

Prosjekt damsikkerhet

Januar 1992

Rapport nr. 3



Norges Geotekniske Institutt

Sikkerhet av fyllingsdammer mot lekkasjebrudd

Prosjektansvarlige:

NVE Tilsyns- og beredskapsavdelingen (NVE-T)

Vassdragsregulantens Forening (VR)

FORORD

Moderne norsk dambygging startet omkring århundreskiftet, da vi tok til å utnytte våre vannkraftressurser. Innledningsvis dominerte mur- og betongdammene, men særlig etter 1950 kom de store fyllingsdammene inn i bildet for fullt. I hele det aktuelle tidsrommet har norsk damteknologi holdt et høyt nivå, og dammene har hevdet seg godt internasjonalt med hensyn til kvalitet og sikkerhet.

I den intense utbyggingsperioden vi har vært igjennom i de senere tiår, har begrepet damsikkerhet i sterk grad vært knyttet til planlegging og bygging, der beregningsmetoder, laster, materialelegenskaper og utførelse har vært nøkkelbegreper. Men damsikkerhet avhenger også i sterk grad av hvordan vi overvåker, manøvrerer og tar vare på dammene, og hvor godt vi forstår og er forberedt på ulike hendelser og situasjoner som kan oppstå i driftsfasen. Det var særlig dette som var bakgrunnen for at NVE i 1987 tok initiativ til et samarbeidsprosjekt med VR og dameiere om damsikkerhet. Forprosjektet utga rapporten: "Risikoanalyse for dammer" i 1987, og selve hovedprosjektet startet med etablering av et styringsutvalg høsten 1988. Prosjektlederen tiltrådte i april 1989, og fra da av kom det praktiske arbeidet i gang. Prosjektet avsluttes i 1992.

Styringsutvalget består av:

- * Sjefingeniør Bjarne Nicolaisen, NVE (form.)
- * Sjefingeniør Jan Daleng, VR
- * Prof. Dagfinn K. Lysne, Institutt for vassbygging, NTH
- * Sjefingeniør Thorleif Hoff, Statkraft

Prosjektleder er sivilingeniør Svein Larsen.

Prosjektet har tatt utgangspunkt i dagens situasjon og har fått utredet ulike spørsmål som har betydning for damsikkerheten i driftsfasen, slik som aldring, flomavledning, overtopping, lekkasjer, funksjonssikkerhet av flomluker og beredskapsplanlegging. Dessuten behandles erfaringsinnsamling, dambruddstatistikk og risikovurderinger. Enkelte utredninger blir presentert i egne delrapporter som denne, men prosjektet avsluttes med sluttrapport som summerer opp resultatene av de utredninger prosjektet har utarbeidet.

Den delrapport som fremlegges her: "Sikkerhet av fyllingsdammer mot lekkasje-brudd" er utarbeidet av Norges Geotekniske Institutt (NGI)

Vi har i Norge hatt flere tilfelle av indre erosjon med øket lekkasje ved våre fyllingsdammer, fenomenet er også blant de vanligste brudd og skadetyperne etter internasjonal statistikk.

Den vanlige fyllingsdamtype i Norge er imidlertid steinfyllingsdammen, mens brudd og alvorlige skader mest har skjedd på jordfyllingsdammer.

Det vanligste er at slike lekkasjetilfelle oppstår under første gangs magasinifylling, og det aktuelle spørsmål er om slike lekkasjetilfelle også kan oppstå ved eldre dammer hvor en tidligere ikke har registrert slik unormal tilstand, hvordan et slikt lekkasjeforløp kan arte seg, og hvordan en kan redusere en evt. slik sikkerhetsrisiko med analyser og evt. tiltak på dammene.

Sikkerhet mot brudd som følge av lekkasjer er i første rekke avhengig av følgende:

- a. Sannsynligheten for at en lokal vannvei dannes gjennom tetningen
- b. Tetningens og filterets selvtettende evne
- c. Nedstrøms støttefylling og skrånings evne til å tåle vanngjennomstrømning
- d. Mulighet til raskt å oppdage evt. unormal lekkasje

Sikkerhetsanalyser og evt. tiltak på dammene vil måtte ta utgangspunkt i ovennevnte punkter, hvorav pkt. c og d er mest aktuelle for tiltak på eksisterende dammer.

Risikoen, og behov for å øke sikkerheten, må vurderes særskilt for den enkelte dam.

I prosjektets hovedrapport vil det bli presentert forslag om innhold og omfang av slike lekkasjesikkerhetsanalyser for enkeltdammer.

Oslo, 15.01.92


Bjarne Nicolaisen


Svein Larsen


Jan Daleng

Rapportens forsidebilde viser lekkasje ved Dam Teton, USA.



Norges
Geotekniske
Institutt
Norwegian
Geotechnical
Institute

RAPPORT

SIKKERHET AV NORSKE FYLLINGSDAMMER MOT
BRUDD FORÅRSAKET AV INDRE EROSJON OG
DERAV FØLGENDE ØKET LEKKASJE GJENNOM OG
UNDER DAMMEN

Oppdragsgiver: PROSJEKT DAMSIKKERHET

894084-1

22 JANUAR 1992

I N N H O L D

1.	INNLEDNING	2
2.	OVERSIKT OVER STORE NORSKE FYLLINGSDAMMER MED REGISTRERTE LEKKASJER	5
3.	INTERNASJONAL EKSPERTUTTAELSE OM SIKKERHET AV VIDDALSDAMMEN	8
4.	INTERNASJONAL STATISTIKK OVER DAMBRUDD FORÅRSAKET AV INDRE EROSJON (PIPING)	9
5.	OVERVÅKING AV DAMMERS SIKKERHET MOT INDRE EROSJON	9
6.	SLUTTORD	10
7.	VEDLEGG- OG FIGUROVERSIKT	13

Postal Address:
P.O.Box 40 Tåsen
N-0801 Oslo 8
Norway

Street Address:
Sognsveien 72
Oslo

Telephone:
National
(02) 23 03 88
International
+ 47 2 23 03 88

Telefax:
National
(02) 23 04 48
International
+ 47 2 23 04 48

Telex:
19787 ngi n

Postal Giro
Account No.:
0814 5160643

Bankers:
Den norske Bank
Account No.:
5095.05.01281



1. INNLEDNING

Ved å demme opp vann oppstrøms for en fyllingsdam vil det alltid oppstå en viss vannstrømning, vannsig, gjennom, under og på siden av dammen (seepage). Når vannstrømningen blir større enn forventet utifra en gjennomsnittlig permeabilitet, betraktes den som en lekkasje (leakage). I praksis er det summen av vannsig og evt. lekkasje som måles og som derfor omtales som lekkasje.

Lekkasje kan oppstå gjennom sprekker i tetningskjernen og kan føre til erosjonskanaler og rørdannelse gjennom kjernen (piping).

Likeledes kan det oppstå lekkasjer gjennom fjellfundamentet ved at strømmende vann fører til utvasking av finstoff i fjellsprekker. Hvis fjellfundamentet består av f.eks. oppløselig kalk, kan strømming av vann over tid kunne føre til dannelser av hulrom og kanaler (karst).

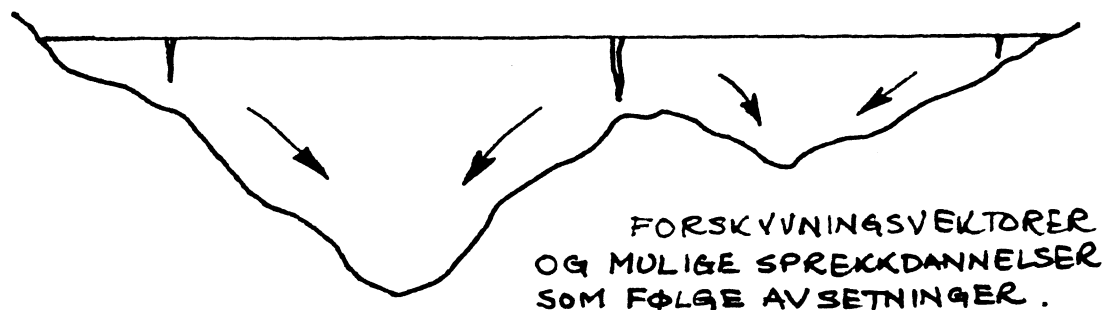
Strømmende vann kan også føre til utfelling av f.eks. kalk som hvor dette skjer, reduserer permeabiliteten og dermed lekkasjen. Dette kan igjen føre til oppbygging av poretrykk som kan påvirke stabiliteten i ugunstig retning.

I det følgende skal oppmerksomheten imidlertid konsentreres om mulige skader som kan oppstå på dammen som følge av indre erosjon og rørdannelse gjennom tetningskjernen (piping).

