (solifluksjon).

Bekkeskråninger med en helningsvinkel på mer enn ca. 20° - 21° vil være utsatt for bakkesig.

Trærs rotsystem vil ha en viss stabiliserende virkning på bakkesig - og da særlig trær med dypereleggende rotsystemer (for eks.svartor). I tillegg vil trærs opptak av vann, som kan være opptil 30% av midlere årsnedbør, være stabiliserende (om enn marginalt) ved at vanninholdet i leira reduseres (spesielt i sommerhalvåret).

Stabilisering av bakkeskråninger vil også kunne foretas ved hjelp av bakkeplanering ved at helningen av skråningen reduseres og at skråningens totalhøyde kan reduseres. Selv om stabiliteten bedres, kan imidlertid bakkeplanering ha negativ effekt på erosjonen på overflate og i drenssystemet.

6.3 VIRKNINGER AV EROSJONSSIKRING

6.3.1 Effekt på erosjon, sedimenttransport

Effekten av et sikringstiltak på erosjonen vil selvsagt avhenge av en teknisk sett, god utførelse. Varigheten over tid vil i tillegg avhenge av hva slags materiale som brukes.

De mest solide og varige løsningene er de som er basert på bruk av stein. Disse metodene har vært dominerende i forbindelse med sikringsarbeider i Norge. Inntil nylig har det ikke vært foretatt systematiske målinger av sedimenttransporten som dokumentasjon på effekten av sikringstiltak. Slike målinger er utenom prosjektet i Leia startet opp i forbindelse med et sikringsprosjekt i Gråelva i Nord-Trøndelag.

Feltbefaringer av gamle sikringsanlegg med stein indikerer at effekten kan være nær 100%, med mindre det oppstår skader på sikringslaget. Effekten refereres her til den prosessen man sikrer mot.

Ved sikring av høye leirskråninger vil bakkesiget utgjøre en "minimumstransport" av masse nedover skråningene, som vi ikke stopper, men over tid reduserer ved erosjons-sikring i foten.

Effekten mot lateral erosjon kan dermed være nær 100%, mens virkningen på sedimenttransporten avhenger av hvor mye den aktuelle prosessen bidrar med. Som eksempel på dette kan nevnes at en full sikring mot alle naturlige prosesser i Vikkas nedbørfelt, unntatt bakkesiget, ville redusere naturlig erosjon med ca 45%, mens tilsvarende sikring i Slemdalsbekken ville redusere naturlig erosjon med ca 95%.

Effekten på den totale sedimenttransport avhenger også av jordbrukets bidrag.

Bruk av geotekstiler forutsetter begrenset påkjenning. På grunn av begrenset varighet, der løsningen er basert på at skråningene gror til, er effekten lavere enn for steinanlegg. Tilplanting/ tilsåing kan i de områder som er aktuelle å sikre i Leira kun anses som et supplerende tiltak ved siden av andre metoder. Tetthet og slitasjestyrke av vegetasjonsdekket vil være avgjørende for effekten.

Ved bruk av dødt tremateriale kan virkningen forventes å bli like god som ved steinsikring i de første årene etter anlegg. Vi antar likevel at man i middel må regne med noe mindre effekt. Effekten over en lengre tidsperiode vil være svært avhengig av hvor godt en følger opp vedlikeholdsbehovet.

Både for geotekstiler og for tremateriale er det behov for mer erfaringsmateriale gjennom praktiske forsøk for å kunne si noe nærmere om effekt og varighet av konstruksjonene. For tremateriale gjelder generelt at det som blir liggende permanent under vann har svært lang holdbarhet, men det som blir liggende innenfor årlig vannstandsvariasjon er sterkt utsatt for råde.

6.3.2 Effekt på stabilitet; kvikkleireskred m.v.

På nedre Romerike er det siden siste istid gått flere hundre skred av ulik størrelse; fra noen få hundre m³ til flere hundretusen m³. De største leirskredene i Norge må ha innbefattet flere millioner m³ jord- og leirmasser. På grunn av kvikkleireskred er det i Norge gått tapt verdier for flere titalls millioner kroner og flere hundre mennesker er tatt av skredene.

Det er gjennom kartleggingsarbeider konstatert at skredene dels er utløst ved naturlig årsaker og dels gjennom menneskelige inngrep.

Av hovedårsakene innenfor det vi kan kalle naturlig utløste skred er erosjon den viktigste.

Ved vertikal eller lateral erosjon, hurtig eller langsom, vil stabiliteten av bekkedal-skråningene reduseres. Særlig stor er skredaktiviteten umiddelbart under eller etter større nedbør- eller snøsmeltingsperioder som gjennom en kombinasjon av øket erosjon og øket grunnvannstrykk kan utløse leirskred.

Gjennom erosjonssikring av bekkeløpene vil en av hovedårsakene til kvikkleireskred kunne reduseres betydelig.

