

Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv

RISIKOVURDERING FOR DAM DRAVLADALEN

DOK.NR. 2015 0624-02-R
REV.NR. 01 / 2016-11-01

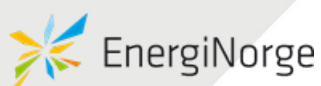


Foto Statkraft

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.



Prosjekttittel: **Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv**
Dokumenttittel: **Risikovurdering for Dam Dravladalen**
Dokumentnr.: 20150624-02-R
Dato: 2015-06-01
Rev.nr. / Rev.dato: 1 / 2016-11-01

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: EnergiNorge
Kontaktperson: Leif Basberg
Kontraktreferanse: Oppdragsbekreftelse 20. oktober 2015

for NGI

Prosjektleder: Suzanne Lacasse
Utarbeidet av: Suzanne Lacasse, Farrokh Nadim, Unni K. Eidsvig, Zhongqiang Liu
Kontrollert av: Kaare Høeg

Sammendrag

NGIs oppgave

EnergiNorge engasjerte NGI til å vurdere muligheter og avgrensninger for bruk av risikoanalyser for norske dammer. Vurderingen består av:

- «State-of-the-art» oversikt over risikoanalyser for dammer i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv.
- Oppdatering av tidligere risikoanalyser for noen norske dammer på 1990-tallet med dagens kunnskap.

Det ble utført en risikoanalyse for flere norske dammer i 1996. Dam Dravladalen ble valgt som eksempel for risikovurdering i dette prosjekt (2016). Et viktig argument for valg av denne dammen var å kunne kvantifisere effekten av rehabiliteringstiltakene utført mellom 1996 og 2016. Risikoanalysene fra 2016 ble gjennomført delvis via en "workshop" hvor sakkyndige fra flere instanser bidro til vurderingene¹.

¹ Deltagerne var Hans Erik Horn og Leif Basberg, Energi Norge; Per Magnus Johansen, Norconsult; Richard Duncumb, Multiconsult; Oddvar Indrebø, Vebjørn Pedersen, og Rune Engesæter, NVE; Reidar Birkeland (pr telefon), Statkraft; Rolv Guddal, Sira Kvina; Janne Gunn Helle, Lyse Produksjon AS; Leif Lia (delvis), NTNU; Ola Gunnleiksrud, E-co Energi; Suzanne Lacasse, Farrokh Nadim, og Unni K. Eidsvig, NGI; og Kaare Høeg (delvis pr telefon), NGI.

Formålet med de nye risikoanalysene for Dam Dravladalen er:

- Oppdatere analysene fra 1996 med 2016-metodikk og sammenligne risiko før og etter utførte rehabiliteringstiltak.
- Vurdere sannsynligheten for brudd i 2016.
- Motta deltagernes synspunkter på metodikk og analysene som ble utført på workshop'en.

Metodikk for risikovurdering

Risikoanalysene ble gjennomført med to metoder: (1) hendelsestre-analyser, styrket med ny-utviklinger siden 1996, og (2) den nyere metode "Bayesian Network" kombinert med "Monte Carlo Simulering". Metodene er beskrevet i "State-of-the-art" rapporten, og er kun meget kort oppsummert i denne rapporten om Dam Dravladalen.

På workshop'en ble en analyse først gjort av de mulige bruddmekanismer ("failure modes") som er aktuelle for Dam Dravladalen. Bruddsannsynlighet ble vurdert for alle plausible bruddmekanismer. For hver bruddmekanisme, ble hendelsestrær bygget. NGI kompletterte arbeidet som var begynt på workshop'en, ved å bygge flere hendelsestrær, se på flere bruddmekanismer og anvende "Bayesian Networks" og Monte Carlo Simulering metodikken for å videre dokumentere bruddsannsynligheten.

Resultater fra risikoanalyser

For hver tenkelig bruddmekanisme er det beregnet en årlig sannsynlighet for brudd. Den totale bruddsannsynlighet er summen av sannsynlighetene for alle plausible bruddmekanismer som kan inntreffe. Det beste estimatet for årlig bruddsannsynlighet for Dam Dravladalen i 2016 er på 10^{-5} , eller én gang pr 100.000 år. Den beregnede årlige sannsynligheten er lavere enn den internasjonalt rapporterte bruddfrekvensen for dammer, basert på publiserte tall og ICOLD-statistikk. De nye analysene gir også et områdetall (maksimum og minimum) for bruddsannsynlighet i tillegg til et best estimat, noe som kan være nyttig i beslutningsprosesser. En oppsummering av konsekvensene av et dambrudd er også gjort selv om Dam Dravladalen har meget lav årlig sannsynlighet for brudd.

Risikovurderingen i 1996 førte til at en viktig, og til da nærmest oversett, bruddmekanisme ble identifisert, og ga insentiv til rehabilitering. Ved en sammenligning av resultater fra 1996 og 2016, viser risikovurderingen at rehabiliteringstiltakene mellom 1996 og 2016 reduserte den beregnede bruddsannsynligheten betydelig. Reduksjonen i risiko ble vist for både tilfellet 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet' og for tilfellet 'jordskjelv', og for den sammenlagte bruddsannsynligheten av geotekniske/naturlige årsaker. Risikoredusering skyldes rehabiliteringstiltakene og ikke forskjeller i analysemetodikk i 1996 og 2016. Tiltaket som bidro mest til redusering i bruddsannsynlighet er knyttet til flomløpet med et overbygg over eksisterende flomløp, økt kapasitet i tunnelen i flomløpssystemet, tetningsvegg for å forhindre gjennomtrekk og oppsamling av foksne i tunnelen og senkning av terrenget i forkant av overløp konstruksjonen som ble igangsatt av Stakraft i lys av resultatene fra 1996-analysene.

Innhold

1	Bakgrunn	6
2	Om Dam Dravladalen	6
2.1	Fyllingdammen	6
2.2	Rehabiliteringstiltak 1996-2012	7
3	Metoder for risikoanalyse anvendt for Dam Dravaldalen	8
3.1	Analysemetodene som ble brukt	8
3.2	Hendelsestre-analyse workshop	8
3.3	Informasjon om Dam Dravladalen	9
3.4	Estimat av sannsynligheter	10
4	Statistikk om hendelser for fyllingsdammer i Norge	11
5	Valg av hendelser og bruddmekanismer	12
5.1	"Failure Mode Screening"	12
5.2	Mekanismer analysert i 2016	14
6	1996-analyser	14
6.1	Bruddmekanismer analysert i 1996	14
6.2	Resultater fra 1996-analysene	15
7	Resultater fra 2016-analyser	16
7.1	2016-resultater med hendelsestre metoden (ETA-analyser)	16
7.2	2016-resultater med "Bayesian Network" metoden (BN-analyser)	18
7.3	Sammenligning av resultater fra ETA og BN analysene	19
7.4	Konsekvenser	20
7.5	Effekt av rehabiliteringstiltakene	21
7.6	Sannsynlighet for brudd for andre dammer	21
7.7	Refleksjoner	21
7.8	Synspunkter fra workshopdeltagerne om hendelsestremetodikken	22
8	Konklusjoner	24
9	Acknowledgment	25
10	Referanser	25

Vedlegg

Vedlegg A	Dam Dravladalen
Vedlegg B	Statistikk om hendelser i norske dammer
Vedlegg C	Risikoanalyser av Dam Dravladalen i 1996
Vedlegg D	Hendelsestre analyser av Dam Dravladalen i 2016
Vedlegg E	"Bayesian Networks" analyser av Dam Dravladalen i 2016
Vedlegg F	Betraktninger om årlig sannsynlighet for lekkasje som kan lede til indre erosjon
Vedlegg G	Sannsynlighet for brudd for andre dammer

1 Bakgrunn

EnergiNorge engasjerte NGI til å vurdere muligheter og avgrensninger for bruk av risikoanalyser for norske dammer. Vurderingen består av:

- «State-of-the-art» oversikt over risikoanalyser for dammer i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv.
- Oppdatering av tidligere risikoanalyser for dammer på 1990-tallet med dagens kunnskap.

Prosjektet har som mål å gi anbefalinger som bør videreutvikles i et mer omfattende hovedprosjekt om risikovurdering av dammer i Norge. Arbeid i Norge sammenlignes med det som er akseptert praksis i utlandet. Arbeidet er viktig for å skape en felles plattform i bransjen for risikoanalyser for dammer. Konklusjonene fra deltagerne i en risikovurderingsworkshop vil inkluderes i sluttanbefalingene.

Som en del av vurderingen av dammer i Norge ble Dam Dravladalen, hvor det ble utført probabilistiske analyser i 1996, valgt som eksempel. Risikoanalysene ble gjennomført delvis via en "workshop" hvor sakkyndige fra flere instanser ble samlet og bidro til vurderingene. Risikovurderingsanalysene av Dam Dravladalen hadde som formål å:

- Oppdatere analysene fra 1996 for Dam Dravladalen med 2015-metodikk og sammenligning av risiko før og etter utførte oppgradering/rehabiliteringstiltak.
- Utføre en risikovurdering, i hovedsak sannsynlighet for brudd, for Dam Dravladalen i 2016.

Denne rapporten beskriver resultater fra analysene for Dam Dravladalen. Hovedrapporten fokuserer på resultater og lærdom fra analysene. Syv vedlegg gir detaljer om analysene og resultatene.

2 Om Dam Dravladalen

2.1 Fyllingdammen

Dravladalsdammen ble bygget i perioden 1971-1972 som en del av Folgefonn-utbyggingen til Vestlandsverkene. Dam Dravladalen ligger i Jondal kommune i Hordaland fylke og demmer opp Dravladalsvatn, som er en av inntaksmagasinerne til Jukla pumpekraftverk. Dammen er en steinfyllingsdam fundamentert på fjell med en sentral skråttliggende tetningskjerne av morene. Dammen har en total lengde på 340 m og en største høyde på 29 m. Dammen er klassifisert i bruddkonsekvensklasse 3 med krav om dimensjonering for 1000-årsflom (Q_{1000}) og med sikkerhetsvurdering for påregnelig maksimal flom (Q_{PMF}). Flomavledningen skjer over en overløpsterskel i betong og videre gjennom en flomtunnel mot elveleiet nedstrøms dammen. Vedlegg A gir mer detaljer og tegninger av dammen, samt en del bilder og litt om historien og rehabiliteringstiltak som ble gjennomført.

Data for Dam Dravladalens magasin er som følger:

Damtopp:	963 moh ²
HRV ³ :	957 moh
LRV ⁴	880 moh
Oppdemt magasinhøyde ved dam	29 m
Magasinvolum ved HRV	58 mill. m ³

2.2 Rehabiliteringstiltak 1996-2012

I 1997 ble det gjennomført en fornying av Dam Dravladalen med bakgrunn i pålegg fra NVE. Det ble etablert følgende:

- en ny damtå for å øke drenasjekapasitet,
- nytt lekkasjemålingssystem,
- nytt nedstrøms skråningsvern med slakere helning,
- nytt kronevern,
- ny overløpsterskel.

Rehabilitering ga en betydelig standardheving. Oppstrøms skråning ble ikke endret.

Dam Dravladalen ble revurdert i 2003. I revurderingsrapporten fra 2003 ble konklusjonen at oppstrøms skråning må rehabiliteres samt at overløpsterskelen ble funnet å ikke være stabil ifølge beregningene.

I juni 2005 ble oppstrøms skråning grundig undersøkt. Konklusjonen ble at skråningen burde få en utforming eller utførelse som hindrer at det oppstår skader på grunn av islaster i fremtiden. For å få riktig utforming, burde skråningen beskyttes med utsortert grovfraksjonert blokk av tilstrekkelig størrelse.

Nye flomberegninger av avløpskapasiteten for flomløpstunnelen ble gjennomført i 2008 og 2010 (Vedlegg A).

I 2010-2011 ble nye rehabilitering utført:

- bygging av nytt oppstrøms skråningsvern og plastring utenpå eksisterende damskråning. Dette ble utført med plastringslag med stein større enn 1m³ i hele damskråningen, og ikke bare i de øverste meterne. Damtoppen ble også hevet med stor stein.
- forsterking av overløpsterskel med påstøp og nye forankringsbolter i fjell.
- øking av avløpskapasitet i flomtunnel ved strossing i tunnelsåle.
- instrumentering av oppstrøms skråning og krone etter føringene gitt i retningslinjene for overvåking og instrumentering av vassdragsanlegg.

Samtidig ble nye beregninger av stabiliteten av nedstrøms og oppstrøms skråninger og av flomløpsterskel utført og funnet tilfredsstillende med rehabiliteringstiltakene.

² moh: meter over havet

³ HRV: høyeste reguleringstilstand

⁴ LRV: laveste reguleringstilstand

3 Metoder for risikoanalyse anvendt for Dam Dravaldalen

3.1 Analysemetodene som ble brukt

Vurderingen av sannsynlighet for brudd for Dam Dravaldalen ble gjort med to typer analyser. Metodene er forklart i mer detalj i NGI (2016) "State-of-the-Art om risikoanalyser for dammer".

- 1) Hendelsestre analyse, med både et fast tall og et tallområde for vurdering av sannsynlighetene. Analysen gir et best estimat, en nedre grense og en øvre grense for sannsynlighet for brudd.
- 2) "Bayesian network" (Bayesisk nettverk) med Monte-Carlo simulering av usikkerhetene i sannsynlighetene. Analysen illustrerer, på en enklere måte enn hendelsestrær, forbindelser og samvirke blant de forskjellige hendelser. Analysen, kombinert med en Monte-Carlo simulering, gir en snittverdi og en probabilistisk fordeling for sannsynlighetene.

Begge metodene bruker en seks-trinn prosedyre (Vick 2002; Høeg 1996):

- 1 Befaring og inspeksjon av dammen for å bli kjent med dammen og grunnforholdene.
- 2 "Failure mode screening", eller valg av utløsningsårsaker og bruddmekanismer.
- 3 Bygging av hendelsestrær eller Bayesisk nettverk.
- 4 Estimat av sannsynligheter for hver hendelse.
- 5 Evaluering av resultater.
- 6 Iterasjon.

En slik evaluering er ofte gjort ved å bringe sammen en gruppe eksperter. Vick (2002) foreslo at "The collective judgment of experts, structured within a process of debate, can yield as good an assessment of probabilities as mathematical analyses".

Et essensielt trinn i vurderingen er trinn 2. "Failure mode screening" eller valg av utløsningsårsaker og bruddmekanismer. Dette er beskrevet i Seksjon 5. Analysen bør se på alle plausible bruddmekanismer og utløsende faktorer.

Sannsynligheten for brudd for dammen er summen av sannsynligheter for alle tilfellene som fører til brudd. Det er derfor viktig at sannsynlighetene fra de forskjellige analyser er sammenlignbare slik at de kan summeres (Seksjon 7), for eksempel en sannsynlighet pr år eller pr 100 år.

3.2 Hendelsestre-analyse workshop

For Dam Dravaldalen ble en workshop organisert for å gjøre en del av analysene. Workshop fant sted i NGIs lokaler 21. og 22. januar 2016. Deltagerne var valgt ut slik at de fleste aktørene var representert. Tabell 1 har en liste over deltagerne.

Det viste seg under workshop'en at det var veldig nyttig å ha adgang til en person på anlegget som var disponibel for å finne dokumenter og målinger og svare på operative spørsmål ettersom de dukket opp. Det anbefales for en eventuell senere workshop at det inviteres en eller to personer fra driftoperasjon av dammen, og at det er en person "stand-by" ved dammens kontor som kan skaffe informasjon ved behov.

Tabell 1. Dam Dravladalen workshop deltagere

Organisasjon	Representant	Ansatt ved
Bransje Forening	Hans Erik Horn	EnergiNorge
Bransje Forening	Leif Basberg	EnergiNorge
Rådgiver	Per Magnus Johansen	Norconsult
Rådgiver	Richard Duncumb	Multiconsult
Myndighet	Oddvar Indrebø	NVE
Myndighet	Vebjørn Pedersen	NVE
Myndighet	Rune Engesæter	NVE
Vassdragsteknisk ansvarlig (VTA)	Reidar Birkeland*	Statkraft
Vassdragsteknisk ansvarlig (VTA)	Rolv Guddal	Siri Kvina
Vassdragsteknisk ansvarlig (VTA)	Janne Gunn Helle	Lyse Production AS
Vassdragsteknisk ansvarlig (VTA)	Ola Gunnleiksrud	E-co Energi
Akademia	Leif Lia	NTNU
Rådgiver/forsker	Farrokh Nadim	NGI
Rådgiver/forsker	Unni K. Eidsvig	NGI
Rådgiver/forsker	Kaare Høeg*	NGI
Rådgiver/forsker	Suzanne Lacasse	NGI

* Delvis deltagelse pr telefon. Reidar Birkeland skaffet driftsinformasjon under workshop'en.

Det var viktig også med en workshop for å få deltagernes synspunkter på sannsynlighetene for hver hendelse og på metodikk og analysene som ble utført på workshop'en. Sannsynlighetene i analysene i denne rapporten er "konsensus" (omforent avgjørelse)-verdier", etter at gruppen ble enig om sannsynlighet etter en diskusjon. Synspunkter om metodikken er presentert under Seksjon 6.7.

Det var ikke mulig å se på alle analysetilfeller på en to-dagers workshop. NGI kompletterte analysene etter workshop'en, og utførte tilleggsanalyser. Hver deltager i workshop'en vil få rapportutkastet til kommentar og vil kunne foreslå å endre tall i analysene før rapporten gjøres endelig.

3.3 Informasjon om Dam Dravladalen

Deltagerne i workshop'en fikk en del informasjon om Dam Dravladalen før og under workshop'en. Informasjon delt ut før workshop'en finnes i Vedlegg A. I Vedlegg A er dammen beskrevet, samt rehabiliteringstiltakene som ble utført mellom 1996 og 2012. Vedlegg A inneholder også bilder av Dam Dravaldalen, før, under og etter rehabiliteringen.

Det kom en del tilleggsinformasjon under workshop'en, inklusivt observert lekkasje og nivået på magasinet de siste tre årene (2012-2015). Vedlegg A og informasjonen fra Statkraft og andre som kom opp under workshop'en ble brukt i analysene. Informasjonen er arkivert på NGI (og selvsagt hos Statkraft).

NGI og workshopdeltagerne hadde også tilgjengelig en del rapporter om dammen, inklusivt teknisk plan (CM Consulting AS 2008a), flomberegninger (CM Consulting AS 2008b), og dambruddsbølgeberegninger (Statkraft 2010).

3.4 Estimat av sannsynligheter

For analysene av Dam Dravladalen ble tallverdiene i Tabell 2 først brukt for å beskrive usikkerheten i hendelsene. Tabell 2 gir en verbal beskrivelse (på engelsk, språket hvor disse konseptene ble utviklet, og med en tilnærmet oversettelse på norsk) og sannsynligheten som assosieres med nytt hver av de verbale beskrivelsene. Tabell 2 gir verdiene for et best estimat av sannsynlighetene, og baserer seg på tidligere erfaringer, arbeid av Høeg (1996) og Vick (2002) og analyser gjort for tidligere dammer.

Sannsynlighetene i Tabell 2 ble også brukt for analysene av Dam Dravaldalen i 1996.

IPCC (2012) foreslo at et tallområde bør brukes for å beskrive sannsynligheter i stedet for de enkelte faste tall i tabell 2 for å uttrykke større usikkerhet. Tallområdene foreslått av IPCC (2012) ble diskutert på workshop'en, og verdier fra konsensus blant deltagerne ble brukt videre i analysene.

Tabell 3 presenterer i samme format som tabell 2 de omforente verdier som ble brukt på workshop'en. Tallområdene i tabell 3 vil brukes for Dam Dravladalen for å beregne nedre og øvre grense på sannsynlighetene med hendelsestre-metoden, og for å utføre Monte-Carlo simuleringene i forbindelse med "Bayesian networks"-analysene.

Tabell 2. Estimat av sannsynligheter med enkelte tall for hendelsestreanalyse

Sannsynlighet	Verbal beskrivelse (engelsk)	Beskrivelse (norsk)
0.001	<i>Virtually impossible,</i> due to known physical conditions or process that can be described and specified with almost complete confidence	Nesten umulig
0.01	<i>Very unlikely,</i> although the possibility cannot be ruled out on the basis of physical or other reasons	Veldig usannsynlig
0.10	<i>Unlikely,</i> but it could happen	Usannsynlig
0.50	<i>As likely as not,</i> with no reason to believe that one possibility is more or less likely than the other	Usikker
0.90	<i>Likely,</i> but it may not happen	Sannsynlig
0.99	<i>Very likely,</i> but not completely certain	Veldig sannsynlig
0.999	<i>Virtually certain,</i> due to know physical conditions or process that can be described and specified with almost complete confidence	Nesten 100 % sikkert

Tabell 3. Estimat av sannsynligheter med områdetall for hver kategori

Sannsynlighet	Verbal beskrivelse (engelsk)	Beskrivelse (norsk)
≈0.0 – 0.005	<i>Virtually impossible</i> , due to known physical conditions or process that can be described and specified with almost complete confidence	Nesten umulig
0.005 – 0.02	<i>Very unlikely</i> , although the possibility cannot be ruled out on the basis of physical or other reasons	Veldig usannsynlig
0.02 – 0.33	<i>Unlikely</i> , but it could happen	Usannsynlig
0.33 – 0.66	<i>As likely as not</i> , with no reason to believe that one possibility is more or less likely than the other	Usikker
0.66 – 0.98	<i>Likely</i> , but it may not happen	Sannsynlig
0.98 – 0.995	<i>Very likely</i> , but not completely certain	Veldig sannsynlig
0.995 – ≈1.0	<i>Virtually certain</i> , due to know physical conditions or process that can be described and specified with almost complete confidence	Nesten 100 % sikkert

4 Statistikk om hendelser for fyllingsdammer i Norge

NGI (2016) presenterer enkelte internasjonale statistikk tall for dambrudd og dam "hendelser" for fyllingsdammer. Statistikk tall er nyttig for å vurdere hva som er de mest viktige årsaker til et eventuelt dambrudd og hvor ofte fyllingsdammer er gått til brudd tidligere. Statistikk-tallene som er rapportert av Fell *et al* (2015) og reproduisert i NGI (2016) er en sterk pekepinn på at intern erosjon er den mest sannsynlige bruddmekanismen for fyllingsdammer.

Bjørn Kjærnsli (NGI, 1992), Kjærnsli *et al* (1992) og Høeg (1996) lagde en grafisk statistikk for norske fyllingsdammer. Disse er gjengitt i Vedlegg B. NGI (1992) konkluderer at internasjonal statistikk fastslår at ingen store steinfyllingsdammer er gått til brudd selv om store lekkasjer har oppstått. Dette skyldes at oppståtte lekkasjer har vært begrenset og at nedstrøms damtå har kunnet avlede lekkasjen uten at det har oppstått ustabilitet i tåa.

Grafene i Vedlegg B viser at ingen dammer med filter med D_{15} mindre enn 2 mm har vært utsatt for lekkasjer. D_{15} står for maskevidden hvor igjennom 15% av filtermaterialet passerer. Et unntak er Songa dammen hvor det er registrerte flere kortvarige lekkasjer. På samtlige dammer, med unntak av Songa, ble lekkasjer registrert ved første gangs fylling av magasinet.

Den norske statistikken viser at ingen stor (høyde > 15m) norsk steinfyllingsdam ferdigstilt etter 1975 har vist tegn på skader. Begge figurer viser at det er kun en liten andel av dammene som har erfart uønskede hendelser, og ingen dam over 100m høy har hatt hendelser.

På enkelte store, norske steinfyllingsdammer med morenetetning har det oppstått til dels store lekkasjer, opptil 210 l/s. Lekkasjene har vanligvis oppstått ved første gangs fylling av magasinet eller under de tre første år i drift. Vedlegg B oppsummerer målingene som er rapportert av Kjærnsli (1992) og Høeg et al (1996), og Vedlegg A gir lekkasjemålinger på Dam Dravladalen i 1974 og 1994.

For samtlige dammer ble det ansett som 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.

Det er uheldig at den norske statistikken stopper i tidlig 90 årene. Dette bør endres. Det er viktig i både deterministiske og probabilistiske analyser å kunne dokumentere antall dam-år uten hendelser, for eksempel stor lekkasje.

5 Valg av hendelser og bruddmekanismer

5.1 "Failure Mode Screening"

På workshop'en, ble følgende bruddmekanismer og utløsningsfaktorer diskutert:

Svakheter i selve dammen:

- Indre erosjon
- Utglidning av opp- og nedstrøms skråning
- Skred inn i magasinet utfra geologien
- Svakheter i fundamentet
- Er det noe operativt som kan føre til brudd?

Eksterne utløsningsfaktorer:

- Flom
- Jordskjelv
- Bresmelting som forårsaker økt vannmengde i magasinet
- Sabotasje/terror
- Meteoritter
- Flystyrt

5.1.1 Prioriterte "failure modes"

Etter diskusjon på workshop'en ble følgende brudd- og utløsningsmekanismer ansett som de mest relevante og mest sannsynlige som kunne føre til dambrudd for Dam Dravladalen:

Svakheter i selve dammen:

- Indre erosjon
- Utglidning av opp- og nedstrøms skråning
- Er det noe operativt som kan føre til brudd?

Eksterne utløsningfaktorer:

- Flom
- Jordskjelv
- Bresmelting som forårsaker økt vannmengde i magasinet

Utglijning av opp- og nedstrøms skråning er analysert som konsekvenser av både flom og jordskjelvbelastning av dammen. Bresmelting som forårsaker økt vannmengde i magasinet ble analysert som en del av flom-tilfellet.

Etter diskusjon med Statkraft og ha fått en oversikt over operative feiltrinn som kan føre til dambrudd, ble dette koblet sammen med sabotasje/terror hendelser.

5.1.2 Nedprioriterte "failure modes"

Svakheter i selve dammen:

- Skred inn i magasinet utfra geologien
- Svakhet i fundamentet

Eksterne kilder:

- Meteoritter
- Flystyrt

Fjellskred i magasinet utfra geologien var eliminert som sannsynlig bruddmekanisme på basis av studien gjort av NGI (2004). Studien kartla dam-områder i Norge hvor instabilitet av fjellet og et storskred kunne forårsake fare for oversvømmelse i magasinet. NGI (2004) lister de mest utsatte dammer for slike farer. Geografisk var dammen med mulig fjellskredfare i Vest Norge fra Rogaland til Møre og Romsdal, og i Telemark, Oppland og Nordland. Dam Dravladalen er i Hordaland mellom Rogaland og Møre og Romsdal. Allikevel ble ikke Dam Dravaldalen identifisert som et prioritert område med hensyn til fjellskredfare.⁵

Tilfellet hvor en svakhet i fundamentet skal være så stor at den kan lede til brudd, ble ikke analysert videre, fordi Dam Dravladammen står på godt fjell. Fjellfundamentet består av gneiss og granitt. Fjellsiden er bratt, med synklinaler ("foliation dips") oppstrøms. Det var ikke tegn på sprekkeplan med fall i nedstrøms retning.

Meteorittnedslag og flystyrt akkurat på Dravladalsvatns lokalisering ble ikke analysert fordi den resulterende sannsynlighet for dambrudd vil kunne være lavere enn 10^{-7} pr år. Energi Norge bestemte også at vilde handlinger ikke skulle behandles. Terror eller sabotasje må ses på av myndighetene som har ansvar for samfunnssikkerhet. En komplette risikoanalyse bør derimot evaluere disse sannsynligheter (som pr i dag anses som meget lave for Dam Dravladalen).

⁵ Derimot er Viddalsvatn fyllingsdammen identifisert som et slik "fjellskredfare" område. Denne bruddmekanismen må eventuelt komme med ved en eventuell analyse av Dam Viddalsvatn.

I denne rapporten er årlig sannsynlighet for brudd beregnet for året 2016. Midttømme (2015) viser til stor effekt av klimaendringer, med en økning i flomstørrelse på 40 til 60 % i Dam Dravladalen-området pr år 2070 til 2100. Referanseperioden er 1961 til 1990.

I 2016-analysene er det ikke tatt hensyn til endringer i vannmengde i magasinet forårsaket av klimaendring. Grunnen for dette er at:

- Siste flomberegning er fra 2008 (CM Consulting 2008b). Det er ikke stor effekt av klimaendring fra 2008 til 2016.
- Flomberegningene oppdateres hvert 10. eller 15. år. Klimaendringene i Midttømmes rapport er merkbare for perioden 2070-2100. De fremtidige flomberegningene er forventet å ta hensyn til effekter av klimaendringer.

Derimot er tilfellet bresmelting med økt vannmengde i magasinet som konsekvens, en følge av klimaendringer eller tilfeldige temperatur endringer. Denne hendelsen er vurdert og tatt med i 2016-analysene.

5.2 Mekanismer analysert i 2016

Analysert for følgende mekanismer ble gjennomført:

- Indre erosjon
- Flom, med to mulige hendelser: (1) is og hardpakket snø som blokkerer overløpet, og (2) bresmelting som renner inn i magasinet
- Jordskjelv

6 1996-analyser

6.1 Bruddmekanismer analysert i 1996

I 1996-analysene for Dam Dravladalen ble hendelser som kan føre til dambrudd delt i tre kategorier:

- Hydrauliske hendelser (flom/bølgeerosjon/ras utløst av sterk nedbør etc.)
- Seismiske hendelser (skader på dammen grunnet jordskjelv, skred utløst av jordskjelv etc.)
- Andre hendelser (indre erosjon, utglidninger på grunn av dårlig stabilitet etc.) som kan oppstå i en "vanlig" driftssituasjon

For hver type hendelse ble en bruddmekanisme ansett som mest sannsynlig, og denne mekanismen ble analysert i mer detalj. Sannsynlighetsanalysene gjennomført i 1996 er oppsummert i Vedlegg C.

6.2 Resultater fra 1996-analysene

Resultatene fra analysene utført i 1996 for Dam Dravladalen, beregnet som sannsynligheter for brudd P_f , er vist i Tabell 4. Det er viktig å merke seg at sannsynlighet for brudd er en årlig sannsynlighet kun for tre av de fire tilfellene. Sannsynlighet for brudd ved indre erosjon er en "nominell" (eller "absolutt" sannsynlighet og har ikke blitt knyttet til en årlig hendelse. Sannsynligheten er å regne som en livstid sannsynlighet (for eksempel for de neste 50 år). En tilnærmet årlig sannsynlighet for brudd i tilfellet indre erosjon i Tabell 4 vil være cirka 50 ganger lavere hvis den nominelle sannsynlighet er for de neste 50 år.

Tabell 4. Resultater fra 1996-sannsynlighetsanalyser for Dam Dravladalen

Hendelse	Mest sannsynlig bruddmekanisme	P_f 1. vurdering	P_f 2. vurdering
Seismisk hendelse	Overtopping forårsaket av setning av dammen	$P_{f\text{ årlig}}$ $<1,5 \cdot 10^{-6}$	$P_{f\text{ årlig}}$ $<1,5 \cdot 10^{-6}$
Hydraulisk hendelse	Overtopping forårsaket av snøplugg i overløpet	$P_{f\text{ årlig}}$ $3 \cdot 10^{-3}$	$P_{f\text{ årlig}}$ $4 \cdot 10^{-4}$
Indre erosjon	Nedbryting av nedstrøms skråning og damtå -nominell sannsynlighet -årlig sannsynlighet (hvis 50 år)	$P_{f\text{ nominell}}$ $5 \cdot 10^{-4}$	$P_{f\text{ nominell}}$ $5 \cdot 10^{-5}$
		$P_{f\text{ årlig}}$ $1 \cdot 10^{-5}$	$P_{f\text{ årlig}}$ $1 \cdot 10^{-6}$
Sabotasje/terror hendelse	Overtopping forårsaket av sprengning av damtopp	$P_{f\text{ årlig}}$ $<1 \cdot 10^{-5}$	$P_{f\text{ årlig}}$ $<1 \cdot 10^{-5}$
Alle hendelser	$P_{f\text{ årlig}}$ uten indre erosjon $P_{f\text{ årlig}}$ med indre erosjon (hvis 50 år)	$P_{f\text{ årlig}}$ $<3 \cdot 10^{-3}$	$P_{f\text{ årlig}}$ $<4,2 \cdot 10^{-4}$
		$P_{f\text{ årlig}}$ $<3 \cdot 10^{-3}$	$P_{f\text{ årlig}}$ $<4,2 \cdot 10^{-4}$

Den relativt høye beregnede sannsynligheten for brudd for Dam Dravladalen sammenlignet med den for andre norske dammer analysert i 1996⁶, skyldes i hovedsak usikkerheten omkring nedbryting av hardpakket snø og is (snø- og isplugg) i overløpet. Derimot ble det gjort klart, som en del av vurderingen i 1996, at ingen dammer hadde gått til brudd på grunn av et flomoverløp fylt med snø eller is.

Skadekonsekvensene ved et eventuelt brudd ble ikke vurdert, men det ble ansett som sannsynlig at et brudd i en steinfyllingsdam vil ta en viss tid for å utvikle seg slik at dameieren vil ha tid til varsling hvis "unormale" oppførsel/hendelser ble oppdaget i tide. Det ble derfor ansett som viktig at dameieren til enhver tid kan dokumentere dammens funksjonalitet og tilstand ved overvåking av vannstand og lekkasje.

Sannsynlighetsberegningene for Dam Dravladalen viste at det ikke var behov for rehabilitering av oppstrøms skråningsvern eller justering av nivåer eller bredder av topp dam eller topp av tetning. Analysene påpekte følgende momenter som burde vurderes i forbindelse med en rehabilitering av dammen:

⁶ Det ble utført sannsynlighetsanalyser for flere norske dammer i 1990 årene, inklusivt Dam Trollaldalen (Songa), Dam Viddalen, Dam Vennemo og Dam Svartevann, i tillegg til Dan Dravladalen.

- Installasjon av en automatisk lekkasjemålingsstasjon med overføring av verdier.
- Forbedre overløpet for å forhindre tilstopping av is og snø.
- Belyse snøforholdene i overløpet om vinteren, og studere nedbryting av kompakt snø og is.
- Øke drenasjekapasitet med en storsteintå i nedstrøms skråning.

7 Resultater fra 2016-analyser

7.1 2016-resultater med hendelsestre-metoden (ETA-analyser)

Tabell 5 gir en oversikt over analysene som ble gjort. Vedlegg D presenterer detaljene for hver hendelsestre-analyse, med forklaringer og begrunnelser for valg av sannsynlighetsverdier for hver gren i trærne. Vedlegg D gir resultater i grafisk form for de mest sentrale hendelsestre-analysene. Vedlegg F oppsummerer de statistiske betraktninger som ble gjort for å kvantifisere årlig sannsynlighet for initiering av lekkasje (inngangsverdi i hendelsestreet for indre erosjon).

Tabell 5. Oversikt over hendelsestre-analyser av Dam Dravaladalen

Hendelse	Figur i Vedlegg D	
Indre erosjon forårsaket av lekkasje	D1; D2	
Flom {	Is og hardpakket snø som blokkerer overløpet (vinterhalvåret)	D3 og D4
	Bresmelting som renner inn i magasinet (sommerhalvåret)	D3 og D5
Jordskjelv	D6	

Analysene er gjennomført med best estimat av sannsynlighetsverdier (Tabell 2) og med 'områdetall' (øvre og nedre estimat) for sannsynlighetsverdier (Tabell 3). Tabell 6 gir resultater for best-estimat analysene og Tabell 7 for analysene med områdetall.

Tabell 6. Årlig sannsynlighet for brudd fra hendelsestre-analyser for Dam Dravaladalen - Best estimat av sannsynlighetsverdier.

Hendelse	Årlig sannsynlighet for brudd, P_f årlig	
Indre erosjon forårsaket av lekkasje	$4.7 \cdot 10^{-6} / \text{år}$	
Flom {	Vinterhalvåret	$2.4 \cdot 10^{-7} / \text{år}$
	Is og hardpakket snø blokkerer overløpet	
	Sommerhalvåret	$\text{For } Q > Q_{10.000} : 5.4 \cdot 10^{-6} / \text{år} *$
	Bresmelting renner inn i magasinet	$\text{For } Q \leq Q_{10.000} : 3.7 \cdot 10^{-7} / \text{år}$
Jordskjelv	$9.0 \cdot 10^{-8} / \text{år}$	

* Dominert av $Q > Q_{10000}$ forgrening.

Best-estimat sannsynlighet-for-brudd verdiene for hver av hendelsene for Dam Dravaladalen er lavere enn 10^{-5} per år (Tabell 6). Disse sannsynligheter er svært lave. De to hendelsene med

høyeste sannsynlighet for brudd, 'flom på sommerhalvåret med bresmelting som renner inn i magasinet' og 'indre erosjon', har årlig sannsynlighet for brudd på ca. $5 \cdot 10^{-6}$ / år.

Når 'områdetall' brukes for sannsynlighetene i hendelsestrærne (Tabell 7), er sannsynlighet for brudd noe høyere, mens det nedre estimatet er så lavt som 10^{-9} / år. Spredningen av sannsynlighetsverdier illustrerer effekten av usikkerhetene, men spredningen er urealistisk stor (se Vedlegg D). Bayesian nettverk-analysene kombinert med Monte Carlo simulering (vist i neste seksjon) reduserer spredningen betydelig.

Tabell 7. Årlig sannsynlighet for brudd fra hendelsestre-analyser for Dam Dravladalen - Områdetall for sannsynlighetsverdier.

Hendelse	Årlig sannsynlighet for brudd, P_f årlig		
	Nedre estimat	Best estimat	Øvre estimat
Indre erosjon forårsaket av lekkasje	$2.8 \cdot 10^{-9}$ / år	$4.7 \cdot 10^{-6}$ / år	$3.2 \cdot 10^{-5}$ / år
Flom {	Vinterhalvåret	$8.5 \cdot 10^{-11}$ / år	$2.4 \cdot 10^{-7}$ / år
	Is og snø blokkerer overløpet	$8.2 \cdot 10^{-11}$ / år	$5.4 \cdot 10^{-6}$ / år
	Sommerhalvåret Bresmelting renner inn i magasinet	$1.8 \cdot 10^{-10}$ / år	$9.0 \cdot 10^{-8}$ / år
Jordskjelv	$1.8 \cdot 10^{-10}$ / år	$9.0 \cdot 10^{-8}$ / år	$1.4 \cdot 10^{-7}$ / år

Tabell 8 gir den totale årlige sannsynlighet for brudd for Dam Dravladalen. Den sammenlagte årlige sannsynligheten for brudd av geotekniske og naturlige årsaker er estimert til 10^{-5} / år eller én gang per 100.000 år.

Tabell 8. Årlig sannsynlighet for brudd med beste estimat for Dam Dravladalen – sammenlagt bruddsannsynlighet av geotekniske og naturlige årsaker.

Hendelse	Årlig sanns. for brudd, P_f årlig	
Indre erosjon forårsaket av lekkasje	$4.7 \cdot 10^{-6}$ / år	
Flom {	Vinterhalvåret	$2.4 \cdot 10^{-7}$ / år
	Is og hardpakket snø som blokkerer overløpet	$5.4 \cdot 10^{-6}$ / år
	Sommerhalvåret Bresmelting som renner inn i magasinet	$9.0 \cdot 10^{-8}$ / år
Jordskjelv	$9.0 \cdot 10^{-8}$ / år	
Sammenlagt bruddsannsynlighet, geotekniske og naturlige årsaker	$1.0 \cdot 10^{-5}$ / år	

Beregningene med nedre sannsynlighetsestimater gir ekstremt lav sannsynlighet for brudd (nedre estimat gir P_f årlig = 10^{-9} / år). Øvre estimater gir en årlig sannsynlighet for brudd på ca. 10^{-4} / år for fire bruddmekanismer: indre erosjon, og flom både på vinterhalvåret og på sommer halvåret.

