Sandslitasje på vannkraftturbiner

Kilder og tiltak

RAPPORT 1984

Prosjektansvarlig:
**Vassdrags-
regulantenes
forening**

NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIDIREKTORAT
BIBLIOTEKET

SANDSLITASJE PÅ VANNKRAFTTURBINER

RAPPORT VEDRØRENDE KILDER FOR MATERIALTILFØRSEL OG TILTAK FOR OPPSAMLING AV SAND VED KRAFTVERK

Komitéen for undersøkelse
av sandslitasje på turbiner

FORORD

ORIENTERING OM PROSJEKTET SANDSLITASJE PÅ TURBINER

Bakgrunn

Sira-Kvina Kraftselskap tok våren 1977 kontakt med Servicekontoret for driftserfaringer og anmodet kontoret om å foreta en undersøkelse omkring sandslitasje på turbiner.

En komité som fungerte som en arbeidsgruppe arbeidet med spørsmålet i ca. 1 år og ga 19.6.1978 ut en rapport, SD nr. 9, "Sandslitasje på turbiner", som hadde til formål å kartlegge problemstillingen. Rapporten tok for seg forskjellige sider ved sandslitasje med spesiell vekt på følgende forhold:

- Geologi (mineralogi)
- Sandtransport i tunneler, sandfang
- Økonomi

Rapporten konkluderer med at problemet er for dårlig undersøkt, spesielt med hensyn til mineralogi og økonomiske konsekvenser. Samtidig er det begrenset hva man kan hente av opplysninger fra utlandet. Skulle man derfor kunne bidra til å forbedre forholdene ved norske kraftverk, ville det bli nødvendig å gjennomføre et forsknings- og utredningsprosjekt. RL sa seg villig til å stå bak et slikt prosjekt, og utarbeidet sammen med komitéen kostnadsoverslag og prosjektplan for et 3 års forskningsprosjekt.

Beskrivelse av prosjektet

Prosjektet kom i gang ca. 1.4.1980 og var forutsatt avsluttet i løpet av 3 år. I beskrivelsen av prosjektet er følgende angitt som formål:

> *Fremskaffe nødvendig grunnlag for rasjonell vurdering av sandslitasje på turbiner og annet mekanisk utstyr for teknisk/økonomisk prosjektering av kraftanlegg og utbedring av slitasjeproblemer ved eksisterende anlegg.*

Arbeidsprogrammet er delt opp i 3 hovedområder. Målsettingen innenfor disse 3 områdene er:

1. *Å kunne anslå sannsynlighet og utviklingshastighet for skadelig sandslitasje ut fra opplysninger om geologiske (mineralogiske) forhold (tunneltrasé, bekkeinntak, inntaksmagasiner etc.) og turbinkonstruksjoner.*

2. *Ut fra gitte forutsetninger å kunne vurdere sandtransporten gjennom tunnelsystemet, planlegge tiltak (sandfang e.l., og kjenne tiltakenes virkning for å redusere turbinslitasje.*

3. *Etablere underlag for å kunne vurdere de totale kostnadsmessige konsekvenser av turbinslitasje, dvs. redusert virkningsgrad, revisjonskostnader, driftsstans og eventuelt vanntap.*

Det ble i første rekke lagt vekt på å vurdere norske forhold og å komme frem til løsninger tilpasset våre kraftverk. Det skulle likevel i en viss grad etableres kontakt med utlandet, særlig alpelandene, der slitasjeomfanget synes å være vesentlig større enn hos oss.

For å få en oversikt over omfanget av sandslitasje i Norge, og for å få et inntrykk av flest mulige sider ved sandslitasje, ble det etablert kontakt med 10 - 15 kraftverk. Disse stilte seg alle meget positive til å samarbeide med prosjektet, og stilte sine anlegg til disposisjon for undersøkelser. I flere tilfeller ble også mannskaper og økonomiske midler stilt til rådighet.

Mye av arbeidet er lagt på geologien, både for å finne kildene for sanden og for å analysere den mineralogiske sammensetning. Fra tidligere forelå en god del erfaringer fra sandtransport i tunneler, sandfang o.l.

Spørmålene er blitt bearbeidet av fagfolk i samarbeid med komitéens medlemmer. Blant annet til innhenting og bearbeiding av feltprøver har diplomkandidater ved NTH vært til stor nytte.

Prosjektkostnader

Prosjektet har budsjettert med utgifter på ca. 1,4 mill. kr. i løpet av 3

år. De kilder som har bidratt er:

1. NTNF
2. Konsesjonsavgiftsfondet
3. Kraftverkene
4. Egeninnsats komitémedlemmer og andre

Bidragene har dels vært pengebidrag, dels egeninnsats av komitémedlemmene og deres organisasjoner. Et vesentlig bidrag har også vært de undersøkelser som er utført i samarbeid med prosjektet, og som er betalt direkte av det enkelte kraftverk.

Styring av prosjektet

Den komité som utarbeidet den første rapporten, har fortsatt som prosjektets styringskomité.

Komitéens medlemmer er:

Dosent Ragnar Dahl, Geologisk Institutt, NTH
Sjefing. Rolf Dillner, Sira-Kvina Kraftselskap
Siv.ing. Svein Jenssen, Sivilingeniør Nybro Hansen A/S
Dr. ing. Dagfinn Lysne, konsulent
Teknisk sjef Sigurd Pettersen, Vassdragsregulantenes forening
(fra sommeren 1983, teknisk sjef Gunnar Brox)

Komitéens formann har vært Lysne, mens Pettersen har vært prosjektkoordinator og sekretær.

Følgende personer har vært knyttet til prosjektet som faglige medarbeidere:

Lab.ing. Torgeir Blindheim, Geologisk Institutt, NTH
Overing. Ragnar Hartmann, NVE-Statskraftverkene
Gruppeleder Kåre Tvinnereim, NHL/VHL

Fra 1.1.1982 da Blindheim gikk over i ny stilling, ble det meste av hans engasjement overtatt av siv.ing. Ola By, Geologisk Institutt, NTH.

En rekke diplomkandidater har dessuten utført undersøkelser i samarbeid med prosjektkomitéen.

INNHOLDSFORTEGNELSE: Side

SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER 3

1. INNLEDNING 7

2. KILDER 9

2.1 Generelt om forekomster og løsmasser 9

2.2 Tilførsel av løsmasser fra ytre kilder 10
2.2.1 Elveinntak 10
2.2.2 Reguleringsmagasiner 11
2.2.3 Mengde av inntransportert masse 11

2.3 Materiale fra tunnelsystemet 12
2.3.1 Renskemetoder 12
2.3.2 Mengde av materiale fra tunnelsålen 13
2.3.3 Grensen for erosjon/transport av løsmasser i tunneler 14
2.3.4 Massetransport i tunneler 15

3. INNSAMLING OG BEARBEIDING AV OPPLYSNINGER FOR Å KARTLEGGE KILDENE 17

3.1 Innsamling av data fra kraftverkets nedslagsfelt og tilløpssystem 17
3.3.1 Generell beskrivelse 17
3.1.2 Bekkeinntak 17
3.1.3 Magasiner 20
3.1.4 Tunnelsystemet 21

3.2 Bearbeiding av innsamlede opplysninger og prøvene 22

4. TILTAK FOR OPPSAMLING AV LØSMASSER 25

4.1 Erfaringer fra tiltak ved eksisterende kraftanlegg 25

4.2 Tiltak utenfor tunnelsystemet 25
4.2.1 Sedimenteringsbasseng 25
4.2.2 Sikring eller endring av elveløpet 27
4.2.3 Inntakenes plassering 27
4.2.4 Magasinets reguleringsnivåer 27

4.3 Tiltak i tunnelsystemet 28
4.3.1 Åpne sandfang 28
4.3.2 Ribbesandfang 31

4.4 Stabilisering av gjenværende masser på tunnelsålen 32

4.5 Rensking av tunnelsålen 33

4.6 Oversikt over renskemetoder i kraftverk 33

Side

Appendix A 34

A Beskrivelse av kraftverkene som har vært undersøkt i prosjektet 34

A.1 Generelt 34

A.2 Beskrivelse av kraftanleggene i tabellform 34
A.2.1 Kommentarer til tabell 1 34
A.2.2 Kommentarer til tabell 2 39
A.2 3 Kommentarer til tabell 3 40

A.3 Kort sammenfatning av spesielle forhold ved hvert kr.v. 40
A.3.1 Driva 40
A.3.2 Evanger 41
A.3.3 Røldal-Suldal 41
A.3.4 Fortun 42
A.3.5 Mauranger 43
A.3.6 Bjerka 43
A.3.7 Dividalen 44
A.3.8 Lio 44
A.3.9 Nedre Vinstra 45
A.3.10 Kvilldal 45
A.3.11 Leirdøla 46
A.3.12 Lomi 46

A.4 Referanser 48

SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER.

Under arbeidet med forskningsprosjektet "Sandslitasje på vannkraftturbiner" ble det funnet riktig å utarbeide en egen rapport for å sammenfatte erfaringene med hensyn til kildene for løsmasser og tiltak for å redusere mulig sandslitasje. De viktigste erfaringene fra prosjektet og erfaringer som foreligger for øvrig, er tatt inn i det følgende.

Undersøkelsene viser at disse geologiske faktorer har betydning for omfanget av slitasjeproblemene:

- konsentrasjon av materiale i driftsvannet.
- materialets kornfordeling.
- materialets mineralsammensetning.

Det synes ikke å være noen lovmessig sammenheng mellom størrelsen på slitasjeproblemene og andelen av nedslagsfeltet som drenerer gjennom bekkeinntak ved de kraftverkene som var med i undersøkelsen. Både ved Mauranger og Lio har det vært betydelige slitasjeproblemer selv om denne andelen er liten. To kraftverk som har hatt liten slitasje, Dividalen og Nedre Vinstra, har begge en høy andel av avrenningen til magasiner. Årsakene til variasjonene kan bl.a. være å finne i de faktorene som er nevnt i avsnittet ovenfor. Tendensen, ved de kraftverkene som har størst slitasje, er imidlertid at hvis en stor andel av vannet tilføres gjennom bekkeinntak, øker sannsynligheten for slitasjeproblemer.

Som det går fram av tabell A.1, varierer størrelsen på de kornene som kan transporteres i tunnelen med kvadratet av vannhastigheten. Transportabel kornstørrelse varierer fra 1,6 til 10,2 mm når vannhastigheten varierer fra 0,7 til 2,0 m/s.

De ytre vannveiene kan deles i to kategorier:

- Bekken eller elva renner med kontinuerlig fall mellom materialkildene og inntaket, uten at vannet passerer innsjøer eller rolige partier der det kan foregå sedimentasjon.
- Materialet har sedimenteringsmulighet i form av større eller mindre bassenger eller vann.

For den andre typen vil mesteparten av det bunntransporterte materialet avsettes, og dersom vannet er stort nok, vil også mye suspendert materiale bli

igjen. Hvis det ikke finnes sedimenteringsmuligheter, vil vannhastigheten avgjøre hvor grovt bunntransportert materiale som kan føres fram til inntaket.

Morene, bresalm og løsmasser på tunnelsålen inneholder både grovkornet og finkornet materiale, mens innsjøsedimenter som regel er så finkornete at de vil kunne transporteres i suspensjon. Ved de anleggene der morenetilførsel er årsaken til slitasjeproblemene skyldes dette ras og erosjon i tykke avsetninger i bratte dalsider. I slikt terreng vil det være mange ferske spor etter ras og tydelige raviner, der sidekantene ikke er dekket med vegetasjon. Erfaringer fra Fortun og Mauranger har vist at dersom det tilføres brevann, så må man også regne med stor tilførsel av sand og slam, ofte flere tusen m^3 sedimenterbart materiale pr. år. Tilførselen av innsjøsedimenter henger som regel sammen med reguleringen av magasinene. Dette materialet er ofte finkornet, og mengden som føres med driftsvannet pr. år kan bli svært høy. For eksempel vil konsentrasjon av 10 g/m^3, vannføring 20 m^3/s og en brukstid på 5000 timer pr. år medføre at ca. 1.300 m^3 materiale føres med driftsvannet årlig.

Det virker som om bunntransportert materiale sliter vesentlig mer enn finkornet suspendert materiale. Det er imidlertid ikke riktig å se bort fra slitasjevirkningen til finstoffet, fordi mengden av dette ofte er flere ganger så stor som mengden av bunntransportert materiale.

Ved de undersøkte kraftverkene kan ikke materiale avsatt av breelver og andre elver sies å være noen vesentlig årsak til turbinslitasje. Dette skyldes at det ikke er registrert stor erosjon i slike avsetninger og at denne type avsetninger til dels inneholder så grove partikler at de ikke føres helt fram til turbinene. Dersom det ikke har vært spylerensket, har det materialet som ligger igjen på tunnelsålen når anlegget settes i drift en sammensetning av både grovt og finkornet materiale. I løpet av de første årene anlegget er i drift vaskes det finkornige materiale ut av topplaget og det blir igjen en erosjonshud av grovere korn. Tilførsel av finkornig materiale i forbindelse med regulering av magasiner er for øvrig like ofte hovedmaterialkilden som tilførsel gjennom bekkeinntakene.

Kildematerialenes gjennomsnittlige mineralsammensetning er i grove trekk den samme ved de undersøkte kraftverkene, med unntak av Fortun. Det er vanligvis ca. 30% kvarts, 55% feltspat og 15% sjiktmineraler og andre mineraler, i prøvene. Alle kraftverkene har tilførsel av materiale som vil

kunne slite betydelig på turbinene. Selv om sliteevnen varierer noe fra sted til sted, vil mengden av, og kornfordelingen til det materialet som deltar i sliteprosessen sannsynligvis ha størst betydning for omfanget av slitasjeproblemene. Materialet fra Fortun har en annen mineralsammensetning enn prøven fra de øvrige kraftverkene (meget høyt feltspatinnhold), men analyser for bestemmese av slitasjeverdi har vist at dette materialet har nesten like stor sliteevne som de øvrige prøvene.

Undersøkelsene har vist at det er en klar sammenheng mellom bergartsfordelingen i nedslagsfeltet og mineralsammensetningen i løsmassene. Det virker som om de fleste avsetningene er korttransportert. Dersom fjellgrunnen f.eks. inneholder glimmerrike bergarter, så gir dette utslag i et høyt innhold av glimmer i løsmasseprøvene fra det samme området. Dette gjelder også for andre mineraler. Det er i Norge meget vanlig med bergarter som hovedsakelig består av kvarts, feltspat og glimmer. Glimmerinnholdet kan variere mye. I en del mindre områder opptrer basiske bergarter som gabbro og syenitt. Ingen av de anleggene som er undersøkt ligger i områder med spesielt svake bergarter, kanskje bortsett fra Nedre Vinstra, men der er materialtilførselen og slitasjen liten.

TILTAK.

Løsmasser som transporteres i et kraftverks ytre vannveier og i tilløpssystemet kan stoppes ved forskjellige tiltak. Det som bør danne grunnlag for valg av tiltak og tiltakenes omfang er:

- Befaring i de ytre vannveiene for å anslå mektighet av løsmasseforekomster, mineralsammensetning, erosjonsforløp og, om mulig, kvantum av masser som årlig transporteres inn i tilløpssystemet.