Indre erosjon kan bare oppstå hvis filteret som beskytter kjernen ikke er i stand til å holde tilbake finpartikler som vil kunne transporteres av sigevann eller av lekkasjevann langs sprekker eller andre uregelmessigheter.

Ujevne setninger eller andre ujevne bevegelser i damkroppen kan føre til spenningsomlagring i tetningskjernen. Slike spenningsomlagringer kan føre til sprekkdannelser eller reduserte spenninger på såvel horisontale

som vertikale plan. Utsatt for vanntrykk fra oppdemmet magasin kan forholdene forverres ved hydraulisk oppsprekking. Ved hydraulisk oppsprekking kan sprekker utvides eller skapes langs plan utsatt for lavere jordtrykk enn inntrengende vanntrykk.



Hydraulisk oppsprekking starter (generelt) i oppstrømsdel av kjernen og vil utvikle seg mot nedstrøms under forutsetning av at vanntrykket på det potensielle sprekkeplan stiger raskere enn i omliggende masser. Det vil bety at utviklingen må gå relativt raskt og (først og fremst) ved stigende vannstand i magasinet.

Under utvikling av sprekker vil vanntrykket i utviklet del av sprekken være tilnærmet lik fullt vanntrykk, tilsvarende aktuell vannstand. Gradienten i ennå ikke utviklet del av potensiell sprekke vil øke etter hvert som sprekken åpnes og utvikler seg nedstrøms. I den åpne del av sprekken, før sprekken er utviklet tvers gjennom kjernen, vil vanntrykket resultere i en strømming av vann fra sprekken og inn i omliggende masser. Strømningskraften som derved oppstår virker stabiliserende og reduserer muligheten for at sprekken klapper sammen selv om selvsagt noe materiale vil kunne rase ned i sprekken.

Etter hvert som sprekken utvikler seg i nedstrøms retning, vil vannstrømmen øke, og den når sitt maksimum ved fullt utviklet sprekke gjennom kjernen. Vanntrykket (poretrykket) langs sprekken vil avta tilnærmet lineært fra oppstrøms til nedstrøms ende av sprekken, og strømningskraften som tidligere holdt sprekken åpen vil tilnærmet forsvinne slik at



sprekken klemmes sammen.

En slik utvikling betinger imidlertid at vannstrømmen langs den åpne sprekken ikke har ført til materialtransport langs sprekken. Mest sannsynlig er det imidlertid at før sprekken tenderer til å lukke seg, har den vært utsatt for materialtransport og noe innrasing av masser. Hvis filteret imidlertid har forhindret utvasking, vil i beste fall tidligere vannstrømning i åpen sprekk kunne reduseres til bortimot null. Hvis filteret ikke har fungert tilfredsstillende, vil det - selv etter en lukking og innrasing av sprekken - forbli en øket lekkasje.

Hvis filteret ikke tilfredsstiller krav til filter, vil det også uten hydraulisk oppsprekking kunne utvikles indre erosjon. Et vannsig gjennom kjernen vil - hvis filteret er for grovt - føre til utvasking av tetningsmaterialer. Dette vil i så fall starte i overgangen mellom tetningen og nedstrømsfilter. En videreutvikling av utvaskingen vil skje mot strømretningen og er betinget av at det oppstår erosjonskanaler (rør) som er stabile. Dette kan enten skje ved at rørveggene - tross en innadrettet strømningskraft - er stabile, eller ved at rørveggene holdes oppe av nedraste masser som er grove nok til at de ikke lar seg transportere av strømmende vann eller bli holdt tilbake av nedstrømsfilter.

Lekkasjen gjennom en slik tenkt erosjonskanal vil øke etter hvert og nå sitt maksimum når kanalen er utviklet helt opp til oppstrømsfilter. Da vil vannstrømmen gjennom kanalen øke drastisk, og det kan forventes at det skjer større ras ved kanalens innløp som i beste fall tetter kanalen ved innløpet mens kanalen nedstrøm vil virke som en drenasje.

Skader som kan oppstå på dammen med eventuelt brudd som følge består i at lekkasjevannet som strømmer ut i damtåa og i nedstrøms skråning kan føre til skred i skråningen og eventuelt utrasing av enkelte blokker i en fot og skråning bestående av stein (sloughing, unravelling).

Et dambrudd som utvikler seg som beskrevet ovenfor vil bli klassifisert som forårsaket av indre erosjon (piping). Første ledd i skadefølgen er indre erosjon, mens siste ledd omfatter ras i nedstrøms skråning og damtå. Tilsvarende vil strømming av vann over topp tetning (overtopping)



bli ansett som bruddårsak hvor også siste ledd i skadefølgene er den samme.

Selv om siste ledd i skadefølgen er den samme atskiller disse to bruddårsaker seg ved at mengden av vann som er involvert kan være svært forskjellige.

Sikkerhet mot dambrudd forårsaket av overtopping vil bli behandlet i en annen sammenheng, mens man i det følgende tar for seg spørsmål i forbindelse med indre erosjon og lekkasje gjennom tetningskjernen.

Volumet av vann som siger eller lekker gjennom en fyllingsdam vil være kjent etter at dammen har vært i drift en tid. På norske fyllingsdammer har de registrerte lekkasjer aldri vært av en slik størrelse at det har kunnet true stabilitetsforholdene i nedstrøms skråning eller damtå på gjeldende dam. (Maks. registrerte lekkasjer: 210 l/s (Viddalsvatn - 1973)).

Det spørsmålet som kan reises er imidlertid:

- Hvilken fare for dambrudd kan med tiden oppstå som følge av indre erosjon (piping) på norske fyllingsdammer hvor det tidligere bare er registrert vannsig eller lekkasjer på opp til 210 l/s gjennom dammen?

Svaret søkes i det følgende gitt ved en oversikt over store norske fyllingsdammer, en ekspertuttalelse om Viddalsdammen og internasjonal statistikk over dambrudd forårsaket av piping.

2. OVERSIKT OVER STORE NORSKE FYLLINGSDAMMER MED REGISTRERTE LEKKASJER

Den første store fyllingsdam, høyde over 15 m, sto ferdig i 1924. Den hadde en fronal tetning i form av en betongplate. Den første store fyllingsdam med morene som tetning ble ferdigstilt i 1956. I alt er det i Norge i dag (1991) bygget 172 store fyllingsdammer hvorav 123 med morene eller annen jordtetning, se Fig. 1. (De oppgitte tall er i

overensstemmelse med oversikt mottatt av Molkersrød, NVE, 1991-10-04. Fig. 1, 2 og 3 er imidlertid ikke korrigert i henhold til disse opplysninger.)

Alle dammer med tetning av betong, tre, asfaltbetong, knust stein og pukk/ bitumen, 49 stk, er steinfyllingsdammer som er fundamentert på fjell. Ikke under noen av disse består berggrunnen av kalkstein eller andre oppløselige bergarter.

Med få unntakelser er også dammer med morene-/jordtetning steinfyllingsdammer. Dammer hvor store deler av nedstrøms støttefylling består av grus er Bordal 1, Tussa, Männika, Gressvatn og Bitdalen. Både Bordal 1 og Bitdalen har en nedstrøms damtå bestående av grov sprengstein, og hele og del av nedstrøms skråning er på henholdsvis Bordal og Bitdal dekket av stein.

Bare Rødungen betegnes som jorddam. Her består store deler av fyllingen av morene. Tetningskjernen og nedstrøms støttefylling er adskilt av filter og drenasje som kommuniserer med en nedstrøms damtå av stein.

De aller fleste av disse dammene er også fundamentert på fjell bestående av ikke oppløselige bergarter.

På 9 dammer er tetningskjernen helt eller delvis fundamentert på løsmasser, nemlig Songa 2, Tussa, Männika, Votna, Sønstevann, Vasslivatn, Manndøla, Løpet, Braskereidsfoss og Nerskogen.

På Fig. 2 og 3 er antall store fyllingsdammer og registrerte feil og mangler fremstilt mot henholdsvis damhøyde og år for ferdigstillelse.

På 5 dammer er det registrert lekkasjer som i denne forbindelse er av interesse. Dammene det gjelder er Hyttejuvet, Svartadalsvatn, Viddalsvatn, Mysevatn og Jukla 1.

Registrert lekkasje på disse dammene har oppstått gjennom svakheter i morenekjernen og har ført til indre erosjon, blakket vann og periodiske variasjoner i lekkasje.

Det er også registrert lekkasje på f.eks. Bitdalsdammen og Dravladalsdammen, men disse lekkasjene som antas å ha sitt utspring i fjellet, har ikke vist tegn på at det har foregått noen form for indre erosjon i morenekjernen.

