

# Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv

## RISIKOVURDERING FOR DAM NYHELLERVATN

DOK.NR. 20150624-03-R

REV.NR. 0 / 2018-04-29



*Foto: E-CO Energi*

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.



## Prosjekt

Prosjekttittel: **Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv**  
Dokumenttittel: **Risikovurdering for Dam Nyhellervatn**  
Dokumentnr.: 20150624-03-R  
Dato: 2018-04-29  
Rev.nr. / Rev.dato: 0 /

## Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: EnergiNorge/E-CO Energi  
Kontaktperson: Eve Cathrin Walseth (EnergiNorge)  
Guttorm Mathismoen (E-CO Energi)  
Kontraktreferanse: Oppdragsbekreftelse 31. Oktober 2016.

## for NGI

Prosjektleder: Suzanne Lacasse  
Utarbeidet av: Unni Eidsvig, Thi Minh Le, Farrokh Nadim, Zhongqiang Liu  
Kontrollert av: Suzanne Lacasse, Kaare Høeg

## Sammendrag

EnergiNorge engasjerte NGI til å vurdere muligheter og avgrensninger for bruk av risikoanalyser for norske dammer. Vurderingen består av en «State-of-the-art» oversikt over risikoanalyser for dammer i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv og risikovurderinger av fire norske dammer Dam Dravladalen, Dam Nyhellervatn, Dam Nesjen og Dam Strandfossen

Denne rapporten beskriver resultater fra vurderingene for Dam Nyhellervatn. Risikoanalysene ble gjennomført med to metoder: (1) hendelsestre-analyser, og (2) den nyere metode "Bayesiske nettverksanalyser" kombinert med "Monte Carlo Simulering". I tillegg ble det gjort deterministiske og probabilistiske analyser av nedstrøms skråningen for Nyhellervatn hoveddam.

Det beste estimatet for årlig bruddsannsynlighet for Dam Nyhellervatn i 2017 er på  $2 \cdot 10^{-6}$ /år eller lavere- Det vil si et brudd kan skje to ganger pr 1 million år. Den beregnede årlige sannsynligheten er lavere enn den internasjonalt rapporterte bruddfrekvensen for fyllingsdammer, for eksempel ICOLDs statistikk, og er representativt av en dam med meget tilfredsstillende oppførsel.

Dam Nyhellervatn har en årlig bruddsannsynlighet som skyldes indre erosjon som er 10 til 60 ganger lavere enn hva tilsier ICOLD-statistikken. Indre erosjon er den mest kritisk brudd-mekanismen. Analysene viser at kontinuerlig overvåkning av lekkasje reduserer betydelig sannsynligheten for at indre erosjon fører til brudd. Overvåkingen hindrer ikke initiering av lekkasje men åpner mulighet for tiltak som bidrar til at indre erosjon ikke utvikler seg videre.

Det ble en svært lav sannsynlighet for brudd forårsaket av flom (god flomavlednings- kapasitet og dermed liten flomstigning). Det ble også svært lav bruddsannsynlighet for ustabilitet i nedstrøms skråning.

Med en beregnet bruddsannsynlighet ved Dam Nyhellervatn på  $2 \cdot 10^{-6}$ /år og de beregnede konsekvensene plasseres Dam Nyhellervatn, uten rehabiliteringstiltak, i sonen med akseptabel og tolerabel risiko når kriterier fra USACE 2014 benyttes. Det ligger imidlertid flere konservative antagelser bak vurderingene av både årlig bruddsannsynlighet og konsekvenser. Dette reduserer enda mer risikoen.

Dammen Nyhellervatn oppfattes som svært trygg, selv med de konservative antagelsene som gir en årlig brudd sannsynlighet på ca.  $10^{-6}$ . Det er rimelig å spørre om dammen bør allikevel oppgraderes. Bør en dam som har stått stabilt i over 40 år og ikke visst noen uønskede hendelser oppfylle de samme krav som en ny dam? Dam Nyhellervatn har stått med sine dimensjonerings-laster i store deler av sitt liv, og det er ingen stor endring in dimensjoneringslastene i dag. De første 40 år i Dam Nyhellervatn kan oppfattes som fullskala modellforsøk for dammen. I tillegg viser internasjonale dambrudd statistikk at den mest kritiske perioden i livet til en fyllingsdam er de første fem operative år.

## Innhold

<b>1</b>	<b>Bakgrunn</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Om Nyhellervatndammene</b>	<b>6</b>
2.1	Nøkkeldata for dammene	6
2.2	Revurdering 2012	7
<b>3</b>	<b>Analysemetodikk for Nyhellervatndammene</b>	<b>8</b>
3.1	Analyse av årlige bruddsannsynlighet	8
3.2	Analyse av nedstrøms skråningsstabilitet	9
<b>4</b>	<b>Hendelsestre-analyser</b>	<b>9</b>
4.1	Workshop	9
4.2	Sannsynligheter for hendelsene i et hendelsestre	10
<b>5</b>	<b>Utløsningsårsak og bruddmekanismer</b>	<b>10</b>
5.1	Identifisering av bruddmekanismer og utløsningsfaktorer	10
5.2	Oversikt over bruddmekanismer og bruddårsak som ble vurdert	11
<b>6</b>	<b>Årlig bruddsannsynlighet - Hoveddammen</b>	<b>12</b>
6.1	Hendelsestre-analyser	12
6.2	"Bayesian Network" analyser	14
<b>7</b>	<b>Analyse av nedstrøms skråningsstabilitet</b>	<b>16</b>
7.1	Deterministiske analysene	16
7.2	Probabilistiske analyser	17
<b>8</b>	<b>Konsekvensanalyse</b>	<b>18</b>
8.1	Eksponerte objekter	18
8.2	Intensitet av dambruddbølgen	18
8.3	Konsekvenser i form av liv og helse	19
8.4	Konsekvenser i form av materielle tap	19
<b>9</b>	<b>Risikovurdering</b>	<b>21</b>
9.1	Beregnete årlige bruddsannsynlighet	21
9.2	Akseptabel og tolerabel risiko	22
9.3	Risikobilde på Dam Nyhellervatn	24
9.4	Overvåking	26
<b>10</b>	<b>Konklusjoner</b>	<b>26</b>
	<b>Acknowledgment</b>	<b>27</b>
	<b>Referanser</b>	<b>28</b>

## Vedlegg

Vedlegg A	Nyhellervatndammene
Vedlegg B	Analyse av nedstrøms støttefylling skråningsstabilitet for hoveddammen
Vedlegg C	Beskrivelse av sannsynlighetene i probabilistiske analysene
Vedlegg D	Betraktninger om årlig sannsynlighet for lekkasje som kan lede til indre erosjon
Vedlegg E	Hendelsestre-analyser av Nyhellervatndammene

## 1 Bakgrunn

EnergiNorge engasjerte NGI til å vurdere muligheter og avgrensninger for bruk av risikoanalyser for norske dammer. Som en del av vurderingen av dammer i Norge ble Dam Nyhellervatn valgt som eksempel for en dam i meget god stand.

Risikovurderingsanalysene av Dam Nyhellervatn hadde som formål å utføre en risikovurdering for Dam Nyhellervatn i 2017. Tre delmål ble prioritert:

- vurdere sikkerhet og risiko for brudd for Dam Nyhellervatn.
- identifisere de mest kritiske bruddårsaker og bruddmekanismer.
- se på effekt av kontinuerlig overvåking av lekkasje.

Denne rapporten beskriver resultater fra analysene for Dam Nyhellervatn. Hovedrapporten fokuserer på resultater og lærdom fra analysene. Analysene og resultatene er beskrevet i mer detalj i vedleggene.

## 2 Om Nyhellervatndammene

Nyhellervatn ligger i Aurland kommune i Sogn og Fjordane og er inntaksmagasin for Aurland III kraftverk, del av E-CO Energis Aurlandsanlegg. Ved fullt magasin dannes et sammenhengende vann som består av Nyhellervatn, Kongshellervatn, Øljuvatn og Volanuttjønnane. Deler av magasinet, inklusive Øljuvatn, ligger i Hol kommune. Nyhellervatn er magasin for Aurland III kraftstasjon. I østre ende av Øljuvatn er det etablert en sperredam. Damanlegget består av en hoveddam, to sekundærdammer, en sperredam (Øljo) og et overløp i betong. Anlegget ble bygget i perioden 1975 -79.

### 2.1 Nøkkeldata for dammene

Nedbørsfelt:	92,9 km <sup>2</sup>
Oppdemmet magasinivolum:	448 mill m <sup>3</sup>
Høyeste regulerte vannstand (HRV):	1438 moh
Laveste regulerte vannstand (LRV):	1364 moh
Damkrone	1442,8 moh
Topp tetning	1439,5 moh
Entreprenør:	Ing. Furuholmen A/S
Kontrollør:	NGI

Nøkkeldata	Hoveddam	Sekundærdam I	Overløpsdam
Damlengde (m)	650	165	70
Største damhøyde (m)	82,5	17,5	Maksimal: 5,3*
Dambredde (m)	250	60	--
Damklasse, KK**	4	3	0

\* Opp til underkant brodekke: 1,9

\*\* Konsekvensklasse

## 2.2 Revurdering 2012

Norconsult gjennomførte i 2012 en revurdering av dammene og lukene ved Nyhellervatn anleggene (Norconsult, 2013).

### 2.2.1 Dammene

Hoveddam, Sekundærdam I og overløpsdam ble vurdert til å være i meget god stand. Hoveddammen har meget små setninger, liten lekkasje og ingen registrerte skader. Alle dammene tilfredsstillter dagens retningslinjers krav til stabilitet bortsett fra nedstrøms skråning av Hoveddam, som ved stasjonær tilstand har en marginalt lavere sikkerhetsfaktor enn gjeldende krav. Noen avvik i henhold til retningslinjene er funnet og listet opp nedenfor, men ingen av disse truer dammens umiddelbare sikkerhet:

- Kronevernet er i følge tegningene kun ført ned til HRV. For dammer i konsekvensklasse 4 (Hoveddammen) tilsier gjeldende krav at kronevernet skal føres ned til 6 m under HRV, mens for dammer i konsekvensklasse 3 (sekundærdammen) og høyere skal det føres ned til 5 m under HRV.
- Fribord ved Nyhellervatn dammene fra HRV opp til topp dam er 4,8 m. For dammer i konsekvensklasse 4 tilsier myndighetenes krav at fribord fra HRV til topp dam skal være på 6 m.
- Nedstrøms skråning på Hoveddammen har ikke tilstrekkelig sikkerhet mot utglidning. Fagansvarlig er av NVE bedt om å utarbeide et notat med mer utførlig omtale av dammens oppbygging, materialbruk, soneinndeling mv. og eventuelt nye beregninger, som avklarer om dammene har tilfredsstillende sikkerhet (NVE, 2014).
- NVE etterlyser, for Hoveddammens vannside, dokumentasjon av steinstørrelser, hvordan plastringen er utført og eventuelle lokale/mindre skader under vann-nivå. Dette kan som et minimum gjøres gjennom undervannsinspeksjon med dykker eller mini-ubåt, som inkluderer systematisk foto-dokumentasjon (NVE, 2014).
- Det er ikke montert deformasjonsbolter i Nyhellervatn Sekundærdam I. Dette er et krav for fyllingsdammer i konsekvensklasse 3 og høyere.
- Sekundærdam I er ikke utstyrt med et system for lekkasjemåling, hvilket er et krav for fyllingsdammer i konsekvensklasse 3 og høyere.
- NVE (2014) savner også dokumentasjon for vannsideinspeksjon av Sekundærdam I og dokumentasjon og vurderinger av utførelsen og tilstanden til fjellboltene til overløpsdammen.

### 2.2.2 Lukene

Generelt er lukene i tilsynelatende god stand. Lukearrangementet oppfyller kravene stilt i damsikkerhetsforskriften mht. styrke og manøvrering (Norconsult, 2013).

Imidlertid tilfredsstillende ikke lukene nødvendig kapasitet for beredskapsmessig nedtapping. Damsikkerhetsforskriften gir en åpning for reduksjon av senkningshastighet ved store magasiner.

NVE (2014) etterlyser en vurdering av betongkonstruksjonene tilhørende lukene og ønsker at denne bør følge revurderingen av lukene.

### 3 Analysemetodikk for Nyhellervatndammene

#### 3.1 Analyse av årlige bruddsannsynlighet

Risikoanalysene ble gjennomført delvis via en "workshop" hvor sakkyndige fra flere instanser ble samlet og bidro til vurderingene om sannsynlighetene. Vurderingen av årlige bruddsannsynlighet for Dam Nyhellervatn ble gjort med to typer analyser:

- 1) Hendelsestre- analyse 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 bruddsannsynlighet.

Metodene er forklart i mer detalj i NGI (2016) "State-of-the-Art om risikoanalyser for dammer". De to metodene følger en åtte-trinns prosedyre (Vick 2002; Høeg 1996):

- 1) Gjennomgang av dammens ytelse under ulike påkjenninger og av tidligere hendelser på dammen
- 2) Befaring og inspeksjon av dammen for å bli kjent med dammen og grunnforholdene.
- 3) "Failure mode screening": identifisering av de viktigste utløsningsårsaker og bruddmekanismer.
- 4) Etablere enighet om hvilke sannsynligheter ulike verbale beskrivelser av usikkerheter representerer.
- 5) Oppbygging av hendelsestrær eller Bayesisk nettverk.
- 6) Estimat av sannsynligheter for hver av enkelthendelsene i hendelsestreet eller nettverket
- 7) Evaluering av resultater.
- 8) Iterasjon.

En slik vurdering gjøres ofte ved å bringe sammen en gruppe eksperter. Vick (2002) hevder at en strukturert kollektiv ekspertvurdering kan gi en like god sannsynlighetsvurdering som matematiske analyser: "The collective judgment of experts, structured within a process of debate, can yield as good an assessment of probabilities as mathematical analyses".



Et essensielt steg i vurderingen er trinn 3. "Failure mode screening" eller identifisering av de viktigste utløsningsårsaker og bruddmekanismer. Dette er beskrevet i Kapittel 5. Analysen bør se på alle plausible bruddmekanismer og utløsende faktorer.

Sannsynligheten for brudd for dammen er summen av alle sannsynlighetene for hendelseskjedene som fører til brudd. Det er derfor viktig at sannsynlighetene fra de forskjellige analyser er sammenlignbare slik at de kan summeres. I denne rapporten benyttes årlige sannsynligheter.

### 3.2 Analyse av nedstrøms skråningsstabilitet

NGI også utførte nye deterministiske analyser av skråningsstabilitet for nedstrøms skråningen under stasjonær tilstand. Disse ble sammenliknet med deterministiske analyser fra Norconsult (2013). Analysene ble utført basert på klassiske likevektbetraktninger ved hjelp av programmet "SLOPE/W", en todimensjonal beregningskode fra GeoSlope (2012). Probabilistiske analyser ble utført med Monte Carlo simuleringsmetodikk i SLOPE/W.

## 4 Hendelsestre-analyser

### 4.1 Workshop

Risikoanalysene ble gjennomført delvis via en "workshop" hvor sakkyndige fra flere instanser ble samlet og bidro til vurderingene om sannsynlighetene. Analysene ble gjennomført på NGI 4. og 5. april 2017. Deltagerne representerte myndighetene, bransjeforening, vassdragstekniske ansvarlige, dameiere og rådgivere. Deltagerlisten er vist i Tabell 1.

Tabell 1. Workshop deltagere for risikoanalyse av Dam Nyhellervatn

Representant	Bedrift
Leif Basberg	EN
Øystein Nøtsund	NVE
Richard Duncumb	Multiconsult
Anne Marit Ruud	Statkraft
Ola Gunleiksrud	E-Co
Guttorm Mathismoen	E-Co
Knut Helge Kjærvik	E-Co
Kaare Høeg	NGI
Suzanne Lacasse	NGI
Farrokh Nadim	NGI
Thi Minh Hue Le	NGI
Unni Eidsvig	NGI

På workshopen var all relevant bakgrunnsinformasjon om Nyhellervatndammene tilgjengelig. I tillegg var kunnskap om og erfaringer med drift og operasjon av Nyhellervatndammene og andre dammer, som workshop deltagerne hadde, svært viktige informasjonskilder.

Arbeidet på workshopen omfattet trinn 3 - 8 i åtte-trinns prosedyren som beskrevet i forrige delkapittel. Alle trinnene ble gjennomført gjennom diskusjon og en konsensus prosess. Under oppbygningen av hendelsestrærne, la deltagerne frem sine synspunkter på sannsynlighetene for hver av enkelthendelsene i hendelsestreet. Sannsynlighetene i analysene i denne rapporten er "konsensus-verdier", etter at gruppen ble enig om sannsynlighet etter en diskusjon.

De viktigste analysetilfellene og samtlige hendelsestrær ble gjennomgått på workshopen. NGI kompletterte analysene etter workshop'en, og gjennomførte tilleggsanalyser i form av deterministiske og probabilistiske analyser av skråningsstabilitet og Bayesianske nettverksanalyser.

## 4.2 Sannsynligheter for hendelsene i et hendelsetre

Sannsynlighetene for hver av hendelsene i hendelsestreet kan estimeres på ulike måter:

- Statistiske estimater, basert på observasjoner, test resultater, osv.
- Beregninger med modeller basert på fysiske prosesser
- Ekspertvurderinger basert på erfaring

Sannsynlighetsestimatene baseres på etterprøvbare resonnementer. Konsensus oppnås gjennom diskusjon ved bruk av standardbeskrivelser av usikkerhet og sannsynlighet.

Relasjoner mellom verbal beskrivelse av usikkerhet og sannsynligheter, som ble brukt på workshopen, er beskrevet i Vedlegg C. I dette vedlegget beskrives også tilsvarende relasjoner for bruk av områdetall for sannsynligheter, som benyttes for å estimere usikkerheten i vurderingene.

## 5 Utløsningsårsak og bruddmekanismer

### 5.1 Identifisering av bruddmekanismer og utløsningsfaktorer

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

#### Potensielle svakheter i og rundt dammene:

- Indre erosjon
- Utglidning av opp- og nedstrøms skråning
- Skred inn i magasinet utfra geologien
- Svakhet i fundamentet
- Noe operativt som kan føre til brudd?

#### Potensielle eksterne utløsningsfaktorer:

- Flom

- Sommer/høst: Bresmelting som forårsaker økt vannmengde i magasinet
- Vinter/vår: is/hardpakket snø som hindrer overløp
- Jordskjelv
- Meteoritter
- Flystyrt

Under diskusjonene kom det opp innspill på utløsende faktorer, potensielle svakheter og potensielle bruddmekanismer for Dam Nyhellervatn. Disse ble deretter sortert og prioritert. I diskusjonen og vurderingene ble det spesielt fokusert på avvik fra myndighetskravene, som ble påpekt under revurderingen i 2012. Disse er beskrevet i Vedlegg A og kort oppsummert her:

For Hoveddammen: For lite kronevern og fribord, for lav sikkerhetsfaktor for nedstrøms skråningen, manglende dokumentasjon av steinstørrelser på oppstrøms side, for lav luke kapasitet ved nedtapping.

For Sekundær dam 1: Behov for deformasjonsbolter og lekkasjemåling og dokumentasjon av inspeksjon på vannsiden.

For overløpet: Dokumentasjon på tilstanden til fjellboltene mangler.

Disse aspektene var vesentlige i identifisering av potensielle bruddmekanismer og i sannsynlighetsvurderinger av enkelte hendelser i hendelsestrærne. Følgende spørsmål ble stilt:

Hva er sannsynligheten for:

- at luke-kapasitet er utilstrekkelig og at tappe-kapasiteten må økes betydelig?
- at det oppstår instabilitet av nedstrøms skråning?
- at drenasjekapasitet ikke er tilstrekkelig ved stor lekkasje eller overtopping?
- at brudd oppstår ved fribord på 4,8m og ved fribord på 6m?
- at bølgepåvirkning er så stor at det vil kunne oppstå skade på oppstrøms side?
- Kan utilstrekkelig luke-kapasitet ha negativ konsekvens nedstrøms?

For en komplett analyse bør man også vurdere sannsynlighet for brudd forårsaket av terror og/eller sabotasje. Det ble bestemt å ikke gjøre analyser for "tilsiktete aksjoner"<sup>1</sup>/villede handlinger som terror eller sabotasje. Dette må ses på av myndighetene som har ansvar for samfunnssikkerhet.

## 5.2 Oversikt over bruddmekanismer og bruddårsak som ble vurdert

Tabell 2 oppsummerer diskusjonen om de viktigste brudd- og utløsningsmekanismer for Nyhellervatn Hoveddam. Brudd- og utløsningsmekanismer som ble diskutert, men som ble ansett som mindre viktige er oppsummert i Tabell 3.