- Vurdere de konsekvensene som massetransport har for turbinene, bl.a. nedsatt virkningsgrad, redusert energiproduksjon, revisjonsfrekvens, kostnader og driftstap.

Dette bør utføres så vel ved planlagte som ved eksisterende anlegg hvor problemer av denne art er til stede eller kan forventes.

Dersom slike undersøkelser konstaterer løsmassetransport av betydelig omfang i de ytre vannveiene og en konsekvensanalyse tilsier at noe bør gjøres, så vil bygging av sedimenteringsbasseng være det mest effektive tiltak. Størrelsen av slike basseng bør tilsvare avlagring i 15 - 20 år. Under

utformingen bør innløpet til bassenget arrangeres slik at strømningen blir mest mulig jevn over hele bassengbredden. Dette sikrer at hele lagervolumet kan utnyttes. Store deler av de suspenderte massene, ned til d = 0,06 mm, vil også bunnfelles i et slikt basseng.

I driftstunnelene kan det bygges sandfang. Plassering og størrelse av slike er viktig for den effekten de har for å stoppe løsmassetransporten. Mengden av masser som ligger tilbake i tunnelen beror på hvilken måte rensken er utført. Åpne sandfang som i prinsippet er en utvidelse av tunnelen fungerer sjelden som forutsatt. Grunnen er at det i sandfangområdet oppstår virvelsoner og sekundærstrømmer (tverrstrømmer) som gjør at strømhastigheten ikke senkes. Løsmassene blir heller ikke liggende tilbake i sandfanget. Vi anbefaler ikke bygging av åpne sandfang.

Halvt lukkede sandfang, ribbesandfang, har derimot vist seg som svært effektive både under laboratorieforsøk og ved kraftverk. Når sandfang bygges, anbefaler vi at denne type velges. Ribbedekket gjør at tømmingen av slike sandfang må planlegges bedre enn for åpne sandfang.

Hvor hurtig utvaskingen og stabiliseringen av de gjenværende massene i en tunnel foregår er fortsatt ukjent. VHL holder på med innsamling av data, men resultatene foreligger ikke ennå. Derimot vet man at 5 - 6 cm av massene på tunnelsålen kan transporteres og at ca. 80% av disse kan stoppes i et effektivt sandfang. Vi tenker her på en maskinrensket tunnel.

1. INNLEDNING.

Prosjektet "Sandslitasje på vannkraftturbiner" har bl.a. omfattet:

- Kartlegging av de geologiske forhold i nedslagsfeltet til kraftverket.
- Vurdering av kilder for slitende materiale i de ytre vannveiene og i kraftverkets tilløpssystem.
- Analyse av løsmasser som transporteres i vannveiene mot turbinene.

Ved et begrenset antall kraftverk, vist i figur 1.1 er omfattende undersøkelser foretatt.

Løsmasser som sliter ned turbiner etter kortere eller lengre tid, medfører både tapt energiproduksjon og kostbare revisjoner. For å redusere problemene kan følgende gjøres:

- Kildene til slitende materiale i tilløpssystemet lokaliseres
- Egnede tiltak som sandfang og sedimenteringsbasseng planlegges og bygges.

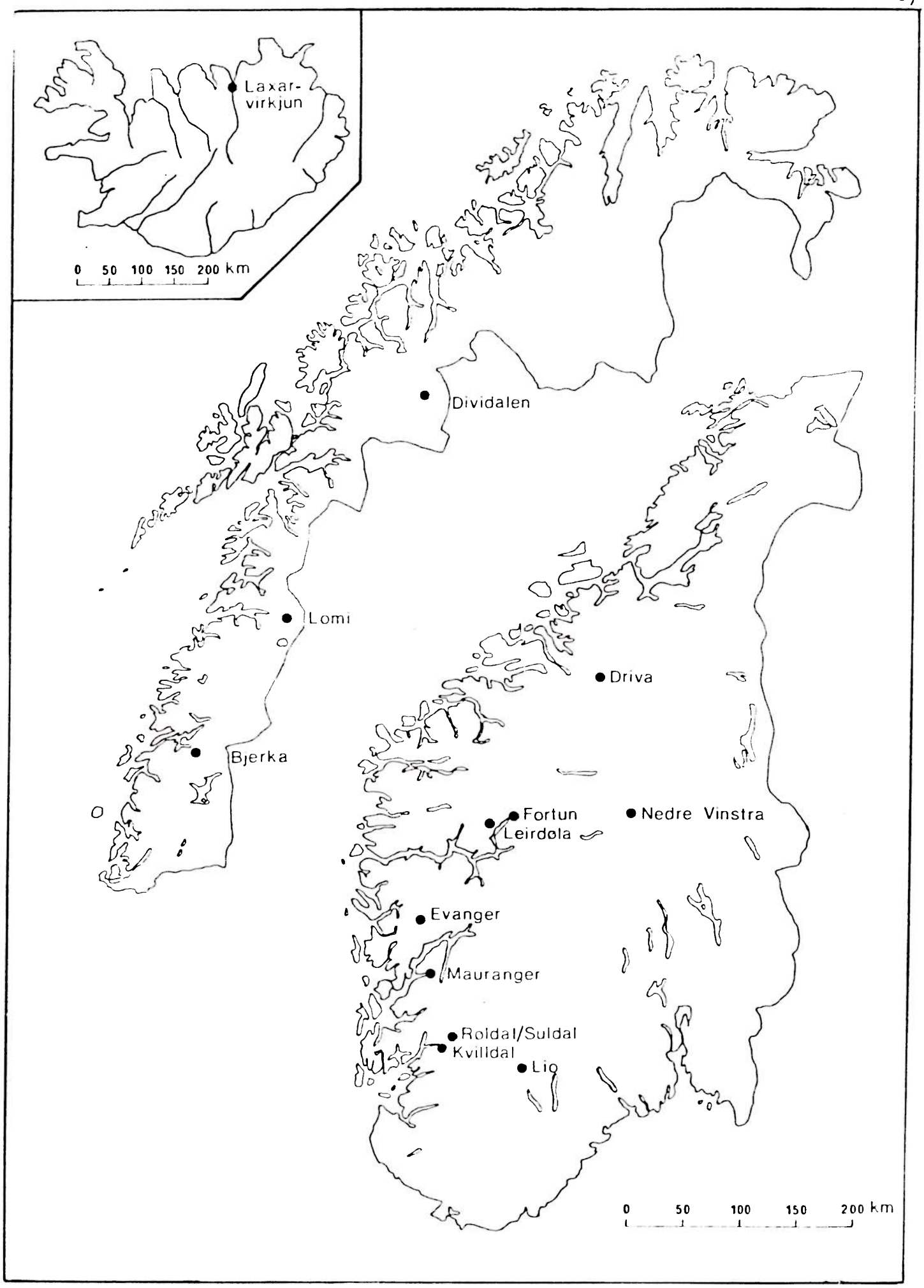
Materialtransport og sandfang i tunneler har vært studert i mer enn 20 år. Erfaringsmaterialet som foreligger er omfattende. En sammenfatning finnes i denne rapporten.

Først i de senere år er det blitt foretatt geologiske vurderinger av kilder, mineralogisk sammensetning av løsmassene og deres sliteevne på turbinstål. Nettopp dette har vært en av hoveddelene i sandslitasjeprosjektet. Denne rapporten omfatter de viktigste resultater og konklusjoner fra arbeidet med de kraftverk som har vært med i prosjektet.

Rapporten er delt inn i tre hovedavsnitt:

KILDER, INNSAMLING OG BEARBEIDELSE AV OPPLYSNINGER FOR Å KARTLEGGE KILDENE og AKTUELLE TILTAK.

Sammenfatning av resultatene av undersøkelsene ved de kraftverk som har inngått i undersøkelsene er gitt i APPENDIX A.



Figur 1.1. Geografisk plassering til kraftverkene som har vært med i undersøkelsene. Island og Norge

2. KILDER.

2.1. Generelt om forekomster av løsmasser.

Løsmasser som tilføres et kraftverk gjennom tilløpssystemet, kan ha flere kilder:

- Bekker og elver eroderer i løsmasser langs vassdraget og kan føre materialet ned i tilløpssystemet.
- Smeltevann fra isbreer har en høy konsentrasjon av silt, sand og grus.
- Regulering av vannstanden i magasiner fører ofte til omlagring av tidligere avsatt materiale. Dette er gjerne finkornet og vil i mange tilfelle kunne bli ført inn gjennom inntaket.
- Materialet som ligger igjen på tunnelsålen vil bli vasket ut, inntil det dannes en grovkornet erosjonshud.

Massetransport fra de ytre vannveiene holder seg i de fleste tilfeller uendret i overskuelig framtid. Intensiteten (transportmengde pr. år) vil påvirkes av hvordan avsmeltingen foregår i nedslagsfeltet, og flomforhold og nedbørforhold gjennom året.

Tilførsel fra breelver vil også være klimapåvirket, dvs. at meget slam tilføres i sommerhalvåret, spesielt ved høye temperaturer, mens lite tilføres vinters tid.

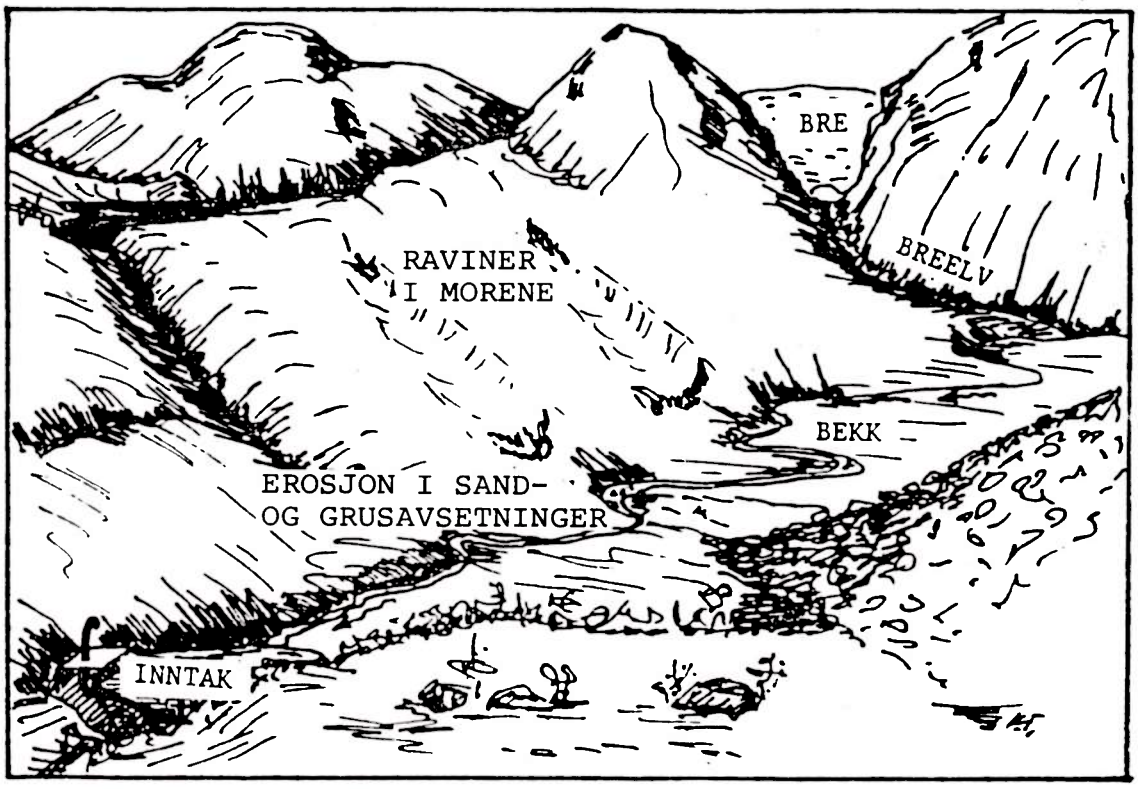
Tilførsel av masser som skyldes større utrasing og erosjon i magasiner, kan være et tidsbegrenset fenomen. Mengden utrast masse og rasfrekvensen vil bl.a. bero på løsmassenes kornfordelingsforhold og mektighet, samt hvor sterkt magasinet er regulert. Bølgeerosjon og mindre utrasinger kan fortsette i årtier alt etter løsmassenes sammensetning.

Massene som ligger tilbake etter tunneldrift og tunnelrensk, vil stabiliseres etter en tid. Transportmengden vil være størst i den første driftstiden og siden avta, for til sist å opphøre.

2.2. Tilførsel av løsmasser fra ytre kilder.

2.2.1. Elveinntak.

I figur 2.1 er vist en skissemessig oversikt over de ytre kildene for materiale som kan transporteres mot et elveinntak.



Figur 2.1. Ytre vannvei - Massetransport mot et elveinntak.

Bekker gjennom moreneavsetninger.

I mange elvedaler finnes moreneavsetninger med til dels stor mektighet. Bekker som renner gjennom slike områder eroderer stedvis ganske kraftig, særlig i flomperioder.

Om det ikke finnes naturlige sedimenteringsmuligheter, vil store materialmengder kunne tilføres inntakene og tilløpssystemet.

Bløtjordsras og ravinedannelse.

Kraftige regnvær, snøsmelting og teleløsning medfører ofte bløtjordsras og ravinedannelse i finstoffholdige masser. Massene som følger smeltevannet til bunnen av dalen, vil transporteres videre mot inntakene.

Breelver.

Elver eller bekker som har sine kilder under eller i nærheten av breer, tilføres materiale fra breen i perioder med sterk smelting. Massene herfra er for det meste svært finkornige, men kan også være blandet med sand, grus og stein.

2.2.2. Reguleringsmagasiner.

Reguleringsmagasiner bygges oftest der det fra før ligger vann eller innsjøer. Reguleringsgrensene vil som regel ligge både høyere og lavere enn naturlig vannstand.

Etter reguleringen vil det ved varierende vannstand blottlegges nye strandlinjer. Bølger vil erodere i ustabile masser. Stedvis undergraves strendene og større masser kan rase ut. Skjer dette i nærheten av inntaket, kan massene bli ført inn i inntaket. De finere massene som eroderes eller raser ut, holder seg gjerne svevende i vannet i kortere eller lengre tid, og vil følge med driftsvannet til kraftverket. Ved ekstrem nedtapping dannes elvefar i løsavsetningene på magasinbunnen. Slike elver tilfører på denne måten tilløpssystemet betydelige masser.

2.2.3. Mengde av inntransportert masse.

Massetransporten fra de ytre vannveiene vil være størst under flomforhold og i perioder med sterk bresmelting. Noe av materialet føres i suspensjon, mens resten transporteres langs bunnen. Transportformen er bl.a. avhengig av kornstørrelsen og vannhastigheten. Eksemplene som er nevnt nedenfor gjelder hovedsakelig bunntransportert materiale. Det er bare sedimenteringsbassenger som i tillegg kan samle opp en del av det som føres i suspensjon. Mengden av suspendert materiale kan bli svært høy, og undersøkelsene har vist at dette også forårsaker slitasje. Det er gjort forsøk på å finne ut hvor store mengder som kan tilføres et bekkeinntak i tilløpssystemet. I slike bekker vil også grovere masser transporteres under flom, men inntaksristen vil normalt hindre disse å komme inn i tunnelsystemet.