At indre erosjon kan føre til store åpne rørdannelser, piping, er framfor alt dokumentert på Jukla 2, høyde 12 m, hvor gjennomgående rør hadde diameter på 30 - 40 cm. NGI rapport 53600-1.

Et vannutbrudd som ble registrert på Songa (1991-06-18) har ført til at Songadammen også tilhører den gruppen av dammer med morenekjerne hvor lekkasjer har oppstått.

Innledningsvis er det pekt på at indre erosjon og derav følgende lekkasjer ikke vil oppstå hvis filteret nedstrøms for morenekjernen fungerer tilfredsstillende. Det ansees derfor av interesse å se på hvorvidt filteret på de nevnte dammer med lekkasje avviker fra de øvrige.

For dammer hvor NGI har ført kontroll, er det i NGI rapport 53500-1 bl.a. gitt en sammenstilling av korngradering av anvendt filter. For 60 dammer hvor korngradering er gitt for sams masser, og ikke for filtermaterialer frasiktet korn større enn 20 mm, er det i Fig. 4 angitt D_{15} mot år for ferdigstilling av dam. D_{15} står for maskevidden hvor igjennom 15% av filtermaterialet passerer. Grovkornet filtermateriale har således en større D_{15} enn filtermateriale som inneholder mer finstoff og vil således i mindre grad ha evne til å holde tilbake kjernematerialer som rives med av strømmende vann. Det skal bemerkes at det er den maksimale D_{15} som er bestemt på mange prøver av filtermaterialet fra hver dam som er anvendt ved fremstilling av Fig. 4.

En vurdering av filterets kvalitet ut fra filterets D_{15} uavhengig av kjernematerialets korngradering kan synes svært forenklet, da de fleste filterkriterier nettopp tar for seg forholdet mellom korngraderingen av henholdsvis tetningsmateriale og filtermateriale. Tidligere James Sherard har imidlertid påvist at for kjernemateriale med en korngradering tilsvarende våre morener kan krav til filteret uttrykkes ved krav til filterets D_{15} alene.



Fremstillingen viser at i de fire dammene som har D_{15} større enn 5 mm har det oppstått lekkasje. I 2 av 9 dammer med D_{15} mellom 2 og 5 mm er det likeledes oppstått lekkasje. Ingen dammer med D_{15} mindre enn 2 mm har vært utsatt for lekkasjer. Et unntak er Songadammen, hvor det er registrert flere kortvarige lekkasjer (1964, 1976, 1979, 1991).

For Hyttejuvet, Mysevatn, Viddalsvatn og Svartadalsvatn ansees hydraulisk oppsprekking å være en sannsynlig årsak til oppståtte lekkasjer, for Jukla 1 en mulig årsak, mens lekkasjene på Jukla 2 mest sannsynlig har oppstått ved piping forårsaket av et altfor grovt filter.

Årsaken til registrerte lekkasjer på Songadammen er i dag (1991.10.31) ikke klarlagt.

På samtlige dammer med lekkasje, med unntak av Songa, ble lekkasjer registrert ved første gangs fylling av magasinet. På Songa ble første lekkasje (14 l/s) registrert i to av tre måleoverløp i 1964, to år etter første fylling av magasinet.

3. INTERNASJONAL EKSPERTUTTALELSE OM SIKKERHET AV VIDDALSDAMMEN

Viddalsdammen som eies av Oslo Energi ble bygget i 1970-71. Ved førstegangs fylling høsten og vinteren 72/73 oppsto det store lekkasjer (140 l/s), lekkasjevannet var sterkt blakket. Høsten 73 oppsto det igjen en kortvarig lekkasje (210 l/s), og nedsynkninger (sinkholes) i toppen av dammen ble registrert. Dammen er i flere omganger reparert ved injeksjon. Etter at det også høsten 1980 ble registrert en kortvarig lekkasje på 180 l/s, anmodet styret i Oslo Energi at en utenlandsk damekspert skulle gi en uttalelse om årsaker og omfang av skader på dammen, sikkerhet og nødvendige sikringstiltak.

James L. Sherard, som på den tid var anerkjent som en av verdens topp-eksperter, ble derfor engasjert. Hans rapport av 12 januar 1981 ansees å være så relevant og informativ at kopi av hans rapport følger i sin helhet som vedlegg.

4. INTERNASJONAL STATISTIKK OVER DAMBRUDD FORÅRSAKET AV INDRE EROSJON (PIPING)

I Wasserwirtschaft har Peter Rissler (1981) gitt en oversikt over 67 kjente brudd på fyllingsdammer som har skjedd i tidsrommet mellom 1900 og 1979, Tabell 2.

Av tabellen fremgår bl.a. at årsaken til dambrudd i 21 tilfeller antas å være Röhrenbildung (piping). Samtlige av disse dambrudd har skjedd på jorddammer, ingen på steinfyllingsdammer.

Videre kan det fastslås at 12 av disse dambruddene er skjedd ved første-gangs oppfylling av magasinet. For en indisk dam er tidspunktet for dambruddet ukjent. Av de øvrige 8 er 6 dammer bygget i tidsrommet 1850 - 1919 og således lenge før geoteknikken var oppstått som et teknisk fag.

To dammer, Nanaksager, India, og Baldwin Hill, USA, er moderne dammer som har røket henholdsvis 5 og 12 år etter ferdigstillelse. For førstnevnte dam foreligger ingen enkeltheter. Når det imidlertid gjelder Baldwin Hill så er det klargjort at lekkasjer og indre erosjon oppsto som følge av at tetningen, som besto av et tynt leirlag og en asfaltmembran, revnet som følge av setninger i grunnen på opptil 3 m. Setningen oppsto som følge av pumping av olje ut av nærliggende område.

Ovenfor omtalte statistikk omfatter store så vel som mindre dammer og Ropptjerndammen skulle således også vært inkludert. Bruddet på Ropptjerndammen, hvor dammen må klassifiseres som en jorddam, skjedde ved første oppfylling av magasinet og bekrefter således statistikkens budskap.

5. OVERVÅKING AV DAMMERS SIKKERHET MOT INDRE EROSJON

Internasjonal statistikk viser at dambrudd på jorddammer som følge av indre erosjon stort sett skjer allerede ved første gangs fylling av magasinet. Norske erfaringer med steinfyllingsdammer med morenetetning viser at lekkasjer og indre erosjon, hvor dette har skjedd, også stort



sett registreres ved første gangs fylling av magasinet. Songadammen utgjør et unntak ved at første lekkasje (14 l/s) ble registrert to år etter første gangs fylling av magasinet. Senere registrerte lekkasjer i form av kortvarige vannutbrudd synes å ha vært langt større. Det er først etter registrert vannutbrudd i år (1991) at årsaker ønskes klarlagt og at dammens sikkerhet mot fremtidige vannutbrudd og eventuell øket indre erosjon blir gjort til gjenstand for diskusjon.

For Songadammen og de øvrige dammer med lekkasje synes det selvsagt at fremtidige lekkasjer må registreres. Selv om fjernavlest daglig lekkasje i enkelte tilfelle blir ansett å bli for dyrt, vil også periodevise registreringer være nyttige. Tross at kortvarige lekkasjer i så fall ikke blir registrert, vil man i alle fall konstatere hvorvidt slike, ikke oppdagede lekkasjer, har medført indre erosjon og varig økning av lekkasjen. En lekkasje som over tid viser tydelig økning, vil betinge en vurdering av dammens sikkerhet og eventuelt sikringstiltak.

På dammer som det tidligere ved årlige besiktigelser ved fullt magasin aldri er blitt registrert lekkasjer ut over et naturlig vannsig, synes det imidlertid overdrevet å tenke på å forsyne disse med opplegg for kontinuerlig fjernavlest lekkasje. Av grunner som omtalt ovenfor bør imidlertid lekkasjen fra disse dammer, hvor det er mulig, visuelt kontrolleres ved årlige besiktigelser.

Det ansees som en selvfølge at årlige inspeksjoner forøvrig også omfatter registrering av dammens ytre skråninger og damtopp, samt at fastlagte innmålinger foretas.

6. SLUTTORD

Internasjonal statistikk synes å fastslå at ingen store steinfyllingsdammer er gått til brudd selv om store lekkasjer har oppstått. Dette skyldes for det første at oppståtte lekkasjer tross alt har vært begrenset og at nedstrøms damtå har kunnet avlede lekkasjen uten at det har oppstått ustabilitet i tåa.



Når det gjelder jorddammer viser internasjonal statistikk at det har skjedd brudd på en rekke dammer hvor årsaken ansees å være indre erosjon. Bruddene har oftest skjedd ved første gangs fylling av magasinet, men også etter mange år i drift, hvilket tydelig gir til kjenne at indre erosjon kan utvikles over lang tid.

