NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK

# PUBLIKASJON

NR
V 33

*Kjell Molkersrød*

# ETTERKONTROLL AV FUNDAMENT-STABILITET VED HVELVDAMMER

*VASSDRAGSDIREKTORATET*

Omslagsbilde: Dam Zakariasvatn i fugleperspektiv

Foto: Dag Bachke

NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK

| TITTEL<br>ETTERKONTROLL AV FUNDAMENTSTABILITET VED HVELVDAMMER | NR<br>V-33 |
|---|---|
| FORFATTER(E)/SAKSBEHANDLER(E)<br><br>KJELL MOLKERSRØD | DATO<br>20.08.90 |
| | ISBN<br>82-410-0096-0 |
| | ISSN<br>0802-0191 |

SAMMENDRAG
De senere år er det utviklet vitenskapelige metoder for å komme frem til beregningsmessig uttrykk for stabiliteten av hveldamfundamenter. På grunn av den sikkerhetsmessige betydning denne stabiliteten har, besluttet Vassdragstilsynet i 1986 å foreta etterkontroll ved et utvalg av våre hvelvdammer. Undersøkelsen er gjennomført i tiden 1987-90. Den har tatt for seg 17 dammer og har bestått av geologisk kartlegging og vurdering og eventuelt beregninger. Konklusjonen etter undersøkelsen er at norske hvelvdammer må sies å ha stabile fundamenter.

ABSTRACT
Scientific methods have in recent years been developed to determine calculable expressions for the stability of arch dam foundations. Due to the importance of this stability for dam safety, the Technical Supervision Division in 1986 decided to make an investigation on a selection of our arch dams. The investigation was carried out in the years 1987-90 on 17 dams. It consisted of geological mapping and estimation and, if necessary, calculations. The conclusion of the investigation was that the foundations of Norwegian arch dams are stable.

EMNEORD

Hvelvdamfundament, stabilitet, etterundersøkelse

SUBJECT TERMS

Arch dam foundation, stability, investigation

ANSVARLIG UNDERSKRIFT

Pål Mellquist
Vassdragsdirektør

Kontoradresse: Middelthunsgate 29
Postadresse: Postboks 5091, Maj.
0301 Oslo 3

Telefon: (02) 46 98 00
Telefax: (02) 69 61 51
Telex: 79397 NVEO N

Bankgiro: 0629.05.75026
Postgiro: 5 05 20 55

# INNHOLD

BAKGRUNN .....S 3

NORSKE HVELVDAMMER .....S 4

UTVALG AV DAMMER .....S 4

UNDERSØKELSEN .....S 4

GEOLOGISK KARTLEGGING OG VURDERING..S 5

STABILITETSBEREGNINGER.....S 6

OPPSUMMERING AV RESULTATENE .....S 6

KONKLUSJON .....S 7

VEDLEGG

## BAKGRUNN

Vassdragstilsynet har som hovedoppgave å føre tilsyn med at sikkerheten ved norske dammer er tilfredsstillende. Dette gjøres ved å kontrollere planlegging og utførelse samt å føre tilsyn med drift og vedlikehold. Tilsynet i driftsfasen omfatter jevnlige inspeksjoner av dam og fundament og kontroll med dameierens egentilsyn.

Vassdragstilsynet har plikt til å holde seg ajour med ny teknisk viten og erfaringer. Det har et ansvar i å anvende denne kunnskapen der dette kan bidra til å klarlegge om sikkerheten ved norske dammer er så god som den kan være.

Hvelvdammer setter store krav til fundamentet pga. systemet for kraftoverføring fra dam til fjell. Fundamentets stabilitet er meget avgjørende for sikkerheten av slike dammer.

De fleste av hvelvdammene våre er bygget i en tid da kunnskapen om fundamentstabilitet mer var basert på skjønn og erfaring enn på beregningsmetodikk.

I løpet av de senere år er det kommet nye metoder for analyse av fundamentstabiliteten for hvelvdammer. Metoden bygger delvis på erfaringer fra bruddet på Malpassetdammen i Syd-Frankrike i 1959, se vedlegg 1. Den innebærer geologisk kartlegging av fjellforholdene, estimering eller måling av poretrykk og friksjonsvinkler i mulige glideplan og de egentlige stabilitetsanalyser, som lettest utføres ved hjelp av et eget EDB-program.

Den nye metodikken er brukt her i landet ved beregning av stabiliteten ved Førrevassdammen, Virdnejavridammen og dam Vinkelfallet, våre største og nyeste hvelvdammer.

Når dette analyseapparat nå er tilgjengelig, fant Vassdragstilsynet det riktig å gå tilbake og gjennomføre en representativ kontroll av fundamentstabiliteten ved bestående norske hvelvdammer.
Man ventet ikke å avdekke spesielt uheldige forhold ved dette, men det var klart ønskelig å få fastslått på et bedre grunnlag enn hittil, hvilken sikkerhet dammen står med.

Kontrollen skulle i første rekke bestå av en revurdering av fundamentstabiliteten ved et utvalg av våre dammer.

## NORSKE HVELVDAMMER

Vi har i Norge 77 hvelvdammer høyere enn ca 10 m, se vedlegg 3. De fleste er slanke armerte konstruksjoner. Dammene er stort sett bygd på velegnede damsteder og fundamenteringsforholdene har vært betraktet som alminnelig gode. Med unntak av de aller nyeste dammene er det ikke foretatt noen egentlig stabilitetsberegning av fjellfundamentet, selv om det har vært vurdert at vederlaget kommer på rimelig godt fjell og at det ikke har vært utpregede svakhetssoner i damfoten.

Det foreligger ingen informasjon om at noen av våre hvelvdamfundamenter skal ha redusert stabilitet. Alle målinger som utføres på våre hvelvdammer viser normale verdier både når det gjelder deformasjoner, lekkasjer og poretrykk.

Hvelvdammene er bygget i perioden 1907 (Svelgfoss, Norsk Hydro) til 1987 (Virdnejavri og Førrevatn, Statkraft) med halvparten i perioden 1950-1970. Ca 70% av dammene er lavere enn 30 m, kun syv dammer er høyere enn 50 m. Se vedlegg 3.

## UTVALG AV DAMMER

Undersøkelsen ville kunne resultere i en oppfølging avhengig av konklusjonene. Ut fra en konsekvensvurdering ble utvalget av dammer foretatt blant våre høyeste, dvs. de som har høyde fra laveste fundament til topp dam på ca 30 m eller mer. Damstedene skulle representere den virkelige fordeling av hvelvdammene over landet slik at undersøkelsen ville gi et bra bilde av forholdene generelt. En evt. oppfølging av undersøkelsen ville kunne kreve mer spesifikke utvelgelseskriterier.

Utvalget av 17 dammer finnes i vedlegg 4 og 5. Fra det opprinnelige utvalget ble dam Storlivatn trukket ut av undersøkelsen på grunn av sin spesielle og lite representative byggemåte. Til gjengjeld ble Rødbergdammen tatt med, hovedsakelig etter dameierens ønske.

## UNDERSØKELSEN

Etter en del forberedende arbeider vinteren 85/86 ble undersøkelsen igangsatt med oversendelse av brev og notat fra Vassdragstilsynet til de aktuelle dameiere den 2. mars 1986, se vedlegg 6.

Et vesentlig moment var å få en så ensartet undersøkelse som mulig. Dette oppnådde vi blant annet ved at 14 av de 17 dammene var prosjektert av Ingeniør Chr. F. Grøner A.S. og for alle disse dammene foretok Grøner også stabilitetskontrollen. Dette var etter dameiernes eget valg, men i henhold til Vassdragstilsynets anbefaling.

De tre siste dammene ble vurdert av (daværende) Siviling. Elliot Strømme A.S., (daværende) Ing. A. B. Berdal A.S. og Siv.ing. O. T. Blindheim.

Etter Grøners opplegg har undersøkelsen i hovedsak omfattet 3 faser:

1. Geologisk kartlegging med vurdering.

2. Enkel stabilitetsberegning.

3. Supplerende undersøkelser og stabilitetsberegning.

Alle dammene ble undersøkt i fase 1. For de dammene hvor det var nødvendig ble undersøkelsen ført videre i fase 2 og eventuelt fase 3. Hver fase skulle oppsummeres i en rapport.

O. T. Blindheim avsluttet undersøkelsen (Hegsetdammen) etter geologisk vurdering (tilsv. fase 1). Strømme gjennomførte undersøkelsen (Myrtjerndammen) i to stadier - geologisk undersøkelse og stabilitetsberegninger - tilsvarende fase 1 og 2, men med en noe annen beregningsmetodikk enn Grøner. Berdal behandlet geologisk vurdering og stabilitetsberegninger (dam (Vierkvev) i én rapport, med beregningsmetodikk tilsvarende Grøners. (Se kapitlet "Stabiltetsberegninger" nedenfor).

## GEOLOGISK KARTLEGGING OG VURDERING

I utgangspunktet ble det foretatt en grundig geologisk vurdering (fase 1) med kartlegging av topografi, bergart, oppsprekking, svakhetssoner og eventuelle glideplan i damfundamentene. Videre er sprekkenes art og ruhet samt evt. sprekkevannstrykk registrert. Dette er benyttet i en vurdering av mulige bruddmekanismer, som har bestått i å fastslå om sprekkesystemet definerer bergblokker som kan gli, se vedlegg 7. For flertallet av dammene fant man ikke slike blokker i fundamentet, og stabilitetsundersøkelsen sluttet med det.

## STABILITETSBEREGNINGER

For de dammene hvor det ble funnet mulige bevegelige bergblokker i den geologiske kartlegging og vurdering, ble det foretatt stabilitetsberegninger av disse. Metoden er basert på tredimensjonal analyse av stive blokker og er beskrevet i kapittel 2 i Grøners fase 2-rapporter, se vedlegg 8. Den er også behandlet i føgende foredrag:

- Amund Gaut, Ingeniør Chr. F. Grøner A.S.
  "Fundamentstabilitet ved våre store hvelvdammer"
  holdt under teknisk medlemsmøte 1988, i Vassdragsregulantenes forening. Vedlegg 9.

- G. Birgisson og J. K. G. Rohde, Ingeniør Chr. F. Grøner A.S.
  "Stabilitetsberegning av fundament for 15 norske hvelvdammer"
  holdt under Fjellsprengningskonferansen i 1988. Vedlegg 10.

Stabilitetsberegningene resulterte i sikkerhetsfaktorer for de aktuelle bergblokkene. Dersom beregningene var beheftet med store usikkerheter eller ga lave verdier, ble nye undersøkelser gjort av fundamentet og eventuelt ytterligere beregninger utført (fase 3).

## OPPSUMMERING AV RESULTATENE

Allerede i fase 1 kunne konklusjonen "tilfredsstillende stabilitet" trekkes for 11 av de 17 dammene ut fra at det ikke fantes løse blokker med ugunstige glideflater.

Av de resterende seks ble det gjort enkle overslagsberegninger for Rødbergdammen med parametre av en annen nøyaktighetsgrad enn de parametre som er brukt i beregningene som er utført for de fem dammene Nibbehøl, Votna, Breiava, Rauddalsvatn og Langlivatn, som ble undersøkt i fase 2.

Etter fase 2 gjensto to dammer - dam Votna og Langlidammen - hvor det var behov for fase 3, mer omfattende geologisk undersøkelse og nye beregninger. For disse dammene forelå konklusjonen "tilfredsstillende stabilitet" med brev fra Grøner h.h.v. 23.12.88 og 17.01.90.

Kun for Langlidammen hadde man visse merknader til konklusjonen: "Dammen har imidlertid en begrenset sikkerhet som er lavere enn for andre dammer som er undersøkt på tilsvarende måte. Dette forhold, samt erosjon forårsaket av flomoverløp vil bli tatt hensyn til i program for tilsyn med dammen."

Resultatene for de enkelte dammene er fremstilt i vedlegg 11. Alle dammene er innpasset i "Grøners system" med tre faser, selv om Strømmes og Berdals opplegg ikke passer helt inn.

## KONKLUSJON

Undersøkelsen omfatter 17 hvelvdammer høyere enn 30 m av de ialt 77 norske hvelvdammene. Utenom dette prosjektet er dammene ved Førrevatn, Virdnejavri og Vinkelfallet undersøkt på tilsvarende måte og funnet å ha tilfredsstillende stabilitet. For de fleste av de 17 kunne man konstatere ved en geologisk kartlegging at stabiliteten av fundamentene var akseptabel. Ved de øvrige dammene gjorde man mer eller mindre omfattende stabilitetsberegninger, og også for disse konkluderte man til slutt med at fundamentene hadde tilstrekkelig sikkerhet.

Behovet for å undersøke også de øvrige dammene har vært drøftet internt i Vassdragstilsynet, og det har også vært tatt opp med Ing. Chr. F. Grøner A/S. Det har vært vurdert om det finnes enkle kriterier for å peke ut dammer der nærmere undersøkelser kunne være påkrevet. Det er enighet om at det i alle fall vil være nødvendig med geologisk ekspertise for å få en pålitelig vurdering. Slike undersøkelser av alle damfundamentene vil nødvendigvis få et betydelig omfang. Resultatene fra de undersøkelser som er gjort er så positive, at det ut fra en sikkerhetsmessig vurdering ikke kan sies å være behov for ytterligere omfattende kontroll. Fundamentforholdene ved norske hvelvdammer ser ut til å være betryggende.

Et forhold som både dameierne og Vassdragstilsynet må være oppmerksom på, er erosjon i fundamentet som følge av flom og andre miljøpåkjenninger. Dette kan på sikt svekke stabiliteten. Forholdet følges best opp med et godt tilsynsopplegg.

VEDLEGG

Vedlegg 1: Omtale av bruddet på Malpasset-dammen

Vedlegg 2: Hvelvdammer i Norge

Vedlegg 3: Hvelvdammer etter byggeår og høyde, grafisk fremstilt

Vedlegg 4: Utvalg av dammer i undersøkelsen

Vedlegg 5: Kart med de utvalgte dammene

Vedlegg 6: Brev (03.02.86) og notat fra Vassdragstilsynet

Vedlegg 7: "Stabilitet av hvelvdammer" (fra Grøners fase 1-rapport)

Vedlegg 8: "Beregningsmetode" (fra Grøners fase 2-rapport)

Vedlegg 9: "Fundamentstabilitet ved våre store hvelvdammer" (foredrag av A. Gaut, Grøner)

Vedlegg 10: "Stabilitetsanalyse av 15 norske hvelvdammer" (foredrag av G. Birgisson og J. K. G. Rohde, Grøner)

Vedlegg 11: Resultatene fra hvelvdamundersøkelsen

# BRUDDET PÅ MALPASSET-DAMMEN

Topp dam kote 102,55
Elvebunn kote 42,00
HRV kote 100,40

Damradius (oppstr. krona) 105 m

Hvelvtykkelse topp 1,50 m
bunn 6,76 m

Bygging startet 1. april 1952.