---

<sup>1</sup> Ordbruk i NVEs veileder

I tillegg kan hendelser som omfatter menneskelig svikt (operasjon, lekkasjemålinger) og tappekapasitet inngå i hendelsestrærne for vurdering av utvikling av bruddmekanismene. Videre ble analyser av Hoveddammen prioritert (etter ønske fra E-Co) fremfor Sekundærdammen, dvs. det var ønskelig å gjøre flere analyser for Hoveddammen enn å gjøre hendelsetre analyser for Sekundærdammen.

Tabell 2. Prioriterte bruddmekanismer og utløsningsårsaker

Utløsningsmekanisme	Bruddmekanisme	Metode	Kommentar/Spørsmål
Lekkasje HRV	Indre erosjon	Hendelsestre	Drenasjekapasitet er inne i vurdering av tåstabilitet
Flom	Overtopping Tilstopping av overløpet?	Hendelsestre	Fribordet er på 4,8 m mens myndighetskrav er på 6 m
Lekkasje ved bergfundament	Kontakterosjon mot oppsprukket fjell som kan skade morenekjernen	Hendelsestre	
Instabilitet i skråningene	Instabilitet av nedstrøms skråning	Probabilistisk likevektsanalyse av skråningen	Prioriteres fra E-CO's side pga. lavere sikkerhetsfaktor enn myndighetskravet

Tabell 3. Bruddmekanismer som ble gitt lavere prioritet under workshopen

Utløsningsmekanisme	Bruddmekanisme	Kommentar
Jordskjelv	Store setninger og overtopping	Jordskjelvanalyser fra Dam Dravladalen ga lav sannsynlighet for dambrudd. Jordskjelvlastene for Nyhellervatn er halvparten av jordskjelvlastene på Dam Dravladalen.
Bølgebelastning oppstrøms (is og bølge mot fylling/plastring)	Overtopping	Nyhellervatn ligger høyt, dekket av is store deler av året. Bølgebelastning kun 5 måneder pr år og på forskjellige steder av fyllingen. Svekkelsene vil skje over tid; forebygges ved jevnlig inspeksjoner og utbedringer ved observerte skader.
Skred inn i magasinet med flodbølge som følge	Overtopping pga. skred inn i magasinet (skred i gamle eller nye steinbrudd -i magasinet eller ved dammen)	Magasinet er ikke skredutsatt: Godt fjell, lite løsmasser, flatt/lite kupert terreng.
Meteoritter og Flystyrt	---	Lave sannsynligheter – og fokuset er på geotekniske bruddmekanismer; tatt med for ordens skyld.

## 6 Årlig bruddsannsynlighet - Hoveddammen

### 6.1 Hendelsestre-analyser

Tabell 4 gir en oversikt over analysene gjennomført på workshopen og i etterkant av workshopen.

Tabell 4. Oversikt over samtlige analyser

Analyse av Nyhellervatn Hoveddam	Metode
Indre erosjon	Hendelsestre-analyse
Flom	Hendelsestre-analyse
Erosjon i bergfundamentet	Hendelsestre-analyse
Ustabilitet på oppstrøms side	
1) Bølgebelastning	Hendelsestre-analyse
2) Isbelastning	
Jordskjelv	Hendelsestre-analyse
Indre erosjon, lekkasje gjennom kjerne	"Bayesian network" og Monte Carlo simulering
Konsekvenser av dambrudd	Analyse av liv og materielle skader
Stabilitet av nedstrøms skråning	Deterministisk og probabilitisk analyse

Tabell 5 gir en oversikt over hendelsestre-analysene som ble gjennomført på workshopen. Vedlegg E gir resultater i grafisk form for hver av de mest sentrale hendelsestre-analysene, med forklaring og begrunnelse for valg av sannsynlighetsverdier for hver gren i trærne. Vedlegg D 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 Nyhellervatn

Hendelsestre-analyse	Figur nr
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 1)	E1
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 2)	E2
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 3)	E3
Lekkasje gjennom kjernen og bergfundamentet	E4
Flom	E5
Oppstrøms stabilitet under bølgebelastning	E6, E7
Oppstrøms stabilitet under isbelastning	E6, E8
Jordskjelv	E9

Analysene er gjennomført med best estimat av sannsynlighetsverdier (Vedlegg C, Tabell C2) og med 'områdetall' (øvre og nedre estimat) for sannsynlighetsverdier (Vedlegg C, Tabell C3). Tabell 6 gir resultater for best-estimat analysene og Tabell 7 for analysene med områdetall for indre erosjonsmekanismen. Tabell 8 oppsummerer den totale bruddsannsynligheten fra geotekniske og natur-relaterte årsaker.

Tre iterasjoner av indre erosjon viser at kontinuerlig overvåking av lekkasje reduserer betydelig sannsynligheten for at indre erosjon fører til brudd. Overvåkingen hindrer ikke initiering av lekkasje men åpner mulighet for tiltak som bidrar til at indre erosjon ikke utvikler seg videre.

Det ble en svært lav sannsynlighet for brudd forårsaket av flom (god flomavlednings- kapasitet og dermed liten flomstigning).

Tabell 6. Best estimat årlig bruddsannsynlighet fra hendelsestre-analyser for Dam Nyhellervatn

Hendelser	Best estimat årlig bruddsannsynlighet, $P_{f\text{ årlig}}$
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 1)	$5.7 \cdot 10^{-6}$
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 2)	$2.1 \cdot 10^{-7}$
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 3)	$1.5 \cdot 10^{-6}$
Lekkasje gjennom kjernen og bergfundamentet	$3.7 \cdot 10^{-7}$
Flom	$6.5 \cdot 10^{-9}$
Oppstrøms stabilitet under bølgebelastning	$1.0 \cdot 10^{-8}$
Oppstrøms stabilitet under isbelastning	$1.0 \cdot 10^{-8}$
Jordskjelv	$2.7 \cdot 10^{-7}$

Når 'områdetall' brukes i hendelsestreet for indre erosjon forårsaket av lekkasje gjennom kjerne, er sannsynlighet for brudd noe høyere og kan komme opp til  $5 \cdot 10^{-5}$ /år, mens det nedre estimatet er så lavt som  $8 \cdot 10^{-8}$ /år. Spredningen av sannsynlighetsverdier illustrerer effekten av usikkerhetene, men spredningen er urealistisk stor. Bayesianisk nettverk-analysene kombinert med Monte Carlo simulering (vist i Kapittel 6.3) reduserer spredningen betydelig og gir et mer representativt bilde av spredningen i årlig bruddsannsynlighet (cf. Figur 1).

Tabell 7. Område tall bruddsannsynlighet fra hendelsestre-analyser for Dam Nyhellervatn

Hendelse	Årlig sannsynlighet for brudd, $P_{f\text{ årlig}}$		
	Nedre estimat	Best estimat	Øvre estimat
Indre erosjon forårsaket av lekkasje gjennom kjernen	$7.8 \cdot 10^{-8}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$5.3 \cdot 10^{-5}$

Tabell 8. Total årlig bruddsannsynlighet for Dam Nyhellervatn av geotekniske og naturlige årsaker

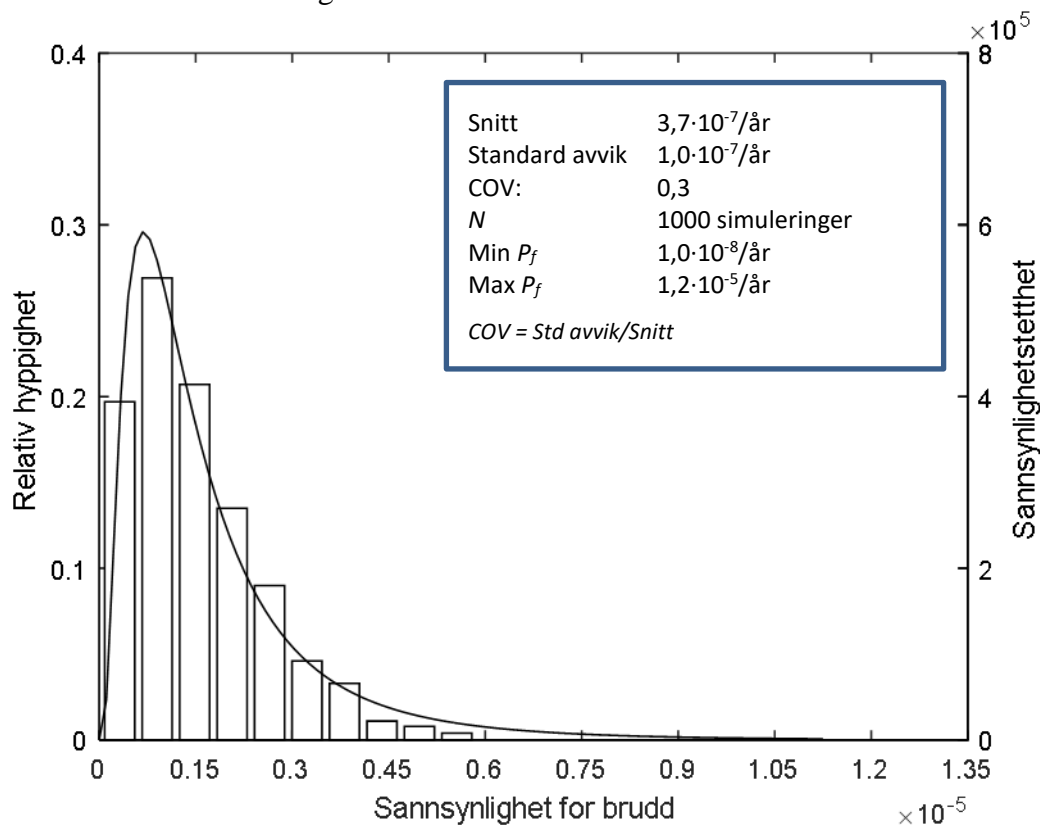
Hendelse	Årlig bruddsannsynlighet, $P_{f\text{ årlig}}$
Indre erosjon forårsaket av lekkasje gjennom kjernen	$1.5 \cdot 10^{-6}$ /år
Lekkasje gjennom bergfundamentet som forårsaker erosjon i kjernen	$3.7 \cdot 10^{-7}$ /år
Flom, iterasjon 2	$6.5 \cdot 10^{-9}$ /år
Bølgebelastning på oppstrøms side	$1.0 \cdot 10^{-8}$ /år
Isbelastning på oppstrøms side	$1.0 \cdot 10^{-8}$ /år
Jordskjelv	$2.7 \cdot 10^{-7}$ /år
<b>Sammenlagt bruddsannsynlighet, geotekniske og natur-relaterte årsaker</b>	<b><math>2.2 \cdot 10^{-6}</math>/år</b>

## 6.2 "Bayesian Network" analyser

Det ble gjennomført Bayesianiske nettverksanalyser (BN) for den mest kritisk bruddmekanisme, dvs. for den som kom ut med høyest sannsynlighet i hendelsetre analysene. Disse analysene ble kombinert med Monte Carlo simuleringer for å kunne beskrive resultatene ved hjelp av en probabilistisk sannsynlighetsfordeling, som kvantifisere snitt og spredning i sannsynlighet for

brudd for Dam Nyhellervatn. Analysen ble også brukt for å verifisere resultatene fra hendelsestre analysene. Når sannsynlighetene for enkelthendelsene er representert ved én verdi gir de Bayesianske analysene det samme svaret som hendelsestreanalysene. "Bayesisk nettverk"-metoden er beskrevet i NGI (2016) "State-of-the-Art" rapport.

Figur 1 viser resultatene for tilfellet "indre erosjon forårsaket av lekkasje ved bergfundament". Resultatet er gitt som et histogram for bruddsannsynlighet. Årlige bruddsannsynlighet ligger på  $3,7 \cdot 10^{-7}/\text{år}$ . Bruddsannsynlighet har en lognormal fordeling, hvor årlige bruddsannsynligheten kan variere mellom  $10^{-8}/\text{år}$  og  $10^{-5}/\text{år}$ .



Figur 1. Probabilistisk fordeling for indre erosjon forårsaket av lekkasje ved bergfundament

Tabell 9 sammenligner resultatene fra hendelsestre- og Bayesiske nettverksanalyser (BN). De siste analysene bekrefter de lave sannsynlighetene for brudd for Dam Nyhellervatn.

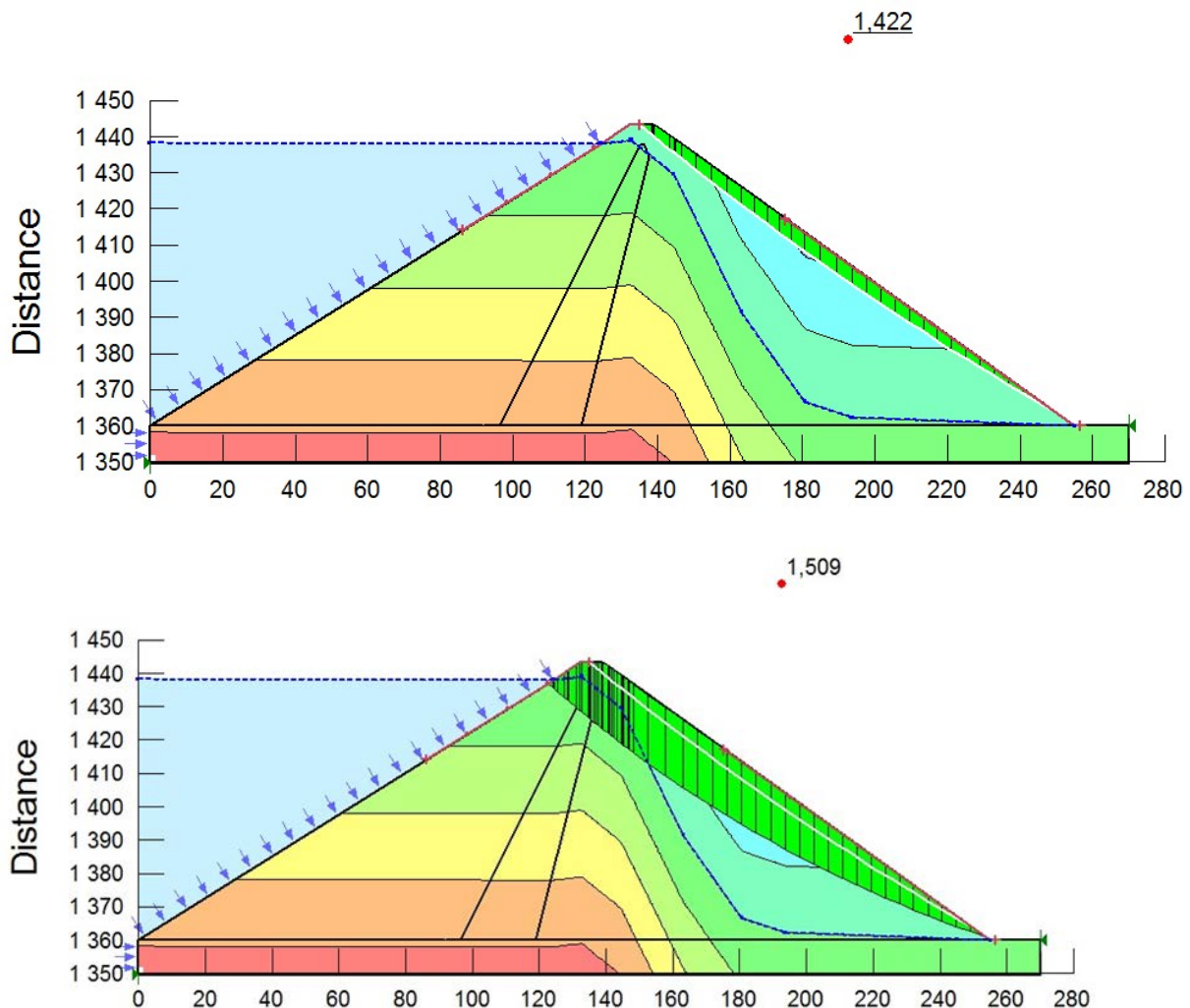
Tabell 9. Sammenligning av bruddsannsynlighet fra hendelsestre-analyser og Bayesiske nettverksanalyser for Indre erosjon forårsaket av lekkasje ved bergfundament.

Metodikk	Årlig sannsynlighet for brudd, $P_f$ årlig	
	Beste estimat	Usikkerhet
Hendelsestre analyse	$3,7 \cdot 10^{-7}/\text{år}$	Nedre estimat: $10^{-8}/\text{år}$ Øvre estimat: $10^{-5}/\text{år}$
Bayesiansk nettverk-analyser	$3,7 \cdot 10^{-7}/\text{år}$	SD= $1,0 \cdot 10^{-7}/\text{år}$

## 7 Analyse av nedstrøms skråningsstabilitet

### 7.1 Deterministiske analysene

Resultatet av NGIs analyser av skråningsstabilitet er vist øverst i Figur 2, med beregnet kritisk glideflate (betegnet som "Glideflate A"). Glideflaten er sirkulær med radius senter vist i rødt i Figur 2. Sikkerhetsfaktoren (FS) ble beregnet til 1,42, som tilsvarer laveste sikkerhetsfaktor funnet av Norconsult (2013). Glideflate A er imidlertid grunnere enn den kritiske glideflaten beregnet i Norconsults (2013), betegnet som "Glideflate B" og vist nederst i Figur 2. NGI fikk en sikkerhetsfaktor på 1,51 for Glideflate B. NGIs grunnere Glideflate A vil sannsynligvis ikke føre til brudd, med vil forårsake skader på dammens skråning. Glideflate A og Glideflate B ble studert videre med deterministiske og probalibistiske analyser.



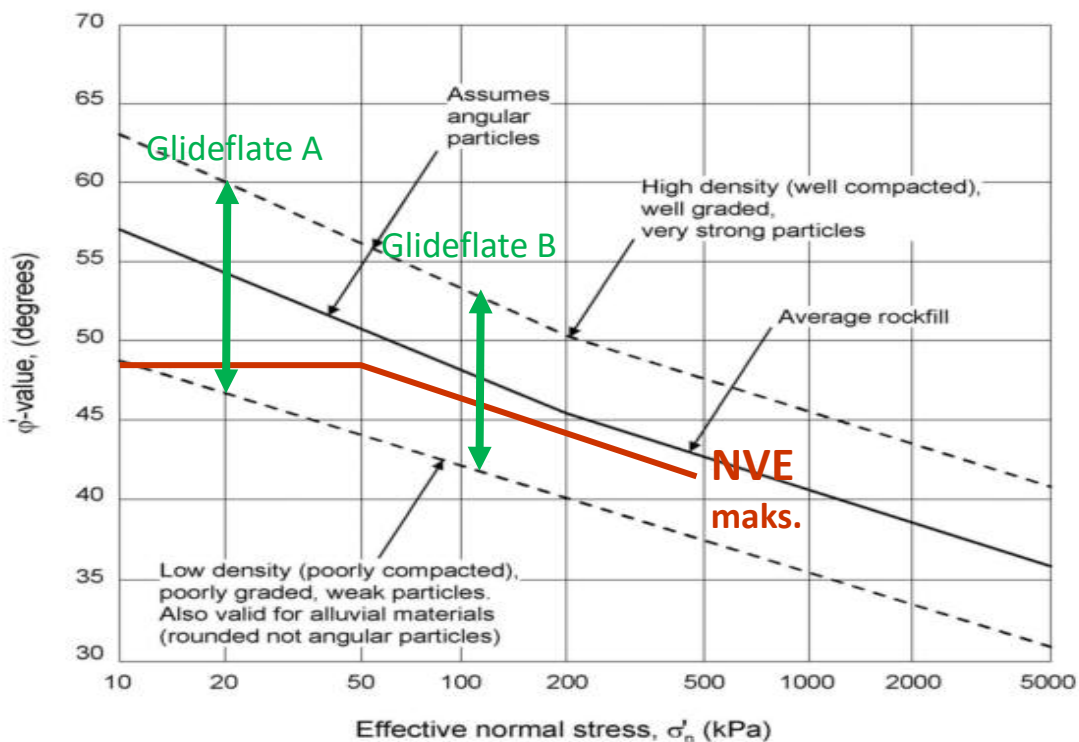
Figur 2. Analyse av nedstrøms skråning stabilitet under stasjonær tilstand. Øverst: NGIs kritisk Glideflate A (hvit) med SF 1,42; Nederst: Norconsults kritisk Glideflate B (sort) med DF 1,51 og Glideflate A) (sort) (horisontal og vertikal skala er i m).



NGI utførte deterministiske sensitivitetsanalyser, hvor parametrene ble endret innenfor en rimelig bredde mellom en minimum og en maksimum verdi. Sensitivitetsanalysene er presentert i Vedlegg B. Blant alle analyser gjennomført er det kun to tilfeller i de parametriske analyser som gir sikkerhetsfaktorer mindre enn 1,5 for Glideflate B: Når friksjonsvinkelen i steinfyllingen og filteret er antatt på sitt laveste verdi på 40 grader er sikkerhetsfaktoren på 1,35; når poretrykket (piezometrisk linjen) er antatt på sitt høyeste er sikkerhetsfaktoren på 1,48. Begge antagelser er meget konservative.