I Norge har vi foruten våre store fyllingsdammer, stort sett steinfyllingsdammer, et anselig antall mindre dammer. Svært mange av disse er å betrakte som jorddammer og sikkerheten av disse dammer må gjøres til gjenstand for individuell behandling.

På enkelte store, norske steinfyllingsdammer med morenetetning har det oppstått til dels store lekkasjer, opptil 210 l/s. Lekkasjene har stort sett oppstått ved første gangs fylling av magasinet eller under de 3 første år i drift.

På fire av seks store dammer med lekkasje er det utført injeksjon som har redusert lekkasjene betraktelig (Hyttejuvet, Viddalsvatn, Mysevatn og Jukla). På tre dammer er damtåa sikret med påfylling av grov stein (Mysevatn, Jukla I og Svartadalsvatn). På nevnte dammer pluss Songa kan man ikke se bort fra at nåværende lekkasjer kan øke som følge av indre erosjon. Disse og andre dammer hvor lekkasje oppdages anbefales overvåket ved at lekkasje måles foruten at fastlagte inspeksjoner og innmålinger foretas.

For samtlige dammer ansees det nødvendig og betryggende at lekkasjer og setninger registreres. For dammer som er fundamentert på løsmasser bør også installasjoner for måling av poretrykk nedstrøms dammen holdes vedlike og rutinemessig avleses. Hvor drenasjetiltak inngår som en del av prosjektet, bør også disse inngå i en rutinemessig kontroll.



Selv om det synes fornuftig å gradere omfang av overvåking på norske fyllingsdammer, må det kunne fastslås at sikkerheten mot brudd på store norske fyllingsdammer for samtlige er meget høy.

for NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT

Bjørn Kjærnsli
Bjørn Kjærnsli

7. VEDLEGG- OG FIGUROVERSIKT

Tabell 1. Maksimale D_{15} fra sikteprøver av filtermaterialer.

Tabell 2. Dambrudd 1900 - 1979.

Figur 1. Norske steinfyllingsdammer >15 m.

Figur 2. Skader på norske fyllingsdammer >15 m i forhold til damhøyde.

Figur 3. Skader i forhold til ferdigstillelsesår.

Figur 4. Ferdigstillelsesår av dammer mot D_{15} filter.
o dammer med lekkasjer.

Vedlegg 1 Viddalsvatn dam - James L. Sherard

TABELL 1 Maksimal D_{15} fra sikteprøver av filtermaterialer

DAM	MAKS D_{15} (mm)	
Bordalsvatn	1,5	(1959)
Slåttmoberget	2,0	(1960)
Songa 1	1,2	(1962)
Reinsvatn	1,2	(1964)
Tunhovd	2,4	(1965)
Hyttejuvet	2,8	(1965)
Sønste vann	1,2	(1966)
Skjellingavatn	1,4	(1966)
Akersvatn	0,8	(1967)
Kalvatn	0,5	(1967)
Homstøl	0,8	(1967)
Roskrepp	0,7	(1968)
Nesjen	1,2	(1968)
Muravatn	2,3	(1968)
Rødungen	0,5	(1968)
Gråsjø	1,8	(1969)
Follsjø	1,9	(1969)
Gressvatn	0,4	(1969)
Finkoihøgda	0,7	(1969)
Kvilesteinvatn	0,7	(1970)
Digeå	3,0	(1970)
Goulasjavri	2,5	(1970)
Bitdalen	0,6	(1970)
Nesjø	2,3	(1970)
Ousdalvatn	1,0	(1970)
Løpet	0,5	(1970)
Flåthøl	0,5	(1970)
Eptevann	0,8	(1971)
Stølsvatn	5,0	(1971)
Viddalsvatn	6,0	(1971)
Krokvatn	1,2	(1972)
Dravladalsvatn	3,0	(1972)
Mysevatn	2,0	(1973)
Båtsvatn	1,2	(1973)
Store Måsevatn	1,3	(1973)
Svartadalvatn	6,0	(1973)
Jukla 1	8,0	(1974)
Juklavatn 2	20,0	(1974)
Nordalen	1,5	(1974)
Askjelldalsvatn	1,9	(1974)
Finnabuvatn	1,8	(1974)
Vargavatn	1,2	(1976)
Svartevatn	0,6	(1976)
Førsvatn	0,6	(1978)
Braskereidsfoss	0,5	(1978)
Nyhellerivatn	1,0	(1979)
Sysenvatn	0,9	(1979)
Ø. Kalvatn	0,6	(1979)
Rundavatn	0,8	(1980)
Rembesdalsvatn	0,7	(1980)
Langavatn	1,5	(1980)
Nerskogen	0,3	(1981)
Innerdalen	0,3	(1981)
Sildvik	0,5	(1981)
Falningsjøen	0,7	(1984)
Oddatjørn	1,5	(1986)
Førreskard	0,7	(1987)
Førrehei	0,5	(1987)

TABELL 2

Zl 1: Zwischen 1900 und 1979 weltweit gebrochene Dämme

Name der Talsperre	Land	Dammtyp	Höhe in m	Vollendung	Bruch	Ursache
Pardo	Argentinien	Felsschütt-	15	1940	1969	Hochwasser, Bedienungsfehler
Oros	Brasilien	Felsschütt-, Erd-	54	?	1960	im Bau überströmt
Armando Salles de Oliveira	Brasilien	Erd-	41 oder 32	1968	1977	Überströmung
Euclides de Cunha	Brasilien	Erd-	63	1960	1977	Überströmung
Ihra	Bundesrepublik Deutschland	Erd-	12	1975	1977	noch nicht amtlich festgestellt
Ahraura	Indien	Erd-	26	1954	?	Röhrenbildung
Kaddam	Indien	Erd-	41	1957	1958	Überströmung
Kedar Nala	Indien	Erd-	20	1964	1964	Röhrenbildung
Kharagpur	Indien	Erd-	24	?	1961	im Bau überströmt
Pagara	Indien	Erd-	27	1927	1943	Überströmung
Nanaksagar	Indien	Erd-	15,6	1962	1967	Röhrenbildung
Chitauni	Indien	Felsschütt-	?	?	1968	?
Dhanibara	Indien	Erd-	20,7	1975	1976	Überströmung
Manivali	Indien	Erd-	18,4	1976	1976	1. Einstau, sonst ?
Macchu II	Indien	Erd-	26	1973	1979	Überströmung
Sempor	Indonesien	Felsschütt-	53,6	?	1967	im Bau überströmt
Ashizawa	Japan	Erd-	15	1912	1956	Überströmung
Heiwaie	Japan	Erd-	20	1949	1951	Überströmung
Ogayarindotameike	Japan	Erd-	19	1944	1963	Überströmung
Ovar Banja	Jugoslawien	Erd-	27	1952	1965	Überströmung
Wadigatara	Lybien	Erd-	39	1975	1975	Röhrenbildung
La Laguna	Mexiko	Erd-	17	1912	1969	Röhrenbildung
Bolan	Pakistan	Erd-	19	1961	1976	Überströmung
Santo Thomas	Philippinen	Erd-	?	?	1976	im Bau überströmt
Odiel	Spanien	Felsschütt-	35	?	1970	im Bau gebrochen
Bon Accord	Südafrika	Erd-	18	1925	1937	Böschungsrutschung
Bila Desuna	Tschechoslowakei	Erd-	17	1915	1916	Röhrenbildung
Alamo Arroyo, site 2	USA	Erd-	21	1960	1960	Röhrenbildung
Apishapa	USA	Erd-	35	1920	1923	unterschiedliche Setzungen
Baldwin Hill	USA	Erd-	80	1951	1963	Röhrenbildung
Balsam	USA	Erd-	18	1927	1929	Erosion UW-Böschung
Corpus Christi	USA	Erd-	19	1930	1930	Röhrenbildung
Fred Burr	USA	Erd-	16	1947	1948	nicht bekannt
Graham Lake	USA	Erd-	34	1922	1923	Erosion UW-Böschung
Greenlick	USA	Erd-	19	1901	1904	Röhrenbildung
Hebron	USA	Erd-	17	1913	1914	Röhrenbildung
Jackson's Bluff	USA	Erd-	9	1930	1942	Überströmung
Jemings Creek	USA	Erd-	21	1962	1963	Böschungsrutschung
Watershed No. 3	USA	Erd-	21	1962	1963	Röhrenbildung
Lake Toxaway	USA	Erd-	19	1902	1916	Röhrenbildung
Little Deer Creek	USA	Erd-	26	1962	1963	Röhrenbildung
Long Tom	USA	Erd-	18	1915	1916	Röhrenbildung
Lookout Shoals	USA	Erd-	25	1915	1916	Überströmung
Lyman	USA	Erd-	20	1913	1915	Röhrenbildung
Mohamon Gulch	USA	Erd-	17	?	1926	Überströmung
Owen	USA	Erd-	17	1915	1914	im Bau gebrochen
Shaeffer	USA	Erd-	30	1911	1921	Überströmung
Selpulveda Canyon	USA	Erd-	20	?	1914	Überströmung
Sinker Creek	USA	Erd-	21	1919	1943	Röhrenbildung
Stockton Creek	USA	Erd-	29	1949	1950	Röhrenbildung
Wagner	USA	Erd-	15	1913	1938	Erosion der UW-Böschung
Goose Creek	USA	Felsschütt-	64	1900	1900	im Bau weggespült
Swift	USA	Erd- und Felsschütt-	57	1914	1964	Überströmung
Wisconsin Dells	USA	Erd-	18	1909	1911	Überströmung
Bearwallow	USA	Erd-	10	1963	1976	Böschungsbruch
Lower van Norman	USA	Erd-	43	?	1971	Verflüssigungsbruch,
Sheffield	USA	Erd-	8	?	1925	Erdbeben
Buffalo Creek	USA	?	?	?	1972	Verflüssigungsbruch,
Kelly Barnes	USA	Erd-	12	?	1977	Erdbeben
Canyon Lake	USA	?	?	?	1972	nicht bekannt
Emery	USA	Erd-	15	1850	1966	nicht bekannt
Whitewater Brook	USA	Erd-	19	1943	1972	Röhrenbildung
Sheep Creek	USA	Erd-	18	1969	1970	nicht bekannt
Lake Barcroft	USA	Erd-	21	1913	1972	Röhrenbildung
Walter Bouldin	USA	Erd-	50	1967	1975	nicht bekannt
Teton	USA	Erd-	90	1976	1976	Böschungsrutschung
						Röhrenbildung