Vannstander oppnådd:

24. mai 1954 kote 60,60
sept. 1955 kote 79,75
juli 1959 kote 94,10

Dambruddet skjedde 2. desember 1959. Da hadde vannstanden nådd kote 100,12 (28 cm under HRV).

Noen helt sikker årsak til dambruddet har man ikke konstatert. For mange spor ble borte da venstre vederlag ble skylt vekk til at det var mulig. Mange teorier er lansert med årsak både i fundament og hvelv. Den mest sannsynlige årsak var fundamentsvikt.

Etter undersøkelser, materialtester av betong og fjell, kontrollberegninger etc., konkluderte undersøkelseskommisjonen med at årsaken til dambruddet var at venstre vederlag ga etter. Vederlaget beveget seg ca 2 m hovedsakelig i tangensiell retning med en mindre radiell komponent.

I et bestemt område hvor endel sprekker var synlig har fundamentet vært mer deformert enn ellers. Pga. hvelvets stivhet kunne det ikke deformeres tilstrekkelig til å overføre lasten til fundamentet i dette området men overførte belastningen til hver ende av denne sonen med dertil økt spenning og gradvis overlast her og nedover mot bunnen. Denne prosessen har tatt dager og uker mens annen fase med glidningen av vederlaget var et raskt brudd i løpet av få sekunder. Man fikk ikke noe forvarsel om bruddet. Blant annet ble damfoten inspisert kort tid før bruddet og det var ingen tegn til lekkasjer.

Grundige geologiske undersøkelser var gjort av damsteder og geologien var nøyaktig beskrevet. Geologen (Prof. Corroy) nølte ikke med å anbefale byggingen av dammen. Det er imidlertid usikkert om Corroy var klar over at det var en hvelvdam som skulle bygges, da de første undersøkelsene ble gjort for en massivdam.

# HVELVDAMMER I NORGE

høyde> ca 10 m

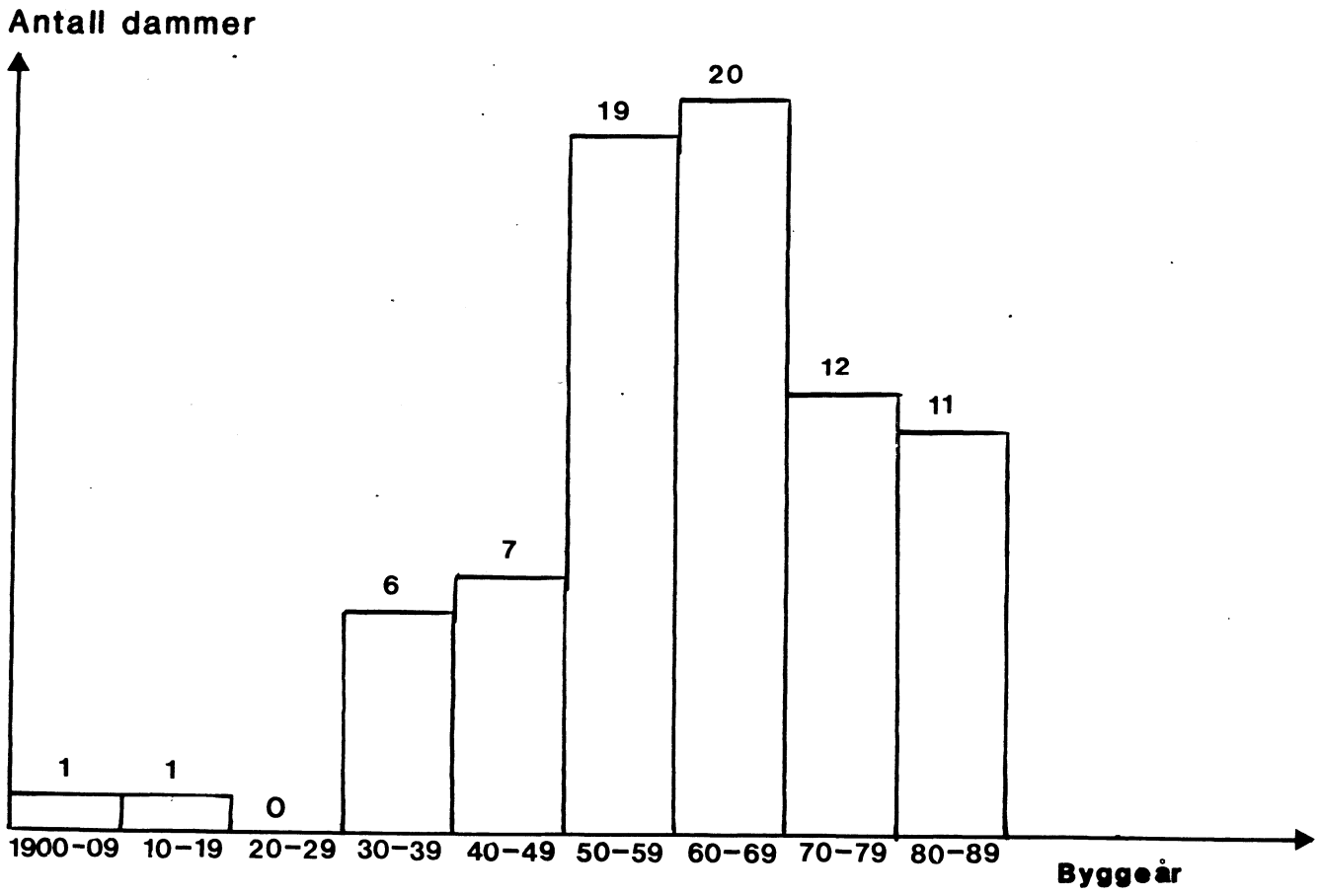
| Dam | Eier | Høyde (m) | Byggeår |
|---|---|---|---|
| Akershus/Oslo | | | |
| Bergstjern | Nittedal Vannverk | 10 | 1973 |
| Høldippeldalen | Nittedal Vannverk | 23 | 1960 |
| Elvåga | Oslo Vann- og Avløpsverk | 25 | 1963 |
| Langlivatn | Oslo Vann- og Avløpsverk | 35 | 1941 |
| Hedmark | | | |
| Osfallet | Rena Kraftselskap | 23 | 1947 |
| Oppland | | | |
| Aurdalsfjord | For. til Bægnavdr. reg. | 35 | 1962 |
| Raudalsvatn | Glommens og Laagens Brukseierf. | 41 | 1952 |
| Vinkelfallet | Midt-Gudbrandsdal Energiverk A/S | 40 | 1983 |
| Buskerud | | | |
| Rødungen | Oslo Lysverker | 16 | 1943 |
| Rødberg | Statkraft | 27 | 1947 |
| Telemark | | | |
| Grøtvann | Kragerø kommune | 10 | 1971 |
| Svelgfoss | Norsk Hydro | 25 | 1907 |
| Borsjø | I/S Skafså Kraftverk | 18 | 1954 |
| Urvatn | I/S Skafså Kraftverk | 20 | 1953 |
| Ørntjern | Skien kommune | 16 | 1961 |
| Bjåen | Skiensfj. Komm. Kr.selsk. | 16 | 1970 |
| Vindsjå | Skiensfj. Komm. Kr.selsk. | 24 | 1958 |
| Grottevatn | Statkraft | 12 | 1942 |
| Vinjevatn | Statkraft | 29 | 1961 |
| Langfoss | Vafos Brug A/S | 19 | 1957 |

| Dam | Eier | Høyde (m) | Byggeår |
|---|---|---|---|
| <u>Vest-Agder</u> | | | |
| Kilen | Sira-Kvina Kraftselskap | 37 | 1970 |
| Juvatn | Vest-Agder Elverk | 47 | 1958 |
| Kvernevatn | Vest-Agder Elverk | 19 | 1953 |
| Skjerkevatn | Vest-Agder Elverk | 19 | 1934 |
| <u>Rogaland</u> | | | |
| Andersvatn | Lyse Kraft | 23 | 1984 |
| Breiava | Lyse Kraft | 54 | 1964 |
| Grytetjørn | Lyse Kraft | 12 | 1982 |
| Maudal | Maudal kraftverk | 35 | 1985 |
| Myrtjørn | Maudal Kraftlag | 33 | 1948 |
| Sandvatn | Røldal-Suldal Kraft A/S | 27 | 1967 |
| Berdalsvatn | A/S Saudefaldene | 29 | 1954 |
| Dalvatn | A/S Saudefaldene | 24 | 1919 |
| Holmavatn | A/S Saudefaldene | 22 | 1952 |
| Nedre Sandvatn | A/S Saudefaldene | 22 | 1971 |
| Slettedalen | A/S Saudefaldene | 72 | 1959 |
| Storlivatn | A/S Saudefaldene | 31 | 1931 |
| Vierkvev | Stavanger Energiverk | 30 | 1947 |
| Bjørndalsvatn | Statkraft | 14 | 1985 |
| Førrevatn | Statkraft | 95 | 1987 |
| Skorpevadhøl | Statkraft | 20 | 1986 |
| <u>Hordaland</u> | | | |
| Bjølsegrøvatn | A/S Bjølvefossen | 21 | 1937 |
| Votna | Røldal-Suldal Kraft A/S | 55 | 1966 |
| Nedre Håvardsvatn | Statkraft | 44 | 1974 |
| Nibbehøl | A/S Tyssefaldene | 35 | 1966 |

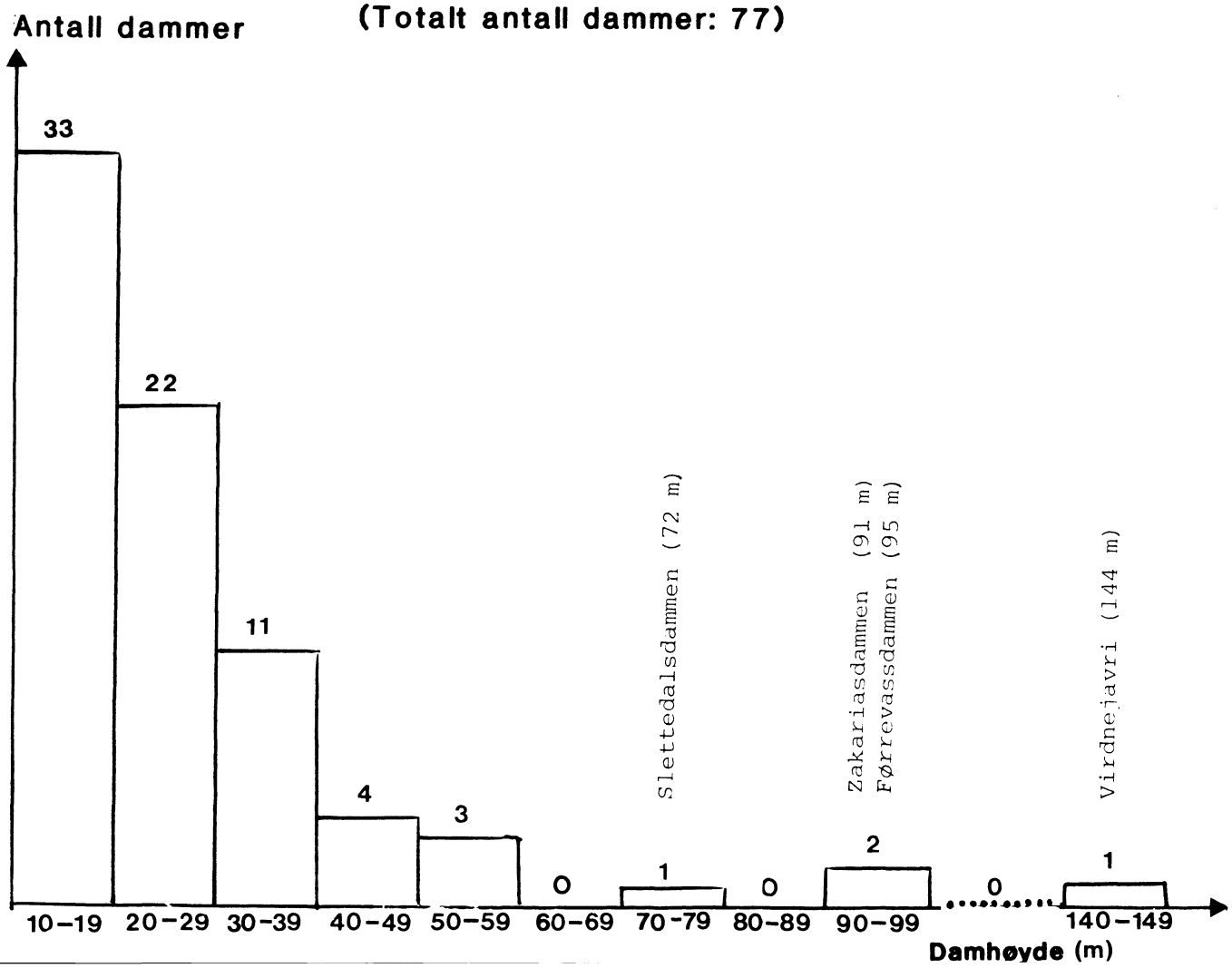
| Dam | Eier | Høyde (m) | Byggeår |
|---|---|---|---|
| <u>Sogn og Fjordane</u> | | | |
| Hjelmevatn | Elkem A/S | 24 | 1952 |
| Sørdalsvatn | Elkem A/S | 17 | 1973 |
| Vingevatn | Elkem A/S | 9 | 1967 |
| Fossvatn | Hydro Aluminium A/S | 22 | 1964 |
| Gravdalen | Hydro Aluminium A/S | 17 | 1961 |
| Harbakkevatn | Hydro Aluminium A/S | 20 | 1959 |
| Nordalsvatn | Hydro Aluminium A/S | 16 | 1952 |
| Storevatn II | Hydro Aluminium A/S | 12 | 1963 |
| N. Sødalsvatn I | Sogn og Fjordane Energiverk | 39 | 1973 |
| Øvre Sødalsvatn | Sogn og Fjordane Energiverk | 15 | 1974 |
| <u>Møre og Romsdal</u> | | | |
| Zakariasdammen | Tafjord Kraftselskap | 91 | 1969 |
| Reinsetvatn | Kristiansund Elverk | 23 | 1946 |
| <u>Sør-Trøndelag</u> | | | |
| Hegset | Trondheim Elverk | 51 | 1961 |
| Sokna Inntaksdam | Sør-Trøndelag Kraftselskap | 25 | 1964 |
| Vekveelv | Sør-Trøndelag Kraftselskap | 12 | 1972 |
| <u>Nord-Trøndelag</u> | | | |
| Namsvatn | Nord-Trøndelag Elverk | 20 | 1951 |
| <u>Nordland</u> | | | |
| Stengvatn | Fauske kommune | 19 | 1973 |
| Grytåvatn | Helgeland Kraftlag A/L | 28 | 1963 |
| Holmvatn | Helgeland Kraftlag A/L | 30 | 1973 |
| Nedre Kvitfossv | I/S Lofotkraft | 14 | 1955 |
| Langevatn | Mosjøen Aluminiumsverk | 15 | 1980 |
| Fiskeløsvatn | Narvik komm. Elverk | 10 | 1934 |
| Nygårdsvatn | Narvik komm. Elverk | 13 | 1932 |
| Giken | A/S Salten Kraftsamband | 13 | 1980 |
| Navnløsvatn | I/S Sundsfjord kraftlag | 10 | 1963 |

| Dam | Eier | Høyde (m) | Byggeår |
|---|---|---|---|
| <u>Finnmark</u> | | | |
| Inntaksdammen | Hammerfest Elverk | 12 | 1950 |
| Nedre Eggevatn | Hammerfest Elverk | 12 | 1950 |
| Vestfjellvatn | Hammerfest Elverk | 14 | 1965 |
| Øvre Eggevatn | Hammerfest Elverk | 10 | 1950 |
| Reinkalvvatn | Nordkyn Kraftlag A/L | 13 | 1955 |
| Ørretvatn | Repvåg Kraftlag A/L | 12 | 1953 |
| Virdnejavri | Statkraft | 144 | 1987 |
| Storvatnet | Sørfjord kraftverk | 11 | 1988 |