6.3.3 Virkning for natur- og miljøinteresser lokalt

De største negative virkninger fra anleggsfasen vil i de fleste tilfelle forsvinne gradvis, ved at opprotede masser jevnes ut, vegetasjon etableres og områdene stabiliseres. Det er en forutsetning at forurensningsmessig vil forholdene bli bedre enn de var før inngrepet. Men når inngrepene endrer et av naturforholdene, resulterer det vanligvis i flere endringer for lokalmiljøet for dyr og planter. Om dette betyr dramatiske endringer for dyre- og plantesamfunnene kan det ikke sies noe generelt om, det må vurderes i hvert tilfelle.

Sikringstiltakene kan også få positive eller negative virkninger for tilgjengelighet til områdene, og for bruksverdien i friluftslivsammenheng.

En bør søke å benytte metoder som i minst mulig grad lager varige skader i terrenget, som veier o.l. Bruk av bunnen i ravinen som adkomstvei, hvor adkomst og sikring integreres vil sannsynligvis gi minst skader på naturen, men kan kanskje gi dramatiske følger for livet i bekken. Muligens er det bare kortvarige endringer. Sikring ved hjelp av lokalt tremateriale vil kunne være en gunstig metode, sett fra natur- og miljøhensyn, under den klare forutsetning at det ikke fjernes for meget av kantvegetasjonen. Sannsynligvis må det hentes endel tremateriale fra områdene utenfor selve kantvegetasjonen.

Bruk av buhne (steinrampe) i yttersving har neppe store konflikter mot miljøet. Det samme kan gjelde mindre terskler over korte strekninger.

Bekkelukking er en metode som står i sterk konflikt med dyreliv og natur- og miljøvernsyn generelt.

Ut fra natur- og miljøhensyn kan det ikke gis en generell anbefaling for eller mot sikringstiltak. Forholdene må kartlegges og vurderes i hvert tilfelle, og sees i sammenheng med andre fordeler og ulemper. Den totale mengde med forbygninger i et distrikt bør også tas med i vurderingene når et tiltak planlegges.

Tilplanting og tilsåing der dette kan være et egnet tiltak, synes gunstig.

6.4 SAMMENSTILLING AV ULIKE LØSNINGER

Nedenfor er forsøkt å sammenstille ulike sikringsmetoder med hensyn til kostnader og virkning/ konsekvenser forøvrig. Det er også her tatt utgangspunkt i erosjonsprosess og tilhørende aktuelle tiltak.

Det tas utgangspunkt i den aktuelle erosjonsprosess. De ulike sikringsmetoder og materialer søkes deretter kostnadssatt. Valg av metode og materiale vil avhenge av lokale forhold og dessuten av virkning, tilgjengelighet, massetilgang, vedlikehold m.v.

Kostnadsanslagene må anses som retningsgivende for antydning av relative kostnader. De reelle kostnadene kan dessuten variere mye, avhengig av de lokale forhold. Levetid uttrykker antatt, gjennomsnittlig levetid, uten vedlikehold.

Grunnlaget for anslagene er svært forskjellig, idet vi f.eks. for bruk av stein har mye materiale, om ikke så mye fra slike forhold som i ravinesystemene i Leira. For mange av de andre typene har vi måttet basere oss på innhentede priser på materialer samt anslag på tidsforbruk i manuelt arbeid.

Særlig for bruk av stedlige materialer, som tømmer og faskiner savnes erfaringstall. Vi ser det derfor som vesentlig at også kostnadsdelen følges opp skikkelig i forbindelse med eventuell utførelse av arbeidene som planlegges i Slemdalsbekkens nedbørfelt.

Virkningene framgår av beskrivelsene i kap. 6.3.

Utgangspunktet for hele prosjektet er sikring i leirområder, spesielt i raviner med sterk erosjon, for å redusere sedimentbelastningen på vassdraget nedstrøms. Denne effekten kommer i tabellen kun fram som effekt på erosjonsprosessen, uttrykt på en skala fra meget god til mindre god. Effekten i form av tonn pr. år vil avhenge av erosjonsintensiteten på den aktuelle strekning, og hvor stor andel av denne erosjonen som skyldes den prosess vi sikrer mot.

Den miljøgevinst som oppnås ved redusert sedimenttransport er ikke tatt med under miljøkonsekvenser i tabellen. Her er kun vurdert konsekvensen lokalt som følge av de inngrep som følger av sikringsarbeidet. En avveining mellom eventuelle ulemper lokalt mot fordeler for vassdraget nedstrøms, må gjøres konkret i den enkelte sak.

Det er viktig å være klar over at noen virkninger vil være varige, mens andre er av midlertidig karakter. Eksempel på midlertidige virkninger er sår i terrenget og opproting av finmasse i elveløpet i forbindelse med anleggsfasen. De fleste typer tiltak vil således kunne ha store negative miljøkonsekvenser i anleggsfasen, mens de negative miljøvirkninger på lang sikt vil kunne være små.

Tabell 11: Sammenstilling av kostnader og effekter ved ulike sikringsmetoder mot bunnsenking (vertikal erosjon).