ten der Fertigstellung aller Dämme gegenübergestellt, die nach der Zusammenstellung der ICOLD [16] zu Bruch gegangen sind. Dabei wurde jeweils davon ausgegangen, daß die Entwicklung

der betreffenden Erkenntnisse und ihre Nutzenanwendung eine gewisse Zeitspanne beanspruchte – erkennbar etwa an dem Zeitraum, in dem Veröffentlichungen über das betreffende The-

NORSKE STEINFYLLINGSDAMMER

høyde $\geq 15\text{m}$ pr. 31.12.89

TVERRSNITT	TETN. TYPE	ANTALL	TIDSROM	MAKS. HØYDE
	BETONG	8	1930 - 68	31m
	BETONG	18	1955 - 81	52m
	TRE	2	1956 - 58	39m
	JORD/ MORENE	120	1956 →	145m
	ASFALT	1	1963	64m
	KNUST STEIN	1	1966	16m
	PUKK / BITUMEN	4	1982 → + (GRÅSJØ-69)	34m
	ASFALT	7	1980 →	90m

NVE-INDRE EROSJON

Dato

90.06.25.

Tegner

W. 9.

NORSKE STEINFYLLINGSDAMMER > 15 m

Godkjent

Kontrollert

Rapport
nr. 894084-1

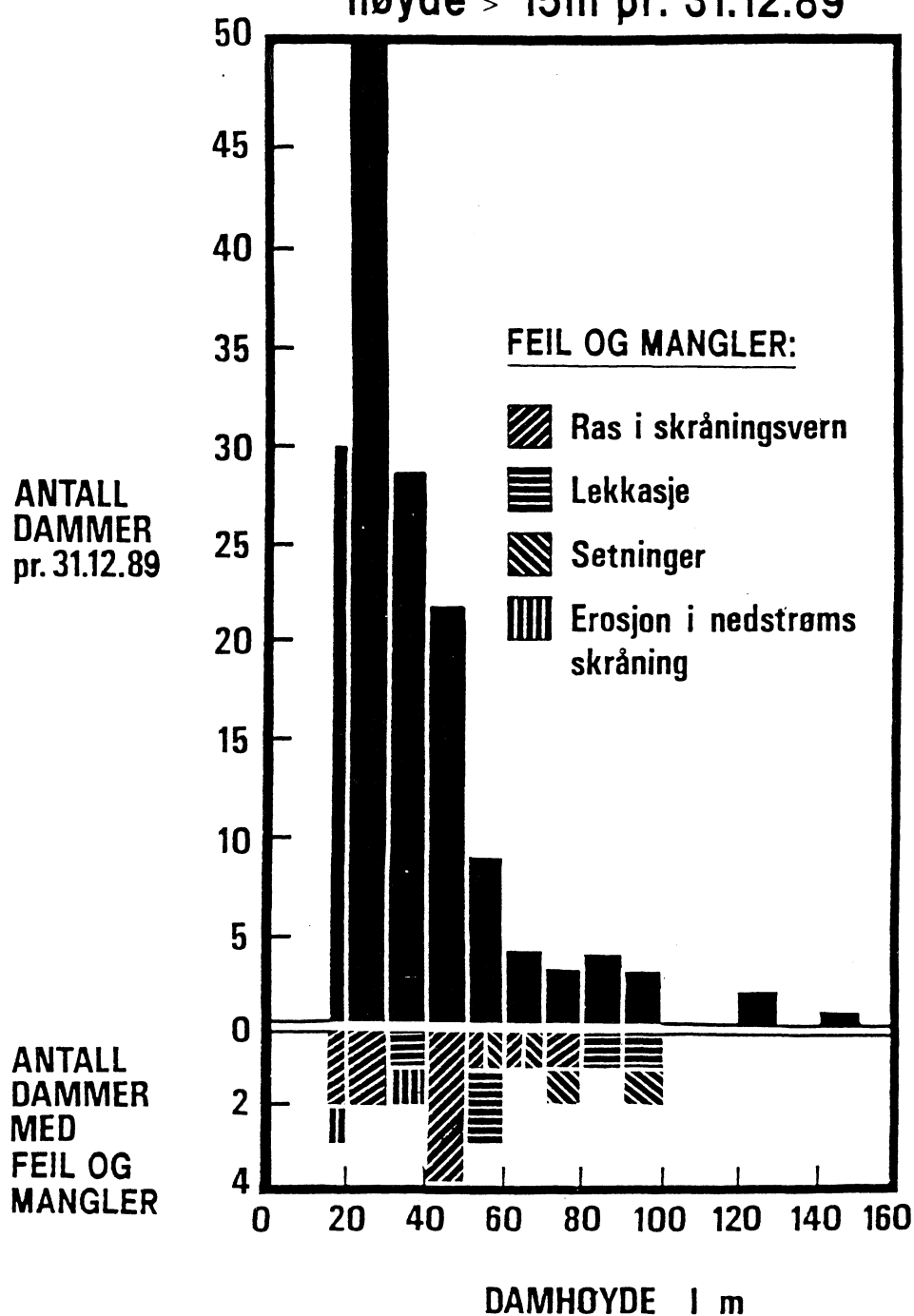
Norges Geotekniske Institutt



Figur
nr. 1

NORSKE FYLLINGS-DAMMER

høyde > 15m pr. 31.12.89



NVE-INDRE EROSJON

Dato

90.06.25.

Tegner

W. G.

SKADER I FORHOLD TIL DAMØYDE

Godkjent

Kontrollert

Rapport
nr.