## HVELVDAMMER ETTER BYGGEÅR
(Totalt antall dammer: 77)




## HVELVDAMMER ETTER HØYDE
(Totalt antall dammer: 77)

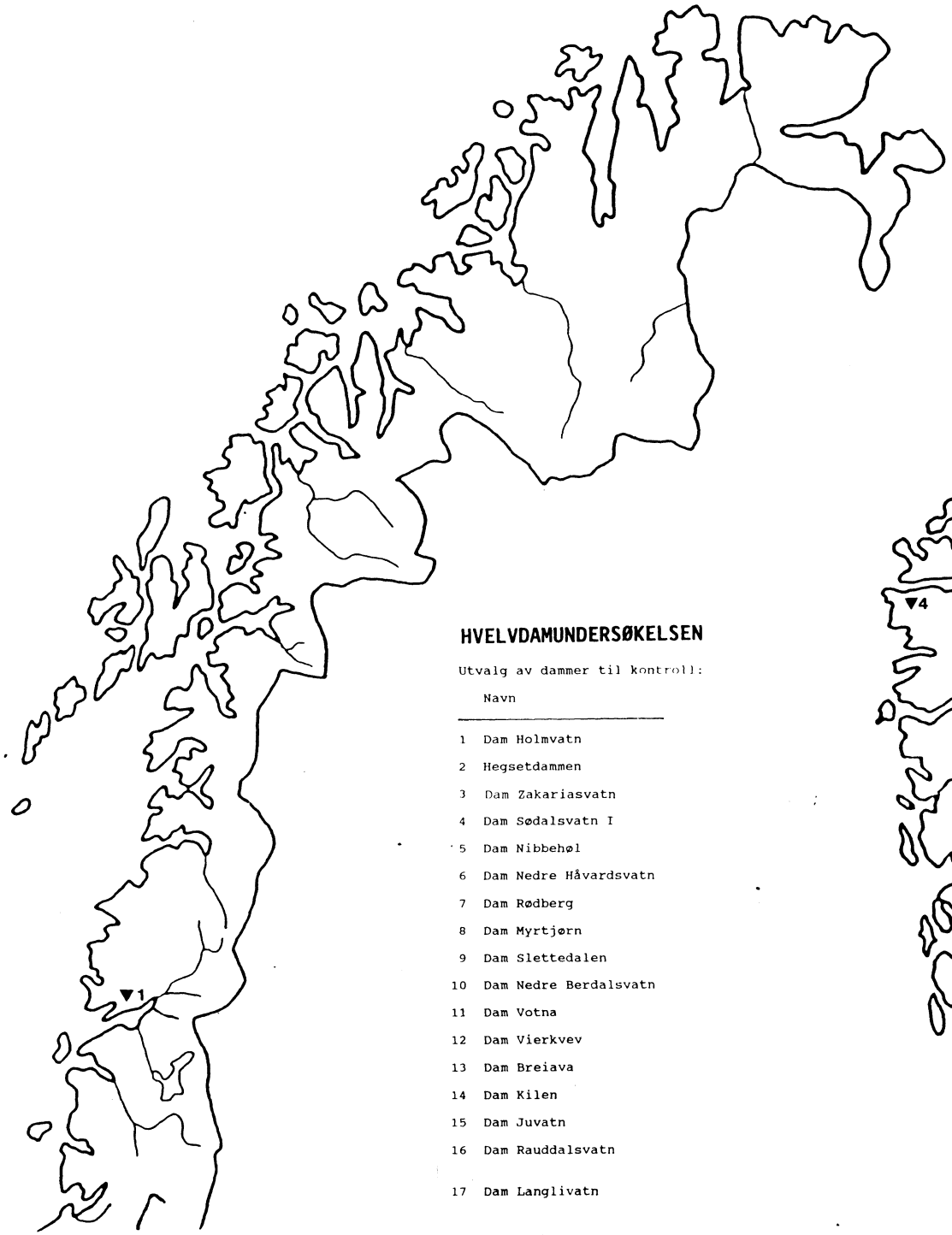


# HVELVDAMUNDERSØKELSEN

Utvalg av dammer til kontroll:

| | Navn | Eier | Byggeår | Høyde | Kontrollert av |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Dam Holmvatn | Helgeland Kraftlag L/L | 1973 | 30 | Grøner |
| 2 | Hegsetdammen | Trondheim Elektrisitetsverk | 1961 | 51 | Blindheim |
| 3 | Dam Zakariasvatn | Tafjord Kraftselskap | 1969 | 91 | Grøner |
| 4 | Dam Sødalsvatn I | Sogn og Fjordane Energiverk | 1973 | 39 | Grøner |
| 5 | Dam Nibbehøl | A/S Tyssefaldene | 1966 | 35 | Grøner |
| 6 | Dam Nedre Håvardsvatn | Statkraft | 1974 | 44 | Grøner |
| 7 | Dam Rødberg | Statkraft | 1947 | 27 | Grøner |
| 8 | Dam Myrtjørn | Maudal Kraftlag | 1948 | 33 | Strømme |
| 9 | Dam Slettedalen | A/S Saudefaldene | 1959 | 72 | Grøner |
| 10 | Dam Nedre Berdalsvatn | A/S Saudefaldene | 1954 | 29 | Grøner |
| 11 | Dam Votna | Røldal-Suldal Kraft A/S | 1966 | 55 | Grøner |
| 12 | Dam Vierkvev | Stavanger Energiverk | 1947 | 30 | Berdal |
| 13 | Dam Breiava | Lyse Kraft | 1964 | 54 | Grøner |
| 14 | Dam Kilen | Sira-Kvina Kraftselskap | 1970 | 37 | Grøner |
| 15 | Dam Juvatn | Vest-Agder Energiverk | 1958 | 47 | Grøner |
| 16 | Dam Rauddalsvatn | Glommens og Laagens Brukseierforening | 1952 | 41 | Grøner |
| 17 | Dam Langlivatn | Oslo kommune | 1941 | 35 | Grøner |

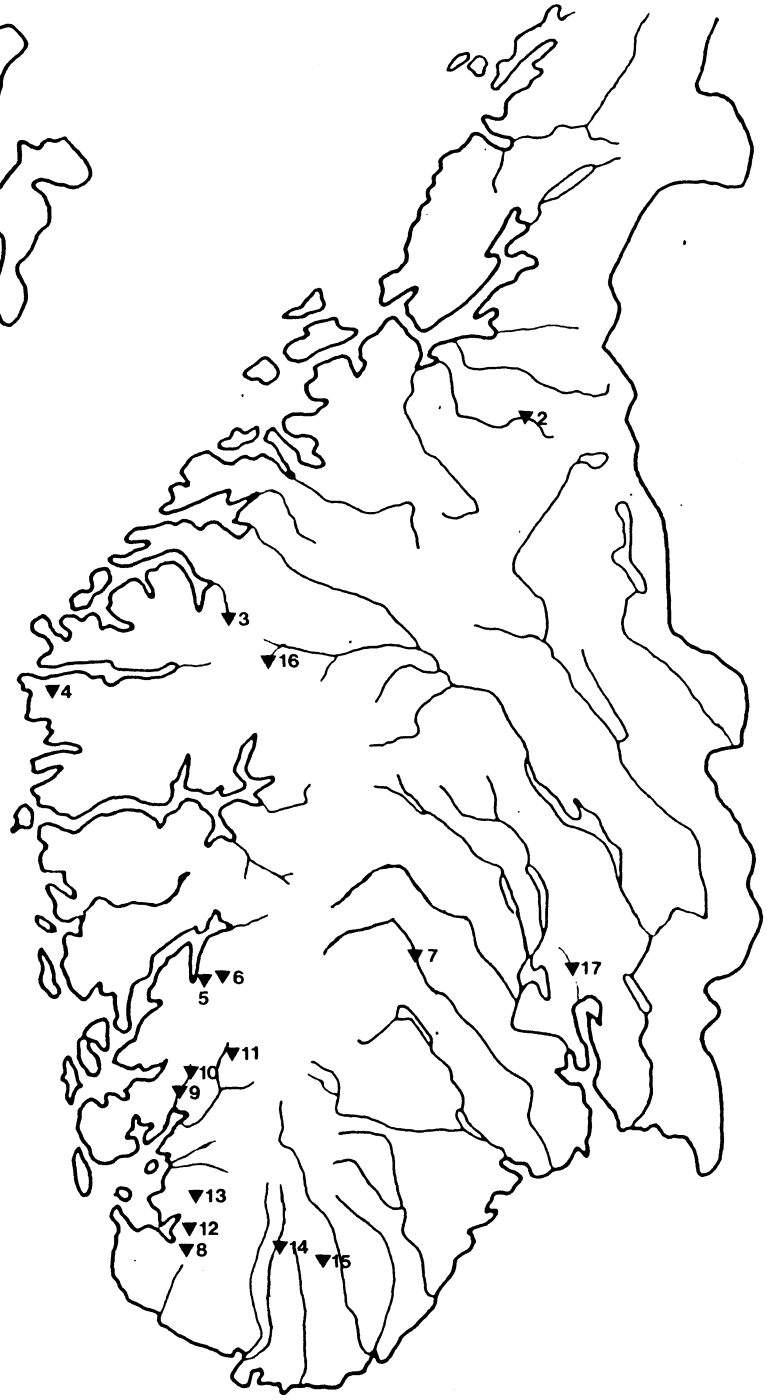
VEDLEGG 4




## HVELVDAMUNDERSØKELSEN

Utvalg av dammer til kontroll:

| | Navn |
|---|---|
| 1 | Dam Holmvatn |
| 2 | Hegsetdammen |
| 3 | Dam Zakariasvatn |
| 4 | Dam Sødalsvatn I |
| 5 | Dam Nibbehøl |
| 6 | Dam Nedre Håvardsvatn |
| 7 | Dam Rødberg |
| 8 | Dam Myrtjørn |
| 9 | Dam Slettedalen |
| 10 | Dam Nedre Berdalsvatn |
| 11 | Dam Votna |
| 12 | Dam Vierkvev |
| 13 | Dam Breiava |
| 14 | Dam Kilen |
| 15 | Dam Juvatn |
| 16 | Dam Rauddalsvatn |
| 17 | Dam Langlivatn |




VEDLEGG 5

VEDLEGG 6

4/58/86-V SS/IMB 03.02.86

Oslo vann- og avløpsverk
Tilsynsseksjonen
Trondheimsvn. 5
0560 OSLO 5

ETTERKONTROLL AV FUNDAMENTSTABILITET VED HVELVDAMMER.
DAM LANGLIVATN, (V. nr. 32)

./. Vedlagt oversendes et notat fra Vassdragstilsynet vedrørende undersøkelse av fundamentstabiliteten ved våre høyeste hvelvdammer. Det fremgår av notatet hva som er bakgrunnen for en slik undersøkelse, hvordan den tenkes gjennomført og hva man regner med å oppnå med den.

Dammen ved Langlivatn hører inn under den nevnte kategori av dammer, og vi ber Dem sørge for å få gjennomført en undersøkelse som beskrevet. De er i prinsippet fri til å velge hvem som skal utføre oppdraget sålenge Vassdragsdirektoratet kan godkjenne kompetansen.

Det vil være en klar fordel med en mest mulig samlet vurdering av alle dammer som inngår i undersøkelsen, 17 stk. i alt. Vi viser i denne forbindelse til at nesten alle dammene i gruppen - i likhet med Deres dam - er konstruert av Ingeniør Chr.F. Grøner A/S, som derfor sitter inn med mye bakgrunnsmateriale. Firmaet har også nødvendig kompetanse når det gjelder geologiske og stabilitetsmessige vurderinger, og vi vil se det som en fordel om firmaet ble engasjert til undersøkelsen.

Vassdragsdirektoratet samordner undersøkelsene, og vår saksbehandler vil være avdelingsingeniør Stig Strokkenes. Eventuelle spørsmål om undersøkelsen kan rettes til ham, mens prinsipielle forhold tas opp med Vassdragsdirektoratet (Vassdragstilsynet).

Vassdragsdirektoratet vil om kort tid ta kontakt for å drefte en del praktiske forhold i forbindelse med undersøkelsen. Vi ber om at man søker å komme igang med undersøkelsen til sommeren.

Åge Hjelm-Hansen

Bjarne Nicolaisen

0786p/IMB

NORGES
VASSDRAGS- OG ELEKTRISITETSVESEN

Dokumenttype
VVT-notat

| Tittel | Tilgjengelighet/merknad | | |
|---|---|---|---|
| Etterkontroll av hvelvdammer | Offentlig | | |
| Prosjekt | Dok.nr./arkivnr. | Dato 28.01.86 | |
| Stikkord/emneord | Ansvarlig Bjarne Nicolaisen | Adm.enhet | Sign. |
| | Saksbehandler Stig Strokkenes | Init./adm.enhet | Sign. |
| Arkivsted | Opplag | Antall ark i alt | Derav bilag |

Det er rundt 70 hvelvdammer i Norge, og de fleste er slanke armerte konstruksjoner. Dammene er stort sett bygd på velegnede damsted og fundamenteringsforholdene har vært betraktet som alminnelig gode. Med unntak av de aller nyeste dammene er det ikke foretatt noen egentlig stabilitetsberegning av fjellfundamentet, selv om det har vært vurdert at vederlaget kommer på rimelig godt fjell og at det ikke har vært utpregede svakhetssoner i damfoten.