Under diskusjonen i workshop'en etter at alle vurderinger var ferdige, ble det bemerket at den høyeste sannsynlighet for dambrudd i Norge kan være for sabotasje/terror hendelse, eventuelt menneskelig feil. Willoch-utvalget (NOU 2000) har gitt tall på sannsynlighet for sabotasje, og en studie med disse tall som bakteppe bør gjennomføres. Imidlertid er en steinfyllingsdam en

konstruksjon som er meget vanskelig å sabotere med sprengning. Et opplagt tiltak mot sabotasje/terror vil være mer overvåking av dammer, spesielt adgang til dammen. En dam er en svært viktig og sentral del av infrastrukturen. Dambrudd fører til store konsekvenser, ikke minst med hensyn til tap av tillit i vannkraftbransjen fra samfunnet. Det er faktisk mye mer kontroll på andre sårbare konstruksjoner i næringslivet enn det er på dammer i Norge. Workshop-deltagerne konkluderte at i hvert fall en restriksjon på adgang til dammene i Norge bør gjennomføres.

7.2 2016-resultater med "Bayesian Network" metoden (BN-analyser)

Vedlegg E presenterer resultatene fra "Bayesian network"-analysene av sannsynlighet for brudd for Dam Dravladalen. "Bayesisk nettverk"-metoden er beskrevet i vedlegget og i NGI (2016) "State-of-the-Art" rapport. Vedlegg E har også illustrasjoner av nettverksanalysene for to tilfeller: (1) is og hardpakket snø som blokkerer overløpet og (2) jordskjelv. Bayesiske nettverksanalyser kombinerte med Monte Carlo simuleringer ble gjennomført for å verifisere resultatene fra hendelsestre-analysene, avgrense spredningen mellom nedre og øvre estimater og kvantifisere gjennomsnitt, maksimum- og minimum-verdier for sannsynlighet for brudd for Dam Dravladalen.

Figur 1 viser resultatene for tilfellet 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet'. Resultatet er gitt som et histogram for sannsynlighet for brudd.

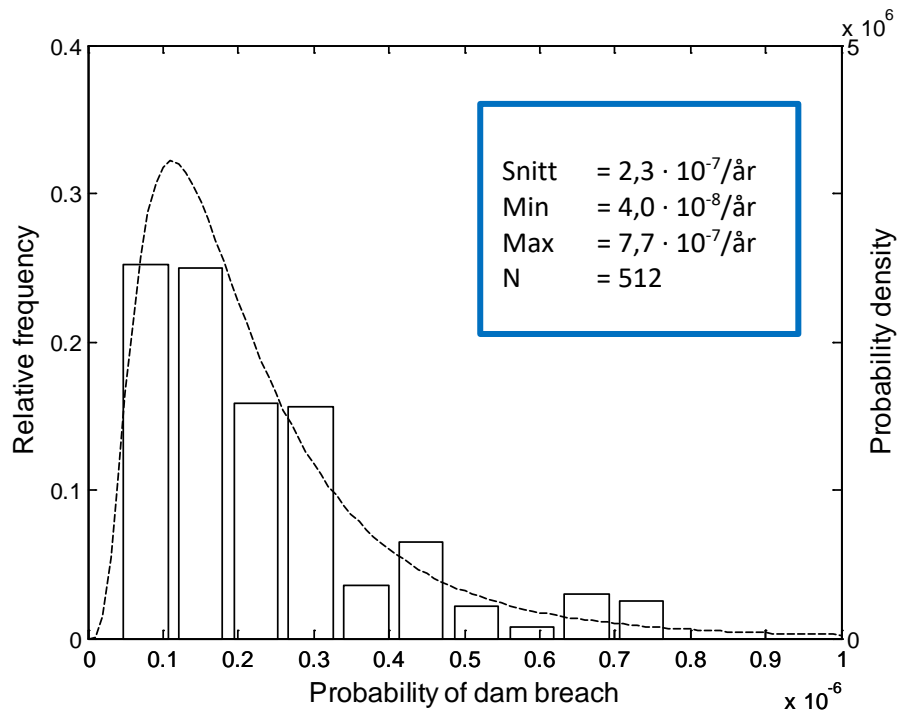
Den lognormale fordelingen som nærmest dupliserer histogrammet ("best fit") er også vist. Minitabellen i Figur 1 oppsummerer enkelte statistiske parametere for fordelingen av den årlige sannsynligheten for brudd (maksimum P_f (Max), minimum P_f (Min), gjennomsnitt og N (antall simuleringer). Vedlegg E har flere detaljer om fordelingen.

I følge Bayesiske nettverk etter 512 Monte Carlo analyser, har den probabilistiske fordelingen av sannsynlighet for brudd forårsaket av 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet' for Dam Dravladalen følgende verdier:

$$\begin{aligned}\text{Snitt } (P_f \text{ årlig}) &= 2,3 \cdot 10^{-7}/\text{år} \\ \text{Minimum } (P_f \text{ årlig}) &= 4,0 \cdot 10^{-8}/\text{år} \\ \text{Maksimum } (P_f \text{ årlig}) &= 7,7 \cdot 10^{-7}/\text{år}\end{aligned}$$

For tilfellet 'jordskjelv' har den probabilistiske sannsynlighet-for-brudd fordelingen for Dam Dravladalen følgende verdier (med 625 Monte Carlo simuleringer):

$$\begin{aligned}\text{Snitt } (P_f \text{ årlig}) &= 3,9 \cdot 10^{-8}/\text{år} \\ \text{Minimum } (P_f \text{ årlig}) &= 9,3 \cdot 10^{-8}/\text{år} \\ \text{Maksimum } (P_f \text{ årlig}) &= 1,3 \cdot 10^{-8}/\text{år}\end{aligned}$$



Figur 1. Probabilistisk fordeling av sannsynlighet for brudd forårsaket av 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet' for Dam Dravladalen.

7.3 Sammenligning av resultater fra ETA og BN analysene

Tabell 9 sammenligner resultatene fra hendelsestre-analyser (ETA) og Bayesiske nettverks-analyser (BN). De siste analysene bekrefter de lave sannsynlighetene for brudd for Dam Dravladalen. BN-analysene kombinert med Monte-Carlo analysene har fordelen av å gi en snitt (mest sannsynlig verdi), standard avvik og en mer realistisk spredning av sannsynlighet for brudd enn ETA-analysene.

Table 9. Sammenligning av sannsynlighet for brudd for Dam Dravladalen beregnet med hendelsestre-analyse og Bayesisk nettverk-analyse med Monte Carlo simulering.

Hendelsestre-analyse		Årlig sannsynlighet for brudd, $P_{f\text{årlig}}$		
		Nedre estimat	Best estimat	Øvre estimat
Flom	Is og hardpakket snø som blokkerer overløpet	$8.5 \cdot 10^{-11} / \text{yr}$	$2.4 \cdot 10^{-7} / \text{yr}$	$1.1 \cdot 10^{-4} / \text{yr}$
Jordskjelv		$1.8 \cdot 10^{-10} / \text{yr}$	$9.0 \cdot 10^{-8} / \text{yr}$	$1.4 \cdot 10^{-7} / \text{yr}$
Bayesisk nettverk-analyser med Monte Carlo simulering		Årlig sannsynlighet for brudd, $P_{f\text{årlig}}$		
		Minimum	Gjennomsnitt	Maksimum
Flom	Is og hardpakket snø som blokkerer overløpet	$4.0 \cdot 10^{-8} / \text{yr}$	$2.3 \cdot 10^{-7} / \text{yr}$	$7.7 \cdot 10^{-7} / \text{yr}$
Jordskjelv		$9.3 \cdot 10^{-8} \text{ yr}$	$3.9 \cdot 10^{-8} / \text{yr}$	$1.3 \cdot 10^{-8} / \text{yr}$

7.4 Konsekvenser

Hendelsestre-analyser kan også benyttes for å analysere omfanget av og sannsynligheten for ulike konsekvenser av et dambrudd. Imidlertid er sannsynligheten for brudd for Dam Dravladalen så lav etter rehabiliteringen som ble gjennomført i perioden 1996-2012, at en grundig analyse ikke ble gjennomført som en del av dette rapporterte arbeidet. Allikevel er det nyttig å vite størrelsen på konsekvensene av et eventuelt brudd av Dam Dravladalen. Norconsult (2010), på oppdrag for Statkraft energi AS, belyste konsekvensene av et eventuelt dambrudd på Dam Dravladalen. Dambruddet ble beregnet fra magasinet og ned til Maurangerfjord (Vedlegg A), ved to ulike flomsituasjoner: en 1.000-års flom ($Q_{1000 \text{ år}}$) og en middelflom (Q_m)

Ved et eventuelt dambrudd på Dravladalsdammen vil en 1.000-års flom medføre maksimum vannføring på ca. 8.800 m³/s og ca. 5.700 m³/s ved middelflom. Bruddtiden ble beregnet til 1 time og 29 minutter og 1 time og 32 minutter for henholdsvis 1.000-års flom og middelflom. Vannstandsstigning ved Jondal vil da være mellom 3 til 10 m over normalen for begge flomtilfeller. Dette betyr at bygninger og infrastruktur som ligger inntil vassdraget vil bli berørt av en eventuell dambrudds- bølge, i hovedsak ved Jondal. Totalt vil ca. 160 bygninger, hvorav 54 boliger, 4 hotell eller bevertningssteder, 8 offentlige bygg og 94 andre bygg, bli berørt. Til sammen er det beregnet 77 boligekvivalenter.

Det ble nevnt på workshop'en at et eventuelt brudd av Dam Dravladalen ville kunne berøre mellom 200 og 300 personer, men at sannsynligheten for dødsfall var meget liten på grunn av den tilgjengelige varslings tiden. Konsekvensbildet vil være mindre alvorlig ved dambrudd under flom, da folk vil ha vært evakuert på grunn av den stigende flommen lenge før et eventuelt brudd i dammen vil ha skjedd. Det ble også nevnt på workshop'en at personer som bor i flomområder vet hvordan de skal forholde seg ved flomfare og uventet ekstremt vær.

Enkelte av workshop'-deltagerne syntes at en dambruddbølgeberegning er nyttig, men fortsatt kun et beredskapsverktøy. Enkelte mente at konsekvensene vil være større ved dambrudd forårsaket av andre krefter enn flom. Det var derimot ikke enighet om dette fordi et eventuelt dambrudd vil til slutte føre til "overtopping" av samme størrelse som beregnet for flom og samme type bruddbølge som etterfølger. Det var enighet om at for en probabilistisk analyse av konsekvensene bør man studere i mer detalj kart over de oversvømmede områdene og i tillegg se på de miljømessige konsekvensene og kostnadene tilknyttet alle konsekvensene.

Dam Dravladalen har en lav sannsynlighet for brudd på 10^{-5} /år, eller en gang per 100.000 år. Det er viktig å notere seg at, med en så lav sannsynlighet for brudd, vil en utløsningsmekanisme med 1.000- eller 10.000-år returperiode (jordkjelv, orkan, nedbør, is- og/eller snøstorm), forårsake mange andre alvorlige konsekvenser (veistengning, kollaps i transportmidler, strømbrydd, omfattende evakuering etc) før Dam Dravladalen går til brudd. Mye av infrastrukturen rundt dammen vil ikke være i stand til å operere, og de fleste sikkerhetsberedskapstiltak vil allerede være utløst. En system-analyse av en slik mulig situasjon bør gjennomføres med for eksempel den nye "stress testing"-metoden (Nadim 2016). "Stress testing" er blant de nye metoder som er brukt i kjernekraftindustri for å evaluere respons og "resilience" for et system under hendelser med veldig lav sannsynlighet og veldig høye konsekvenser.

7.5 Effekt av rehabiliteringstiltakene

Tabell 10 sammenligner resultatene fra de probabilistiske analysene utført i henholdsvis 1996 og 2016. Analysene viser at rehabiliteringstiltakene mellom 1996 og 2016 reduserte den beregnede sannsynlighet for brudd betydelig. Reduksjon i risiko ble vist for både tilfellene 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet' og for 'jordskjelv', og for den sammenlagte bruddsannsynligheten for brudd av geotekniske/naturlige årsaker. Beregnet sannsynlighet for brudd forårsaket av indre erosjon var tilnærmet den samme i 2016 og 1996, men de ble beregnet på forskjellige måter.

Slik risikoreduering bør kunne reflekteres i en kost-nytte analyse.

Table 10. Sammenligning av sannsynlighet for brudd for Dam Dravladalen fra 1996 og 2016 analysene.

Bruddmekanisme eller bruddårsak	Årlig sannsynlighet for brudd, $P_{f\text{ årlig}}$		
	2016-analyser	1996-analyser	
Indre erosjon forårsaket av lekkasje	$4.7 \cdot 10^{-6} / \text{år}$	$5 \cdot 10^{-5}$ (levetid)	
Flom {	Vinterhalvåret		
	Is og hardpakket snø som blokkerer overløpet	$2.4 \cdot 10^{-7} / \text{år}$	$4 \cdot 10^{-4} / \text{år}$
	Sommerhalvåret		
	Bresmelting som renner inn i magasinet	$5.4 \cdot 10^{-6} / \text{år}$	---
Jordskjelv	$9.0 \cdot 10^{-8} / \text{år}$	$< 1,5 \cdot 10^{-6} / \text{år}$	
Sammenlagt bruddsannsynlighet, geotekniske/naturlige årsaker	$1.0 \cdot 10^{-5} / \text{år}$	$< 4,2 \cdot 10^{-4} / \text{år}$	

7.6 Sannsynlighet for brudd for andre dammer

Vedlegg G oppsummerer flere internasjonale statistikk tall for dambrudd og gir en illustrasjon av risikoveiledninger i forskjellige land. Disse viser at Dam Dravladalen, med en beregnet sannsynlighet for brudd på 10^{-5} per år, har et akseptabel risikonivå, og har en lavere sannsynlighet for brudd enn de fleste andre utenlandske dammer.

7.7 Refleksjoner

Selv med en god sikkerhet mot dambrudd, er ikke dette noe argument for å stoppe overvåkingsprogrammene som gjennomføres i dag. Endringer i dammens oppførsel bør følges nøye, og klimaendringer kan påvirke sikkerhetsnivået. Et godt overvåkingsprogram bør ha beredskapsplaner for tiltak, skulle noe uventet skje.

Det er anbefalt at man vurderer mulige utfordringer i fremtiden og har en plan for hva man bør gjøre hvis disse utfordringene skulle inntre. Dette er en direkte applikasjon av "The Observational Method" (Peck 1969), som er mye brukt og generelt sett er en god praksis i geoteknikk.

7.8 Synspunkter fra workshopdeltagerne om hendelsestre-metodikken

Gjennom rapporten og spesielt i Vedlegg D er det notert uttalelser som ble uttrykt under workshop'en. Deltagerne ble spurt om å vurdere selve workshop'en og hendelsestre-analysene som verktøy for å vurdere dambruddrisiko. Sluttkommentarene om selve workshop'en og analysens kan oppsummeres som følger:

Om hendelsestre-analysen

- Interessant analyse, det er nyttig å gjøre slike vurderinger.
- Deltagerne var interessert i å kunne dokumentere hvor mye reduksjonen i beregnet risiko ble som følge av rehabiliteringstiltakene.
- En komplett risikoanalyse bør også gå igjennom konsekvensene. Konsekvensene vil variere, avhengig av bruddutviklingen og forløpet.
- Et alternativ vill ha vært feiltre type analyser.

Om workshop'en (forbedringspotensiale):

- Gruppen hadde for dårlig lokalkunnskap. Det manglet folk fra Dam Dravladalen drift.
- Det er nødvendig å ha en person fra anlegget som raskt kan hente informasjon og svare på spørsmål som Reidar Birkeland gjorde denne gangen.
- Vurdering av feilmekanismer gikk for fort. Workshop'en burde bruke mer tid på "failure mode screening" og vurdere i mer detalj hva som kan lede til brudd. En grovanalyse ble savnet, og hendelsestre-analysene startet for tidlig med detaljene. Man skulle ha brukt mer tid på hva som kan gå galt.
- Risikoanalysen satte usikkerhetene i et system, men analysen er likevel kvalitativt.
- I analysene om flom var det uenighet om det var usikkerhet i PMF-flommen. Enkelte mente at det ikke var mulig, gitt beregningene fra 2010, at en flom kunne være større enn PMF-verdien. Det ble foreslått at det var null usikkerhet på PMF-verdien. Majoriteten mente at det var usikkerhet rundt den beregnende verdien av PMF, begrunnet med at det er usikkerheter i flomberegninger i dag (det er mange forskjellige forskningsgrupper utenlands som arbeider med forbedringer i metoder og beregninger). På workshop'en ble det bestemt at risikovurderingen ikke ville ha vært komplett uten en analyse med flom som utløsningsmekanisme. Faktisk var denne bruddårsaken en av dem som ga høyest sannsynlighet for brudd.

Om risikovurderinger av dammer

- Risikovurderinger bør være et verktøy for dameierne. Etterspørselen for risikoanalyser bør være drevet av dameierne og/eller bransjen. Det er mange krav som treffer anleggene. Hva angår den faktiske sikkerheten er den vanskelig å fastslå idet mange faktorer må komme inn i vurderingene. Det er mange deterministiske krav. En risikoprosess som viser til sårbarheter og områder hvor det er mer enn god nok sikkerhet bør kunne bidra til å "uniformere"

sikkerhetsnivået for forskjellige dammer. Man bør se på problemstillingene fra et totaløkonomisk synspunkt.

- Man må ikke slutte med deterministiske analyser men heller komplette deterministiske resultater med risikovurderinger. Probabilistiske analyser gir anledning til å oppdage "nye ting".
- Hvilket formål skal risikoanalyser tjene? Identifisere hva det(de) kritiske elementet(er) er. Assistere dameier i å avgjøre hvor man bør bruke sine ressurser best. Identifisere problemområder der tiltak bør iverksettes. Det gjøres i dag 20 til 30 ROS (risiko og sårbarhets) analyser hvert år, men det gjøres på et grovere nivå.
- Bør risikoanalyser av dammer brukes i Norge: Dammer som ikke tilfredsstillers dagens forskrifter bør analyseres probabilistisk for å etablere hvilke forbedringstiltak som vil ha mest effekt på aspektene som bør forbedres, og for å avgjøre hva som er en optimal bruk av ressursene. Risikoanalyser vil også være nyttig for NVE som et tilleggsverktøy under sikkerhetsvurdering og godkjenning av en dam.
- Hvor mye tid vil det ta for å "forbedre" ett tall i hendelsestre-analysen? Gjøre to risikoanalyser? Oppgradering i forhold til forskrifter. Alternative metoder kan vurderes: denne dammen får beste effekt av å gjøre et spesifikt tiltak, selv om ikke de formelle, deterministiske kravene er tilfredsstillt. Må søke om dispensasjon fra forskriftskrav. Hjelp å finne løsninger når forskriftskravene ikke er innfridd. Identifikasjon av noe annet enn det som står i forskriftene. Problem med is og snø i overløpet ble oppdaget i workshopen. Finne frem andre ting enn det som forskriftene krever.
- Ingen steinfyllingsdam har gått til brudd.
- Risikovurdering kan ikke erstatte "revurdering" av en dam, men analysen kan være en del av revurderingen, og gi mye nyttig tilleggsinformasjon. Kostnadene knyttet til risikoanalyser er mye lavere enn selve iverksettingen av tiltak.
- Det er 20 år siden bransjen har vært gjennom en slik probabilistisk øvelse. Risikoanalyse er brukt i mye større grad i utlandet. Norske steinfyllingsdammer med morenekjerne er mye sikrere enn de fleste dammer i utlandet. Statistikkene fra Fell et al (2015) og andre gir et mer negativt internasjonalt bilde enn situasjonen er i Norge.
- Rapporten bør si noe om "akseptable risikoverdier" (dette finnes i Vedlegg G).
- Hvordan forteller man samfunnet hva risikoen er?

"Lessons learned"

- Øke instrumentering på dammer i Norge. Selv enkle systemer kan gi nyttig informasjon. Bransjen har ikke vært flink i Norge med instrumentering og oppfølging av instrumenteringen på dammer. Når det "vipper" rundt sikkerhetskravet, kan instrumenteringsresultater være en god dokumentasjon og kan gis vekt under et argument.
- Det bør alltid være lekkasjemålere installert på fyllingsdammer. Den største sannsynligheten for brudd er generelt indre erosjon. Lekkasje og deformasjoner for en dam er som blodtrykk og temperatur for mennesker.

- Det bør være en beredskapsplan med tiltak for uventet oppførsel.
- God overvåking bør kunne gi dispensasjon fra enkelte forskriftsmessige krav.
- Det er behov for å vurdere om sikkerheten mot adgang for uvedkommende er tilstrekkelig for dammer i Norge.

8 Konklusjoner

De nye beregningene i 2016 tilsier at den årlige bruddsannsynlighet for Dam Dravladalen er 10^{-5} / år eller én gang per 100.000 år. Den beregnede årlige bruddsannsynligheten er lavere enn den internasjonalt rapporterte bruddfrekvensen for dammer, basert på publiserte tall og ICOLD-statistikk. De nye analysene gir også et områdetall (maksimum og minimum) for bruddsannsynlighet i tillegg til et best estimat, noe som kan være nyttig i beslutningsprosesser.

Risikovurdering ble gjennomført i to omganger for dam Dravladalen. I 1996, førte risikovurderingen til at en viktig, og til da nærmest oversett, bruddmekanisme ble identifisert, og ga insentiv til omfattende rehabilitering. Analysene i 2016, når de sammenlignes med resultatene fra 1996, viser at rehabiliteringstiltakene mellom 1996 og 2016 reduserte den beregnede bruddsannsynlighet betydelig. Reduksjon i risiko ble vist for både tilfellet 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet' og for 'jordskjelv', og for den sammenlagte bruddsannsynligheten for brudd av geotekniske og naturlige årsaker. Risikoreduering skyldes rehabiliteringstiltakene siden 1996 og ikke forskjeller i analysemetodikk i 1996 og 2016. Tiltaket som bidro mest til reduisering i bruddsannsynlighet er knyttet til flomløpet: overbygg med tette sidevegger over eksisterende flomløp, økt kapasitet til flomløpssystemet med strossede tunnel, innløp til tunnel og øvre deler av utløpskanalen, tetningsvegg for å forhindre gjennomtrekk og oppsamling av fokksnø i tunnelen og betydelig senkning av terrenget i forkant av overløp konstruksjonen som ble satt i gang av Statkraft.

Beregnet sannsynlighet for brudd forårsaket av indre erosjon (som er den hyppigste årsak til brudd i fyllingsdammer) ble omtrent den samme i 2016 som i 1996 ($P_f = 10^{-5}$ /år), selv om de ble beregnet på forskjellige måter. Analysene viser at Dam Dravladalen, med en beregnet bruddsannsynlighet på 10^{-5} per år på grunn av indre erosjon, har et akseptabelt risikonivå, og har en vesentlig lavere bruddsannsynlighet enn det som internasjonal statistikk tilsier.

Selv med en god sikkerhet mot dambrudd, er ikke dette noe argument for å stoppe overvåkingsprogrammene som gjennomføres i dag. Endringer i dammens oppførsel bør følges nøye, og klimaendringer kan påvirke fremtidig sikkerhetsnivå. Et godt overvåkingsprogram bør også ha beredskapsplaner med tiltak mot uventet oppførsel, skulle noe uventet skje. Det er anbefalt at man vurderer mulige utfordringer i fremtiden og har en plan for hva man bør gjøre hvis disse utfordringene skulle inntre.

Workshopdeltagerne konkluderte også at risikovurdering bør bli et nyttig verktøy for dameierne. Hva angår den faktiske sikkerheten for en dam er den vanskelig å fastslå idet mange faktorer må komme inn i vurderingene. En risikoprosess som viser til sårbarheter og områder hvor det er mer

enn god nok sikkerhet, bør kunne bidra til å "uniformere" sikkerhetsnivået for forskjellige dammer. Risikoanalyser vil være mest nyttig til å identifisere hva det(de) kritiske elementet(er) er, sammenligne forskjellige scenarier og sammenligne sikkerheten for forskjellige dammer. Resultatene fra analysene vil kunne bidra til dokumentasjon i avgjørelser om hvor man best bør bruke sine ressurser. Risikoanalyser vil også være nyttig for NVE som et tilleggsverktøy ved sikkerhetsvurdering og godkjenning av en dam.

En konklusjon fra workshop'en er at man bør øke instrumentering på dammer i Norge. Selv enkle systemer kan gi nyttig informasjon. Når det "vipper" rundt sikkerhetskravet kan instrumenteringsresultater være en god dokumentasjon og kan gis vekt under et argument. Det bør alltid være lekkasjemålere installert på fyllingsdammer. Den største sannsynligheten for brudd av geotekniske årsaker er indre erosjon. Samtidig bør god overvåking kunne gi dispensasjon fra enkelte forskriftsmessige krav.

9 Acknowledgment

NGI takker workshopdeltagerne for deres bidrag til rapporten, spesielt Per Magnus Johansen for hans hjelp med innsamling av data og til Reidar Birkeland, Statkraft AS, for hans konstante og meget raske assistanse under workshop'en. NGI ønsker også å takke Statkraft AS for tillatelse til å bruke Dam Dravladalen for analysen.

10 Referanser

- CM Consulting (2008a). Dravladalsdammen. Prosjektrapport. Rapport til Statkraft Energi AS. Rapportnr 2008P1010-01, 26. juni 2008
- CM Consulting (2008b). Flomberegning Dravladalsvatn. Rapport til Statkraft Energi AS. Rapportnr 20087P1010-01, 11.april 2008
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. and Foser, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams*. 2nd Edition. CRC Press (Balkema). Lieden, NL. 1348 pp.
- Hartford, D.N.D. and Baecher, G.B. (2004). Risk and uncertainty in dam safety. Thomas Telford, UK. 391 pp.
- Høeg, K. (1996). Performance Evaluation, Safety Assessment and Risk Analysis for Dams. *Hydropower and Dams*. V 6. 3. 8p.
- IPCC (2012). "Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change adaptation". A Special Report of Working Group I and Working Group II of the International Panel on climate change. https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf
- Kjærnsli, B. (1992). Sikkerhet av norske fyllingsdammer mot brudd forårsaket av indre erosjon og derav følgende øket lekkasje gjennom og under dammen. Rapport til "Prosjekt damsikkerhet". NGI rapportnr 904084-1. 22 januar 1992.
- Kjærnsli, B. Valstad, T. and Høeg, K. (1992). Rockfill Dams. Design and Construction. Hydropower development, Vol. No.10. 148p.

- Nadim, F. (2016). Challenges in managing the risk posed by extreme events. Keynote Paper. 6th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications (APSSRA6). Shanghai, China. H.W. Huang, J. Li, J. Zhang & J.B. Chen (eds). pp. 62-70.
- NVE (2015). Klilmaendring og damsikkerhet: Analyse av dammers sårbarhet for økte flommer. NVE Rapport 94/2015. ISBN 978-82-410-1146-7. (G.H: Midttømme).
- NGI (2004). Tsunami modelling and prediction. Pre-project: Slide-generated waves in Reservoirs. Report to NVE. NGI/ICG Report 20031100-1. 30 November 2004 (Carl Harbitz).
- NGI (2016). Dam sikkerhet i et helhetlig perspektiv. "State-of-the-Art" om risikoanalyser for dammer. NGI rapport til Energi Norge. Rapportnr 2015 0624-01-R-01. Datert 2016-06-01.
- Norconsult (2010). Folgefonn. Dambruddsbølgeberegning for strekningen Dravladalsvatn – Hardangerfjorden. Rapport for Statkraft Energi AS. Dokument nr M:\500266\Doc-\Dravladalsdammen 15.92.10.doc. Februar 2010.
- NOU (2000). Et sårbart samfunn. Utfordringer for sikkerhets og beredskapsarbeidet i samfunnet. Norges offentlige utredninger 2000:24. Oslo 2000.
- Peck, R.B. (1989). Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics. *Geotechnique*. **19** (2) June 1969. pp. 171-187.
- Vick, S. (2002). *Degrees of Belief. Subjective Probability and Engineering Judgment*. ASCE Press. 405 pp.

Vedlegg A

DAM DRAVLADALEN

Innhold

A1.	Bakgrunn	2
A2.	Dam Dravladalen fram til 1996	2
A3.	Pålitelighetsanalysene utført i 1996.....	9
	A3.1 Formål med analysene	9
	A3.2 Resultater av probabilistiske analyser	9
A4.	Dam Dravladalen fra 1996 til 2015.....	12
	A4.1 Tiltak 1996–2008	12
	A4.2 Flomberegninger (2008)	13
	A4.3 Reguleringsanlegg	13
	A4.4 Anbefalte rehabiliteringstiltak i 2008	14
	A4.5 Beregninger av stabilitet med nye tiltak	15
	A4.6 Gjennomførte tiltak etter 2008	16
	A4.7 Damkontroll under rehabiliteringsarbeidene	18
	A4.8 Vurdering av utførte arbeider og ferdig resultat	18
A5.	Dokumenter brukt som kilder	19
A6.	Bilder av Dam Dravladalen før, under og etter rehabilitering.....	20
	A6.1 Før rehabilitering	20
	A6.2 Under rehabilitering	23
	A6.3 Etter rehabilitering	24
A7.	Instrumentering på Dam Dravladalen	30

A1. Bakgrunn

Som en introduksjon til workshop'en 'Risikovurdering av Dam Dravladalen' ble Dam Dravladalens' historie kort beskrevet. Vedlegget reproduserer informasjonen som ble sendt ut til deltagerne før workshop'en. Dokumentet var en oppsummering av generelle forhold rundt dammen, enkelte observasjoner som ble gjort under drift, samt en kort oppsummering av resultatene fra probabilistiske analyser utført i 1996. Informasjonen ble delt i tre hovedavsnitt:

- Dam Dravladalen frem til 1996
- Resultater av pålitelighetsanalysene utført i 1996
- Dam Dravladalen fra 1996 til 2015

I tillegg ble bilder av Dam Dravladalen og enkelte aspekter av instrumenteringen på Dam Dravladalen ble gjengitt etter tillatelse fra Statkraft AS.

A2. Dam Dravladalen fram til 1996

Dam Dravladalen ble bygd i perioden 1971–1972 som en del av Folgefonn-utbyggingen til Vestlandsverkene (Fig. A2.1 og A2.2). Dam Dravladalen ligger i Jondal kommune i Hordaland fylke og demmer opp Dravladalsvatn, som er en av inntaksmagasinerne til Jukla pumpekraftverk. Dammen er en steinfyllingsdam fundamentert på fjell med en sentral skråttliggende tetningskjerne av morene.

Damanlegget består av en fyllingsdam og et overløp (Figur A2.3 og Figur A2.4). Fyllingsdammen er totalt 340 m lang og maksimalt 29 m høy med sentral tetting av morene fundamentert på fjell og krone på kote 961,50. Damkronen har en bredde på 7,5 m.

Overløpet av betong er 25 m langt med topp på kote 957,00 og maksimal høyde 3 m. Det går ikke gangbane over overløpet. Fra overløpet ledes vannet videre gjennom en 45 meter lang flomtunnel med tverrsnitt 28 m^2 , like på sørsiden av dammen. Hver side av overløpet er avgrenset av 70 cm brede vanger på kote 958,22 og med samlet lengde ca. 25 m.

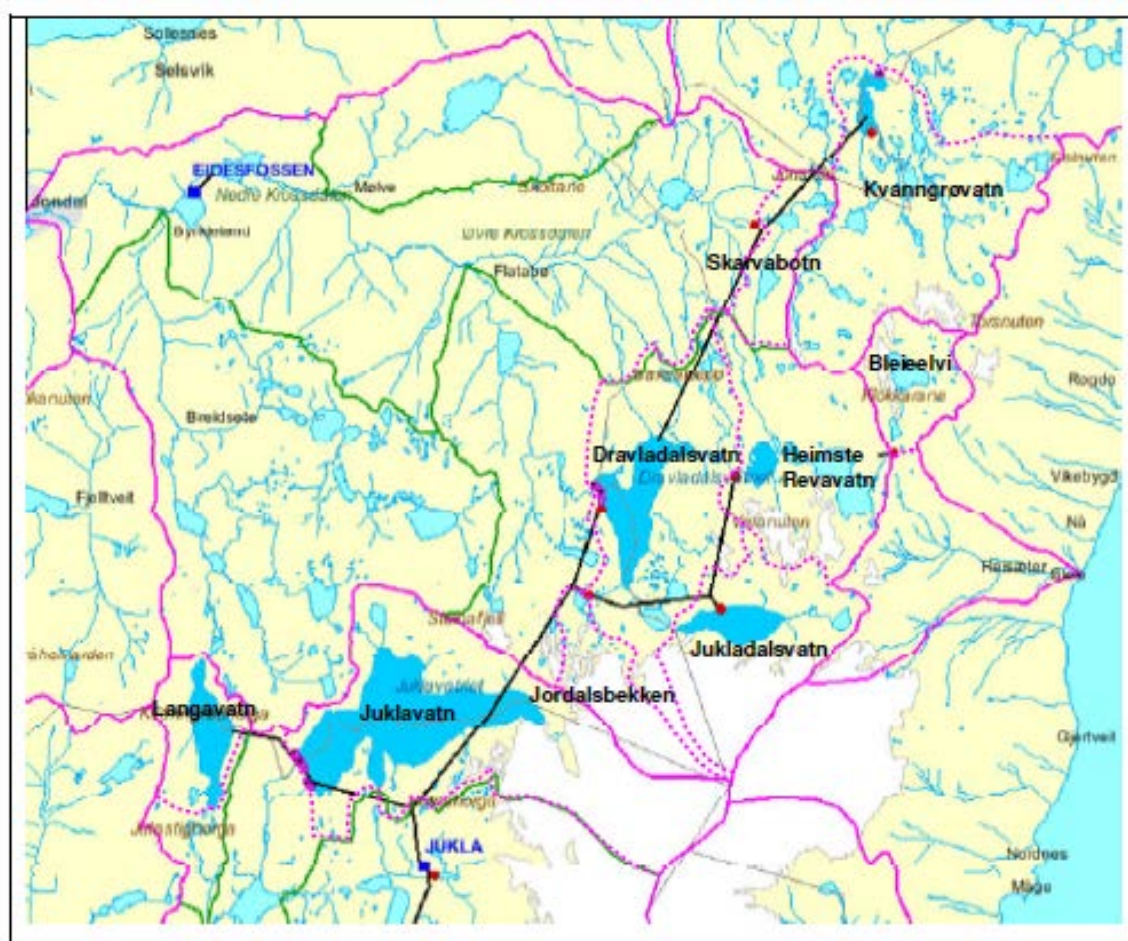
Mot slutten av byggeperioden ble det bestemt at flomløpets lengde skulle kortes inn for å hindre at mindre flommer skulle bli forsterket etter reguleringen, noe som medførte at damhøyden ble økt med 0,5 m.

Dammen er klassifisert i bruddkonsekvensklasse 3 med krav om dimensjonering for 1000-årsflom (Q_{1000}) og med sikkerhetsvurdering for påregnelig maksimal flom (Q_{PMF}). Flomavledningen skjer over en overløpsterskel i betong og videre gjennom en flomtunnel mot elveleiet nedstrøms dammen.

Data for Dam Dravladalens magasin er som følger:

HRV ¹ :	957 moh ²
LRV ³	880 moh
Reguleringshøyde ved dam	29 m
Magasinvolument ved HRV	58 mill. m ³

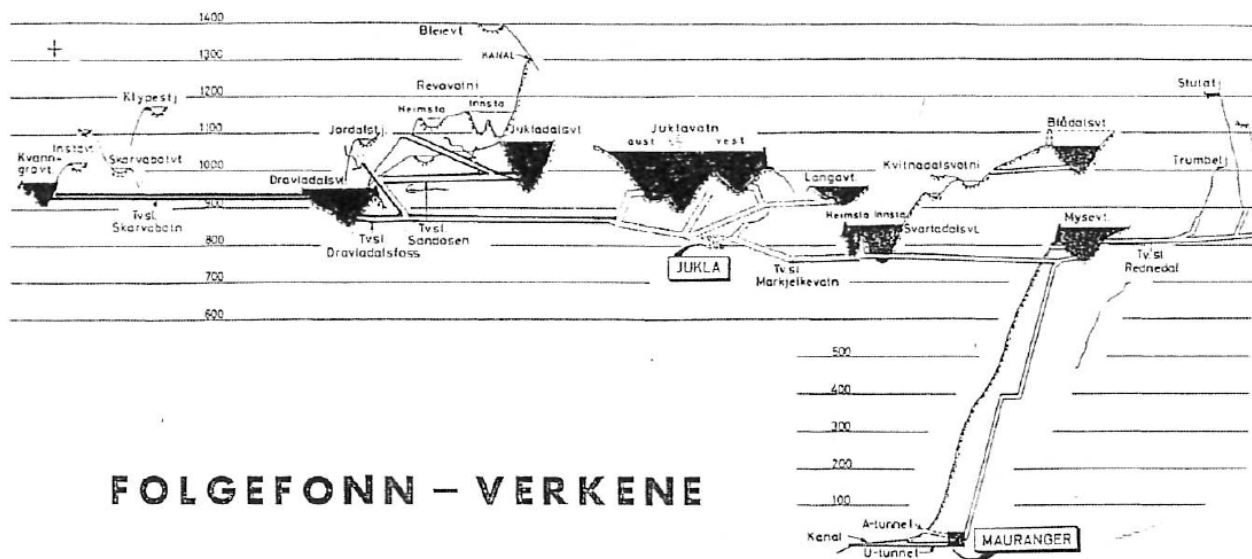
Reguleringsområdet vises i Figur A2.1. Statkraftverkene var entreprenør for bygging av dammen. Figur A2.5 og A2.6 gir dammens lengdeprofil og tverrsnitt i 1994. Dam Dravladalen ble bygget med en standard på skråningen som ikke er i henhold til dagens praksis (steilere nedstrøms skråningshelning). Kornfordeling for soner 1, 2 og 3 i Dam Dravladalen er vist i Figur A2.7.