894084-1

Norges Geotekniske Institutt

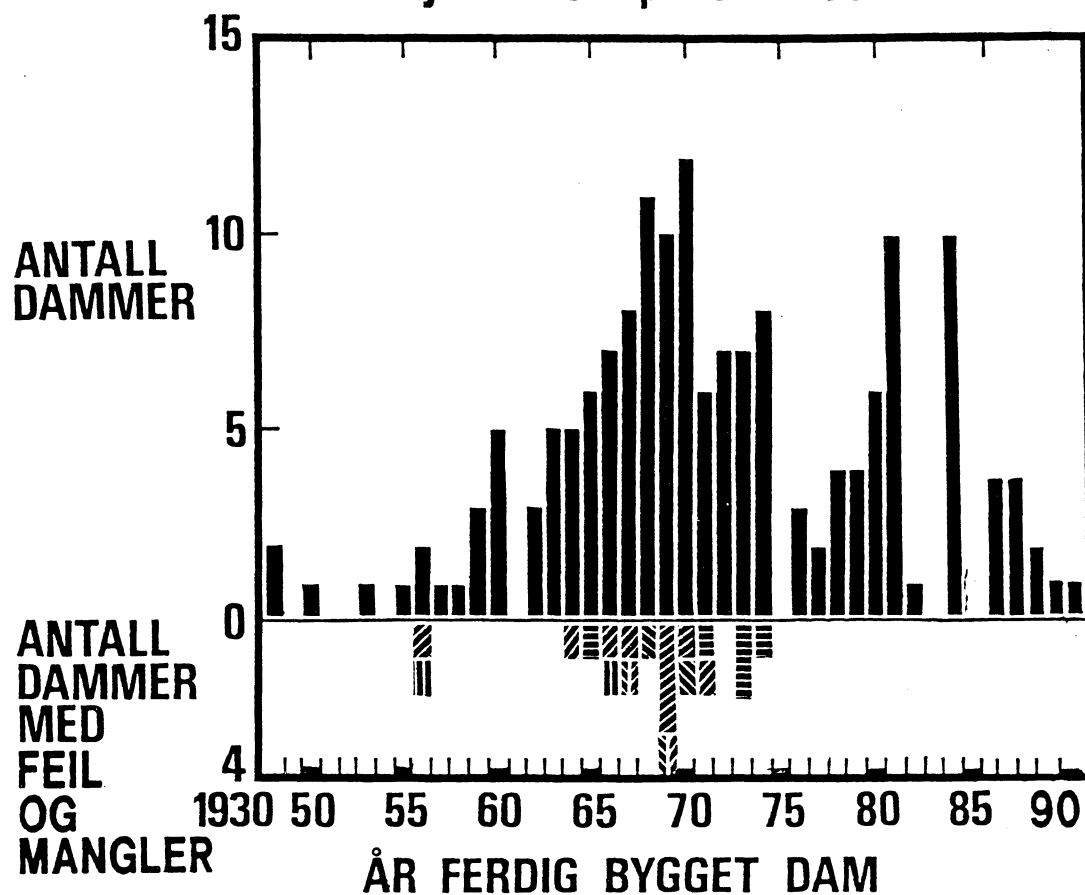


Figur
nr.

2

NORSKE FYLLINGSDAMMER

høyde $\geq 15\text{m}$ pr. 31.12.89



- Antall dammer
- ▨ Ras i skråningsvern
- ▩ Lekkasje
- ▧ Setninger
- ▦ Erosjon i nedstrøms skråning

NVE-INDRE EROSJON

SKADER I FORHOLD TIL FERDIGSTILLELSESÅR

Dato

90.06.25.

Tegner

W. G.

Godkjent

Kontrollert

Rapport
nr.

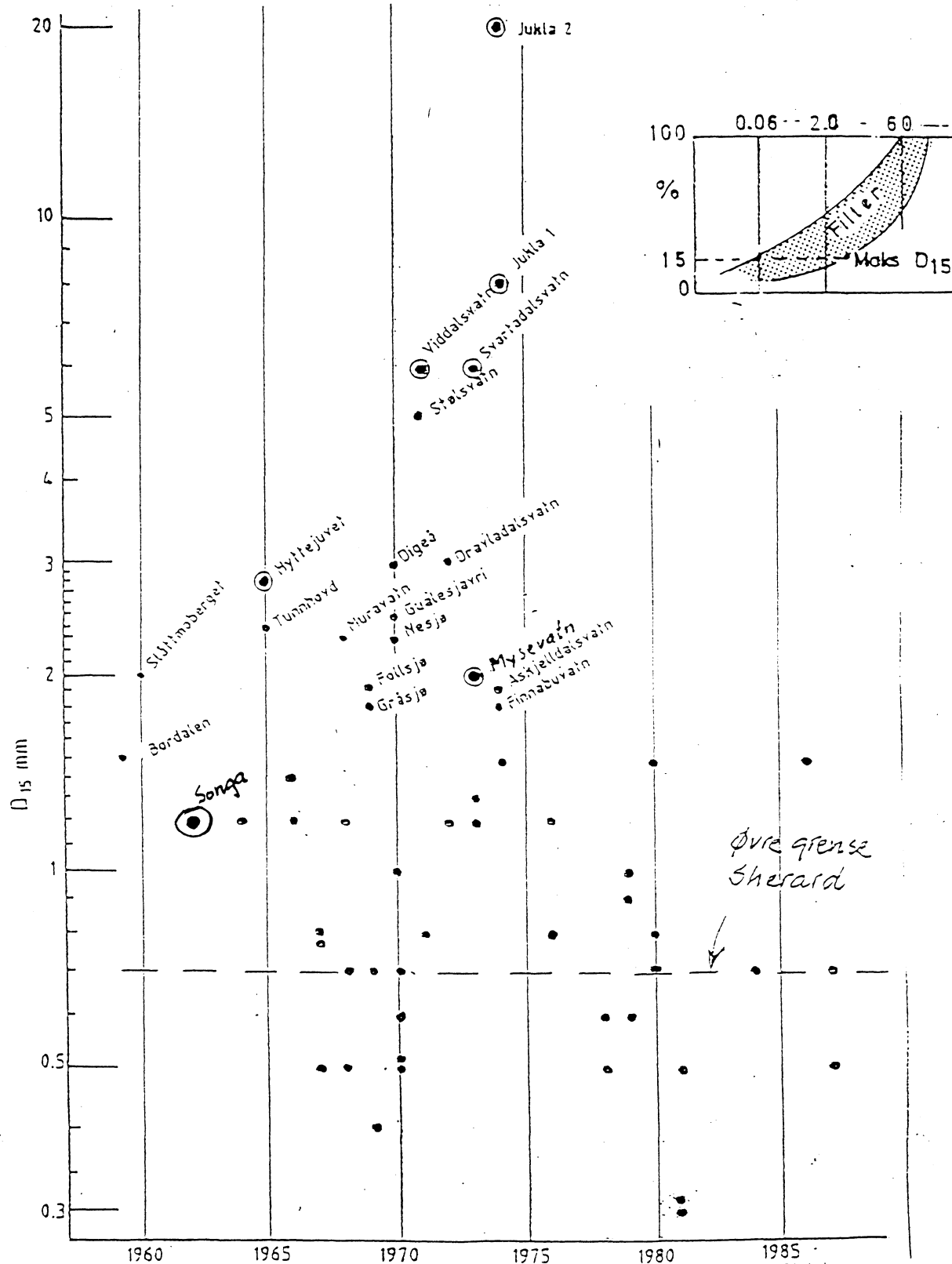
894084-1

Norges Geotekniske Institutt



Figur
nr.

3



ÅR FERDIG BYGGET DAM

NVE-INDRE EROSJON

Ferdigstillelsesår mot D_{15} filter.
 ⊙ dammer med lekkasjer.

Rapport nr.
894084-1

Figur nr.
4

Tegner

 Kontrollert

Dato
28.11.91

Godkjent



REPORT TO
OSLO LYSVERKER
OSLO

on

VIDDALSVATN DAM
LEAKAGE PROBLEM

James L. Sherard
Consulting Engineer
San Diego, California

Januar 12, 1981

Contents

	Page
1. Summary of Main Points	2
2. Sherard Activity	3
3. Brief Review of Dam Performance	5
4. Cause of Leakage	9
5. Extent of Deterioration	14
6. Safety of Dam	15
7. Remedial measures	19
Attachment 1	H. Vestad Letter to J.L. Sherard, October 27, 1980
Attachment 2	Oslo Lysverker Program for January 8-12 meeting

JAMES L. SHERARD
Consulting Engineer
3483 Kutty Street
San Diego, California 92110

January 12, 1981

Oslo Lysverker
Sommerrogt. 1

OSLO 2

VIDDALSVATN DAM

Attention: Messrs. H. Vestad and M. Mortensen

Gentlemen:

At your request I spent the last several days in Oslo reviewing the leakage problem at the Viddalsvatn Dam. My observations and opinions have been discussed at several conferences with your staff and are summarized briefly in this report.

1. Summary of Main Points

- 1) The leakage and erosion has been caused by selective erosion of the fines out of the moraine core material through the coarse downstream filter.
- 2) The experience is very similar to a number of other troubles in recent years with dams of similar core materials, which has been a surprise in the profession, indicating that these materials are internally unstable and require finer downstream filters than previously believed desirable.
- 3) There is no possibility of a complete failure of the dam. The worst probable future trouble will be a repetition of the past leaks. It is not necessary to lower the reservoir or take rapid remedial measures when new turbid leaks appear.
- 4) Grouting with procedures generally similar to those you used in the past is the appropriate method of repair. It may be necessary to grout more than once in the future before the condition is permanently stabilized.

2. Sherard Activity

In preparation for the visit to Oslo, Mr. Vestad sent me a letter dated October 27, 1980 with 9 enclosed documents summarizing the history of the dam performance and the present situation. For the record this letter (2 pages) is attached to this report as Attachment 1.