I løpet av de senere år er det kommet nye metoder for analyse av fundamentstabiliteten for hvelvdammer. Metoden bygger delvis på erfaringer fra bruddet på Malpasset-dammen i Syd-Frankrike i 1959. Den innebærer geologisk kartlegging av fjellforholdene, estimering eller måling av poretrykk og friksjonsvinkler i mulige glideplan og de egentlige stabilitetsanalyser, som lettest utføres ved hjelp av et eget EDB-program.

Når dette analyseapparat nå er tilgjengelig, finner Vassdragsdirektoratet det riktig at man går tilbake og gjennomfører en representativ kontroll av bestående norske hvelvdammer for å kontrollere fundamentstabiliteten. Det må presiseres at man ikke venter å avdekke spesielt uheldige forhold ved dette, men det er klart ønskelig å få fastslått på et bedre grunnlag enn hittil, hvilken sikkerhet dammene står med.

I første omgang vil en slik undersøkelse omfatte våre høyeste hvelvdammer, og vi har valgt de dammene som har høyde fra laveste fundament til topp av dam på ca. 30 m eller mer. Damstedene representerer en rimelig geografisk og geologisk spredning og antas å gi et bra bilde av forholdene generelt. Når resultatene fra denne undersøkelsen foreligger, vil det bli vurdert om også lavere dammer bør undersøkes på samme måte.

I utgangspunktet må det foretas en grundig geologisk kartlegging av bergart, oppsprekking, svakhetssoner og mulige glideflater. Utfra dette kan det så gjøres en første vurdering av hvordan hvelvkreftene kan opptas av fjellfundamentet. Vassdragsdirektoratet antar at det i mange tilfeller kan konstateres allerede

Dokument sendes til

på dette grunnlag at forholdene er akseptable og at ytterligere undersøkelse ikke er påkrevet. I motsatt fall vil videre kontroll og analyse måtte gjennomføres.
Vassdragsdirektoratet vil ha ansvar for at undersøkelsene blir utført på en faglig forsvarlig måte og at ensartede forutsetninger legges til grunn alle steder.
De instanser som skal gjennomføre undersøkelsene må derfor godkjennes av Vassdragsdirektoratet, som også vil ta stilling til forutsetninger, resultater og konklusjoner. Gjennomføringen er ikke underlagt noe spesielt tidspress, men vi finner det naturlig at feltundersøkelsene tar til sommeren 1986.

Skulle det noen steder vise seg nødvendig å bedre stabilitetsforholdene, vil det kanskje være mest aktuelt å redusere poretrykket i fjellet ved drenering. Injisering, utstøping og forankring kan også komme på tale.

GRØNER
RÅDGIVENDE INGENIØRER

## 3.0 STABILITET AV HVELVDAMMER

Hvelvdammer i Norge er fundamentert på bergarter med høy fasthet i forhold til de spenninger som forårsakes av damkreftene. Ved alle damsteder er imidlertid fjellet oppsprukket, og dette vil i større eller mindre grad påvirke stabiliteten av fjellfundamentet.

Sprekkene deler fjellet opp i blokker. Fastkilte blokker uten bevegelsesmulighet har liten betydning for stabiliteten. Men ved mange damsteder er de topografiske forhold og sprekkeretninger slik at det finnes blokker som kan gli ut. Blokkene utsettes for damkrefter, gravitasjonskrefter og sprekkevannstrykk. En eventuell glidning kan foregå langs ett eller to sprekkeplan. Sikkerheten mot glidning er avhengig av tilstrekkelig stor friksjon i de aktuelle sprekkeplan.

Disse forhold kan undersøkes ved geologisk kartlegging, vurdering av ingeniørgeologiske parametre og stabilitetsberegning.

Først omkring 1970 forelå bergmekaniske beregningsmetoder anvendelige for kontroll av damfundament. I Norge ble metodene ikke anvendt før på slutten av 1970-tallet.

Bortsett fra dammer bygget i de siste årene, er det derfor ikke utført beregningsmessig kontroll av damfundamentet for norske hvelvdammer. For alle større dammer er det imidlertid utført geologiske undersøkelser av damstedet. De geologiske rapportene angir bergart og karakterisering av oppsprekningen. I en del tilfelle er det tatt med nærmere beskrivelse av sprekker og svakhetssoner. Rapportene konkluderer vanligvis med at damstedet ansees egnet for bygging av en dam.

Den som sto for prosjekteringen, foretok i en viss utstrekning ingeniørgeologiske vurderinger ved plassering og utforming av dammen. Ved noen dammer har dette skjedd i samarbeid med ingeniørgeolog.

Etterkontroll av dammene kan utføres etter de prinsipper som i dag gjelder ved bygging av nye dammer. Damstedene undersøkes med vekt på kartlegging av sprekker og kvantifisering av ingeniørgeologiske parametre for bestemnmelse av friksjon i de aktuelle sprekkeplan. Disse parametre inkluderer:

- Sprekkenes utholdenhet og retningsvariasjon
- Sprekkefrekvens
- Sprekkenes åpenhet/kontaktforhold mellom sprekkeflater
- Om sprekkene følges av knusning og omvandling av sidebergarter
- Karakter av eventuell mineralisering og fyllmateriale

- Om sprekkene er plane, hakkete eller bølgete
- Sprekkeflatenes ruhet
- Trykkstyrke på sprekkeplan, målt med prellhammer
- Porevannstrykk/vanntrykk på sprekkeflatene

I praksis vil det sjelden være mulig å gi nøyaktige tallverdier for alle disse parametre, slik at en del må baseres på skjønn.

I første fase må det avklares om opptredende sprekker medfører noen mulighet for at blokker kan gli ut. I en del tilfelle vil dette kunne bestemmes ut fra enkle betraktninger. Ved mer uoversiktelige tilfelle er det nødvendig med en mer inngående vurdering hvor damkreftene tas med i betraktningen.

Damfundament hvor det ikke er mulighet for bevegelse av blokker, kan ansees som stabile. I de tilfelle det i første fase konkluderes med at det er mulighet for bevegelse av blokker, vil det i neste fase være aktuelt å utføre stabilitetsberegning av fundamentet.

Stabilitetsberegninger utføres ved at man kontrollerer stabiliteten av en modell av fundamentet. Stabiliteten kan angis ved en beregnet sikkerhetsfaktor. beregningsmodellen er en sterkt forenklet idealisering av det virkelige fundamentet. Beregnet sikkerhetsfaktor må derfor kun oppfattes som en indikasjon. Stabilitetsberegningen gir imidlertid en basis for en samlet vurdering av stabiliteten.

Ved etterkontroll av flere dammer vil beregningene avklare om det finnes dammer med lav beregnet sikkerhet i forhold til de andre dammer som undersøkes på samme måte.

Mer inngående undersøkelser, samt vurdering av eventuelle tiltak, kan da begrenses til de dammer som peker seg ut ved en slik sammenligning.

GRØNER
RÅDGIVENDE INGENIØRER

## 2. BEREGNINGSMETODE

Det grunnleggende konsept for analyse av fundamentstabilitet ble fremsatt i begynnelsen av 1970 åra av franskmennene Londe, Vigier og Vormeringer.

Det er basert på en tredimensjonell analysemetode hvor man forutsetter stive blokker. Man undersøker et fjellegeme avgrenset av geologiske sprekkeplan (P1-Pn) og av naturlig terreng, slik det er vist på skissen i fig.1. De krefter som virker på dette avgrensede fjellegeme, er blokkens tyngde (W), vanntrykk U1-Un på avgrensningsplanene samt overføringskreftene fra dammen (Q).

Mot nevnte angripende krefter virker de skjærkrefter som blir mobilisert langs et eller flere av avgrensningsplanene. Skjærstyrken er avhengig av sprekkeplanenes ruhet, fyllingsmateriale, trykkstyrke og kontakt arealet mellom flatene.

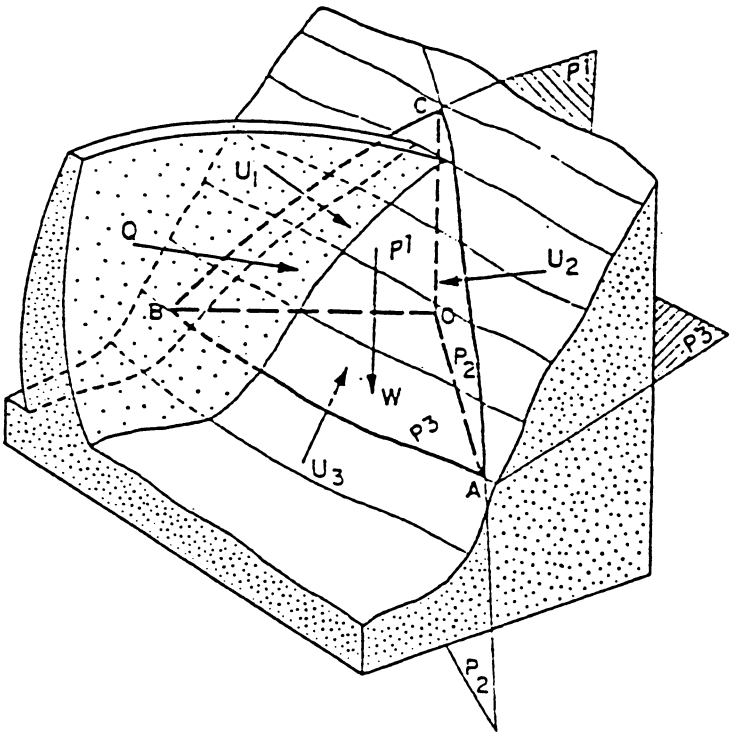



Fig. 1 Stabilitet av fjellblokk

Følgende komponenter må være bestemt før analysen gjennomføres:

- Orientering av aktuelle avgrensningsplan.
- Glideblokkens tyngde.
- Vanntrykk på blokkens avgrensende sprekkeplan.
- Overføringskrefter fra dammen.
- Skjærparametre på aktuelle glideplan (iflg. N. Barton, NGI, publikasjon nr. 105 og 119).

Forutsetninger for stivblokkanalysen:

- Volumet begrenses av sprekkeplanenes skjæring med hverandre og overflaten.
- Volumet er udeformerbart.
- Intern brudd i fjellblokken kan ikke skje, dvs. at blokken ikke kan deles opp i mindre blokker.
- Kohesjon og strekkstryke er lik null langs kontaktplanene.
- Skjærstyrken langs planene er bare avhengig av friksjon, dvs. den effektive friksjonsvinkel.

For å bestemme hvorvidt en fjellblokk glir på ett eller to plan, vurderer man normalkraften på hvert enkelt av avgrensningsplanene. Hvis resultantvektoren av alle krefter som virker på blokken, har en komponent normalt og rettet mot et plan, vil blokken ha kontakt med dette planet ved glidning. Slik kontakt er en betingelse for at det kan mobiliseres skjærkrefter mot bevegelse. Hvis bare ett plan tilfredsstiller dette kriterium, glir blokken på ett plan, og hvis to plan tilfredsstiller dette kriterium glir blokken på to plan. Glidning langs tre plan er umulig ifølge forutsetningene for stivblokkmetoden.

## 3. UTFØRTE BEREGNINGER

Sikkerhetsfaktorer (se vedlegg 3 og 4) for hvert av vederlagene er beregnet ut fra to forskjellige tilstander vedrørende sprekkevannstrykk. Ved drenert tilstand antar man 1/3 av fullt vanntrykk på sprekkeplanene langs damaksen nedstrøms dammen, lineært avtagende til 0 langs fjelloverflaten. Ved udrenert tilstand antar man fullt vanntrykk på sprekkeplanene nedstrøms for dammen lineært avtagende til 0 langs fjelloverflaten.

GRØNER
RÅDGIVENDE INGENIØRER

VASSDRAGSREGULANTENES FORENING

TEKNISK SEKTOR

TEKNISK MEDLEMSMØTE 1988

KRISTIANSAND 1-2. MARS 1988

# FUNDAMENTSTABILITET VED VÅRE STORE HVELVDAMMER

Forfatter:
Amund Gaut
Ingenior Chr. F. Groner A.S.

GRØNER
RÅDGIVENDE INGENIØRER

## FUNDAMENTSTABILITET VED VÅRE STORE HVELVDAMMER

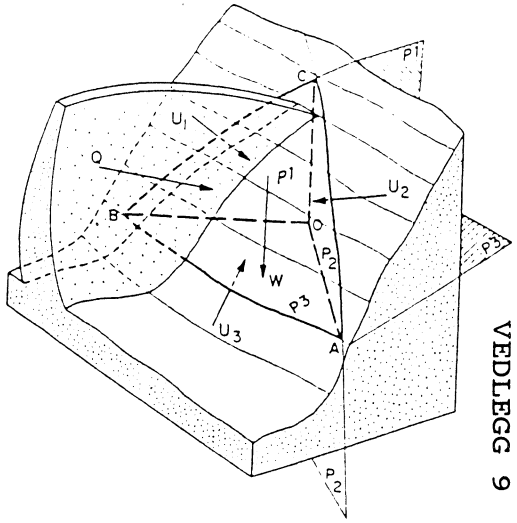
Hvelvdammer i Norge er fundamentert på bergarter med høy fasthet i forhold til de spenninger som forårsakes av damkreftene. Den sterke overflateerosjonen under Kvartærtidens istider har hos oss effektivt fjernet de mange meter med dypforvitret fjell som en vanligvis finner på sydligere breddegrader. Selve bergartstypene er også gunstige med tanke på fundamenteringsarbeider, idet porøse lava- eller sedimentbergarter forekommer forholdsvis sjelden. Dypbergarter, gneiser og høymetamorfe sedimenter dominerer de fleste steder i landet.

På dette grunnlag har dambyggere i Norge i utgangspunktet hatt en relativt enkel fundamenteringsjobb, og den ingeniørgeolgiske dokumentasjonen for hvelvfundamentenes stabiltet har i de fleste tilfelle vært begrenset til en enkel geologisk befaringsrapport.

De fleste fjellvederlagene er imidlertid gjennomsatt av ett eller flere sprekkeplan, slik at bergmassen ofte er delt opp i blokker. Fastkilte blokker uten bevegelsesmulighet har liten betydning for stabiliteten, men ved en del damsteder er topografi og sprekkeretninger slik at det finnes blokker som kan gli ut. Blokkene utsettes for damkrefter, gravitasjonskrefter og sprekkevannstrykk. Stabiliteten avgjøres av friksjonen på det eller de sprekkeplan som blokken eventuelt vil gli på. En prinsippskisse for kreftene som virker på en slik glideblokk, er vist i fig. 1.

Fig. 1 Krefter som virker på stabiliteten av en mulig blokk. Figuren er gjengitt etter P. Londe (1973).