## 7.2 Probabilistiske analyser

Glideflate A har en gjennomsnittlig effektiv spenning på 20 kPa i bunnen av skjærflaten. Glideflate B har en effektiv spenning på 120 kPa. Effektiv spenningen påvirker friksjonsvinkelen i steinfyllingen. Figur 3 viser hvordan friksjonsvinkel i steinfylling kan variere avhengig av steinkvalitet, komprimering og effektivspenning. Dokumentasjon for friksjonsvinkel dataene er gitt i Vedlegg B.



Figur 3. Friktsjonsvinkel (sekantverdi) for steinfylling (NGI 2002/EBL 2002)

I NGIs probabilistiske analyser ble steinfyllingsmaterialer i Dam Nyhellervatn gitt en friksjonsvinkel mellom 45 og 55° når normalspenning var lav ( $\sigma'_n = \text{ca. } 20 \text{ kPa}$ , Glideflate A) og mellom 40 og 50° når normal spenning var rundt 120 kPa (Glideflate B).

Resultater fra de probabilistiske analysene av nedstrøms skråningsstabilitet under stasjonær tilstand er vist i Tabell 10. Resultatet viser at nedstrøms skråning har en meget lav

brudds sannsynlighet. Glideflate B på nedstrøms skråningen, med snitt sikkerhetsfaktor på 1,32, har en lav brudds sannsynlighet på grunn av kvaliteten og styrken av steinfyllingen.

Situasjoner hvor en sikkerhetsfaktor som er lavere enn kravet men allikevel har meget lav brudds sannsynlighet har vært erfart før innen geoteknikk, både for skråninger og direkte og pelede fundamenter. Brudds sannsynlighet er en "nominell brudds sannsynlighet".

Tabell 10. Resultat fra probabilistiske analysene av nedstrøms skråningsstabilitet

Glideflate	Snitt sikkerhetsfaktor, FS på probabilistisk fordelingen	Brudds sannsynlighet
Grunnere glideflate A	1,58	$P_f < 10^{-7}$
Dypere glideflate B	1,32	$P_f = 7 \cdot 10^{-7}$

## 8 Konsekvensanalyse

### 8.1 Eksponerte objekter

Antall boligekvivalenter som kan bli berørt av et dambrudd på yhellervatn hoveddam, fordelt på bygningstyper (Norconsult, 2012b), er som følger:

Boligbygning:	192,2
Industri- og lagerbygning:	2,3
Hotell- og restaurantbygning	19,2
Kultur- og forskningsbygning	23,4
Kontor- og forretningsbygning	6,5
Helsebygning	16,9
Samferdsels- og kommunikasjonsbygning	0,3
Sum boligekvivalenter	260,7

I tillegg vil dambruddbølgen berøre deler av Fv50. Dambruddbølgen krysser E-16 i dagen ved Fossheim og fortsetter parallelt med E-16 i ca 1,8 km. På nordsiden av elven ligger Fv 243 og Fv 242 som også vil rammes av bruddbølgen.

### 8.2 Intensitet av dambruddbølgen

Brudd i hoveddammen til Nyhellervatn gir den suverent største dambruddbølgen av dammene i Aurlandsanleggene. Det simulerte rørosjonsbruddet gir størst vannføring med over 120 000 m<sup>3</sup>/s som kulminasjonsvannføring ut av bruddet. Denne toppen blir dempet til ca. 90 000 m<sup>3</sup>/s etter Vassbygdvatn. Bølgen gir svært store vannstandsstigninger, f.eks. nærmere 30 m ved E-COs bygg i Vassbygdi. Bølgen transporteres raskt og toppen når fjorden drøye 1,5 timer etter bruddstart eller ca. en halvtime etter at kulminasjonsvannføringen nås i bruddet. Dette tilsvarer en gjennomsnittlig hastighet på bølgetoppen på ca. 80 km/t (E-CO Vannkraft, 2003). For å beregne konsekvensene benyttes relasjoner som angir antall omkomne og bygningskade som funksjon av intensitet av dambruddbølgen. Dette er vist i de neste to avsnittene.

### 8.3 Konsekvenser i form av liv og helse

For å beregne konsekvensene i form av liv og helse kan funksjonen vist i Figur 4 benyttes. Figuren angir sammenheng mellom antall omkomne og intensitet av vannutslippet (strømningshastighet og -dybde). For å beregne antall eksponerte personer benyttes antall boenheter og snitt antall personer per boenhet i Norge (2,2 personer per boenhet). Antall eksponerte personer er 261 boenheter x 2,2 personer per boenhet, dvs. 574 personer.

E-CO Vannkraft (2003) beregnet vannstandsstigning for ulike steder nedstrøms Nyhellervatn hoveddam og de fleste ligger mellom 10 og 30 meter, men også ned til 5 meter og helt opp til 50 m. Ankomsttider varierer fra 15 minutter til 1,5 t. Tabell 11 gir gjennomstrømnings volum pr sekund pr meter flombredde for forskjellige vannstigningsverdier.

Beregnet antall omkomne vil ligge mellom de to kurvene i Figur 4, siden ankomsttiden for dambruddbølgen varierer og følgelig gir ulik varslings tid. Tabell 12 gir resulterende antall omkomne med og uten varslings tid.

Tabell 11. Beregning av Q/W som funksjon av vannstandsstigning

Vannstandsstigning (m)	Gjennomstrømnings volum per sekund og per meter flombredde* (Q/W i Fig. 4)
5	110 m <sup>2</sup> /s
10	220 m <sup>2</sup> /s
15	330 m <sup>2</sup> /s
20	440 m <sup>2</sup> /s
30	660 m <sup>2</sup> /s

\* Antar at strømningshastigheten er 22 m/s som tilsvarer 80 km/t.

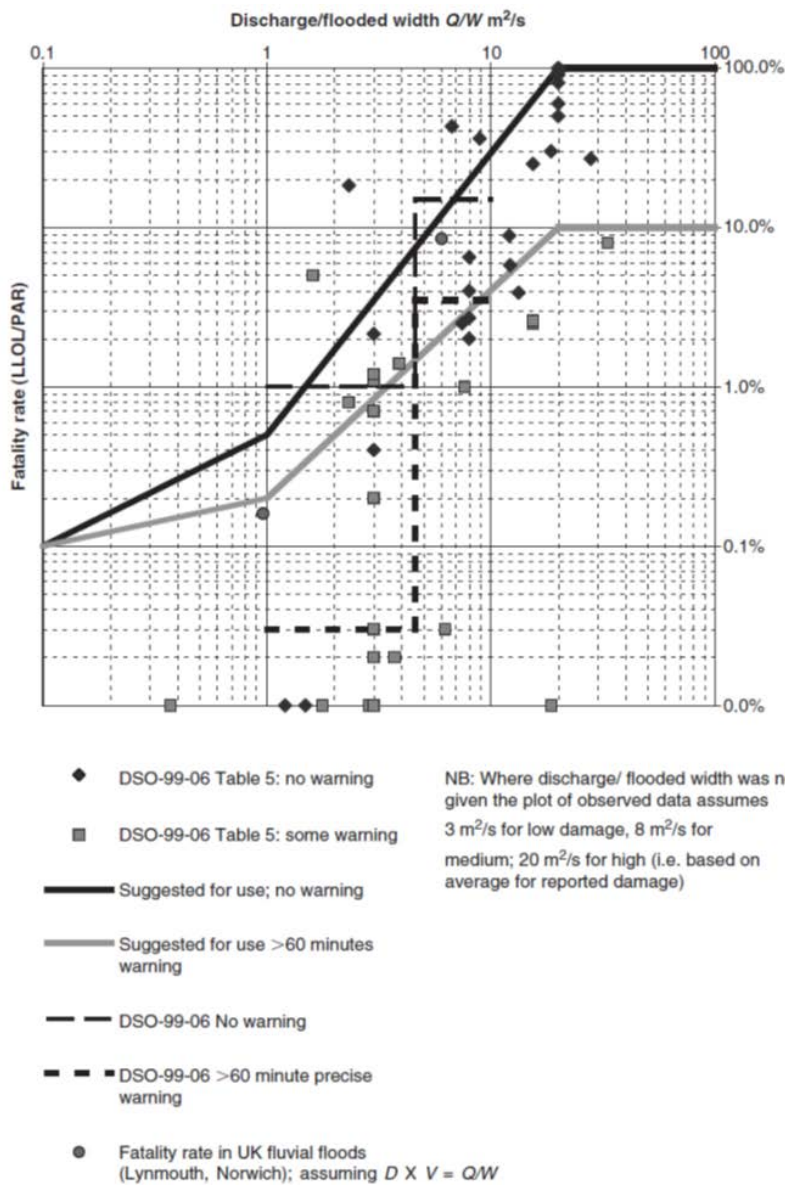
Tabell 12. Beregnet antall omkomne fra Figur 4 og Tabell 8

Antall omkomne beregnet ved å bruke 10% dødelighet (fra kurven med varslings tid over en time) og 100% dødelighet (fra kurven uten varslings tid eller kort varslings tid)		
Eksponerte	Med varslings tid	Uten varslings tid
574	57	574

### 8.4 Konsekvenser i form av materielle tap

For beregning av skader forårsaket av dambruddbølgen må en kombinasjon av hastighet og dybden av strømmen inngå som inngangsparameter (Brown and Gosden, 2004). Skader forårsaket av dambruddbølgen er foreslått å beregnes etter Tabell 13.

Ut fra Tabell 13 vil samtlige bygninger med D x V høyere enn 7 m<sup>2</sup>/s bli totalt ødelagt. Samtlige eksponerte boligheter vil havne i denne kategorien. Tabell 14 viser materielle tap og beregnet risiko, hvis kostnadene for gjenoppbygging antas å ligge på 2 – 5 mill NOK per boligekvivalent.



Figur 4. Foreslått sammenheng mellom dødelighet og fluks av vannutslippet (Brown and Gosden, 2004)

Tabell 13. Alvorlighet av bygningsødeleggelse fra bølgehastighet og -dybde (Brown and Gosden, 2004)

Alvorlighet av skade på bygninger	V: gjennomsnittlig hastighet; D: punkt dybde
Ingen skade	Dambruddbølgen er helt innenfor strømningskanalen
Kun oversvømmelse	$V < 2\text{m/s}$ eller $D \times V < 3\text{m}^2/\text{s}$
Strukturelle skader	$V > 2\text{m/s}$ eller $3\text{m}^2/\text{s} < D \times V < 7\text{m}^2/\text{s}$
Full ødeleggelse	$V > 2\text{m/s}$ og $D \times V > 7\text{m}^2/\text{s}$

Tabell 14. Beregnet materielle tap og risiko. Antall boligekvivalenter = 260

Tap og risiko	Totale materielle tap (gjenoppbyggingskostnader på 2 mill/boligenhet)	Totale materielle tap (gjenoppbyggingskostnader 5 mill/boligenhet)
Beregnet tap	520 mill. NOK	1300 mill. NOK
Beregnet risiko <sup>1</sup> der total brudd sannsynlighet er $3 \cdot 10^{-6}$ /år	1560 NOK/år	3900 NOK/år

<sup>1</sup> Risiko = sannsynlighet x konsekvens

## 9 Risikovurdering

### 9.1 Beregnede årlige bruddsannsynlighet

Selv med flere konservative antagelser har Dam Nyhellervatn en bruddsannsynlighet som skyldes indre erosjon på  $1,5 \cdot 10^{-6}$ /år og en total bruddsannsynlighet på  $2 \cdot 10^{-6}$ /år for alle brudmekanismer samlet.

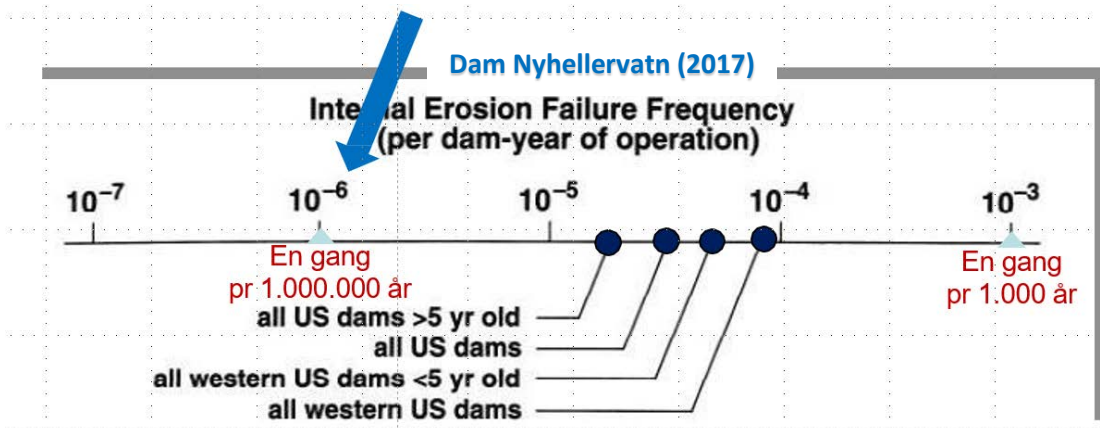
Basert på observert hyppighet av brudd i dammer som skyldes indre erosjon og levetid av dammer i USA har ICOLD publisert at dammene i USA har en årlig bruddsannsynlighet pga indre erosjon mellom 2 og  $9 \cdot 10^{-5}$ /år. Figur 5 sammenligner årlige bruddsannsynlighet for Nyhellervatn Hoveddam med bruddsannsynlighet for dammer i USA. Dam Nyhellervatn har en årlig bruddsannsynlighet som er 10 til 60 ganger lavere enn hva tilsier ICOLD-statistikken.

Fell (2015) rapporterte statistikk tall for fyllingsdammer fra 1800 til 1986, basert på Foster et al. (2000). Antall dammer i databasen er 11192 "store" dammer<sup>2</sup>. Et utvalg av Fells' statistikk er reproduisert i Tabell 15, med andel brudd og uønskede hendelser (i prosent) i snitt for forskjellige brudmekanismer og til forskjellige tider i en dam levetid. Fell beregnet også en årlig bruddsannsynlighet fra observasjoner i samme perioden, år 1800 til 1986. Bruddssannsynligheten etter først fylling av magasinet er på  $2 \cdot 10^{-4}$ /år. Fells årlige bruddsannsynlighet er noe høyere en tallene vist i Figur 5 med ICOLD statistikken.

Statistikken fra Fell (2015) viser at:

- Indre erosjon og overtopping er hovedårsak til brudd i fyllingsdammer.
- Instabilitet i skråningene er en sjelden bruddårsak, men det har vært observert flere uønskede hendelser senere i en dam levetiden. Disse ble, som regel, reparert.
- Ca. 67% av brudd som skyldes indre erosjon og "piping" og ca. 50% av indre erosjon og "piping" hendelser ("accidents") skjer enten ved første fylling av magasinet eller i løpet av de første fem operative år.
- Det er mye oftere brudd i mindre dammer (mindre enn 30 m høy) enn i de høye dammer.

<sup>2</sup> I henhold til ICOLDS definisjon for "store dammer" (damhøyde  $\geq 15$  m)



Figur 5. Sammenligning av Nyhellervatns årlige bruddsannsynlighet med bruddsannsynlighet for andre dammer (alle pga. indre erosjon)

Tabell 15. Statistikk for brudd og uønskede hendelser for fyllingsdammer (Fell 2015).

Failure mode	Average probability		Percentage of occurrence of event and timing of incident (%)							
			Failure				Event/accident			
	Failure	Event	Constr.	1 <sup>st</sup> fill.	0-5yrs	>5yrs	Constr.	1 <sup>st</sup> fill.	0-5yrs	>5yrs
Internal erosion and piping										
-Embankment	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	2%	48%	14%	36%	0%	26%	13%	61%
-Foundation	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	5%	20%	50%	25%	0%	30%	24%	46%
-Emb'ent to foundation	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	0%	50%	50%	0%	0%	20%	27%	53%
Slope instability										
-Downstream	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	18%	18%	0%	64%	15%	11%	25%	49%
-Upstream	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	0%	0%	100%	0%	22%	2%	26%	50%

Event er en uønsket hendelse

Constr. er under bygging

1<sup>st</sup> fill. er under første fylling av reservoaret

0-5 yrs er i de første 5 operative år, etter første fylling

>5 yrs er etter de første 5 operative år.

## 9.2 Akseptabel og tolerabel risiko

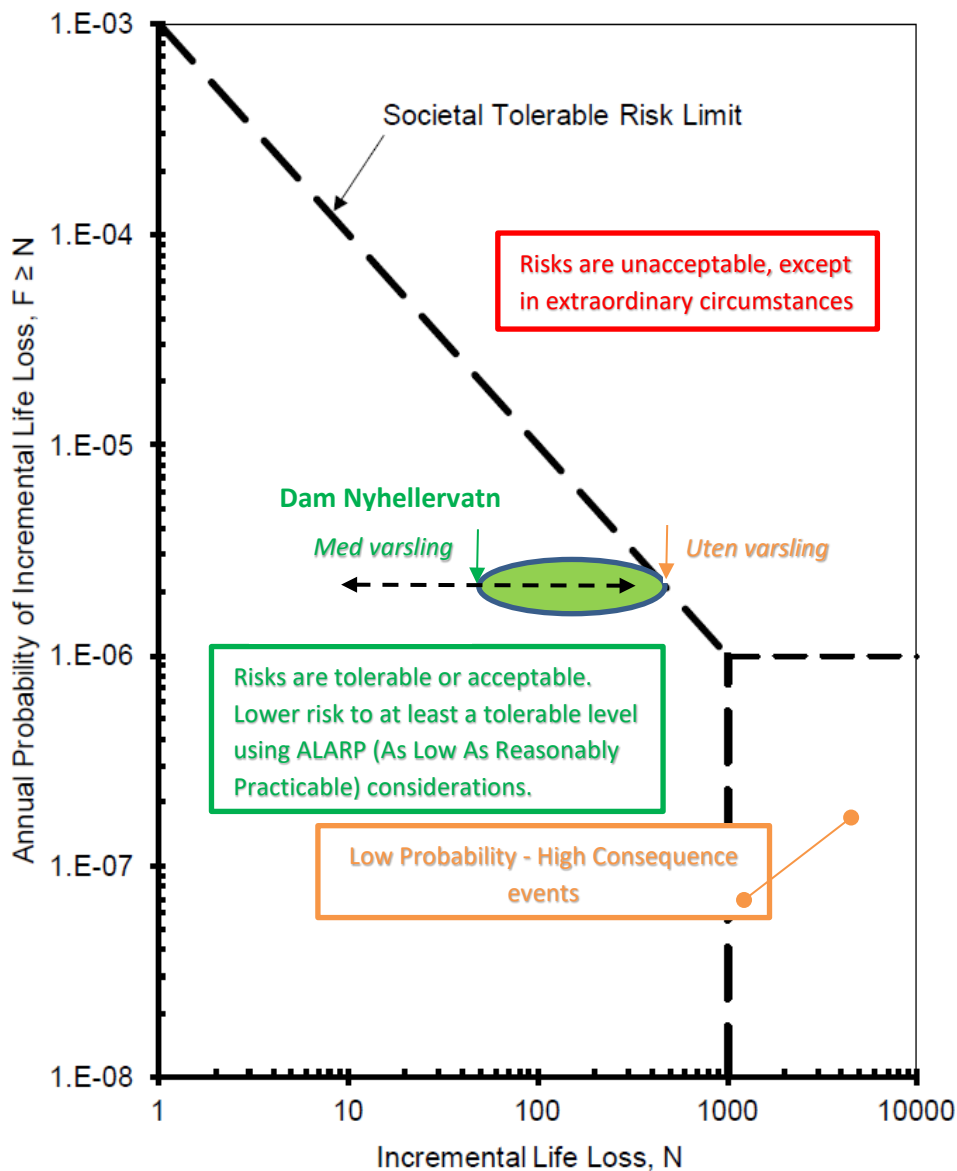
Flere land stiller krav til eller har retningslinjer for sikkerhet for mennesker som potensielt kan bli berørt av et dambrudd, i form av eksplisitte og tallfestede risikoakseptkriterier. Figur 6 viser kravet for dammer fra US Army Corps of Engineers (USACE 2014).

For risiko som uttrykker tap av menneskelige liv, skilles det mellom 'individuell risiko' og 'samfunnsmessig risiko':

- Med 'individuell risiko' menes sannsynligheten for at ett individ mister livet som følge av en fare i løpet av en referanseperiode (vanligvis ett år). Den individuelle risikoen innebærer altså en risikoøkning som kommer i tillegg til den underliggende sannsynligheten for å miste livet, dersom faren ikke eksisterte. For individuell risiko, er grensen til akseptabel risiko ofte satt til  $10^{-2}/\text{år}$  eller  $10^{-3}/\text{år}$ .