SIKRING AV BUNN OG SIDER					
Materiale	Kostnad, anlegg (pr.løpe-meter)	Levetid (gj.snittlig)	Effekt på erosjonsprosessen	Miljøvirkninger	
				Vann-kvalitet	Flora/fauna, lokalt
Stein	850,-	> 100 år	++	++	-
Gabioner	950,-	50 år	++	++	--
Geotekstiler	400,-	25 år	+	+	0
Tømmer og faskiner	240,-	20 år	+	+	0
TERSKLER					
Materiale	Kostnad, anlegg (pr.stk)	Levetid (gj.snittlig)	Effekt på erosjonsprosessen	Miljøvirkninger	
				Vann-kvalitet	Flora/fauna, lokalt
Sprengt stein	17.000,-	> 100 år	++	++	0
Gabioner	32.000,-	50 år	++	++	-
Tømmer og faskiner	9.000,-	25 år	+	+	+
Jordsekker	9.000,-	50 år	+	+	0

Tegnforklaring

++ = store positive konsekvenser

+ = positive konsekvenser

0 = små konsekvenser

- = negative konsekvenser

-- = store negative konsekvenser

Tabell 12: Sammenstilling av kostnader og konsekvenser ved ulike sikringsmetoder mot bunnsenking (vertikal erosjon).

Materiale	Kostnad, anlegg (pr.løpemeteter)	Levetid (gj.snittlig)	Effekt på erosjonsprosessen	Miljøvirkninger	
				Vann-kvalitet	Flora/fauna, lokalt
Stein	850,-	> 100 år	++	++	-
Stein m/buhner (ved stor påkjenning)	1250,-	> 100 år	++	++	-
Gabioner	1300,-	50 år	++	++	--
Geotekstiler	570,-	25 år	+	+	0
Tømmer og faskiner	330,-	25 år	+	+	0
Tilsåing, planting (kun ved begrenset påkjenning)	70,-	20 år	+	+	+

Tegnforklaring

++ = store positive konsekvenser

+ = positive konsekvenser

0 = små konsekvenser

- = negative konsekvenser

-- = store negative konsekvenser

Sikring med stein gir solide konstruksjoner som krever lite vedlikehold. Ulempen er at det krever tunge maskiner som igjen fordrer gode adkomstveger. Ved hel bunnsikring er de inngrep som følger av opparbeiding av adkomst og den endring som følger av sammenhengende steinlag i bunnen av ravinen vurdert som noe negativ. Ved bruk av stein til terskler blir ikke steinlaget sammenhengende. I tillegg vil tersklene skape et variert strømbilde med stryk, kulper og stilleflytende partier. Totalt sett er derfor terskler vurdert som positive for miljøet lokalt, under forutsetning av at adkomstvegene ikke blir for dominerende.

Bruk av gabioner synes lite aktuelt. De blir både kostbare og er vurdert som svært negative miljømessig.

Geotekstiler (kokosmatter) er vurdert å ha mindre konsekvenser for miljøet lokalt enn steinsikring. Det er i tillegg en noe rimeligere løsning, men det er behov for nærmere utprøving for å se effekten over tid. Geotekstiler er ikke anbefalt ved stor belastning, og vil nok derfor få begrenset anvendelse til denne type sikring.

Bruk av stedlig tremateriale (tømmer/ faskiner) krever lite inngrep for adkomst m.v. For miljøsidene er konsekvensene derfor vurdert som små. Ved bygging av tømmerteriskler er konsekvensene vurdert som positive, i og med beskjedne inngrep og fordeler som følge av terskelvirkningen, som beskrevet ovenfor. Det er også en rimelig løsning, men det er behov for å gjøre erfaringer både på gjennomføringssiden og med hensyn til effekt over tid.

Tilplanting/ tilsåing er en rimelig metode, som også vurderes som positiv for miljøet. Metoden kan bare brukes mot sideveis erosjon, og må i stor grad betraktes som et supplement til annen sikring, i områder hvor påkjenningen er moderat.

For jordsekker til bruk i terskler savnes erfaring med hensyn til byggemåte m.v. Kostnad og effekt er derfor beheftet med stor usikkerhet. Miljømessig er det vurdert som mer positivt enn bruk av stein, først og fremst fordi inngrepene blir små ved at massene kan hentes lokalt.

Lukking er ansett som uaktuelt i Leira først og fremst av miljøhensyn, men også av sikkerhetsgrunner, med fare for tilstopping av rør m.v.

Denne sammenstillingen og vurderingen må bli noe skjematisk. I praksis vil valg av løsning og materiale måtte vurderes nærmere i forhold til lokale forhold.

6.5 SAKSBEHANDLING, GJENNOMFØRING

Til gjennomføring av tiltak kan tenkes en rekke aktører. Dette kan være grunneiere eller andre som har interesse av å hindre skader som følge av erosjon lokalt. Som kjent fører erosjon i leirområder også til utglidninger som kan true hus, vegger, dyrka mark m.v. Ved kvikkleireskred kan konsekvensene bli katastrofale.