$P_{1-3}$ : Glideplan som avgrenser blokken
$U_{1-3}$ : Vanntrykk på planene $P_{1-3}$
Q : Overføringskrefter fra dammen
W : Tyngden av blokken




VEDLEGG 9

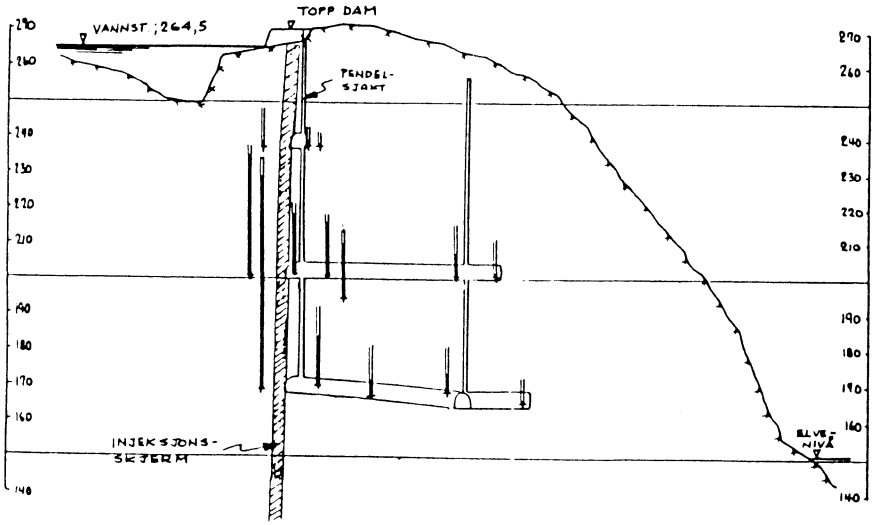
På den tiden da de fleste hvelvdammene i Norge ble prosjektert, kjente man ikke det teoretiske grunnlaget for en stabilitetsberegning av slike blokker. Derfor er det bare i unntakstilfelle foretatt noen nøyaktig oppmåling av sprekkesystemene i vederlagene, og de parametre som er avgjørende for friksjonen på sprekkeplanene, er ikke detaljert vurdert. En nærmere undersøkelse av disse forhold, med etterfølgende beregning av stabiliteten for mulige glideblokker, er hovedinnholdet i denne undersøkelsen.

Ved vurderinger av en fjellblokksstabilitet vil det være relativt greit å beregne gravitasjonskreftene og overføringskreftene fra hvelvdammen. Vanskeligere er det å forutsi sprekkevannstrykket og friksjonen på sprekkeplanene.

For vann i en hvelvdams fjellvederlag gjelder at det samlede hydrauliske potensial vil avta utover og nedover i vederlaget. Fordi permeabiliteten i fjell er liten, vil potensialet, og derved også vanntrykket som er en del av potensialet, avta svært rakst. Forholdet kan være anderledes hvis de ytre deler av vederlaget er tettere enn de innerste, men fordi de fleste sprekker i fjell er mest åpne ut mot overflaten, vil de ytre deler av et fjellvederlag oftest ha en gunstig drenering. Høyt sprekkevannstrykk vil derfor sjelden oppstå. En injeksjonsskjerm ved damfoten vil ytterligere redusere permeabiliteten og derved også vanntrykket i vederlaget.

Nøyaktige målinger foretatt ved oppfyllingen av Virdnejavri-dammen i Alta bekrefter antagelsen om at vanntrykket gjennomgående er meget lavt. Dette er illustrert i fig. 2.

Fig. 2 Lengdesnitt av vestre vederlag for Virdnejavri-dammen. Vanntrykket i målepunkter er angitt som trykkhøyde. Gjengitt etter P.M. Johansen (1987).








For dammene i denne undersøkelsen har vi ikke hatt anledning til å gjennomføre direkte vanntrykksmålinger, og vi har i stedet gjort beregninger for to teoretiske alternativer:

a) at vanntrykket rett nedstrøms dammen tilsvarer trykkhøyden i magasinet og
b) at vanntrykket rett nedstrøms dammen tilsvarer 1/3 av trykkhøyden i magasinet.

Det forutsettes så at vanntrykket avtar til 0 langs det aktuelle sprekkeplans utgående i vederlaget. I begge tilfelle vil vanntrykket være betydelig høyere enn hva som er observert ved Virdnejavri-dammen, men det må påpekes at ikke alle de eldre dammene har tilsvarende injeksjonsskjerm og drenasjesystemer.

Den andre hovedusikkerheten i regnestykket ligger i utformingen av sprekkene. Fra overflaten kan det være vanskelig å avgjøre både om en sprekk setter igjennom hele vederlaget, og ikke minst hvordan friksjonsforholdene er inne i fjellet. Vi har i praksis gått ut fra at tilsynelatende store sprekker er gjennomsettende, og friksjonskraften beregnes som en syntese av flere friksjonsparametre etter nedenstående ligning (Barton og Choubey 1978).

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right]$$

$\tau$ = maksimal skjærstyrke
$\sigma_n$ effektiv normalspenning
JRS = ruhetskoeffisient
JCS = sprekkeflatens enaksiale trykkstyrke
$\phi_b$ = friksjonsvinkel for uforvitret, plan flate av den aktuelle bergart (basic friction angle).

JRS, ruhetskoefisienten, anslås etter observasjoner av sprekkeflatene i felt. Nærmere retningslinjer for dette er angitt av Barton og Choubey (1978), men mye må likevel baseres på skjønn. JCS måles med prellhammer. Tabeller for $\phi_b$ finnes i forskjellige litteraturreferanser, men også disse verdiene må justeres etter et visst skjønn.

På grunnlag av de krefter en har kommet frem til, kan det så foretas en stabilitetsberegning av den eller de fjellblokkene som er aktuelle. Stabiliteten kan angis ved en beregnet sikkerhetsfaktor. Sikkerhetsfaktoren angir hvor mange ganger større friksjonskreftene er enn de drivende krefter. Dvs. at faktoren blir 1,0 når disse kreftene er like, og en stabilitetsfaktor på under 1,0 skulle indikere en viss ustabilitet. De usikkerheter som ligger i vurderingen av vanntrykk og friksjonskrefter medfører imidlertid at den beregnede sikkerhetsfaktor gir et sterkt forenklet bilde av forholdene. Den må derfor kun oppfattes som en indikasjon, et viktig ledd i en samlet vurdering av stabiliteten.

For å beregne blokkvolum, sprekkeareal og vanntrykksforhold har vi benyttet en databasert terrengmodell, Thermos, og DAK-systemet Prime Medusa. Slik EDB-bruk effektiviserer og øker nøyaktigheten i beregningene.

Ingeniør Chr. F. Grøner A.S. har lagt opp undersøkelsen etter en modell med 3 faser:

1. En vurdering av om det finnes sprekkesett som avgrenser blokker slik at disse kan gli ut.

2. En beregning av sikkerhetsfaktoren for slike blokker der de finnes, med tilhørende stabilitetsvurdering.

3. Planlegging av tiltak for å bedre stabiliteten i de tilfelle det anses nødvendig.

Vår andel av undersøkelsen har omfattet 14 dammer med i alt 28 vederlag. Vi har funnet behov for å beregne en sikkerhetsfaktor for i alt 6 av disse vederlagene. For de siste 3 dammene har en så vidt vites ikke funnet behov for detaljerte stabilitetsberegninger.

For de 6 vederlagene har vi funnet sikkerhetsfaktorer som varierer mellom 0,9 og 7,0 når en regner det maksimale vanntrykk for å være 1/3 av trykkhøyden i magasinet, og variasjoner fra 0,2 til 6,2 når vi regner med fullt vanntrykk rett nedstrøms dammen. Når enkelte av disse sikkerhetsfaktorene synes svært lave, må det påpekes at en i tvilstilfelle alltid har valgt de minst gunstige tallene i beregningen.

For én av dammene synes det nødvendig å gjøre tiltak i fase 3. For en annen med lav sikkerhetsfaktor vil vi først kontrollere om de avgjørende sprekkene virkelig er gjennomsettende på oppstrømsside av vederlaget. Dette vil bli gjort ved nedtappet magasin våren 1988.

Tiltak for å bedre stabiliteten vil først og fremst være rettet mot å redusere vanntrykket på sprekkeflatene. Stikkord for slikt arbeid vil være injeksjon og drenering. De andre faktorene, gravitasjonskraft, damkrefter og friksjon, kan en gjøre lite for å endre. Det må imidlertid påpekes at injeksjon i visse tilfelle kan ha negativ effekt på friksjonsforholdene.

Undersøkelsen har også vist at det er grunn til å være spesielt oppmerksom på den erosjon som oppstår der dammens overløp går over det ene eller begge vederlag. Dette kan medføre at til dels store fjellblokker løsner, slik at vederlaget blir generelt svekket. For én av dammene har vi anbefalt at en etablerer målebolter for å kontrollere om en etter hvert får øket oppsprekking. For en annen dam bør det også slik situasjonen nå er, foretas arbeider for å hindre utrasing av blokker.





GRØNER
RÅDGIVENDE INGENIØRER

I tillegg til de 6 vederlag hvor sikkerhetsfaktor er beregnet, er det også noen få andre hvor sprekkesystemene er slik at blokker teoretisk sett kan gli ut. Erfaringene fra de 6 beregningene tilsier imidlertid at en sikkerhetsfaktor her vil bli svært stor, enten på grunn av sprekkenes orientering eller de potensielle glideblokkenes store dimensjoner. I disse tilfelle anses beregningen derfor ikke for å være nødvendig.

Som en konklusjon må det kunne sies at hvelvdamfundamentene gjennomgående har stor sikkerhet mot utglidning, men også at enkelte dammer kunne vært formet anderledes hvis en hadde hatt mer detaljert kunnskap om stabilitetsberegninger da de ble prosjektert.

En har gjennom undersøkelsen ikke kommet frem til spesielle bergartstyper eller andre naturforhold hvor en generelt kan si at fundamentstabiliteten vil være dårlig. Kanskje skal en være spesielt oppmerksom på bergarter med en velutviklet planskifrighet, spesielt der skifrighetsplanet er flattliggende eller har fall ut mot fjellkløften som en ofte finner nedenfor en hvelvdam. I slike tilfelle vil minst ett mulig glideplan alltid være tilstede. Konklusjonen må likevel bli at det alltid vil være behov for en geologisk vurdering for å klarlegge hvilke sprekkeplan som reelt forekommer.

Sandvika, den 11. februar 1988

Amund Gaut

Amund Gaut

**REFERANSER:**

**Barton, N. og Choubey, V. (1978)** : The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, NGI-publikasjon nr. 119, 1978.

**Johansen, P.M. (1987)** : Vederlag for Alta-dammen. Måleresultater fra første gangs oppfylling. Fjellsprengningsteknikk, Bergmekanikk/-Geoteknikk, 1987, s. 34.1 - 34.9.

**Londe, P. (1973)** : Analysis of the stability of rockslopes, Q.Jl Engng Geol. Vol. 6, 1973, s. 93-127.

# STABILITETSBEREGNING AV FUNDAMENT FOR 15 NORSKE HVELVDAMMER
# FOUNDATION STABILITY ANALYSIS FOR 15 NORWEGIAN ARC DAMS

Siv.ing. G. Birgisson,
Ingeniør Chr. F. Grøner A.S.

Siv.ing. J.K.G. Rohde,
Ingeniør Chr. F. Grøner A.S.

## SAMMENDRAG

Det er utført stabilitetsberegninger av damfundamentene for ialt 15 norske hvelvdammer. Likevektsberegninger av bergblokker basert på gjennomgående sprekkeplan og sprekkefriksjon som stabiliserende kraft, har ved to av dammene gitt lave sikkerhetsfaktorer. Forøvrig er beregnet sikkerhetsfaktor tilfredsstillende.

Ved grundingere feltkartlegging ved en av dammene med lav sikkerhetsfaktor, er det imidlertid påvist at sprekkeplan er usammenhengende. Nye beregninger basert på 1% brudd i intakt berg gir tilfresstillende beregnet sikkerhetsfaktor.

## SUMMARY

Stability analysis of rock abutments for 15 Norwegian arc dams have in general revealed satisfying calculated safety factors.

The 3-D equilibrium rigid block analysis, based on pervasive rock discontinuities, and with friction as the only force resisting sliding, has resulted in low values of the factor of safety for two of the dams.

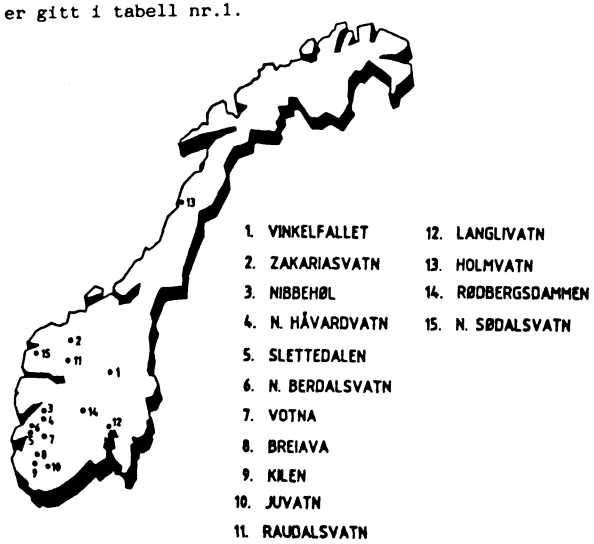
More detailed discontinuity survey for one of these dams has revealed that the potential sliding planes were unpervasive. By assuming only 1% fracture of intact rock bridges along the possible sliding planes the calculated factor of safety increases to a satisfying value.

## INNLEDNING

I de følgende avsnitt er det gitt en omtale av beregningsmetode og resultat for fundamentstabilitet for ialt 15 norske hvelvdammer.

VEDLEGG 10

Dammenes beliggenhet er vist på kartoversikt figur 1 og karakteristiske data er gitt i tabell nr.1.




Figur 1. Beliggenhet av dammer.

Tabell 1 - karakteristiske data for beregnede dammer.

Som eksempel er gitt en nærmere omtale av beregninger ved to av dammene, Dam Vinkelfallet og Dam Votna.

Stabilitetsberegninger for Dam Vinkelfallet ble utført under bygging av dammen, som følge av de nye damforskrifter av 1. januar 1981.

De øvrige 14 dammer er beregnet som et ledd i etterkontroll av fundamentstabilitet ved ialt 17 norske hvelvdammer med damhøyde over 30m.