Arriving in Oslo the morning of January 8, 1981 the afternoon was spent in your Oslo office reviewing the material sent me previously and supplementary documents. January 9 - 12 was spent in further discussions in your office and at NGI, where I inspected soil samples taken from the two recent Borings 1 and 2. During this period I reviewed the documents listed in the "Program" prepared in advance, attached to this report as Attachment 2. The meetings were attended by messrs. H. Vestad and M. Mortensen of your staff and B. Kjærnsli and J. Lunde of NGI. A conference with Chairman of the Board, E. Tandberg, was held on January 9.

This report was prepared on January 11 - 12, and discussed at final meetings on January 12, attended also by Managing Director A. Finstad.

As shown in Attachment 2 (Program), you asked me particularly to try to form opinions on four main questions:

- 1) Causes of leakage
- 2) Extent of damage
- 3) Safety of dam
- 4) Remedial measures

3. Brief Review of Dam Performance

The 90-meter high rockfill dam with central earth core of glacial moraine was constructed during 1971-72. Details of the design, construction and first period of operation are described in Mr. Vestad's paper for the 1976 ICOLD meeting in Mexico (Q.45, R.22).

On the first reservoir filling in 1972-73, a series of turbid leaks emerged at the downstream toe, for each of these the maximum quantity of flow was of relatively short duration, such as a few days, after which the leakage volume decreased and the leakage water become clear. The maximum measured leakage volumes were 140 l/second in January 1973 and 210 l/second in August 1973. Sinkholes (craters) appeared near the upstream edge of the crest in August 1973 near Stations 21 and 15.

Exploratory drilling was carried out in the summer of 1973, showing maximum erosion of the core in the general vicinity of the two sink holes. The core in these two areas was grouted during October-November 1973 and March-September 1974. The total grout take in three lines of grout holes over about 20 meters of length near Station 21 was 48,242 liters of grout.

During the years 1975-79 the dam behaved normally with measured leakage generally of 5 to 20 l/second when the reservoir was nearly full, but with occasional short duration leakage flows of 30 to 40 l/second. At the end of 1978, by which time it was expected that most of the embankment settlement had been completed, an additional campaign of exploratory drilling and grouting was carried out in the same 20 meter length near the larger of the two sinkholes near Station 21. In the exploratory borings, it was found that particles of the upstream filter had penetrated to the middle of the core and some of the grout from the 1973-74 campaign was seen in the samples. In the 1978-79 grouting campaign, about the same amount of grout was injected (48,180 liters), some of which entered the core in the same area as the 1973-74 grouted zone and some of the grout was taken in the core at lower elevations than had been previously grouted (below approximate elevation 920). Most of the grout was taken in only a few of the grout holes.

In October 1980 another turbid leak of short duration developed with maximum measured volume of about 170 l/second. This was very similar to the 1973 leaks, with maximum turbidity (1 to 4 grams of suspended solids per liter) occurring for less than 24 hours, and the leakage volume decreasing to less than 20 l/second within a few days.

During October-December 1980 you have been working to put down 3 additional exploratory borings in the general area of Station 21 and 22. Only one of these (Hole 2) has been grouted showing grout takes as follows:

	<u>Grout Take</u>
Elevation 899-900	3080 liters
Elevation 900-911	no appreciable take
Elevation 911-912	3371 liters
Elevation 912-914	no appreciable take
Elevation 914-915	1524 liters take at which time you exhausted grout supply
Above Elevation 915	No grouting carried out.

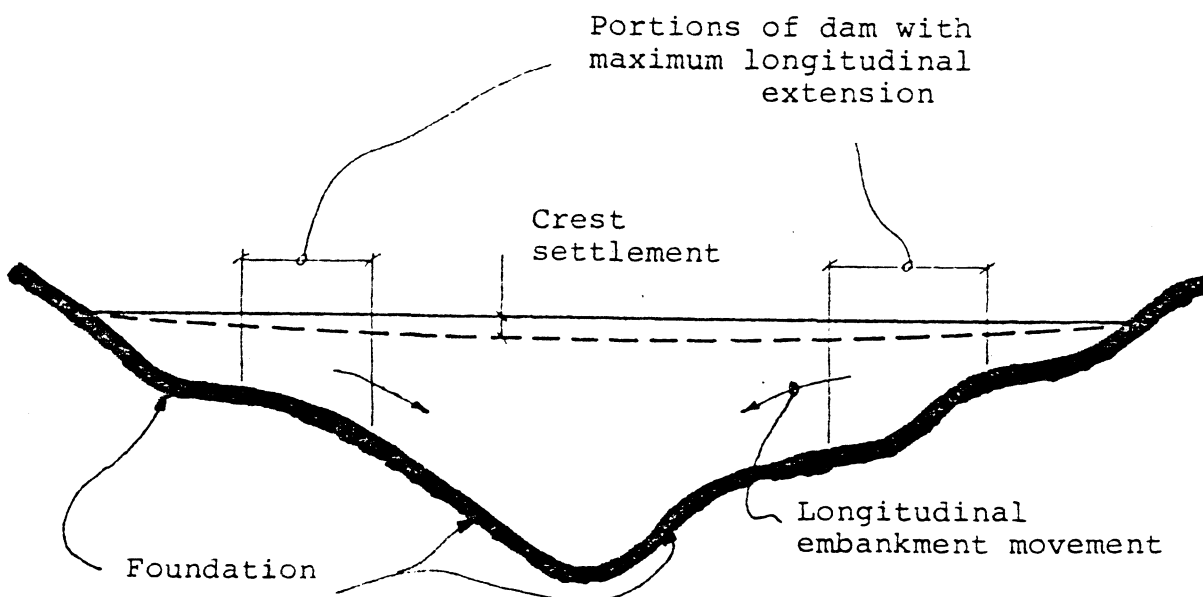
Studies with dye injected in the reservoir water upstream, made in 1973 confirmed the likelihood that most of the larger leakages probably passed through the core in the general vicinity of the two sinkholes. A similar study in 1980 was less conclusive, but showed indication that most of the leakage was in the area of Stations 21-24, with emphasis on the length between Stations 21-22.

4. Cause of Leakage

I agree with the diagnosis of your staff concerning the cause of the problem; that is, that small concentrated leaks developed through the core, probably resulting from hydraulic fracturing, and that these leaks progressively carried fine particles of the core material through the downstream filter leaving the coarser sand and gravel particles of the core material behind.

This behavior is similar to that which has occurred in about 15 other projects in various parts of the world in recent years. All of these troubles occurred in dams with very similar impervious core materials - coarse, broadly graded soils with fines of low plasticity, usually glacial moraines. It is now well demonstrated by world experience that these materials are internally unstable in the sense that small initial leaks can cause the fine particles (silt and fine sand) to migrate out of the voids between the coarser sand and gravel particles. Until the last few years this phenomenon was not understood in the profession. In the past it has been considered good practice to provide coarse downstream filters for these soils. The new experience is rapidly leading to a change in the accepted design practice in which relatively fine downstream filters are provided for these coarse broadly graded moraines, which filters contain sufficient fine to medium sand sized particles to assure retention of the selectively eroded fines in the core material. The nature of the problem is discussed in more detail in the paper I published in the New Delhi ICOLD Conference (1979) "Sinkholes in Dams of Coarse, Broadly Graded Soils".

The initial leaks causing the trouble at Viddalsvatn Dam were probably caused by hydraulic fracturing made possible by the differential settlement between the higher portion of the dam in the central valley and the lower portions of the dam on each end. This differential settlement causes movement of the dam toward the central portion from both ends, and extension of the dam in the longitudinal direction in the lengths over the valley walls near the ends of the dam, as shown schematically in Sketch 1, below:



Sketch 1 Sections of Dam with maximum Longitudinal Extension Caused by Differential Settlement (Schematic only)

The type of movement shown above occurs in all embankment dams, with magnitude of crest extension depending on the magnitude of the settlement and shape of valley. The stretching (extension) of the embankment in the longitudinal direction at the ends of the dam reduces the internal embankment stress on vertical transverse planes. When the internal stress on these planes is reduced to a value approaching, or less than, the reservoir water pressure acting on the upstream face of the core, water from the reservoir can penetrate in narrow cracks caused to open by the water pressure. In dams with earth cores of most soil types these initial leaks are controlled by the downstream filters and quickly sealed when the embankment material forming the crack walls softens and sloughs (or swells) closing the crack with no erosion of the soil. In cores of coarse, broadly graded moraines, because of the great difference between the size of the fines and the coarser particles, in some circumstances the fines are eroded selectively and carried through the downstream filter, leaving the coarse and gravel particles behind which prop the crack open and prevent sealing.