Dersom sikringen er motivert først og fremst ut fra hensynet til vassdraget nedstrøms, vil et samarbeid være aktuelt mellom alle berørte, og bidrag fra offentlige etater blir særlig aktuelt.

Som for alle vassdragstiltak av et visst omfang, må det gjennomføres en vurdering av tiltaket i forhold til vassdragslovens bestemmelser. Det må foretas vurderinger av teknisk og miljømessig art av tiltaket. Mulige finansieringsmåter kan være gjennom diverse offentlige støttetiltak; sysselsettingstiltak, miljøtiltak m.m.

For planlegging og gjennomføring av sikringsarbeider i vassdrag kan interesserte parter som ønsker bistand, sende søknad til NVE. NVE gjør en foreløpig vurdering av behovet for sikring. Dersom saken anses aktuell, står NVE v/ Vassdragsteknisk seksjon deretter for nødvendige undersøkelser og planlegging av aktuelle tiltak.

Sikringsarbeider i regi av NVE følger en fastlagt prosedyre for saksbehandling. En plan for tiltaket sendes via fylkesmannen til distriktet til uttalelse fra berørte parter. Det kan i forbindelse med høringen eller i lys av uttalelser bli aktuelt å revidere planen. På bakgrunn av uttalelsene i distriktet og fylkesmannens vurdering av saken, samt egen vurdering av sakens samfunnsmessige berettigelse, tar NVE stilling til om det gis bevilgning fra NVE.

Dersom saken bevilges på NVEs budsjett blir saken på nytt sendt distriktet via fylkesmannen. Kommunen må avgi et kommunalt garantivedtak for ansvar og vedlikehold. Det kan tas undergaranti fra berørte parter. Distriktet må videre bidra med minimum 25% i finansieringen. Når dette er avklart, og forutsatt at fylkesmannen ikke har innsigelser, kan tiltaket gjennomføres.

For saker med betydelig konsekvenser for almene interesser i vassdraget, kan det bli aktuelt å kreve konsesjonsbehandling i henhold til Vassdragslovens §§ 104-106. Fylkesmannen foretar i samråd med konsesjonsmyndigheten i NVE en vurdering om søknad om konsesjon skal kreves.

6.6 TRÆR SOM STABILISERENDE ELEMENT I LEIRSKRÅNINGER

6.6.1 Innledning

Ett av delprosjektene tar for seg bruk av vegetasjon til stabilisering av skråninger. Til utredning av dette tema ble inngått avtale med Lars Helge Frivold ved Institutt for skogfag ved Norges Landbrukshøgskole. Det vises til separat rapport (Frivold, 1991) for nærmere detaljer.

Arbeidet tar for seg den rollen trær kan spille som stabiliserende element. Det bygger på et rent litteraturstudium. Hovedvekten er lagt på å beskrive ulike treslag med tanke på hvor egnet de kan være til å stabilisere leirskråninger.

6.6.2 Treslagenes egnethet for stabilisering av leirskråninger.

På meget erosjonsutsatt mark anbefales et varig, vernede vegetasjonsdekke. Skog er den vegetasjonsformen som gir best vern. Av skog er det uensartede bestand av treslag med dyptgående rotsystem som gir best stabilitet. (Med uensartede bestand menes her skog med stor variasjon m.h.t. treslag, trehøyder m.v.) Hvor rasfaren er stor, bør vekten av trærne være liten, og trær som setter rotskudd og stubbeskudd er fordelaktige. Teknikken som nyttes ved skogpleien må være skånsom og gi minst mulig markskader.

Kostnadsforhold og grunneiers interesser kan gjøre det nødvendig å fravike dette idealet i større eller mindre grad.

Den skogformen som ofte går for å gi best økonomisk utbytte på relativt kort sikt, nemlig enaldrede, rene granskoger som forynges ved snauhogster, ligger fjernt fra idealskogen på erosjonsutsatte leirskråninger. Her hører gran hjemme bare som innblandingstre sammen med treslag med dypere rotsystem. På særlig ustabil mark bør gran frarådes helt.

For hurtig stabilisering synes gråor, selje, pil, vier og muligens rogn å være særlig godt egnet; på våt mark også svartor og kanskje tindved. Av utenlandske arter peker grønnor seg ut som interessant, ved siden av utenlandske pilearter.

Forøvrig har hengebjørk, dunbjørk, osp og ask gode egenskaper blant de større trærne.

Av utenlandske treslag kan nevnes balsampoppel og europeisk edelgran. Av klimatiske grunner er lønn, lind, eik og bøk lite aktuelle som erosjonsvern på Romerike, selv om de kan ha gode egenskaper. Alm bør en ikke satse på i dag p.g.a. faren for sykdom (almedød).

Som verdifulle elementer kan hassel, furu, rogn og kirsebær inngå.