## UNDERSØKELSESPROGRAM

Ved etterkontroll av fundamentstabilitet for de 14 dammene er undersøkelsene inndelt i følgende faser:

Fase I omfatter ingeniørgeologisk kartlegging med hovedvekt på sprekkesystem, svakhetssoner og eventuelle foliasjonsplan, klassifisering av sprekker mht. art og ruhet samt registrering av bergartenes trykkstyrke på sprekkeplan ved hjelp av prellammer. Lekkasjer evt. andre indikasjoner på poretrykk i bergmassene er registrert. Vurdering av mulige bruddmekanismer er foretatt på grunnlag av topografi og sprekkesystem. Samtlige av de 14 dammer er undersøkt i fase I.

Fase II omfatter stabilitetsberegninger av antatte bevegelige bergblokker basert på ingeniørgeologiske forhold rapportert fra fase I, damkrefter og hydrostatisk trykk. Fase II er gjennomført der mulig bruddmekanisme er identifisert.

Beregninger foretatt ved Dam Vinkelfallet tilsvarer fase II av dette programmet.

## BEREGNINGSMODELL

Beregningsmetoden er basert på en likevektsbetraktning av stive bergblokker, avgrenset av sprekkeplan (P1-Pn) og av naturlig terreng som vist på skissen i figur 2. Krefter som virker på den avgrensede bergblokk, er blokkens tyngde (W), vanntrykk U1-Un på avgrensningsplanene samt overføringskrefter fra dammen (Q).

Som stabiliserende krefter virker de skjærkrefter som mobiliseres langs et eller flere av avgrensningsplanene. Skjærstyrken er avhengig av sprekkeplanenes ruhet, fyllingsmateriale, trykkstyrke og kontaktarealet mellom sprekkeplan.

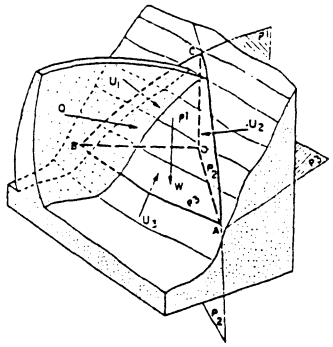


Fig. 2. Likevektsbetraktning av bergblokk

Som grunnlag for analysen bestemmes følgende:

- Orientering av aktuelle avgrensende sprekkeplan
- Glideblokkens tyngde
- Vanntrykk på blokkens avgrensende sprekkeplan
- Overføringskrefter fra dammen
- Skjærparametre på aktuelle glideplan

Som forutsetninger for analysen legges følgende til grunn:

- Volum er udeformerbart
- Intern brudd i bergblokken kan ikke skje, dvs. at blokken ikke kan deles opp i mindre blokker.

- Gjennomgående glideplan, dvs. ikke brudd i uoppsprukket berg og ren friksjon på sprekkeplan.

Ut ifra resultatvektorens retning og sprekkeplanenes orientering vurderes blokkenes mulige bevegelsesretning. Friksjonskrefter på glideplan beregnes.

Ved beregning av mobiliserbar skjærstyrke er følgende beregningsformel benyttet:

$$\tau = \sigma_n' \times \tan\left(JCR \times \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n'}\right) + \emptyset_r\right)$$

hvor:

$\tau$ = mobiliserbar skjærkraft
$\sigma_n'$ = effektiv normalspenning
JRC = sprekkeplanets ruhetskoeffisient
JCS = sprekkeplanets trykkstyrke
$\emptyset_r$ = friksjonsvinkel på sprekkeplan (residual).

For disse parametre gjelder følgende:

$\sigma_n'$ - effektiv normalspenning - avtar med økende sprekkevannstrykk.

JRC - sprekkeplanets ruhetskoeffisient - gir uttrykk for ruhet på sprekkeplan og vurderes ut ifra geologiske feltobservasjoner. Variasjonsområdet er fra 0 for en glatt sprekk til 20 for en ru sprekk.

JCS - Sprekkeplanets trykkstyrke - er lik bergartens enaksiale trykkstyrke ( $\sigma_c$ ) for en uforvitret bergoverflate. JCS fastlegges på grunnlag av prellhammerforsøk i felten.

$\emptyset_r$ - residual friksjonsvinkel på sprekkeplan - fastlegges ut ifra basis friksjonsvinkel $\emptyset_b$ (gitt i tabeller for forskjellige bergarter) korrigert for forvitring på sprekkeplan. Friksjonsvinkelen er bl.a. avhengig av mineralsammensetning, forvitringsgrad og tidligere bevegelse på sprekkeplan. Forvitringsgrad bestemmes ved prellhammerforsøk utført i felten. Variasjonsområde for $\emptyset_b$ ligger normalt i størrelsesorden 25-35°. Ved uforvitrede sprekker benyttes $\emptyset_r$ lik $\emptyset_b$.

For nærmere omtale av formelgrunnlaget vises til publikasjon nr. 105 og 119 fra NGI samt diverse artikler og foredrag av N. Barton.

Sikkerhetsfaktoren beregnes som forholdet mellom summen av mobiliserbare skjærkrefter og summen av drivende krefter.

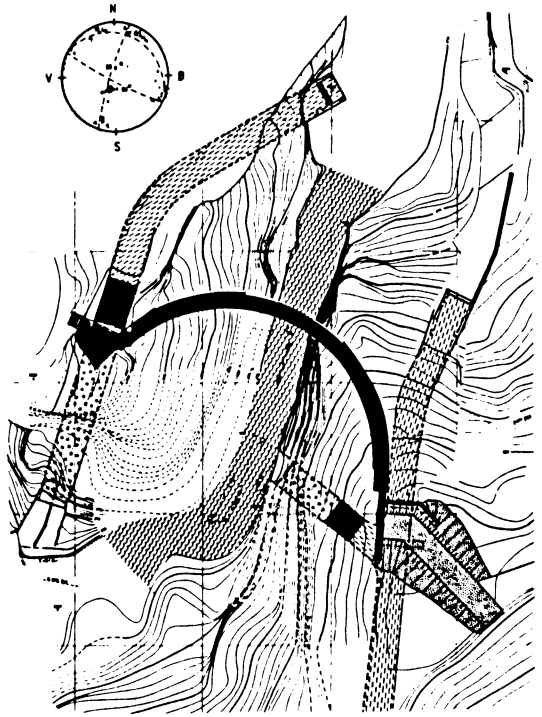
Sikkerhetsfaktorer for damvederlagene er beregnet ut ifra to forskjellige tilstander vedr. sprekkevannstrykk, drenert og udrenert. Ved drenert tilstand er antatt et maksimalt sprekkevannstrykk lik 1/3 av fullt vanntrykk, lineært avtagende til 0 ved bergoverflaten. Ved udrenert tilstand forutsettes sprekkevannstrykk lik fullt vanntrykk, lineært avtagende til 0 ved bergoverflaten.

**DAM VINKELFALLET**

**Orientering**

Dam Vinkelfallet er en hvelvdam i betong fundamentert på berggrunn. Fangdam ved dammens venstre (østre) vederlag, er en fyllingsdam som delvis er fundamentert på løsmasser.

Dammens utforming og beliggenhet er vist i figur 3.




Figur 3. Dam vinkelfallet med tunnelsystem.

Damstedet er lokalisert ca 2 km nord for Ringebu sentrum i Gudbrandsdalen, i nedre del av elveleiet for Våla - en sideelv av Gudbrandsdalslågen.

Elven har ved damstedet erodert en dyp, trang slukt med bratte bergvegger. Slukten følger bergmassenes sprekkeplan vekselvis i nordsydlig og øst - vestlig retning. Denne karakteristiske knekkformen i ca. 90° vinkel har gitt området sitt navn.

Dammens maksimale høyde er 35m og lengde målt langs damkrone er ca. 90m inkl. fangdam.

Dammen var ferdig bygget i 1983.

## Grunnforhold

Bergarten i området består av lagdelt sandstein av eokambrisk alder, tilhørende Sparagmittformasjonen. Bergarten har øst - vestlig strøk og faller med ca. 15 - 25$^g$ mot nord. Bergmassene er tildels oppsprukne og stedvis forvitret, spesielt i overflaten (dagfjellssonen).

Tre sprekkesett er registrert i damområdet:

**Sprekkesett I** Øst - vestlig strøk med fall ca 15 - 20$^g$ mot nord (parallelt lagdelingen). Sprekkene er bølgete med middels ruhet. Skifrige lag med tynt, forvitret belegg forekommer. Antatte parametre ved beregning er JRC lik 10, JCS lik 70 MPa og $Ø_r$ lik 27°.

**Sprekkesett II** Øst - vestlig strøk med fall 80 - 90$^g$ mot syd. Sprekkene er diskontinuerlige og lite gjennomsettende med middels ruhet. Antatte parametre ved beregningen er JRC lik 15, JCS lik 100 MPa og $Ø_r$ lik 27°.

**Sprekkesett III** Nord - sydlig strøk med fall 80 - 90$^g$ mot vest. Sprekkene er kontinuerlige og gjennomsettende, tildels åpne med liten ruhet. Antatte parametre ved beregingen er JRC lik 5, JCS lik 70 MPa og $Ø_r$ lik 27°.

Sprekkesettene er representert i stereografisk projeksjon i figur 3.

## Stabilitetsberegninger

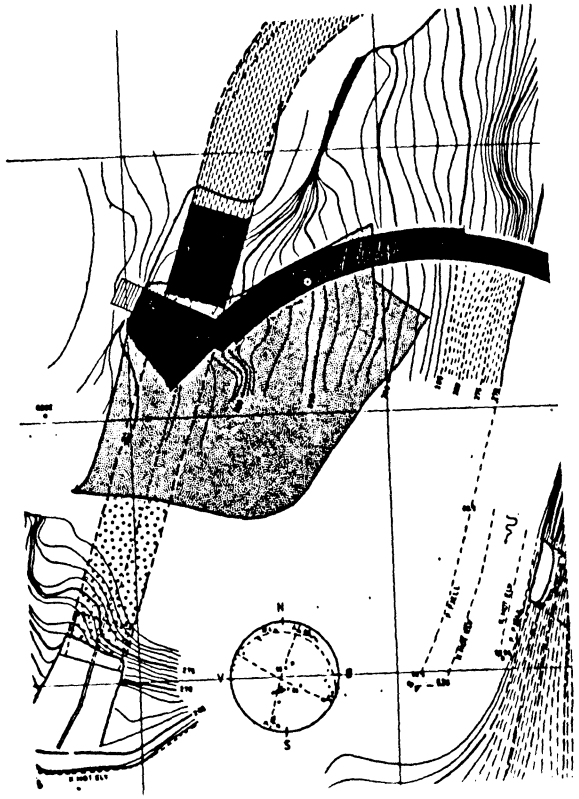
Den mest ugunstige kombinasjon av topografi og bergmassenes sprekkeplan er funnet ved dammens høyre vederlag (vestside) hvor terrenget faller meget bratt ned mot elven i en sydvendt skråning ca. 7 - 8m nedstrøms for damvederlaget. En mulig bevegelse av bergblokk avgrenset av de tre sprekkesett kan her foregå ut mot dalføret langs sprekkeplan I og II. Bergblokk med avgrensninger er vist på figur 4.

En tilsvarende mulig bruddmekanisme er ikke funnet ved dammens venstre (østre) vederlag.

Stabilitetsberegningene har gitt en sikkerhet mot utglidning i størrelseorden 3,2 - 4,0 ved hhv. udrenert og drenert tilstand.

## Tiltak og observasjoner

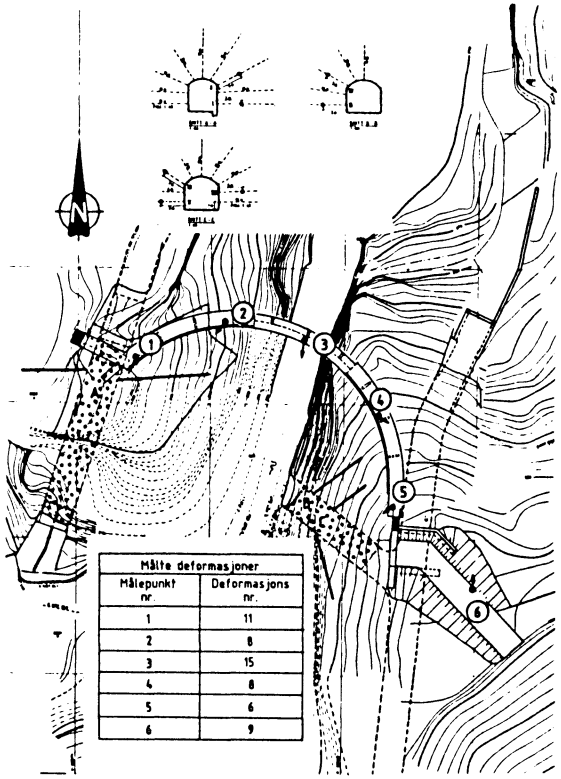
Ved damstedet er det utført tildels omfattende injeksjonsarbeider for å begrense lekkasje under damfundamentet. Denne injeksjonen bidrar til å begrense risiko for oppbygging av poretrykk nedstrøms for dammen. Ved siden av injeksjon, er det drevet separat tverrstoll for drenasje av dammens venstre vederlag. Omløpstunnelen fungerer som drenasjetunnel ved dammens høyre damvederlag. I tunnelene er det boret drenasjehull samt hull for installasjon av poretrykksmålere. Drenerte deler av tunnelsystemet, plassering av drenasjehull, poretrykksmålere og målebolter fremgår av figur 5.



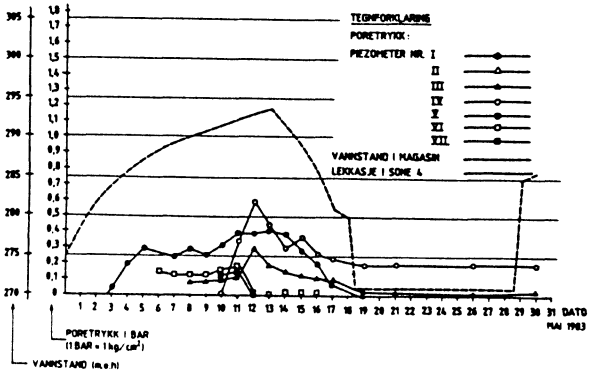

Figur 4. Bergblokk med avgrensningsplan.

Poretrykk i damfundamentet ble avlest ved første gangs oppfylling av magasinet og de første driftsår ved anlegget. I tillegg er deformasjonsmålinger foretatt 1 gang pr. år. Resultat av poretrykk og deformasjonsmålinger er fremstilt i figur 5 og 6.

Poretrykksmålinger i målerne III, IV og V viser en variasjon som korresponderer med vannstand i magasinet, mens reaksjoner i de øvrige målere er liten og tildels tilfeldig. Tilfeldige variasjoner kan ha forbindelse med nedbør evt. avsmelting i området. De målte sprekkevannstrykk ligger lavere enn vanntrykk tilsvarende hydrostatisk trykklinje fra dam til bergoverflaten.




Figur 5. Drenasjesystem, poretrykksmålere og målebolter.