There are several main reasons for concluding that action of the type of figure 1 above was responsible for the initial leaks. The main reason is that the sinkholes (and areas of the eroded core as indicated by the exploratory drilling and grout takes) were at the locations in the dam where maximum longitudinal stretching would be expected. If this is not the cause, then it is an enormous coincidence. Another main reason is that the rockfill shells settled more than the earth core, as indicated by the post-construction measurements, so that it is unlikely that arching between the core and shells caused the stress transfer needed for the development of the hydraulic fracturing. Another reason is that the core is sufficiently wide and has a sufficient quantity of fines such that initial leaks caused simply by segregation of the coarser particles of the core material during construction are highly unlikely.

In summary, while it is always difficult to be completely confident of the cause of the initial leaks it is overwhelmingly probable that they were caused by hydraulic fracturing from the general action of figure 1 above. The subsequent selective erosion of the core is clearly due to the passage of fines through the downstream filter, made possible by the broadly graded coarse nature of the core material and the relatively coarse downstream filter (tunnel muck screened to remove particles larger than 170 millimeters).

5. Extent of Deterioration

From the evidence of the sinkhole locations, the exploratory drilling and grouting results and the studies with dye in the reservoir, we can be confident that most of the erosion damage in the core is located in the two relatively short lengths of the dam at each end.

Examination of the nearly continuous drive samples taken in the core from holes 1 and 2 (October - December 1980 borings) shows no evidence of erosion of the core. All the samples inspected, which are relatively undisturbed and give a reliable picture of the sampled material, comprise impervious compacted material uninfluenced by seepage or erosion.

From these observations, the records of the leakage quantities measured and the quantities of grout taken, it is reasonable to conclude that the eroded zones of the dam core are relatively small in volume, probably confined to narrow channels (such as 0,5 meters wide or less) generally in the two lengths of the dam near the location of the sinkholes.

6. Safety of the dam

All experience and theory confirm that there is no possibility of a complete failure of the dam or of loss of life or property damage downstream. The worst conceivable condition which can develop in the future is a repetition of the past troubles at about the same magnitude, or possibly somewhat larger leakage if no further remedial grouting were done for several years, but always a relatively small leak, which will not cause flood damage downstream. The main reasons supporting this conclusion are listed below.

The only portion of the moraine core material which can easily pass through the downstream filter are the silt fines (smaller than 0,1 millimeters). The downstream filter is 3 m wide and consists of fairly a well-graded material with an appreciable content of sand sized particles. Probably particles of core material in the range of size of 0,2 to 0,5 millimeters will generally get stuck in the voids of the filter. We can be confident that particles of the moraine core of 1,0 millimeters and larger will not pass through the downstream filter. Hence, it is impossible that the downstream filter will collapse or be displaced. The maximum possible total leakage through the dam will always be limited to a moderate value by the hydraulic capacity (permeability) of the downstream filter, and the downstream filter will become progressively less pervious as the moraine core erodes and sand and silt particles become lodged in its pores. This action is clearly seen from the past performance where initial leaks of up to 200 l/second are quickly reduced by erosion within the dam to 20 to 30 l/second; this can only occur by the action of clogging the pores of the downstream filter, blocking off the leakage channel.

There has never been a complete failure of dam with massive downstream shell of quarried rockfill founded on a rock-foundation. There are many cases where flows of the order of 50 m³/sec. have passed through rockfill dams without damage (usually from floods during construction before the

impervious core is built). It is inconceivable that leaks of this order of magnitude could develop through the Viddalsvatn Dam.

As discussed above, the Viddalsvatn Dam experience is only one of a series of similar experiences which have occurred in recent years by the same action in dams with cores of similar coarse, broadly graded soils, usually glacial moraines. The pattern of leakage at Viddalsvatn Dam (that is, an abruptly developing, highly turbid leak of 100 to 200 l/sec which decreases in volume relatively quickly and becomes clear) is typical of the other experiences. In some of these cases much larger areas (and volumes) of the core were damaged by erosion before repairs were made. In none of these dams was there any serious consideration that a complete failure was possible.

The Viddalsvatn Dam has already been tested by several of these abruptly appearing leaks, at different locations within the core. If a much more severe condition were possible, it would have already developed. All experience shows that the largest and most frequently occurring initial leaks will occur soon after the first reservoir filling. There is every reason to conclude that any future concentrated leaks will not be larger than those of the past and the frequency will decrease.

For the above reasons I believe it is not imperative to lower the reservoir or make immediate repairs following any new turbid leaks. An argument can be made that once a leak develops, indicating a new erosion channel has developed, it is desirable to try keeping the reservoir at a high level in the subsequent period to allow equilibrium to develop, even if a somewhat larger volume of the core is eroded than would occur if the reservoir were lowered. The advantage would be to allow more reliable grouting of the damaged zone and reduce the likelihood that another leak would develop in the immediately adjacent area after grouting when the reservoir is raised again.

7. Remedial measures

Three different methods have been used by different engineers to make repairs of the eroded moraine cores in the other recent dams with similar experiences: (1) grouting, (2) construction of impervious walls by the slurry trench method and (3) excavating and rebuilding the damaged section. Grouting has been used most commonly, it is the least costly and most flexible method. Repairs by the slurry trench method and by excavating and rebuilding are generally suitable and economical for repair of low dams, such as up to 10 or 15 meters in height, or for the repair of the upper portion of high dams.

In some of the other dams a combination of repair methods have been used, for example, at the Wreck Cove Surge Lake Dam in Nova Scotia (Canada), one section of the dam where the height was about 10 meters was excavated and rebuilt, while in another section where the height was greater, repairs were made by grouting.

I would make the repairs at Viddalsvatn Dam by grouting, which will be clearly the least costly method and technically satisfactory.

The October - December 1980 explorations (the grouting in Hole 2) show that the core is now eroded down to the bottom of the dam (to Elevation 899). Hence, if it were decided to excavate and rebuild the damaged section it would be necessary to go below Elevation 899, probably requiring that the dam be taken out of service for at least one year. If repairs were made by the slurry trench method, the trench would have to go down to this elevation or lower and be sealed well against the rock foundation. This is possible but expensive and believed not necessary.

One disadvantage of grouting, as already demonstrated by the Viddalsvatn Dam experience, is that new erosion may develop subsequently in the same location, requiring re-grouting. The renewed erosion may occur from small leaks which are not completely sealed off by the first grouting treatment or from new leaks which develop by hydraulic fracturing from continuing settlement. Hence, it is necessary to accept the idea that it may be required to grout again more than once in the future before conditions are finally stabilized. On the other hand I believe it possible that one more campaign of grouting may achieve permanent results. At the Yards Creek Pumped Storage Upper Reservoir Dam where the moraine core was extensively damaged by similar erosion, a single grouting effort in 1965 was sufficient to prevent any recurrence of the problem up to the present.

It would be desirable, and probably possible with sufficient effort, to seal off the entire leak by grouting, so that no water emerges at the downstream toe. It may not be essential, however, to stop all the leakage. At the Yards Creek Project clear leakage of the order of 30 l/second has continued to emerge at full reservoir for the 15 years since the grouting was completed. Evidently the water is flowing through the core in one or more leakage channels which are in a condition of equilibrium, in which no erosion is taking place.

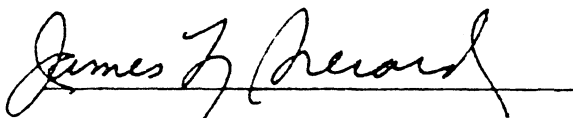
I believe that the basic grouting procedures you have used in the past are appropriate; that is, drill the grout holes full depth with casing and then grout by gravity grouting, pulling the casing in 1,0 meter stages. This method was also used successfully in 1980 to seal the leak at the Wreck Cove Dam. (The leak of about 30 l/sec was completely stopped).

The details of the grouting program need to be determined by experimentation. I would start in the vicinity of Hole 2 (in the October - December 1980 program) and work both ways, continuing until no grout take was obtained. Probably at least two lines of holes are desirable. I would carry all the holes in this area to refusal on the bedrock foundation.

I don't have a strong opinion about the best grout mix to use. I have the general opinion that grout mixes with relatively high cement contents are probably desirable, and that the mix you used for the upstream and downstream lines during the 1973 - 74 grouting is appropriate (100 kg cement : 50 kg of water; 2 kg bentonite). For such a grout (0,5 : 1 water/cement ratio by weight) the bentonite has very little influence and could be eliminated.

I would concentrate the effort in the area of the larger of the two sink holes (Stations 20 - 23), but I would consider also some effort again at the other end of the dam in the area of the other sinkhole. More than one drilling would be desirable.

Yours very truly,

A handwritten signature in cursive script, reading "James L. Sherard", written over a horizontal line.

J. L. Sherard