- Risiko for flere dødsfall under én samme hendelse refereres til som 'samfunnsmessig risiko', eller risikoen for en omfattende skade fra en hendelse, der konsekvensene er i en slik målestokk at det fremkaller et sosialt/politisk ansvar og flere personer kan miste livet.

I Norge finnes det ikke slike risiko-krav for dammer. En sannsynlighet på  $10^{-4}$ /år er en mye brukt øvre grense for akseptabel risiko for 10 omkomne i utlandet, og i offshore industrien i Norge.



Figur 6. Anbefalte risikoakseptkriterier for samfunnsmessig risiko (USACE, 2014), og risiko for Dam Nyhellervatn (grønn ellipse).

USACE (2014) i Figur 6 setter også sannsynligheten på  $10^{-5}$ /år som øvre grense for tolerabel risiko for 100 dødsfall og  $10^{-6}$ /år for 1000 dødsfall. For veldig høye antall dødsfall ( $>1000$ ) er

det behov for mer detaljerte studier. Dette reflekterer både "risikoaversjon" for et stort antall omkomne og at beregningene knyttet til meget sjeldne hendelser er veldig usikre.

Figur 7 (øvre del) viser de aller første (1984) anbefalte akseptabel-risiko kurver, med en vurdering av hvor i diagrammet plasseres forskjellige strukturtyper og hendelser. Vurderingene, foretatt av flere professorer på MIT (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA), er basert på erfaring med "hvor ofte enkelte strukturtyper går til brudd og forårsaker dødsfall".

Risikoverdiene som er vist i Figur 6 og 7 er mye lavere enn "risikoen ved å leve", når enkelte er eksponert til naturfarer eller andre menneske-skapte farer.

### 9.3 Risikobilde på Dam Nyhellervatn

Med en beregnet bruddsannsynlighet ved Dam Nyhellervatn på  $2 \cdot 10^{-6}$ /år og de beregnede konsekvensene ligger risikoen i øvre del av akseptabel/tolerabel risiko, når kriterier fra USACE 2014 benyttes (Figur 6). Risikobildet for Dam Nyhellervatn er vist med grønn ellipse. Bredden av risikoellipsen for Dam Nyhellervatn viser effekten av varsling for å redusere antall omkomne.

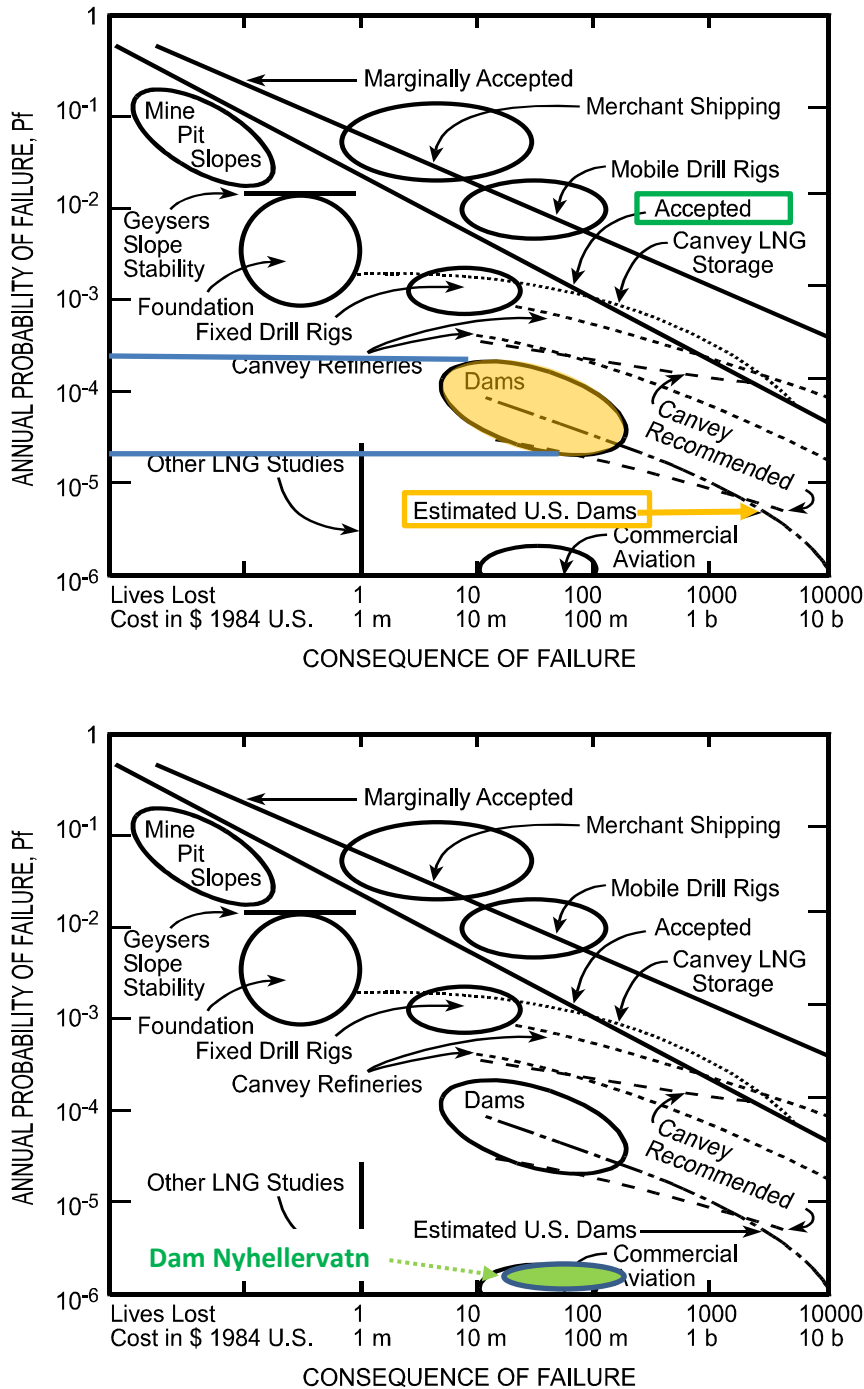
Den nedre delen i Figur 7 viser hvor Dam Nyhellervatn plasseres i forhold til andre dammer og andre strukturer. I denne grafen ligger også Dam Nyhellervatn svært gunstig i den akseptabel risiko sonen.

Det ligger imidlertid flere konservative antagelser bak vurderingene av årlig bruddsannsynlighet og konsekvenser for Dam Nyhellervatn:

- For vurdering av konsekvensene og risiko, er det benyttet scenariet som gir den største dambruddbølgen. Denne antar Middelflom ( $Q_m$ ) i vassdraget og brudd ved rørosjon i dammen. I Figur 6, er det benyttet en bruddsannsynlighet som tilsvarer summen av samtlige bruddmekanismer. Sannsynligheten for brudd etter utvikling av rørosjon alene (og i kombinasjon med middelflom) er mye lavere enn  $2 \cdot 10^{-6}$ /år.
- Hendelsestre-analysene brukte for initiering av lekkasje en snitt verdi for norske dammer basert på observert lekkasje. Dam Nyhellervatn har mye mindre lekkasje enn snittet, og lavere sannsynlighet for initiering av lekkasje kunne ha vært brukt. Sannsynlighet kunne godt være minst halvert med en sannsynlighet for initiering av lekkasje som baseres seg på observasjoner på Dam Nyhellervatn i stedet for et snitt av observasjoner av lekkasje for alle steinfyllingsdammer i Norge siden 1970. I tillegg er ikke Dam Nyhellervatn byggematerialet av den "erodible typen" (Figur A5 i Vedlegg A) med en kornstørrelse som er langt mindre enn kornstørrelse i dammene som har erfart større lekkasje.
- For vurdering av konsekvenser, er det benyttet maksimalt antall eksponerte personer. En vurdering som tar hensyn til oppholdstid, antall timer pr døgn eksponering og varslingstid vil redusere estimatet på antall omkomne. En studie gjort av DNV for en steinfyllingsdam i Norge viser at en detaljert analyse av eksponering og varsling reduserer estimatet på antall omkomne med en faktor på 30 til 90% eller mer, hvor det lavere tallet er for tilfellet "uten



varsling" og det høyere tallet for tilfellet "to-timers varsling". Selv om resultatene ikke er direkte anvendbare for Dam Nyhellervatn, et mer realistisk estimat av antall omkomne er muligens mellom 400 (uten varsling) og 30 (med varsling). Dette estimatet er vist med stiplede linje i Figur 6.



Figur 7. Risikoaksept for samfunnsmessig risiko. Øvre: Whitman, 1984; Nedre: Risiko Dam Nyhellervatn (grønn ellipse).

Dam Nyhellervatn kommer ut med meget lave årlige bruddsannsynligheter, og dammen oppfattes som svært trygg. Det er rimelig å spørre om dammen må allikevel oppgraderes. Bør en dam som har stått stabilt i over 40 år oppfylle de samme krav til beregnet sikkerhetsfaktor som en ny dam? Dam Nyhellervatn har stått med dimensjoneringslaster i store deler av sitt liv, og det er ingen stor endring in dimensjoneringslastene i dag. De første 40 år i Dam Nyhellervatn kan oppfattes som fullskala modellforsøk for dammen.

## 9.4 Overvåking

Selv med meget lave årlige bruddsannsynligheter har Hoveddammen store konsekvenser ved dambrudd. Det er derfor viktig å videreføre de gode overvåkings programmene som gjennomføres i dag. Endringer i dammens oppførsel i fremtiden bør følges nøye, og klimaendringer kan påvirke sikkerhetsnivået. Et godt overvåkingsprogram bør ha beredskapsplaner for tiltak, ved uventede hendelser. Det er anbefalt at man vurderer mulige utfordringer i fremtiden og har en plan for hva man bør gjøre hvis disse utfordringene skulle inntreffe.

Resultatene fra analysene vil kunne bidra til dokumentasjon i avgjørelser om hvor man best bør bruke sine ressurser. Risikoanalyser vil også være nyttig som et tilleggsverktøy ved sikkerhetsvurdering og godkjenning av en dam. 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.

Det vil være viktig å bygge et større erfaringsgrunnlag i forhold til gjennomføring og etter hvert sammenligning av sannsynligheter for brudd mellom forskjellige damanlegg. Dette kan videre bidra til en riktigere prioritering av ressurser i forhold til damsikkerhet. Dette gjelder både innenfor et damanlegg, blant E-CO's damanlegg, og også på landsbasis.

## 10 Konklusjoner

Beregningene tilsier at den årlige sannsynlighet for brudd for Dam Nyhellervatn er  $2 \cdot 10^{-6}$  eller lavere. Den årlige sannsynlighet tilsier at et brudd kunne skje to ganger per 1 million år. Det beste estimatet for bruddsannsynlighet er mye lavere enn den rapporterte bruddfrekvensen for fyllingsdammer ellers i verden. Dam Nyhellervatn har en årlig bruddsannsynlighet som er 10 til 60 ganger lavere enn hva tilsier ICOLD-statistikken for dammer i USA.

Den mest kritiske bruddmekanismen er indre erosjon gjennom kjernen. Analyse av indre erosjon viser at kontinuerlig overvåking av lekkasje reduserer betydelig sannsynligheten for at indre erosjon fører til brudd. Overvåkningen hindrer ikke initiering av lekkasje men åpner mulighet for tiltak som bidrar til at indre erosjon ikke utvikler seg videre.

Det ble en svært lav årlig sannsynlighet for brudd forårsaket av flom pga. god flomavledningskapasitet og dermed liten flomstigning.

For Dam Nyhellervatn var det en stor verdi å sammenligne sannsynligheter for brudd for anlegget på Nyhellervatn. Det kan konkluderes med at:

- Flom er ikke et stort problem.
- Lekkasjemåling er kritisk.
- Indre erosjon er mer sannsynlig enn brudd i nedstrøms skråning.

En probabilistisk analyse av stabiliteten av nedstrøms skråning viser, at skråningen, selv med en deterministisk sikkerhetsfaktor noe under 1,5 (den ble beregnet til 1,42), har meget lav bruddsannsynlighet, og at rehabiliteringstiltak ikke trenges for stabiliseringsformål.

Med en beregnet bruddsannsynlighet ved Dam Nyhellervatn på  $2 \cdot 10^{-6}$ /år og de beregnede konsekvensene plasseres Dam Nyhellervatn i sonen med akseptabel/tolerabel risiko, når kriterier fra USACE (2014) benyttes. Det ligger imidlertid flere konservative antagelser bak vurderingene av både årlig bruddsannsynlighet og konsekvenser.

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.

En konklusjon fra vurderingene er at man bør øke instrumentering på dammer i Norge, generelt. 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.

Dammen Nyhellervatn oppfattes som svært trygg, selv med de konservative antagelsene som gir en årlig brudd sannsynlighet på ca.  $10^{-6}$ . Det er rimelig å spørre om dammen bør allikevel oppgraderes. Bør en dam som har stått stabilt i over 40 år og ikke visst noen uønskede hendelser oppfylle de samme krav som en ny dam? Dam Nyhellervatn har stått med sine dimensjoneringslaster i store deler av sitt liv, og det er ingen stor endring i dimensjoneringslastene i dag. De første 40 år i Dam Nyhellervatn kan oppfattes som fullskala modellforsøk for dammen. I tillegg viser dambruddstatistikk at den mest kritiske perioden i livet til en fyllingsdam er de første fem operative år.

## Acknowledgment

NGI takker workshopdeltagerne for deres bidrag til analysene. NGI ønsker også å takke E-Co for tillatelse til å bruke Dam Nyhellervatn i analysen.

## Referanser

- EBL (2003). Stability and Breaching of dams. Report on Sub-Project 1: Shear Strength of Rockfill and Stability of Dam Slopes. Oslo. Publication No. 123-20033. [EBL (Energibedriftenes landsforening) er nå EnergiNorge]
- E-Co Vannkraft (2003). Dambruddsbølgeberegninger Aurlandsvassdraget, utarbeidet av NKV Vandbygningkontoret AS, Offentlig rapport, dokument 21463.doc, Januar 2003.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. og Foster, M. (2015). Geotechnical Engineering of Dams. 2<sup>nd</sup> edition. CRC Press, Taylor and Francis Group. 1348 p.
- 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. (1996). Performance Evaluation, Safety Assessment and Risk Analysis for Dams. *Hydro-power and Dams*. V 6. 3. 8p.
- 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. 2016-06-01.
- NGI (2002). Shear Strength of Rockfill and Stability of Dam Slopes. NGI Report 20011042-1. Oslo. December 2002.
- Norconsult (2013). Dam Nyhellervatn, Aurlandsanleggene, Revurdering av dam og luker, Dokument nr.:5123699\_rev\_nyh\_E01
- Norconsult (2012). Klassifisering, Aurlandsanleggene, Dokument nr.:511971\_kl\_01, revisjon 1, 28. mars 2012.
- NVE (2014). Dammer Nyhellervatn i Aurland kommune. Godkjenning av revurdering av dammer og luker – vedtak, brev datert 12. februar 2014, ref. NVE 201203220-8 tbd/omin.
- USACE (2014). Engineering and Design. Safety of dams – policy and procedures, Department of the Army, ER 1110-2-1156, US Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000, 31 March 2014.
- Vick, S. (2002). *Degrees of Belief. Subjective Probability and Engineering Judgment*. ASCE Press. 405 pp.
- Whitman, R.V. (1984). Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering. ASCE Journal of Geotechnical Engineering. [110 Issue 2 \(Feb. 1984\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:2(143)), pp 145-188.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1984\)110:2\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:2(143))

# Vedlegg A

## NYHELLERVATNDAMMENE

### Innhold

<b>A1 Innledning</b>	<b>2</b>
<b>A2 Bakgrunn</b>	<b>2</b>
A2.1 Nøkkeldata for dammene	2
<b>A3 Nyhellervatn dammene</b>	<b>4</b>
A3.1 Nyhellervatn hoveddam	4
A3.2 Nyhellervatn Sekundærdam I	5
A3.3 Vurderinger og anbefalte tiltak etter revurdering av dam og luker	5
<b>A4 Last og stabilitetsanalyser</b>	<b>8</b>
A4.1 Flomberegninger	8
A4.2 Stabilitetsberegninger	9
A4.3 Bølgeoppskylning	10
A4.4 Drenasjekapasitet og erosjonssikring	10
A4.5 Skredgenererte flodbølger	10
<b>A5 Konsekvensanalyser</b>	<b>10</b>
A5.1 Eksponerte objekter	10
A5.2 Dambruddsbølgeberegninger	11
<b>A6 Instrumentering ved Aurlandsanleggene</b>	<b>14</b>
A6.1 Lekkasjemålesystem	14
A6.2 Målinger av deformasjoner	15
<b>A7 Bilder fra Dam Nyhellervatn</b>	<b>18</b>
<b>Referanser</b>	<b>21</b>

## A1 Innledning

Vedlegget oppsummerer forhold rundt Dam Nyhellervatn. Dokumentet har til hensikt å fungere som en introduksjon og gi nyttig bakgrunnskunnskap til workshopen 'Risikovurdering av Dam Nyhellervatn.

Analysene sikter mot å vurdere sikkerhet og risiko for brudd for Dam Nyhellervatn og å identifisere de mest kritiske bruddårsaker og bruddmekanismer. På workshopen skal deltagerne først enes om hvilke potensielle bruddårsaker og bruddmekanismer som skal analyseres.

## A2 Bakgrunn

Nyhellervatn ligger i Aurland kommune i Sogn og Fjordane og er inntaksmagasin for Aurland III kraftverk, del av E-CO Energis Aurlandsanlegg. Ved fullt magasin dannes et sammenhengende vann som består av Nyhellervatn, Kongshellervatn, Øljuvatn og Volanuttjønnane. Deler av magasinet, inklusive Øljuvatn, ligger i Hol kommune. Nyhellervatn er magasin for Aurland III kraftstasjon. I østre ende av Øljuvatn er det etablert en sperredam. Damanlegget består av en hoveddam, to sekundærdammer, en sperredam (Øljo) og et overløp i betong. Beliggenheten av de ulike damdelene fremgår av Figur A1. Anlegget ble bygget i perioden 1975 - 79.