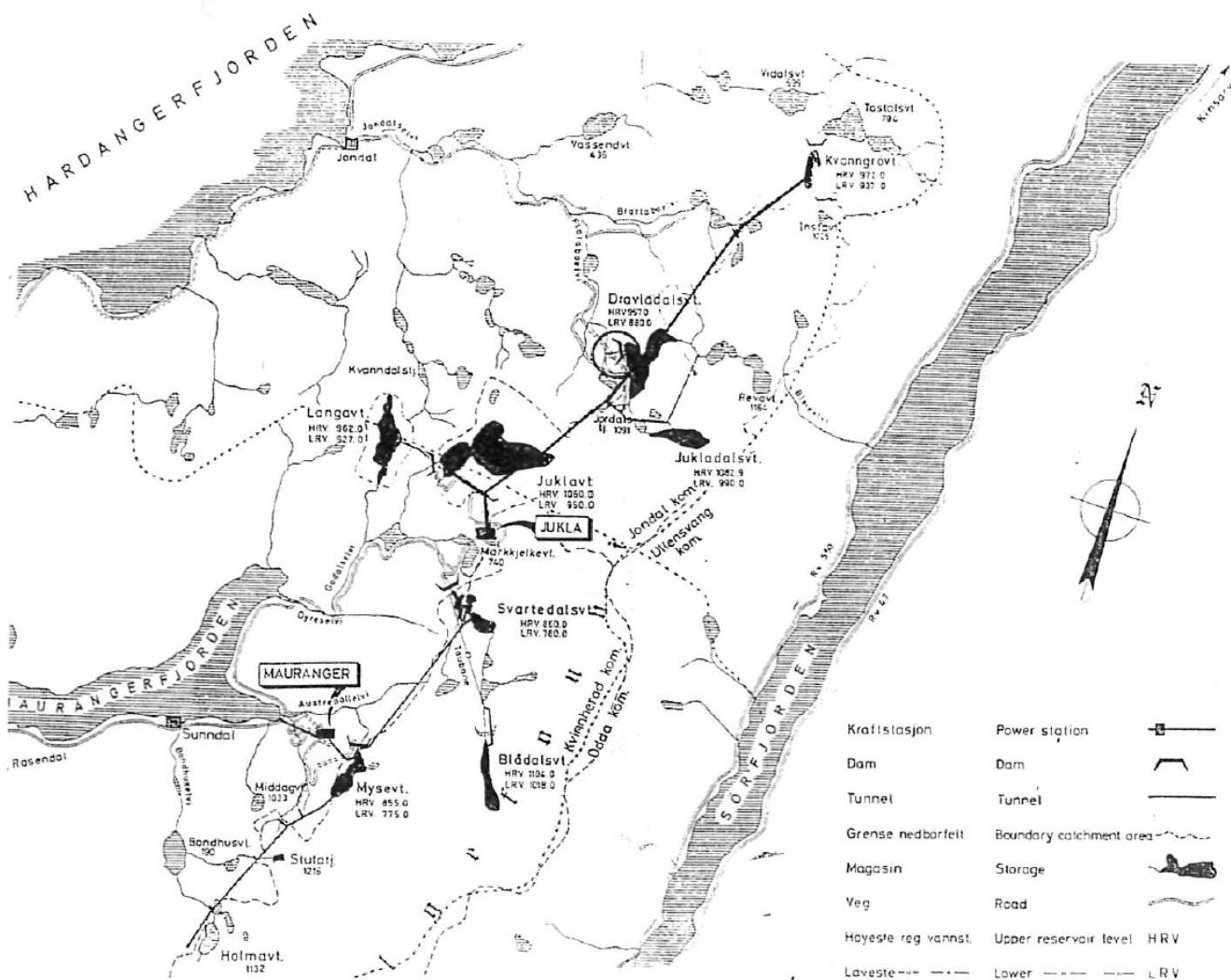
Figur A2.1 Reguleringsområdet for Dam Dravladalen (CM Consulting 2008a).

Statkrafts vurdering (Statkraft 1994) tilsa at ved en maksimal flomsituasjon (PMF⁴) var det et fribord til topp kjerne på 0,5m. Det er i forbindelse med siste revurdering nylig gjennomført en beregning av avløpskapasiteten for flomtunnelen på Dravladalsdammen.

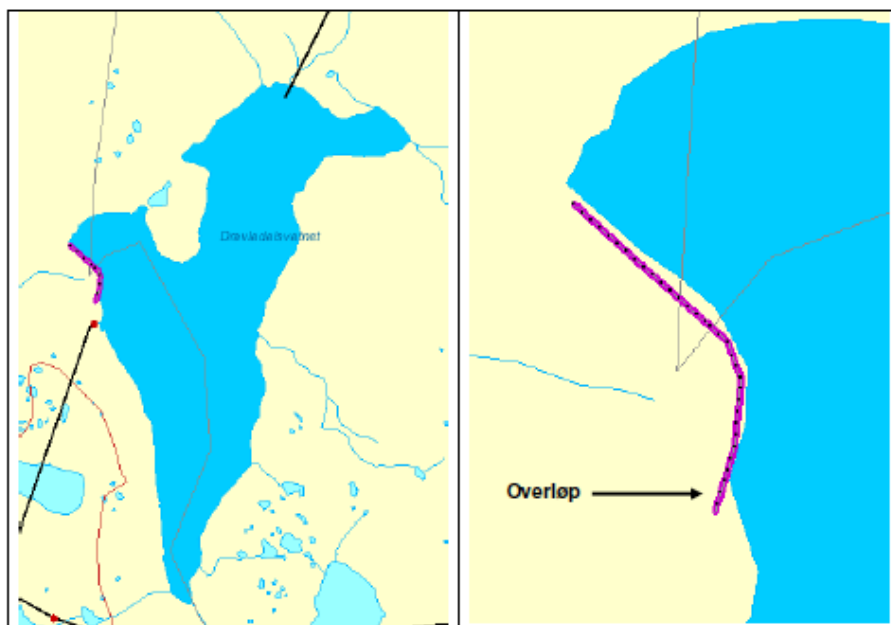
¹ HRV: høyeste reguleringstilstand
² moh: meter over havet
³ LRV: laveste reguleringstilstand
⁴ PMF: "probable maximum flood"



FOLGEFONN – VERKENE



Figur A2.2 Oversikt over Folgefonnverkene.



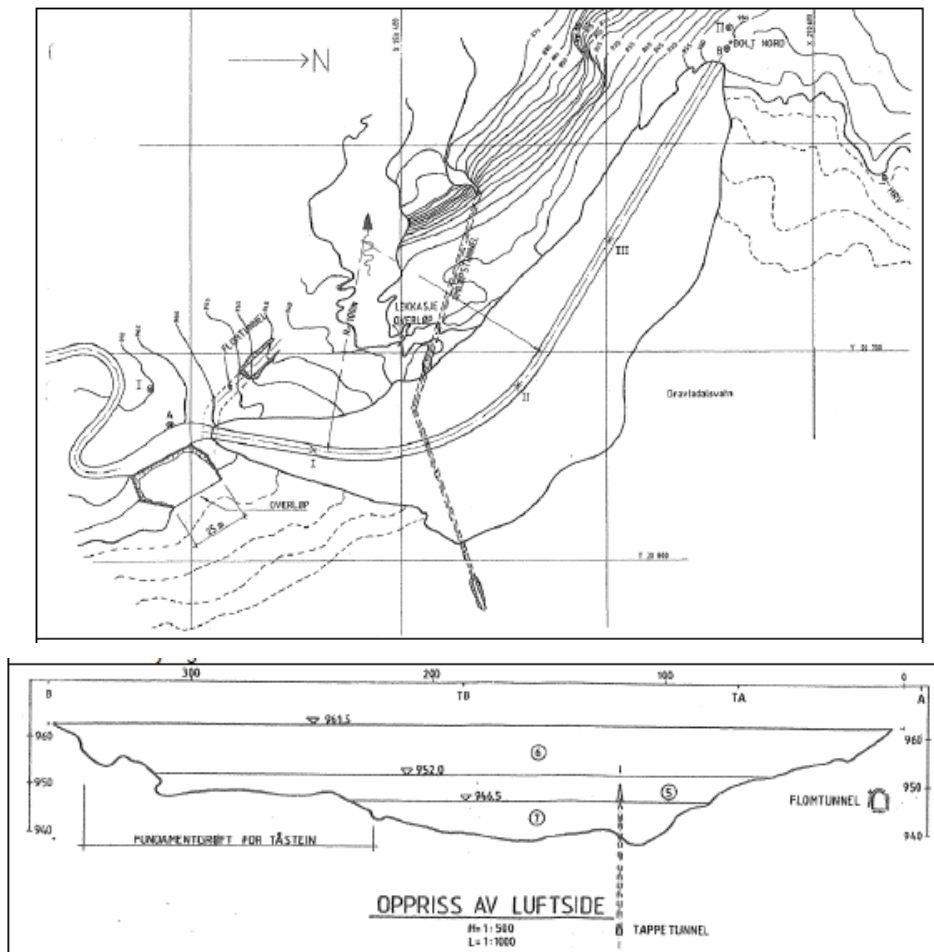
Figur A2.3 Kart over Dravladalsvatn og damsted (CM Consulting 2008a).



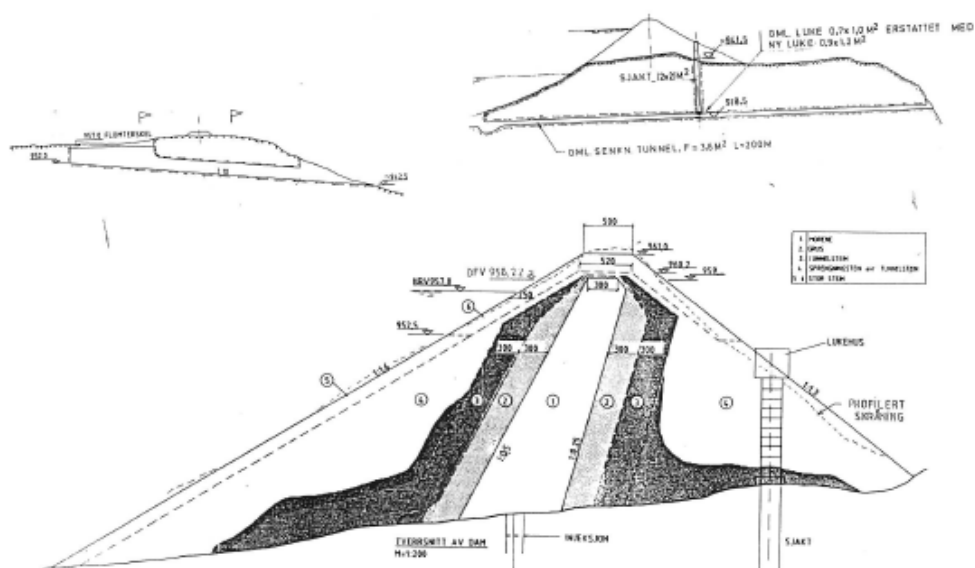
Figur A2.4 Dam Dravladalen og overløp (CM Consulting 2008a)
 (venstre: Dravladalsvatn fyllingsdam med overløp; høyre: Dravladalsvatn overløp)

Lekkasje ble målt et lite stykke nedstrøms for damtåa og var derfor påvirket av nedbør, snøsmelting og eventuelt evaporasjon. Figur A2.8 gir en oversikt over målt lekkasje mot vannstand i 1974 og 1994. I 1994, basert på laboratorieundersøkelser av morenen, var den forventede lekkasjen på ca. 1 – 10 l/s. Registrert lekkasje var 11-13 l/s. Målte deformasjoner var små.

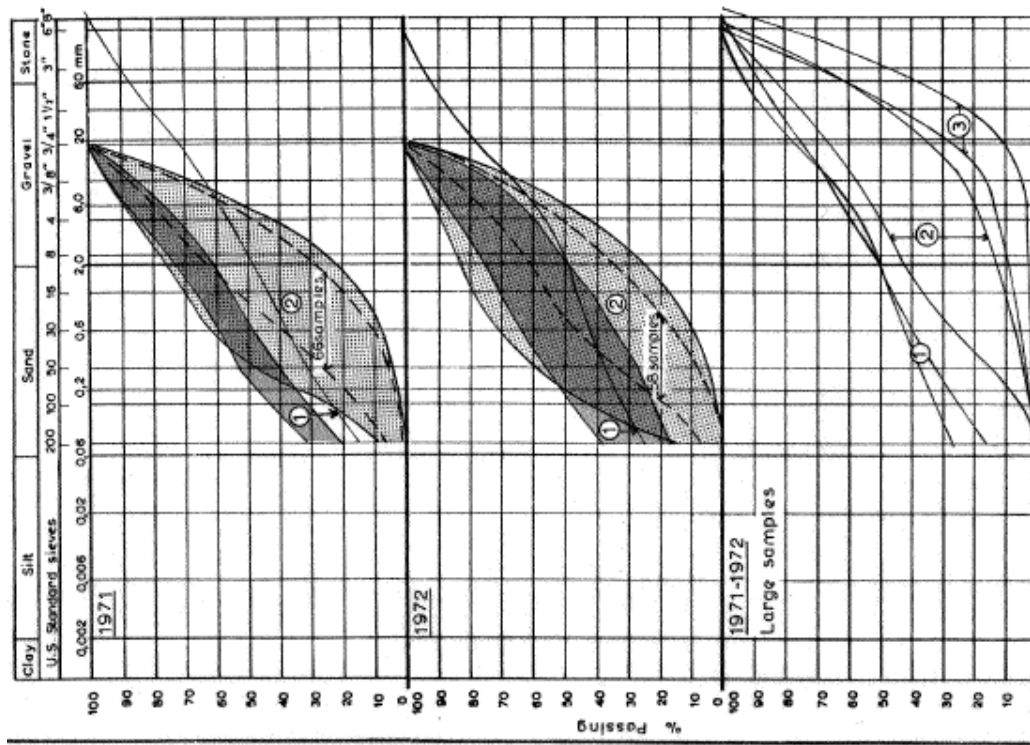
Figur A2.9 illustrerer vannstand og lekkasjemåling nedstrøms Dam Dravladalsvatn i perioden 01. januar 2013 – 01. januar 2016. «Toppene» i lekkasjen i mars/april 2015 skyldes feilmåling/falskt vann som følge av snøsmelting. Lekkasjene ved dammen er små (typisk mellom 0 og 10 l/s), spesielt sammenlignet med resten av dammene i Folgefonn (Jukla, Svartedal og Mysevatn). Det er ikke spor av finstoff i vannet. Normal lekkasje er mellom 3 og 8 l/s (R.Birkeland, personlig kommunikasjon, epost 22. januar 2016).



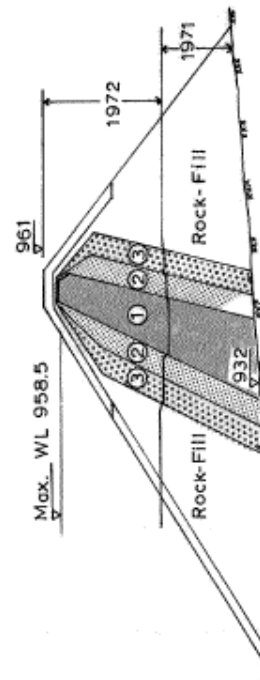
Figur A2.5 Plantegning (øvre) og lengdesnitt (nedre) av Dam Dravladalen (2008)



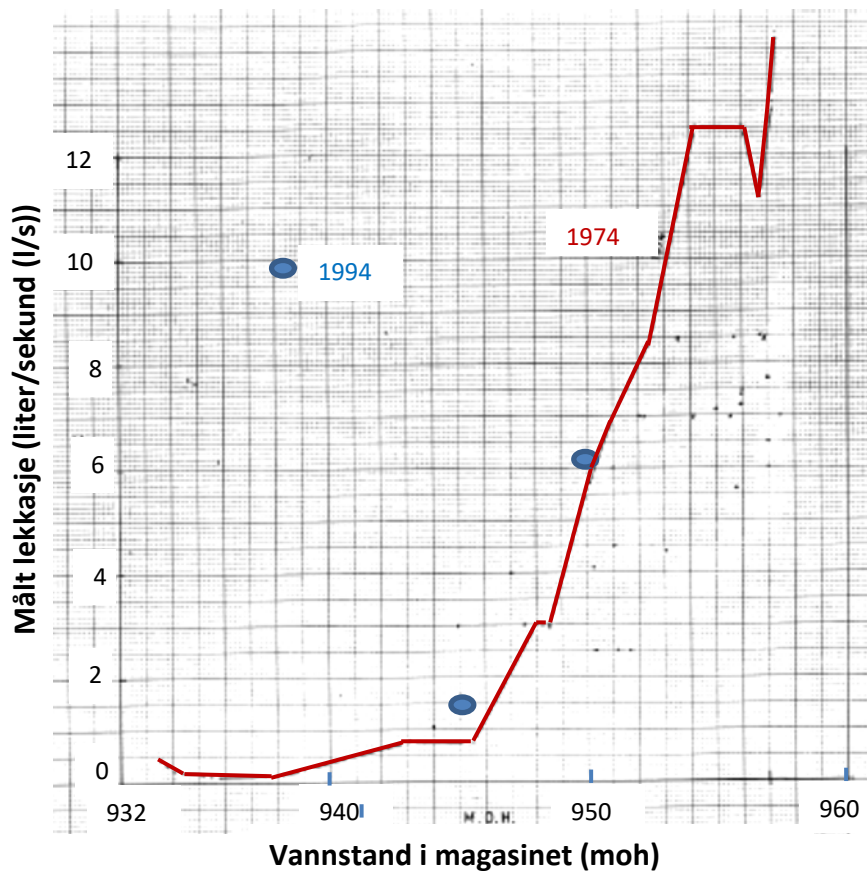
Figur A2.6 Tverrsnitt av Dam Dravladalen (1994) (til venstre, lengdeprofil, flomtunnel).



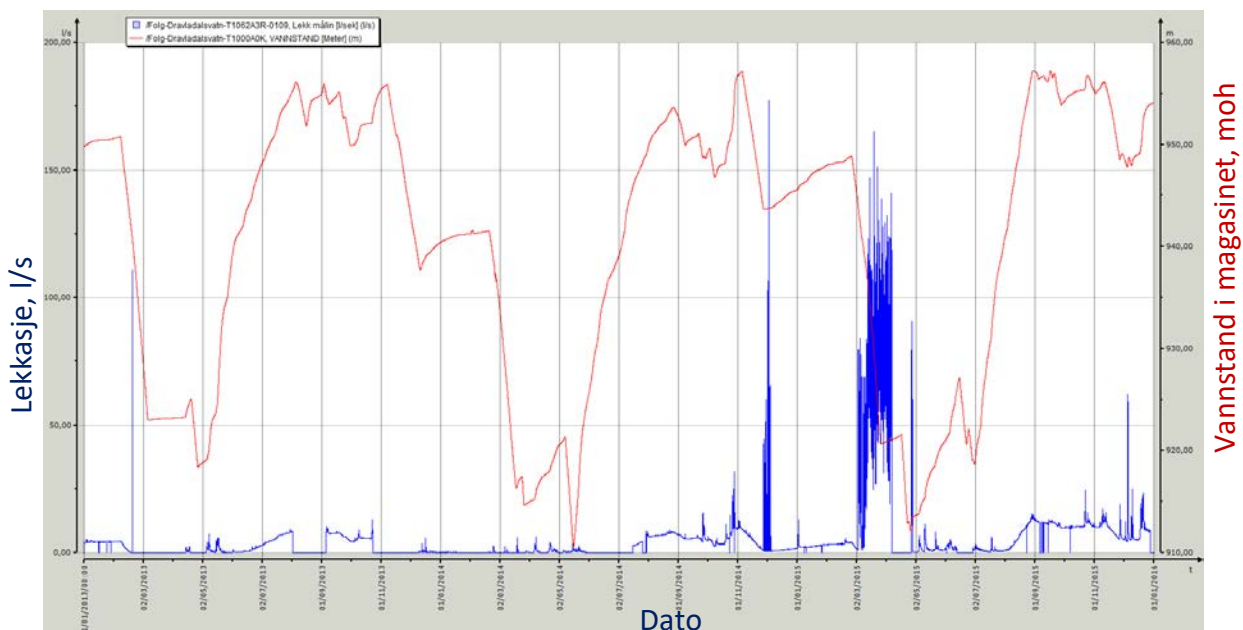
- 1971
- Zone ① 21 samples (< 3/4") + 1 large sample
- Zone ② 74
- 1972
- Zone ① 36 samples (< 3/4") + 1 large sample
- Zone ② 65
- 1971-1972
- Zone ① 2 large samples
- Zone ② 2
- Zone ③ 2



Figur A2.7 Kornfordeling i kjernen og soner 2 og 3, Dam Dravladalen (NGI 1983)



Figur A2.8 Målte lekkasjer, Dam Dravladalen (1974 og 1994)



Figur A2.9 Vannstand og lekkasjemåling 2013 – 2016 på Dam Dravladalen (Statkraft, R. Birkeland, personlig komm. 2016).

A3. Pålitelighetsanalysene utført i 1996

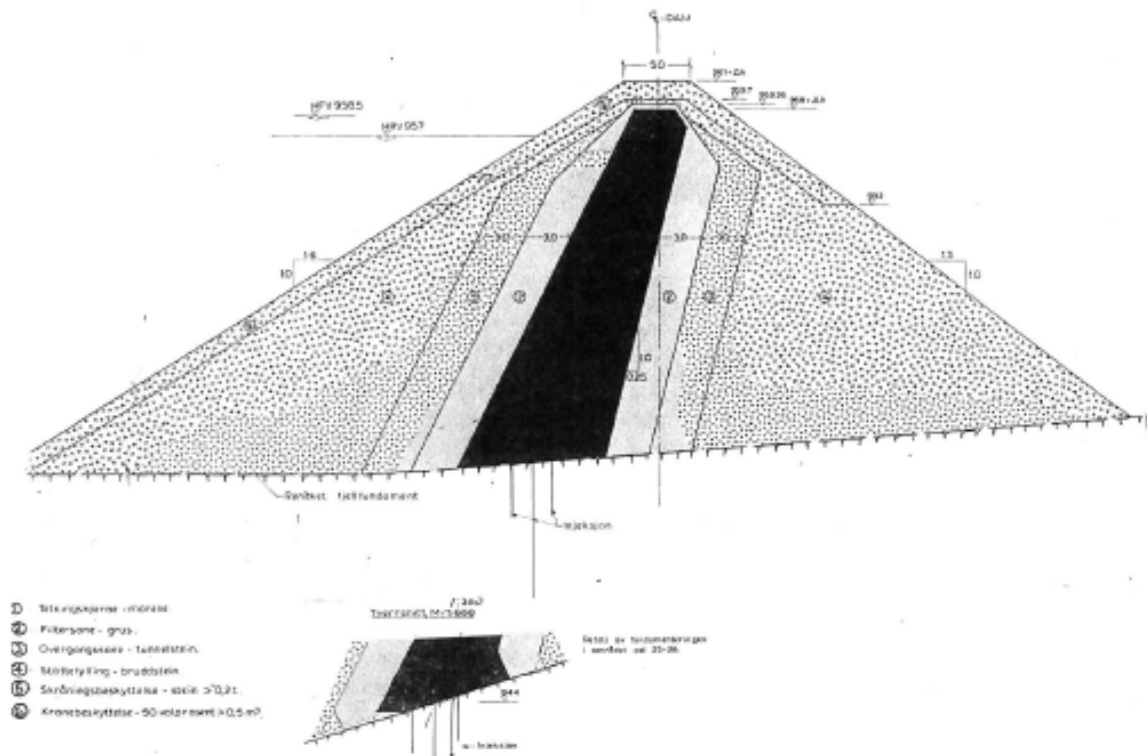
A3.1 Formål med analysene

Formålet med analysene var å kartlegge hvilke bruddmekanismer som mest sannsynlig vil kunne inntreffe for Dam Dravladalen, anslå sannsynlighet for brudd og sammenligne bruddsannsynligheten med den estimert for fem andre steinfyllingsdammer i Norge. Sammenligningen ble ansett som et viktigere resultat enn de absolutte verdiene anslått for bruddsannsynlighetene.

A3.2 Resultater av probablistiske analyser

1996-workshop

Workshop'en i 1996 samlet flere erfarne personer fra Berdal Strømme, NGI, Statkraft og Steven Vick, privat konsulent fra Colorado, USA som var (og er fortsatt) en ekspert på området risikovurdering av dammer. Steven Vick, som hadde lang erfaring med tilsvarende workshop'er, ledet workshop'en (Vick 2002). Damtverrsnitt brukt for analysen er vist i Figur A3.1.



Figur A3.1 Tverrsnitt av Dam Dravladalen brukt for sannsynlighetsanalyser i 1996

De utløsende mekanismene for Dam Dravladalen kan inndeles i tre kategorier:

- 1) Hydrauliske hendelser (flom/bølgeerosjon/ras utløst av sterk nedbør etc.).

- 2) Seismiske hendelser (skader forårsaket av jordskjelv, ras utløst av jordskjelv etc.).
- 3) Andre hendelser (indre erosjon, utglidninger) som kan oppstå i en "vanlig" driftssituasjon

Et eksempel på analyse for hydrauliske hendelser (flomsituasjoner) er gitt nedenfor. Tilfellet som er vurdert er for damovertopping på grunn av snø/is i overløpet. Følgende fire bruddårsak eller –mekanismer ble diskutert:

- 1) Flom: Overløp har tilstrekkelig kapasitet for en PMF-flom. I tillegg har man tappemuligheter ved dammen og gjennom "by-pass" i stasjon.
- 2) Tilstopping i overløp: Over tregrensen, ingen flytetorv eller drivved som kan tilstoppe overløpet.
- 3) Bølgeerosjon: Meget lite strøk og derved små bølger i forhold til kvalitet av oppstrøms skråningsvern.
- 4) Snøras inn i magasin: Topografien er slik at det blir akkumulert relativt små mengder snø. Det nødvendige snøvolumet for å forårsake tilstopping (som var $> 500\ 000\ m^3$).

Hendelsestrær konstrueres ved å stille de "riktige" spørsmålene. For et potensielt brudd av dammen på grunn av indre erosjon ble følgende spørsmålsrekke reist for Dam Dravladalen:

- 1) Vil finstoff kunne transporteres/eroderes fra tetningskjernen?
- 2) Vil lekkasjen kunne øke slik at situasjonen kan betegnes "labil"?
- 3) Vil lekkasjen oppdages?
- 4) Kan vi nå frem til dammen før en labil situasjon oppstår?
- 5) Er lukene operative? Vil magasinet senkes?
- 6) Vil et progressivt brudd starte?
- 7) Vil dammen gå til brudd?

Resultater

Analysene for Dam Dravladalen beregnet sannsynligheter for brudd for fire kategorier hendelser (Tabell A3.1). I 1996 ble sannsynligheten for dambrudd for en fyllingsdam i Norge som har oppført seg "normalt" i 20 til 25 år vurdert som $P_f \text{ årlig} = 1,5 \times 10^{-5}$. Den høyere sannsynligheten for brudd for Dam Dravladalen⁵ enn for andre norske dammer som ble analysert skyldes i hovedsak usikkerheten omkring erosjon av hardpakket snø (snøplugg) i overløpet. Derimot ble det gjort klart, som en del av vurderingen at ingen dammer hadde gått til brudd på grunn av et flomoverløp fylt med snø eller is.

Skadekonsekvensene ved et eventuelt brudd ble ikke vurdert, men det ble ansett som sannsynlig at et brudd i en steinfyllingsdam vil ta en viss tid for å utvikle seg slik at dameieren vil ha tid til varslings hvis "unormal" oppførsel/hendelse ble oppdaget i tide. Det ble derfor ansett som viktig at dameieren har en mulighet til enhver tid å kunne dokumentere dammens funksjonalitet og tilstand ved overvåking av vannstand og lekkasje.

⁵ Det ble i 1990-årene utført sannsynlighetsanalyser for flere norske dammer, inklusivt Dam Trollaldalen (Songa), Dam Viddalen, Dam Venemo, Dam Dravladalen og Dam Svartevann.

Tabell A3.1 Resultater av sannsynlighetsanalyser fra 1996 for Dam Dravladalen

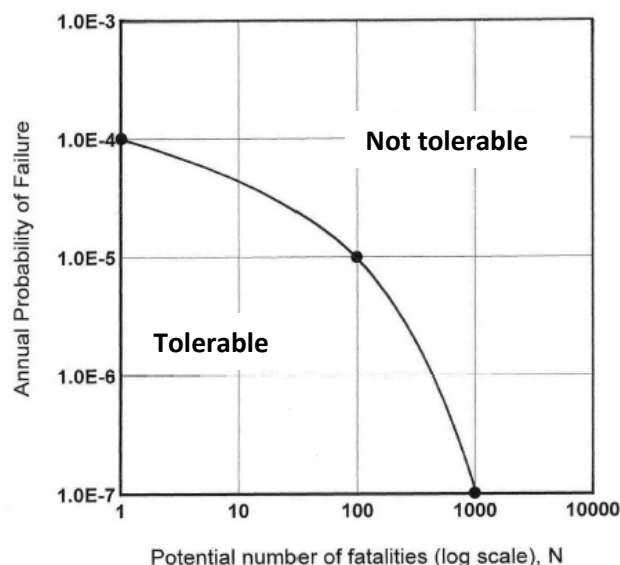
Hendelse	Mest sannsynlig bruddmekanisme	P_f årlig fra 1. vurdering	P_f årlig fra 2. vurdering*
Seismisk hendelse	Overtopping forårsaket av setning av dammen	$< 1,5 \times 10^{-6}$	$< 1,5 \times 10^{-6}$
Hydraulisk hendelse	Overtopping forårsaket av snøplugg i overløpet	3×10^{-3}	4×10^{-4}
Intern erosjon	Nedbryting av nedstrøms skråning og damtå	5×10^{-4} (over dammens levetid)	5×10^{-5} (over dammens levetid)
Sabotasje/terror hendelse	Overtopping forårsaket av sprengning av damtapp	$< 1 \times 10^{-5}$	$< 1 \times 10^{-5}$
<u>Alle hendelser (summen av enkelthendelser)</u>		<u>$< 3,5 \times 10^{-3}$</u>	<u>$< 4,6 \times 10^{-4}$</u>

* Annen iterasjon

Sannsynlighetsberegningene for Dam Dravladalen viste at det ikke var behov for rehabilitering av oppstrøms skråningsvern eller justering av nivåer eller bredder av topp dam eller topp av tetning. Analysene påpekte følgende momenter som burde vurderes i forbindelse med en rehabilitering av dammen:

- Installasjon av en automatisk lekkasjemålingsstasjon med overføring av verdier.
- Forbedre situasjonen i overløpet for å forhindre tilstopping av is og snø.
- Bidra til å belyse snøforholdene i overløpet i perioden januar til mai, og studere erosjonsmekanismer av kompakt snø.
- Øke drenasjekapasitet med en steintå i nedstrøms skråning.

Den anbefalte "tilsiktete" sannsynlighet for brudd for større dammer i Norge var i 1996 estimert til verdiene i Figur A3.2 (NGI 1996) som viser et såkalt F-N diagram.



Figur A3.2 Anbefalt "tilsiktet" sannsynlighet for brudd for større dammer i Norge i 1996

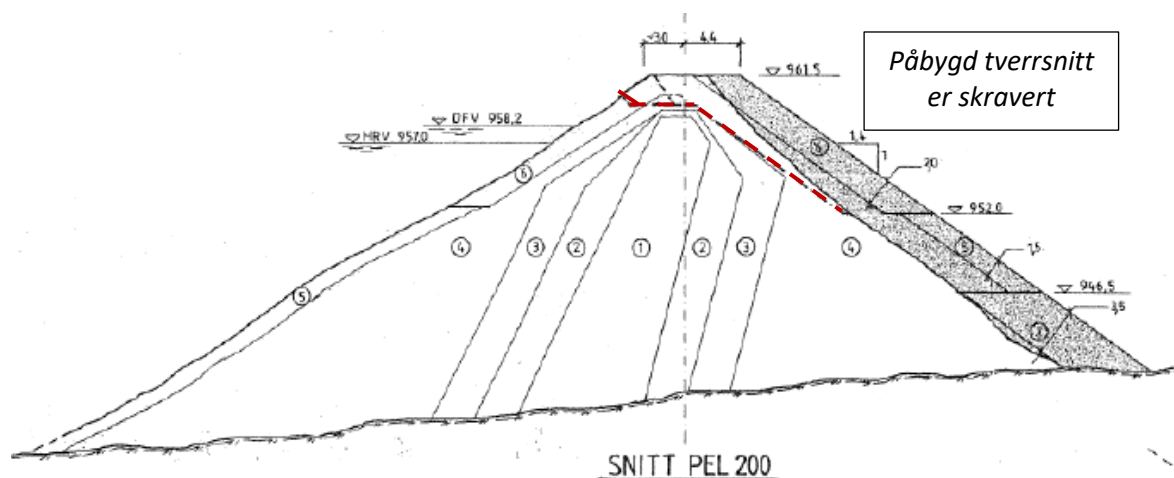
A4. Dam Dravladalen fra 1996 til 2015

A4.1 Tiltak 1996–2008

I 1997 ble det gjennomført en fornying av Dam Dravladalen med bakgrunn i pålegg fra NVE. Det ble etablert følgende:

- en ny damtå for å øke drenasjekapasitet,
- nytt lekkasjemålingssystem,
- nytt nedstrøms skråningsvern med slakere helning enn øverste del av den gamle skråningen,
- nytt kronevern,
- ny overløpsterskel.

Rehabilitering ga en betydelig standardheving. Oppstrøms skråning ble ikke endret. Figur A4.1 viser et snitt av dammen og hvilke masser som ble skiftet ut i forbindelse med rehabilitering (på store deler av dammen ble det også skiftet ut masser i damtoppen (rød stiplet linje). I juni 1996 (etter utførte sannsynlighetsberegninger) ble nivå på topp tetningskjerne målt til å være mellom 959,07 og 959,30 moh.



Figur A4.1 Tverrsnitt av rehabilitert Dam Dravladalen, 1:200 (1997). På store deler av dammen ble det også skiftet ut masser i damtoppen (stiplet linje) (CM Consulting 2008b).

Dam Dravladalen ble revurdert i 2003. I revurderingsrapporten fra 2003 ble konklusjonen at oppstrøms skråning må rehabiliteres samt at overløpsterskelen ble funnet å ikke være stabil ifølge beregningene.

I juni 2005 ble oppstrøms skråning grundig undersøkt. Konklusjonen ble at skråningen burde få en utforming eller utførelse som hindrer at det oppstår skader i fremtiden på grunn av islaster. For å få riktig utforming, burde skråningen beskyttes med utsortert grovfraksjonert blokk av tilstrekkelig størrelse. I 2008 var nedstrøms skråning 1:1,4 og oppstrøms skråning på ca 1:1,6.

A4.2 Flomberegninger (2008)

Det er utført flomberegning for reguleringsanlegget ved Dravladalsvatn, plassert i klasse 3 med krav om dimensjonering i forhold til 1000-årsflom (Q_{1000}) og sikkerhetsvurdering i forhold til påregnelig maksimal flom (Q_{PMF}). Beregningen er basert på bruk av NVEs programvare for flomfrekvensanalyse (EKSTREM) og på nedbør-avløpsmodellen PQRUT. Beregningen er foretatt i henhold til retningslinje for flomberegninger [NVE 2002]. CM Consulting (2008a; b) beregnede flomverdiene for Dravladalsvatn er gitt i Tabell A4.1.

Tabell A4.1 Flomverdier for Dam Dravladalen for HRV 957 moh

Verdi	HRV (moh)	Vannstand (moh)	Vannstand over RHV (m)	Vannstand rel. krone (m)
1000-årsflom (Q_{1000}), 70m ³ /s	957,00	958,46	1,46	-3,04
Maksimal flom (Q_{PMF}), 70m ³ /s		959,33	2,33	-2.17

CM Consulting (2008a) indikerte i sin rapport at resultatet tilsvarer en døgnmiddelflom ved Q_{1000} på 2.250 l/s/km² og et forholdstall mellom Q_{PMF} og Q_{1000} lik 1,76. I datamaterialet inngår måleserier fra felter med sammenlignbar feltstørrelse, årsavløp, effektiv sjøprosent og breprosent som feltet til Dravladalsvatn. Beregningene var lite sensitive for mindre endringer i tilløpsflommens størrelse, damanleggets avløpskapasitet og overføringskapasiteter. Det er ikke gangbane over overløpet, og det forekommer ikke "overtopping" av selve damkronen. Den beregnede døgnmiddelverdien for Q_{1000} er ca. 6 % høyere enn i en tidligere beregning utført av NVE i 1986, og tilsvarende døgnmiddelverdi for PMF ca. 4 % høyere.

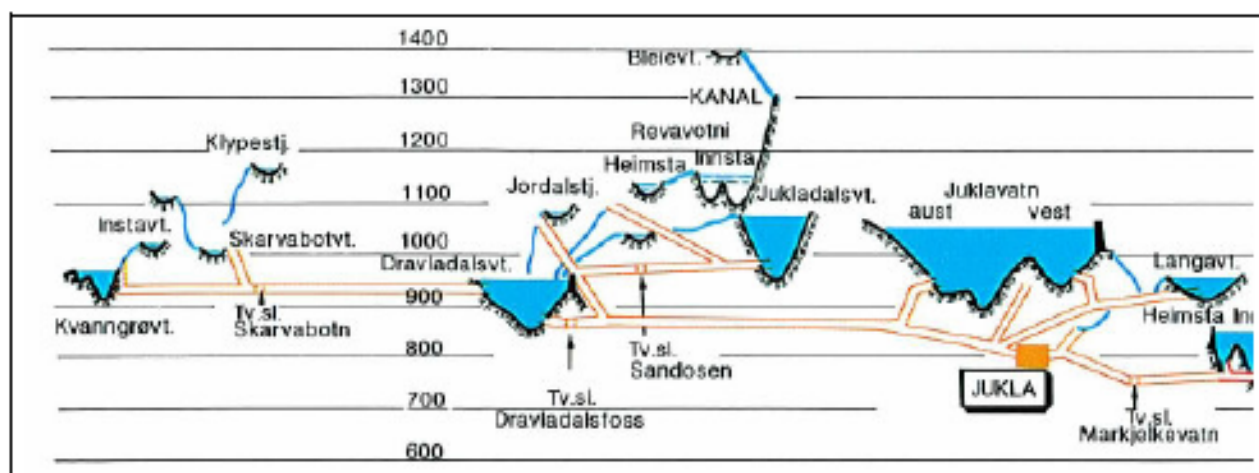
Det er gjort beregninger av avløpskapasiteten for flomløpstunnelen fra Dravladalsvatnet (Norconsult 2010b). Beregningene viser at flomavledningssystemet har tilstrekkelig kapasitet til å avlede Q_{1000} og Q_{PMF} med gjeldende regelverk. Flomavledningssystemet består av et 35m langt, fritt overløp, som leder direkte i et trau, og videre en 40-50 m lang tunnel, etterfulgt av en ca. 40-50 m lang, sprengt kanal som leder vannet utfor Dravladalsfossen (Foto A4 og A7 i Seksjon A6).

A4.3 Reguleringsanlegg

Damanlegget ligger i Jondal kommune i Hordaland fylke, og Dravladalsvatn, som er inntaksmagasin til Jukla pumpekraftverk, ligger i vassdraget Jondalselvi (Figur A2.1). Deler av magasinet ligger også i Ullensvang kommune. Naturlig nedbørfelt til Dravladalsvatn er 27,25 km², og tilsiget påvirkes av avløp fra to oppstrøms reguleringer i eget vassdrag og overføringer fra flere andre vassdrag. Vann kan overføres fra Kvanngrovvatn i Storelvi og Skarvabotn i Jondalselvi og fra Juklavatn i Øyreselva, når Jukla kraftverk står. I tillegg overføres vann kontinuerlig fra Bleielvi i vassdraget med samme navn gjennom en kanal. Derfor regnes delfeltet i Bleielvi med i naturlig felt til Heimste Revavatn og Dravladalsvatn, som da øker med 2,8 km² og blir 10,4 resp. 30,0 km². Utbredelsen av de enkelte delfelt er vist i Figur A2.1. Middeltilsiget til det utvidede naturlige feltet til Dravladalsvatn er i følge NVEs avrenningskart for 1961-1990 114 Mm³/år, som svarer til 3,62 m³/s eller 120 l/s/ km². Høyden i dette

nedbørfeltet fordeler seg mellom 957 og 1644 moh. Magasinet har HRV på kote 957,00 og et areal ved HRV lik 1,38 km².