For Ottinntaket ved Driva kraftverk er det grovt anslått at 4.000 - 5.000 m^3 masse tilføres inntaket årlig.

Ved Fortun kraftverk ble sedimenteringsbassenget i Styggedalen tømt høsten 1982, etter 15 års drift. Ca. 80.000 m^3 masse ble kjørt ut, hvilket tilsvarer

sedimentering av noe over 5.000 m^3 årlig. I dette tilfellet var finkornige masser også oppsamlet.

Fra Sveits er det kjent at det i ett sedimenteringsbasseng avsettes opptil 60.000 - 70.000 m^3 årlig. Løsmassenes mektighet er imidlertid ofte langt større i Sveits enn i Norge.

2.3. Materiale fra tunnelsystemet.

Tiløpssystemet regnes å omfatte alle tunneler og sjakter som direkte har vannkommunikasjon med kraftverket. Ved de største kraftverkene kan tunnelene ha en samlet lengde på opp mot 20 - 40 km. Tunnelene renskes på forskjellige måter. Hvor store masser som siden kan transporteres mot kraftverket, er sterkt avhengig av hvilken renskemetode som blir benyttet.

2.3.1. Renskemetoder.

Etter at tunneldrivingen er ferdig og før kraftstasjonen settes i drift, renskes tunnelene. Dette foregår på ulike måter.

Finrensk ved spyling.

I en finrensket tunnel vil alle masser bli fjernet fra tunnelsålen. Først foretas maskinell rensk ned til knølene. Deretter spyles med en blanding av luft og vann. Metoden er kostbar. Masse som kan forårsake turbinslitasje fjernes, men samtidig avdekkes den råsprengte tunnelsålen og friksjonstapene øker.

Finrensk (maskinell).

Ved bruk av spesielle skuffer på renskemaskinene, er det mulig å fjerne det meste av massene som ligger tilbake etter tunneldriften. Det regnes allikevel med et restlag på gjennomsnittlig ca. 3 cm. Dette er for tynt til at stabilt dekklag kan dannes, og det alt vesentlige av de gjenværende massene transporteres derfor mot turbinene. Også i dette tilfelle øker friksjonstapene langs tunnelbunnen.

Grovrensk (knølrensk).

Den vanligste renskemetoden hittil har vært grovrensk, eller som den også betegnes: "knølrensk". Alle massene som ligger over de høyeste oppstikkende

fjellknøler i tunnelbunnen, fjernes maskinelt. Tunnelsålen blir relativt jevn. En del av de gjenværende massene er så finkornige at de vil transporteres når kraftverket settes i drift. Så fremt tunnelsystemet fylles forsiktig, vil det med tiden dannes et relativt jevnt og stabilt dekklag over sålen. Fordelene med denne renskemåten er at den er rimelig og forholdsvis rask å utføre. Tunnelarealet økes mens tunnelbunnen forblir relativt jevn.

Rensk ved frispeilsstrømning (gravitasjonsrensk).

Ved flere høytrykks kraftverk drives tilløpstunnelene med helning 1:9 - 1:12.

Ved gravitasjonsrensk fjernes alle gjenværende masser i tunnelen ved å tilføre vann. I en tunnel med helning 1:10 vil strømhastigheten bli ca. 4 m/s, om det tappes en vannmengde på ca. 1 m^3/s pr. m bredde.

Denne renskemetode er blitt benyttet ved Skjomen-verkene, Kolsvik kraftverk, Røldal-Suldal Kraft A/S og Ulla-Førre-verkene. Erfaringene fra disse anleggene har stort sett vært meget gode. Det vanskeligste synes å være selve tilretteleggingen og tilpassingen til de oftest anstrengte terminplaner ved anleggene. For tunneler med stort fall er kontrollert gjennomspyling viktig, idet det ellers vil kunne skje ukontrollert under oppfylling.

2.3.2. Mengde av materiale fra tunnelsålen.

Ved grovrensk (knølrensk) regnes det med at et ca. 20 cm tykt masselag ligger tilbake på tunnelsålen. Undersøkelser ved VHL viser at av dette vil ca. 5 - 6 cm transporteres ved strømhastigheter 1,5 - 1,7 m/s før et stabilt dekklag er dannet. 20% av massene transporteres svevende i strømmen, mens de øvrige 80% eller ca. 1 m^3 pr. 20 - 25 m^2 tunnelsåle, vil transporteres langs tunnelbunnen.

For maskinell finrensk regnes med at et ca. 3 cm tykt masselag blir tilbake. Dette utgjør ca. 1 m^3 masse pr. 40 m^2 tunnelsåle.

Det er ikke uvanlig at deler av tunneler tas i bruk uten noen form for rensk. Forutsatt at det dannes et stabilt dekksjikt langs bunnen, vil transportert volum materiale bli omlag som for grovrensket tunnel.

2.3.3. Grensen for erosjon/transport av løsmasser i tunneler.

Erosjon og transport av løsmasser i tunneler har langt på vei vært et sær-norsk problem, idet utstrakt bruk av råsprengte tunneler med gjenværende løsmasser på tunnelsålen stort sett har vært en spesiell norsk praksis.

Problemstillingen ble derfor tatt opp av norske kraftselskaper i samarbeide med Vassdrags- og havnelaboratoriet (VHL) tidlig i 60-årene. Gjennom alle år siden har det vært samlet inn data fra tunneler som blir nedtappet for inspeksjon. Det har vært utført flere laboratorieforsøk, både for konkrete anlegg som Rana-verkene (1966-67) og mer generelle laboratorieundersøkelser.

Med utgangspunkt i kjente teorier for erosjon og sandtransport i elver og kanaler (hvor det foreligger svært mye publiserte data) er innsamlede data for tilsvarende transport i tunneler blitt bearbeidet til følgende formel:

$$d_{70} = \frac{\gamma_v}{\gamma_s - \gamma_v} \cdot \frac{V^2}{C \cdot A^{1/6}} \qquad (1)$$

der d_{70} = kornstørrelse ved grensen for erosjon i tunneler

γ_v = egenvekt for vann

γ_s = egenvekt for sand

V = vannhastighet i tunnelen

A = tunneltverrsnitt

C = koeffisient, funnet til ca. 130

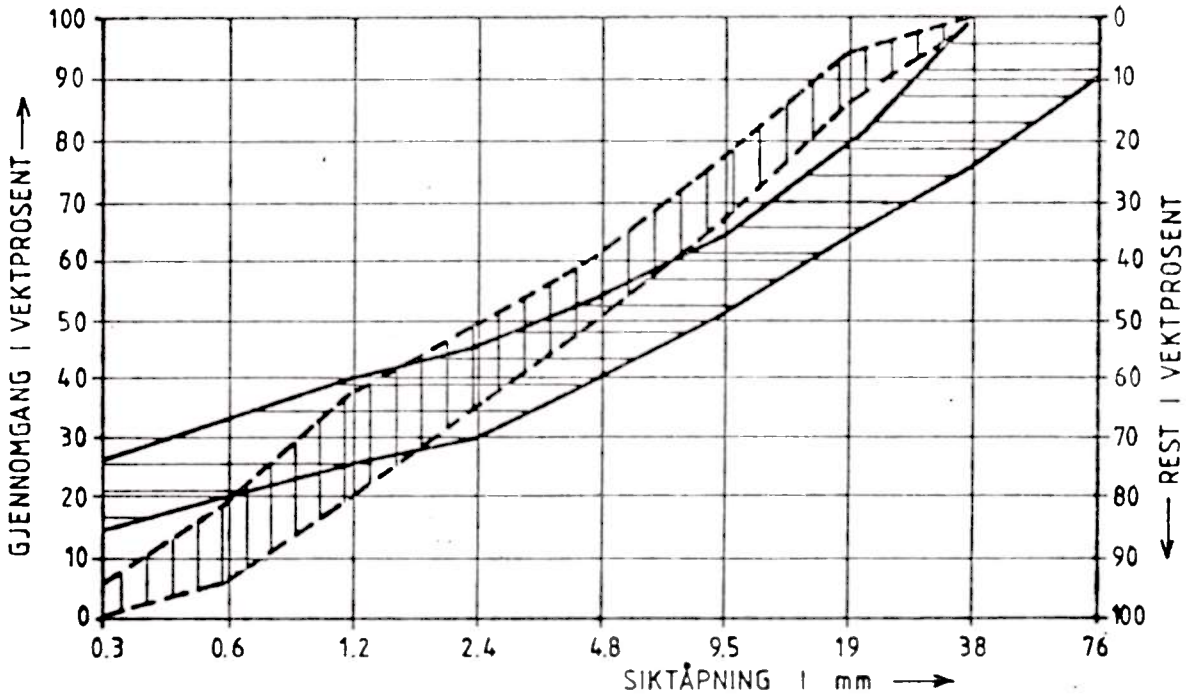
Det er viktig å merke seg at formelen gjelder for fylt tunnel. Delvis fylt tunnel (som f.eks. ved oppfylling) blir å regne som åpen kanal, der grensen for erosjon er vesentlig forskjellig fra et fylt tunneltverrsnitt.

Siden den relative egenvekten for sand er ca. 2,7 og variasjon i tunnel-arealet har begrenset betydning, kan vi anta $A = 40 - 50\ m^2$ og får

$$\underline{d_{70} = 0{,}0024\ V^2\ (m)} \qquad (2)$$

2.3.4. Massetransport i tunneler.

Sikteanalyser av de massene som ligger tilbake i en tunnel etter grovrensk har gitt kornfordelingskurver som vist i figur 2.2.



Figur 2.2. Kornfordeling av gjenværende masser på tunnelsåle. Horisontal skravur dekker 21 prøver fra diverse anlegg (2). Vertikal skravur dekker prøver fra Lang-Sima (3).

Den del av massene som er finere enn 0,25 mm, utgjør 12 - 24% av det hele. Midlere diameter i massene ligger fra ca. 3 til 9 mm, mens de groveste steinene har diameter fra ca. 40 til 100 mm.

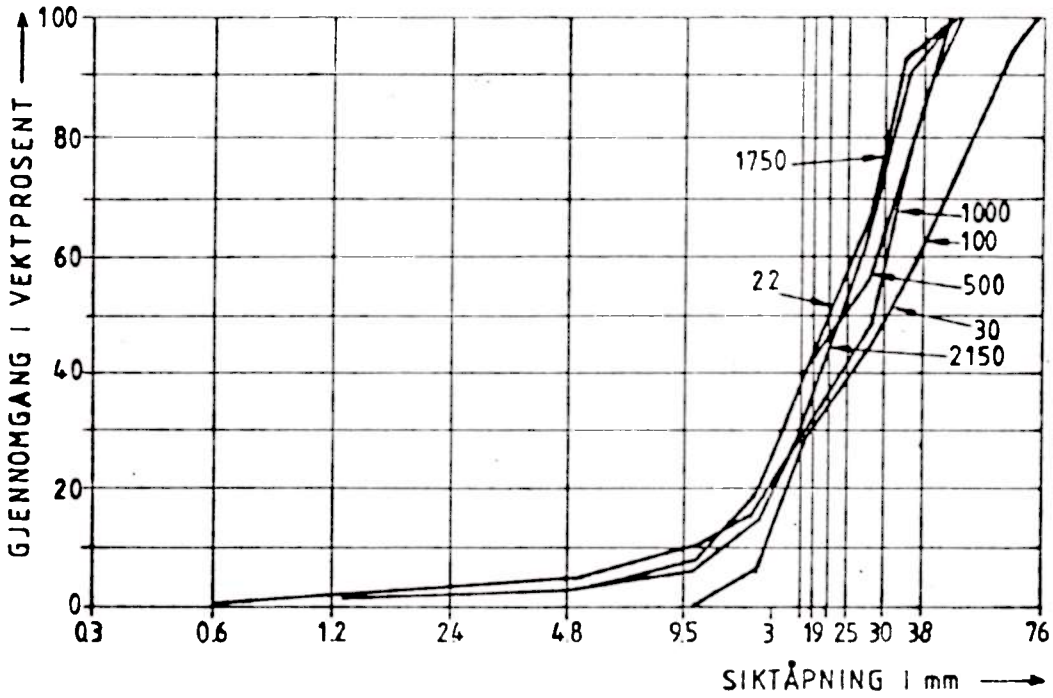
Det 5 - 6 cm tykke masselag som transporteres ut fra tunnelen utgjør som nevnt 1 m^3 masse pr. 20 - 25 m^2 tunnelsåle.

Etter en tids drift dannes et stabilt dekklag på tunnelsålen. Prøver fra en tilløpstunnel viser at dette dekklaget består av grovere og mer ensgraderte masser enn middel av de gjenværende massene etter grovrensk, se figur 2.3. Ved Lang-Sima-tunnelen ble mesteparten av materialet mindre enn 10 mm vasket ut av dekklaget i sålen.

Av figur 2.3 fremgår at d_{50} varierer fra 22 mm til 30 mm. Settes verdiene inn i ligning (1), finnes verdier for C som varierer mellom 32 og 43.

Midlere C-verdi settes til 38, og vi får en formel tilsvarende ligning (2), for hvordan gjennomsnittlig kornstørrelse til materialet, som danner erosjonshud på sålen, varierer med kvadratet av vannhastigheten.

$$d_{50} = 0{,}0084\ V^2 \qquad (3)$$



Figur 2.3. Kornfordeling i dekklaget ved Lang-Sima etter 70 timers drift. Tunnelareal 33 m², strømhastighet 1,7 m/s ved fullt pådrag.

3. INNSAMLING OG BEARBEIDING AV OPPLYSNINGER FOR Å KARTLEGGE KILDENE.

3.1. Innsamling av data fra kraftverkets nedslagsfelt og tilløpssystem.

I de følgende avsnitt vil de opplysningene som bør innhentes for vurdering av sandslitasjeproblemene ved et allerede utbygd kraftverk bli gjennomgått. Ved planlegging av nye kraftverk vil hovedsakelig de undersøkelsene som kan gjøres i de ytre vannveiene, være aktuelle.

3.1.1. Generell beskrivelse.

Det er nødvendig med en generell, teknisk beskrivelse av anlegget. Denne bør inneholde følgende opplysninger:

- kart over nedslagsfeltet med vassdraget, alle inntak, magasiner og tunnelsystemet inntegnet.
- størrelsen på nedslagsfeltet til hvert inntak.
- midlere tilløp til hvert inntak.
- snitt av tunnelsystemet med opplysning om tverrsnittsareal.
- fallhøyde.
- vannforbruk.
- oppstartingsår.
- turbintype, ytelse og omdreiningstall.
- rapporter fra eventuelle:
  - virkningsgradsmålinger,
  - spaltevannsmålinger,
  - revisjoner,
  - inspeksjoner av turbinen(e).

3.1.2. Bekkeinntak.

Undersøkelsene i forbindelse med bekkeinntak har til hensikt å skaffe opplysninger om løsmasseavsetningenes type og mektighet, om det foregår erosjon, transportforholdene og materialenes sliteegenskaper.