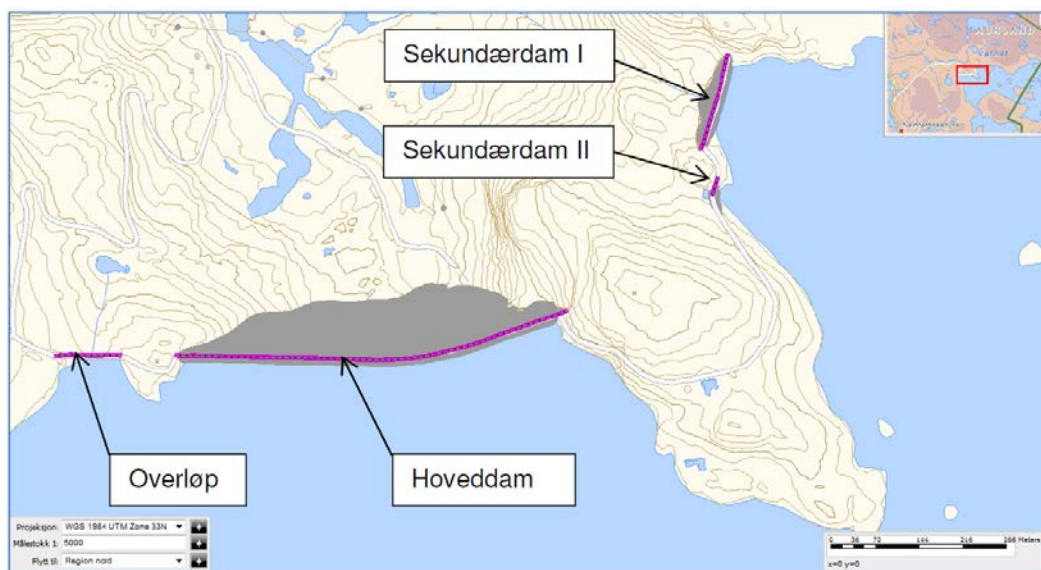
### A2.1 Nøkkeldata for dammene

Nedbørsfelt:	92,9 km <sup>2</sup>
Oppdemmet magasinvolum:	448 mill m <sup>3</sup>
Høyeste regulerte vannstand (HRV):	1438 moh
Laveste regulerte vannstand (LRV):	1364 moh
Damkrone	1442,8 moh
Topp tetning	1439,5 moh
Entreprenør:	Ing. Furuholmen A/S
Kontrollør:	NGI

Nøkkeldata	Hoveddam	Sekundærdam I	Overløpsdam
Damlengde (m)	650	165	70
Største damhøyde (m)	82,5	17,5	Maksimal: 5,3*
Dambredde (m)	250	60	--
Damklasse, KK**	4	3	0

\* Opp til underkant brodekke: 1,9

\*\* Konsekvensklasse

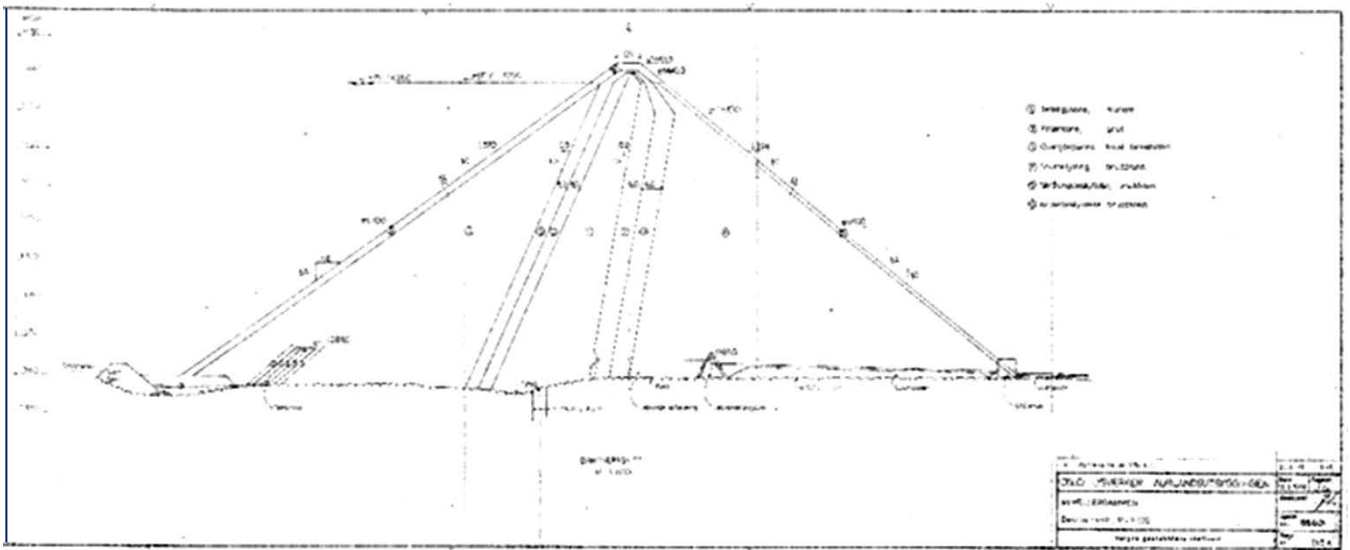


Figur A1. Oversiktskart (øverst) og damanleggene ved Nyhellervatn (nederst) (Norconsult, 2013)

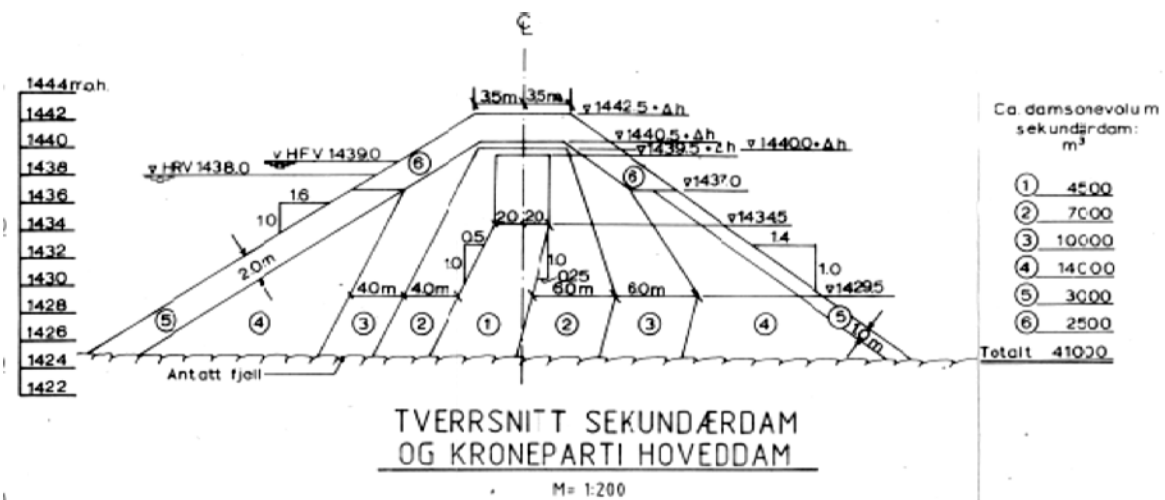
### A3 Nyhellervatn dammene

#### A3.1 Nyhellervatn hoveddam

Dammen er bygget som fyllingsdam med tetningskjerne av morene, filtersoner av grus og overgangssoner av finsprengt tunnelstein. Støttefyllingen er bygd av tunnelstein fra tunneler i Nyheller-området. Vann- og luftside er plastret med stor stein fra steinbrudd i området. Tverrsnitt av dammen er vist i Figur A2.



Figur A2. Tverrsnitt av Nyhellervatn Hoveddam. Dammen har seks soner, 1: tetningskjerne av morene, 2: filtersone av grus, 3: overgangssone av finsprengt tunnelstein, 4: støttefylling av sprengstein, 5: skråningsbeskyttelse, 6: kronebeskyttelse (NGI, 1979).



Figur A3. Nyheller Sekundærdam I. dammen seks soner: 1: tetningskjerne, 2: filtersone, 3: overgangssone, 4: støttefylling, 5: skråningsbeskyttelse, 6: kronebeskyttelse (NGI, 1979).



## A3.2 Nyhellervatn Sekundærdam I

Sekundærdammen er bygget i samme periode som Hoveddammen, dvs. 1975 - 79. Den er, i likhet med Hoveddammen bygget opp av 6 damsoner, som vist i Figur A3. Kornfordeling fra kjerne, filter og overgangsmateriale (sone 1, 2 og 3) er vist i Figur A4.

Figur A5 viser byggeår og  $D_{15}$  i filtersonen for norske dammer, der  $D_{15}$  står for maskestørrelsen (siktstørrelsen) hvor 15% av filtermaterialet passerer. Ved fremstilling av figuren er det de maksimale verdier av  $D_{15}$  som er brukt. Fremstillingen viser at det har oppstått lekkasjer i de fire dammene som har  $D_{15}$  større enn 5mm. 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.

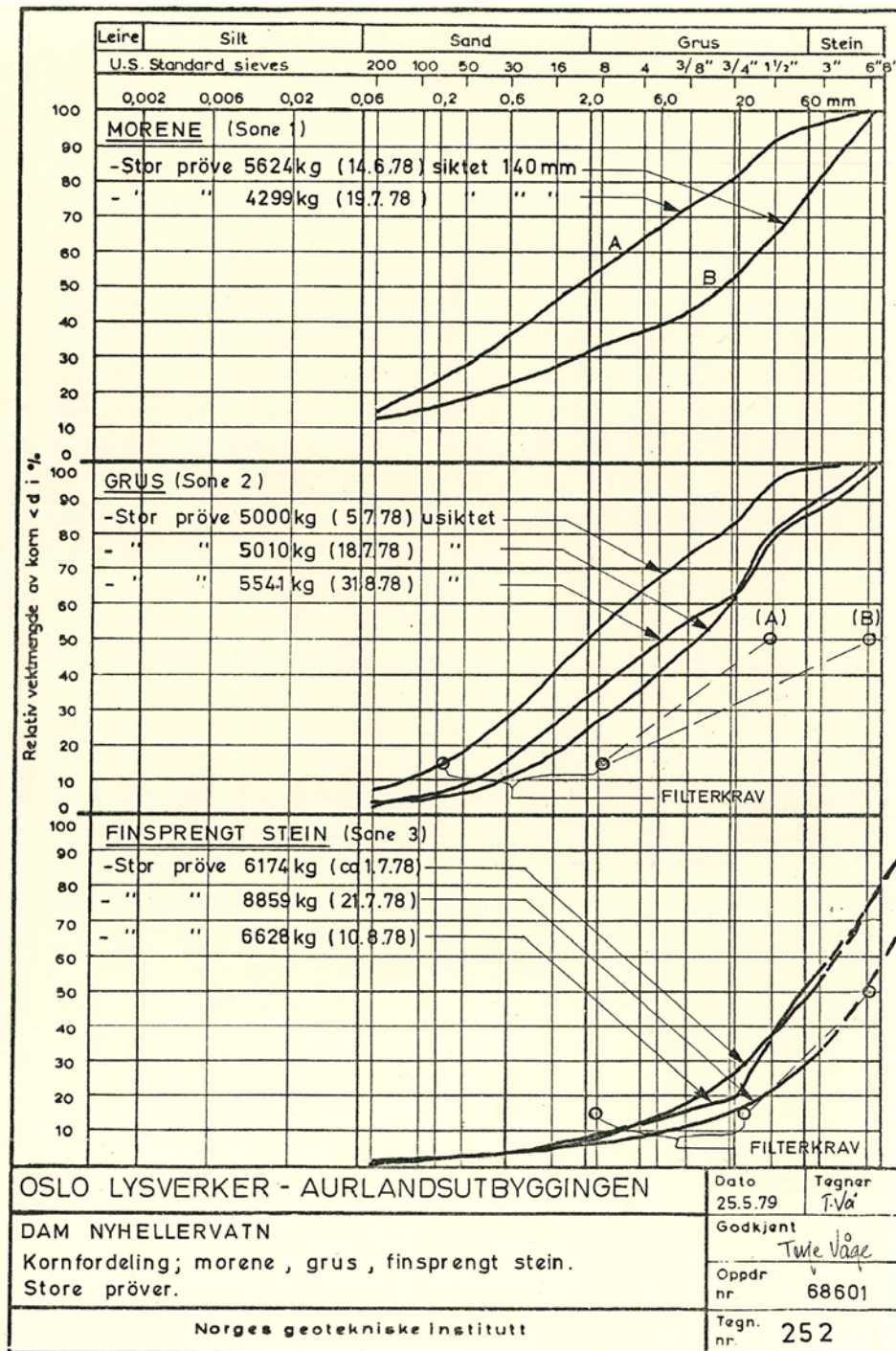
## A3.3 Vurderinger og anbefalte tiltak etter revurdering av dam og luker

Norconsult gjennomførte en revurdering av dammene og lukene ved Nyhellervatn anleggene. Konklusjonen av revurderingen er at dam Nyhellervatn er i meget god stand (Norconsult, 2013). Lukene er generelt i god stand.

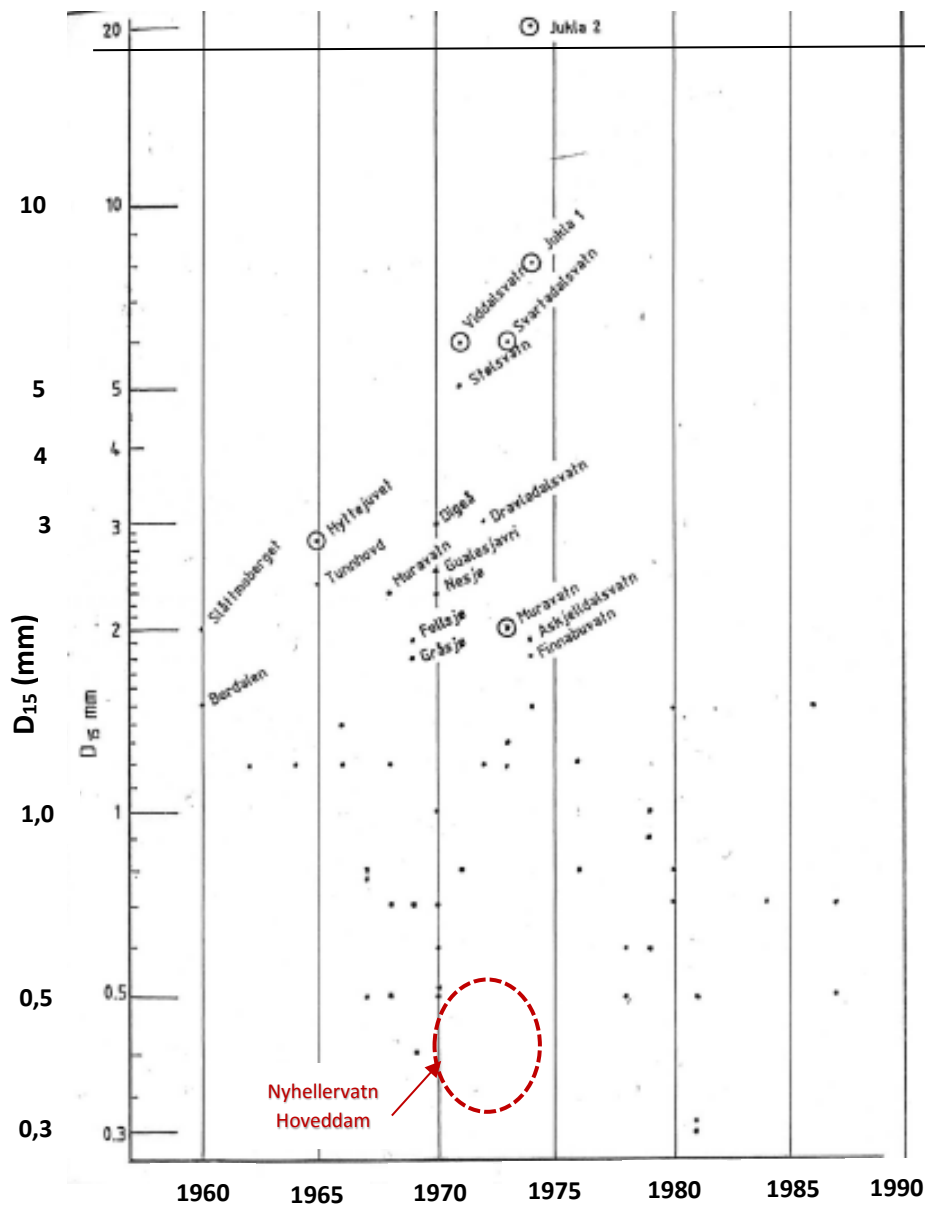
### A3.3.1 Vurdering av dammene

Hoveddam, Sekundærdam I og overløpsdam ble vurdert til å være i meget god stand. Hoveddammen har meget små setninger, liten lekkasje og ingen registrerte skader. Alle dammene tilfredsstillers dagens retningslinjers krav til stabilitet bortsett fra nedstrøms skråning, hoveddam, som ved stasjonær tilstand har en marginalt lavere sikkerhetsfaktor enn gjeldende krav. Noen avvik i henhold til retningslinjene er funnet og listet opp nedenfor, men ingen av disse truer dammens umiddelbare sikkerhet:

- Kronevernet er i følge tegningene kun ført ned til HRV. For dammer i konsekvensklasse 4 (Hoveddammen) tilsier gjeldende krav at kronevernet skal føres ned til 6 m under HRV, mens for dammer i konsekvensklasse 3 (sekundærdammen) og høyere skal det føres ned til 5 m under HRV.
- Fribord ved Nyheller dammene fra HRV opp til topp dam er 4,8 m. For dammer i konsekvensklasse 4 tilsier myndighetenes krav at fribord fra HRV til topp dam skal være på 6 m.
- Nedstrøms skråning på Hoveddammen har ikke tilstrekkelig sikkerhet mot utglidning. Fagansvarlig er av NVE bedt om å utarbeide et notat med mer utførlig omtale av dammens oppbygging, materialbruk, soneinndeling mv. og eventuelt nye beregninger, som avklarer om dammene har tilfredsstillende sikkerhet, NVE (2014).



Figur A4. Kornfordeling for morene (sone 1), grus (sone 2) og finsprengt stein (sone 3) (NGI, 1979).



Figur A5. Dam ferdigstillelsesår mot  $D_{15}$  (i mm) i sone 2 (filter). Små sirkler viser dammer hvor det er observert lekkasje (Kjærnsli, 1992). Rød ellipse indikerer verdiene for Dam Nyhellervatn.

- NVE etterlyser, for Hoveddammens vannside, dokumentasjon av steinstørrelser, hvordan plastringen er utført og eventuelle lokale/mindre skader under vann-nivå. Dette kan som et minimum gjøres gjennom undervannsinnspeksjon med dykker eller mini-ubåt, som inkluderer systematisk foto-dokumentasjon, NVE (2014).
- Det er ikke montert deformasjonsbolter i Nyhellervatn Sekundærdam I. Dette er et krav for fyllingsdammer i konsekvensklasse 3 og høyere.

- Sekundærdam I er ikke utstyrt med et system for lekkasjemåling, hvilket er et krav for fyllingsdammer i konsekvensklasse 3 og høyere.
- NVE (2014) savner også dokumentasjon for vannsideinspeksjon av Sekundærdam I og dokumentasjon og vurderinger av utførelsen og tilstanden til fjellboltene til overløpsdammen.

### A3.3.2 Vurdering av lukene

Generelt er lukene i tilsynelatende god stand. Lukearrangementet oppfyller kravene stilt i damsikkerhetsforskriften mht. styrke og manøvrering (Norconsult, 2013).

Imidlertid tilfredsstillende ikke lukene nødvendig kapasitet for beredskapsmessig nedtapping. Senkehastigheten i magasinet ved HRV og full lukeåpning er beregnet til ca. 0,36 m/døgn. Det tilsvarer en tappekapasitet på ca. 88m<sup>3</sup>/s. Damsikkerhetsforskriften § 5-9 krever en senkehastighet på ca. 1.0 m/døgn som gir et avløp 239,9 m<sup>3</sup>/s inkludert midlere tilsig. Til sammenligning er Q<sub>1000</sub> = 57 m<sup>3</sup>/s og Q<sub>PMF</sub> = 129 m<sup>3</sup>/s. Nødvendig tappekapasitet for å oppnå kravet vil sannsynligvis påføre vassdraget og muligens 3. person betydelig skade. Damsikkerhetsforskriften gir en åpning for reduksjon av senkningshastighet ved store magasiner.

NVE (2014) etterlyser en vurdering av betongkonstruksjonene tilhørende lukene og ønsker at denne bør følge revurderingen av lukene.

## A4 Last og stabilitetsanalyser

### A4.1 Flomberegninger

Flomberegninger for Aurland III ble utført i 2012 av Norconsult og er godkjent av NVE i brev datert 03.05.2012. Aurland III kraftverk er en del av E-CO Energi AS sine vannkraftanlegg i Aurland kommune i Sogn og Fjordane. Området Aurland III omfatter dam Nyhellervatn. Resultater fra flomberegningen er vist i Tabell A1. Verdier som tar hensyn til klimaendringer er vist i Tabell A2. Disse er beregnet ved å legge til et klimapåslag på 20% på tilsiget for Q<sub>1000</sub>.

Tabell A1. Flomberegningen for dam Nyhellervatn (Norconsult, 2012a).

Flom	Tilløp (m <sup>3</sup> /s)	Avløp (m <sup>3</sup> /s)	Vannstand (moh)	Flomstigning (m)
Dimensjonerende avløpsflom (Q <sub>1000</sub> )	111	57	1438,58	0,58
Påregnelig maksimal avløpsflom (PMF)	478	129	1439,00	1,00

Tabell A2. Flomberegninger som tar hensyn til klimaendringer (20% påslag i tilsiget) (Norconsult, 2012a).

Dam Nyhellervatn	Tilløp (m <sup>3</sup> /s)	Avløp (m <sup>3</sup> /s)	Vannstand (moh)	Flomstigning (m)
Dimensjonerende avløpsflom (Q <sub>1000</sub> )	133,33	70,57	1438,67	0,67

## A4.2 Stabilitetsberegninger

Resultater av stabilitetsberegningene er sammenfattet i Tabell A3 for Hoveddammen og i Tabell A4 for Sekundærdam I. Det er gjort beregninger for:

- Stasjonær tilstand, for oppstrøms og nedstrøms skråning, der det er forutsatt at vannstanden i magasinet tilsvarer dimensjonerende flomvannstand (DFV).
- Hurtig nedtapping, for oppstrøms skråning, der det er forutsatt at vannstanden i magasinet tilsvarer laveste regulerte vannstand (LRV).
- Ulykkestilstand, for nedstrøms skråning, der det er forutsatt en stor lekkasje gjennom tetningen i dammen, tilsvarende den dimensjonerende lekkasjen på 10,0 m<sup>3</sup>/s.
- Jordskjelvbelastning, for oppstrøms og nedstrøms skråning, der det er benyttet maksimal bakke akselerasjon på 0,35 m/s<sup>2</sup> for bruddgrensetilstanden (jordskjelv med returperiode på 1/475 år), og 1,0 m/s<sup>2</sup> for ulykkestilstanden (jordskjelv med returperiode på 1/10 000 år). Dette tilsvarer henholdsvis 0,04 og 0,1 av tyngdens akselerasjon (9,81 m/s<sup>2</sup>).