Reguleringen består av en overføringstunnel fra Kvanngrovvatn til Dravladalsvatn, som underveis har et inntak i Skarvabotn (Figur A4.2). I tillegg overføres vann fra Bleielvi til feltet til Heimste Revavatn i en kanal. Fra Heimste Revavatn overføres vann til tilløpstunnelen til Jukla kraftverk rett nedstrøms Dravladalsvatn. Underveis tas på denne tunnelen inn vann fra Jukladalsvatn og Jordalsbekken. På overføringstunnelen til Jukla kraftverk tas også inn vann fra Juklavatn. Hvis kraftverket står og ventilene mot Juklavatn og Dravladalsvatn begge står åpne, vil vann teoretisk kunne overføres fra Juklavatn til Dravladalsvatn. Langavatn ligger 5m høyere på HRV enn Dravladalsvatn og vil kunne overføre vann til Dravladalsvatn når kraftverket står og ventilen mot Juklavatn er stengt. Dette bidraget sees imidlertid helt bort fra, fordi kapasiteten på overføringen fra Juklavatn vil være mye større.



Figur A4.2 Oversikt over reguleringene til Jukla pumpekraftverk (CM Consulting 2008a)

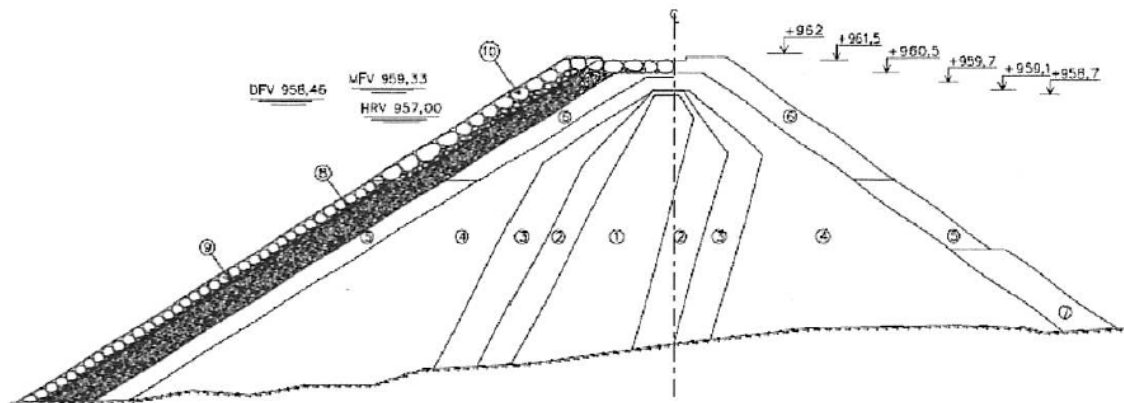
A4.4 Anbefalte rehabiliteringstiltak i 2008

I 2008 foreslå CM Consulting (2008) fire nye tiltak:

- bygge nytt oppstrøms skråningsvern utenpå eksisterende damskråning;
- forsterke overløpsterskel med påstøp og nye forankringsbolter i fjell;
- øke avløpskapasitet i flomtunnel ved strossing i tunnelsåle;
- instrumentering av oppstrøms skråning og krone etter føringene gitt i retningslinjene for overvåking og instrumentering av vassdragsanlegg.

Figur A4.2 viser anbefalt tverrsnitt av Dam Dravladalen etter tiltak. Kroneverket skal stå til kote 962.

CM Consulting (2008b) dokumenterer i en rapport hvorfor tiltakene trengs og hvordan utførelsen gir verdier som tilfredsstillende dagens krav og retningslinjer. Enkelte beregningsresultater, men ikke alle, oppsummeres nedenfor.



Figur A4.2 Tverrsnitt av Dam Dravladalen etter tiltak (CM Consulting 2008)

A4.5 Beregninger av stabilitet med nye tiltak

Nedstrøms og oppstrøms skråninger

Tabell A4.2 gir resultater fra stabilitetsanalyser av opp- og nedstrøms skråninger (CM Consulting 2008b). Analysene er gjort med anerkjente metoder og programvare (Morgenstern-Price, Spencer og Bishop Simplified metoder, og Slide (2D beregningsprogram fra Rocscience)).

Tabell A4.2 Sikkerhetsfaktor av ned- og oppstrømskråningene med nye tiltak (anbefalt 2008)

Skråning	Analyse	Sikkerhetsfaktor, kritiske glideflater
Nedstrøms	Stasjonær tilstand	1,8-1,9
	Ulykkessituasjon (lekkasje 10 m ³ /s gjennom tetningen)	1,6
Oppstrøms	Stasjonær tilstand	1,7-1,8
	Hurtig nedtapping (med ugunstigste vannstand)	1,7
Nedstrøms	Jordskjelvlast, stasjonær tilstand, 475-års returperiode*	1,7
	Jordskjelvlast, stasjonær tilstand, 10.000-års returperiode**	1,35
Oppstrøms	Jordskjelvlast, stasjonær tilstand, 475-års returperiode*	1,6
	Jordskjelvlast, stasjonær tilstand, 10.000-års returperiode**	1,2

* Krav til Sikkerhetsfaktor = 1,25

** Krav til sikkerhetsfaktor = 1,0

Flomløpsterskel

Som en del av planarbeidet for et overbygg over flomløpsterskelen ved Dravladalsvatn, har Norconsult (2010a) gjort stabilitetsvurderinger av bergfundament for overbygg flomløpsterskel Dravladalsvatn for "worst case scenario" med full snølast og nedtappet vannmagasin, og ved

jordskjelvlaster. Dravladalsvatn ligger i et område med omdannede vulkanske overflatebergarter (gneiser) tilhørende Kinsarvikformasjonen. Bergarten på stedet er delvis migmatittisert og lagdelt med mørke og lyse bergartsbånd.

Det planlagte overbygget vil gi økt belastning både på bergmassen i fundamentet til flomløpsterskelen, og i fundamentet til ny bakvegg nedenfor muren i overkant flomløpsbassenget. Overbygget består av en taks-kive som i bakkant er fast forankret til bærende vegger. I front hviler taket på et glidelager i overkant av en bjelke, som igjen hviler på tre pilarer og sideveggene til overbygget. Pilarene er ført ned gjennom dagens flomløpsterskel og fundamentert på berg. Størst belastning blir på de tre pilarene, men det vil også være betydelige laster på hver av sideveggene og bakveggen. Mens pilarene pga glidelageret kun utsettes for rene vertikalkrefter, vil bakveggen utsettes for vertikal-, horisontal- og momentkrefter. Bergmassen er moderat oppsprukket i blokker som delvis har en rombeform.

Beregningene viser for bergfundamentet til flomløpsterskelen at de stabiliserende kreftene er større enn de drivende ved alle "worst case" scenarier som ble analysert (Norconsult 2010a). For bergfundamentet til bakveggen gir beregningene varierende resultater ved de ulike belastningsscenariene, avhengig av antagelsene i analysen: Bergfundamentet til bakveggen er, ved fullt sprekkvannstrykk i glideplansprekk og baksprekk og i tilfelle jordskjelv, ikke stabilt. For å øke stabiliteten tilstrekkelig ble det derfor nødvendig å sikre bergmassen med bolter.

A4.6 Gjennomførte tiltak etter 2008

Statkraft har i perioden 2010-2012 gjennomført ombyggingsarbeider på fyllingsdam og flomløp i Dravladalen. Arbeidsomfanget besto av, blant annet:

- Fyllingsdam: Etablering av nytt oppstrøms skråningsvern og kronevern utenpå eksisterende damskråning. Nytt skrånings- og kronevern består av to lag stein med en horisontal tykkelse på minimum 3 meter i skråningen. Minimum steinstørrelse i det ytterste laget er 1(én) m³.
- Overbygg: I vinterhalvåret legger det seg opp store mengder snø og is i innløpet, samlekanalen og flomløpstunnelen. For å unngå at flomløpet tettes av fokksnø og is er det etablert et overbygg med tette sidevegger over eksisterende flomløp. Deler av flomløpsterskelen i betong ble fjernet og re-etablert som en tilpasning til flomløpets nye utforming. Flomløpsterskelen har nå en rett linjeføring.
- Flomløpstunnel: For å øke kapasiteten til flomløpssystemet er tunnelen og øvre deler av utløpskanalen strosset ned 1,5 m i sålen. Innløpet til tunnelen er også strosset i sålen og har fått en hydraulisk gunstig utforming. Ved utløpet av flomløpstunnelen er det etablert en tetningsvegg for å forhindre gjennomtrekk med følgende oppsamling av fokksnø i tunnelen.

For å forbedre forholdene med tanke på akkumulering av snø i forkant av overløpskonstruksjonen ble terrenget senket betydelig. Totalt er det sprengt ut 8.000-10.000 m³ i dette området. I tillegg er det installert ny instrumentering på Dam Dravladalen.

Fyllingsdam

Skrånings- og kronevern: Det er plastret nytt oppstrøms skråningsvern bestående av to lag stor stein. Det var stort fokus på å få kvaliteten av plastringsarbeidene på et tilfredsstillende nivå helt fra første stein. Plastringsarbeidene som er utført er av god kvalitet. Det ytterste plastringslaget har en minste steinstørrelse på 1 m³. Steinen som er benyttet er av god kvalitet. Plastringen er utført solid med grov stein i bakkant.

Dam topp: Den eksisterende damtoppen ble senket 0,5 meter før det ble lagt/plastret ett 1,5 meter lag med stein større enn 1 m³. Denne plastringen er deretter mettet med samfengt sprengstein. Utførelsen ble endret fra opprinnelig plan juli 2011, og godkjent av NVE i august samme år. Endringen bestod av å heve damtoppen til kote 963,0 (+0,5 meter fra opprinnelig nivå). Kjørebanelen ble hevet tilsvarende til kote 962,5. Ved å heve damtoppen vil også dammen tilfredsstillende NVE sitt krav til fribord til topp dam (6 meter over HRV), ved en eventuell fremtidig oppklassifisering til klasse 4. Den øverste delen av plastringen i nedstrøms skråning er gravd opp og erstattet med ny og større stein. Dette ble gjort for å sy den nye damtoppen bedre sammen med nedstrøms skråning og på den måten få en mer helhetlig dam.

Flomløpstunnel

Utstrossing av tunnelen: For å øke avledningskapasiteten til flomløpssystemet ble utstrossingen av tunnelen og kanal utført. Totalt ble det strosset ut i overkant av 800 fm³⁶ i tunnel og kanal. Massene ble kjørt direkte i dammen og benyttet i støttefyllingen. I flomløpstunnelen er det etablert en tetningsvegg for å forhindre gjennomtrekk med følgende oppsamling av fokksnø i tunnelen.

Overløpsterskel: For å rette opp overløpsterskelen ble de to sørligste seksjonene pigget bort. Bolting, armering og forskaling av de nye seksjonene ble også gjennomført. Fjellfundamentet ble også stabilisert med 10 meter lange, Ø32 mm fjellbolter.

Overbygg

Overbygg: Sidevegg og vangemur på sør- og nordsiden, de fem pilarene på overløpsterskelen og de fem seksjonene i den bakre oppleggsveggen for takbjelkene ble støpt ferdig i august 2011. Drageren i fremkant av bygget sto også ferdig på denne tiden.

Takbjelker: Glidelagrer som danner opplegget for takbjelkene i fremkant ble støpt inn på toppen av drageren. Lagrene ble støpt inn med en helning på 4,5° +/- 0,4°. I bakkant ble bjelkene lagt 250 mm inn på bakveggen. For å fordele belastningen og forhindre oppknusing ble det plassert et gummibånd mellom bjelke og betongvegg. I 2012 ble det montert takbeslag i forkant av bjelkene. Beslagene har en dobbel funksjon; holde jordmassene på taket på plass og en estetisk avslutning og dekking av endene av bjelkene.

⁶ 800 fm³ = 800 fastkubikkmeter

Instrumentering

Vannstandsmåling: Vannstandsmålerøret ble installert i deler av traseen. Nytt rør ble trukket og testet før det gamle ble fjernet.

Lekkasjemåling: Lekkasjemåling har vært på plass siden 1997. Anlegget er fortsatt operativt.

Setnings- og deformasjonsmåling: Kjernebolter, kronebolter, skråningsbolter og målesøyler ble installert.

Kjernebolter: Rørene for eksisterende kjernebolter er forlenget i forbindelse med omleggingen og heving av damtoppen. Selve kjerneboltene er fortsatt godt tilgjengelig.

Kronebolter/ Skråningsbolter: I forbindelse med omleggingen av damtoppen er det re-etablert kronebolter på opp- og nedstrøms side i hele dammens lengde. Det er også satt skråningsbolter i plastringen oppstrøms. Seksjon A7 gir to oversiktstegninger over målebolter.

Målesøyler: Det er støpt tre nye målesøyler; to oppstrøms og en nedstrøms dammen.

A4.7 Damkontroll under rehabiliteringsarbeidene

Under arbeidet er det gjort kontroll av plastring og innfylling i dam. Damskråningens geometri har også blitt kontrollert ukentlig av entreprenørens egen landmåler. Målingene er presentert grafisk og oversendt byggeledelsen.

Armering og forskaling ble kontrollert av damkontrolløren i god tid før støp. Ved kontrollen har sjekklisten for betongarbeider (vedlagt kontrollplanen) blitt benyttet. Eventuelle feil eller mangler ble rettet opp før støpeformen ble endelig godkjent. Entreprenøren har også gjennomført en egenkontroll med egne sjekklister. Damkontrollens sjekklister, entreprenørens sjekklister og støpeplanene er lagret i Statkrafts prosjektarkiv.

Betongkvaliteten ble kontrollert ved luftmålinger, temperaturmålinger og utstøping av terninger på blanderiet til leverandøren. I tillegg er det tatt luftmålinger og det er støpt terninger på anlegget. Betongkvaliteten har vært god gjennom hele anleggsperioden. Det har ikke vært avvik ved betongleveransen.

Dimensjonering og utforming av bjelkene ble utført i et samarbeid mellom Norconsult og Norelement. Under montering ble plassering og innfesting kontrollert. Glidelagrene i forkant av kontraksjonen ble svært nøye utplassert og kontrollmålt.

A4.8 Vurdering av utførte arbeider og ferdig resultat

I Statkrafts sluttrapport er vurderingen at alle arbeider utført med tiltakene i perioden 2010-2012 har vært tilfredsstillende.

A5. Dokumenter brukt som kilder

- Berdal Strømme – NGI (1996). Risikoanalyse. Dam Dravladalensvatn. Oppdragsgiver EnFO. Rapport 95 4124-01. 12 april 1996.
- CM Consulting (2008a). Flomberegning Dravladalsdammen. Rapportnr 2008P1010-01. 11 April 2008.
- CM Consulting (2008b). Dravladalsdammen Prosjektrapport. Rapportnr 2008P1010-01. 27 Juni 2008.
- Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (2009), Damsikkerhetsforskriften, <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-12-18-1600>
- NGI (1983). Grain size of core - filter - and transition material in some Norwegian earth rockfill dams. NGI Internal Report 53500-1. 6 May 1983. Rev. October 1983.
- NGI (1996). Risk Analysis for Three Rockfill Dams in Norway. Target Safety Level for Large Dams in Norway. NGI rapport 954124-5. 13 December 1996.
- Norconsult (2010a). Stabilitetsvurdering, flømløpsterskel Dravladalsvatn. Notat til Statkraft Energi 5012475, 1.juli 2010.
- Norconsult (2010b). Beregning av avløpskapasitet Dravladalsdammen. Notat til Statkraft Energi 5012475, nr. 1, 25.11.2010.
- NVE (2002), Retningslinje for flomberegninger (utgave 1-2002, nå erstattet at utgave 4-2011).
- NVE (2014) Veileder til damsikkerhetsforskriften. Klassifisering av vassdragsanlegg. Veileder nr. 3/2014.
- Statkraft (2012). Dam Dravladalen - Ombygging dam og flømløp. Sluttrapport. (Utarbeidet av Statkraft med kontroll av Norconsult).
- Statkraft (1994). Dravladalsdammen. Status pr sept. 1994. (DRAVLADA.DOC/GRA). 21.03.1995.
- Vick, S.G. (2002) "Degrees of Belief: Subjective Probability and Engineering Judgement". ASCE Publications.

A6. Bilder av Dam Dravladalen før, under og etter rehabilitering

A6.1 Før rehabilitering



Foto A1. Dam Dravladalen før rehabilitering (2010) (Foto: Statkraft)



Foto A2. Oversiktsbilde av Dam Dravladalen før rehabilitering (2010) (Foto: Statkraft)



Foto A3, A4, A5 Dam Dravladalen før rehabilitering (2010) (Foto Statkraft)



Foto A6. Damkrone, Dam Dravladalen, før rehabilitering (Foto: Statkraft)



Foto A7. Flomløp, tunnel og kanal på Dam Dravladalen (2010, før rehabilitering) (Foto: Statkraft)

A6.2 Under rehabilitering



Foto A8, A9, A10 Dam Dravladalen under rehabilitering (2010-2011) (Foto Statkraft)

A6.3 Etter rehabilitering



Foto A11, A12. Dam Dravladalen etter rehabilitering (Foto: Statkraft)



Foto A13, A14. Dam Dravladalen etter rehabilitering (Foto: Statkraft)



Foto A15, A16. Damkrone, Dam Dravladalen, etter rehabilitering (Foto: Statkraft)



Foto A17, A18. Dam Dravladalens overløp etter rehabilitering (Foto Statkraft)



Foto A19, A20. Flomløp Dam Dravladalen, før og etter rehabilitering (2010-2012) (Foto: Statkraft)



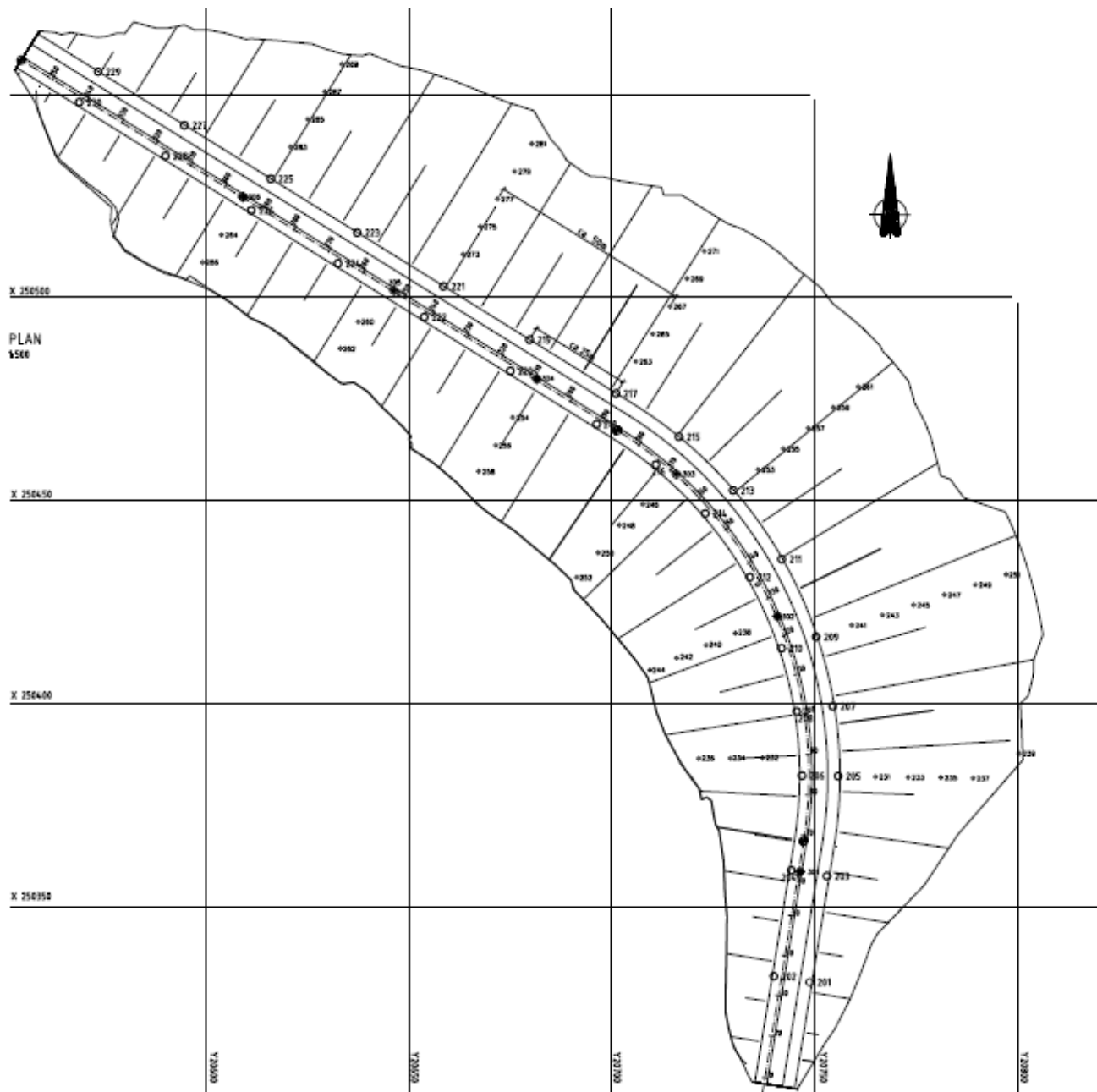
Foto A21. Flømløpstunnel, Dravladalen etter rehabilitering (Foto: Statkraft)



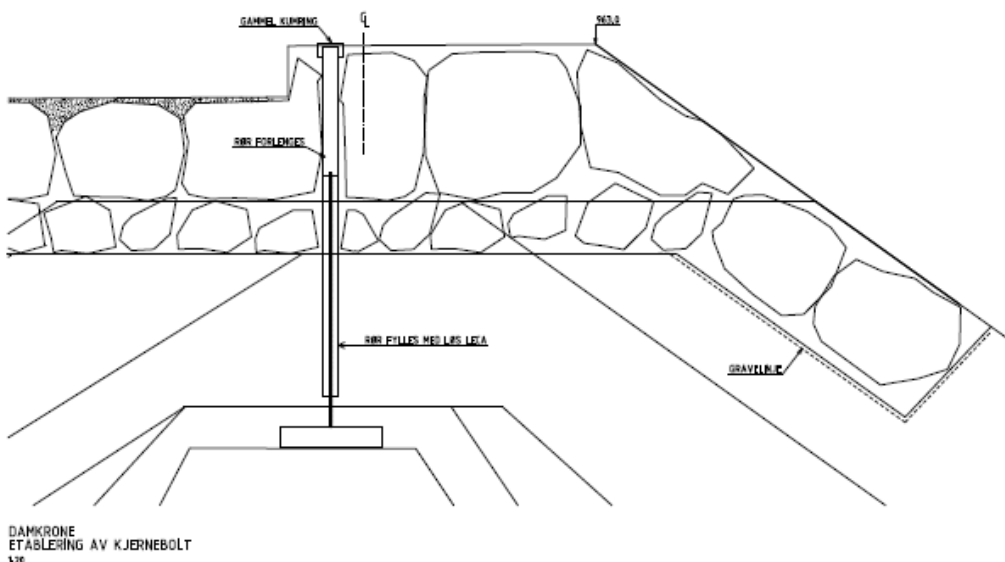
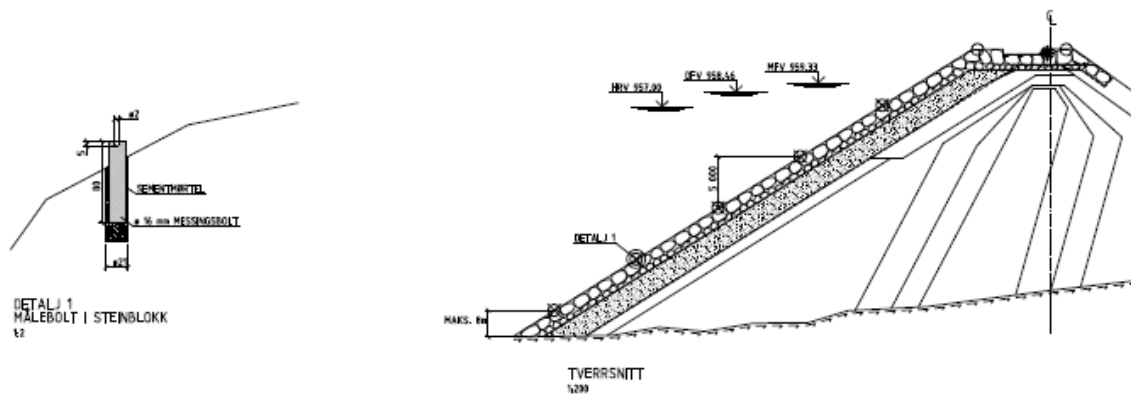
Foto A22. Snøakkumulasjon i snørik 2015-vinter (Foto: Statkraft)

A7. Instrumentering på Dam Dravladalen

- Kronebolter
- Skråningsbolter
- ◆ Kjernebolter



Figur A7.1 Dam Dravladalen - Rehabilitering. Krone-, skrånings- og kjernebolter plan (Statkraft 2012)



FORKLARINGER:

- KRONEBOLTER
- SKRÅNINGSBOLTER
- EKISTERENDE KJERNEBOLTER

Figur A7.2 Dam Dravladalen rehabilitering. Krone-, skrånings- og kjernebolter plan, snitt og detaljer (Statkraft 2012)

Vedlegg B

STATISKTIKK OM HENDELSER I NORSKE DAMMER

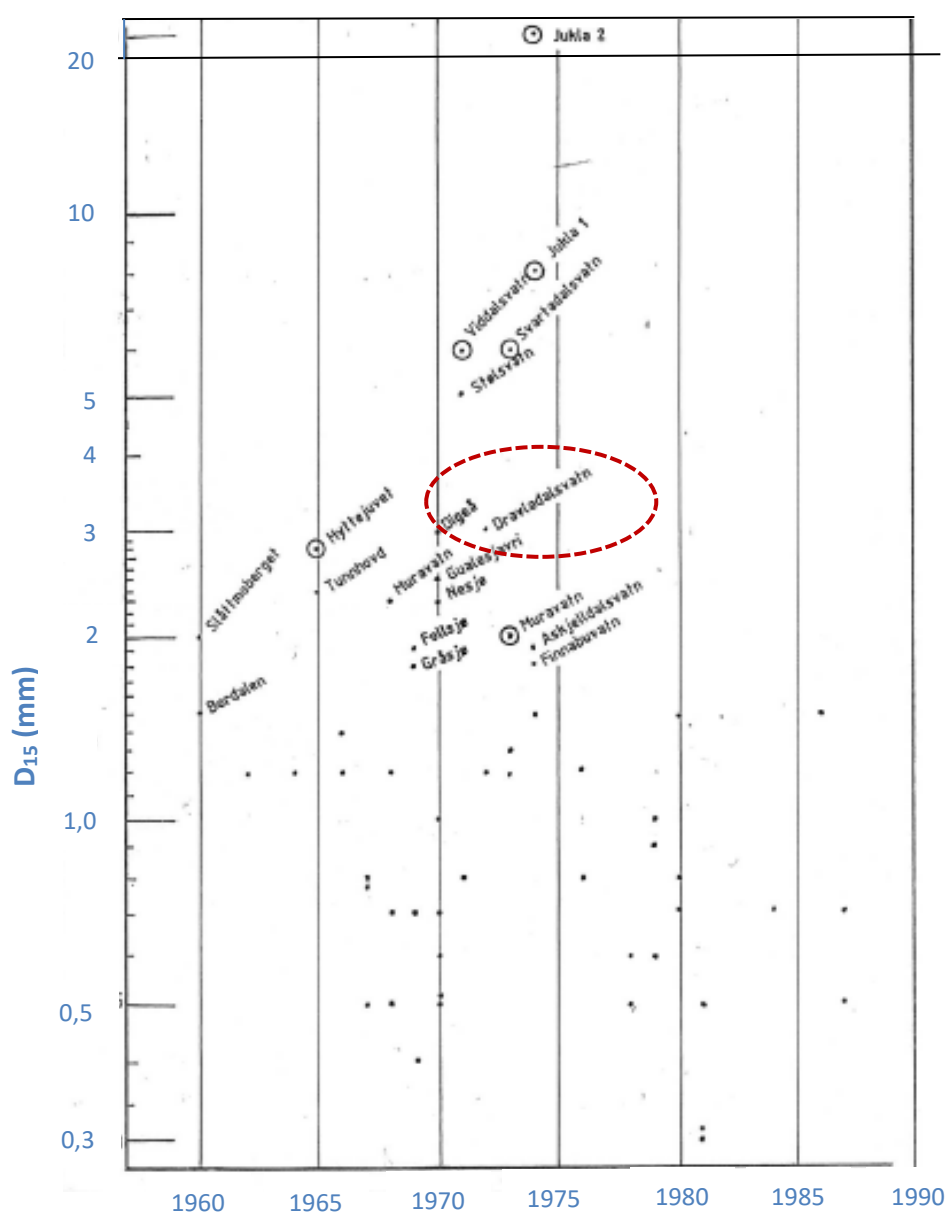
Innhold

B1.	Introduksjon	2
B2.	Lekkasje i norske steinfyllingsdammer (1960-1988).....	2
B3.	Hendelser i norske dammer (1950-1992)	3
B4.	Referanser	4

B1. Introduksjon

Norge har ca. 330 store dammer (>15m høy), og over halvparten av disse er fyllingsdammer (2015 tall). På ingen av de store dammene har det oppstått brudd. Den gode statistikken gjenspeiler at de fleste er steinfyllingsdammer (i motsetning til jorddammer) fundamentert på fjell (Kjærnsli *et al* 1992; Høeg 1996). Noen hendelser har derimot vært observert, spesielt lekkasjer.

B2. Lekkasje i norske steinfyllingsdammer (1960-1988)



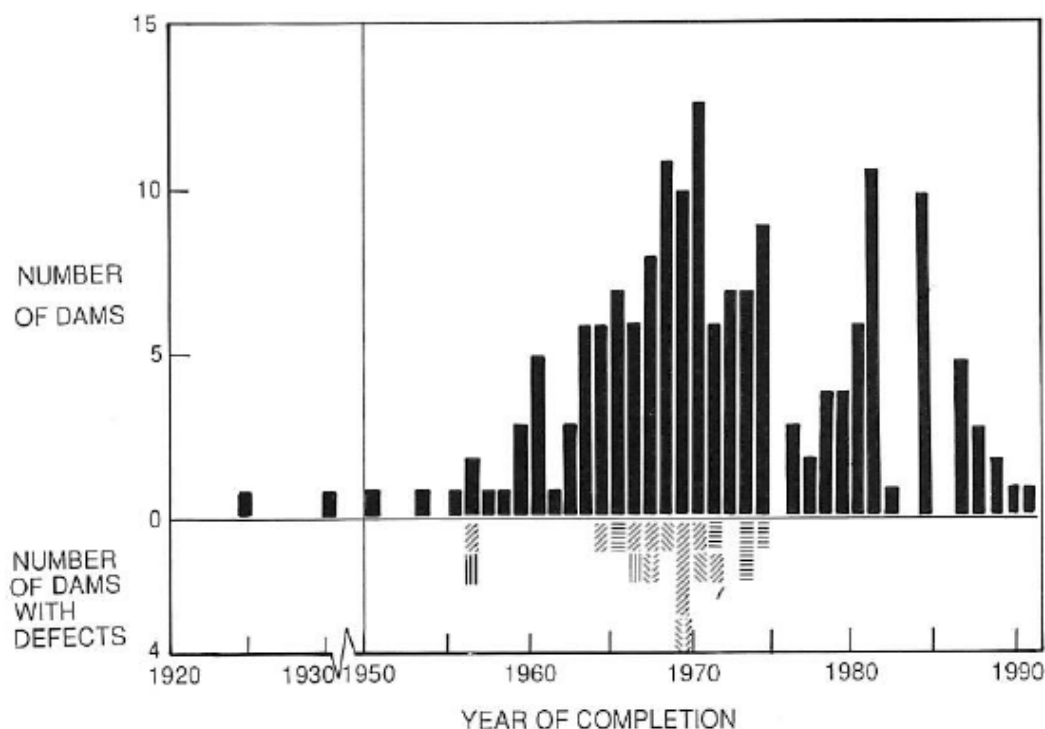
Figur B1. Dam ferdigstillelsesår mot D_{15} (i mm) i sone 2 (filter).
 Sirklene viser dammer hvor det er observert lekkasje (Kjærnsli 1992).

I figur B1 står D_{15} for maskestørrelsen (siktstørrelsen) hvor igjennom 15% av filtermaterialet passerer. Ved fremstilling av figuren er det de maksimale verdier av D_{15} som er brukt. Fremstillingen viser at i de fire dammene som har D_{15} større enn 5mm har det oppstått lekkasjer. I to av de ni dammene 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 Songa dammen hvor det er registrert flere kortvarige lekkasjer. På samtlige dammer, med unntak for Songa, ble lekkasjer registrert ved første gangs fylling av magasinet.

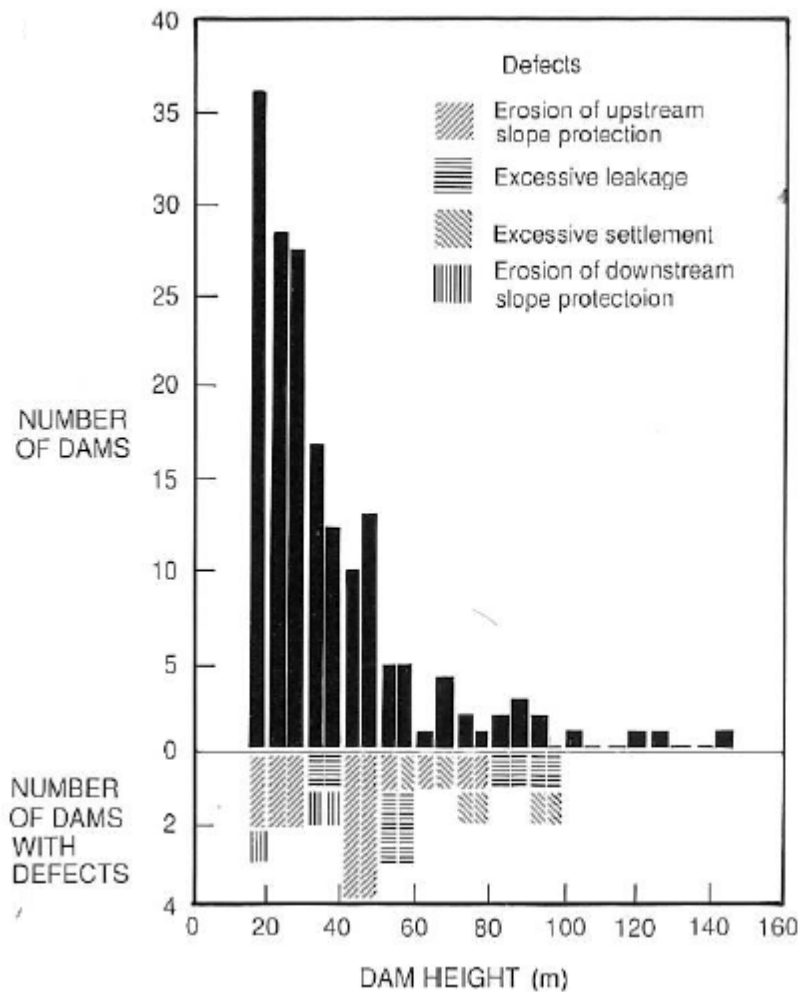
På fire av seks store dammer med lekkasje er det utført injeksjon som har redusert lekkasjene betraktelig (Hyttejuvet, Viddalsvatn, Mysevatn og Jukla). På flere dammer er damtåa sikret med påfylling av grov stein for eksempel, (Mysevatn, Jukla I og Svartadalsvatn). På nevnte dammer pluss Songa kan man ikke se bort fra at lekkasjene 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.

B3. Hendelser i norske dammer (1950-1992)

Figur B2 og B3 viser antall negative hendelser som en funksjon av dam ferdigstilleleseår og dam høyde. Hendelsene omfatter erosjon oppstrøms, store lekkasjer, setninger, og erosjon i nedstrøms skråningsvern. Statistikken viser at ingen dam ferdigstilt etter 1975 har vist tegn på skader. Begge figurer viser at det er kun en liten andel av dammene som har erfart uønskede hendelser, og ingen dam over 100m høy har hatt hendelser.



Figur B2. Antall observerte uønskede hendelser mot dam ferdigstilleleseår (Kjærnsli 1992; Kjærnsli et al 1992; Høeg 1996).



Figur B2. Antall observerte uønskede hendelser mot dam høyde (Kjærnsli 1992; Kjærnsli et al 1992; Høeg 1996).

B4. Referanser

- Hoeg, K. (1996). Performance Evaluation, Safety Assessment and Risk Analysis for Dams. *Hydropower and Dams*. V 6. 3. 8p.
- Kjærnsli, B. Valstad, T. and Høeg, K. (1992). Rockfill Dams. Design and Construction. *Hydropower development*, Vol. No.10. 148p.
- Kjærnsli, B. (1992). Sikkerhet av norske fyllingsdammer mot brudd forårsaket av indre erosjon og derav følgende øket lekkasje gjennom og under dammen. Rapport til "Prosjekt damsikkerhet". NGI rapportnr 904084-1. 22 januar 1992.
- Sherard, J.L (1981). Viddalsvatn Dam Leakage Problem Report to Oslo Lysverket. Oslo, 12 January 1981.

Vedlegg C

RISIKOANALYSER AV DAM DRAVLADALEN I 1996

Innhold

C1.	Innledning til 1996-analysene	2
C2.	Workshop i 1996	2
C3.	"Failure mode screening" i 1996	2
	C3.1. Inndeling i tre hendelses kategorier	2
	C3.2. Mest sannsynlige bruddmekanismer	2
C4.	Resultater fra 1996-analysene	4
C5.	Konklusjon fra 1996-analysene	5
C6.	Referanser	5

C1. Innledning til 1996-analysene

Analysene i 1996 hadde som formål å (1) kartlegge, for Dam Dravladalen, hvilke bruddmekanismer som mest sannsynlig kan inntreffe og (2) kvantifisere bruddmekanismene ved å beregne Sannsynlighet for brudd. De kvantifiserte sannsynligheter var først og fremst et hjelpemiddel for dameieren og myndighetene for å kunne forbedre de forhold som gir de høyeste sannsynligheter for brudd.

Samtidig vil prosjektet, etter å ha utført sannsynlighetsberegninger også for Viddalsdammen og Svartevannsdammen, kunne sammenligne sannsynlighetene for brudd for tre dammer i et samfunnsmessig perspektiv. Informasjon gjengitt nedenfor er hentet fra NGI (1996a; 1996b; 1997) og artiklene av Johansen *et al* (1997) og Vick and Stewart (1996).