Liten verdi som erosjonsvern har gran og hegg.

For drenering er det viktig at trærne hurtig kommer i god vekst; dette har mer å si enn treslaget i og for seg. Den drenerende virkningen av vegetasjon er imidlertid ubetydelig i vinterhalvåret. Vannforbruket vil variere med de lokale forhold.

De treslag som gir best stabilisering av leirskråninger gir ikke nødvendigvis den beste vannkvaliteten hva innhold av f.eks. nitrogen angår. Man må altså foreta en avveining i hvert enkelt tilfelle.

Snauhogst bør - eller må - unngås på utsatt mark, men virkningene av snauhogst vil dempes hvis trærne som sto der setter stubbeskudd eller rotskudd.

Trær nær større bekker og elver, som velter ut i vassdraget og føres med strømmen, kan gi betydelig risiko for tilstopping av flomløp på dammer (jfr. Børset 1990). Dette er et argument mot å velge liten eller ingen bestandspleie, i hvert fall nær elveløp. Det skal imidlertid til nokså intensivt ettersyn og pleie langs elvekantene for å hindre slike tilfelle.

Forøvrig er det helst andre interesser enn erosjonsvern som taler for pleie av skogbestand, når de først er etablert. Det kan f.eks. være grunneiers interesse av tømmerproduksjon, eller landskapsestetiske momenter.

En tiltaksplan for å begrense erosjon i skråninger, ravinedaler og bekkefar må omfatte hele tilsigsområdet.

En slik plan bør innledes med en arealbeskrivelse, i relasjon til vassdraget. Her markeres og avgrenses teiger som hver for seg antas å være noelunde enartede med hensyn på jordforhold, bratthet m.m., og det lages behandlingsforslag for hver teig. Arbeidet må skje i samarbeid mellom fagfolk fra ulike fagområder og andre interesserte parter, ikke minst grunneierne.

I noen tilfelle må en regne med kulturer som ledd i utprøving av treslagsvalg og metoder, der det ikke er tilstrekkelig fagkunnskap i dag.

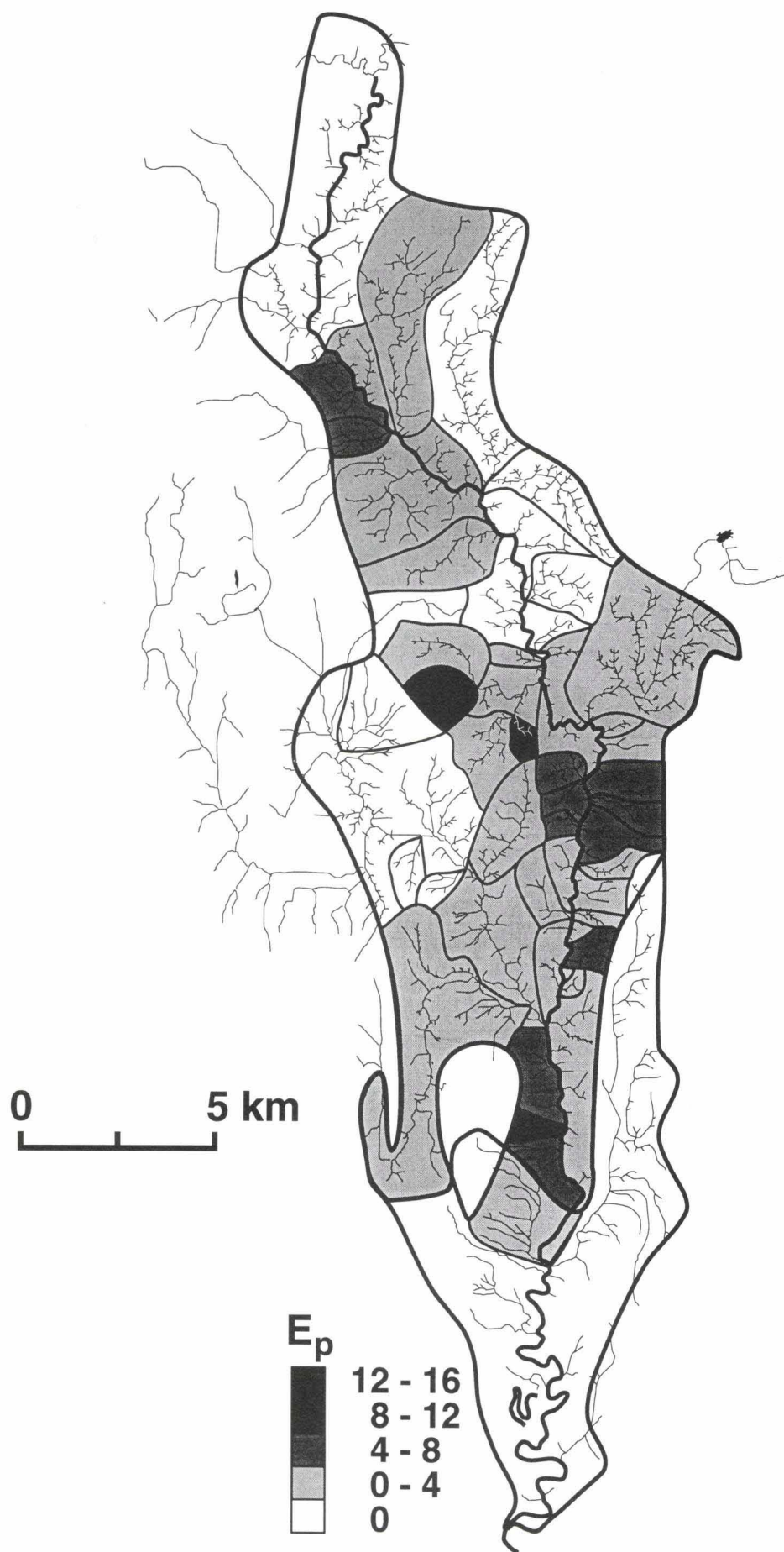
En oversikt over treslagene og noen av deres egenskaper er satt opp meget skjematisk i appendiks 2.