Før feltarbeidet kan settes i gang, vil det være nødvendig å skaffe til veie:

- topografiske kart, minimum målestokk 1:50.000.
- eventuelle berggrunns- og løsmassekart.
- stereografisk flyfotodekning av hele nedslagsfeltet.
- opplysninger om isavsmeltingen og isbevegelsesretningen.
- opplysninger om flom- og nedbørvariasjoner som funksjon av årstidene.

Ut fra dette materialet vil det være mulig å klarlegge: Hvor i nedslagsfeltet det kan finnes løsmasser og avsetningstyper av betydning, forventet mineralsammensetning, sannsynlige erosjonssteder og hvor stor maksimalvannføringen er i forhold til vannføringen ved en eventuell befaring i nedslagsfeltet.

Opplysningene tegnes inn på det topografiske kartet og de kontrolleres ved befaring i felten fra inntaksstedet og oppover langs vassdraget. Ved befaringen bør man spesielt søke å:

- bestemme avsetningstype:

  bunn-, side- eller endemorene,

  breelvsavsetninger,

  elveavsetninger,

  ur,

  innsjøsedimenter,

  blandinger av disse.

- anslå avsetningenes størrelse (konkrete anslag av utbredelse og volum, ikke bare som stor, middels, liten osv.).
- beskrive erosjonen langs vassdraget. Er det sår etter ras? Hvor gamle er disse?
- kvantifisere volumet av den årlige tilførselen fra de ulike erosjons- eller rasstedene. Dette kan gjøres ved at man ser på hvor ferske erosjonsflatene er og ved å anslå det opprinnelige terrengets overflate.

- vurdere kornstørrelsen til materialet som tilføres.
- vurdere avsetningenes stabilitet, og om det kan tenkes store utrasinger i fremtiden.
- vurdere vassdragets transportevne ut ifra topografien, vannføringen og kornstørrelsen til det materialet som avsettes i de roligste partiene.
- påvise om det finnes noen steder som egner seg for lokalisering av sedimenteringsbasseng eller andre tiltak.

Dreier det seg om inntak av brevann, indirekte eller direkte, bør dette vannet alltid passere et sedimenteringsbasseng før det slippes inn i driftstunnelen. Feltarbeidet vil da gå ut på å kvantifisere og beskrive den årlige materialtilførselen slik at bassenget kan dimensjoneres. Det bør tas prøver av brevannet og av de løsmassene som avsettes nedstrøms breen. Materialets kornfordeling og mineralsammensetning undersøkes. Vannprøvene bør tas over en lengre periode fordi innholdet av suspendert stoff varierer sterkt med årstiden. Tilførselen av grovere materiale kan kvantifiseres ved at de avsetningene som breelven legger fra seg oppmåles.

Løsmasseprøver på 1 - 2 kg tas ved alle større erosjons- eller rassteder. Prøvene bør være minst mulig utvasket og omrørt, dvs. at de skal tas minst 1 m under overflaten og så høyt opp i ras- eller erosjonsskråningen som mulig. Prøvene tas slik at de til sammen er representative for materialtilførselen fra det aktuelle området.

Ved å analysere bunnprøver fra de roligste strømpartiene i vassdraget kan største kornstørrelse for det materialet som blir transportert bestemmes.

Det er viktig å være oppmerksom på at ved feltbefaring om sommeren er ofte vannføringen og materialtilførselen liten. Situasjonen er en helt annen mens snøsmeltingen pågår og man må derfor være på utkikk etter tegn til materialtilførsel fra sår eller erosjonssteder ved høyere vannstand.

Kornfordelingen bestemmes for alle prøvene. For et begrenset utvalg av prøvene bør også mineralsammensetningen og sliteevnen på stål bestemmes. Mineralsammensetningen bestemmes fraksjonsvis. Dersom det skal foretas slitasjetest på materialet, vil det være nødvendig å ta prøver på 3 - 5 kg.

3.1.3. Magasiner.

Ved undersøkelse av magasiner gjelder i stor grad samme framgangsmåten som for bekkeinntak. Først beskrives forholdene så nøyaktig som mulig ut fra de opplysninger som allerede foreligger, og dette kontrolleres deretter ved befaring og undersøkelser i felten.

Aktuelt grunnlagsmateriale kan være:

- topografisk kart.
- kvartærgeologisk kart.
- bunnkotekart.
- flyfotografier.
- eventuelle rapporter fra tidligere undersøkelser av løsmasseforholdene og stabiliteten i området.

Undersøkelsene vil klarlegge faren for erosjon og ras, hvordan eventuell masseforflytning vil foregå, og om det er fare for suspensjonsstrømmer mot inntaket. Videre må mengden materiale som vil kunne tilføres tunnelsystemet anslås. Ut fra undersøkelsene bør det også være mulig å vurdere inntakets plassering.

Feltundersøkelsene vil derfor bestå i:

- bestemmelse av avsetningstypene i området, deres utbredelse og mektighet. Til dette kan det være nødvendig å ta i bruk boringer, geoelektriske målinger eller seismiske målinger.
- vurdering av faren for tilbakeskridende erosjons ved elve- og bekkeoser ved senking av vannivået.
- nøyaktig kartlegging av eventuelle finkornige sedimenter (særlig silt/finsand), slik at det senere kan gjøres stabilitetsberegninger.
- undersøkelse av inntaksområdet for vurdering av faren for at løsmasser kan trekkes inn i tunnelen, p.g.a. den vannstrømmen som vil oppstå.
- prøvetaking av de ulike avsetningene for kornfordelingsanalyse og eventuell mineralogisk analyse. De mest aktuelle avsetningstypene vil være morene, innsjøsedimenter, deltaavsetninger og andre elveavsetninger.

Ut fra disse innsamlede opplysningene kan det gjøres en rekke stabilitets-messige vurderinger og beregninger. De aktuelle problemstillingene bør vurderes i forhold til de ulike reguleringsnivåer:

- utrasinger over og under vannspeilet.
- bølgeerosjon langs strendene.
- erosjon ved utløp av elver og bekker.
- grunnvannserosjon.
- faren for suspensjonsstrømmer mot inntaket (strøm av finkornig materiale som holder seg svevende).
- faren for blakking av vannet.
- strømningsforholdene i magasinet ved redusert vannstand.

Alle disse problemstillingene vil være avhengige av topografien, løsmassenes mektighet, oppbygging, kornfordeling og pakking, samt tilsiget av grunnvann og overflatevann.

Når det på denne måten er laget en oversikt over stabilitetsforholdene, kan det deretter ut fra lagtykkelser og kornfordeling beregnes hvor mye materiale som vil kunne eroderes og/eller rase ut, og hvor stor andel av dette som vil kunne sedimentere eller holde seg svevende i vannet.

Dersom magasinet har tilløp av slamholdig vann, bør også strømningsforholdene og sedimenteringsmulighetene for slammet vurderes.

3.1.4. Tunnelsystemet.

Aktuelt bakgrunnsmateriale vil være:

- bergartsbeskrivelse.
- detaljerte tegninger av drifstunnelen med inntegning av sandfang, side-grener og andre installasjoner.
- opplysninger om tverrsnitt og strømningshastigheter.
- detaljtegning av eventuelt sandfang.
- opplysninger om sålerensken for hele tunnelen.

Hensikten med undersøkelsene vil være å vurdere massenes sliteevne, hvilke fraksjoner som kan transporteres i tunnelen ut fra de hydrauliske betingelsene, hvilke fraksjoner som transporteres i praksis, sålens stabilitet, hvilke fraksjoner og hvor mye materiale sandfanget kan stoppe, og å beregne mengden av masser transportert langs bunnen og i suspensjon.

Ved å gå gjennom tunnelen er det mulig å ta prøver av det materialet som transporteres langs bunnen, det som legges opp i nisjer og som er stabilisert på sålen. Det vil også være mulig å registrere mengden av slikt materiale, og om det legges opp noe der sidegrenene har sitt samløp med hovedtunnelen.

I sandfanget bør avlagringsmønsteret, materialets kornfordeling og midlere tilførsel pr. år registreres. Det er viktig at sandfangets effektivitet vurderes, om lagringskapasiteten utnyttes, eller om det er sannsynlig at mye av det bunntransporterte materialet føres gjennom sandfanget.

Bestemmelse av mengden av materiale som passerer turbinen har vist seg å være viktig for vurderingen av omfanget av sandslitasjen. En slik bestemmelse kan gjøres ved å ta suspensjonsprøver av avløpsvannet så nær turbinen som mulig, der strømmen er mest mulig turbulent slik at alt materialet holdes svevende. Prøvene bør tas med jevne mellomrom over en lengre driftsperiode (gjerne ett år), og konsentrasjon og kornfordeling bestemmes. Det har imidlertid vist seg å være vanskelig å ta slike prøver. Det anbefales derfor at man tar kontakt med faggruppen for Ingeniørgeologi, Geologisk Institutt, NTH, for nærmere diskusjon av hvordan prøvetakingen kan foregå.

3.2. Bearbeiding av innsamlede opplysninger og prøver.

Den videre undersøkelsen av de innsamlede prøvene foregår i laboratoriet.

Kornfordelingen bestemmes enten ved tørrsikting eller våtsikting og slemmeanalyse. Vanntransportert materiale uten belegg på kornene kan tørrsiktes, mens moreneprøver og prøver med høyt finstoffinnhold bør våtsiktes. Det har vært vanlig å benytte sikt med åpning 4,0 - 2,0 - 1,0 - 0,5 - 0,25 - 0,125 - 0,063 mm. Dersom det opptrer mer enn 10% materiale som er mindre enn 0,063 mm, kan man slemme dette for å bestemme hvor stor andel som er mindre enn 0,020 mm. Det har liten hensikt å bestemme kornfordelingen til materiale som er mer finkornet enn dette, fordi det vil holde seg svevende under de fleste forhold i ferskvann, og fordi det ikke er noen aktuelle tiltak som vil kunne stoppe så finkornet materiale. Resultatet av kornfordelingsanalysen tegnes opp som en vanlig kornfordelingskurve. Den viser hvordan hele prøven fordeler seg på de forskjellige fraksjonene.

Mineralsammensetningen bestemmes ved en kombinasjon av følgende tre metoder: korntelling ved hjelp av stereomikroskop, differensialtermisk analyse (DTA) og røntgendiffraksjonsanalyse (XRD). Korntellingen utføres på fraksjonene > 4, 4 - 2, 1 - 0,5, 0,5 - 0,25 og 0,25 - 0,125 mm. I de groveste fraksjonene telles bergartskornene, men idet de finere fraksjonene hovedsakelig inneholder rene mineralkorn, telles disse. Det er vanskelig å skille mellom kvarts- og feltspatkorn så disse telles derfor som én gruppe. Det er viktig å bestemme om det er belegg på kornene, om de er skarpkantet eller om de er forvitret. Det telles 150 - 200 korn i hver fraksjon og bergarts- og mineralsammensetningen beregnes i prosent. For korn mindre enn 2 mm benyttes alltid pålysmikroskop med stereovirkning.

Differensialtermisk analyse (DTA) er en metode som kan bestemme kvartsinnholdet forholdsvis nøyaktig (± 2,5 vektprosent). Metoden går ut på at nedknust pulver varmes gradvis opp i en spesiell apparatur til ca. 600°C. Ved hjelp av et termoelement registreres endoterme og eksoterme reaksjoner i prøven. Kvarts har en endoterm reaksjon ved 573°C, og størrelsen på dette utslaget er proporsjonalt med kvartsinnholdet i prøven. Det utføres DTA på 2 - 3 fraksjoner i hver prøve og resultatene benyttes som en korreksjon til røntgendiffraksjonsanalysene.

Røntgendiffraksjonsanalyse (XRD) utføres på materiale som er nedknust til 2 - 30 µm og metoden kan bestemme innholdet av alle mineralene som er representert i prøven. Prinsippet for metoden er at det sendes en konsentrert røntgenstråle mot pulveret, og innfallsvinkelen varieres fra 2 til ca. 60°. Strålen reflekteres i gitrene til de ulike mineralene. Gitteravstand er karakteristisk for hvert mineral. Ved bestemte innfallsvinkler interfererer de reflekterte strålene fra de ulike gitrene i mineralet og intensiteten på refleksen øker. Intensiteten er bl.a. avhengig av mineraltypen og mengden av mineralet i prøven. Hvert mineral gir interferens ved bestemte innfallsvinkler. Ved å sammenligne størrelsen på refleksene for de ulike mineralene og bruke kvartsinnholdet bestemt ved DTA som korreksjon, kan man beregne den kvantitative mineralsammensetningen forholdsvis nøyaktig. Standardavviket er ca. ± 3%. XRD utføres på alle fraksjoner av prøven.

Ved hjelp av de tre metodene får man et godt bilde av mineral- og bergartssammensetningen, kornformen, forvitringsgraden og om prøven inneholder andre stoffer som f.eks. humus.

Konsentrasjon av suspendert materiale bestemmes ved filtrering av vannprøver. Ca. 1 l vann suges ved hjelp av en vakuumpumpe gjennom et filter som har åpninger på 0,45 µm. Filteret veies før analysen, og tørkes og veies etterpå. Konsentrasjonen bestemmes i mg/l eller g/m^3. Dersom det ønskes mineralogisk analyse av materialet, må det som regel filtreres mer enn 1 l vann. Dersom prøven inneholder grovt materiale, fjernes dette ved at man lar prøven passere gjennom sikt med åpning 45 µm før den filtreres.

Materialets sliteevne bestemmes i et spesielt slitasjeforsøk. Materialet i fraksjon 0,063 - 0,5 mm mates ned på en roterende tallerken. På tallerkenen hviler et stålstykke, som er slipt til med en bestemt krumningsradius. Stålstykket belastes med et lodd på 10 kg og slitasjepulveret passerer mellom stålstykket og tallerkenen. Etter at pulveret har passert stålstykket, suges det vekk, og det tilføres hele tiden nytt pulver. Forsøket pågår i 1 minutt. Slitasjeverdien er stålstykkets vekttap i mg. Den er bl.a. avhengig av materialets mineralsammensetning og kornform, og varierer fra ca. 100 for nedknust ren kvarts til 0 for glimmer. Analysen er grundig beskrevet i "Sandslitasje på vannkraftturbiner. Slitasjetesting" [10].

Analyseresultatene presenteres med et bilag for hver prøve. Det inneholder kornfordelingskurve og stolpediagrammer som viser det fraksjonsvise innholdet av kvarts, feltspat, glimmer og hornblende. Det har også en rubrikk for eventuelle merknader om bergartstyper, kornform, forvitringsgrad o.l. Det bør i tillegg lages en samlet tabell for alle prøvene som viser gjennomsnittlig mineralsammensetning for hele prøven, innhold av materiale mindre enn f.eks. 0,25 mm, avsetningstype og hvor prøven er tatt.

Resultatene fra filtrering og slitasjeforsøk presenteres fortløpende i tabeller.