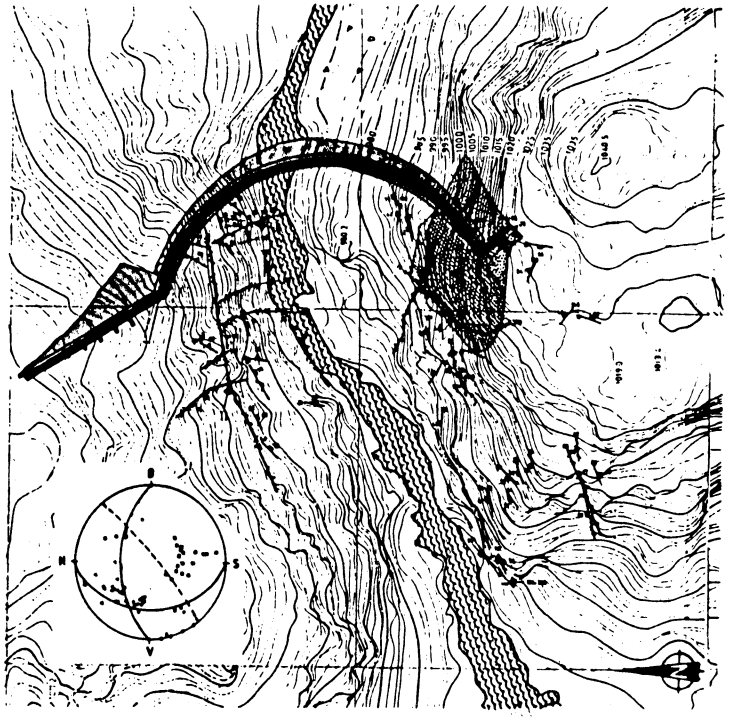

Figur 6. Poretrykks- og vannstandsobservasjoner ved første gangs oppfylling.

DAM VOTNA

## Orientering

Dam Votna er en del av Novle Kraftverk, vest for Haukelifjell ved Røldal. Dammen fungerer som en regulerings- og inntaksdam.

Dammens utforming og beliggenhet er vist på figur 7. Dammen er en ca. 52m høy dobbeltkrommet hvelvdam med kronelengde ca 142m.




Figur 7. Dam Votna.

Hvelvet er ved dammens høyre side avsluttet med en massivdam mot berg. Ved dammens venstre side er dammen avsluttet med en platedam.

Dammen ble bygget i 1964 - 66.

## Grunnforhold

Berggrunnen ved Dam Votna består av metavulkanske bergarter av prekambrisk alder, sannsynligvis tilhørende Telemarksuiten. Bergmasser ved høyre damvederlag består for det meste av metabasalter, mens bergmasser ved venstre vederlag består av metarhyolitt.

Bergartene antas å være påvirket av skyvebevegelser idet de ligger like under det kaledonske skyvedekket. Ifølge det geologiske kart følger en regional forkastningssone langs kløften ved dammen. Den kan ha bidratt til økt oppsprekking og knusning i området. Metarhyolitten synes generelt å være lite forvitret og ha relativt gode mekaniske egenskaper sammenlignet med metabasalten.

Den primære lagstillingen i bergartene har strøkretning ca. N 160° og steilt fall mot nordøst. Lagdelingen er imidlertid lite fremtredende, mens bergartene har en markert foliasjon i NS-retning med fall mot vest.

Fire sprekkesett er registrert i damområdet samt en sleppesone i venstre vederlag:

Sprekkesett A: Sprekkesett parallelt bergartens sekundære skifrighetsplan med NNØ-lig strøk og fall mot øst. Plane sprekkeflater med noe glimmerbelegg.

Sprekkesett B: Regionalt sprekkesett med strøkretning mot NØ og fall mot SØ. Sprekkene er kontinuerlige og gjennomsettende over store avstander uten fyllingsmateriell.

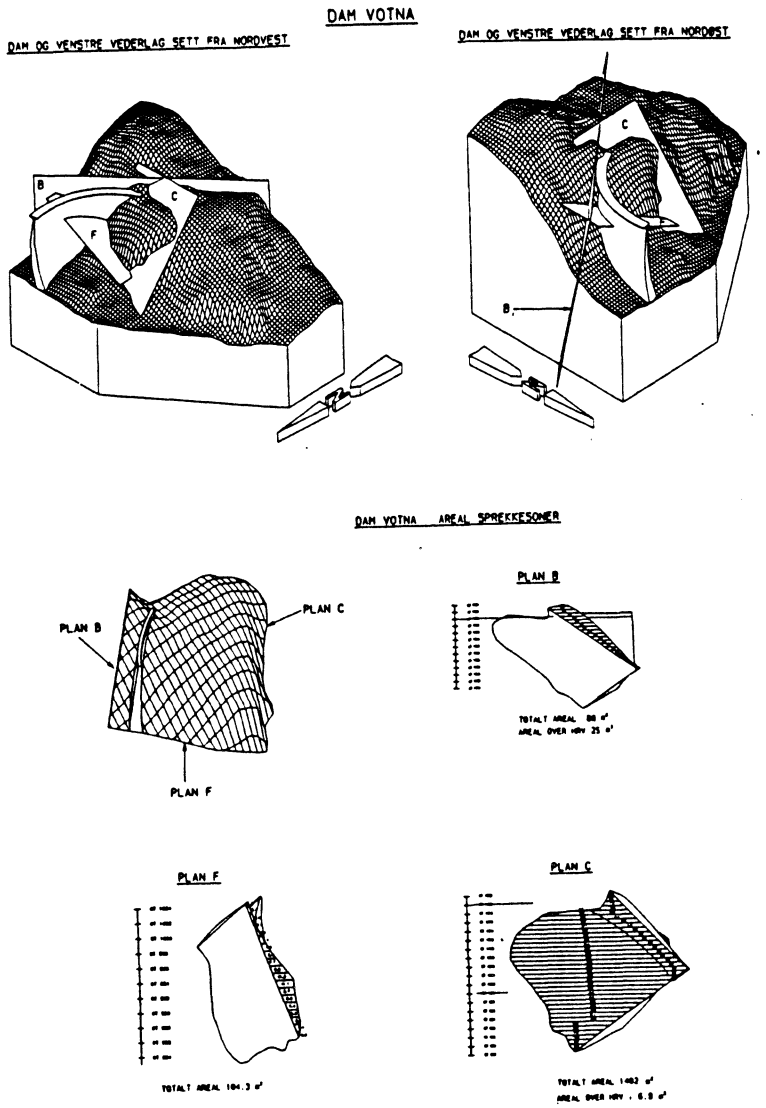
Sprekkesett C: Regionalt sprekkesett med strøkretning NØ til SØ og fall mot NV eller NØ. Sprekkene er diskontinuerlige og lite gjennomsettende. De fleste sprekkefalter er glatte, ofte bølgende eller krumme. (Utglidning av blokker langs slike flater vil kunne være betinget av brudd i fast fjell). Noe omvandlingsmateriell på enkelte spekter.

Antatte spekterparametre for glideplan er JRC lik 10, JCS lik 150 MPa og $Ø_r$ lik 30°.

Sprekkesett D: Steile sprekker med strøkretning S eller SØ og fall mot NØ eller SV. Plane sprekkeflater ofte med forskifring av bergartene nær sprekker.

Sprekkesett F: Sleppesone med noe usikker retning og 30° fall mot vest. Antatt friksjonsvinkel for sleppesone er $Ø_r$ lik 22°

Oppsprekningsmønsteret i vederlagene er vist i stereografisk projeksjon på figur 7.




Figur 8. Bergblokk med avgrensningsplan.

## Stabilitetsberegninger

Beregningene er utført på en mulig glideblokk i venstre vederlag.

Den aktuelle glideblokk avgrenses av sprekkeplan C (100°/56°N) og F (0°/30°V) nedstrøms dammen og sprekkeplan B (55°/88° SØ) oppstrøms dammen (se figur 8):

Ved beregning av blokkenes volum og sprekkeplanenes areal er det benyttet en databasert terrengmodell (TERMOS).

Beregningene viser at blokken kan bevege seg langs sprekkeplan. C, mens plan F og B vil åpne seg ved bevegelse. Mobiliserbar skjærkraft på C-planet vil motvirke blokkens glidning.

Sikkerhetsfaktor for glideblokken basert på gjennomgående avgrensningsplan og ren friksjon er beregnet lik 1,1 og 0,5 for henholdsvis drenert og udrenert vanntrykk på sprekkeplanene og basis friksjonsvinkel Øb lik 30 grader for sprekkeplan C.

Det er foretatt ny befaring ved damstedet ved nedtappet magasin hvor vegfylling ved damvederlag var fjernet for å kunne vurdere sprekkeplans utholdenhet. Ved befaringen fremkom at mulige glideplan (plan C) ikke var en sammenhengende sprekk, men besto av flere parallelle og tildels usammenhengende flater.

Nye beregninger, foretatt på bakgrunn av disse observasjoner og antatt brudd i fast berg på 1 % av sprekkeflatens areal, har gitt en sikkerhetsfaktor på hhv. 3.1 og 2.4 for drenert og udrenert tilstand.

## SLUTTBEMERKNINGER

Observasjoner mht. porevannstrykk, lekkasjeforhold og deformasjoner ved Dam Vinkelfallet ble foretatt ved første gangs oppfylling av magasin. Innmåling av målebolter foretas rutinemessig 1 g. pr. år. Resultatenes størrelsesorden er tilfredstillende, og de beregnede sikkerhetsfaktorer ligger på et betryggende nivå.

For de øvrige 14 dammene er Fase I ferdig og Fase II- undersøkelse med en forenklet stabilitetsberegning er utført for 5 av disse dammene.

Foruten ved Dam Votna, har beregninger basert på gjennomomgående sprekkeplan og ren friksjon gitt en lav sikkerhetsfaktor ved Dam Langlivatn.

En grundigere vurdering av poretrykk, volum av blokk, sprekkenes utholdenhet og sprekkeparametre, dvs ruhet og bergartens trykkstyrke ved Langlivatn er under utførelse.

Eksemplet fra Dam Votna viser at de forenklede forutsetninger som legges til grunn ved beregninger i fase II (med bl. a. gjennomgående glideplan), er relativt konservativ. En beskjeden økning i andel brudd i friskt berg på 1% ga her en økning i den beregnede sikkerhetsfaktor på fra hhv 0,5 og 1,1 ved udrenert/ drenert tilstand til hhv. 2.4 og 3.1.

## REFERANSER


Barton, N. 1974: A review of the Shear Strength of Filled Discontinuities in Rock, NGI Publikasjon nr. 105, Oslo.

Barton, N. and Choubey, V. 1977: The Shear Strength og Rock Joints in Theory and Practice. Rock mechanics 10, s. 1-54.

Brown, E.T. (ed) 1981: Rock Characterization, testing and monitoring. ISRM suggested methods, Oxford, 211 s.

Huek, E. and Bray, J.W. 1974: Rock Slope engineering. Inst. mining and metallurgy, London, 358 s.

Londe, P. 1973: Analysis of the stability of rock slopes. Q. Jl. Engineering Geology, Vol. 6.

Londe, P. 1973: Rock mechanics and dam foundation design. ICOLD, Paris, 101 s.

Londe, P., Vigier, G. and Vormeringer, R. 1969: Stability of Rock Slopes. A three-dimensional study. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 95, No. SM1, s. 235-262.

Nilsen, B. 1979: Stabilitet av høye fjellskjæringer. Rep. 11, Geol. Inst., NTH, Trondheim.


./.

Tabell 1

| DAM | BELIGGENHET | KRAFTSELSKAP | DAMHØYDE | FERDIG BYGGET | BERGGRUNN |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. VINKELFALLET | Oppland | Mid-Gudbrandsdal Elektrisitetsverk | 35 m | 1983 | Sandstein |
| 2. ZAKARIASVATN | Møre og Romsdal | Tafjord Kraftselskap | 95 m | 1969 | Båndet gneis |
| 3. NIBBEHØL | Hordaland | A/S Tyssefaldene | 35,5 m | 1966 | " |
| 4. N. HÅVARDSVATN | " | Statkraftverkene | 43 m | 1974 | Fyllitt |
| 5. SLETTEDALEN | Rogaland | Saudefaldene | 75 m | 1951 | Foldet gneis |
| 6. N. BERDALSVATN | " | " | ca. 30 m | 1954 | Granittisk gneis |
| 7. VOTNA | Hordaland | Røldal-Suldal Kraft A/S | 51 m | 1967 | Metabasalt- og Metarhyolitt |
| 8. BREIVA | Rogaland | Lyse Kraft | 53 m | 1964 | Granitt og gneis |
| 9. KILEN | Vest Agder | Sira-Kvina Kraftselskap | 36 m | 1970 | Båndet granittisk gneis |
| 10. JUVATN | " | Vest-Agder Elektrisitetsverk | 46 m | 1958 | Granittisk gneis |
| 11. RAUDALSVATN | Oppland | Glommen og Laagens Brukseierforening | 40 m | 1952 | Peridotitt |
| 12. LANGLIVATN | Nordmarka | Oslo Vann- og avløpsverk | 45 m | 1941 | Monzonitt |
| 13. HOLMVATN | Nordland | Helgeland Kraftlag | 30 m | 1971 | Glimmerskifer |
| 14. RØDBERGSDAMMEN | Buskerud | Statkraftverkene | 25 m | 1946 | Amfibolitt |
| 15. N. SØDALSVATN | Sogn og Fjordane | Sogn og Fjordane Energiverk | 39 m | 1973 | Sandstein |