6.7 PRIORITERING AV OMRÅDER FOR EROSJONSSIKRING

Som det går fram av sedimentbudsjettet i kap. 4, er det stor variasjon i erosjonsintensitet mellom delfeltene. Ved vurdering av områder for aktive erosjonssikringstiltak, betyr dette at man kan oppnå stor reduksjon av sedimenttransporten ved å sikre noen utvalgte bekker, som bidrar med størst andel til sedimentbudsjettet.

I prioriteringssammenheng vil det i tillegg være relevant å vurdere andre opplysninger, som kvikkleireforekomst og omfanget av verdier som er truet ved eventuelle større skred. I denne omgang har vi ikke gått nærmere inn på disse faktorer, men avgrenser framstillingen til prioritering ut fra erosjonsintensitet.

Figur 33 viser hvilke delfelt som anbefales undersøkt først for nærmere vurdering med tanke på erosjonssikring i bekkeløpet. Utplukkingen er basert på høye E_p -verdier og derav høy erosjonsintensitet ($E_p > 4$).



Figur 33: Delfelt som anbefales nærmere undersøkt med tanke på erosjonssikring.

I disse bekkene er det bunnsenkingen som forårsaker det vesentlige av erosjonen. Det primære må da bli å redusere den vertikale erosjonen, enten i form av hel bunnsikring eller ved terskelbygging. I alle bekker med høye Ep-verdier må det imidlertid forventes at lengdeprofilen er såvidt bratt at punktvis terskelbygging ikke er aktuelt, da disse i praksis vil komme så tett at man i realiteten etablerer en hel bunnsikring. At det kan være et ønske å variere fallforholdene noe, vil være en annen sak.

Det må presiseres at bekkene må detaljundersøkes før en kan si noe konkret om effekten av tiltak. Spesielt må det undersøkes om det finnes fjellterskler som henger opp lengdeprofilen.

I tillegg til sikring av bekker med stor grad av bunnsenking, kan det være aktuelt å sikre spesielle punktkilder langs hovedløpet i Leira og Gjermåa. Utslagsgivende for prioritering vil antakelig måtte være en kombinasjon enten med kvikkleireforekomst eller betydelige økonomiske verdier som er truet.

I områder med lave Ep-verdier kan tilplanting av skråninger med sikte på reduksjon av bakkesig og mulig bedring av stabiliteten være et aktuelt tiltak. Valg av treslag bør da skje ut fra en samlet vurdering av virkning på stabilitet av skråninger, miljøeffekter forøvrig og økonomi.

6.8 EKSEMPEL, PLAN FOR TILTAK I SLEMDALSBEKKEN

Innenfor prosjektet er det utarbeidet en plan for utprøving av sikringstiltak i bekkeløp innenfor et område oppstrøms målestasjonen i Slemdalsbekken. Delfeltet har en høy Ep-verdi og målingene av sedimenttransporten har vist at erosjonsintensiteten er svært høy. Befaringer har vist at det i området har foregått og foregår tildels betydelig bunnsenking med påfølgende utrasing av skråninger.

Planen beskriver et videreføringsprosjekt i to deler:

Delprosjekt 1: anleggsmessig utførelse av tiltak

Delprosjekt 2: oppfølging av tiltakene

Det legges vekt på at andre metoder enn de tradisjonelle skal utprøves. Innenfor planen er derfor foruten bruk av stein planlagt bunnsikring med geotekstiler, faskiner, terskler

av tømmer, jordsekker m.v.

Samtidig vil effekten av tiltakene under og etter anleggsfasen bli fulgt opp innenfor en rekke fagområder. Herunder nevnes:

- økonomi
- anleggsteknikk
- sikringsmetoder, teknisk vurdering
- sedimenttransport
- miljøvirkninger (vegetasjon, dyreliv, landskap, friluftsliv)

De vurderinger som her blir gjort vil ha generell interesse ut over sikring innenfor Leiras nedbørfelt, ved at miljøvirkninger av denne type tiltak dokumenteres. Både teknisk, kostnadmessig og miljømessig vil en få svar på om en del nye eller mindre brukte metodene er egnet.