Ut fra grunnlagsmaterialet, feltbefaring og analyseresultatene settes det opp en oversikt over hovedkildene for materialtilførsel, mengden som tilføres, materialets sliteegenskaper og hvordan det transporteres i de ytre og indre vannveiene. Kildene bør kvantifiseres og rangeres slik at man lett ser hvilke som tilfører materiale av betydning og hvor det derfor kan være behov for tiltak. Dette kan gjerne gjøres i tabellform for å lette oversikten.

Ut fra kildematerialets kornfordeling og strømningsforholdene i de ytre vannveiene og tunnelen kan det beregnes hvor stor andel av materialet som kan bli ført helt fram til turbinen og forårsake slitasje.

4. TILTAK FOR OPPSAMLING AV LØSMASSER.

4.1. Erfaringer fra eksisterende kraftanlegg.

Tabell 4.1 sammenfatter de arrangementer som er blitt bygd ved de kraftanleggene som har vært med i undersøkelsen, samt de anbefalinger av tiltak som er gitt.

Tiltakene har til hensikt å stoppe eller redusere den transport av materiale som har forårsaket turbinslitasje. Her nevnes:

- bygging av sedimenteringsbasseng foran bekkeinntak.
- erosjonssikring langs elver og bekker der erosjon foregår.
- endring av inntakets plassering og utforming.
- endring av magasinenes reguleringsgrenser.
- bygging av nye eller utbedring av eksisterende sandfang.
- stabilisering eller rensk av tunnelsålen.

4.2. Tiltak utenfor tunnelsystemet.

4.2.1. Sedimenteringsbasseng.

For de kraftverkene som har inngått i undersøkelsen er sedimenteringsbasseng den løsningen som oftest er blitt anbefalt fordi den er effektiv og forholdsvis rimelig dersom topografien kan utnyttes ved byggingen. Tiltaket er spesielt aktuelt i forbindelse med direkte inntak av bekker eller elver der materialet ikke har andre brukbare sedimenteringsmuligheter i form av større vann eller rolige partier i elveløpet. Dersom vassdraget har tilførsel av brevann, går gjennom rasområder eller eroderes i morenemasser, vil dette som regel medføre stor materialtilførsel. Et stort og riktig utformet sedimenteringsbasseng vil i slike tilfeller kunne stoppe mye av materialet i sandfraksjonen (ned til 0,06 mm). Topografien på bassengstedet vil normalt være bestemmende for hvor stort basseng det er lønnsomt å bygge. Dersom det er mulig, bør bassenget kunne lagre materiale for 10 - 20 år eller lengre. Det er viktig at vannet ledes inn i bassenget på en slik måte at mest mulig av lagringskapasiteten utnyttes. Muligheten for tømming vil være avhengig av hvor lett det er å komme fram med egnede maskiner og om massen som graves ut kan deponeres i nærheten. Dette har selvsagt betydning for størrelsen på bassenget.

Kraftverk	Renskemetode i tunnelen			Tilførsel fra den opprinnelige tunnelsålen i dag		I sandfanget eller tunnelen avsettes mesteparten av matr. ned til ca. .... mm	Masse avsatt i sandfanget i gjennomsnitt pr. år, m^3	Gjennomsnittlig konsentrasjon av suspendert matr. i avløpsvannet, g/m^3	Eksisterende tiltak mot materialtilførsel				Anbefalte tiltak mot materialtilførsel					
	grovrensk	utlasting fra groper	spylerensk	ja	nei				ingen	sandfang, fung. tilfredsstillende	sandfang, fung. ikke tilfredsstillende	sedimenteringsbasseng	ingen	sedimenteringsbasseng	heve laveste vannstand	forbedre sandfang	plastre utsatte avsetninger	flytte inntaket
Driva					X	0,25	200[1]	--		X				X				
Evanger					X	0,70	270	--			X			X				
Røldal/Suldal																		
Røldal					X	0,30	500	--			X			X				
Suldal I					X	--	lite	--			X		X					
Suldal II					X	0,35	--	--			X			X				
Fortun	X				X	0,50[2]	5000[3]	--			X	X		X				
Mauranger	X				X	--	3000[7]	58[4]		X					X			
Bjerka					X	0,30[2]	0	150			X	X			X	X		
Dividalen	X				X	0,40	lite	3			X		X					
Lio					X	0,30	--	--			X						X	X
Nedre Vinstra					X	--	inntil 250	2[5]		X			X					
Kvilldal		X	X	?		0,35	0	30 - 125[6]	X						X			
Leirdøla	X				X	0,60	lite	--			X		X					
Lomi	8)				X	0,30	--	blakket avløpsvann		?			X					

Tabell 4.1. Beskrivelse av materialtransporten i tunnelsystemene.

1) *Det er i tillegg avsatt mye materiae i tverrslag og i nisjer i tunnelen.*

2) *Materialet er avsatt i tunnelen.*

3) *Dette er gjennomsnittlig avsatt mengde pr. år i sedimenteringsbassenget i Styggedalen, som er et av flere bekkeinntak ved Fortun kraftverk.*

4) *Tallet er basert på målinger gjort i februar 1975.*

5) *Dette er slamkonsentrasjonen i en stor vannprøve som ble tatt mens det var tilførsel fra bekkeinntakene.*

6) *Målinger fra 8/11-82 til 17/1-83. Konsentrasjonen øker kraftig når vannstanden i magasinet synker.*

7) *Sandfanget betjener bare inntaket under Bondhusbreen.*

8) *Trykksjakten ble spylerensket, mens den øvrige delen av tilløpstunnelen ikke ble rensket.*

4.2.2. Sikring eller endring av elveløpet.

Slike tiltak kan være aktuelle og økonomisk forsvarlige der hvor de erosjonsaktive strekningene er små og hvor materialet som eroderes føres inn i inntaket. Det er viktig at forbygningen dimensjoneres og utføres riktig. Mellom plastringslaget og de underliggende massene kan det brukes syntetisk filterduk som effektivt hindrer utvasking av finkornet materiale gjennom det grovere plastringslaget.

4.2.3. Inntakets plassering.

For bekkeinntak eller inntak i elver kan plassering og utforming av inntaket ha stor betydning for hvor mye sand som føres inn i tunnelsystemet, spesielt under flom. Generelt bør inntaksarrangementet utformes slik at den største materialtransporten som skjer under flom, blir ført forbi inntaket og at det heller ikke avleires masse foran inntaket. Konkret vil utformingen måtte vurderes i hvert enkelt tilfelle ut fra topografiske forhold og erfaring med sandtransportproblemer.

For inntak i magasiner er det av stor betydning hvor inntaket blir plassert i forhold til vannstrømmene i magasinet og i forhold til eventuelle løsmasser. Det er uheldig dersom inntaket ligger like framfor osen av en materialførende elv, eller i lett eroderbare løsmasser som vil rives med av vannstrømmen inn i tunnelen. Inntaket bør så vidt mulig plasseres i en bratt fjellskråning uten løsmasseoverdekning og slik at eventuelt materiale som føres med bekker og elver inn i magasinet får sedimentere i god avstand fra inntaket før vannet trekkes inn i tunnelen. Det vil være ufordelaktig å plassere inntaket i det dypeste punktet i magasinet, fordi det der ofte vil være størst løsmasseoverdekning, og sedimenter lett vil trekkes dit p.g.a. gradienten og vannstrømmene.

4.2.4. Magasinets reguleringsnivåer.

Det vil sjelden være økonomisk forsvarlig å endre/tilpasse reguleringsgrensene p.g.a. sandslitasjeproblemer, men det kan ha stor betydning for tilførselen av slitende materiale hvor langt ned et magasin tappes. Når vannstanden i et magasin senkes under naturlig vannstand (NV), vil bekker og elver begynne å grave i det materialet som tidligere var avsatt i bekkeutløpene. Videre synker poretrykket, grunnvannsstrømmen i massene øker, vannstrømmene i magasinet vil bli sterkere og bølgene vil få nye strandpartier å vaske ut.

Omfanget av erosjons- og rasvirksomheten vil ofte øke etter hvert som vannnivået synker. Dette er avhengig av hvordan løsmassene er fordelt i magasinet, og det kan tenkes at det peker seg ut nivåer der en ytterligere senking av vannstanden vil medføre en sterk økning i erosjonen. Heving av vannstanden kan også føre til bølgeerosjon og undergraving av tidligere stabile avsetninger.

Det vil være størst aktivitet de første gangene magasinet tappes ned og erosjonen vil avta etter hvert som det vaskes fram en overflatehud av grovere materiale og løsmassene får tilpasset seg de nye forholdene. Denne stabiliteten vil forrykkes dersom magasinet tappes ekstra langt ned en sesong.

Det viktigste tiltaket for å hindre erosjon i et magasin vil altså være å tappe det minst mulig ned, og unngå for stor variasjon i laveste vannstand fra år til år. Det kan også tenkes at bekker og elver kan legges om slik at de har utløp over fjell og derved unngår å grave i tidligere avsatte masser.

4.3. Tiltak i tilløpssystemet.

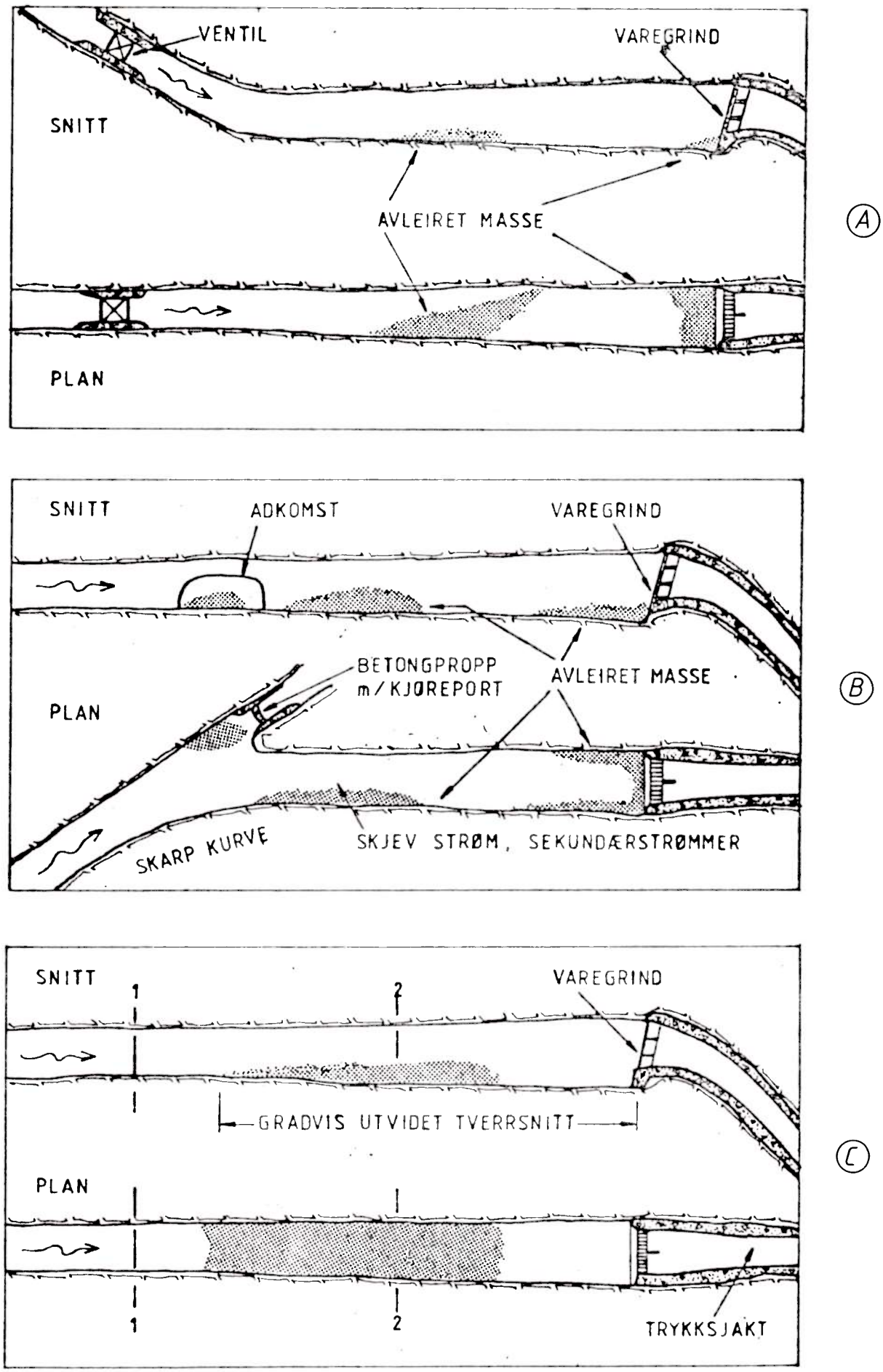
Løsmasser som transporteres i tilløpssystemet kan stoppes før de når turbinen. Det vanligste tiltak er å bygge sandfang. Disse plasseres gjerne umiddelbart foran trykksjakten. De kan utformes på noe forskjellige måter.

4.3.1. Åpne sandfang.

Åpne sandfang er i prinsippet en utvidelse av tilløpstunnelen. Hensikten er å nedsette strømhastighetenen slik at løsmasser som transporteres, avsettes på bunnen. Figur 4.1 viser noen utformninger av åpne sandfang. Erfaringene med åpne sandfang er generelt dårlige. I figur 4.1 betegnes sandfang (A) og (B) som dårlige av følgende grunner:

- I sandfang (A) vil de store strømhastigheter ut fra luker (5 - 7 m/s) forårsake separasjon og virvelsoner i sandfanget. Strømhastighetene langs bunnen reduseres ikke og løsmassene i vannstrømmen fortsetter gjennom sandfanget.

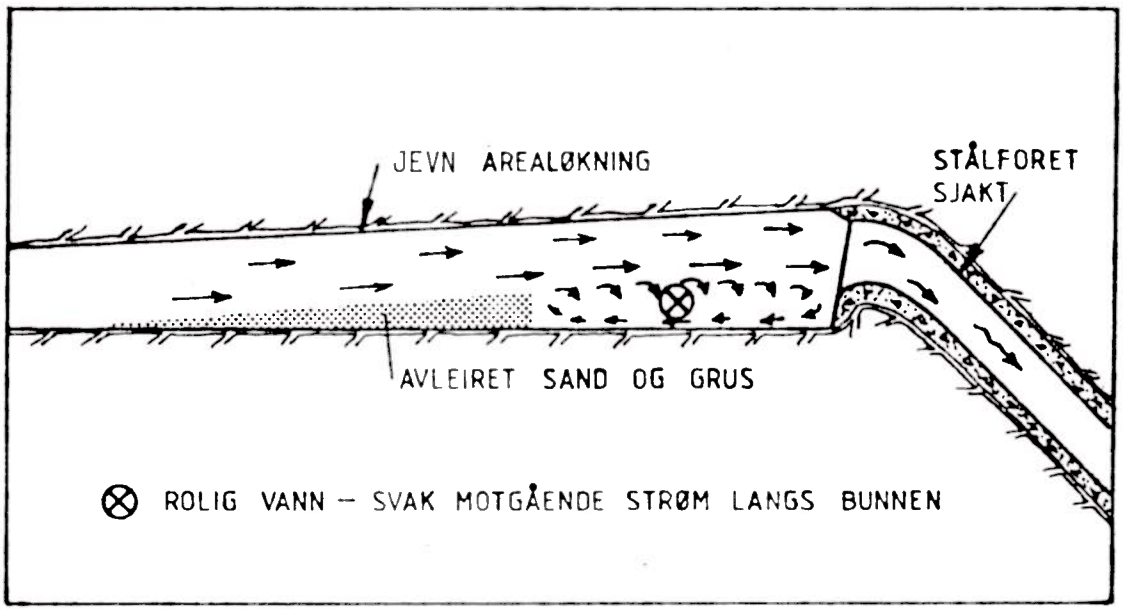
- I sandfang (B) gjør kurven i tunnelen at det dannes sekundære strømmer på tvers av tunnelen. Avleiringen av løsmassene blir dårlig. Bare en del av massene blir liggende tilbake mens de øvrige fortsetter gjennom sandfanget mot turbinene.