Beregningene viser at Hoveddammens oppstrøms skråning er tilfredsstillende med hensyn til utglidning for alle dimensjonerende lasttilfeller. Ved nedstrøms skråning er det beregnet en sikkerhetsfaktor for en stasjonær tilstand som er marginalt lavere enn myndighetenes krav (Tabell A3). Beregningene viser at Nyhellervatn Sekundærdam I har tilfredsstillende sikkerhet mot utglidninger for alle dimensjonerende lasttilfeller (Tabell A4).

Tabell A3. Resultater av stabilitetsberegningene for Nyhellervatn Hoveddam (Norconsult, 2013).

Lasttilfelle	Beregnet sikkerhetsfaktor (kritisk glideflate)		Krav til sikkerhetsfaktor
	Oppstrøms	Nedstrøms	
Stasjonær tilstand	1,6	1,4	1,5
Hurtig nedtapping	1,4	-	1,3
Ulykkestilstand	-	1,1	1,1
Jordskjelv (ulykkegrense)	1,2	1,2	1,0

Tabell A4. Resultater av stabilitetsberegningene for Nyhellervatn sekundærdam I (Norconsult, 2013).

Lasttilfelle	Beregnet sikkerhetsfaktor (kritisk glideflate)		Krav til sikkerhetsfaktor
	Oppstrøms	Nedstrøms	
Stasjonær tilstand	1,8	1,8	1,5
Hurtig nedtapping	1,8	-	1,3
Ulykkestilstand	-	1,4	1,1
Jordskjelv (ulykkegrense)	1,3	1,5	1,0

### A4.3 Bølgeopp skyling

Det ble gjort beregninger av vindbølger i magasinet. I beregningene ble det benyttet en vindhastighet over magasinet på 30 m/s som kombineres med dimensjonerende flomvannstand (DFV), samt vindoppstuvning.

- Signifikant bølgehøyde ble beregnet til å være 1,32m
- Dimensjonerende oppskylingshøyde er beregnet til 3,04 m.

### A4.4 Drenasjekapasitet og erosjonssikring

Nedstrøms støttefylling skal ha gode drenasjeegenskaper slik at dammen tåler store unormale lekkasjer/overtopping som følge av ulykkelaster eller skade på dammen. For dammer i konsekvensklasse 3 og 4 skal det tåles en lekkasje/overtopping av inntil 10 m<sup>3</sup>/s eller en enhetslekkasje på 0,5 m<sup>3</sup>/s/m. Dam Nyhellervatn tilfredsstiller dette kravet til drenasjekapasitet.

Det er også krav til erosjonssikring. For enhetsvannføring på 0,5 m<sup>3</sup>/s/m og skråningshelning på 1:1,4 blir minimum steinstørrelse for erosjonsbeskyttelse på 0,5 m. Dette er tilfredsstilt ved Dam Nyhellervatn.

### A4.5 Skredgenererte flodbølger

NGI (2003) gjorde en oversiktskartlegging av potensiale for skredgenererte flodbølger i norske dammer. Dam Nyhellervatn er ikke inkludert på listen over de dammene som er identifisert med størst potensiale for skredgenererte flodbølger. Men det at den ikke er identifisert kan også skyldes mangel på data. Vurdering av skredfare og skredgenererte bølger må derfor vurderes separat.

## A5 Konsekvensanalyser

Områdene som blir berørt av dambrudd ved Nyhellervatn dam omfatter bl.a. Sauavaddalen, Øyestølsvatnet, Aurdalsvatnet, Skori, Vassbygdi, Låvi og Aurlandsvangen (Figur A6) (E-CO Vannkraft, 2003).

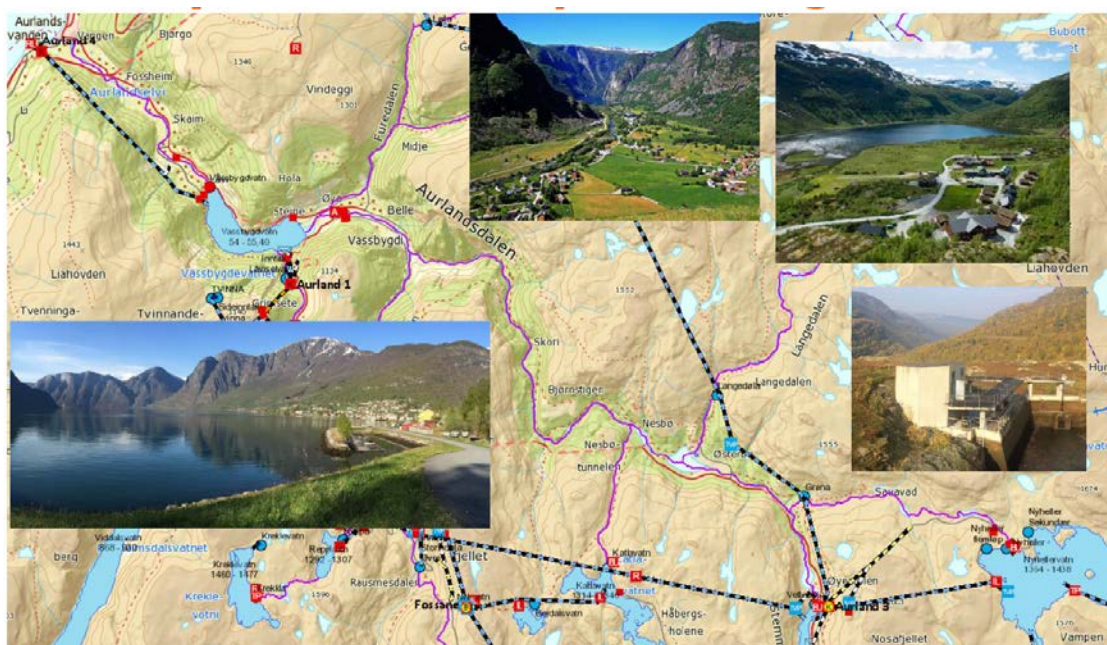
### A5.1 Eksponerte objekter

Antall boligekvivalenter som kan bli berørt av et dambrudd på Nyhellervatn Hoveddam, fordelt på bygningstyper (Norconsult, 2012b):

Boligbygning:	192,2
Industri- og lagerbygning:	2,3
Hotell- og restaurantbygning	19,2
Kultur- og forskningsbygning	23,4

Kontor- og forretningsbygning	6,5
Helsebygning	16,9
Samferdsels- og kommunikasjonsbygning	0,3
Sum boligequivalenter	260,7

I tillegg vil dambruddbølgen berøre deler av Fv50. Dambruddbølgen krysser E-16 i dagen ved Fossheim og fortsetter parallelt med E-16 i ca. 1,8 km. På nordsiden av elven ligger FV 243 og FV 242 som også vil rammes av bruddbølgen.



Figur A6. Eksponerte områder og objekter nedstrøms Nyhellervatn (Foto: E-CO)

## A5.2 Dambruddbølgeberegninger

Det er vurdert to ulike scenarier av dambrudd, E-CO Vannkraft (2003):

1. Middelflom ( $Q_M$ ) i vassdraget og brudd ved rørosjon i dammen
2. 1 000-års flom ( $Q_{1000}$ ) i vassdraget og brudd ved overtopping av dammen.

Resultater av dambruddsanalyser for Nyhellervatn er vist i Tabell A5, samt i Figur A6 og A7.

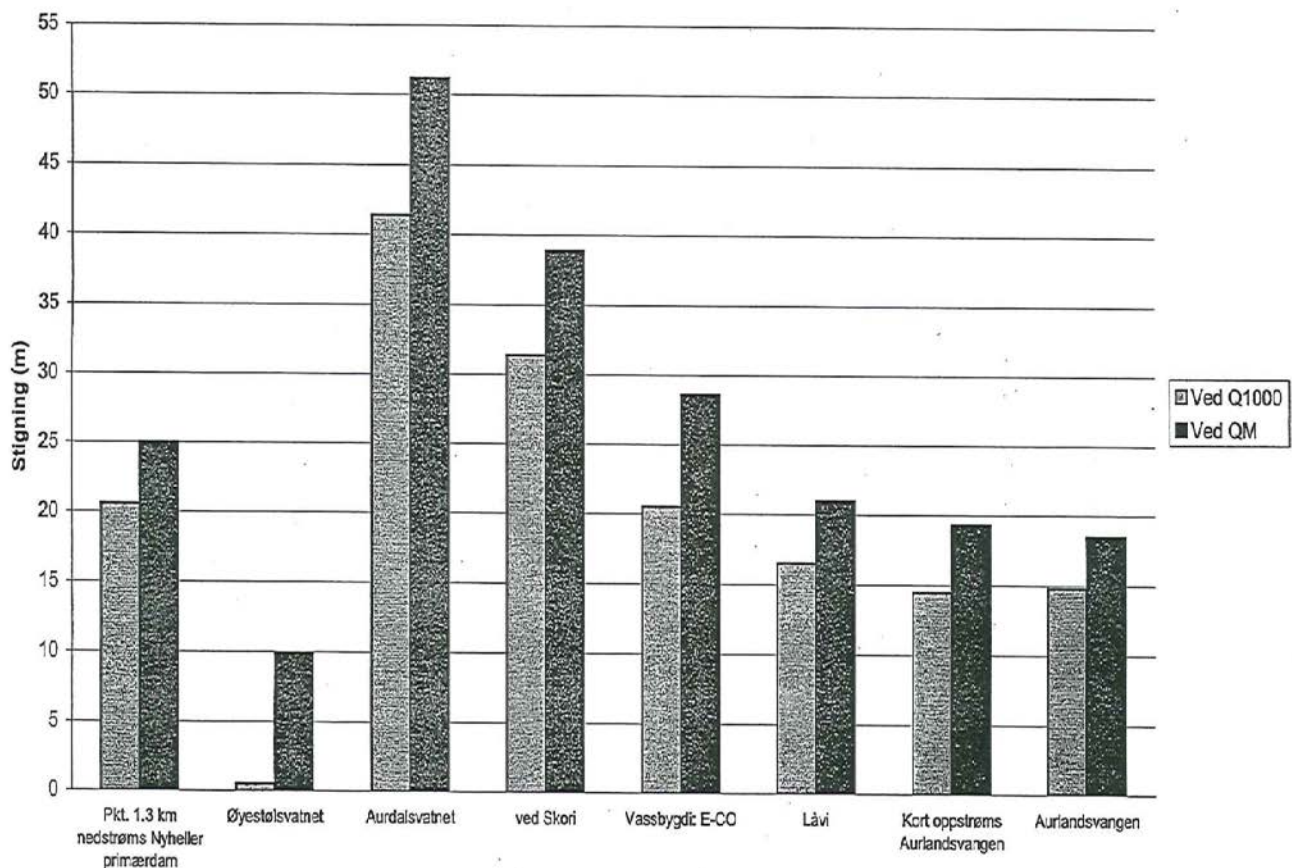
Tabell A5. Maksimal bruddvannføring, dominobrudd og vannstandsstigning ved Vassbygdvatn.

Dam	Bruddvannføring ( $m^3/s$ )	Dominobrudd	Vannstandsstigning ved Vassbygdvatn
Hoveddam	120 000( $Q_M$ )	Nei	30 m
Sekundærdam I	4 000( $Q_M$ )	Nei	2-3 m

Brudd i hoveddammen til Nyhellervatn gir den suverent største dambruddbølgen av dammene i Aurlandsanleggene. Det simulerte rørerosjonsbruddet gir størst vannføring med over 120 000 m<sup>3</sup>/s som kulminasjonsvannføring ut av bruddet. Denne toppen blir dempet til ca. 90 000 m<sup>3</sup>/s etter Vassbygdvatn. Bølgen gir svært store vannstandsstigninger, f.eks. nærmere 30 m ved E-CO's bygg i Vassbygdi (Figur A7). Bølgen transporteres raskt og toppen når fjorden drøye 1,5 timer etter bruddstart eller ca. en halvtime etter at kulminasjonsvannføringen nås i bruddet. Dette tilsvarer en gjennomsnittlig hastighet på bølgetoppen på ca. 80 km/t.

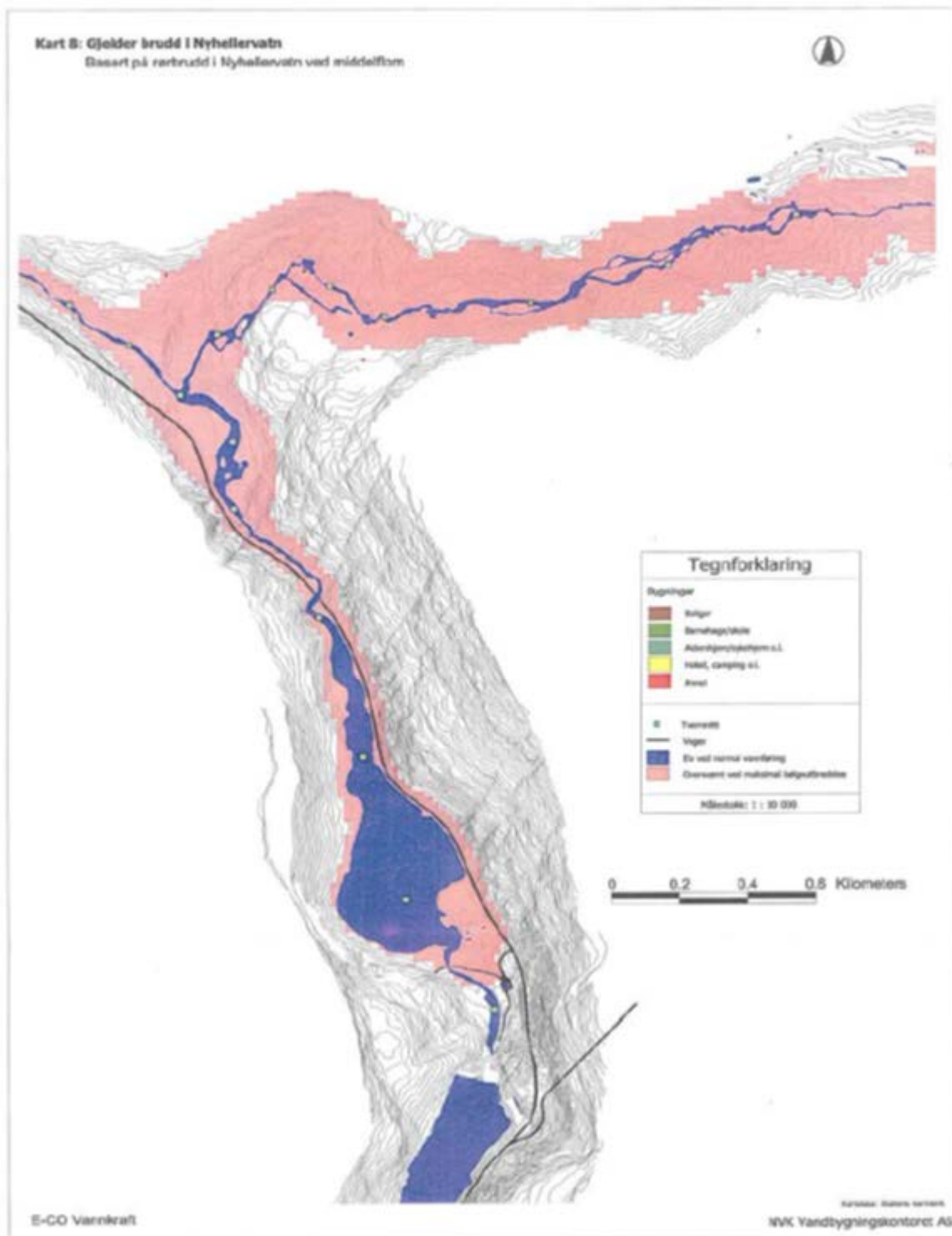
Når bølgen når hovedvassdraget, skylles bølgen opp mot Øyestølsvatn. Overtopping-bruddet i Nyhellervatn Hoveddam er noe mindre enn rørerosjonsbruddet. Vannstandsstigning ved brudd i Nyhellervatn Hoveddam er vist i Figur A7.

Bølgeutbredelse etter dambrudd ved Nyhellervatn Hoveddam for lokasjonen først rammet av dambruddbølgen (ankomsttid 15 min) er vist i Figur A8.



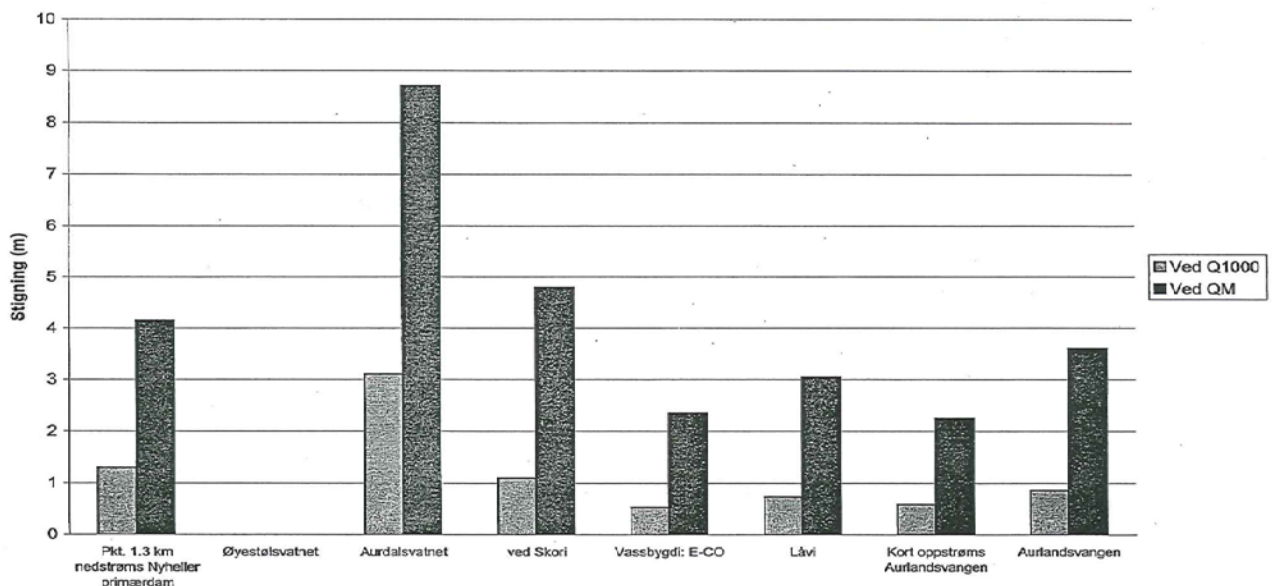
Figur A7. Vannstandsstigning ved ulike lokaliteter nedstrøms ved Nyhellervatn Hoveddambrudd (E-CO Vannkraft, 2003).





Figur A8. Maksimal bølgeutbredelse for Sauavaddalen ved rørbrudd ved middelflom i Nyhellervatn Hoveddam (E-CO Vannkraft, 2003). Bølgen ankommer 15 min etter bruddstart i dette området.

Sekundærdammen gir en anselig bølge ved rørbrudd med kulminasjonsvannføring i bruddet på ca. 4 000 m<sup>3</sup>/s og 2-4 m vannstandstigning fra og med Vassbygdi. Overtoppingsbrudd i sekundærdammen gir en kulminasjonsvannføring på ca. 700 m<sup>3</sup>/s. Brudd i overløpsdammen gir 300 til 400 m<sup>3</sup>/s i kulminasjonsvannføring ut av bruddet og under 1 m vannstandsstigning i Vassbygdi og nedover. Vannstandsendingene ved brudd i Nyhellervatn Sekundærdam I er vist i Figur A9.



Figur A9. Vannstandsendinger ved brudd i Nyhellervatn Sekundærdam I (E-CO Vannkraft, 2003).