REFERANSER

- Akershus fylkeskommune, 1991 Arealbruk, tilgjengelighet og verneinteresser i Leiravassdraget. Rapport fra ATV-Leira prosjektet, 80 s.
- Bjerrum, L. 1971 Kvikkleireskred. Et studium av årsaksforhold og forbygningsmuligheter. NGI-publikasjon nr 89.
- Bogen, J. og Nordseth, K. 1986 The sediment yield of Norwegian rivers. S 233 - 252 i: B. Hasholt(red) Partikulært bundet stofftransport i vand og jorderosjon, NHP - rapp. nr 14, KOHYNO.
- Bogen, J. 1992 Monitoring grain size of suspended sediment in rivers. s 183 - 190 i : J. Bogen, D.E.Walling og T. Day, Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins. IAHS - publication no 210.
- Bogen, J. Moen, E. & Sandersen, F. 1990 Forurensning som følge av leirerosjon og betydningen av erosjonsforebyggende tiltak. Foreløpig rapport, fase 2. (Upubl.) NVE/NGI.
- Bogen, J. & Sandersen, F. 1991 Sedimentkilder, Erosjonsprosesser og sedimenttransport i Leira - vassdraget på Romerike. NVE publikasjon nr 20. 126 s.
- Brynildsen, A. 1985 Fosfor i avrenning fra jorderosjonsområder. Samarbeidsutvalget i hydrologi, Univ. i Oslo rapp nr 7, 103 s.
- Frivold, L.H. 1991 Trær som stabiliserende element i leirskrånninger. Med spesiell relevans til Romerike. Institutt for skogfag, NLH, 45 s.
- Hattinger, H. 1976 Torrent control in the mountains with reference to the tropics. p. 119-134 in: Kunkle, S.H. & Thames J.L. (red) "Hydrological techniques for upstream conservation." FAO Conservation Guide nr 2, Rome 1976, 134 s.
- Klakegg, O. 1992 Erosjonsrisikokart. Kobling av digitale jordsmonnskart og satellittdata ved bruk av GIS. Kart og plan, vol. 5. s 99 - 101.

- Krogstad, T. 1986 Fosfor i erosjonsmateriale fra leir- og siltrike jordarter s 159-168 i: B. Hasholt (red) Partikulært bundet stofftransport i vand og jorderosjon. NHP-rapport nr 14. KOHYNO.
- Lundekvam, H. 1992 Resultat frå nyare forsøk med erosjon. Foredrag ved konferanse om "Jordarbeiding og erosjon", Quality Park Hotel, Kolbotn, 17.-18. sept. 1992.
- Probst, J.L. 1989 Hydroclimatic fluctuations of some European rivers since 1800, s 44-55 i: G.E. Petts, H. Møller og A.L. Roux (red). Historical change of large alluvial rivers, Western Europe. J.Wiley & Son.
- Skarbøvik, E. 1993 Transport of phosphorus and fine grained sediments in rivers. Dr scient oppgave, Geografisk institutt, Rapportserie Hydrologi Universitetet i Oslo. Rapport nr 37.
- Sælthun, N.R., Bogen, J., Flood, M.H., Laumann, T., Roald, L.A., Tvede, A.M. & Wold, B. 1990 Klimaendringer og vannressurser. Bidrag til den interdepartementale klimautredningen. NVE-publikasjon nr 30.
- Walling, D. E. & Quine, T. 1990 Radionucleides to identify sediment sources in the Leira catchment, Norway. Final report Dec. 1990. Dept. of Geography, University of Exeter, UK.

Appendiks 1 Sedimentføringskurver som er benyttet for å estimere suspensjonstransport G_s t/døgn fra vannføring Q i m^3/s ved brudd i måleserien.

Krokfoss:	$G_s = 0.0123 \cdot Q^{2.7}$ ved $Q > 18 m^3/s$ $G_s = 0.0123 \cdot Q^{3.17}$ ved Q mellom $2 m^3/s$ og $18 m^3/s$ $G_s = 0.4$ ved $Q < 2 m^3/s$
Slemdalsbekken:	$G_s = 204 \cdot Q^{0.654}$ ved $Q > 1 m^3/s$ $G_s = 200 \cdot Q^{1.76}$ ved $Q \leq 1 m^3/s$
Vikka:	$G_s = 2.5 \cdot 10^8 \cdot Q^{8.4}$

Appendiks 2 Oversikt over treslag som kan være aktuelle i ravinedaler på Romerike, og noen av deres egenskaper. Oversikten er sterkt skjematisk, og rommer ikke nyanser.