Figur 4.1. Åpne sandfang, forskjellige utforminger.

- Sandfang (C) er i prinsippet den beste utforming av et åpent sandfang. Foran sandfanget bør det være en 150 - 200 m lang rett strekning i tunnelen. Dette sikrer jevn strøm inn mot sandfanget. I selve sandfanget øker tverrsnittet jevnt og ikke mer enn at strømhastigheten reduseres jevnt uten at det dannes separasjon og virvelsoner.

I ideelle tilfeller kan man regne med å få avsatt masser som tilsvarer ca. 90% av det utvidede tunnelareal (sandfangvolum). En del suspenderte (svevende) partikler vil også avsettes nedstrøms sandbanken etter hvert som denne vandrer framover. Dette skyldes at det dannes en saktegående bakevje som vist i figur 4.2.



Figur 4.2. Strømningsforhold i et halvfylt sandfang.

Kommentarer til åpne sandfang.

Om åpne sandfang behandlet i dette avsnittet kan generelt sies:

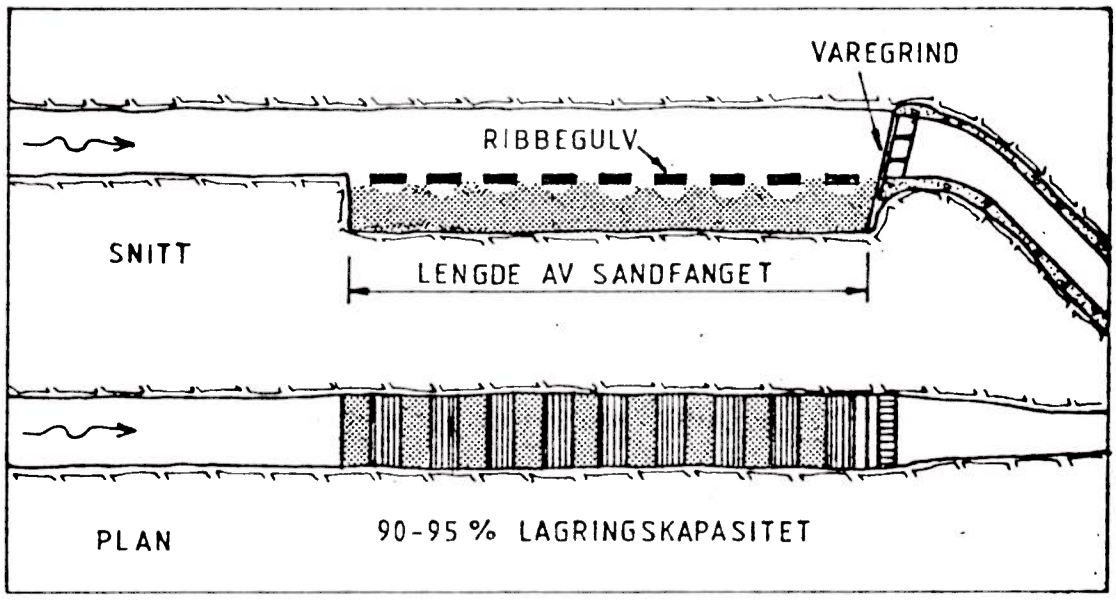
- Et åpent sandfang bør ikke plasseres nærmere en kurve eller luke (ventil) enn 150 - 200 m, heller ikke i nærheten av et forgreningsområde eller en svingesjakt.
- Tversnittsarealet må økes så forsiktig at strømmen er positivt rettet i hele tverrsnittet og retarderes jevnt framover i sandfanget.

- Dersom fjellkvaliteten er dårlig i sandfangsområdet, slik at det dannes sprang i vegger eller tak, vil strømningsforholdene bli mer ujevne og oppsamlingsevnen vesentlig redusert.

- Erfaringene med åpne sandfang, også de som er tilnærmet ideelt utformet, er at de ikke alltid er så effektive som laboratorieforsøk og vurderinger for øvrig skulle tilsi. Årsakene er ikke fullt ut klarlagt, men skyldes trolig ujevne strømforhold, noe som ofte skyldes ujevne vegger og tak i tunnelen. Driftsforholdene spesielt under oppstartingsperioden har også virket inn i noen tilfeller.

4.3.2. Ribbesandfang.

Som en konsekvens av de dårlige erfaringene med åpne sandfang, anbefales det nå å bygge såkalte ribbesandfang. I disse legges et ribbedekk mellom vannstrømmen og lagringsvolumet. Laboratorieforsøk har klart vist at effekten av denne type sandfang er god. Dette bekreftes også fra en del kraftverk hvor slike sandfang har vært i drift en tid. Et ribbesandfang er vist i figur 4.3.



Figur 4.3. Ribbesandfang.

Tunnelen utvides i bunnen og volumet tilpasses antatt behov.

Kommentarer til ribbesandfang.

Ribbesandfang har følgende fordeler:

- de kan plasseres på steder hvor åpne sandfang ikke egner seg.
- de gir sikrere lagring av massene og bedre utnyttelse av lagringsplassen.

Ulempene kan være:

- de er noe dyrere å bygge enn åpne sandfang.
- tømmingen krever enkelte steder eget arrangement p.g.a. ribbene.

4.4. Stabilisering av gjenværende masser på tunnelsålen.

Etter at tunneldriften er ferdig ligger det tilbake en kjørebane på tunnelsålen som kan være fra 0,7 til 1,1 m tykk (målinger ved Skjomen-verkene). Noen ganger kan det være hensiktsmessig og økonomisk fordelaktig å la disse massene bli liggende. Det bør da sørges for at minst mulig utvasking skjer etter at kraftverket kommer i drift. Stabilisering av de gjenværende massene kan gjøres på to ulike måter:

- Det legges fast dekke av asfalt eller betong over tunnelsålen.
- Det legges ut et dekke av pukk grov nok til å motstå strømkreftene ved de strømhastigheter som kan forventes i tunnelen.

  Fast dekke kan brukes i alle tunneler. Dimensjoneringskriteriene er fortsatt noe usikre, men forskning pågår (1983) for å avklare dette.

Når det gjelder stabilisering med pukk eller singel, kan denne måten bare benyttes hvor oppfylling av tunnelsystemet kan gjøres kontrollert.

Generelt kan det sies at dersom tunnelarealet er økonomisk optimalt, kan det legges asfalt eller betongdekke. Friksjonstapene kan reduseres med 15 - 20% på denne måten.

Dersom man p.g.a. driftshensyn har drevet en tunnel som er "for stor" ut fra økonomiske kriterier, kan stabilisering av tunnelsålen vurderes. De strømningssituasjonene som kan oppstå under drift, oppfylling og tømming bør vurderes på forhånd.

4.5. Rensking av tunnelsålen.

Bare finrensk ved spyling vil hindre turbinslitasje p.g.a. tilførte løsmasser fra tunnelen. Det bør da være en forutsetning at masser ikke transporteres inn fra ytre kilder, ellers vil kostnadene ved finrensk ikke stå i forhold til virkningene.

4.6. Oversikt over renskemetoder i kraftverk.

Tabell 4.2 gir en oversikt over renskemetoder med kommentarer.

Renskemetode	Gjenværende masse	Anmerkninger
Finrensk (manuell)	0	Tunnelsålen blir i mange tilfeller svært ujevn, falltapene øker.
Finrensk (maskinell)	Ca. 1 m^3 pr. 40 m^2 såle	do.
Grovrensk	Ca. 20 cm transportabelt ca. 1 m^3 pr. 20 - 25 m^2 såle	Etter at stabilt dekklag er dannet, vil sålen være relativt jevn.
Spylerensk (gravitasjonsrensk)	0	Ujevn tunnelsåle, økte falltap.
Stabilisering med pukk, asfalt eller betong	70 - 100 cm Dersom grovrensk utføres ca. 30 cm	Gjenværende masser gir mindre strømningsareal. Glattere såle gir imidlertid reduserte falltap.

Tabell 4.2. Oversikt over renskemetoder i kraftverkstunneler.

APPENDIX A.

A. BESKRIVELSE AV KRAFTVERKENE SOM HAR DELTATT I PROSJEKTET.

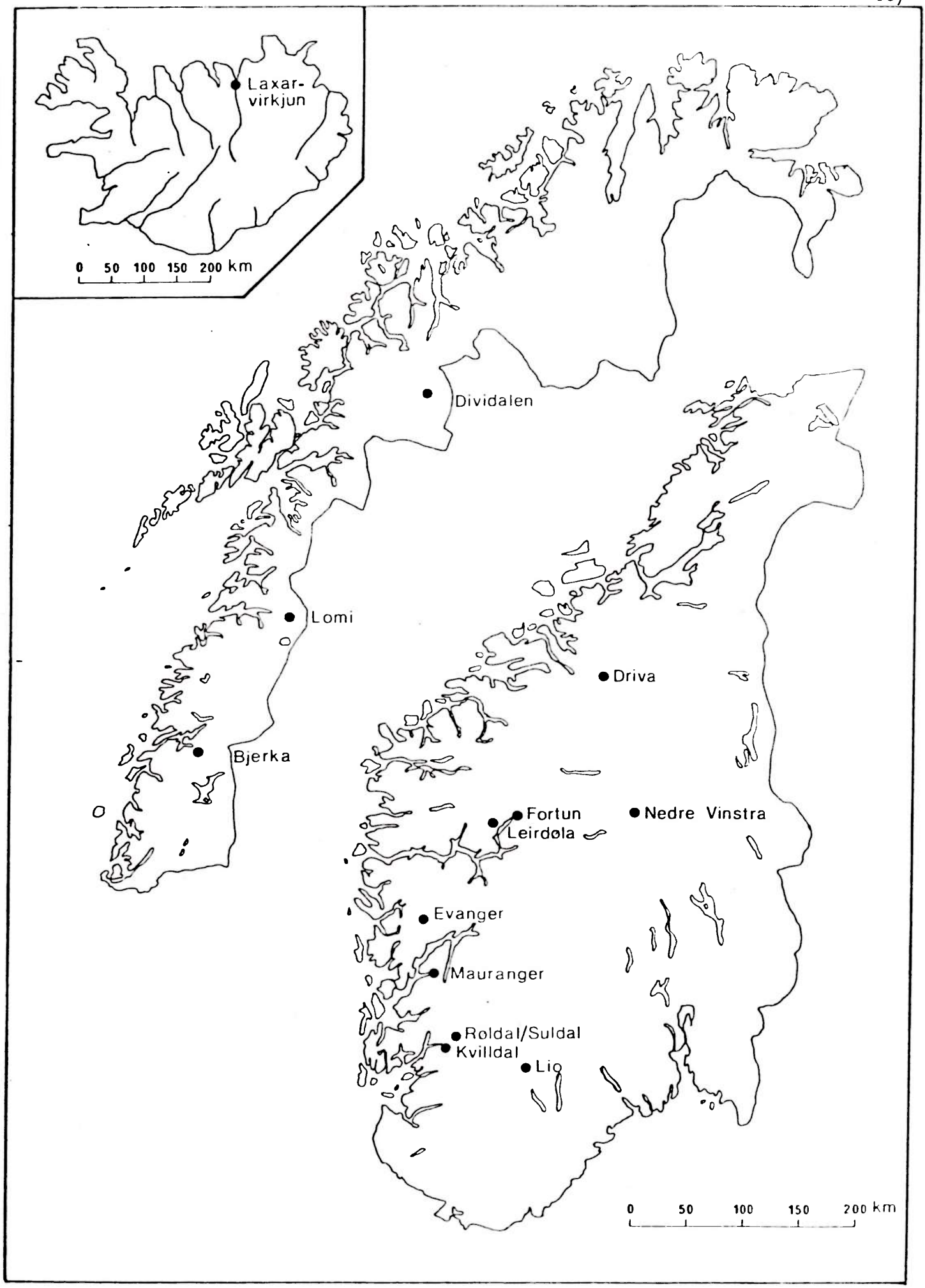
A.1. Generelt.

Som orientert om innledningsvis i denne rapporten er de fleste erfaringer og data fremkommet gjennom forskningsprosjektet "Sandslitasje på vannkraftturbiner". Prosjektet var i hovedsak basert på en relativt grundig gjennomgåelse av et antall utvalgte kraftanlegg. Et sammendrag av undersøkelsene ved disse anleggene er tatt inn i denne appendix'en.

A.2. Beskrivelse av kraftanleggene, i tabellform.

For at det skal være enklere å sammenligne kraftverkene er tekniske data og resultatene fra undersøkelsene framstilt i tabellform. Se tabell A.1, A.2 og A.3. Anleggenes geografiske plassering er vist i figur A.1.

Dataene i tabellene er hentet fra delrapportene for de enkelte anlegg, [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9] og [11].



Figur A.1. Geografisk plassering til kraftverkene som har vært med i undersøkelsene. Island og Norge.

Kraftverk	Oppstartingsår	Brutto fallhøyde m	Samlet installert effekt MW	Antall turbiner og type	Nedslagsfelt, km^2	Midlere, tilløp mill. m^3/år	Ca. andel av nedslagsfeltet som drenerer gjennom bekkeinntak/magasiner %	Tunnel tverrsnitt, m^2	Vannhastighet i tunnelen m/s	Kornstørrelse som kan transporteres i tunnelen, d_{70}, mm
Driva	1973	550	2 x 70	2 francis	411	--	14/86	22	--	--
Evanger	1969	790	3 x 110	3 pelton	310	837	20/80	32	1,5	5,7
Røldal/Suldal										
Røldal	1966	460	2 x 80	2 francis	424	--	9/91	--	--	--
Suldal I	1965	310	2 x 80	2 francis	577	--	2/98	--	--	--
Suldal II	1967	560	70 + 80	2 francis	228	--	25/75	23	--	--
Fortun	1963	970	6 x 37	6 pelton	379	641	28/72	18	1,5	6,3
Mauranger	1974	775-860	2 x 125	2 pelton	162	--	6/94	--	--	--
Bjerka	1972	357	20	1 francis	80	--	11/89	8	0,7	1,6
Dividalen	1972	256-289	26	1 francis	250	167	0/100	11	1,0	3,0
Lio	1969	335	44	1 francis	248	--	5/95	15	1,0	2,9
Nedre Vinstra	1953-58	420	4 x 92	4 francis	1.300	--	7/93	30	2,0	10,2
Kvilldal	1981-	520	4[1] x 310	4 francis	2.000	--	--	135	1,0[2]	2,0[2]
Leirdøla	1978	445	100	1 francis	165	--	17/83	21	1,2	3,9
Lomi	1979	524-582	2 x 59	2 francis	145	263	0/100	17	1,4	5,5

Tabell A.1. Tekniske data for kraftverkene.