C2. Workshop i 1996

Deltagere i workshop for Dam Dravladalen i 1996 var: Eivind Torblaa, Dagfinn Riise, Eystein Kalihovde, Leif Lia, Kaare Høeg, Ola Gunleiksrud, Harry Ingvar Torvanger, Ivar Torblaa, Claus Rikartsen, Farrokh Nadim, Per Magnus Johansen, Jan Henry Eikevik og Steven Vick, den siste en risiko spesialist fra Colorado, USA).

For hendelsestre-analyse, brukte workshop deltagerne den samme sannsynlighetsskalaen som i Tabell 2 i hovedrapporten.

C3. "Failure mode screening" i 1996

C3.1. Inndeling i tre hendelses kategorier

I 1996-analysene for Dam Dravladalen ble hendelser som kan føre til dambrudd delt i tre kategorier:

- Hydrauliske hendelser (flom/bølgeerosjon/ras utløst av sterk nedbør etc.)
- Seismiske hendelser (skader på dammen grunnet jordskjelv, skred utløst av jordskjelv etc.)
- Andre hendelser (indre erosjon, utglidninger på grunn av dårlig stabilitet etc.) som kan oppstå i en "vanlig" driftssituasjon

C3.2. Mest sannsynlige bruddmekanismer

For hver type hendelse ble en bruddmekanisme vurdert som den mest sannsynlig og denne mekanismen ble analysert i mer detalj. Vurderingene som ble gjort er oppsummert i Tabell C1.

Tabell C1. "Failure mode screening" i 1996.

Cause or mechanism	Most probably failure mechanism ¹	"Failure mode rejected (explanation in parenthesis)"
Hydraulisk	Overtopping due to drift snow-blockage of the spillway canal and/or tunnel	<ol style="list-style-type: none"> 1) Flood overtopping (dam can "sustain" PMF: <ul style="list-style-type: none"> • top core NWL + 2 m, top filter NWL + 2.3 m • headrace tunnel and bottom outlet in addition). 2) Overtopping due to debris blockage (above timber line, no debris, no peat). 3) Overtopping due to ice jam blockage (no conditions for ice jam, <ul style="list-style-type: none"> • Frozen lake • Large tunnel cross section). 4) Overtopping due to glacier ice slides (no glacier calving into Dravladalsvatn). 5) Overtopping due to upstream wave erosion (too short windfetch in the basin (1 km); large stones in crest protection (stone size > 0.5 m³)). 6) Glacier lake dam breach in Jukladalsvatn (distance too long for glacier advance, initiative measures will be applied on time, tunnel transfers Jukladalvatn, blasting ice). 7) Outburst flood from glacier (maximum volume calculated is 500 000 m³, volume storage in Dravladalsvatn sufficient; reservoir rise by ≈ 0.5 m). 8) Overtopping due to landslide into basin (geological conditions): <ul style="list-style-type: none"> • no weakness planes dipping out of slope • no weathering of the rock • no weak cementation • no geological or historic evidence of previous landsliding. 9) Avalanche into basin (too small volumes, not on the side of the reservoir causing flooding at the dam).
Seismisk	Large crest deformation leading to overtopping and breach	<ol style="list-style-type: none"> 1) Foundation failure (rock foundation) 2) Core liquefaction (>95 % compaction, low pore pressures) 3) Foundation rocks lope failure in steep hillside (Rock foliation dip upstream, no evidence for joints dipping downstream, gneiss/granite foundation) 4) Spillway collapse (will not affect core, no damage when maximum acceleration is < 0.2g, need simultaneous extreme flood) 5) Reservoir rock, ice, snow, so avalanche, so overtopping (Magnitude 6.2 is too small to trigger; other Keefer risk factors not present: <ul style="list-style-type: none"> • no planes of weakness dipping out of slope. • no weathering of the rock. • no weak cementation. • no geological or historic evidence of previous landsliding). 6) Seiches (Maximum observed/calculated due to earthquake < 1.0 m)
Andre	Core piping/internal erosion leading to toe slope/keystone instability, leading to dam breach	<ol style="list-style-type: none"> 1) Foundation erosion due to water pressure/leakage from headrace tunnel (headrace tunnel to far from dam). 2) Erosion in or through foundation rock joints (good rock quality, tight joints, no erodable fillings of joints). 3) Upstream core "washout" into tunnel spoil at El. 955-956 (cannot propagate to failure, initiative measures could be taken).

For eksempel, for hydrauliske hendelser (flomsituasjoner) er hendelsen vurdert for overtopping på grunn av snø/is i overløpet. Følgende fire bruddårsak eller –mekanismer ble diskutert i 1996:

¹ "Failure mode selected"

- 1) Flom: Overløp har tilstrekkelig kapasitet for en PMF-flom. I tillegg har man tappe-muligheter ved dammen og gjennom "by-pass" i stasjon.
- 2) Tilstopping i overløp: Over tregrensen, ingen flytetorv eller drivved som kan tilstoppe overløpet.
- 3) Bølgeerosjon: Meget lite strøk og derved små bølger i forhold til kvalitet av oppstrøms skråningsvern.
- 4) Snøras inn i magasin: Topografien er slik at det blir akkumulert relativt små mengder snø. Det nødvendige snø volumet for å forårsake tilstopping (som var $> 500\,000\text{ m}^3$).

For krigs- og terrorhendelser, ble vurderingen gjort på basis av statistiske vurderinger: I Norge ble det ansett cirka 335 dammer kunne være et mål for krigshandlinger eller terror. Som utgangspunkt ble det antatt at et forsøk på å ødelegge en dam i Norge skjer en gang i året. Statistisk sjans for at Dravladalsdammen skal velges som mål er $3 \cdot 10^{-3}$ (1/335) pr år. Det ble også ansett at sannsynligheten for at Dravladalsdammen skulle bli valgt som mål er langt lavere enn gjennomsnittet, grunnet dammens avsides beliggenhet og vanskelige tilgjengelighet. Vurderinger ble også gjort av sannsynlighet for at terroristen(e) ville bli oppdaget på vei opp til dammen (med 1 til 2 lastebiler med sprengstoff!), sprengningserfaring for at en ladning sprengstoff plassert på toppen av en steinfyllingsdam skal få så store konsekvenser at dammen går til brudd, plassering av sprengstoffet, etc.

C4. Resultater fra 1996-analysene

Resultatene fra analysene for Dam Dravladalen, beregnet som sannsynligheter for brudd P_f , er vist i Tabell C2. Sannsynlighet for brudd er en årlig sannsynlighet kun for tre av de fire tilfellene. Sannsynlighet for brudd ved indre erosjon er en "nominell" (eller "absolutt") sannsynlighet og har ikke blitt knyttet til en årlig hendelse.

Tabell C2. Resultater fra 1996-sannsynlighetsanalyser for Dam Dravladalen

Hendelse	Mest sannsynlig bruddmekanisme	P_f 1. vurdering	P_f 2. vurdering
Seismisk hendelse	Overtopping forårsaket av setning av dammen	$P_{f\text{ årlig}}$ $<1,5 \cdot 10^{-6}$	$P_{f\text{ årlig}}$ $<1,5 \cdot 10^{-6}$
Hydraulisk hendelse	Overtopping forårsaket av snøplugg i overløpet	$P_{f\text{ årlig}}$ $3 \cdot 10^{-3}$	$P_{f\text{ årlig}}$ $4 \cdot 10^{-4}$
Indre erosjon	Nedbryting av nedstrøms skrånning og damtå -nominell sannsynlighet	$P_{f\text{ nominell}}$ $5 \cdot 10^{-4}$	$P_{f\text{ nominell}}$ $5 \cdot 10^{-5}$
Sabotasje/terror-hendelse	Overtopping forårsaket av sprengning av damtapp	$P_{f\text{ årlig}}$ $<1 \cdot 10^{-5}$	$P_{f\text{ årlig}}$ $<1 \cdot 10^{-5}$
Alle hendelser	$P_{f\text{ årlig}}$ uten indre erosjon tilfellet	$P_{f\text{ årlig}}$ $<3 \cdot 10^{-3}$	$P_{f\text{ årlig}}$ $<4,2 \cdot 10^{-4}$

Sannsynligheten for brudd forårsaket av indre erosjon er å regne som en livstid sannsynlighet (for eksempel for de neste 50 eller 100 år). Den årlige sannsynligheten for brudd i tilfellet indre

erosjon i Tabell C2 vil være 50 ganger lavere hvis den nominelle sannsynlighet er for de neste 50 år.

C5. Konklusjon fra 1996-analysene

Det ble konkludert i 1996 at sannsynligheten for dambrudd, for en dam i Norge som har oppført seg «normalt» i 20 til 25 år, ble statistisk beregnet til $P_f = 1,5 \cdot 10^{-5}$ pr. år. Grunnen til at Dam Dravladalen kom ut med en høyere sannsynlighet for brudd for en definert hydrauliske hendelse, skyldtes usikkerheten omkring de fysiske mekanismer vedrørende erosjon av hardpakket snø. Her var ikke kunnskapsnivået tilfredsstillende.

Skadekonsekvensene ved et eventuelt brudd ble ikke vurdert, men det ble ansett som sannsynlig at et brudd i en steinfyllingsdam vil ta en viss tid for å utvikle seg slik at dameieren vil ha tid til varsling hvis "unormal" oppførsel/hendelse ble oppdaget i tide. Det ble derfor ansett som viktig at dameieren fikk en mulighet til enhver tid å kunne dokumentere dammens funksjonalitet og tilstand ved overvåking av vannstand og lekkasje.

Sannsynlighetsberegningene for Dam Dravladalen viste at det ikke var behov for rehabilitering av oppstrøms skråningsvern eller justering av nivåer eller bredder av topp dam eller topp av tetning. Analysene påpekte følgende momenter som burde vurderes i forbindelse med en rehabilitering av dammen:

- Installasjon av en automatisk lekkasjemålingsstasjon med overføring av verdier.
- Forbedre situasjonen i overløpet for å forhindre tilstopping av is og snø.
- Bidra til å belyse snøforholdene i overløpet i perioden januar til mai, og studere erosjonsmekanismer av kompakt snø.
- Øke drenasjekapasitet med en steintå i nedstrøms skråning.

C6. Referanser

- Johansen, P.M., Vick, S. og Rikartsen, K. (1997). Risk analysis of three Norwegian rockfill dams. *Hydropower 97*. Balkema, Rotterdam. 431-442.
- NGI (1996a). Risikoanalyse. Dam Dravladalen. NGI rapport 954124-1. 12 april 1996.
- NGI (1996b). Risk Analysis for Three Rockfill Dams in Norway. Target Safety Level for Large Dams in Norway. NGI rapport 954124-5. 13 December 1996.
- NGI (1997). Risikoanalyse. Dravladalsvatn, Svartevann og Viddalsvatn. Oppsummeringsrapport. NGI rapport 954124-4. 21 mars 1997.
- Vick, S. og Stewart, R.A. (1996). Risk analysis in dam safety practice. *Uncertainties in the Geologic Environment*. ASCE Geotechnical Special Publication No. 58. Madison WN. pp. 586-603.

Vedlegg D

HENDELSESTRE-ANALYSER AV DAM DRAVLADALEN I 2016

Innhold

D1.	Introduksjon	2
D2.	Hendelsestre-analyser utført i 2016.....	2
	D2.1 Indre erosjon forårsaket av lekkasje (Fig. D1 og D2)	3
	D2.2 Flom, vinterhalvåret: Is og hardpakket snø som blokkerer overløpet (Fig. D3, D4)	4
	D2.3 Flom, sommerhalvåret: Bresmelting som renner inn i magasinet (Fig. D3, D5)	4
	D2.4 Jordskjelv (Fig. D6)	5
D3.	Sannsynlighet for brudd fra hver hendelsestre-analyse	6
D4.	Total bruddsannsynlighet fra hendelsestre-analyser (2016).....	7
D5.	Referanser	8

D1. Introduksjon

Det ble utført flere hendelsestre-analyser av Dam Dravladalen i 2016. Vedlegg D gir detaljerte resultater i grafisk form for de seks mest sentrale hendelsestre-analysene. Sluttresultatene er oppsummert i hovedrapporten.

Tabell D1 gir en oversikt over de seks analysene. Hendelsestrærne finnes i Figur D1 til D6.

Tabell D1. Oversikt over hendelsestre-analyser av Dam Dravladalen

Hendelse	Figur nr	
Indre erosjon forårsaket av lekkasje	D1; D2	
Flom {	Is og hardpakket snø som blokkerer overløpet (vinterhalvåret)	D3 og D4
	Bresmelting som renner inn i magasinet (sommerhalvåret)	D3 og D5
Jordskjelv	D6	

D2. Hendelsestre-analyser utført i 2016

Metoden som ble brukt for analysene er beskrevet i hovedrapporten (Seksjon 3). For Dam Dravladalen analysene ble tallverdiene in Tabell 2, tallområdeverdiene i Tabell 3 og de verbale beskrivelsene i de samme tabellene brukt for å velge sannsynlighetene for hendelsene.

Hendelsestrærne i Figur D1 til D6 viser hver hendelse og sannsynlighetstallene for hver hendelse. Sannsynlighetene ble bestemt under workshop'en. Hvert hendelsestre bruker følgende struktur/semantikk:

- Teksten ovenfor trærne forklarer stegene i analysen og begrunnelsen for valg av sannsynlighetene i den tilhørende forgrening i hendelsestreet.
- Sannsynlighet for brudd for en gren er produktet av sannsynlighetene for samtlige uavhengige hendelser langs en gren.
- Hendelseskjeder som resulterer i dambrudd er markert med svart trekant ▲, mens øvrige hendelseskjeder som ikke resulterer i dambrudd er markert med åpen trekant, △.
- Den totale sannsynligheten knyttet til hver utløsningsmekanisme (hver figur) er summen av sannsynlighetene for hver gren som resultater i dambrudd.

I alle analyser er det den årlige sannsynlighet for brudd som er beregnet. Den totale sannsynligheten for brudd for Dam Dravladalen er summen av sannsynlighetene for brudd fra alle hendelsene som er plausible for dammen.

D2.1 Indre erosjon forårsaket av lekkasje (Fig. D1 og D2)

Hendelsestre-analyse for tilfellet 'indre erosjon' har følgende utvikling: lekkasje finner sted; hvor stor er lekkasje; vil lekkasje "selv-reparere" ("self-heal") eller fortsette å øke; vil lekkasjen oppdages; og så vil rehabiliteringstiltak være effektive; vil lekkasje og indre erosjon forårsake lokal utrasing ("unravelling") av tåa som vil forårsake en utglidning; vil lekkasje eller indre erosjon forårsake andre typer kollaps, for eksempel utvasking av fyllmasse, setninger, synkehull ("sinkholes") eller annen indre erosjon ("distress") symptomer; og til slutt dambrudd som en følge av én eller flere av disse hendelsene.

Den største vanskeligheten med et 'indre erosjon' hendelsestre er å etablere en temporal (daglig, månedlig, årlig) sannsynlighet for den første hendelsen 'initiering av lekkasje'. Sannsynlighetsestimater på 0.05/år som ble brukt er basert på erfaring i Norge og internasjonalt og statistiske betraktninger. Vurderingene som gir en verdi på 0.05/år er beskrevet i vedlegg F.

Med inngangsverdier på en sannsynlighet på 1/20 pr år (0.05/år) ble hele forløpet på hendelsene som kan føre til brudd analysert. Videre i treet, når det var stor usikkerhet, ble sannsynlighetsverdier på 0.5¹ brukt. Dette skjer allerede i den andre hendelsen når det må velges mellom 'normal' og 'unormal' lekkasje. Estimater er basert på erfaring med steinfyllingsdammer i Norge (statistikk i vedlegg B) og erfaring med stein- og jordfyllingsdammer utenlands. Erfaring med norske dammer bidro også til å bestemme sannsynlighet for "self-healing" prosessen, oppdagelse av lekkasje (pluss dagens regler om overvåking av lekkasje), og effektivitet av rehabiliteringstiltakene.

Utrasing er avhengig av tiden mellom lekkasje oppstår og oppdagelsen av den. Dravladalens damtå har imidlertid blitt rehabilitert mellom 1996 og 2012 (Vedlegg A). For en steinfyllingsdam som Dam Dravladalen med omfattende rehabilitering, er sannsynlighet for utrasing, utglidning og andre erosjon symptomer estimert som lav (ca. 5% eller mindre, "unlikely" til "very unlikely", eller usannsynlig til veldig usannsynlig, Tabell 3 i hovedrapporten). Mer detaljer om tankekjeden for hele treet finnes ovenfor selve hendelsestreet i Figur D1.

Ni grener i hendelsestreet fører ikke til dambrudd, mens seks grener fører til brudd av Dam Dravladalen. Grenene har en sannsynlighet for brudd mellom $6.3 \cdot 10^{-8}$ pr år og $3.1 \cdot 10^{-6}$ pr år. Dam Dravaldalens sannsynlighet for brudd under tilfellet 'indre erosjon' er derfor $4.7 \cdot 10^{-6}$ pr år.

Figur D2 gjennomfører den samme analyse for indre erosjon, men med områdetall som beskrevet i hovedteksten (Tabell 3 i Seksjon 3 i hovedrapporten). Ni grener i hendelsestreet fører ikke til dambrudd, mens fem grener fører til brudd av Dam Dravladalen. Grenene har en sannsynlighet for brudd mellom $6.3 \cdot 10^{-8}$ pr år og $3.1 \cdot 10^{-5}$ pr år. Dam Dravladalens sannsynlighet for brudd under tilfellet 'indre erosjon' er derfor mellom $3 \cdot 10^{-9}$ og $3 \cdot 10^{-5}$ pr år. En hendelsestre-analyse med tallområde for sannsynlighetsverdier er gjennomført for hvert tilfelle i Tabell D1. Resultatene oppsummeres i Seksjon D3 nedenfor, men kun treet for 'indre erosjon'-tilfellet er vist i dette vedlegget.

¹ En verdi på 0.5 når det er to grener. Det er 0.333 for tre grener, 0.25 for fire grener, osv.

D2.2 Flom, vinterhalvåret: Is og hardpakket snø som blokkerer overløpet (Fig. D3, D4)

Hendelsestre-analysene så på flom i kombinasjon med de antatt mest kritiske hendelsene, fordelt på vinter- og sommerhalvår. Det overordnede flomtreet er vist i Figur D3, og hendelsestreet for hendelsen med 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet' er vist i Figur D4. Snø og kuldeperioden på 6 måneder (1/2 år) ble bestemt etter konsultasjon med Statkraft personell lokalt på Dam Dravladalen.

Hendelsestre-analyse for tilfellet 'is og hardpakket snø i overløpet' har følgende utvikling: snø kommer inn i overløpet; danner is og hardpakket snø, som kan tette overløpet; hva er vannstands nivået i magasinet; går kraftstasjon; er bypass åpen; er bunntappeluke åpen; blir det flom som fører til overtopping, og så dambrudd. Dam Dravladalens overløp har blitt betydelig rehabilitert i 2012 (Vedlegg A og hovedrapport). Den omfattende ombygging av overløpet samt bildene fra de siste årenes ubetydelig snøakkumulasjon i tunnelen (Vedlegg A, bildeserie i annekset) bidro sterkt til å redusere sannsynlighetsverdiene sammenlignet med vurderingene som ble gjort i 1996. Mer detaljer om tankeketten for hele treet finnes ovenfor selve hendelsestreet i Figur D4.

Ti grener i hendelsestreet fører ikke til dambrudd, mens to grener fører til brudd av Dam Dravladalen. Disse to har sannsynligheter for brudd på $1.3 \cdot 10^{-8}$ pr år og $2.3 \cdot 10^{-7}$ pr år. Dammens sannsynlighet for brudd under tilfellet 'is og hardpakket snø i overløpet' er derfor $2.4 \cdot 10^{-7}$ pr år.

D2.3 Flom, sommerhalvåret: Bresmelting som renner inn i magasinet (Fig. D3, D5)

Avstanden mellom breen og Dam Dravladalen er på 2,5 km. Avstanden mellom breen og nærmeste punkt i magasinet er på 1 km. Figur D7 viser breen i bunn av bildet og Dam Dravladalen oppe i venstre. Et skred eller vann som følge av smelting av breen vil mest sannsynlig komme ned i Jukladalsvatn først og vil dermed bli betydelig dempet før det når Dravladalsvatn. Vannmengde kan potensielt være veldig stor og komme raskt, basert på erfaringer fra andre magasiner. Det er ikke registrert vannutbrudd fra breen i dette området tidligere (R. Birkeland, epost 5. februar 2016).

På samme måte som for hendelsen med 'is og hardpakket snø i overløpet' på vinterhalvåret ble bresmelting, for eksempel forårsaket av klimaendring, som renner inn i magasinet, antatt å være plausibel kun på sommerhalvåret. Dette ble bestemt etter konsultasjon med Statkraft personell lokalt på Dam Dravladalen. Det overordnede flomtreet er vist i Figur D3, og hendelsestreet for hendelsen med 'bresmelting som renner inn i magasinet' er vist i Figur D5.

Hendelsestre-analyse for tilfellet 'bresmelting som renner inn i magasinet' har følgende utvikling: flomsituasjon; hva er vannstands nivået i magasinet; er det bresmelting; fører vannene til overtopping. Under workshop'en ble det mye diskusjon om hvor mye usikkerheter det kan

være i flomberegningene. Noen mente at verdier som var gitt i CMConsulting (2008) var et absolutt maksimum mens andre mente at flomverdien med en returperiode på 10.000 år hadde en viss usikkerhet og kunne overskrides (dvs $Q > Q_{10.000 \text{ år}}$). Uenigheten besto i om det var mulig i det hele tatt at en flom større enn 10.000-års hendelsen kunne skje, og om det var usikkerhet i flomverdiene som var resultatet av flomberegningene i 2008 (CMConsulting 2008).

Etter diskusjonen, valgte NGI å bruke en maksimumflom med en sannsynlighet på 0.0001 (én i 10.000 år), og at verdiene var beheftet med en viss usikkerhet, spesielt med tanke på at også Norge er i en periode med klimaendring (NVE 2015) eller erfarer i hvert fall hyppigere ekstremt regnvær. Det betyr at $Q_{10.000 \text{ år}}$ kan overskrides.

Mer detaljer om tankekjeden for hele treet finnes ovenfor selve hendelsestreet i Figur D5.

Ni grener i hendelsestreet fører ikke til dambrudd, mens seks grener fører til brudd av Dam Dravladalen. Disse grenene har sannsynligheter for brudd mellom $2.3 \cdot 10^{-9}$ pr år og $5.0 \cdot 10^{-6}$ pr år. Dam Dravladalens sannsynlighet for brudd under tilfellet 'bresmelting som renner inn i magasinet' er derfor $5.4 \cdot 10^{-6}$ /år.

Resultatet er faktisk dominert av forgreningen hvor $Q > Q_{10.000 \text{ år}}$, som var tema for diskusjon under workshop'en. Dam Dravaldalens sannsynlighet for brudd under tilfellet 'bresmelting som renner inn i magasinet' reduseres til $3.7 \cdot 10^{-7}$ /år hvis man tror at en slik hendelse ikke kan skje.

D2.4 Jordskjelv (Fig. D6)

Hendelsestre-analyse for tilfellet 'jordskjelv' har følgende utvikling: et jordskjelv med en maksimum akselerasjon (A_{\max}) som fører til setninger i damkronen, så overtopping hvis det ikke er nok fribord, og til slutt dambrudd.

Figur D8 gir koordinater for Dam Dravaldalen og Figur D9 presenterer de nyeste jordskjelvkartene som ble brukt for å estimere maksimum akselerasjon ("peak ground acceleration", PGA) for forskjellige returperioder. Det er ikke noe forskjell i verdiene brukt i 1996 og 2016 selv om jordskjelv kart ble oppdatert i 2008. Figur D10 gir verdiene brukt i 1996 og 2012. Venstre figur gir maksimum akselerasjon i en semi-log skala. Høyere figur gir verdiene i en aritmetisk skala.

I analysene ble en maksimum jordskjelvakselerasjon verdi med returperiode på ca. 500 år (475 år), eller $A_{\max} = 0.15g$, ble brukt. Setninger i damkronen mindre enn 2.1m var ansett som ikke kritiske, men overtopping kunne skje for setninger større enn 2.1m. Om overtopping skjer er avhengig av om magasinet var fullt eller ikke under jordskjelvet. Ikke all overtopping fører til dambrudd. Siden det var stor usikkerhet med dette ble en sannsynlighet på 0.5 brukt for denne forgrening (to grener). Mer detaljer om tankekjeden for hele treet finnes ovenfor selve hendelsestreet i Figur D6.

Fem grener i hendelsestreet fører ikke til dambrudd, mens to grener fører til brudd av Dam Dravladalen. Hver av disse to grener har en sannsynlighet for brudd på $4.5 \cdot 10^{-8}$ pr år. Dam Dravladalens sannsynlighet for brudd under tilfellet 'jordskjelv' er derfor $9.0 \cdot 10^{-8}$ pr år.

D3. Sannsynlighet for brudd fra hver hendelsestre-analyse

Den årlige sannsynlighetene for brudd for hver hendelsestre-analyse i Figur D1 til D6 (dvs hver hendelse eller utløsningsmekanisme) er oppsummert i Tabell D2. Analysene er gjennomført med best estimat av sannsynlighetsverdier (Tabell 3 i hovedrapport). Den årlige sannsynligheten for brudd for de samme hendelsene hvor analysene med 'områdetall' for sannsynlighetsverdier (Tabell 4 i hovedrapport) er gitt i Tabell D3.

I Tabell D2 er sannsynlighet-for-brudd verdiene for hver av hendelsene for Dam Dravladalen lavere enn 10^{-5} per år. Disse sannsynligheter er svært lave og, som diskutert i hovedrapporten, lave i forhold til de fleste dammer utenlands. De to hendelsene med høyeste sannsynlighet for brudd, 'flom på sommerhalvåret med bresmelting som renner inn i magasinet' og 'indre erosjon', har årlig sannsynlighet for brudd på ca. $5 \cdot 10^{-6}$ /år når man bruker best estimat sannsynlighetsverdier i analysene (Tabell D2).

Når 'områdetall' brukes for sannsynlighetene i hendelsestrærne, er sannsynlighet for brudd noe høyere, mens det nedre estimatet er så lavt som 10^{-9} /år (Tabell D3). Spredningen av sannsynlighetsverdier illustrerer effekten av usikkerhetene, men spredningen er urealistisk stor. Beregningene i Tabell D3 gir et altfor urealistisk bredt område for sannsynligheter, fordi alle minimumsverdier er brukt samtidig og alle maksimumsverdier er brukt samtidig. I realitet, minimum, maksimum og verdier i mellom bør brukes om hverandre.

Et verktøy for å oppnå dette er å bruke Monte Carlo simulering med tilfeldige verdier for hver parameter. Vedlegg E (Bayesian nettverk-analyser) bygger videre på sannsynlighetsverdi-områdene for hendelser og gjennomfører Monte Carlo simuleringer for å begrense spredningen på sannsynlighet for brudd områdene.

Tabell D2. Årlig sannsynlighet for brudd fra de forskjellige hendelsestrær for Dam Dravladalen - Best estimat av sannsynlighetsverdier brukt i analysene.

Hendelse	Figur nr	Årlig sannsynlighet for brudd, P_f årlig	
Indre erosjon forårsaket av lekkasje	D1	$4.7 \cdot 10^{-6}$ / år	
Flom	Vinterhalvåret Is og hardpakket snø blokkerer overløpet	D3 og D4	$2.4 \cdot 10^{-7}$ / år
	Jordskjelv	D6	$9.0 \cdot 10^{-8}$ / år

* Dominert av $Q > Q_{10000}$ forgrening, Figur D5.

Tabell D3. Årlig sannsynlighet for brudd for de forskjellige hendelsestrær for Dam Dravladalen - Best estimat områdetall for sannsynlighetsverdier ble brukt i analysene.

Hendelse	Figur nr	Årlig sannsynlighet for brudd, P_f årlig		
		Nedre estimat	Best estimate	Øvre estimat
Indre erosjon forårsaket av lekkasje	D1, D2	$2.8 \cdot 10^{-9}$ / år	$4.7 \cdot 10^{-6}$ / år	$3.2 \cdot 10^{-5}$ / år
Flom {	Vinterhalvåret			
	Is og hardpakket snø blokkerer overløpet	---	$8.5 \cdot 10^{-11}$ / år	$2.4 \cdot 10^{-7}$ / år
	Sommerhalvåret			
	Bresmelting renner inn i magasinet	---	$8.2 \cdot 10^{-11}$ / år	$5.4 \cdot 10^{-6}$ / år
Jordskjelv	---	$1.8 \cdot 10^{-10}$ / år	$9.0 \cdot 10^{-8}$ / år	$1.4 \cdot 10^{-7}$ / år

D4. Total bruddsannsynlighet fra hendelsestre-analyser (2016)

Tabell D4 gir den totale årlige sannsynlighet for brudd for Dam Dravladalen av geotekniske og naturlige årsaker. I tillegg kommer eventuell bruddsannsynligheten forårsaket av utilsiktede hendelser (sabotasje og terrorhendelser).

Den totale årlige sannsynligheten for brudd av geotekniske og naturlige årsaker er 10^{-5} / år eller én gang per 100.000 år.

Beregningene med nedre sannsynlighetsestimater gir ekstremt lave sannsynlighet for brudd (nedre estimat gir P_f årlig = 10^{-9} / år). Øvre estimater gir en total årlig sannsynligheter for brudd på ca. 10^{-4} / år for tre bruddmekanismer (Tabell D3): indre erosjon, og flom både på vinterhalvåret og på sommer halvåret. Den totale sannsynligheten for brudd er da ca. 5 ganger pr 10.000 år eller én gang pr 2.000 år, noe som er sammenlignbart med andre vannkraftdammer internasjonalt. Hovedrapporten diskuterer resultatene i mer detalj.

Tabell D4. Total årlig sannsynlighet for brudd med beste estimat for Dam Dravladalen - Sammenlagt bruddsannsynlighet av geotekniske og naturlige årsaker.

Hendelse	Årlig sannsynlighet for brudd, P_f årlig	
Indre erosjon forårsaket av lekkasje	$4.7 \cdot 10^{-6}$ / år	
Flom {	Vinterhalvåret	
	Is og hardpakket snø som blokkerer overløpet	$2.4 \cdot 10^{-7}$ / år
	Sommerhalvåret	
	Bresmelting som renner inn i magasinet	$5.4 \cdot 10^{-6}$ / år
Jordskjelv	$9.0 \cdot 10^{-8}$ / år	
Sammenlagt bruddsannsynlighet, geotekniske og naturlige årsaker	$1.0 \cdot 10^{-5}$ / år	

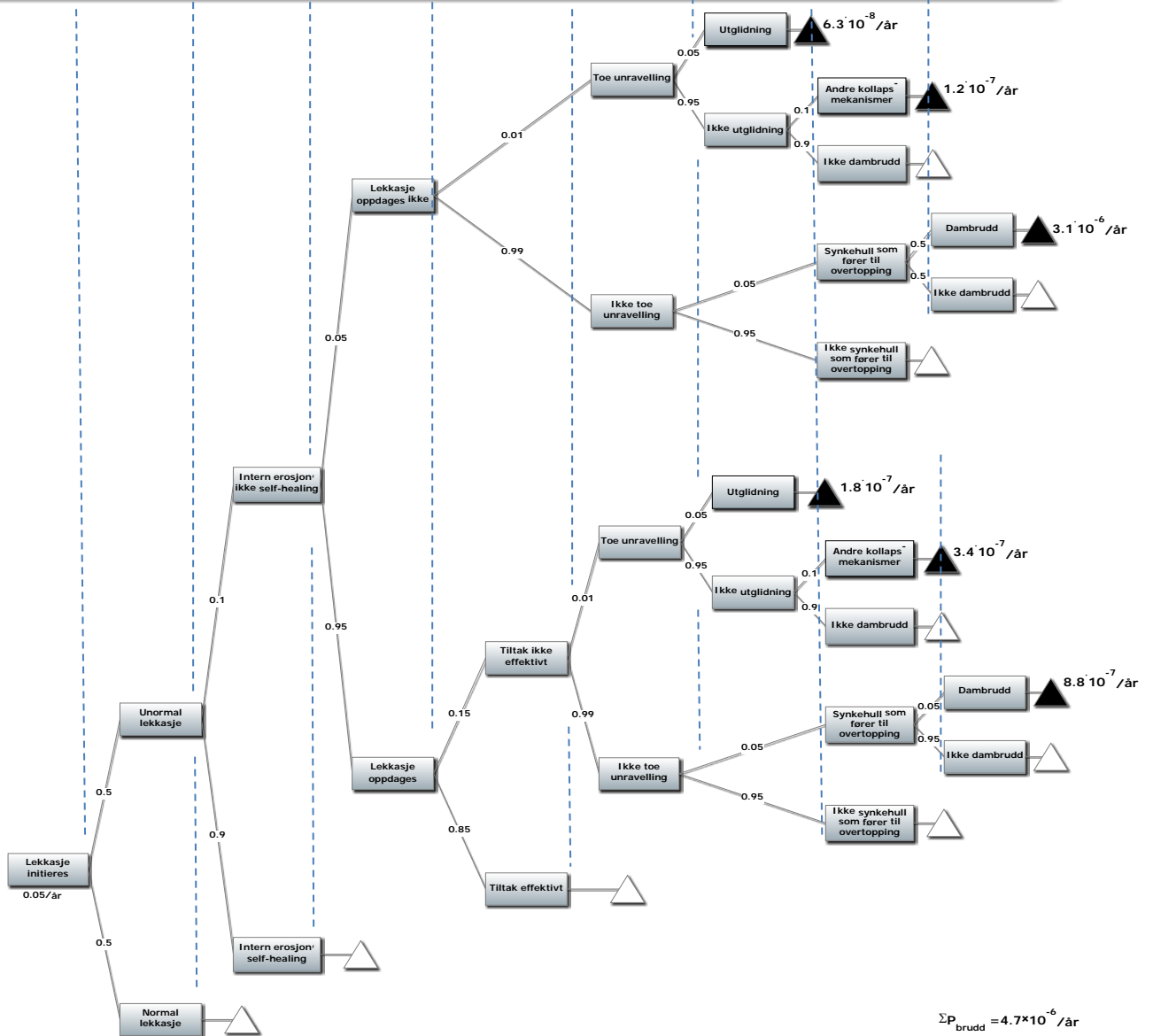
Tabell D5. Total årlig sannsynlighet for brudd med nedre, beste og øvre estimater for Dam Dravladalen av geotekniske og naturlige årsaker.

Hendelse	Årlig sannsynlighet for brudd, P_f årlig		
	<u>Nedre estimat</u>	<u>Beste estimat</u>	<u>Øvre estimate</u>
Geotekniske og naturlige årsaker	$3 \cdot 10^{-9} / \text{år}$	$1.0 \cdot 10^{-5} / \text{år}$	$2.9 \cdot 10^{-4} / \text{år}$

D5. Referanser

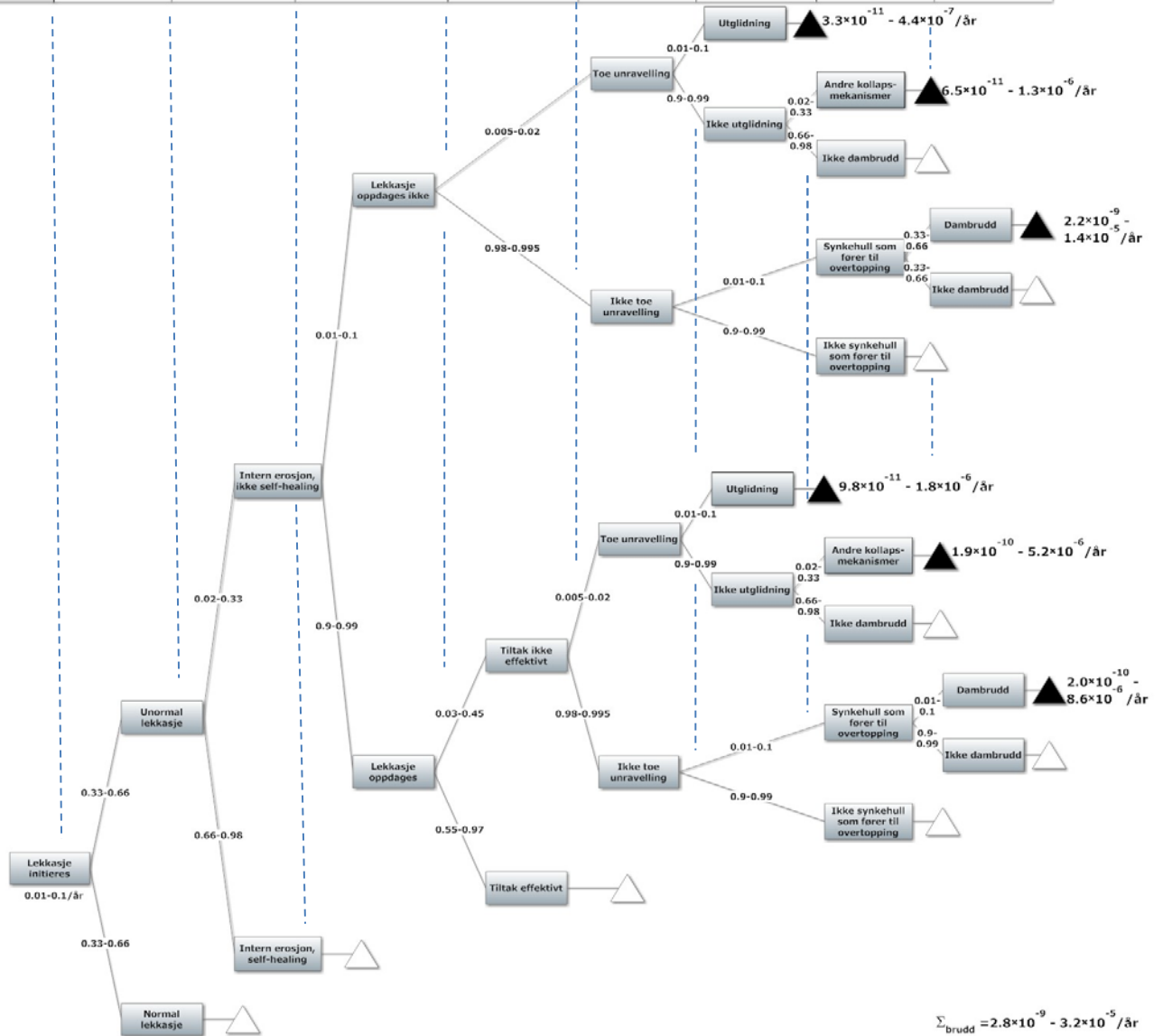
- CM Consulting (2008). Flomberegning Dravaldalsdammen. Rapportnr 2008P1010-01. 11 April 2008.
- NASA (2011a). Probabilistic Risk Assessment Procedures. Guide for NASA Managers and Practitioners, NASA/SP-2011-3421 (Stamatelatos, M. and Dezfuli, H.). NASA Headquarters. Washington, DC. 2nd ed. Dec 2011.
- NASA (2011b). NASA Risk Management Handbook. NASA/SP-2011-3422. Ver. 1.0. NASA Headquarters. Washington, D.C. November 2011.
- NVE (2015). Klimaendringer og damsikkerhet: Analyse av dammers sårbarhet for økte flommer. Rapport 94/2015 (G.H. Midttømme). ISBN 978-82-410-1146-7 12 pp.