## A6 Instrumentering ved Aurlandsanleggene

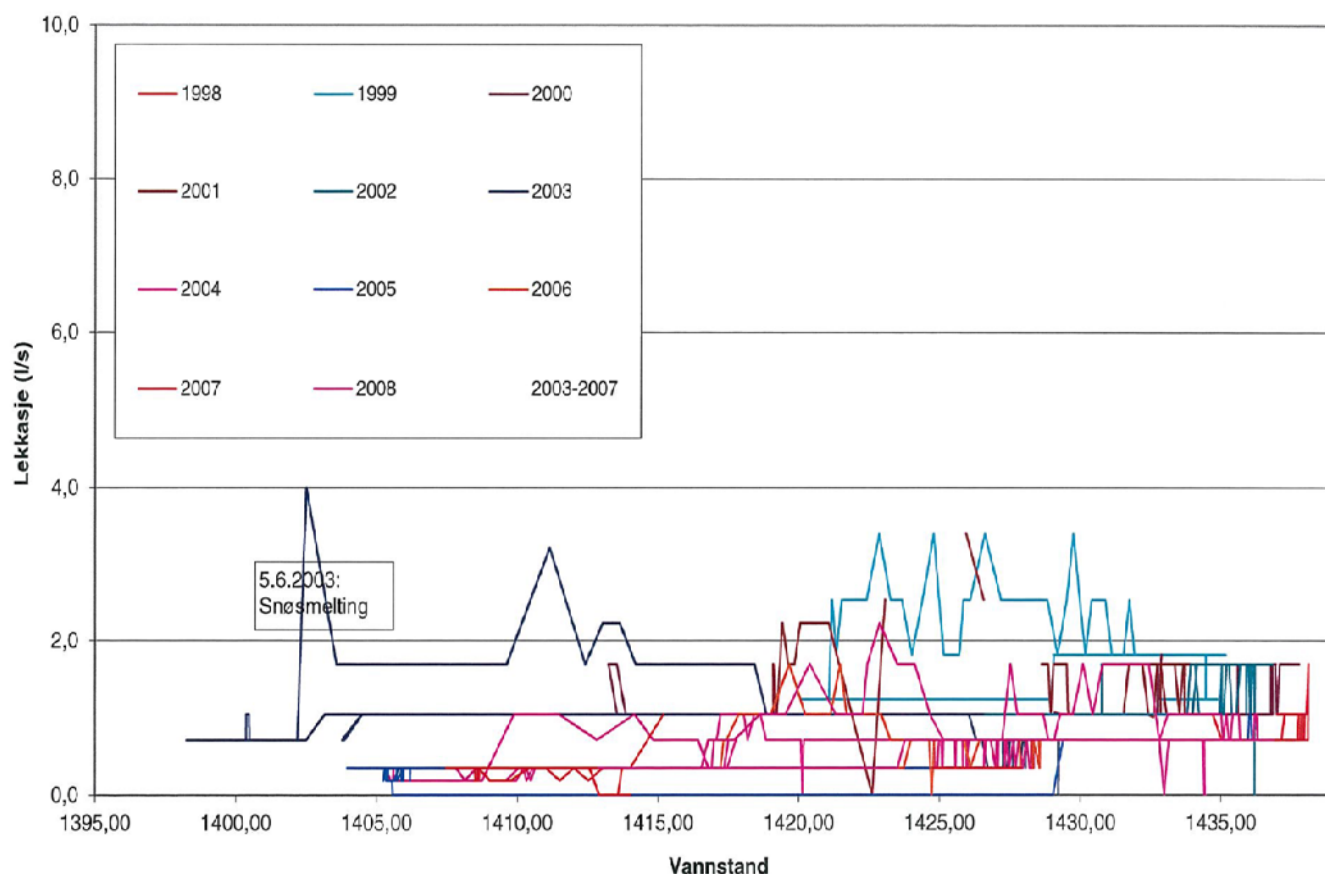
I Hoveddammen er det innebygd instrumenter for måling av poretrykk, innvendig deformasjon og lekkasje. På damkronen og nedstrøms skråning er det et nettverk av målebolter for å registrere forskyvninger og setninger.

### A6.1 Lekkasjemålesystem

Lekkasjemålinger utføres kontinuerlig i målehus på Hoveddammen, der lekkasjen måles over et V-overløp. Lekkasjeverdierne overføres til driftssentralen i Gol. Det er tidligere registrert minimale lekkasjer fra dammen.

Under befaringen ble det målt en samlet lekkasje på 5 cm (tilsvarende 1 l/s) (Norconsult, 2013). Lekkasjevannet var klart og viste ingen tegn til indre erosjon. Registrerte lekkasjemålinger er vist i Figur A10 for perioden 1998 – 2008, samt for 2012 i Figur A11. Det fremkommer av kurvene at gjennomsnittlig lekkasje ved Hoveddammen er på om lag 1 – 2 l/s, maksimalt 3,5 l/s hvis en ser bort fra snøsmelting. Dette er meget lavt sett i forhold til dammens størrelse.

**Dam Nyhellern**  
**LRV: 1364 HRV: 1438**



Figur A10. Lekkasje som funksjon av vannstand i perioden 1998-2008 (Norconsult, 2013).

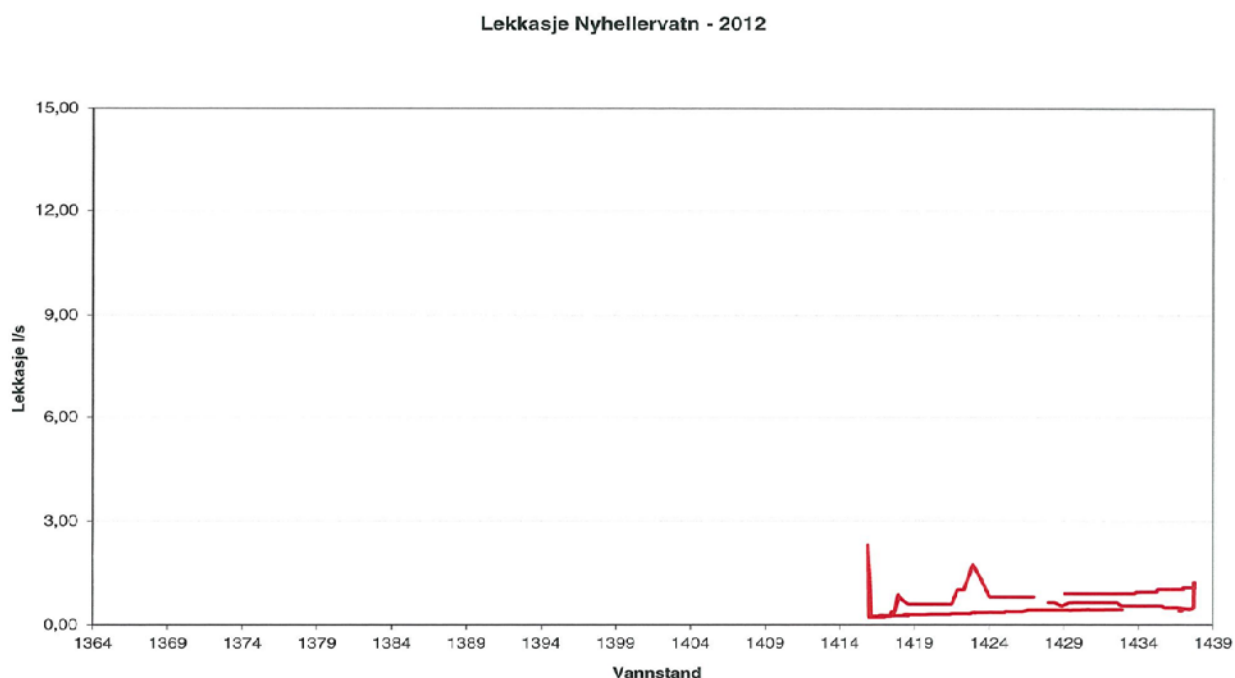
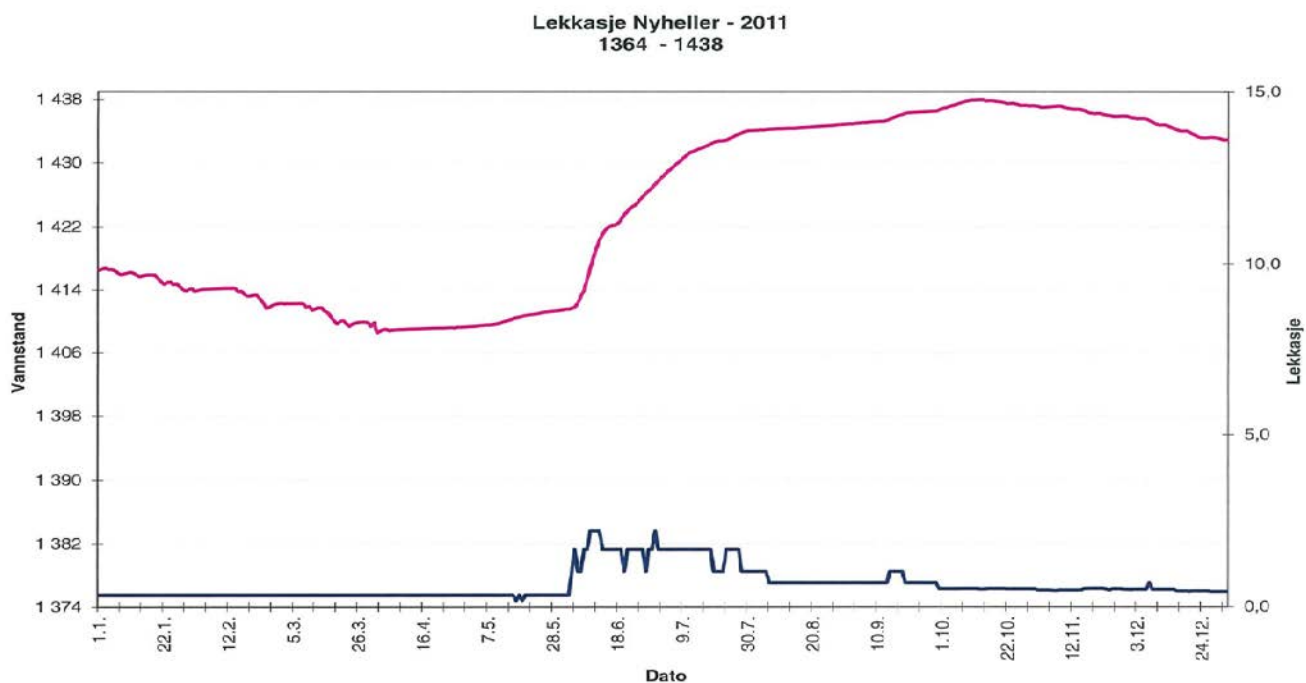
## A6.2 Målinger av deformasjoner

Deformasjoner i dammen er målt vha. deformasjonsbolter. Hoveddammen er meget godt instrumentert med 12 stk. kjernebolter, 82 stk. kronebolter og 152 stk. skråningsbolter. Senteravstand er for kjernebolter 50 meter, kronebolter 12,5 meter og skråningsbolter 25 meter. Vertikal avstand mellom skråningsbolter er 15 meter. Plassering av deformasjonsboltene ved Nyhellervatn Hoveddam fremgår av Figur A12.

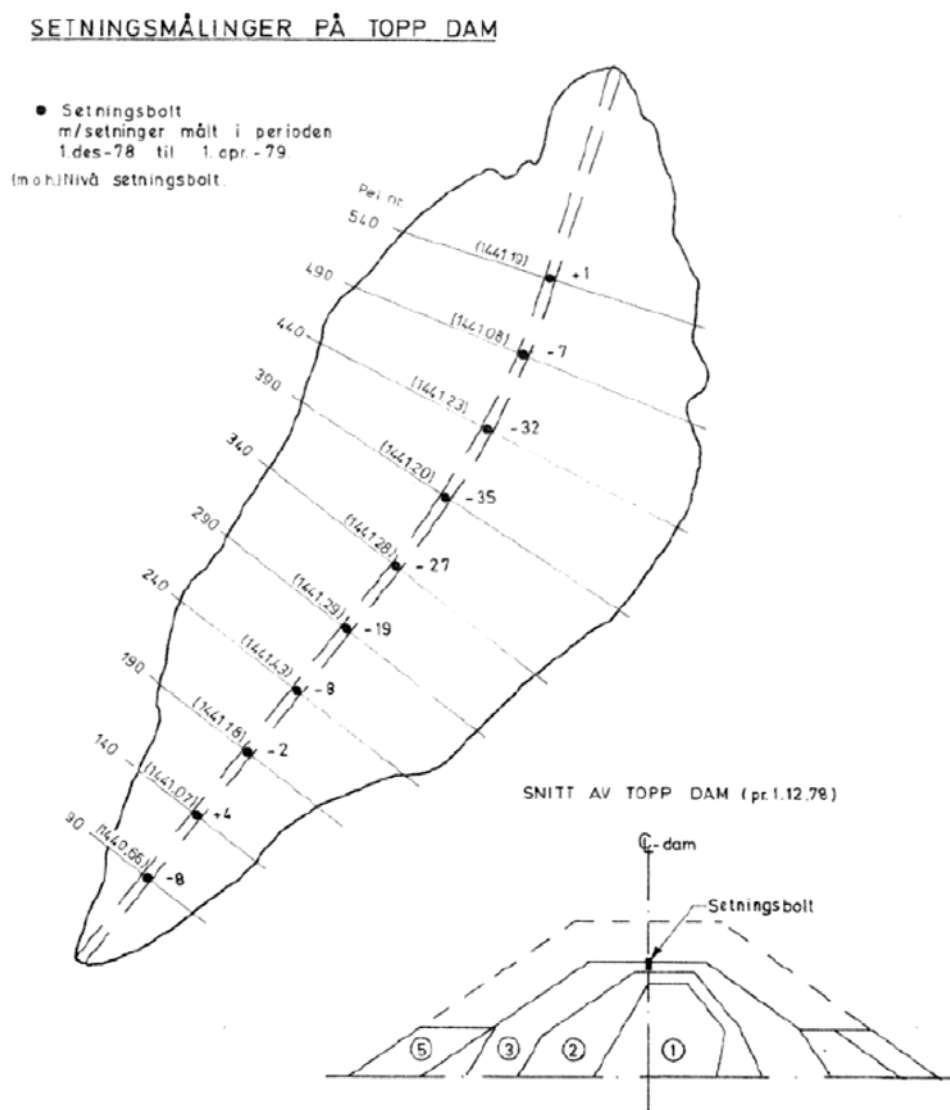
Deformasjoner fra de 12 kjerneboltene (bolt 254 – 265) er registrert hvert år og viser at de årlige setningene de siste 15 årene er i snitt på ca. 1-2 mm. Den største totale setningen i kjerneboltene er ved bolt nr. 261 og er på 172 mm i perioden 1980-2012. Tabell A6 viser de største totale setningene for krone- og kjerneboltene.

Det fremgår av Tabell A6 at setningene viser en avtagende setningstakt. Data er hentet fra E-COs egne registreringer for kjernebolter og Fugro Surveys deformasjonsrapport fra 2008.

Rapporten konkluderer med at setningene avtar i de øverste radene og på damkronen, men øker nedstrøms i de tre nederste radene (Norconsult, 2013). Totalt sett er setningene meget små sett i forhold til dammens størrelse.



Figur A11. Lekkasje i 2012 som funksjon av tid (øverst) og av vannstand (nederst) (Norconsult, 2013).



Figur A12. Plassering av bolter for setningsmålinger på topp dam (NGI, 1979).

Tabell A6 Største totale setninger ved Nyheller hoveddam (Norconsult, 2013).

Sted	Bolt nr.	Periode 1980-1990	Periode 1990-2000	Periode 2000-2008*	Total setning
Oppstrøms kronebolt	185	167 mm	73 mm	34 mm	274 mm
Kjernebolt	261	106 mm	44 mm	22 mm	172 mm
Nedstrøms kronebolt	235	102 mm	46 mm	19 mm	167 mm

\* Til 2012 for kjernebolt nr 261

## A7 Bilder fra Dam Nyhellervatn



*Foto A1. Nyhellervatn Hoveddam (Foto: E-CO)*



*Foto A2. Damkrone Hoveddam (Foto: Norconsult)*



*Foto A3. Rett nedstrøms Nyhellervatn Hoveddam (Foto: E-CO)*



*Foto A4. Nedstrøms skråning ved Hoveddam (Foto: E-CO).*



*Foto A5. Sperredam Ølju (Foto: E-CO)*



## Referanser

- E-CO Vannkraft (2003), Dambruddbølgeberegninger Aurlandsvassdraget, utarbeidet av NKV Vandbyggningskontoret AS, Offentlig rapport, dokument 21463.doc, Januar 2003.
- 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 rapport nr. 904084-1. 22 januar 1992.
- NGI (2003). Tsunami modelling and prediction. Pre-project: Slide-generated waves in reservoirs, NGI report 20031100-1, 30 November 2004.
- NGI (1979). Aurlandsutbyggingen, Geoteknisk sluttrapport ved bygging av Nyhellerdammen 1978-1979, rapport 68601-29, November 1979.
- Norconsult (2013). Dam Nyhellervatn, Aurlandsanleggene. Revurdering av dam og luker, Dokument nr.:5123699\_rev\_nyh\_E01
- Norconsult (2012a). Flomberegninger for Aurlandsanleggene, Aurland III, Dam Nyhellervatn, Dokumentnr. 5111971\_3\_02, revisjon 2, 10. mai 2012.
- Norconsult (2012b). Klassifisering, Aurlandsanleggene. Dokument nr.: 511971\_kl\_01, revisjon 1, 28. mars 2012.
- NVE (2014). Dammer Nyhellervatn i Aurland kommune. Godkjenning av revurdering av dammer og luker – vedtak, brev datert 12. februar 2014, ref. NVE 201203220-8 tbd/omin.



# Vedlegg B

## ANALYSE AV NEDSTRØMS STØTTEFYLLING SKRÅNINGSTABILITET FOR HOVEDDAMMEN

### Innhold

<b>B1</b>	<b>Bakgrunn</b>	<b>2</b>
<b>B2</b>	<b>Analyseparametre</b>	<b>2</b>
	B2.1 Parametre i Norconsults tidligere analyser	2
	B2.2 Friksjonsvinkel i steinfylling	2
<b>B3</b>	<b>Norconsults 2013 stabilitetsanalyser</b>	<b>4</b>
<b>B4</b>	<b>Nye deterministiske analyser (2017)</b>	<b>6</b>
<b>B5</b>	<b>Parametriske analyser (sensitivitetsanalyser)</b>	<b>6</b>
<b>B6</b>	<b>Probabilistiske analyser</b>	<b>9</b>
	B6.1 Metodikk og inngangsparametere	9
	B6.2 Resultater	10
<b>B7</b>	<b>Konklusjoner</b>	<b>17</b>
	<b>Referanser</b>	<b>17</b>

## B1 Bakgrunn

EnergiNorge engasjerte NGI til å vurdere muligheter og avgrensninger for bruk av risikoanalyser for norskedammer. Risikoanalysene ble gjennomført delvis via en "workshop" hvor sakkyndige fra flere instanser ble samlet og bidro til vurderingene. I løpet av workshopen ble det vurdert skråningsstabilitet hadde en del usikkerheter, spesielt med tanke på inngangsparameterverdiene i de allerede gjennomførte deterministiske analyser. Derfor anbefalte NGI, som et tillegg til hendelsestre-analysene, å utføre probabilistisk analyse for å faren og risiko knyttet til mulig utglidning av støttefyllingene oppstrøms og nedstrøms.

Stabilitetsanalyse av både oppstrøms og nedstrøms skråninger har vært beregnet av Norconsult og presentert i Norconsult (2013; 2014) som en del av revurderingen av dammen. Forutsetningene og resultatene fra disse analysene er oppsummert nedenfor og danner grunnlaget for de nyere deterministiske og probabilistiske analysene utført av NGI.

NGIs analyser så på nedstrøms skråningsstabilitet under stasjonær tilstand. NGIs formål var å demonstrere metodikken. Analyser av andre tilstander (ulykke, hurtig nedtapping og jordskjelv) og av oppstrøms skråningsstabilitet er ikke gjennomført.

## B2 Analyseparametre

### B2.1 Parametre i Norconsults tidligere analyser

Tidligere stabilitetsanalyser ble utført av Norconsult i 2004 og 2013 basert på klassiske likevekts betraktninger ved hjelp av programvaren "SLOPE/W" (todimensjonalt beregningsprogram fra GeoSlope) (Norconsult, 2013). Følgene inngangsdata ble benyttet i analysene:

Morene:	$\phi' = 33^\circ$ , $c' = 10 \text{ kPa}$ , $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$
Steinfyllinger:	$\phi' = 45^\circ$ , $c' = 0 \text{ kPa}$ , $\gamma = 20.5 \text{ kN/m}^3$

hvor  $\phi'$  er friksjonsvinkel,  $c'$  kohesjon og  $\gamma$  romvekt.

### B2.2 Friksjonsvinkel i steinfylling

I Nyhellervatn Hoveddam er steinfylling brukt i filtersone, støttefylling, overgangssoner, skråningsbeskyttelse og kronebeskyttelse. Kornform og størrelse for disse fyllingsmassene kan variere.

Friksjonsvinkelen av steinfyllinger reduserer med økende normal effektiv spenning og er avhengig av kvalitet av stein, komprimering, kornform og kornfordeling og angularitet (kantede partikler).

Den mest pålitelige maten for å bestemme  $\phi'$ -vinkelen er å utføre laboratorie- eller feltforsøk. Imidlertid vil man sjelden oppnå et komplett sett av data, og forsøksresultatene må benyttes til å ekstrapolere spenningsnivåene som er relevante for stabilitetsanalysen. Den opprinnelige og grunnleggende friksjonsvinkel-diagrammet fremstilt av Leps (1970), som hovedsakelig baserte seg på resultatene fra treaksialforsøk, er meget nyttig og anvendelig, og ble brukt som kilde for NGIs anbefaling (NGI 2002/EBL 2003). Imidlertid viser forsøksresultater etter 1970 av Leps  $\phi'$ -verdier var for konservative, spesielt for normale effektive spenninger lavere enn 200 kPa. Leps (1970; 1988) foreslo selv at dette kunne være tilfelle, men han hadde få datapunkter å vise til.