1) Bare 2 av turbinene er satt i drift til nå (juli 1983).

2) Vannhastighet når 2 turbiner er i drift. Hastigheten øker til 2 m/s når alle 4 aggregatene er ferdige, og d_{70} til materialet som kan transporteres i tunnelsystemet øker da til 7,9 mm.

Kraftverk	Problemer på grunn av sandslitasje					Hovedkilder for tilførsel av materiale, avsetninger								Materialets gjennomsnittlige mineralsammensetning, %			Det tilførte materialets gjennomsnittlige innhold av korn mindre enn 0,25 mm, %	Grov bergartsfordeling i nedslagsfeltet					
	få problemer	slitasje på labyrinter og ledeapparat	slitasje på løpehjul, nåler og dyser	sliping og revisjoner	merknader	liten materialtilførsel	morene	breslam	innsjøsedimenter	glasifluvialt matr.	matr. fra tunnelsålen	hovedsakelig gj. bekkeinntak	hovedsakelig fra magasin	kvarts	feltspat	sjiktmineraler		granitt/granodioritt	granittisk gneis	fyllitt/glimmerskifer	gabbro/dioritt	syenittisk gneis	kvartsitt/sparagmitt
Driva		X			Virkn.gr. red. 4% på 5 år		X					X		30	60	10	48		X	X			
Evanger			X	X	Levetiden red. med 30%		X	X				X		35	42	12	40			X			X
Røldal/Suldal																							
Røldal							X					X		27	49	7	35	X	X	X			
Suldal I	X					X								35	46	5	26	X	X				
Suldal II							X					X		27	45	4	20	X	X	X			
Fortun			X	X	Levetiden red. med ca. 30%		X	X				X		5	72	21[1)]	32				X	X	
Mauranger			X		Utskifting etter ca. 18500 driftstimer			X	X				X	30	53	10	49	X			X		
Bjerka				X					X				X	26	44	20	42			X			
Dividalen					Skiftet spalteringer i 1981				X				X	30	50	16	41						
Lio				X	Virkn.gr. red. 2% på 8 år				X	X			X	33	53	6	42	X	X		X		
Nedre Vinstra	X					X	X		X			X	X	25	56	13	55			X	X		X
Kvilldal		X							X		?		X	32	51	13	38	X	X	X			
Leirdøla	X					X		X					X	12	18	68[2)]							
Lomi		X			Reg. slitasje på ledefl. e. 2 år		X		X				X	25	67	4	70	X	X				
														38	35	24	83			X	X		

Tabell A.2. Beskrivelse av sandslitasjeproblemene og de geologiske forholdene ved hvert kraftanlegg.

1) *Prøvene inneholder gjennomsnittlig 21% pyroksen og hornblende.*

2) *Den øverste tallrekken er gjennomsnittet for løsmasseprøvene, mens den nederste er gjennomsnittet for vann-/suspensjonsprøvene.*

Kraftverk	Renskemetode i tunnelen			Tilførsel fra den opprinnelige tunnelsålen i dag		I sandfanget eller tunnelen avsettes mesteparten av matr. ned til ca. .... mm	Masse avsatt i sandfanget i gjennomsnitt pr. år, m^3	Gjennomsnittlig konsentrasjon av suspendert matr. i avløpsvannet, g/m^3	Eksisterende tiltak mot materialtilførsel				Anbefalte tiltak mot materialtilførsel					
	grovrensk	utlasting fra grober	spylerensk	ja	nei				ingen	sandfang, fung. tilfredsstillende	sandfang, fung. ikke tilfredsstillende	sedimenteringsbasseng	ingen	sedimenteringsbasseng	heve laveste vannstand	forbedre sandfang	plastre utsatte avsetninger	flytte inntaket
Driva					X	0,25	200[1]	--		X				X				
Evanger					X	0,70	270	--			X			X				
Røldal/Suldal																		
Røldal					X	0,30	500	--			X			X				
Suldal I					X	--	lite	--			X		X					
Suldal II					X	0,35	--	--			X			X				
Fortun	X				X	0,50[2]	5000[3]	--			X	X		X				
Mauranger	X				X	--	3000[7]	58[4]		X					X			
Bjerka					X	0,30[2]	0	150			X	X			X	X		
Dividalen	X				X	0,40	lite	3			X		X					
Lio					X	0,30	--	--			X						X	X
Nedre Vinstra					X	--	inntil 250	2[5]		X			X					
Kvilldal		X	X	?		0,35	0	30 - 125[6]	X						X			
Leirdøla	X				X	0,60	lite	--			X		X					
Lomi	8)				X	0,30	--	blakket avløpsvann		?			X					

Tabell A.3. Beskrivelse av materialtransporten i tunnelsystemene.

1) *Det er i tillegg avsatt mye materiae i tverrslag og i nisjer i tunnelen.*

2) *Materialet er avsatt i tunnelen.*

3) *Dette er gjennomsnittlig avsatt mengde pr. år i sedimenteringsbassenget i Styggedalen, som er et av flere bekkeinntak ved Fortun kraftverk.*

4) *Tallet er basert på målinger gjort i februar 1975.*

5) *Dette er slamkonsentrasjonen i en stor vannprøve som ble tatt mens det var tilførsel fra bekkeinntakene.*

6) *Målinger fra 8/11-82 til 17/1-83. Konsentrasjonen øker kraftig når vannstanden i magasinet synker.*

7) *Sandfanget betjener bare inntaket under Bondhusbreen.*

8) *Trykksjakten ble spylerensket, mens den øvrige delen av tilløpstunnelen ikke ble rensket.*

A.2.1. Kommentarer til tabell A.1:

Den siste kolonnen i tabell A.1, kornstørrelse som kan transporteres i tunnelen, er beregnet etter formelen: $d_{70} = 0{,}0045 \cdot v^2 \cdot A^{-1/6}$, der d_{70} vil si at 70% av massen er finere enn denne storrelsen, v er midlere strømhastighet i m/s og A er tunneltverrsnittet i m^2. Formelen er utviklet på grunnlag av laboratorieforsøk og andre erfaringer. Manglende opplysninger er markert med strek i tabellen.

A.2.2. Kommentarer til tabell A.2:

Opplysningene om problemer p.g.a. sandslitasje er ikke like gode for alle kraftverkene. I denne tabellen er det derfor bare tatt med det vi med sikkerhet vet uten at det trenger å være noen fullstendig beskrivelse av problemene.

Den fjerde kolonnen i tabellen viser det tilførte materialets gjennomsnittlige mineralsammensetning. For en del av kraftverkene er summen av mineralene betydelig mindre enn 100%. Dette skyldes at mineralsammensetningen er bestemt bare ved korntelling. Da en del av prøven også vil bestå av bergartskorn og ikke bare rene mineralkorn, er sannsynligvis særlig feltspatinnholdet anslått for lavt. Innholdet av kvarts er bestemt på nedknust prøvemateriale, slik at de oppgitte prosentverdiene stemmer overens med det totale innhold av kvarts. Prøvene inneholder også en liten andel andre mineraler som ikke er tatt med i tabellen. Med sjiktmineraler menes myke, flakformede mineraler som glimmer og kloritt.

Prøvenes gjennomsnittlige innhold av materiale mindre enn 0,25 mm er tatt med fordi beregninger og erfaringer viser at dette materiale vil kunne transporteres i suspensjon etter at det har kommet inn i tunnelsystemet. Det er derfor svært vanskelig å stoppe. Den eneste muligheten til å hindre materialet i å passere turbinene er derfor å sørge for at det ikke kommer inn i tunnelene ved å la det sedimentere i store bassenger.

Bergartsfordelingen i nedslagsfeltene er bestemt ut fra oversiktskart i stor målestokk og opplysningene er tatt med for å vise sammenhengen med mineralsammensetningen i løsmasseprøvene.

A.2.3. Kommentarer til tabell A.3:

Opplysninger om renskemetoder i tunnelene mangler for de fleste av kraftverkene.

Alle de kraftverkene der det ikke antas å bli tilført materiale fra den opprinnelige tunnelsålen, har vært i drift i mange år.

Den nedre kornstørrelsesgrensen for materiale som avsettes i tunnelsystemet er svært usikker og de oppgitte verdiene må bare betraktes som et forsøk på å antyde hvor grovt materiale som passerer turbinene. For mange av kraftverkene er det sannsynligvis en god del materiale som er grovere enn de oppgitte grensene, som også sliter på turbinene. Der rubrikken er fylt ut med en strek mangler det opplysninger.

Tallene som angir mengde materiale avsatt i sandfangene pr. år gir nødvendigvis ikke et riktig bilde av den totale sandtilførselen. Sandfangets effektivitet og kapasitet spiller her en avgjørende rolle.

Konsentrasjon av suspendert materiale i avløpsvannet varierer mye med årstiden og vannstand i magasinene. For Bjerka og Dividalen er konsentrasjonene målt over lang tid slik at disse variasjonene er jevnet ut.

Årsakene til at sandfangene ikke fungerer tilfredsstillende kan være at: strømningsforholdene er ugunstige, kapasiteten er for liten eller at de er svært tungvinte å tømme. De sedimenteringsbassengene som er anlagt ved Fortun og Bjerka betjener et bekkeinntak hver og virker altså bare på en del av den totale vannmengden som tilføres kraftverkene.

De anbefalte tiltakene er forslag til hva som kan redusere materialtilførselen. Før de settes i verk er det nødvendig med økonomiske vurderinger for å avgjøre om det er lønnsomt eller ikke.

A.3. Kort sammenfatning av spesielle forhold ved hvert kraftverk.

A.3.1. Driva.

Kraftverket har stor tilførsel av morenemateriale gjennom bekkeinntaket i Ottdalen, spesielt ved snøsmeltingen og i sterke nedbørperioder. Det går hyppige ras i dalen og det er lite sannsynlig at aktiviteten vil avta i nærmeste framtid. Inntaket tilføres anslagsvis 4.000 - 5.000 m^3 materiale pr. år. Dette har små muligheter for å sedimentere på veien mot inntaket.

Den finkornige delen av materialet vil føres gjennom tunnelsystemet og forårsake slitasje på turbinene. Den grove delen vil bli liggende igjen i tunnelen og sandfanget. Materialet har et høyt innhold av slitende mineraler, og morene har vanligvis skarpkantede korn. Slitasjen førte over en periode på 5 år til 4% redusert virkningsgrad.

Tiltaksmulighetene er gunstige ved Driva kraftanlegg, fordi årsaken til slitasjen er klar og tilførselen er konsentrert til ett bekkeinntak. Det er derfor anbefalt å bygge et sedimenteringsbasseng oppstrøms inntaket, der det meste av materialet ned til finsand-/siltfraksjonen (0,2 - 0,06 mm) vil kunne samles opp, [1].

A.3.2. Evanger.

Det tilføres mye materiale fra 3 hovedkilder og noe fra 5 mindre kilder. Det som tilføres er hovedsakelig breslam og morene, som er finkornet og inneholder gjennomsnittlig 35% kvarts og 42% feltspat, dvs. at det er sterkt slitende. Alle hovedkildene er bekkeinntak der materialet har små sedimenteringsmuligheter på veien fram til inntakene. Sandfanget fungerer lite tilfredsstillende og det meste av materialet føres derfor gjennom tunnelsystemet og forårsaker slitasje. Problemene har ført til at de slitasjeutsatte komponentene har fått redusert levetiden med ca. 30%. I tillegg kommer tapet i virkningsgrad.

Blant annet p.g.a. at det slitende materialet er forholdsvis finkornet er bygging av sedimenteringsbasseng anbefalt ved de tre bekkeinntakene der tilførselen er størst. Bygging av et større og bedre sandfang vil også kunne stoppe en del av tilførselen, men ikke i samme grad som bassenger i de ytre vannveiene, [2].

A.3.3. Røldal/Suldal.

Tre av de seks kraftstasjonene til Røldal/Suldal Kraft A/S er med i undersøkelsene.

Suldal I har svært liten tilførsel av slitende materiale og det er ikke registrert slitasjeproblemer av betydning på aggregatene. Det er derfor heller ikke aktuelt å sette i verk noe tiltak mot sandslitasje.

Suldal II har betydelig tilførsel av slitende materiale gjennom to bekkeinntak. Materialet stammer hovedsakelig fra moreneavsetninger og noen

glacifluviale avsetninger. Finstoffinnholdet er ca. 20% mindre enn 0,25 mm, og kvarts- og feltspatinnholdet henholdsvis 27 og 45% i gjennomsnitt for kildematerialet. Ved inntaket kalt "Bleskestad", som har den største tilførselen, har materialet ingen sedimenteringsmuligheter før det går inn i tunnelen. Ved inntaket i Kvanndalen er det derimot bygd en dam som demmer opp et avlangt vann (ca. 1 km langt). Bassenget er grunt, vannstanden varierer ofte og vannstrømmen er stor. Det synes derfor som om mye av materialet føres gjennom bassenget og ned i inntaket. Det avsettes lite materiale i tunnelen og sandfanget fungerer ikke tilfredsstillende. Sandslitasjen har ført til tap av virkningsgrad og redusert levetid for de utsatte komponentene.

Bygging av sedimenteringsbasseng ved inntaket i Bleskestad er anbefalt, mens det i Kvanndalen trolig ville hjelpe å holde høy og jevn vannstand i magasinet. En utbedring av sandfanget vil selvfølgelig også kunne stoppe mye av materialet.

Røldal kraftverk tilføres materiale fra morene gjennom to av bekkeinntakene, Skjemmedalen og Grøndalen. 35% av materialet er så finkornet at det vil kunne transporteres i suspensjon i tunnelsystemet. Kvarts- og feltspatinnholdet er henholdsvis 27 og 49%. I Skjemmedalen har massene ingen sedimenteringsmuligheter før inntaket, mens det i Grøndalen er anlagt et lite basseng som stopper det aller groveste, ved selve nedløpet til tunnelen. En del av materialet blir liggende igjen i tunnelen og sandfanget, mens det finkornige føres gjennom hele tunnelsystemet. Sandslitasjen har medført tap av virkningsgrad og nødvendiggjort utbedringer på de slitasjeutsatte delene i turbinene. Materialtilførselen kan trolig reduseres betraktelig dersom det anlegges rikelig dimensjonerte sedimenteringsbassenger ved de to bekkeinntakene, [4].

A.3.4. Fortun.

Kraftverket har stor tilførsel av slamrikt brevann, spesielt gjennom de tre bekkeinntakene i Ringsdalen, Skagastølsdalen og Styggedalen. Det foregår i tillegg erosjon i moreneavsetninger i Ringsdalen og Skagastølsdalen. Materialet inneholder gjennomsnittlig 32% finstoff, og mineralsammensetningen er: 5% kvarts, 72% feltspat og 21% pyroksen og hornblende. Selv om kvartsinnholdet er lavt, så har slitasjetesting [10] vist at sanden er nesten like slitende som materiale med 25 - 30% kvarts (vanlig i Norge).