Vil lekkasje finne sted?	Størrelse på lekkasje?	Vil lekkasjen stoppe av seg selv ("self-healing")?	Vil lekkasjen oppdages?	Effektivitet av tiltak?	Vil toe unravelling finne sted?	Utglidning?	Andre kollapsmekanismer enn utglidning?	Dambrudd som følge av utglidning, synkehull og overtopping
3 av 5 dammer har hatt unormal lekkasje gjennom kjernen på Folgefonn over en periode på 40 år. P(unormal lekkasje initiert) = 3/(5*40) = 2.5% per år. Her benyttes 0.05/år for konservatisme; det tilsvarer 87% sannsynlighet for lekkasje over en 40-års periode (Vedlegg G)	Høyeste observerte lekkasje på rehabiliterte Dravladalsdammen er 10l/s (2012-2015). Klart vann dvs ingen utvasking av masser. Forventet vanngjennomstrømning er 3-5 l/s. Unormal lekkasje defineres som lekkasje > 10l/s (i tillegg til den forventede vanngjennomstrømningen).	Filter installert. Lekkasje som ikke stopper av seg selv: konsentrert lekkasje som fører til erosjon og mulig rørdannelse ("piping") og synkehull	Stor sannsynlighet for at det oppdages: Automatiske lekkasje målinger forberedt ved rehabilitering. Sannsynligheten for at det ikke oppdages omfatter: Manglende oppfølging/menneske like feil målesystem ute av drift etc.	Driftsansvarlig har en analyseplan for tiltak ved forskjellige volumer av lekkasje. Menneskelige feil: Det er ikke nødvendig med rask reaksjon for at tiltaket skal være effektivt; de fleste vil iverksette riktige tiltak når de får litt tid på seg. Senking av magasinivå som tiltak er pr. definisjon ikke effektivt hvis $Q_{ut} < Q_{inn}$	Avhenger av tiden det tar før lekkasjen og erosjonen oppdages. Damtå er nå forsterket tåler vannstrøm på 30m ³ /s.	Steinfyllinger er robuste og stabile. Dammens skrånende kjerne gir lavere sannsynlighet for utglidning i nedstrøms skråning	Utvasking av fyllmasser som kan føre til setninger, synkehull og overtopping.	Dambrudd vil ikke skje hvis overtopping kun varer i "kort tid"



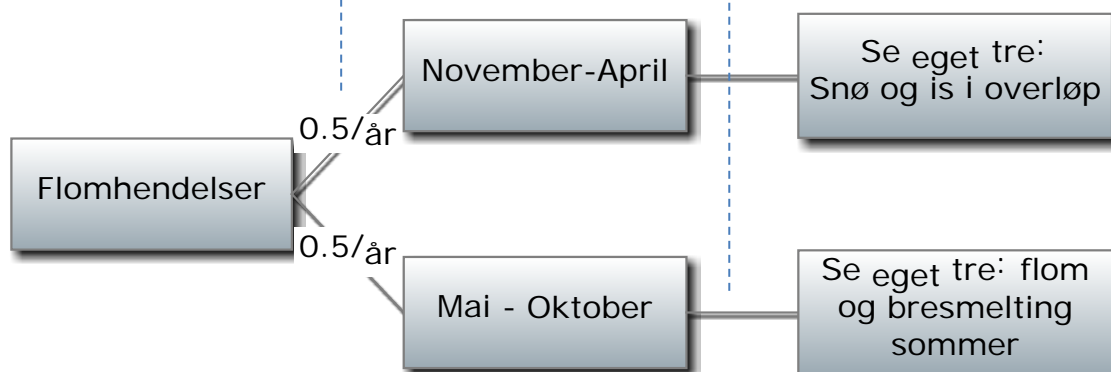
Figur D1: Hendelsestre-analyse for indre erosjon med best estimat av sannsynlighetsverdiene for hver hendelse.

Vil lekkasje finne sted?	Størrelse på lekkasje?	Vil lekkasjen stoppe av seg selv ("self-healing")?	Vil lekkasjen oppdages?	Effektivitet av tiltak?	Vil toe unravelling finne sted?	Utglidning?	Andre kollapsmekanismer enn utglidning?	Dambrudd som følge av utglidning, synkehull og overtopping
3 av 5 dammer har hatt unormal lekkasje gjennom kjernen på Folgefonn over en periode på 40 år: P(unormal lekkasje initiert) $\approx 3/(5 \times 40) = 2.5\%$ per år. Her benyttes 0.05/år for konservatisme, det tilsvarer 87% sannsynlighet for lekkasje over en 40-års periode. (Vedlegg G)	Høyeste observerte lekkasje på rehabiliterte Dravdalssdammen er 10l/s (2012-2015) - Klart vann, dvs. ingen utvasking av masser - Forventet vanngjennomstrømning er 3-4 l/s - Unormal lekkasje defineres som lekkasje > 10l/s.	- Filter installert - Lekkasje som ikke stopper av seg selv; konsentrert lekkasje som fører til erosjon og mulig rørdannelse ("piping") og synkehull	Stor sannsynlighet for at det oppdages: - Automatiske lekkasje målinger, forbedret ved rehabilitering Sannsynligheten for at det ikke oppdages omfatter: - Manglende oppfølging/menneskelige feil, målesystem ute av drift etc.	- Driftsansvarlig har en analyseplan for tiltak ved forskjellige volumer av lekkasje. - Menneskelige feil: Det er ikke nødvendig med rask reaksjon for at tiltaket skal være effektivt; de fleste vil iverksette riktige tiltak når de får litt tid på seg - Senking av magasinnivå som tiltak er pr. definisjon ikke effektivt hvis $Q_{ut} < Q_{inn}$	- Avhenger av tiden det tar før lekkasjen og erosjonen oppdages - Damtå er nå forsterket, tåler vannstrøm på 30m ³ /s.	- Steinfyllinger er robuste og stabile - Dammens skrånende kjerne gir lavere sannsynlighet for utglidning i nedstrøms skråning	- Utvasking av fyllmasser som kan føre til setninger, synkehull og overtopping.	Dambrudd vil ikke skje hvis overtopping kun varer i "kort" tid.



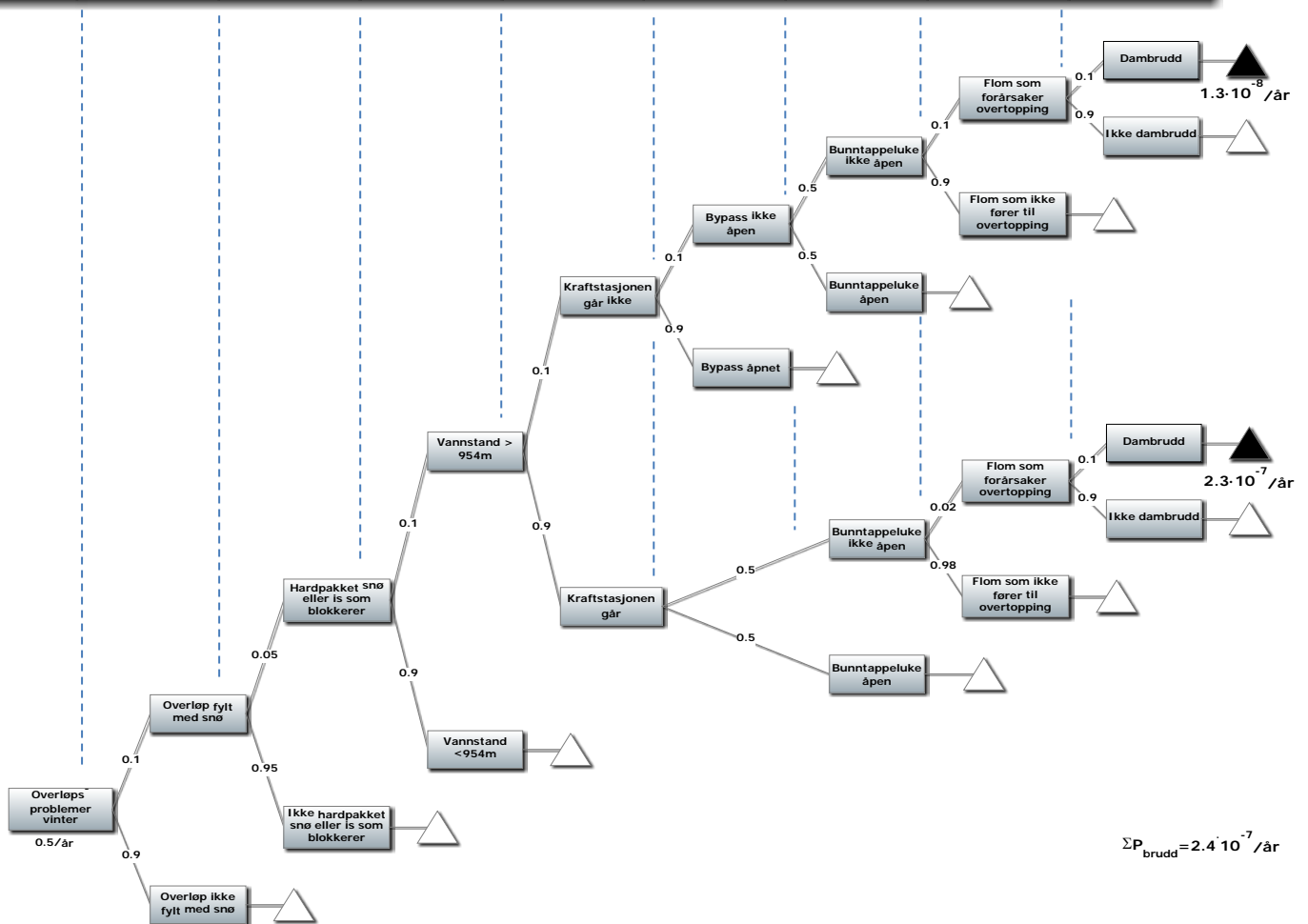
Figur D2: Hendelsestre-analyse for intern erosjon med øvre og nedre estimat for sannsynlighetsverdiene for hver hendelse.

Hendelse	Tid på året?	Årstidsspesifikke problemer i kombinasjon med flom
Flomhendelser i kombinasjon med andre hendelser	Deler opp i en sommerforgrening og en vinterforgrening for å kunne gjøre årstidsspesifikke analyser	Vinter: Flom kombinert med hardpakket snø og is i overløp Sommer: Flom kombinert med bresmelting i magasinet



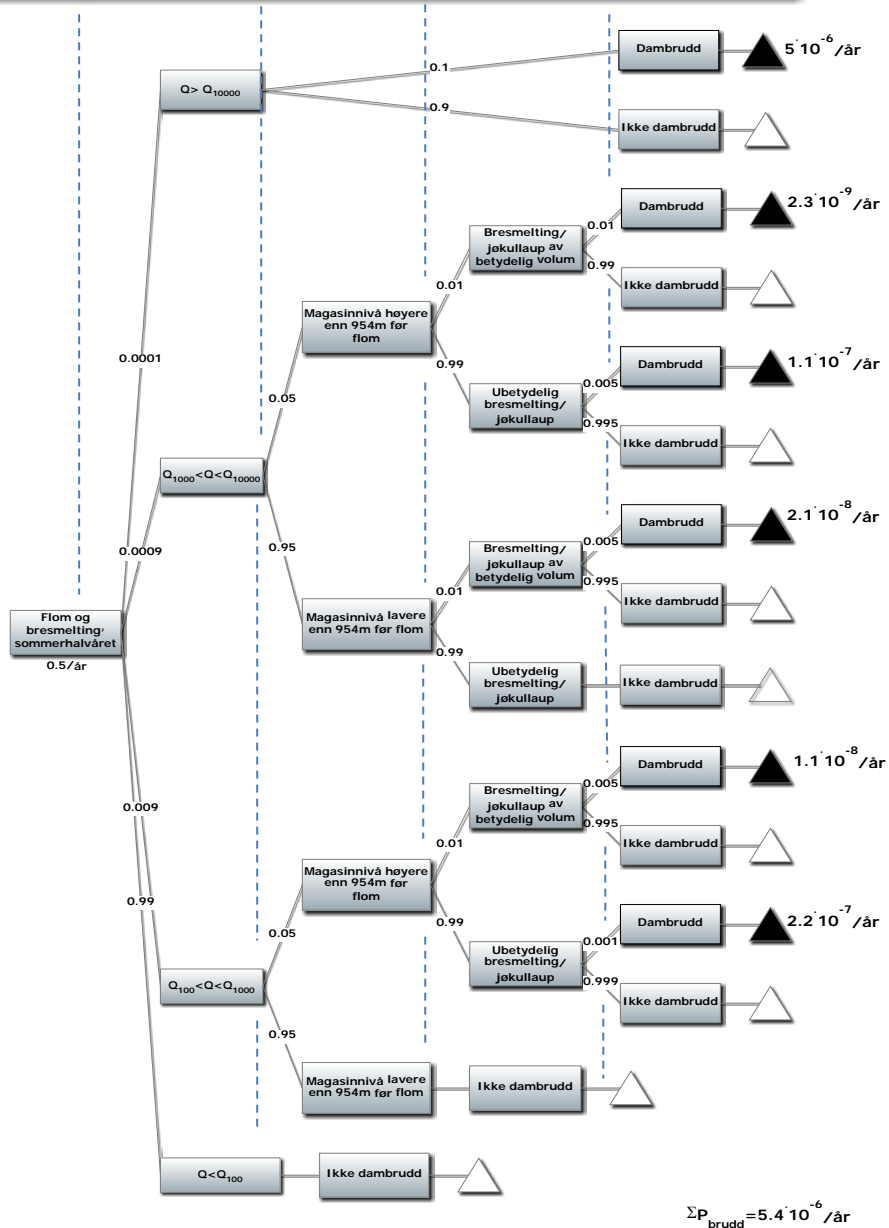
Figur D3 Overordnet hendelsestre for flomhendelser kombinert med årstidsspesifikke hendelser fordelt på vinter- og sommerhalvåret.

Tid på året og hendelser	Snø i overløp?	Is og hardpakket snø?	Vannstand i magasinet?	Går kraftstasjonen?	Er bypass åpen?	Er bunntappeluke åpen?	Flom som fører til overtopping?	Dambrudd?
Omfatter vinterhalvåret P = 0.5 Hendelser: Overløpsproblemer kombinert med flom	Forårsaket av snøsog inn i overløpet -17 m akkumulert snø årlig i Dravladalen Siden 2012: Overbygg med tette sidevegger over eksisterende flomløp som fungerer bra	Is og hardpakket snø kan tette overløpet Ikke høyt vanninnhold i snøen som er en forutsetning for isdannelse Lite sannsynlig med tine/fryseprosesser Kun delvis blokkering	Vannstand høyest i desember synker fra januar til juni Sannsynlighet for vannstand over nivå 954m i April: 5 - 10%. Benytter 10% som representativt for sannsynligheten på vinteren Nivå under 954m: tilstrekkelig fribord i magasinet Merk: Nivå 954m er 3m under HRV=957m	Konservative sannsynligheter basert på driftserfaring Konsensus fra workshopen	Konservative sannsynligheter basert på driftserfaring Konsensus fra workshopen -Bypass er en energidreper som gjør det mulig å tappe forbi vann dersom kraftstasjonen står Den kan ikke nyttes samtidig med kraftstasjonen derfor vurderes ikke kombinasjoenen av kraftstasjon og bypass.	Bunntappeluken er testet Åpning er avhengig av fremkommelighet av personell og strøm	Samlet slukeevne i kraftstasjon og bunntappeluke er 45 m ³ /s -10 årsflom 40m ³ /s, sannsynlighet 0.1 Hvis kraftstasjonen går (nedre forgrening) vil kun flommer større enn 50års flommen (sannsynlighet 0.02) forårsake overtopping	Det kan ta tid før overtopping går til brudd Damtå er utbedret Damtøpp er plastret Det vil ikke gå 40 m ³ /s over dammen da noe av overløpet vil fungere (ikke fullstendig blokkasje)



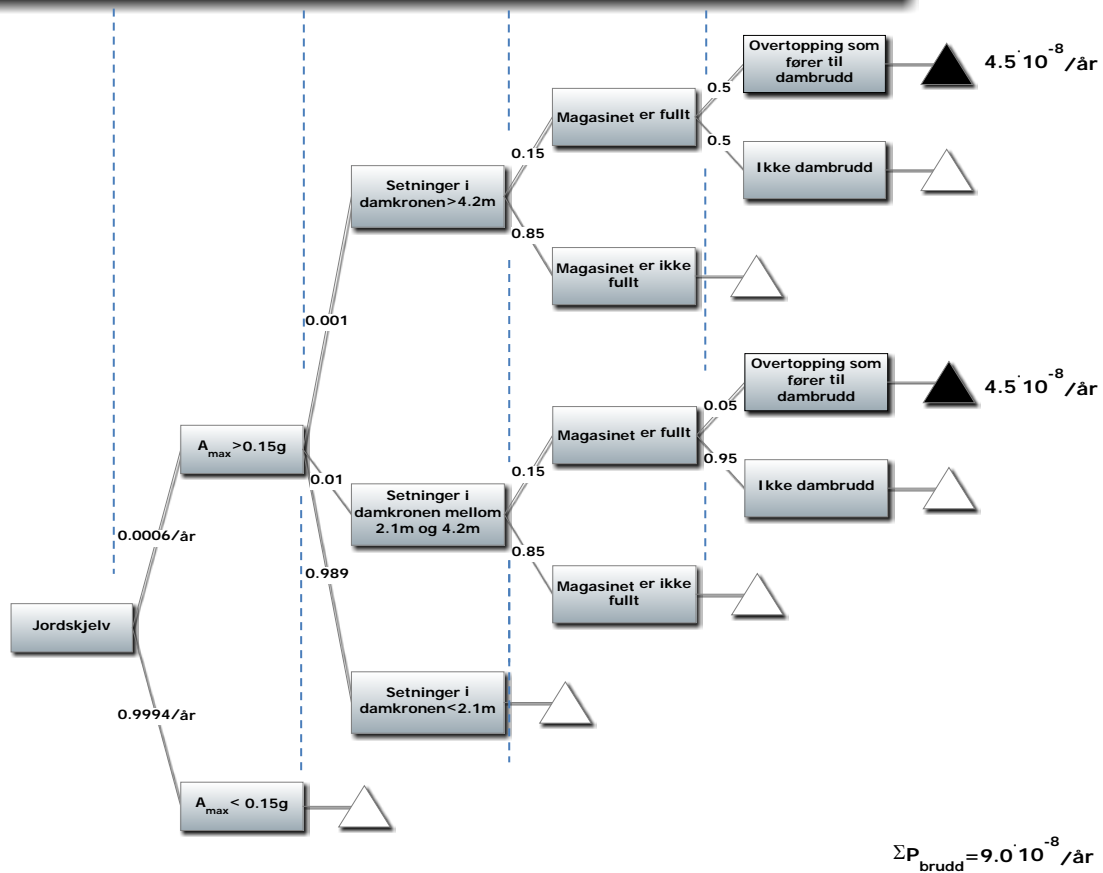
Figur D4. Hendelsestre-analyse for snø og is i overløpet (om vinterhalvåret) kombinert med flom.

Tid på året og hendelser	Flom?	Magasinnivå før flom?	Bresmelting/jøkullaup?	Dambrudd?
Omfatter sommerhalvåret P = 0.5 Hendelser: Flom og bresmelting	Gitt fra flomberegningene PMF antas å ha gjentakelsesintervall på 10 000 år (det kan være betydelig lengre). PMF er beregnet ut fra høyeste verdier og har derfor mindre usikkerhet enn vanlige flomberegninger	Vannstand synker fra januar - juni Sannsynlighet for høyere vannstand enn 954m i April er 5-10%. Benytter 5% som representativt for sommeren	Omfatter sannsynligheten for Jøkullaup og sannsynligheten for at volumet er stort nok. Jøkullaup skjer: 10%, Stort volum gitt jøkullaup: 10%, dvs. 0.01 for hendelsene samlet. Breen er 1 km fra nærmeste punkt i magasinet. Potensielt store vannmengder fra breen men vil gå i Jukladalsvatn først og begrenses før de når Dravladalsvatn	Basert på degree-of-belief; [Vick 2002] -Store personvariasjoner i disse tallene blant deltagerne på workshopen Sannsynlighetene representerer første iterasjon. Det bør ses på ulike typer bruddmekanismer det kan gi lavere sannsynlighet



Figur D5. Hendelsestre-analyse for bresmelting i magasinet (sommerhalvåret) kombinert med flom.

Hendelse	A_{max} ?	Setninger i damkronen?	Magasinnivå?	Dambrudd?
Jordskjelv	Basert på nye jordskjelvkart' ekstrapolering av 100 års og 475 års jordskjelvene for å finne $P(A_{max} > 0.15g)$ - $A_{max} < 0.15g$ er ikke vurdert da det er ansett å ikke gi setninger i kjernen på mer enn 2.1 m	Endrede grenser siden 1996 analysen' siden damkronen er hevet 1.5m. Øverste gren omfatter overtopping av dammen' midtre gren overtopping av kjernen' Nederste gren: ingen overtopping	Lavere sannsynlighet for at magasinet er fullt enn i 1996 analysen fordi damkronen er hevet 1.5 m	Damta er forsterket' derfor er overtopping et mindre problem i 2016 enn i 1996. Følgelig er sannsynlighetene for dambrudd som følge av overtopping lavere enn i 1996.



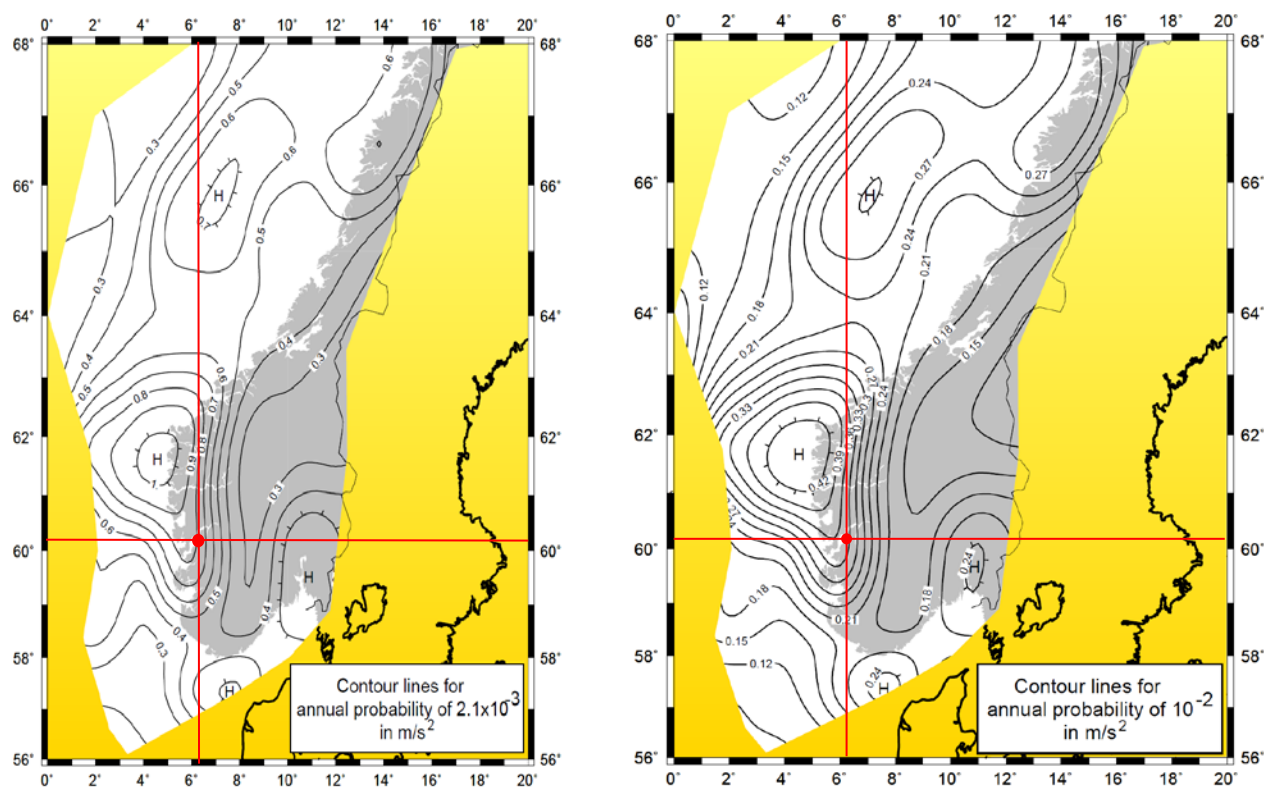
Figur D6. Hendelsestre-analyse for jordskjelv som fører til setninger i damkronen, overtopping og dambrudd.



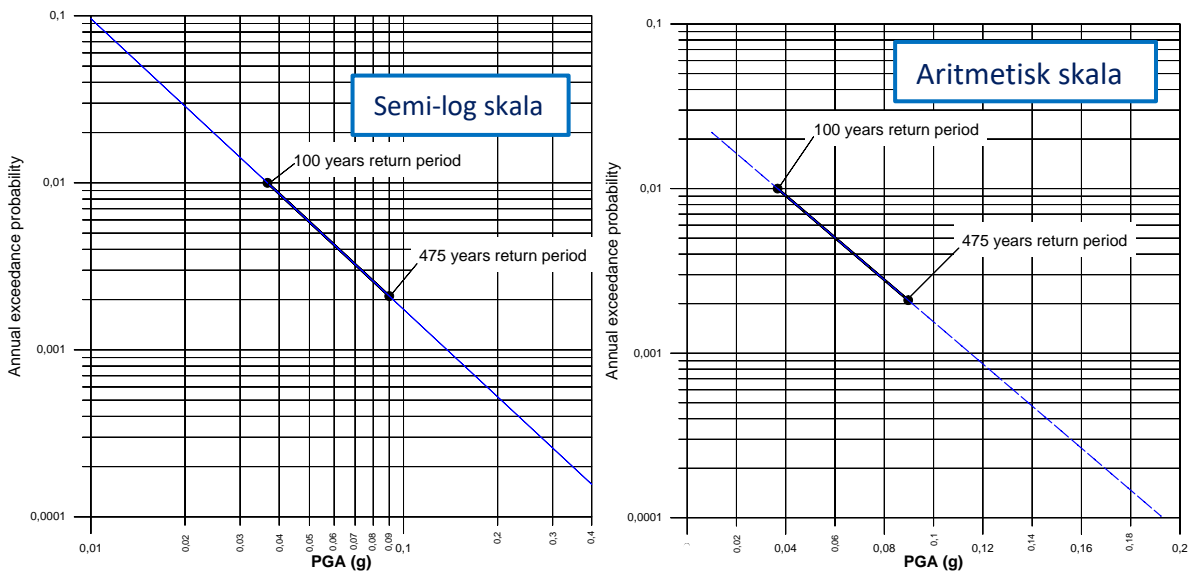
Figur D7. Avstand fra Dam Dravladalen og breen.



Figur D8. Koordinater for Dam Dravladalen (ca. 60 grader nord, 6 grader øst).



Figur D9. Seismisitet ved Dam Dravladalen: 475-år jordskjelv, $PGA \approx 0.88 \text{ m/s}^2$ (venstre); 100-år jordskjelv, $PGA \approx 0.36 \text{ m/s}^2$ (høyre) [PGA: "Peak ground acceleration"].



Figur D10. Seismisitet ved Dam Dravladalen: "Peak ground acceleration" (PGA) for 100-år og 475-år jordskjelv.

Vedlegg E

"BAYESIAN NETWORKS" ANALYSER AV DAM DRAVLADALEN (2016) *[PROBABILISTIC ANALYSES OF DAM DRAVLADALEN WITH BAYESIAN NETWORK]*

Contents

E.1	Bakgrunn	2
E.2	Bayesian network	2
E.3	Application of Bayesian network to risk assessment of Dam Dravladalen	3
	E.1.1 Dam failure due to 'ice and hard-packed snow blocking spillway'	3
	E.1.2 Dam failure due to earthquake	8
E.4	Bayesian network analyses enhanced with Monte Carlo simulations	10
	E.1.3 Probability density function for each event	10
	E.1.4 Results of Bayesian network analyses enhanced with Monte Carlo simulations	13
	E.1.5 Distribution of probabilities of failure for Dravladalen Dam	13
E.5	Comparison of ETA and BN analyses	14
E.6	References	16

E.1 Bakgrunn

Vedlegg E presenterer resultatene fra "Bayesian network"-analysene av sannsynlighet for brudd for Dam Dravladalen. "Bayesisk nettverk"-metoden er relativt ny og er beskrevet i noe detalj i vedlegget. Flere av faguttrykkene er fortsatt kjent kun på engelsk. Analysene ble gjort av NGIs Dr. Zhongqiang Liu som fortsatt lærer å skrive norsk. Av disse grunner er teksten for vedlegget på engelsk. Derimot ble de fleste figurene laget på norsk, og figurtitlene og tabelltitlene gis både på engelsk og norsk. "State-of-the-art" rapporten om risikovurdering av dammer (NGI 2016) gir mer informasjon om metoden og har et vedlegg med en artikkel om metoden av Liu *et al* 2015.

Bayesiske nettverksanalyser ble gjennomført for to av tilfellene fra vedlegg D:

- 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet'
- 'jordskjelv'

Bayesiske nettverksanalyser er gjennomført for å verifisere resultatene fra hendelsestre-analysene i Vedlegg D. Det bayesiske nettverket er deretter supplert med Monte Carlo analyser for å ta hensyn til usikkerheter i sannsynlighetsverdiene på hendelsestrærne (områdetall sannsynlighetsverdiene fra Tabell 3 i hovedrapporten) og for å kvantifisere gjennomsnitt, maksimum og minimum verdier for sannsynlighet for brudd for Dam Dravladalen.

E.2 Bayesian network

A Bayesian network (BN), also called a belief network, or Bayes net or causal network, is an increasingly popular method for reasoning under conditions of uncertainty and for modelling uncertain domains. It has been applied to a number of civil and environmental engineering problems, ranging from avalanche risk assessment (Grêt-Regamey and Straub 2006), design of early warning system for landslide hazard mitigation (Medina-Cetina *et al* 2007), rock slope failure assessment (Einstein *et al* 2010), dam risk analysis (Smith 2006, Peng *et al* 2012), earthquake risk management (Bayraktarli *et al* 2005; Bensi *et al* 2011) and multi-hazard and multi-risk assessment (Liu *et al* 2015).

A Bayesian network is a probabilistic model based on directed acyclic graph expressed as:

$$B_S = G(Z, E) \quad (E1)$$

where B_S represents the structure of the network, Z is the set of random variables (Z_1, Z_2, \dots, Z_n), and $E \in Z \times Z$ is the set of directed arcs, representing the probabilistically conditional dependency relationships among random variables. Each variable Z_i can be defined in a discrete and finite outcome space (discrete random variable) or as a continuous outcome space (continuous random variable).

One important property of the Bayesian network is that the joint probability function of all random variables in the network can be factorized into conditional and unconditional probabilities implied in the network (Jensen 2007). Thus, the joint distribution can be expressed in the compact form as:

$$P(z_1, z_2, \dots, z_n) = \prod_{i=1}^n P(z_i | pa(z_i)) \quad (\text{E2})$$

where $pa(z_i)$ is the parent set of z_i . It should be noted that if child node z_i has no parents, then the equation reduces to the unconditional probability of $p(z_i)$.

E.3 Application of Bayesian network to risk assessment of Dam Dravladalen

The Bayesian network analyses were run for two of the cases studied with the event tree analysis method in Appendix D:

- 'ice and hard-packed snow blocking spillway'
- 'earthquake'

The Bayesian network analyses are first used to verify the results of the event tree analyses. Thereafter, the Bayesian network analyses are supplemented with Monte Carlo simulations to obtain the statistics of the probability of dam breach for Dravladalen Dam in terms of the mean, maximum and minimum probabilities of failure.

E.1.1 Dam failure due to 'ice and hard-packed snow blocking spillway'

The Bayesian network (BN) for the case of 'ice and hard-packed snow blocking spillway' ('is og hardpakket snø som blokkerer overløpet') is presented in Figure E1.

Calculations with lower bound, best estimate and upper bound probabilities for each event ("hendelse") were done using Hugin Lite (Hugin Expert 7.8, 2016). The BN model takes into account the inter-relationships of events in its systematic structure. The lower bound estimate, best estimate and upper bound estimate probability descriptors from Table 3 and 4 in the main report were used in the BN analyses. The Bayesian network results are presented in Figures E2 to E4, and correspond to the event tree analyses in Figures D3 and D4 in Appendix D. In Figures E2 to E4, all the probabilities are shown as percentage (i.e. 99=0.99).

Lower bound estimate

With the lower bound estimates of probabilities, the Bayesian network analysis of the case of 'ice and hard-packed snow blocking spillway' gives a probability of failure Dam Dravladalen of $8.5 \cdot 10^{-11}$ /year (Fig. E2, numbers are in percentage points). The result is identical to that with the event tree analysis (Table D3 in Appendix D), as it should.

Best estimate

With the best estimates of probability descriptors, the Bayesian network analysis of the case of 'ice and hard-packed snow blocking spillway' gives a probability of failure Dam Dravladalen of $2.4 \cdot 10^{-7}$ / yr. (Fig. E3, numbers are in percentage points). The result is identical to that with the event tree analysis (Table D3 in Appendix D), as it should.

Upper bound estimate

With the upper bound estimates of probabilities, the Bayesian network analysis of the case of 'ice and hard-packed snow blocking spillway' gives a probability of failure Dam Dravladalen of $1.1 \cdot 10^{-4}$ / year (Fig. E3, numbers are in percentage points). The results is identical to that with the event tree analysis (Table D3 in Appendix D), as it should.

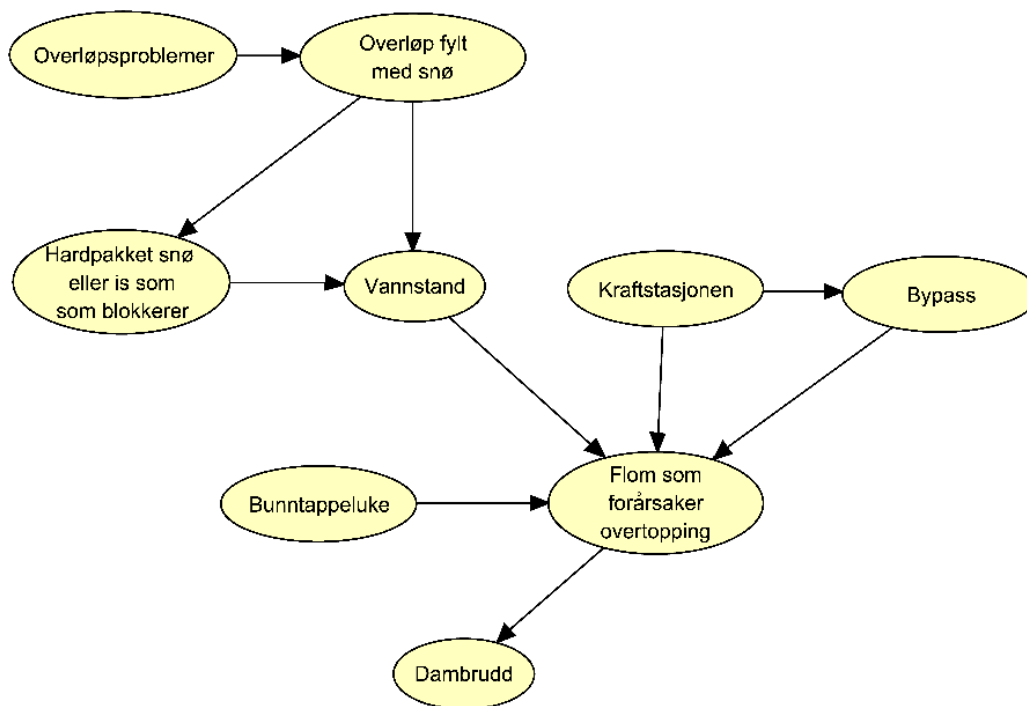


Figure E1. Bayesian network for dam failure due to 'ice and hard-packed snow blocking spillway'
 [Figur E1. Bayesisk nettverk for dambrudd forårsaket av 'is/hardpakket snø som blokkerer overløpet].

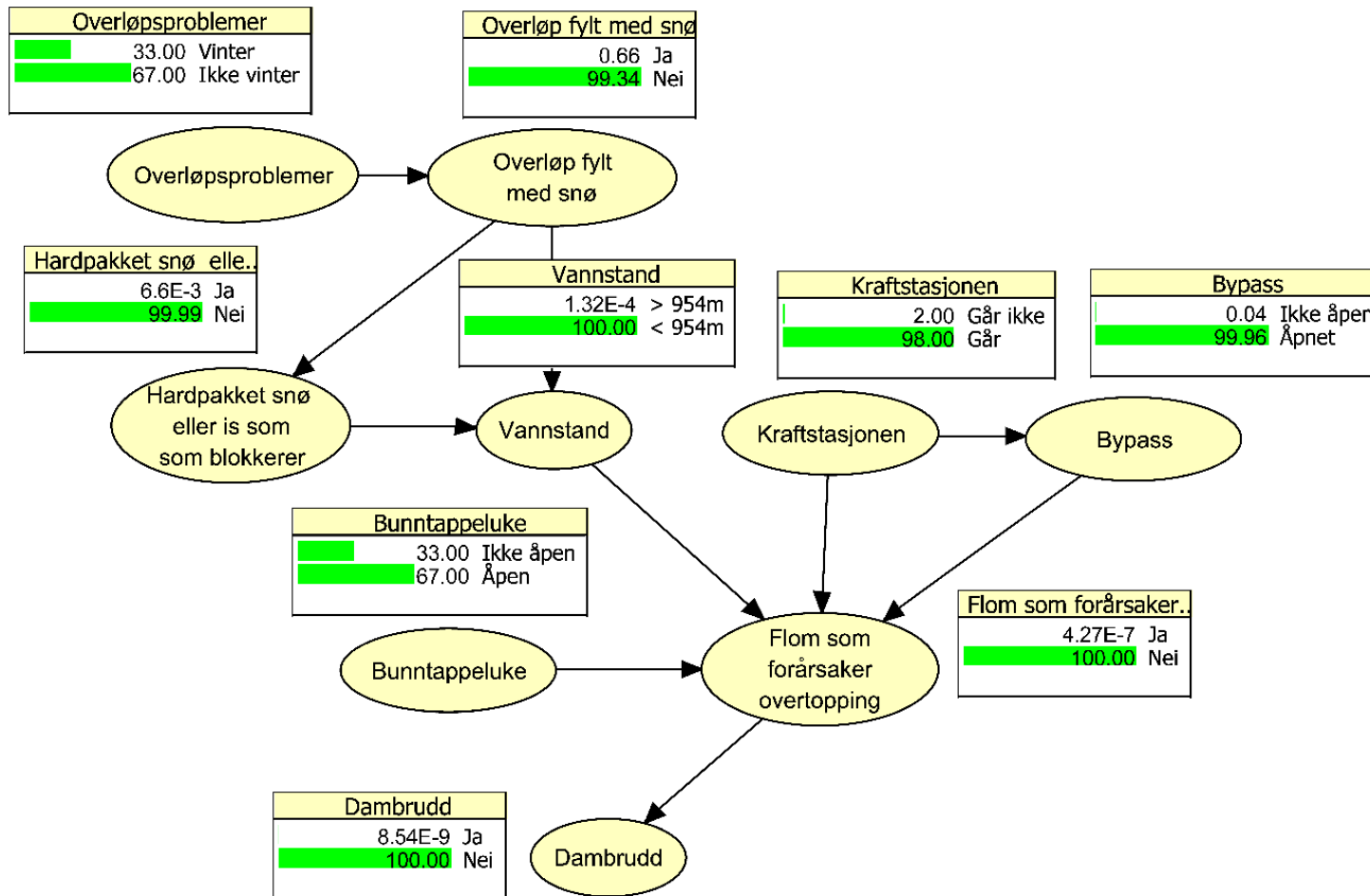


Figure E2. Bayesian network analysis estimating failure probability of Dravladalen dam due to 'ice and hard-packed snow blocking spillway' - lower bound probabilities (all the probabilities are shown as a percentage point; colour bar chart indicates relative probabilities).
 [Figur E2. Bayesisk nettverksanalyse for å kvantifisere bruddsannsynlighet for Dam Dravladalen forårsaket av 'is/hardpakket snø som blokkerer overløpet' – nedre sannsynlighet estimat (sannsynligheter er vist som prosentpoeng; farget stolpediagram viser relative sannsynligheter)].