## RESULTATENE FRA UNDERSØKELSEN

| DAM | FASE 1<br>rapportdato/konklusjon | FASE 2<br>rapportdato/konklusjon | FASE 3<br>rapportdato/konklusjon |
|---|---|---|---|
| Dam Holmvatn | 30.06.87/ "Det er ikke påvist noen sprekkesett som kan gi mulighet for utglidning av blokker. Detaljert beregning av en sikkerhetskoeffisient anses ikke å være nødvendig." | | |
| Heggsetdammen | 21.11.88/ "Vi kan ikke se at det finnes mulighet for utglidning, uheldig poretrykksoppbygging e.l. som kan sette fundamentstabiliteten i fare. Det anses derfor ikke nødvendig med videre undersøkelser, vurderinger eller analyser for holdbarheten av fundamentene." | | |
| Dam Zakariasvatn | 10.04.87/ "Det er påvist to kombinasjoner av sprekkesett som kan gi mulighet for utglidning av blokker. Ut fra en skjønnsmessig vurdering anses sikkerheten mot utgliding å være høy. Detaljert beregning av en sikkerhetskoffisient anses ikke å være nødvendig." | | |
| Dam Sodalsvatn | 08.05.87/ "Det er påvist to kombinasjoner av sprekkesett som kan gi mulighet for utglidning av blokker. Ut fra en skjønnsmessig vurdering anses sikkerheten mot utglidning å være høy. Likevel anbefales beregning av en sikkerhetsfaktor som grunnlag for en endelig stabilitetsvurdering." | 23.05.90 (brev)/ "Dam Nedre Sodalsvann var blant de dammene som etter første undersøkelse ble anbefalt beregningsmessig kontroll. Dam Nedre Sødalsvann ble tatt med fordi det i venstre damvederlag var påvist sprekkesett som kan gi mulighet for utglidning. Stabiliteten ble imidlertid antatt å være høy, og at det ville være tilstrekkelig med en forenklet beregning.<br><br>Dam Nedre Sødalsvann skiller seg derfor ut fra de andre dammene hvor vi anbefalte en mer grundig beregningsmessig kontroll. Når vi nå har kontrollert disse dammene finner vi det ikke nødvendig med mer undersøkelse av Nedre Sødalsvann. Den vurderes til å ha en bedre stabilitet enn dammer hvor beregningene viser høye sikkerhetsfaktorer.<br><br>Vi anbefaler derfor at det ikke utføres noen stabilitetsberegninger av Dam Nedre Sødalsvann." | |

| | | |
|---|---|---|
| Dam Nibbehøl | 12.06.87/ "I begge vederlag er det påvist kombinasjoner av sprekkesett som kan gi mulighet for utglidning av blokker langs sprekkeplan. Det anbefales å gjennomføre en stabilitetsberegning som grunnlag for en endelig sikkerhetsvurdering. Det synes som om en forenklet overslagsregning vil gi størst sikkerhetsfaktor for venstre vederlag. Det kan derfor vise seg tilstrekkelig å utføre stabilitetsberegningen for høyre vederlag." | 10.05.88/ "Beregningene er utført på en potensiell glideblokk i høyre vederlag.... Sikkerhetsfaktorer for vederlagene er beregnet ut fra to forskjellige tilstander vedrørende sprekkevannstrykk.... Beregnet sikkerhetsfaktor for glideblokken er 4,1 og 2,4 for henholdsvis drenert- og udrenert vanntrykk på glideplan. Vi anser stabiliteten av dammen som tilfredsstillende. Det er ikke nødvendig med ytterligere undersøkelser i Fase III." |
| Dam Nedre Håvardsvatn | 12.06.87/ "I venstre vederlag er det påvist ett sprekkeplan som kan gi mulighet for utglidning av en blokk. Ut fra en skjønnsmessig vurdering anses sikkerheten mot utglidning å være høy. Detaljert beregning av en sikkerhetsfaktor anses ikke å være nødvendig." | |
| Dam Rødberg | 30.06.87/ "I venstre vederlag kan man påvise kombinasjoner av sprekkesett som kan gi mulighet for utglidning av blokker. Hvis det under befaring ved nedtappet magasin blir bekreftet at steile sprekker på oppstrømssiden av dammen er gjennomgående, anbefales beregning av sikkerhetsfaktor som grunnlag for en endelig stabilitetsberegning." | 02.12.88/ "Beregningene er utført på en potensiell glideblokk i venstre vederlag... Sikkerhetsfaktorer for glideblokken er beregnet ut fra to forskjellige tilstander vedrørende sprekkevannstrykk.... Beregnet sikkerhetsfaktor for glideblokken er 3,8 og 1,9 for henholdsvis drenert og udrenert vanntrykk på glideplanene.... Ut fra en totalvurdering anser vi stabiliteten av Rødbergdammen som tilfredsstillende." |
| Dam Myrtjørn | 16.07.86/ "Det sees ingen svakhetsplan som umiddelbart kan sies å ha betydning for fjellets stabilitet.... Det kan ikke sees noen oppsprekking eller tendens til glidning som står i forbindelse med de påkjenninger som dammen påfører fjellet. Det er ikke tegn til at poretrykket i sidefjellet har medført noen forringelse av stabiliteten. Det samme gjelder for frostsprenginger." | Strømme har foretatt stabilitetsberegninger selv om den geologiske undersøkelsen konkluderte med god stabilitet:<br><br>01.10.86/ "...sikkerheten mot dambrudd er høy.... Damsikkerheten som opprinnelig ble lagt til grunn ved beregning av damhvelvet er lik sikkerheten for hele damstedet." |
| Dam Slettedalen | 15.09.87/ "Under befaringene ble det ikke i noen av vederlagene påvist sprekkeplan som kan gi mulighet for utglidning av blokker slik at det kan få betydning for dammens stabilitet. Sikkerheten mot utglidning anses for å være høy. Detaljert beregning av en sikkerhetsfaktor for utglidning på sprekkeplan anses for å være unødvendig." | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Dam Nedre Berdalsvatn | 10.08.87/ "Under befaringene ble det ikke påvist sprekkeplan som kan gi mulighet for utglidning av blokker i noen av vederlagene. Sikkerheten mot utglidning anses for å være høy. Detaljert beregning av en sikkerhetsfaktor for utgliding på sprekkeplan er ikke aktuell." | | |
| Dam Votna | 12.06.87/ "I venstre (sydlige) vederlag er det påvist sprekker som kan gi mulighet for utglidning av blokker. Veifyllingen oppå vederlaget skjuler imidlertid eventuelle sprekker som ville kunne avgrense en glideblokk på oversiden. Det anbefales å utføre en stabilitetsberegning som om det forekommer ugunstige sprekker på dette stedet. Om man etter en slik beregning finner at stabiliteten er tilstrekkelig, vil man kunne unngå omfattende undersøkelser for å beskrive oppsprekkingen mer nøyaktig." | 10.05.88/ "Beregningene er utført på en potensiell glideblokk i venstre vederlag... Sikkerhetfaktorer for glideblokkene er beregnet ut fra 2 forskjellige tilstander vedrørende sprekkevannstrykk.... Beregnet sikkerhetsfaktorer for glideblokken er 1,1 og 0,5 for henholdsvis drenert og udrenert vanntrykk på sprekkplanene .... Vi anbefaler en nærmere undersøkelse i Fase III." | 22.12.88 (notat)/ "...24.08.88 foretok Grøner igjen en befaring hvor skjærplanets utholdenhet under løsmassene ble nærmere undersøkt. Resultatet av befaringen var at skjærplanet under løsmassene var usammenhengende. På grunnlag av dette ble det bestemt å utføre nye beregninger hvor det ble tatt hensyn til at deler av skjærplanet går gjennom intakt berg."<br><br>23.12.88 (brev)/ "Etter befaringen 24.08.88 angir vår geolog A. Gaut at det er fullt forsvarlig å regne med at minst 1% av bruddflaten vil gå gjennom intakt fjell. Beregningsnotatet viser da sikkerhetsfaktorer på minst 2,7 for udrenert fjell og minst 3,5 for drenert fjell. Vi konkluderer derfor med at dam Votna har tilstrekkelig stabilitet. Det er ikke behov for mer inngående undersøkelser eller tiltak for å bedre stabiliteten." |
| Dam Vierkvev | Berdal har foretatt beregning i samband med den geologiske kartlegging og vurdering. | 06.07.87/ "Med bakgrunn i at det er utført en konservativ beregning av opplagerkrefter og benyttet lave kohesjons- og friksjonsverdier på sprekkplanene, så er den beregnede sikkerhetsfaktor mot utglidning likevel tilfredsstillende høy. Selv om fjellforholdene ved vederlagene skulle være noe ugunstigere enn antatt, så burde hvelvdammen likevel ha tilstrekkelig sikkerhet mot utglidning. Forsterkende eller drenerende tiltak i damfundamentet anses derfor ikke nødvendig." | |
| Dam Breiava | 10.04.87/ "I venstre vederlag er det påvist sett av sprekker og knusningssoner som kan gi mulighet for utglidning av en blokk langs sprekkeplan. Det anbefales at en for dette vederlaget beregnes en sikkerhetsfaktor som grunnlag for endelig stabilitetsvurdering." | 10.05.88/ "Beregningene er utført på en potensiell glideblokk i venstre vederlager..... Sikkerhetsfaktorer for vederlagene er beregnet ut fra to forskjellige tilstander vedrørende sprekkevannstrykk. Beregnet sikkerhetsfaktorer for glideblokken er 7,0 og 6,2 for henholdsvis drenert og udrenert vanntrykk på sprekkeplanene....Vi anser stabiliteten av dammen som tilfredsstillende. Det er ikke nødvendig med ytterligere undersøkelser i Fase III." | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Dam Kilen | 12.06.87/ "I venstre vederlag er det ikke påvist sprekkekombinasjoner som kan gi mulighet for utglidning av blokker langs sprekkeplan. Under forutsetning av at det oppstrøms finnes sprekker på tvers av elvekløften, avgrenses hele høyre vederlag av sprekkesystemer. Det kan beregnes en sikkerhetsfaktor for dette vederlaget. En glidning i høyre vederlag betinger imidlertid en flytting av svært store fjellmasser. Sprekkene i underkant av blokken er bare middels eller dårlig utviklet. På dette grunnlag anslås stabiliteten skjønnsmessig for å være så stor at en beregning av sikkerhetsfaktoren ikke skulle være nødvendig." | | |
| Dam Juvatn | 14.07.87/ "Ingen av sprekkesystemene representerer i dag noen fare for dammens stabilitet, og beregning av en stabilitetsfaktor er ikke aktuelt. Det anbefales at man holder øye med en eventuell fremtidig utvikling av oppsprekkingen nær dammens venstre vederlag." | | |
| Dam Rauddalsvatn | 10.04.87/ "I begge vederlag er det påvist kombinasjoner av sprekkesett som kan gi mulighet for utglidning av blokker. Stabilitetsberegning bør gjennomføres for å angi en sikkerhetsfaktor som grunnlag for endelig stabilitetsvurdering." | 06.06.88/ "Beregningene er utført på to potensielle glideblokker i henholdsvis venstre og høyre vederlag.... Sikkerhetsfaktorer for hvert av vederlagene er beregnet ut fra to forskjellige tilstander vedrørende sprekkevannstrykk... Beregnet sikkerhetsfaktorer for glideblokken i venstre vederlag er 1,9 og 1,6 for henholdsvis drenert og udrenert vanntrykk på sprekkeplanene... Flere mulige glideblokker avgrenses av sprekkeplan i høyre vederlag. Den minste av dem er tatt i betraktning i beregningsanalysen. Beregnet sikkerhetsfaktor for glideblokken er 2,5 og 1,9 for henholdsvis drenert og udrenert vanntrykk på sprekke planene.... Ut fra en total vurdering anser vi stabiliteten av Rauddalsdammen som tilfredsstillende. Vi finner det ikke nødvendig med ytterligere undersøkelser i Fase III." | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Dam Langlivatn | 10.04.87/ "I høyre vederlag er det påvist flere kombinasjoner av sprekkesett som kan gi mulighet for utglidning av fjellblokker langs sprekkeplan. En nærmere stabilitetsberegning bør gjennomføres som grunnlag for en endelig stabilitetsvurdering. I venstre vederlag er det ikke påvist sprekkesett som kan gi grunnlag for slik utglidning. En nærmere undersøkelse av enkelte sterkt overdekkede deler av vederlaget er imidlertid ønskelig." | 10.05.88/ "Beregningene er utført på to potensielle glideblokker i høyre vederlag. Sikkerhetsfaktorer er beregnet ut fra to forskjellige tilstander vedrørende sprekkevannstrykk.... Beregningene viser sikkerhetsfaktorer for høyre vederlag på 0,2 og 0,9 for blokk 1 og 1,6 og 2,2 og blokk 2. .... sleppevanntrykksantakelsen som fører til F=0,2 er helt urealistisk for Langlia, da vi her under befaringen 29.10.87 kunne observere åpne sprekker uten vanntrykk.... vi anbefaler nærmere undersøkelser i Fase III" | 14.12.89/ "Beregningene er utført på en potensiell glideblokk i høyre vederlag.... Beregnet sikkerhetsfaktor for blokken er 1,9 og 1,0 for henholdsvis drenert og udrenert vanntrykk på sprekkeplanene. .... Vi konkluderer med at dam Langlivatn har tilfredsstillende sikkerhet. Det er observert åpne sprekker uten vanntrykk. Vi anser derfor vederlaget for å være drenert som forutsatt i beregningene.... Imidlertid er den beregnede sikkerhet lavere enn for andre dammer som er undersøkt på tilsvarende måte. Vi anbefaler derfor at dammen holdes under tilsyn etter nærmere avtale med Vassdragstilsynet." |

" 17. Per Einar Faugli (red.): FoU-program 1988-1992. (57 s.) 1988. Utgått

" 18. Vidar Nebdal Svendsen: Flomavledning ved dammer. Erfaringer fra oktoberflommen 1987. (24 s.) 1989.

" 19. V.N. Svendsen, E. Torblaa: Karbonatisering av betong, et problem på norske dammer? (21s.) 1989.

" 20. V.N. Svendsen, E. Torblaa: Alkali - tilslagreaksjoner i norske betongdammer. (33s.) 1989.

" 21. B. Jakobsen, T. Herfjord: A case study on optimal water management of small catchments, Aaros river in Norway. (20s.) 1989.

" 22. S. Homstvedt: Nedbørfelt i vassdragsregisteret. 1989. (kr. 250,-).

" 23. M. Flood, T. Jensen, H. Stensby, S. Norbom, J. Slapgård: Mulig vannkrafttilgang fram til år 2005. (77s.) 1989.

" 24. S. Homstvedt (red): Vassdragsregisterets kartbok (137s.) 1990. (kr. 1 100,-).

" 25. B. Jakobsen, T. Herfjord: Vannbruksplan for Årosvassdraget. (42s.) 1990.

" 26. P. E. Faugli: Vassdragsforskning mot år 2015. (234s) 1990.

" 27. G. Berg, P.E. Faugli (red): Etterundersøkelsesprogrammet-statusrapport. (89s.) 1990.

" 28. J.A. Eie, J. Brittain: Biotopjusteringsprogrammet-status 1988. (54s) 1990.

" 29. J. Brittain, J.A. Eie: Biotpjusteringsprogrammet-status 1989. (49s) 1990.

" 30. N.R. Sælthun, J. Bogen, M.H. Flood, T. Laumann, L.A. Roald, A.M. Tvede, B. Wold: Klimaendringer og vannressurser. (105s) 1990.

" 31. B. Andersen: Naturulykker, flom og skred. Samordning av innsats. Rapport fra arbeidsgruppe. (16s) 1990.

" 32. T. Jensen, E. Kielland, A. Korvald, S. Norbom, J. Slapgård: Utbygd vannkraft pr. 01.01.1990. ( s) 1990.

" 33. K. Molkersrød: Etterkontroll av fundamentstabilitet ved hvelvdammer. (7s) 1990.