I Styggedalen er det bygd et sedimenteringsbasseng som samler opp mesteparten av materialet ned til 0,06 mm. Bassenget har et totalvolum på ca. 150.000 m^3 og i løpet av en 16 års-periode ble det avsatt 80.000 m^3 materiale der. Ved de to andre bekkeinntakene er det ingen sedimenteringsmuligheter av betydning oppstrøms inntaket. I tunnelsystemet er det ikke annet enn små utvidelser på tunnelen som samler opp sand. Disse har svært liten kapasitet og er dessuten tungvinte å tømme. Det meste av sanden føres derfor helt fram til turbinene. Slitasjen medfører redusert levetid for de utsatte maskindelene, og tap av virkningsgrad. Problemene ble merkbart mindre etter at sedimenteringsbassenget i Styggedalen sto ferdig. Bygging av et tilsvarende basseng i Ringsdalen er derfor anbefalt. For øvrig ville et godt sandfang også kunne stoppe mye av det grove materialet som i dag går igjennom turbinene, [3].

A.3.5. Mauranger.

Hovedkildene ved dette kraftverket er finkornet breslam og innsjøsedimenter som er avsatt i nærheten av inntakene i magasinene. De første driftsårene skyldtes trolig slitasjen også tilførsel fra tunnelsålen. Både innholdet av finstoff og slitende mineraler er høyt. Det meste av materialet som tilføres fra nedslagsfeltet har gode sedimenteringsmuligheter i de mange vann og magasiner i dreneringssystemet, men den finkornige delen av materialet vil holde seg svevende og bli trukket inn i tunnelene.

I forbindelse med inntaket av brevann under Bondhusbreen er det anlagt et sandfang som årlig samler ca. 3.000 m^3 sand og grus. Slammet fra Bondhusbreen har også anledning til å sedimentere i Mysevatn lenger nedstrøms i systemet. Den nordre tunnelgrenen har ikke noe sandfang. Den store tilførselen av suspendert materiale, ca. 60 g/m^3, er svært vanskelig å stoppe etter at det først har kommet inn i tunnelen. Den eneste muligheten for å redusere tilførselen er derfor sannsynligvis å heve laveste vannstand i magasinene slik at avsetningene ikke eroderes løs, [5].

A.3.6. Bjerka.

Kraftverket tilføres i dag slitende materiale fra Store Målvatn, i form av finkornige innsjøsedimenter som eroderes når vannstanden senkes. En stor del av magasinet var nesten fylt opp av innsjøsedimenter før reguleringen begynte. Når vannstanden senkes, konsentreres vannstrømmen til elver som

graver kraftig. Materialet er så finkornet at det holdes i suspensjon fram til tunnelinnløpet. Prøvene fra området inneholder gjennomsnittlig 26% kvarts og 44% feltspat. Sandfanget fungerer ikke tilfredsstillende og mesteparten av materialet føres derfor gjennom hele tunnelsystemet. Ved avløpet er det målt en gjennomsnittlig konsentrasjon av suspendert materiale på 150 g/m^3.

Slitasjen har medført behov for revisjoner og sveiseutbedringer på turbinen. De finkornige innsjøsedimentene er svært vanskelige å stoppe og den eneste måten å hindre at de eroderes, er å heve laveste vannivå. Befaring og prøvetaking tyder på at det i tillegg tilføres en del grovere materiale. Dette vil kunne stoppes dersom det bygges et bedre sandfang [6].

A.3.7. Dividalen.

Også ved dette kraftverket består hovedkildene av finkornige innsjøsedimenter som eroderes og holdes i suspensjon til de trekkes inn i tunnelen. Men tilførselen er her mye mindre og det er målt gjennomsnittlige konsentrasjoner i avløpsvannet på bare 3 g/m^3. Det foregår også erosjon i morene og glacifluviale avsetninger ved magasinet, men bare den finkornige delen av dette materialet vil kunne holde seg i suspensjon. Det grove vil sedimentere i bassenget. To små sandfang samler opp en del av det grove bunntransporterte materialet, mens det som holdes suspendert i vannstrømmen passerer turbinen. Det er registrert en forholdsvis beskjeden slitasje på turbinen. Spalteringene er skiftet én gang. På grunn av liten materialtilførsel og slitasje er det ikke anbefalt noen spesielle tiltak [7].

A.3.8. Lio.

Slitasjeproblemene ved dette kraftverket skyldes store løsmasseavsetninger rundt tunnelinnløpet i magasinet. Der opptrer både innsjøsedimenter og glacifluviale avsetninger. Erosjonen foregår særlig under snøsmeltingen og når vannstanden er lav. På grunn av hellingen og den korte avstanden mellom massene og inntaket føres disse ned i tunnelen. Materialet inneholder gjennomsnittlig 42% mindre enn 0,25 mm, 33% kvarts og 53% feltspat. Sandfanget har liten kapasitet og samler bare opp det groveste, bunntransporterte materialet. Turbinen ble revidert etter 8 års drift og virkningsgraden var da redusert med ca. 2%. Det er anbefalt at de utsatte massene sikres mot videre erosjon ved plastring eller at inntaket flyttes vekk fra disse avsetningene, [8].

A.3.9. Nedre Vinstra.

Kraftverket tilføres finkornige innsjøsedimenter når magasinet i Olstappen tømmes langt ned. Ved et av bekkeinntakene foregår det ras i bratte moreneskråninger, spesielt i snosmeltingsperioden, og en del av massene føres ned i inntaket. Når vannstanden i Olstappen ikke er for lav, og utenom snøsmeltingen, er det liten sandtransport i vannveiene. Prøvene som er tatt inneholder gjennomsnittlig 55% materiale mindre enn 0,25 mm og henholdsvis 25 og 56% kvarts og feltspat. Sandfanget ble utbedret i 1968 etter 15 års drift. Det synes nå å virke tilfredsstillende, dvs. at det stopper mesteparten av det bunntransporterte materialet. Bare den finkornige delen av materialet holdes i suspensjon og en vannprøve tatt mens det bare var tilførsel fra bekkeinntakene viste en konsentrasjon på 2 g/m^3. Det er ikke registrert slitasje av betydning på turbinene ved kraftverket. Det er derfor heller ikke foreslått noen ytterligere tiltak for å redusere sandtransporten, med unntak av bygging av noen mindre fangdammer ved bekkeinntak i Hatta. Dette for å stoppe det grovkornige materialet og for å hindre at selve innløpet tettes igjen, [9].

A.3.10. Kvilldal.

Driftsvannet har et høyt innhold av suspendert materiale som skyldes ras og erosjon i løsmassene rundt magasinet Sandsavatn. Det foregår trolig også utvasking av tunnelsålen fremdeles og en del grovere materiale tilføres derfra. Sandsavatn er omgitt av store og til dels finkornige løsavsetninger. LRV er ca. 40 m lavere enn naturlig vannstand, og ved første gangs nedtapping gikk det flere ras og erosjonen var stor. Dette førte til sterk blakking av vannet og p.g.a. at materialet er så finkornet har en stor del holdt seg svevende siden, uten å sedimentere. Materialet som transporteres langs bunnen av tunnelen inneholder gjennomsnittlig 32% kvarts og 51% feltspat, mens det som føres i suspensjon består av ca. 12% kvarts og 18% feltspat, resten er glimmermineraler. Det er ikke bygd noe sandfang i tunnelen. Innholdet av suspendert materiale i avløpsvannet varierer fra 30 g/m^3 når det er høy vannstand i Sandsavatn og opp til 125 g/m^3 når vannstand nærmer seg LRV. Slitasjen har gitt synlige groper i forkant på skovlene, og spaltevannsmengden har økt med 20 - 30% i løpet av ca. 1 år. Undersøkelsene er ikke avsluttet ennu. Det vil sannsynligvis bli anbefalt at man må forsøke å unngå for sterk nedtapping av magasinet, [11].

A.3.11. Leirdøla.

Det er utført få undersøkelser for å klarlegge sandslitasjeforholdene ved Leirdøla kraftverk. Beskrivelsen i denne rapporten er basert på notater fra befaringer av tilløpstunnelen og de ytre vannveiene høsten 1980 og '81, og på undersøkelser av sandprøver fra tunnel og sandfang, [13], [14] og [15]. Det er liten tilførsel av sand og grovt materiale. De to bekkeinntakene er godt utformet og bekkene syntes ikke å være særlig materialførende. I inntaksmagasinet, Tunsbergdalsvannet, er det store løsavsetninger. Ved tunnelutslaget er det gravd en kanal gjennom løsmassene. Denne er plastret både i bunnen og på sidene. Vannet i magasinet er blakket p.g.a. breslam. Dette er så finkornet at det holder seg svevende og trekkes gjennom tunnelsystemet. Men p.g.a. kornstørrelsen og fordi mengden som passerer turbiner sannsynligvis er liten, har dette ikke medført slitasjeproblemer.

Ved befaringen høsten 1981 syntes tunnelsålen å være stabilisert i overflaten. Det var avsatt noen små sandbanker (1 - 2 m^3) i nisjene. Bare en mindre del av sandfanget var fylt opp. I kjølevannsbassenget avsettes det noe finsand og silt, mens materialet i sandfanget består av grovsand og noe grus. Mineralsammensetningen viser at materialet er sterkt slitende, men tilførselen har vært liten.

Da det ikke er registrert slitasje eller andre problemer p.g.a. løsmassetilførselen, er det heller ikke anbefalt noen tiltak.

A.3.12. Lomi.

Også ved dette kraftverket er løsmassetilførselen og slitasjen lite undersøkt. Det er foretatt inspeksjoner i tilløpstunnelen sommer 1979 og 1980. Videre ble turbinen inspisert i juni 1981, [16]. Tunnelen og magasinet er også befart i oktober 1981, [17].

Kraftverket har hatt tilførsel av slitende materiale fra følgende kilder:

- tunnelsålen inntil en stabil erosjonshud ble vasket fram.
- finkornet innsjøsediment som raser ut under vann like ved inntaket i Lomivann.
- morene som eroderes av bekker i nærheten av inntaket.
- en tipp av tunnelmasser, og bløt morene nedenfor denne, eroderes av vannet fra overføringstunnelen som munner ut oppe i lia ca. 300 m fra inntaket.

- løsmasser rundt magasinet eroderes av sidebekker ved lav vannstand.

De fleste av kildene har sannsynligvis stabilisert seg etter noen års drift, men bekkeerosjon ved lav vannstand vil sannsynligvis fortsette dersom materialet er ensgradert, finkornet og avsetningene er store. Mye av det grove materialet som tilføres fra de ytre kildene vil trolig sedimentere i Lomivannet, mens det finkornige materialet og det som graves løs like ved inntaket vil trekkes inn i tunnelen. Materialet har et høyt kvartsinnhold og det antas derfor å kunne slite sterkt på turbinene.

I sandfanget ovenfor trykksjakten avsettes materiale i middels- og finsandfraksjonen, men det er uklart om kapasiteten er stor nok og hvor effektivt massene stoppes. Finkornet suspendert materiale føres imidlertid gjennom turbinen, bl.a. er avløpsvannet til sine tider gråfarget, sannsynligvis ved lav vannstand i magasinet og når det går ras ved inntaket.

De utsatte sliteflatene på turbinene ved Lomi kraftverk er utført i rustfrie stålkvaliteter som man vet har god slitasje- og kavitasjonsmotstand. Det ble ved inspeksjon i 1981 registrert noe slitasje på ledeflatene. Det er ikke foretatt spaltevannsmålinger på turbinene. De er heller ikke revidert eller reparert på annen måte p.g.a. sandslitasje.

Både slitasjen og massetilførselen er for dårlig klarlagt til at det er mulig å anbefale noen tiltak. Det synes imidlertid som om sandslitasjen er forholdsvis liten og at mye av materialtilførselen vil stabilisere seg og avta etter noen års drift.

A.4. REFERANSER.

[1] Komitéen for undersøkelse av sandslitasje på turbiner, 1982: "Sandslitasje på vannkraftturbiner. Driva kraftverk." Vassdragsregulantenes forening, Asker.

[2] Komitéen for undersøkelse av sandslitasje på turbiner, 1982: "Sandslitasje på vannkraftturbiner. Evanger kraftverk." Vassdragsregulantenes forening, Asker.

[3] Komitéen for undersøkelse av sandslitasje på turbiner, 1983: "Sandslitasje på vannkraftturbiner. Fortun kraftverk." Vassdragsregulantenes forening, Asker.

[4] Komitéen for undersøkelse av sandslitasje på turbiner, 1983: "Sandslitasje på vannkraftturbiner. Røldal/Suldal kraftverk." Vassdragsregulantenes forening, Asker.

[5] Komitéen for undersøkelse av sandslitasje på turbiner, 1983: "Sandslitasje på vannkraftturbiner. Mauranger kraftverk." Vassdragsregulantenes forening, Asker.

[6] Komitéen for undersøkelse av sandslitasje på turbiner, 1983: "Sandslitasje på vannkraftturbiner. Bjerka kraftverk." Vassdragsregulantenes forening, Asker

[7] Komitéen for undersøkelse av sandslitasje på turbiner, 1983: "Sandslitasje på vannkraftturbiner. Dividalen kraftverk." Vassdragsregulantenes forening, Asker.

[8] Komitéen for undersøkelse av sandslitasje på turbiner, 1983: "Sandslitasje på vannkraftturbiner. Lio kraftverk." Vassdragsregulantenes forening, Asker.

[9] Komitéen for undersøkelse av sandslitasje på turbiner, 1983: "Sandslitasje på vannkraftturbiner. Nedre Vinstra kraftverk." Vassdragsregulantenes forening, Asker.

[10] Komitéen for undersøkelse av sandslitasje på turbiner, 1983: "Sandslitasje på vannkraftturbiner. Slitasjetesting." Vassdragsregulantenes forening, Asker.

[11] S. Soknes og O. By, 1983: "Kvilldal kraftverk - Turbinslitasje." Vassdrags- og havnelaboratoriet, Trondheim.

[12] K. Tvinnereim, 1980: "Sandtransport og sandfang i kraftverkstunneler." EEU-kurs: Hydromekanikk i praksis. NTH, Trondheim.

[13] S. Pettersen, 1980: Notat "Sandslitasje på turbiner. Befaring og møte på Leirdøla k.v. 18.9.1980". Vassdragsregulantenes forening. Reguleringsforeningens Landssammenslutning, Asker.

[14] D.K. Lysne, 1981: "Rapport fra befaring Leirdøla kraftverk 12. og 13. november 1981." Vassdragsregulantenes forening. Reguleringsforeningens Landssammenslutning, Asker.

[15] R. Dahl, 1981: "Befaring ved Leirdøla kraftverk." Geologisk Institutt, NTH, Trondheim.

[16] H. Bjørnarå, 1983: "Turbinslitasje og revisjoner ved Lomi kraftverk." Sivilingeniør Nybro Hansen A/S, Høvik.

[17] R. Dahl, 1981: "Befaring og prøvetaking ved Lomi kraftverk." Geologisk Institutt, NTH, Trondheim.