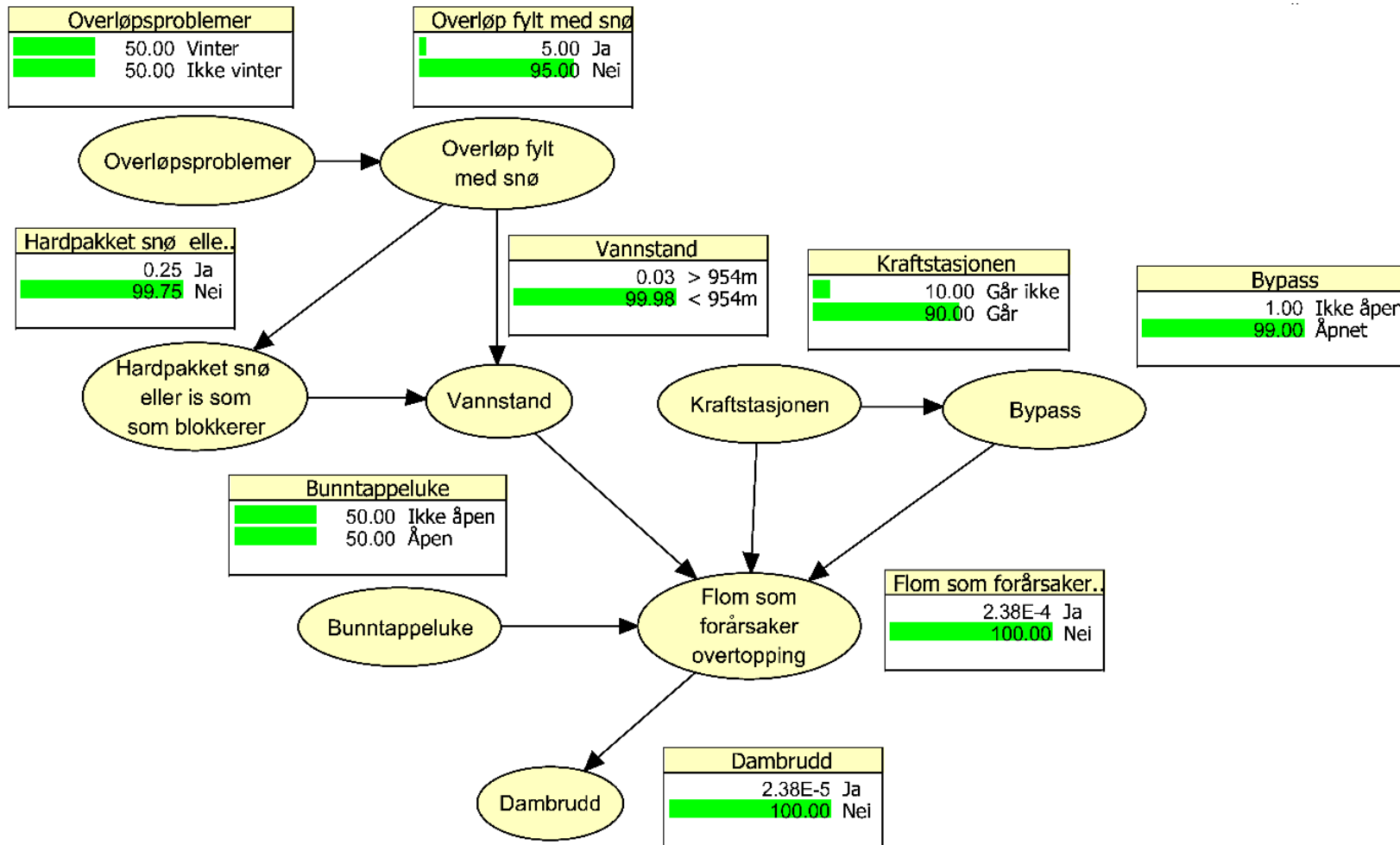


Figure E3. Bayesian network analysis estimating failure probability of Dravladalen dam due to 'ice and hard-packed snow blocking spillway' – best estimate probabilities (all the probabilities are shown as a percentage point; colour bar chart indicates relative probabilities).
 [Figur E3. Bayesisk nettverksanalyse for å kvantifisere bruddsannsynlighet for Dam Dravladalen forårsaket av 'is/hardpakket snø som blokkerer overløpet' – best sannsynlighet estimat (sannsynligheter er vist som prosentpoeng; farget stolpediagram viser relative sannsynligheter)].

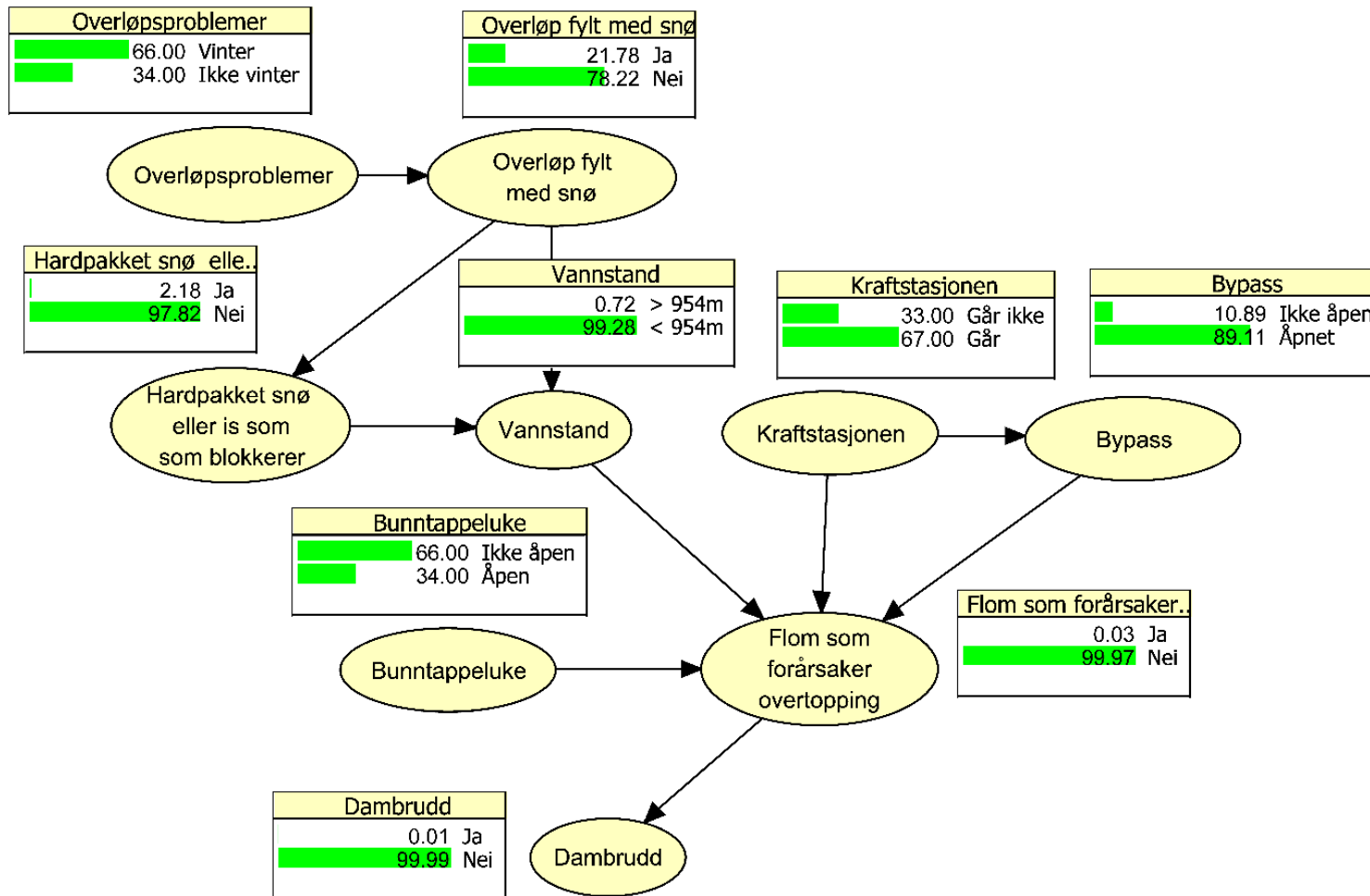


Figure E4. Bayesian network analysis estimating failure probability of Dravladalen dam due to 'ice and hard-packed snow blocking spillway' - upper bound probabilities (all the probabilities are shown as a percentage point; colour bar chart indicates relative probabilities).
 [Figur E4. Bayesisk nettverksanalyse for å kvantifisere bruddsannsynlighet for Dam Dravladalen forårsaket av 'is/hardpakket snø som blokkerer overløpet' - øvre sannsynlighet estimat (sannsynligheter er vist som prosentpoeng; farget stolpediagram viser relative sannsynligheter)].

E.1.2 Dam failure due to earthquake

The Bayesian network under earthquake loading ('jordskjelv') can be constructed as illustrated in Figure E5.

Calculations with lower bound, best estimate and upper bound probabilities for each event ("hendelse") were done using Hugin Lite (Hugin Expert 7.8, 2016). The lower bound estimate, best estimate and upper bound estimate probability descriptors from Table 3 and 4 in the main report were used in the BN analyses.

The Bayesian network results are presented in Figures E6 to E8, and correspond to the event tree analyses in Figures D6 in Appendix D. In figures E6 to E8, all the probabilities are shown as percentage (i.e. 99=0.99).

Lower bound estimate

With the lower bound estimates of probabilities, the Bayesian network analysis of the case of 'earthquake' gives a probability of failure for Dam Dravladalen of $1.8 \cdot 10^{-10}$ /yr (Fig. E6, numbers in figure are in percentage points). The result is identical to that with the event tree analysis (Table D3 in Appendix D), as it should.

Best estimate

With the best estimates of probability descriptors, the Bayesian network analysis of the case of 'earthquake' gives a probability of failure of $9.0 \cdot 10^{-8}$ / yr. (Fig. E7, numbers in figure are in percentage points). The result is identical to that with the event tree analysis (Table D3 in Appendix D), as it should.

Upper bound estimate

With the upper bound estimates of probabilities, the Bayesian network analysis of the case of 'earthquake' gives a probability of failure of $1.4 \cdot 10^{-7}$ / year (Fig. E8, numbers in figure are in percentage points). The result is identical to that with the event tree analysis (Table D3 in Appendix D), as it should.

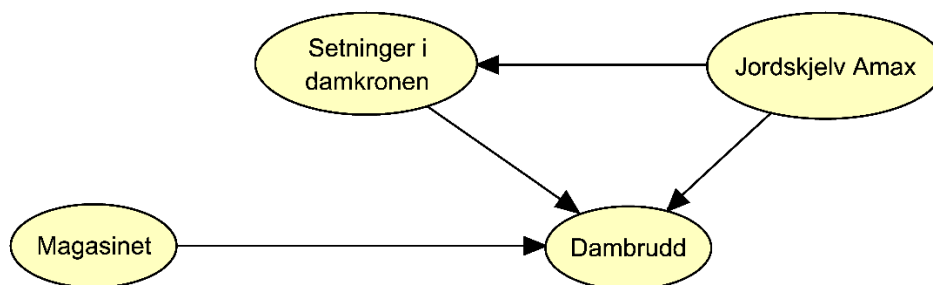


Figure E5. Bayesian network for dam failure due to 'earthquake'.
 [Figur E5. Bayesisk nettverk for dambrudd forårsaket av 'jordskjelv'].

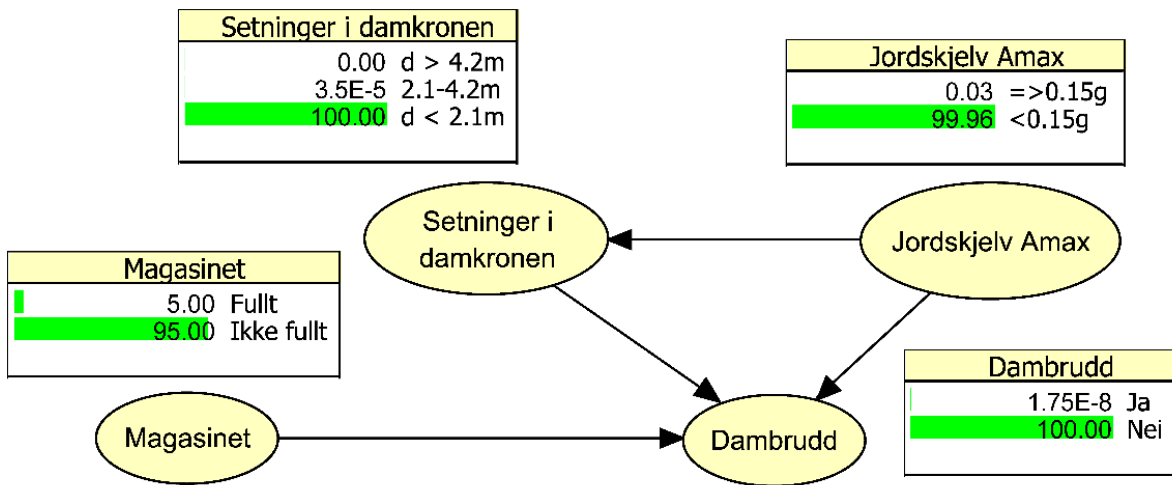


Figure E6. Bayesian network analysis estimating failure probability of Dravladalen dam due to 'earthquake' - lower bound probabilities (all the probabilities are shown as a percentage point; colour bar chart indicates relative probabilities).

[Figur E6. Bayesisk nettverksanalyse for å kvantifisere bruddsannsynlighet for Dam Dravladalen forårsaket av 'jordskjelv' – nedre sannsynlighet estimat (sannsynligheter er vist som prosentpoeng; farget stolpediagram viser relative sannsynligheter)].

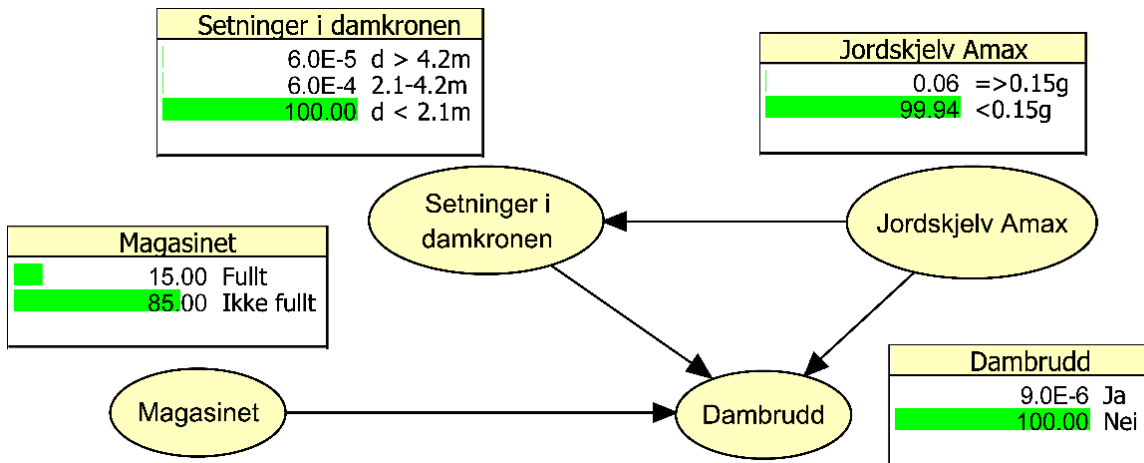


Figure E7. Bayesian network analysis estimating failure probability of Dravladalen dam due to 'earthquake' – best estimate probabilities (all the probabilities are shown as a percentage point; colour bar chart indicates relative probabilities).

[Figur E7. Bayesisk nettverksanalyse for å kvantifisere bruddsannsynlighet for Dam Dravladalen forårsaket av 'jordskjelv' – best sannsynlighet estimat (sannsynligheter er vist som prosentpoeng; farget stolpediagram viser relative sannsynligheter)].

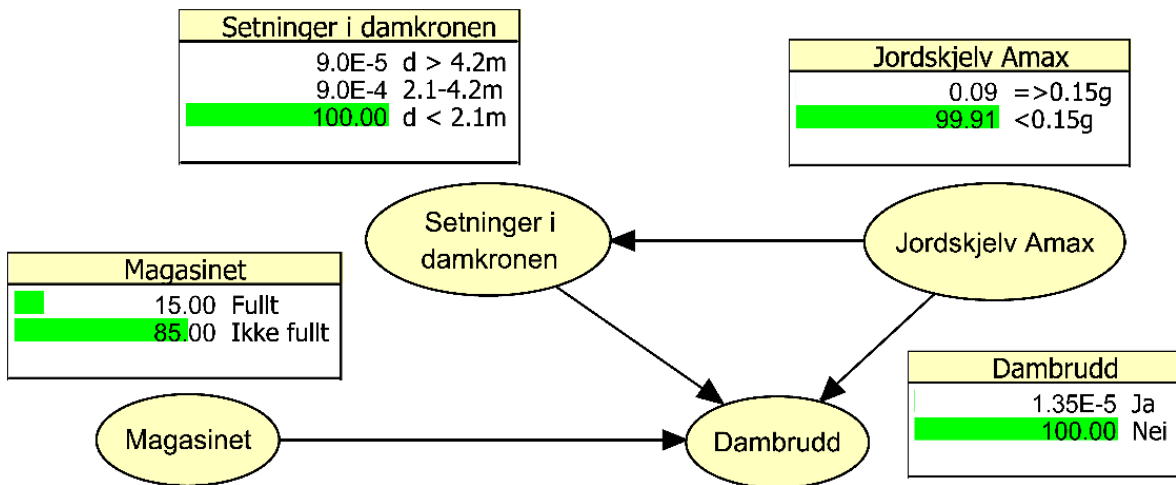


Figure E8. Bayesian network analysis estimating failure probability of Dravladalen dam due to 'earthquake' - upper bound probabilities (all the probabilities are shown as a percentage point; colour bar chart indicates relative probabilities).

[Figur E8. Bayesisk nettverksanalyse for å kvantifisere bruddsannsynlighet for Dam Dravladalen forårsaket av 'jordskjelv' – øvre sannsynlighet estimat (sannsynligheter er vist som prosentpoeng; farget stolpediagram viser relative sannsynligheter)].

E.4 Bayesian network analyses enhanced with Monte Carlo simulations

As recommended by IPCC (Section 3 in main report), each event was assigned a range of probabilities, i.e. a lower and upper bound probability. Monte Carlo simulations were carried out in order to obtain the statistics of the probability of dam breach for Dravladalen Dam (i.e. the mean and maximum and minimum probabilities). The combined Bayesian network-Monte Carlo analyses were run for the two same cases as in Section E3:

- 'ice and hard-packed snow blocking spillway'
- 'earthquake'

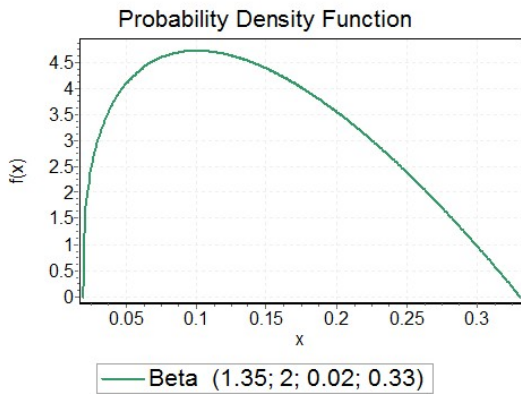
E.1.3 Probability density function for each event

A Beta distribution was selected for each event because the Beta probability density function (PDF) is suitable to model the behaviour of events limited to intervals of finite length (e.g. values between 0.1 and 0.2).

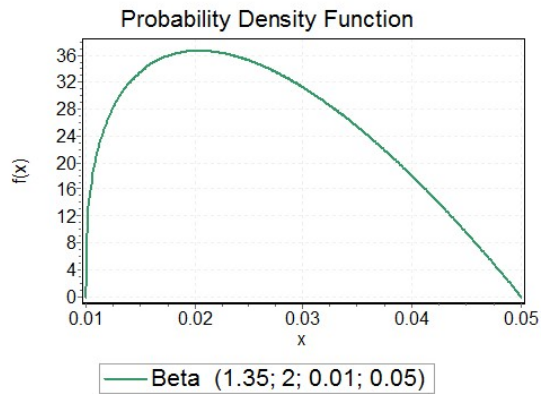
The beta distributions were fitted with the commercial program EasyFit, produced by Mathwave (www.mathwave.com/products/easyfit.htm). Four parameters of the Beta distributions were obtained, the first two being shape parameters and the last two

parameters being the lower and upper bounds. The following distributions were used, and are illustrated in Figure E9.

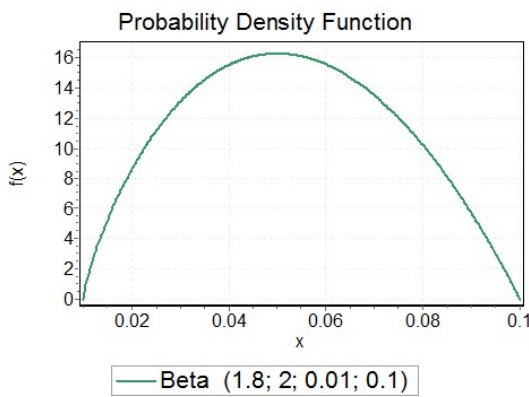
- Best estimate of 0.1, lower bound of 0.02 and upper bound of 0.33 (Fig. E9(a)).
- Best estimate of 0.02, lower bound of 0.01 and upper bound of 0.05 (Fig. E9(b)).
- Best estimate 0.05, lower bound of 0.01 and upper bound of 0.1 (Fig. E9(c)).
- Best estimate of 0.5, lower bound of 0.33 and upper bound of 0.66 (Fig. E9(d)).
- Best estimate of 0.0006, lower bound of 0.00035, upper bound of 0.0009 (Fig. E9(e)).
- Best estimate value of 0.001, lower bound of 0, upper bound of 0.001 (Fig. E9(f)).
- Best estimate of 0.01, lower bound of 0.001 and upper bound of 0.01 (Fig. E9(g)).
- Best estimate of 0.15, lower bound of 0.05 and upper bound of 0.15 (Fig. E9(h)).
- Best estimate of 0.5, lower bound of 0.1 and upper bound of 0.5 (Fig. E9(i)).
- Best estimate of 0.05, lower bound of 0.01 and upper bound of 0.05 (Fig. E9(j)).



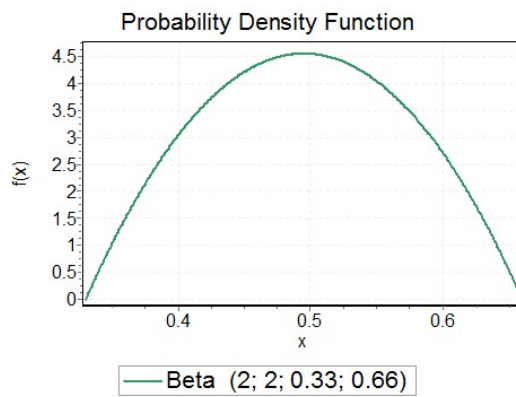
(a)



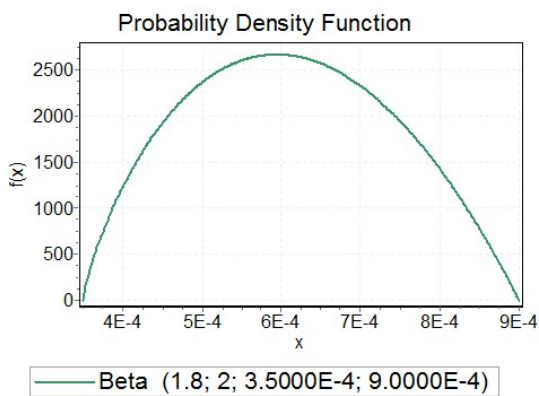
(b)



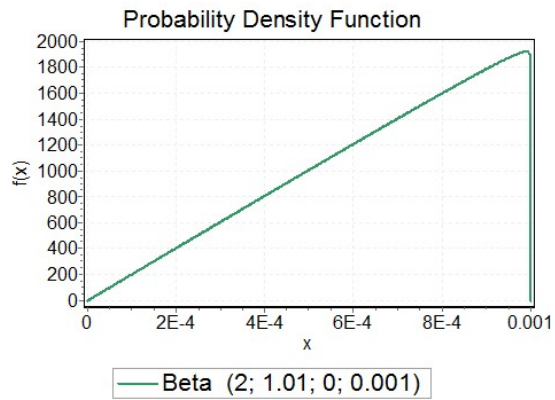
(c)



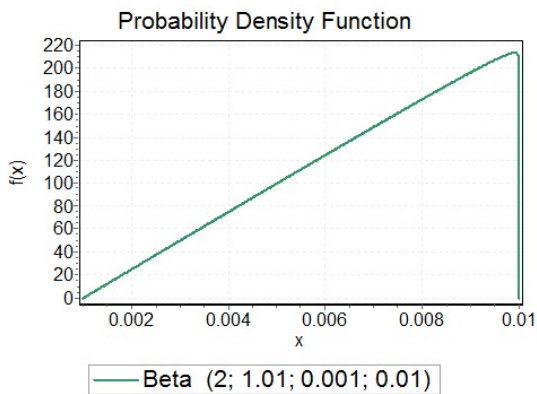
(d)



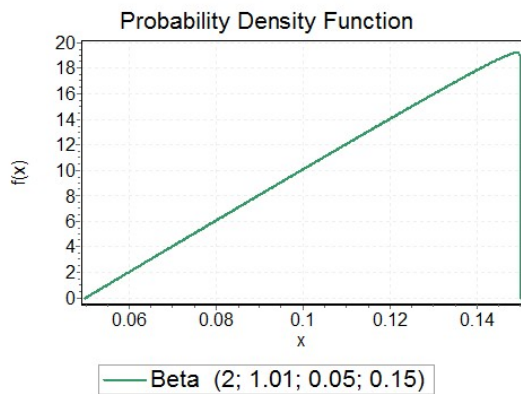
(e)



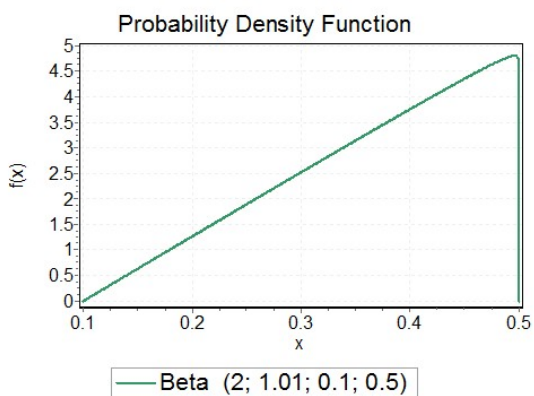
(f)



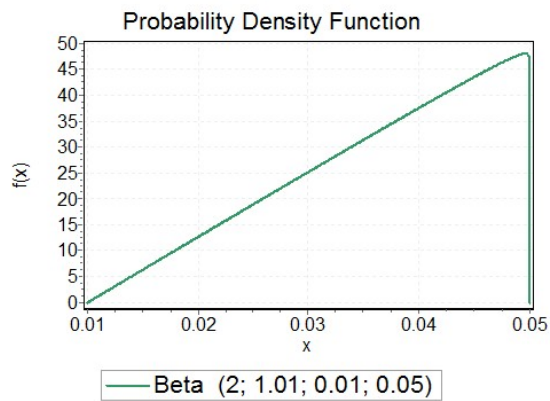
(g)



(h)



(i)



(j)

Figure E9. Fitted Beta distributions for the different probability ranges for events in analysis.
 [Figur E9. Tilpasning av Beta PDF for forskjellige sannsynlighetsområder for hendelser].

E.1.4 Results of Bayesian network analyses enhanced with Monte Carlo simulations

The Monte Carlo simulations were done with the BNT toolbox in MATLAB (Murphy, 2001).

For the 'ice and hard-packed snow blocking the spillway' series of events, each simulation generated two sets of random numbers for the nine events shown in Figure E1. Thus, a total of 512 simulations were done.

For the 'earthquake' series of events, each simulation generated five sets of random numbers for the four events in Figure E5. Thus, a total of 625 simulations were done.

E.1.5 Distribution of probabilities of failure for Dravladalen Dam

'Ice and hard-packed snow blocking the spillway'

Figure E10 presents the results of the Monte Carlo simulations for the 'Ice and hard-packed snow blocking the spillway' case. The results are given as a histogram of the probability of failure of Dam Dravladalen. A mini-table on the figure summarizes the statistics of the probability of failure distribution in terms of the Maximum value (Max), Minimum value (Min), mean, N (number of simulations), and p -value). The best fit of the histogram to a lognormal distribution is also shown. The p -value is obtained from the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test. A significance level of 5% is used most commonly for this test. The p -values were greater than 5% for all parameters. Thus, the hypothesis of a lognormal marginal distribution for the probability of failure for Dam Dravladalen is not rejected at the 5% significance level.

The mean probability of failure of Dam Dravladalen for the case of 'ice and hard packed snow blocking the spillway' was $2.3 \cdot 10^{-7}$ / yr.

'Earthquake'

Figure E11 presents in the similar manner the results of the Monte Carlo simulations for the 'earthquake' case with a histogram of the probability of failure of Dam Dravladalen, the resulting statistical parameters and the best fit lognormal distribution.

The mean probability of failure of Dam Dravladalen for the case of 'earthquake' was $3.9 \cdot 10^{-8}$ / yr.

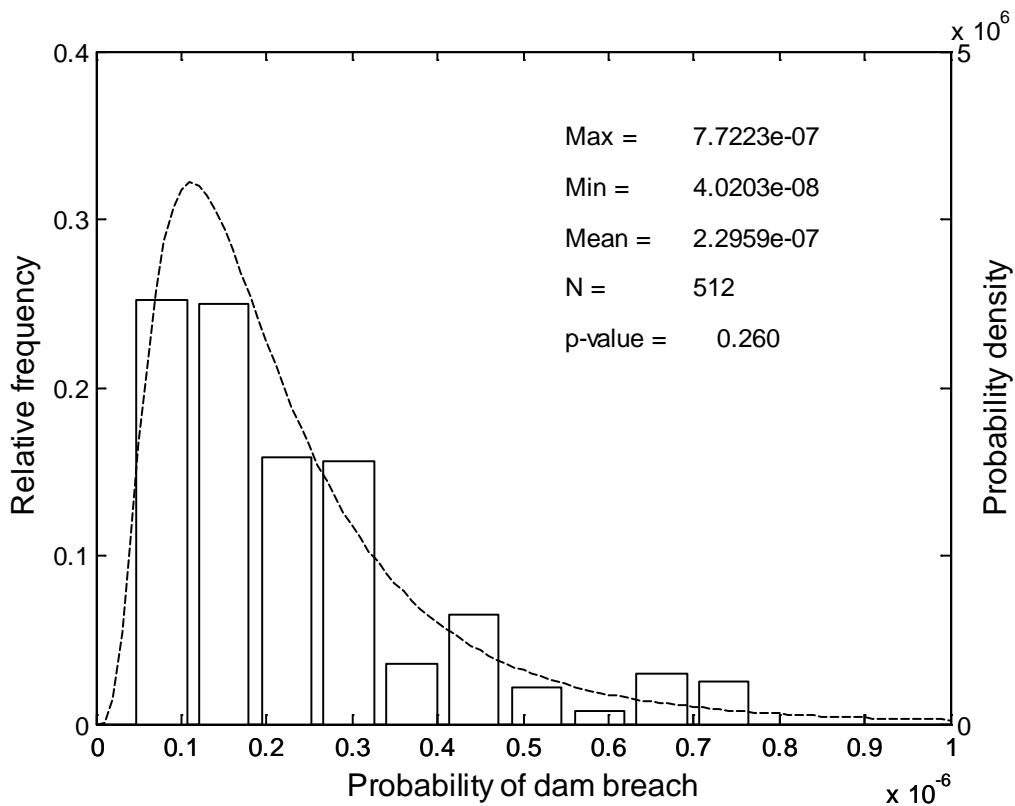


Figure E10. Distribution of probability of failure for Dravladalen Dam for case of 'ice and hard-packed snow blocking the spillway'.

[Figur E10. Probabilistisk fordeling av bruddsannsynlighet forårsaket av 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet' for Dam Dravladalen].

E.5 Comparison of ETA and BN analyses

Table E1 compares the results of the event tree analyses (ETA) in Appendix D and the Bayesian Network (BN) analyses enhanced with Monte Carlo simulations in this appendix. The Bayesian network analyses confirmed the low probabilities of failure for Dam Dravladalen.

Whereas the event tree analysis with the lower and upper bound give a very wide range of probabilities (three to seven orders of magnitude), the Bayesian network enhanced with Monte Carlo simulation gave a mean value (most probable value) very close to the best estimate of the probability of failure and a much narrower range of probabilities of failure (one order of magnitude).

The new approach, with Bayesian network combined with Monte Carlo simulations, could be an effective tool to narrow down the range of probabilities, provided enough simulations are done. The Bayesian network enhanced with the Monte Carlo simulations

covered a fairly wide range of uncertainty in the probability estimates in the chain of events that could lead to a failure of Dam Dravladalen.

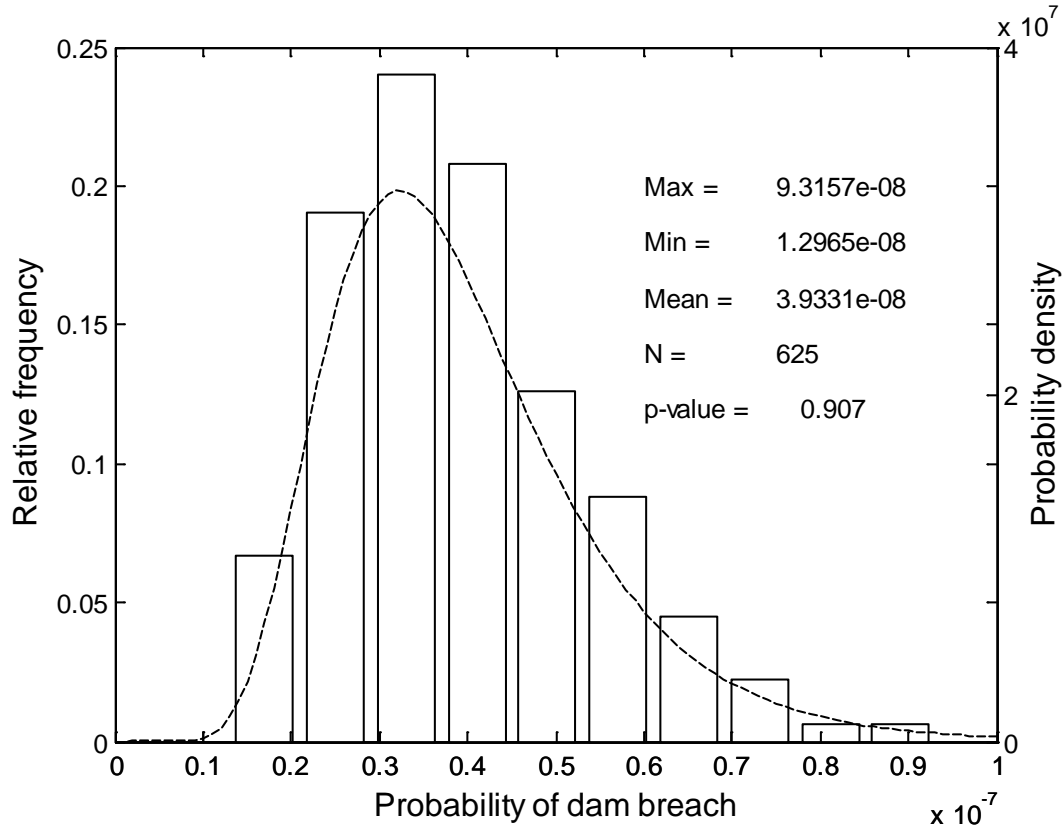


Figure E11. Distribution of probability of failure for Dravladalen Dam for case of 'earthquake'.
 [Figur E11. Probabilistisk fordeling av bruddsannsynlighet forårsaket av 'jordskjelv' for Dam Dravladalen].

Table E1. Comparison of probabilities of failure for Dam Dravladalen from event tree analysis and Bayesian network analysis enhanced with Monte Carlo simulation.
 [Tabell E1. Sammenligning av sannsynlighet for brudd for Dam Dravladalen beregnet med hendelsestre-analyse og Bayesisk nettverksanalyse med Monte Carlo simulering].