Treslag	Stammehøyde H = Høy M = Middels L = Lav	Rotttype Pe = Pelerot Fa = Fastrot Fl = Flatrot V = Variabel	Nat. Foryngelse Frø St = Stubbeskudd Ro = Rotskudd	Ungdomsvekst H = Hurtig M = Middels L = Langsom
	H M L	Pe Fa Fl V	Frø St Ro	H M L
Gran	H	Fl	Frø	L
Furu	H	Pe V	Frø	M
Einer	L	Pe V	Frø	L
Edelgran	H	Pe	Frø	L
Dunbjørk	H M	Fa V	Frø St	M
Hengebjørk	H	Fa V	Frø St	H M
Osp	H M	Fa	Frø St ¹ Ro	H
Poppel	H	V	St Ro	H+
Gråor	M	Fa V	Frø St Ro	H
Svartor	H M	Fa	Frø St	H M
Grønnor	L	Fa	Frø St Ro	H
Ask	H	Fl ²	Frø St	M
Hassel	L	Fl (?)	Frø St Ro	L
Hegg	M L	Fl	Frø St Ro	H
Kirsebær	M	Fa V	Frø St (Ro)	M
Rogn	L	V	Frø St	H
Selje	M L	V	Frø St Ro	H
Pil og vier	L	V	Frø St Ro	H+
Tindved	L	Pe	Frø St Ro	M

¹ I ung alder

² Med kraftige senkerøtter

I 1993 ER FØLGENDE PUBLIKASJONER UTGITT:

- Nr 1 Inger Marie Traagstad og Svein Homstvedt: Seminarrapport: Vassdragsinformasjon i forvaltningen. (168 s.)
- " 2 Oddvar Fossheim (red.): Retningslinjer for inngrep i vassdrag. Saksbehandling i forhold til vassdragslovens §§ 104-106 m.v. (almene interesser). (35 s.)
- " 3 Opprusting og utvidelse av vannkraftverk. Erfaringer fra gjennomførte prosjekter, Toverud kraftverk, Oppland. (90 s.)
- " 4 Sverre Husebye: LRV-Prosjektet: Utnyttelse av vannvolumet under laveste regulerede vannstand i ekstreme tørrår. (51s.)
- " 5 Knut Gjermundrød (red.): Veiledning i planlegging av mikro- og minikraftverk. (32 s.)
- " 6 Arne Venjum (red.): Oversikt over vedtak i tvistesaker 1991 og 1992. Tariffer og vilkår for overføring av kraft. (34 s.)
- " 7 Katinka L. Greve og Pål Meland: Drøfting av målene for norsk enøk-politikk. (17 s.)
- " 8 Marit Lundteigen Fossdal og Nils Roar Sæthun (redaktører): Energiplanleggingsmodeller - klimaendringer. Rapport fra nordisk ekspertmøte. (Energy planning models - climate change). (135 s.)
- " 9 John Cock: Pris på elektrisk kraft til husholdning 1993. (7 s.)
- " 10 Christian H. Johansen: Kraftmarkedsundersøkelse - pr. 1.1.1993. (24 s.)
- " 11 Heidrun Kårstein (red.): Hydrologisk månedsoversikt - Artikkelsamling 1991-1992. (43 s.)
- " 12 Kåre Utaaker: Virkninger av vassdragsreguleringer på lokalklimaet. (121 s.)
- " 13 Per Einar Faugli, Arne H. Erlandsen og Ollianne Eikenæs (redaktører): Inngrep i vassdrag; konsekvenser og tiltak - en kunnskapsoppsummering. (639 s.) 2 bind.
- " 14 Didrik Hjort: Statistikk over overføringstariffer i regional- og distribusjonsnett 1993. (65 s.)
- " 15 John E. Brittain og Jan Henning L'Abée-Lund: Biotopjusteringsprogrammet - status 1992. (60 s.)
- " 16 Jon Eilif Trohjelld og Inge Harald Vognild: Jordkabel som alternativ til luftledning. Sammenligning av økonomiske og tekniske forhold ved spenninger over 22 kV. (62 s.)
- " 17 Ollianne Eikenæs: Geofaglege undersøkingar i Troms og Finnmark fylke. Verneplan I og II vassdrag. (73 s.)
- " 18 Gunnar Østrem (red.): Ferskvannstesaurus, en første, foreløpig del av Norsk miljøtesaurus. (236 s. + diskett)
- " 19 Sverre Husebye (red.), Jim Bogen, Anne Kronen Helgestad og Lars-Evan Pettersson: Miljøkonsekvenser av veiutbygging mellom Longyearbyen og Svea: Avrenning, erosjon og landskap. *Environmental impacts of road construction between Longyearbyen and Svea: Runoff, erosion and landscape.* (40 s.)
- " 20 Jan Slapgård (red.): Kostnader for kraftverksprosjekter pr. 01.01.1992. (31 s.)
- " 21 Jim Bogen, Hallvard Berg og Frode Sandersen: Forurensning som følge av leirerosjon og betydningen av erosjonsforebyggende tiltak. Sluttrapport. (86 s.)