Event tree analyses		Annual probability of failure, $P_{f \text{ annual}}$		
		Lower bound	Best estimate	Upper bound
Flood	Ice and hard packed snow blocking spillway	$8.5 \cdot 10^{-11} / \text{yr}$	$2.4 \cdot 10^{-7} / \text{yr}$	$1.1 \cdot 10^{-4} / \text{yr}$
Earthquake		$1.8 \cdot 10^{-10} / \text{yr}$	$9.0 \cdot 10^{-8} / \text{yr}$	$1.4 \cdot 10^{-7} / \text{yr}$
Bayesian network analysis enhanced with Monte Carlo simulations		Annual probability of failure $P_{f \text{ annual}}$		
		Minimum	Mean	Maximum
Flood	Ice and hard packed snow blocking spillway	$4.0 \cdot 10^{-8} / \text{yr}$	$2.3 \cdot 10^{-7} / \text{yr}$	$7.7 \cdot 10^{-7} / \text{yr}$
Earthquake		$9.3 \cdot 10^{-8} / \text{yr}$	$3.9 \cdot 10^{-8} / \text{yr}$	$1.3 \cdot 10^{-8} / \text{yr}$

E.6 References

- Bayraktarli, Y., Ulfkjaer, J., Yazgan, U., Faber, M. (2005). On the application of bayesian probabilistic networks for earthquake risk management. *9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR 05)*, June 20-23, Rome.
- Bensi, M.T., Der Kiureghian, A., Straub, D. (2011). A Bayesian network methodology for infrastructure seismic risk assessment and decision support. *PEER Report* 2011/02.
- Einstein, H.H., Sousa, R.L., Karam, K., Manzella, I., Kveldsvik, V. (2010). Rock slopes from mechanics to decision making. *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering*, Edited by J. Zhao, V. Labiouse, J.P. Dudt and J.F. Mathier. London: CRC Press, 3-13.
- Grêt-Regamey, A., Straub, D. (2006). Spatially explicit avalanche risk assessment linking Bayesian networks to a GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6(6): 911-926.
- Hugin Expert 7.8. <http://www.hugin.com/productservices/demo/hugin-lite>. Accessed 1 February 2016.
- Murphy, K. P. (2001) The Bayes Net Toolbox for Matlab. *Computing Science and Statistics*, 33(2):1024–1034.
- Liu, Z.Q., Nadim, F., Garcia-Aristizabal, A., Mignan, A., Fleming, K. and Luna, B. Q. (2015). A three-level framework for multi-risk assessment, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 9(2): 59-74.
- Medina-Cetina, Z., Nadim, F. (2008). Stochastic design of an early warning system. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 2(4): 223-236.
- NGI (2016). Dam sikkerhet i et helhetlig perspektiv. "State-of the Art" om risikoanalyser for dammer. NGI rapport til Energi Norge. Rapportnr 2015 0624-01-R-01 datert 2016-03-01.
- Peng, M. and Zhang, L. M. (2012). Analysis of human risks due to dam-break floods—part 1: a new model based on Bayesian networks. *Natural Hazards* 64: 903-933.
- Smith, M. (2006). Dam risk analysis using Bayesian networks. *Proceedings of the 2006 ECI Conference on Geohazards*, June 18-21, Lillehammer, Norway.

Vedlegg F

STATISTISKE BETRAKTNINGER OM ÅRLIG SANNSYNLIGHET FOR LEKKASJE SOM KAN LEDE TIL INDRE EROSIJON

Innhold

F1.	Introduksjon	2
F2.	Årlig og 'absolutt' sannsynlighet	2
F3.	Sannsynlighet for initiering av lekkasje, Dam Dravladalen	3
	F3.1 Tilnærming 1 – statistikk fra alle fyllingsdammer i Norge	3
	F3.2 Tilnærming 2 – statistikk for Folgefonnområdet	4
	F3.3 Anbefalt verdi for hendelsetre-analyse	4
F4.	Referanser	5

F1. Introduksjon

En av vanskelighetene med en hendelsestre-analyse for 'indre erosjon' er å kvantifisere en temporal (daglig, månedlig, årlig, tiårig) sannsynlighet for den første hendelsen i treet, 'initiering av lokal lekkasje' i året når analysene utføres (2016).

En sannsynlighetsverdi på 0,05/år ble brukt i hendelsestre-analysene i Vedlegg D. Estimaten er en øvre grense og baserer seg på to tilnærminger som ble gjort for Dam Dravladalen.

F2. Årlig og 'absolutt' sannsynlighet

Når en bruddsituasjon i en fyllingsdam oppstår under normale operative laster som ikke er tilfeldige i tid, kan det være vanskelig å etablere årlige sannsynligheter. Lekkasje som kan lede til lokal indre erosjon er et godt eksempel på dette. Drivkraften for indre erosjon er vannhøyde i magasinet.

For å analysere indre erosjon har man ofte satt inn en tilfeldig "defekt" ("flaw") hvor lokal lekkasje og indre erosjon starter. Defekten er antatt til å kunne skje hvor som helst i dammen. Utviklingen av indre erosjon, selv med en defekt, er vanskelig å forutsi. Utviklingen er avhengig av fysiske prosesser og materialet i de forskjellige sonene i dammen. Indre erosjon skjer ikke momentant, men som en fysisk prosess over tid. En kan stille to spørsmål: (1) Vil en dam under gitte laster (vannhøyde i reservoar) få brudd grunnet indre erosjon uansett over en uendelig lang tid, og (2) hvis det er tilfellet, hvor lang tid tar det for et slikt brudd å utvikle seg.

Det er en forskjell mellom en "absolutt" (over dammens levetid) og en årlig sannsynlighet for en hendelse. Sannsynlighet for at en dam vil gå til brudd på grunn av indre erosjon i et gitt år n , er produktet av (1) en 'absolutt' sannsynlighet for at dammen i det hele tatt kan gå til brudd på grunn av indre erosjon, og (2) den tidsavhengige sannsynligheten for hvor lang tid erosjonsutviklingen vil ta. Hartford and Hicher (2015) illustrerte en slik tilnærming. En modifisert versjon av deres figur er gitt i Figur F1. Selv om alle usikkerhetene er "epistemiske"¹, kan sannsynligheten allikevel gjøres til årlig sannsynlighet ved å se på usikkerhetene om hvor lang tid det vil ta for indre erosjon å utvikle seg.

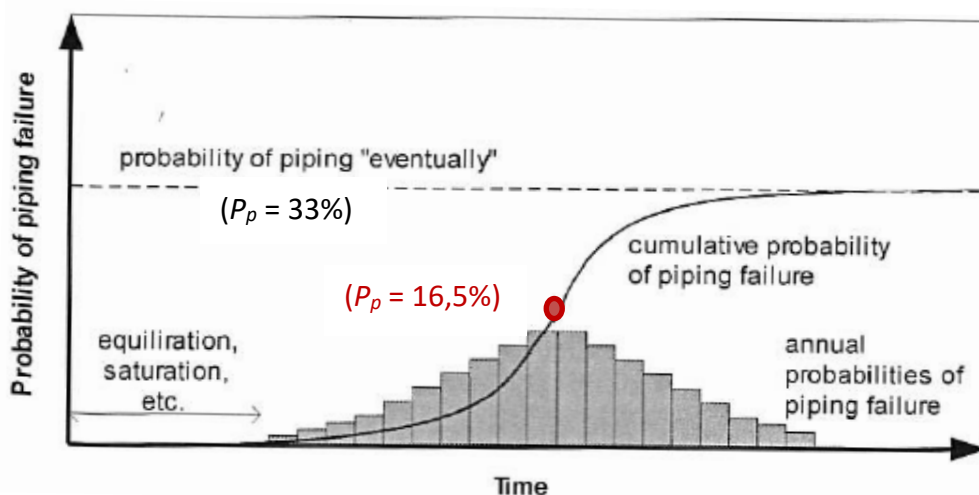
De årlige sannsynligheter (stolpediagram i Figur F1, eller stigningen (gradienten) på den kumulative kurven) endrer seg med tid. Den starter med null (tid lik 0), øker til en maksimum-verdi ved den mest sannsynlige tid for at brudd vil finne sted (med antagelse at det vil i det hele tatt

¹ Det er to kategorier usikkerheter: "aleatoriske" og "epistemiske usikkerheter:

"**Aleatoric uncertainty or variability** is representative of unknowns that differ each time one runs the same experiment. For example, the natural variation of a property of a soil, snow volume, rainfall intensity, wind direction and wind intensity are aleatoric uncertainties. This uncertainty cannot be reduced."

"**Epistemic, or systematic, uncertainty** is due to lack of knowledge. This uncertainty can be reduced. The uncertainty may be due to insufficient or inaccurate measurements or model simplifications. For example, an experiment to measure the acceleration of gravity near the earth's surface: the acceleration $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ignores the effects of air resistance which effect, if included in the model, could reduce the uncertainty in g ."

skje et brudd på grunn av indre erosjon), og deretter avtar med tid. Den kumulative kurven når den 'absolutte' sannsynlighet for brudd forårsaket av indre erosjon ved sin asymptote. I Figur F1, er asymptoten, eksempelvis, gitt som en sannsynlighet for indre erosjon ved 'rørdannelse' P_p på 33 %. Slike konsepter er brukt for de to beregningene utført i Seksjon F3 nedenfor.



Figur F1. Tidsavhengig sannsynlighet for indre erosjon i løpet av en dams levetid, gitt en sannsynlighet for indre erosjon på 33% (etter Hartford og Hicher 2015) ².

F3. Sannsynlighet for initiering av lekkasje, Dam Dravladalen

F3.1 Tilnærming 1 – statistikk fra alle fyllingsdammer i Norge

Norge har ca. 335 store dammer (>15m høy), og over halvparten av disse er fyllingsdammer (2015 tall, se Vedlegg B). De fleste er steinfyllingsdammer med morenekjerne fundamentert på fjell. På flere dammer har det vært observert lekkasjer (Vedlegg B).

Hvis man antar lekkasje i 80 steinfyllingsdammer i Norge, med en gjennomsnitt operasjonstid (inntil nå) på 40 år (1970-2010), og hvis man antar at 40% av steinfyllingsdammene har hatt initiering av to (2) lokale lekkasjer gjennom kjernen i disse 40 år, kan den årlige sannsynlighet for "lekkasje-initiering" beregnes fra:

$$P_{\text{lekkage initiering, årlig}} = [\text{Antall lekkasjer}] / [\text{Total antall damår med og uten lekkasje}]$$

$$P_{\text{lekkage initiering, årlig}} = [2 \text{ lekkasjer på } 40\% \text{ av } 180 \text{ dammer}] / [180 \text{ dammer hver med } 40 \text{ år}]$$

$$P_{\text{lekkage initiering, årlig}} = 0.020 = 2,0 \% \text{ per år.}$$

² Indre erosjon/rørdannelse = "piping" i figuren.
 Sannsynlighet for indre erosjon = "Probability of piping after a long time (eventually)" i figuren.

F3.2 Tilnærming 2 – statistikk for Folgefonområdet

På Folgefonnverkene, har tre av fem dammer hatt lekkasje gjennom kjernen. Den årlige sannsynlighet for lokal lekkasje-initiering kan beregnes fra:

$$P_{\text{lekkage initiering, årlig}} = [\text{Antall lekkasje}] / [\text{Total antall damår med og uten lekkasje}]$$

$$P_{\text{lekkage initiering, årlig}} = [3 \text{ dammer}] / [5 \text{ dammer med } 40 \text{ år hver}]$$

$$P_{\text{lekkage initiering, årlig}} = [3/(5*40)] = 0.015 = 1,5 \% \text{ per år.}$$

Sannsynlighets verdien på 1,5 % per år er å regne med som en lavere grense verdi fordi det kan ha skjedd flere lokale lekkasjeepisoder i de tre dammene over de 40 årene.

F3.3 Anbefalt verdi for hendelsetre-analyse

Basert på de to tilnærmingene ovenfor, anbefalte NGI at en verdi på 2 til 5 % per år som inngangsverdi for årlig sannsynlighet for initiering av lokal lekkasje gjennom kjernen på Dam Dravladalens. En verdi på 0.05 ble brukt for å ligge på den konservative siden.

Det er viktig å innse at disse årlige inngangsverdiene også har betydning for hva sannsynligheten er for lekkasje initiering over en periode på, for eksempel, 40 år. Sannsynligheten for lekkasje over en periode N kan beregnes fra:

$$P_{\text{hendelse i perioden } N} = 1 - (1 - P_{\text{årlig}})^N \quad (\text{for store } N\text{-verdier})$$

En eksempelberegning av sannsynlighet for lekkasje for Dam Dravladalen over en periode N på 40 år og hvor årlig sannsynlighet $P_{\text{årlig}}$ har verdier mellom 1 til 50 % pr år, er oppsummert i Tabell F1.

Table F1. Sannsynlighet for lekkasje over en 40-årsperiode for forskjellige årlige sannsynligheter for lekkasje-initiering.

$P_{\text{lekkage initiering, årlig}}$	$P_{\text{lekkage over 40 år}}$
0,01 (1 %/år)	33 %
0,03 (3 %/år)	70 %
0,05 (5 %/år)	87 %
0,10 (10 %/år)	98,5 %
0,50 (50 %/år)	99,9 %

Tallene i Tabell F1 sier at hvis man bruker 10 % som årlig sannsynlighet til initiering av lokal lekkasje, er sannsynligheten for at lokal lekkasje vil oppstå i løpet av en periode på 40 år på 98,5 % (tilnærmet helt sikkert). Hvis man bruker 5 % som årlig sannsynlighet til initiering av lekkasje, er sannsynligheten for at lekkasje vil oppstå i løpet av en periode på 40 år på 87 % (tilnærmet sikkert). Selv ved å bruke kun 3 % som årlig sannsynlighet til initiering av en lokal lekkasje, er sannsynligheten for at lekkasje vil oppstå i løpet av en periode på 40 år på 70 %.

I analysene som er gjennomført i Vedlegg D og presentert i hovedrapporten, er sannsynligheten for at lekkasje vil oppstå i løpet av en periode på 40 år på 87 % (med en inngangs-sannsynlighetsverdi på 0,05/år).

F4. Referanser

Hartford, D.N.D. and Hicher. P. (2015). A case and a proposal for a soil mechanics solution to the problem of internal erosion in dams. 25th ICOLD Congress. Stavanger June 2015. Q. 98.R.20, pp. 305-326.

Vedlegg G

SANNSYNLIGHET FOR BRUDD FOR ANDRE DAMMER

Contents

G1.	Introduction	2
G2.	Probability of dam failure.....	2
	G2.1. Statistics on dam incidents and failures	2
	G2.2. Internal Erosion in Earth Dams	3
	G2.3. Rockfill Dams in Norway, as analysed in 1996	3
G3.	Societal risk and <i>F-N</i> curves	4
G4.	<i>F-N</i> criteria for dam safety 1990 – 2015	4
G5.	Comparison with risk guidelines in different countries	6
G6.	Comparison of values obtained for Dam Dravladalen.....	7
G7.	Environment when a 10,000-year event occurs.....	7
G8.	References.....	8

G1. Introduction

(Materiale for dette vedlegget er hentet fra internasjonale kilder. Teksten er gjengitt på engelsk.)

This appendix presents examples of the computed probability of failure for existing dams where data are available. More extensive information can be found in the State-of-the-art report to Energi Norge (NGI 2016).

The probability of failure or probability of non-performance is usually expressed as an exponential which is difficult to associate with everyday life. To help with the understanding of these numbers, the exponential can be simplified to the expressions in Table G1 below.

As time passes during the life of a dam and observations of the behaviour of the dam are made, the annual probabilities can be updated with Bayesian theory. Given observed satisfactory behaviour, the updating on the basis of observations would probably yield lower probability of non-performance than those estimated in this report.

Table G1. Examples of probability of failure as frequency over time.

Probability of occurrence Exponential expression	Probability of occurrence Expressed as frequency over time
$10^{-1}/\text{year}$	Once in 10 years
$10^{-2}/\text{year}$	Once in 100 years
$10^{-3}/\text{year}$	Once in 1,000 years
$10^{-4}/\text{year}$	Once in 10,000 years
$10^{-5}/\text{year}$	Once in 100,000 years
$10^{-6}/\text{year}$	Once in 1,000,000 years
$10^{-7}/\text{year}$	Once in 10,000,000 years
$10^{-8}/\text{year}$	Once in 100,000,000 years

G2. Probability of dam failure

G2.1. Statistics on dam incidents and failures

ICOLD (International Commission on Large Dams) presented statistics on dam incidents where the average probability of failure is between 10^{-4} and 10^{-5} per year (Londe 1993; ICOLD 1995; Foster et al. 2000; Høeg 2001). Peck (1980), based on work by Baecher et al. (1980a and b) who used the ICOLD database plus other data, reported that the probability of failure of dams in the United States and worldwide, was between 2 and 7×10^{-4} per year.

Foster et al. (2000) reported that the probability of an accident due to downstream slope instability was between 1 and 5×10^{-4} per year and the probability of failure was 1.5×10^{-5} per year.

For tailings dams, the probability of failure is significantly higher than the average probability of 10^{-4} and 10^{-5} per year reported above.

G2.2. Internal Erosion in Earth Dams

Historical data are available for earth dams that provide failure frequency per dam-year of operation. Figure G1 shows internal erosion failure frequencies for US dams. The annual probability of failure associated with internal erosion of earth dams is between 10^{-4} and 5×10^{-4} per year. Internal erosion failures tend to occur more frequently in the first 5 years reflecting first-filling failures. The figure also lists a number of factors in the dam construction and monitoring that affected the probability of failure. The data suggest significantly higher probabilities of failure than that computed for Dam Dravladalen.

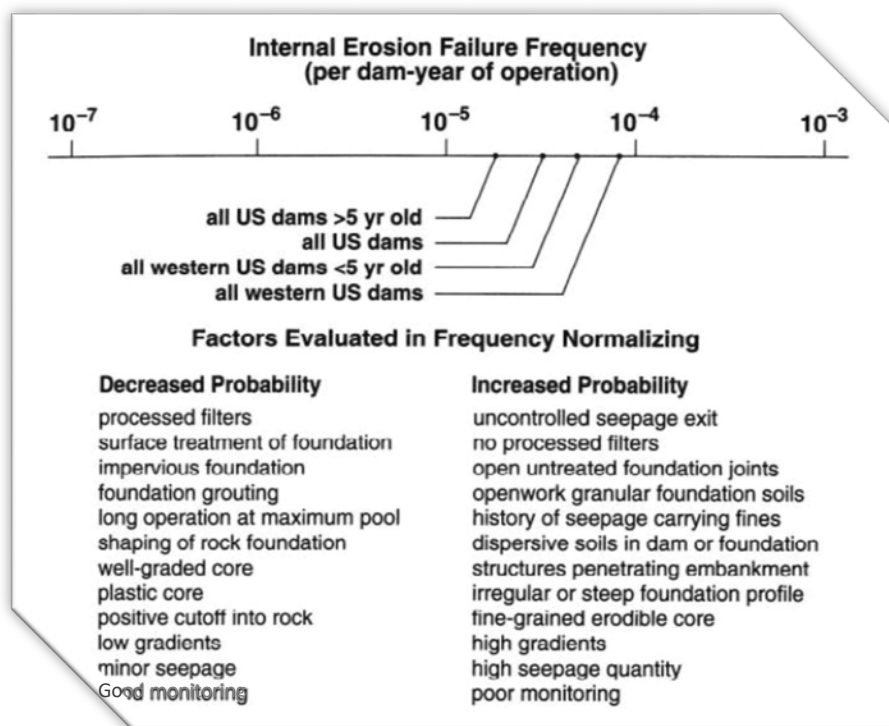


Figure G1. Normalized frequency (annual probability) for dam failure by internal erosion in the US (von Thun, 1985; Vick, 2002).

G2.3. Rockfill Dams in Norway, as analysed in 1996

Detailed event tree analyses, similar to the analyses presented in this report, were run for two other rockfill dams in Norway, the Viddalsvatn and the Svartevatn dams. The latter one was known to be a robust dam with respect to internal erosion, while the first one had shown some signs of internal erosion in its earlier history. The annual probabilities of failure for these dams were computed, using the event tree analysis. Table C1 presents the results of these analyses.

The probabilities of 5×10^{-4} correctly reflect the less robust construction and the less satisfactory behaviour of the Viddalsvatn dam, whereas the Svartevatn dam is considered to be a very safe dam. It has an estimated annual probability of failure between 10^{-6} and 10^{-5} per year.

Table G2. Probability of failure for rockfill dams in Norway (NGI files)

Dam	Trigger	Annual probability of non-performance P[]			
		Flood/ Precipitation	Earthquake	Internal erosion	All three triggers
Viddalsvatn		$1.2 \cdot 10^{-6}/\text{yr}$	$1.1 \cdot 10^{-5}/\text{yr}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$ (lifelong)	$5.6 \cdot 10^{-4} / \text{yr}$
Svartevatn		$1.0 \cdot 10^{-7}/\text{yr}$	$2.0 \cdot 10^{-7}/\text{yr}$	$6.0 \cdot 10^{-6}$ (lifelong)	$6.3 \cdot 10^{-6} / \text{yr}$

G3. Societal risk and *F-N* curves

The risk of multiple fatalities from a single event is referred to as *societal risk*. Whereas individual risk is a simple probability, societal risk is a probability distribution over number of fatalities. Most US federal regulations relating to food, drugs and the environment are based on individual risk. For civil infrastructure and natural hazards, the driving criterion is more often societal risk. At least four representations of societal risk exist (Allen *et al.* 1992): Histograms; Accident sequence scatterplots; Marginal (non-cumulative) frequency plots (*f-N* curves); and Complementary cumulative distribution plots (*F-N* curves). This appendix looks at the safety criteria as expressed with *F-N* curves only, where *F* is the frequency (number of events per year, for example, and *N* is the number of fatalities.

G4. *F-N* criteria for dam safety 1990 – 2015

The beginnings of *F-N*- criteria for dam safety are traceable to the early 1990's in development programs at ANCOLD, BC Hydro and USBR. These programs were not independent, which led to similar recommendations across the three. Early published results appeared, respectively, in BC Hydro (1993), ANCOLD (1994), and von Thun (1996).

Baecher et al (2015) made a summary of each of the criteria proposed through the years. Figure G2 gives their schematic history of the development of the societal risk criteria.

The latest contributions is from USACE in the fourth column in Figure G2. USACE developed interim tolerable risk guidelines, which are based on ANCOLD (2003) and NSW-DSC (2006). Two types of societal risk are defined under the USACE tolerable risk guidelines: Individual risk and societal *F-N* criteria. Societal risk is represented by a distribution of the estimated annual probability of potential life loss from dam failure for all loading types and conditions, all failure modes, and all population exposure scenarios. This is displayed as an *F-N* chart (Fig. G3), which is a plot of the annual probability of exceedance of potential life loss (*F*) versus incremental life loss (*N*). By incremental, one means one more life loss than otherwise.

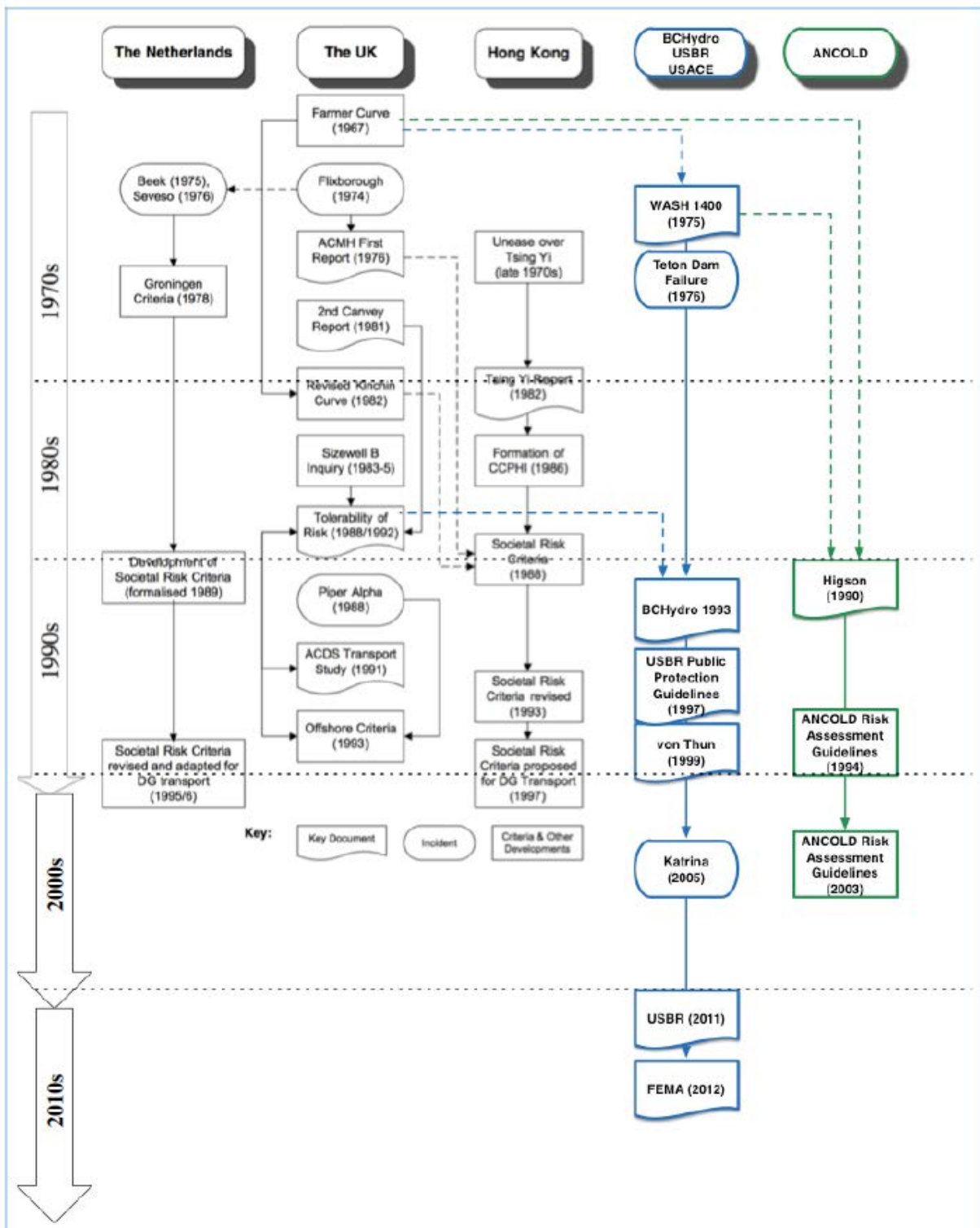


Figure G2. Evolution of societal risk criteria from five authorities (after Baecher et al 2015).

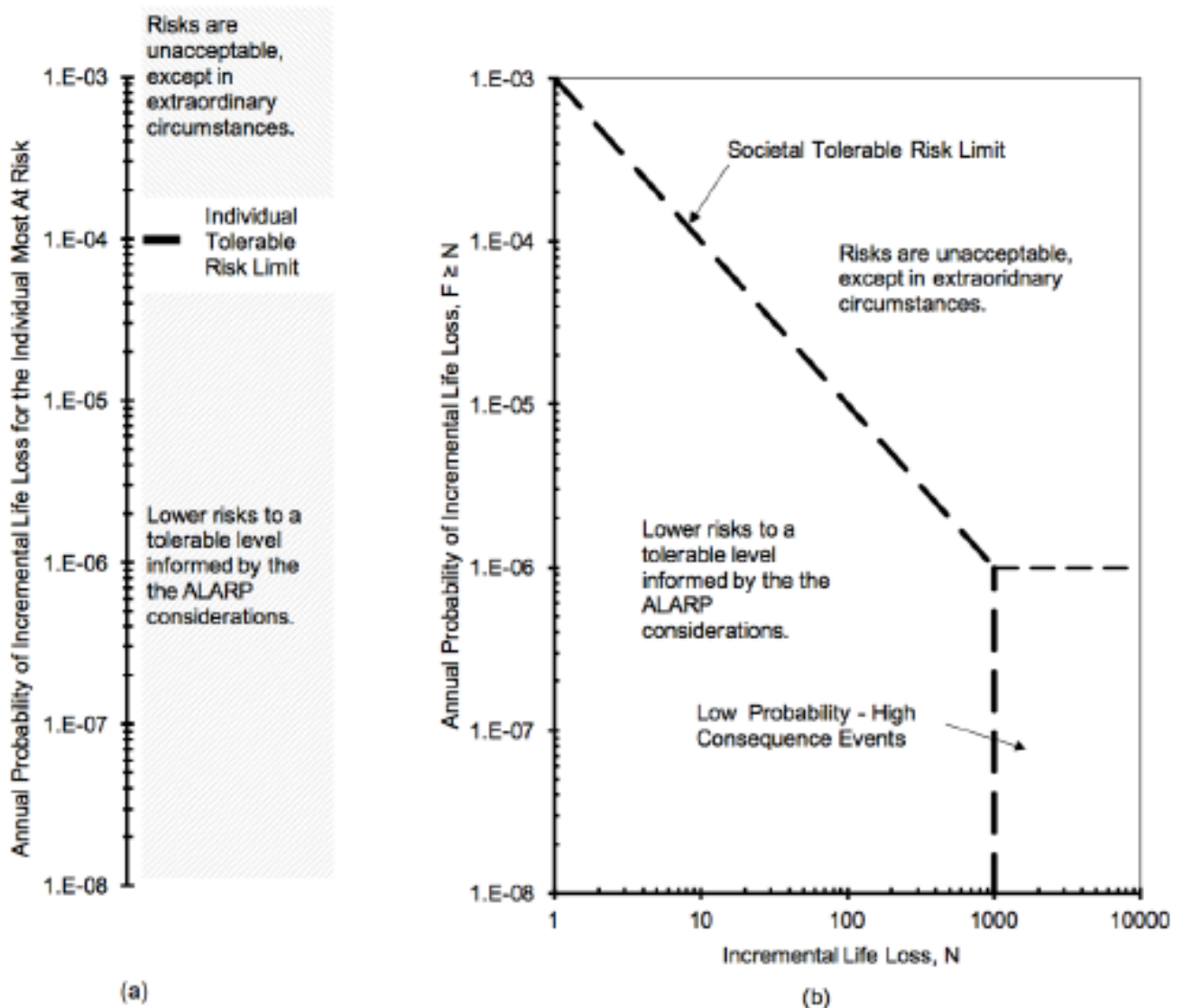


Figure G3. Guideline for incremental risk (a) individual risk; b) societal risk (USACE 2014).

G5. Comparison with risk guidelines in different countries

The guidelines for acceptable risk, expressed in F-N curves in several countries are compiled in Figure G4. Whereas not all the guidelines were originally prepared for dams, they are however quite comparable. For one fatality, the acceptable probability of failure is about 10^{-2} to 10^{-3} per year. For 10 fatalities, the acceptable level is approximately (on the average) 10^{-4} per year. For 100 fatalities, the acceptable probability of failure is 10^{-5} to 10^{-6} per year.

G6. Comparison of values obtained for Dam Dravladalen

The probabilistic analyses for Dam Dravladalen suggest an annual probability of failure of 10^{-5} per year. The calculated annual probability of failure falls within the existing acceptable risk guidelines.

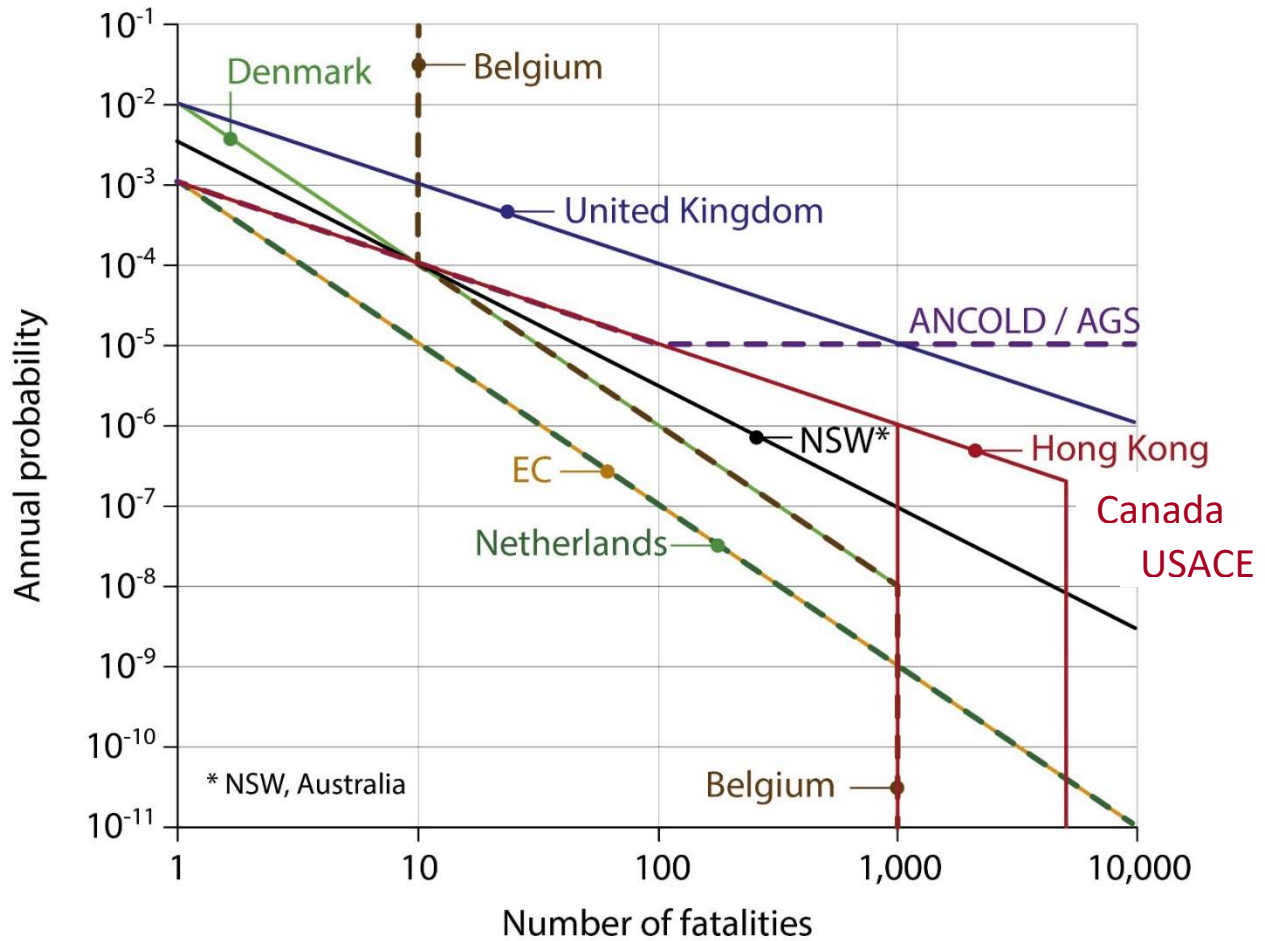


Figure G4. Acceptable risk guidelines in several countries (not all are for dams) (After Ho, Ken 2008, personal communication).

G7. Environment when a 10,000-year event occurs

It is important to note that if a 1,000 or 10,000-year event should occur (earthquake, hurricane, rainfall, hot spell or ice and snow storm), a system approach should be used. Under a rare event, much of the infrastructure around a dam and security systems will fail before the dams fails under a rare event. For such cases, one should have recourse to a "stress testing" approach (Nadim, 2016).

G8. References

- Allen, F. R, Garlick, A.R., Hayns, M.R. and Taig, A.R. (1992). *The Management of Risk to Society from Potential Accidents : The Main Report of the UKAEA Working Group on the Risks to Society from Potential Major Accidents : With an Executive Summary*. London; New York: Elsevier Applied Science.
- ANCOLD (1994). *Guidelines on Risk Assessment 1994*. Australian, New Zealand Committee on Large Dams.
- ANCOLD (2003). *Guidelines on Risk Assessment*. Sydney: Australian National Committee on Large Dams.
- Baecher, G., Paté, M.E. and deNeufville, R. (1980a). *Dam Failure in Benefit/Cost Analysis*. ASCE Jour. Geot. Eng. Div., Vol. 106, No. GT1, pp 101–116.
- Baecher, G., Paté, M.E. and deNeufville, R. (1980b). *Fisk of Dam Failure in Benefit-Cost Analysis*. Water Resources Research, V. 16, No. 3, pp. 449–456.
- Baecher, G.B., Abedinisohi, F. and Patev, R.C (2015). *Societal Risk Criteria for Loss of Life - Concepts, History, and Mathematics*". Report prepared for the Reliability Models for Major Rehabilitation Program, Headquarters US Army Corps of Engineers & USACE Risk Management Center, Denver. 85pp.
- BC Hydro (1993). *Guidelines for Consequence – Based Dam Safety Evaluations and Improvements*. H2528 Interim. Vancouver: BC Hydro.
- Foster, M., Fell, R. and Spannagle, M. (2000). *The statistics of embankment dam failures and accidents*. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 5, pp. 1000–1024.
- Høeg, K. (2001). *Embankment-dam engineering, safety evaluation and upgrading*. Proc. *ICSMGE*, Istanbul, 2001.
- ICOLD (1995). *Dam failures - statistical analysis*, Bulletin No. 99. ICOLD, Paris, France.
- Londe, P. (1993). *Safety evaluation using reliability analysis*. Proc. Workshop on Dam Safety Evaluation, Grindelwald, Switzerland, Vol. 4, pp. 171–188.
- Nadim, F. (2016). *Challenges in managing the risk posed by extreme events*. Keynote Paper. 6th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications (APSSRA6). Shanghai, China. H.W. Huang, J. Li, J. Zhang & J.B. Chen (eds). pp. 62–70.
- NGI (2016). *Dam sikkerhet i et helhetlig perspektiv. "State-of-the-Art" om risikoanalyser for dammer*. NGI rapport til Energi Norge. Rapportnr 2015 0624-01-R-01. Datert 2016-06-01.
- NSW-DSC (2006). *Risk Management Policy Framework for Dam Safety*. New South Wales Government, Dams Safety Committee.
- Peck, R.B. (1980). *Where has all the judgment gone? The Fifth Laurits Bjerrum Memorial Lecture*, Oslo, Norway. *Canadian Geotechnical Journal*. V 40.
- USACE (2014). *2014. Safety of Dams Policies and Procedures*. ER 1110-2-1156. Washington DC: US Army Corps of Engineers.
- Vick, S. (2002). *Degrees of Belief. Subjective Probability and Engineering Judgment*. ASCE Press. 405 pp.
- von Thun, J. (1985). *Application of statistical data from dam failure and accidents to risk-based decision analysis on existing dams*. U.S. Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, Colorado.
- von Thun, J.L. (1996). *Risk Assessment of Nambe Falls Dam*. In *Uncertainty in the Geologic Environment*, 1:604–35. Madison: ASCE.

Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv RISIKOVURDERING FOR DAM DRAVLADALEN		Dokumentnr./Document no. 2015 0624-02-R
Dokumenttype/Type of document Rapport/Report	Distribusjon/Distribution Begrenset/Limited	Dato/Date 2016-06-01
		Rev.nr.&dato/Rev.no.&date 01 / 2011-11-01
Oppdragsgiver/Client EnergiNorge		
Emneord/Keywords Dam, damsikkerhet, risikoanalyser		

Stedfesting/Geographical information	
Land, fylke/Country	Havområde/Offshore area
Kommune/Municipality	Felt navn/Field name
Sted/Location	Sted/Location
Kartblad/Map	Felt, blokknr./Field, Block No.
UTM-koordinater/UTM-coordinates	

Dokumentkontroll/Document control Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev/ Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll av/ Self review by:	Sidemanns- kontroll av/ Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Inter- disciplinary review by:
0	Originaldokument	SL, UKE, ZL	FNa, KH	Workshop deltagere; Statkraft	--
01	Etter Stratkraft gjennomgåelse og EnergiNorges DSHP styringsgruppe kommentarer	SL	FNa, KH	Statkraft	--

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date 2016-11-01	Prosjektleder/Project Manager Suzanne Lacasse
--	--------------------------------	---

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen ingeniørrelaterte geofag. Vi tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg, og hvordan jord og berg kan benyttes som byggegrunn og byggemateriale.

Vi arbeider i følgende markeder: Offshore energi – Bygg, anlegg og samferdsel – Naturfare – Miljøteknologi.

NGI er en privat næringsdrivende stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskaper i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting within the geosciences. NGI develops optimum solutions for society and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the following sectors: Offshore energy – Building, Construction and Transportation – Natural Hazards – Environmental Engineering.

NGI is a private foundation with office and laboratories in Oslo, a branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