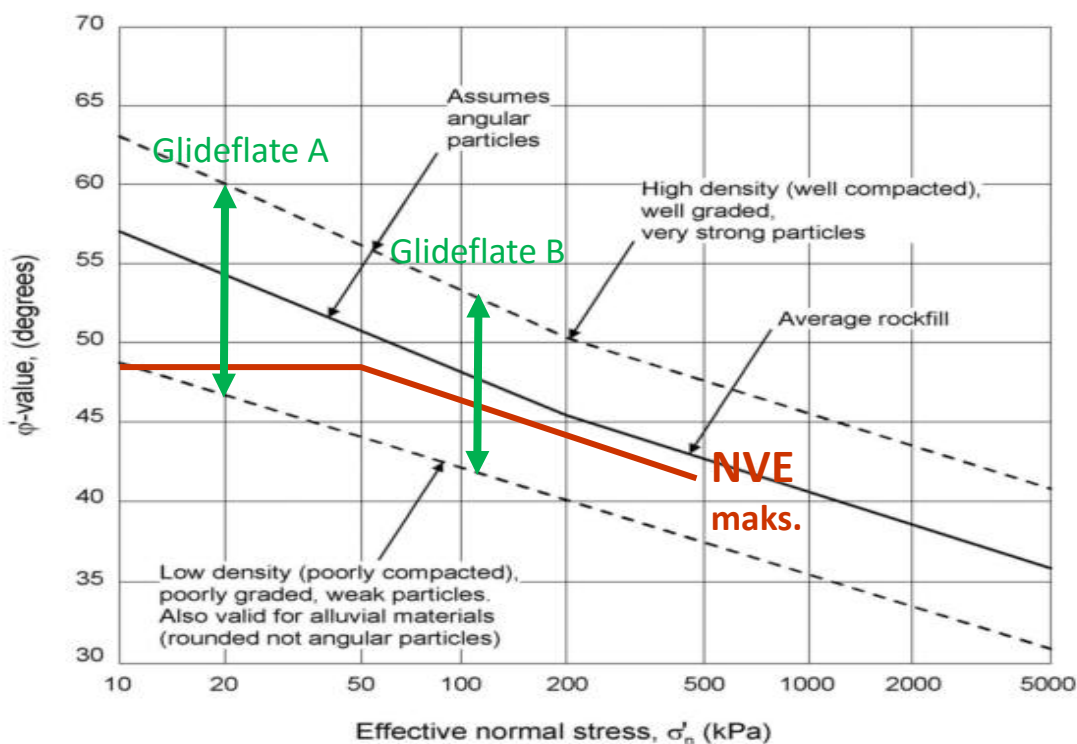
Med få unntak viste alle tilleggsdata presentert i NGI (2002)/EBL (2003)  $\phi'$ -verdier som ligger over linjen for "average rockfill" i Leps diagram, og mange punkter lå over den øvre linjen, spesielt for lave og moderate normalspenninger. Figur B1 reproducerer NGIs anbefaling (NGI 2002/ EBL 2003), for styrke i steinfylling basert på Leps (1970; 1988) og sammenligner disse verdier med NVEs anbefaling, hvor friksjonsvinkel reduseres med økende normal effektiv spenning. Skred i steinfyllingsskråninger går vanligvis ikke dypt sammenlignet med bredden på utglidningslegemet. Glideflaten kan, for eksempel, gå dypt hvis den følger kontaktflaten mot en morenekjerne. Der det forventes at grunne glideflater er de mest kritiske, kan man benytte  $\phi'$ -verdier bestemt ved plane deformasjonsforsøk, og med lave normal effektiv spenning.

Figur B1 viser at under lav normal effektiv spenning ( $\sigma' = 20$  kPa) ligger friksjonsvinkelen mellom  $48^\circ$  og  $60^\circ$ . Under høyere normal effektiv spenning ( $\sigma' = 100$  kPa) er friksjonsvinkelen mellom  $42^\circ$  og  $55^\circ$ . I stabilitetsanalyse, vil friksjonsvinkelen velges avhengig av det aktuelle effektive spenningsnivået på den kritiske glideflaten i nedstrømskråningen.

Steinfyllingene i Dam Nyhellervatn består av knust tunnelstein, bruddstein og grus. Kornform og størrelse for disse fyllingsmassene kan variere mye. Steinfyllingsmaterialet i skråningene til Dam Nyhellervatn er forutsatt til å være av god kvalitet (tunnelstein fra området).

For god kvalitet steinfylling som i Nyhellervatndammen, bør friksjonsvinkelen vurderes i den øvre sjikt av data i Figur B1. I NGIs nye analyser ble det vurdert at steinfyllingsmaterialer i Dam Nyhellervatn har en friksjonsvinkel mellom  $45^\circ$  og  $55^\circ$  når normalspenning er lav ( $\sigma' = 20$  kPa, Glideflate A) og mellom  $40^\circ$  og  $50^\circ$  når normal spenning er rundt 120 kPa (Glideflate B). Disse spenningsnivåer er aktuelle for de skjærflatene som blir vurdert senere i rapporten.

Helningen av nedstrøms skråningen på 1:1.4 er hentet fra gamle tegninger og skanninger av nedstrøms siden. NGI mottok en tegning fra E-CO energi som viser at den bratteste skråningen har en helning på 1:1.4, både på nedstrøms- og oppstrøms side. Dimensjoner og helning av dammen finnes i Vedlegg 5b i Norconsult (2013).



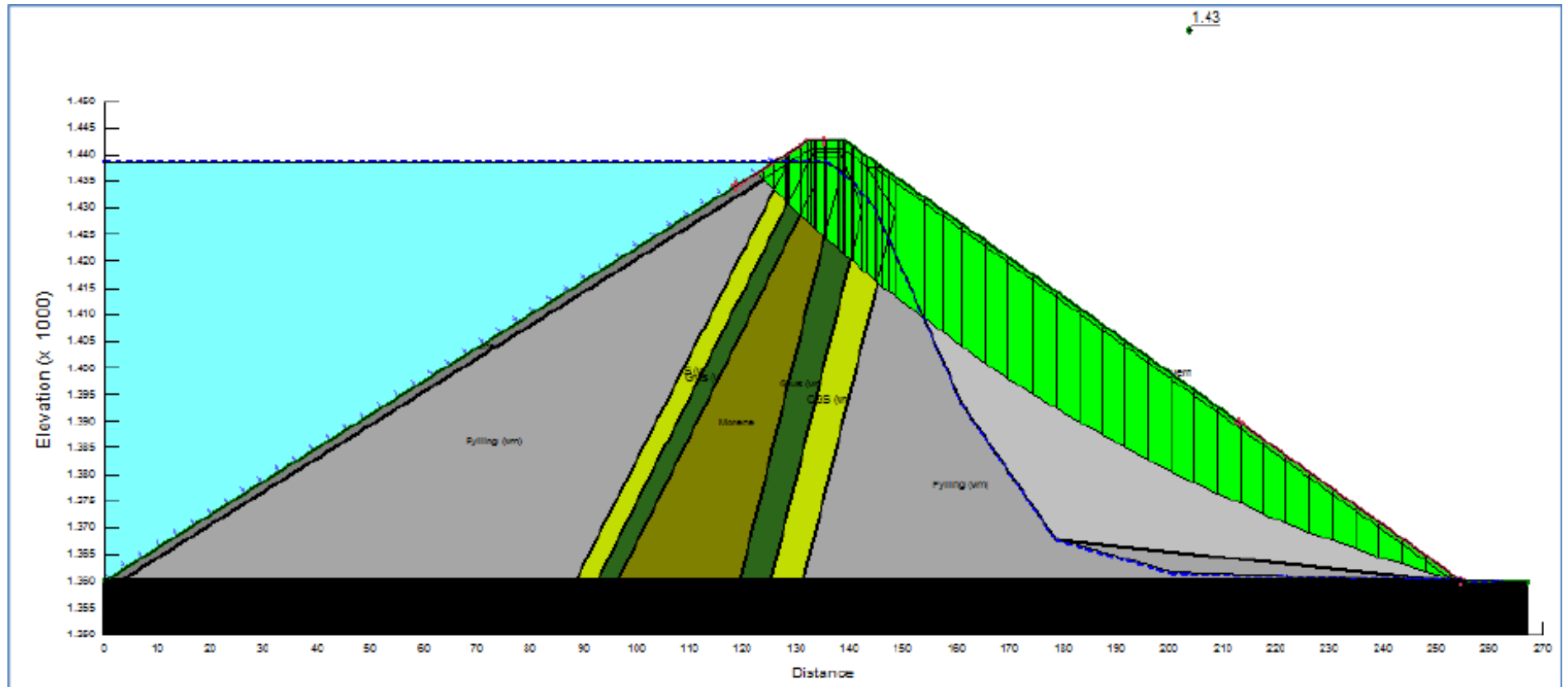
Figur B1. Friksjonsvinkel (sekantverdi) for steinfylling (NGI 2002/EBL 2002) (også Høegs foredrag, Bucuresti, Romania 2009)

### B3 Norconsults 2013 stabilitetsanalyser

Norconsults 2013 stabilitetsberegningene for Nyhellervatn Hoveddam er sammenfattet i Tabell B1. Følgende analyser ble gjennomført

- Stasjonær tilstand for oppstrøms og nedstrøms skråning, der det er forutsatt at vannstanden i magasinet tilsvarer dimensjonerende flomvannstand (DFV).
- Hurtig nedtapping for oppstrøms skråning, der det er forutsatt at vannstanden i magasinet tilsvarer laveste regulerte vannstand (LRV).
- Ulykkestilstand for nedstrøms skråning, der det er forutsatt en stor lekkasje gjennom tetningen i dammen, tilsvarende den dimensjonerende lekkasjen på 10,0 m<sup>3</sup>/s.
- Jordskjelvbelastning, for oppstrøms og nedstrøms skråning.

Norconsults beregningene viser at stabiliteten av oppstrøms skråning er tilfredsstillende for alle dimensjonerende lasttilfeller. For nedstrøms skråning er det beregnet en sikkerhetsfaktor for en stasjonær tilstand som er marginalt lavere enn myndighetenes krav. En friksjonsvinkel på 45 grader ble brukt i steinfyllingen. Figur 2 viser Norconsults mest kritiske glideflate nedstrøms under stasjonær tilstand. Beregnet sikkerhetsfaktor er 1,43.



Figur B2. Norconsults deterministisk analyse av nesdtrøms skråningsstabilitet (Norconsult, 2013)

Tabell B1. Resultater av stabilitetsberegningene for Nyhellervatn Hoveddam (Norconsult, 2013).

Lasttilfelle	Beregnet sikkerhetsfaktor (kritisk glideflate)		Krav til sikkerhetsfaktor
	Oppstrøms	Nedstrøms	
Stasjonær tilstand	1,6	1,4	1,5
Hurtig nedtapping	1,4	-	1,3
Ulykkestilstand	-	1,1	1,1
Jordskjelv (ulykkesgrense)	1,2	1,2	1,0

## B4 Nye deterministiske analyser (2017)

NGI utførte en deterministisk stabilitetsanalyse av nedstrøms støttende fyllingen under stasjonær tilstand. De samme inngangsdataene som Norconsult (Seksjon B2.1) ble benyttet. Parameterverdiene anses som konservative, og vil gi en lavere sikkerhetsfaktor (SF) enn den aktuelle verdien.

Resultatet av NGIs nye analyser viser at den laveste sikkerhetsfaktoren er 1.42 (Figur 3). NGIs kritiske glideflate er grunnere enn Norconsults kritisks glideflate i 2013. Norconsults dypere glideflate vil kunne føre til dambrudd. NGIs grunnere glideflate vil sannsynligvis ikke føre til brudd, med vil forårsake skader på dammen. For Norconsults glideflate B fikk NGI en sikkerhetsfaktor på 1,51 (Figur 4). Figur 3 og 4 viser også poretrykkskonturer og vannflate. NGI vurderte både den grunne Glideflate A og den dypere Glideflate B.

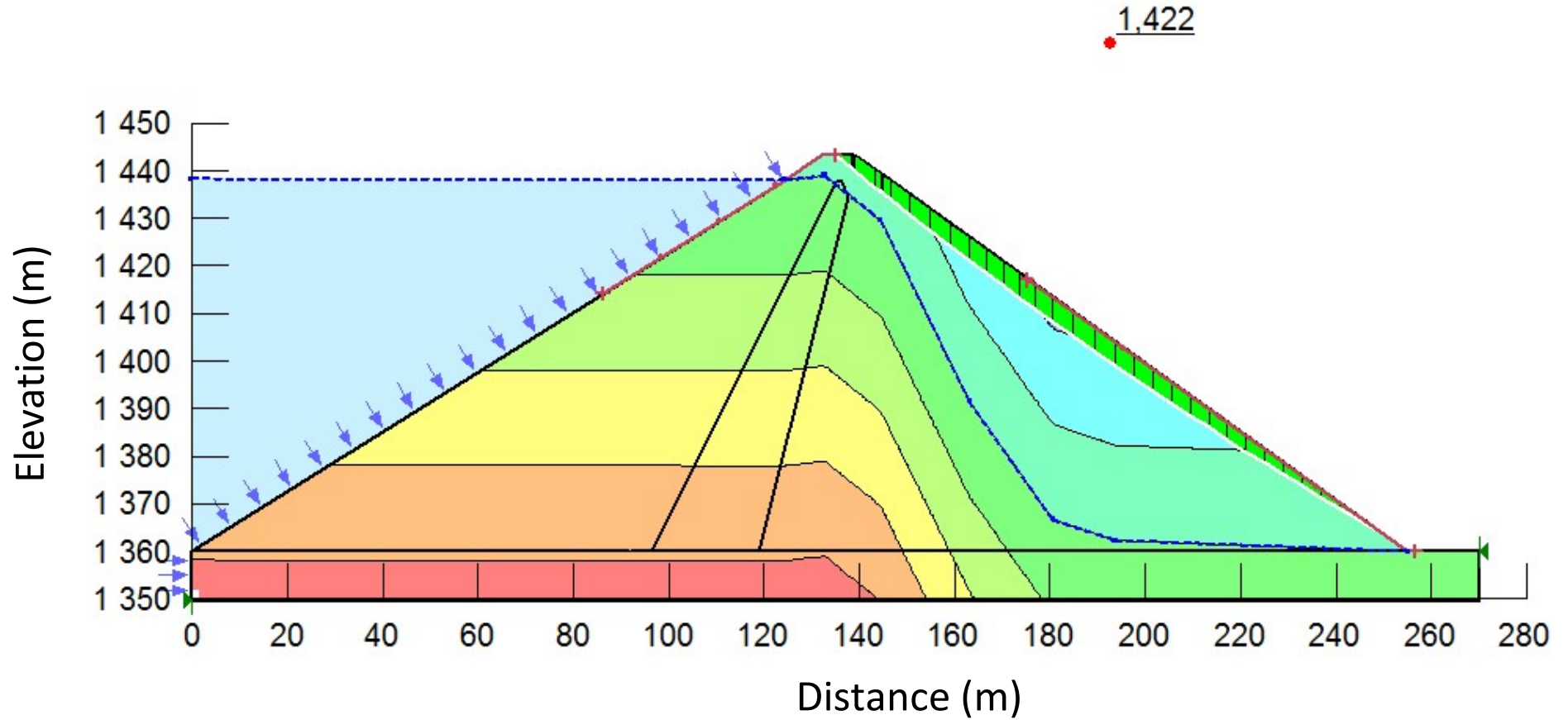
Norconsults parametre (i Seksjon B.2.1) kan anses som konservative og fører til lavere sikkerhetsfaktorer enn hva som anses som aktuelt. NVEs forskrift sier at kohesjon i morene skal settes lik 0. En analyse med null kohesjon i morenen viser til samme resultat som ovenfor fordi de to glideflater i Figur 3 og 4 ikke går gjennom morenen.

Den dypere glideflaten betegnes som Glideflate B og den grunnere glideflate som Glideflate A.

## B5 Parametriske analyser (sensitivitetsanalyser)

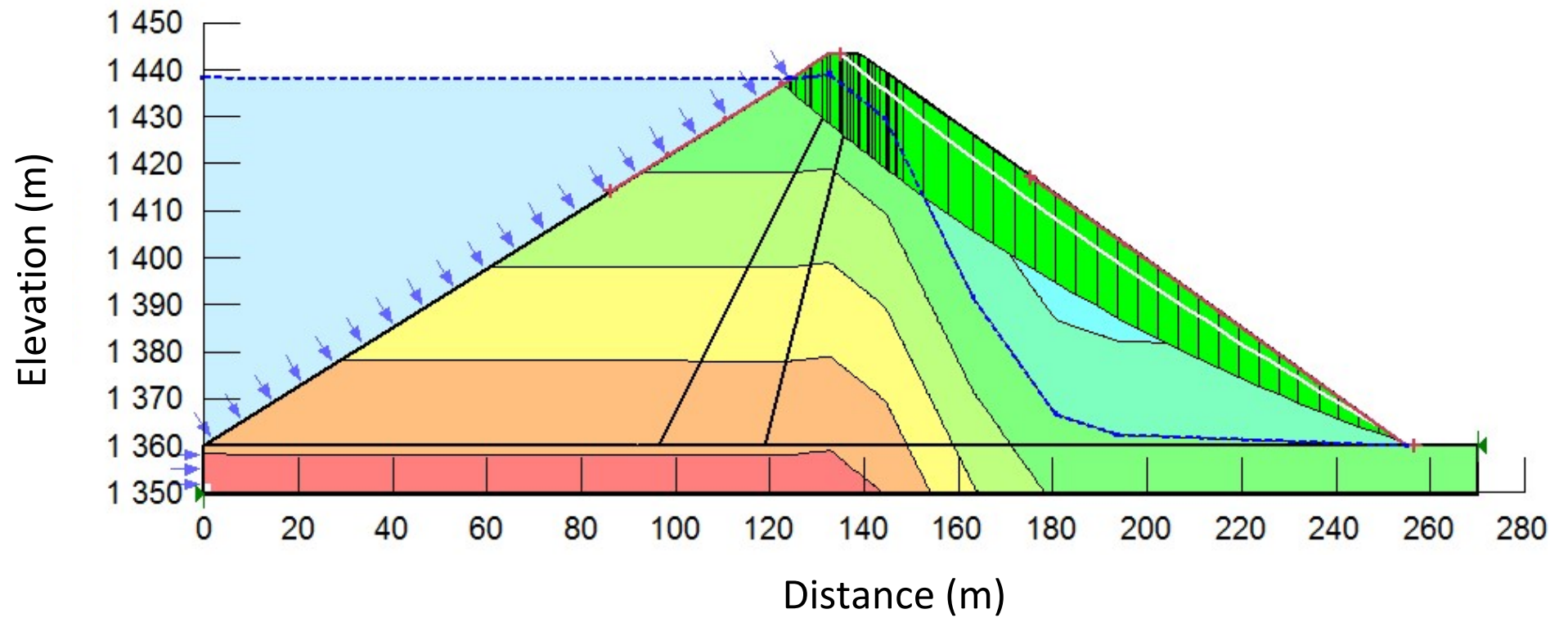
Resultatene av parametriske analyser utført av NGI i 2017 viser at de enkelte inngangsparametre påvirker de to kritiske glideflater forskjellig. Tabell B2 viser parameterverdiene og resultatene av analysene. Minimum og maksimum verdier for friksjonsvinkel i steinfyllingen er 45° og 55° i analyse av grunn glideflate (A), og 40° og 50° for den dypere glideflate B, basert på et forsiktig valg av parametre for de relevante effektive spenninger i Figur 1.





Figur B3. NGIs deterministisk analyse av nesdrøms skråningsstabilitet - Glideflate A har laveste sikkerhetsfaktoren

1,509



Figur B4. NGIs deterministisk analyse av nesdrøms skråningsstabilitet for Glideflate B

Tabell B2. Parametre og resultat av NGIs parametriske analyser

Materiale/ Poretrykks- forhold	Para- meter	Enhet	Snitt- verdi	Tilvekst (5 trinn)	Verdier		FS Glideflate A		FS Glideflate B	
					Min	Max	Min	Max	Min	Max
					Morene	$\varphi$	°	33	2	23
	$c$	kPa	10	2	0	20	1.95	1.95	1.58	1.59
	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	23	0.5	20.5	25.5	1.95	1.95	1.59	1.58
Steinfylling, filter, over- gangssoner	$\varphi (A)$	°	50	1	45	55	1.68	2.29	---	--
	$\varphi (B)$	°	45	1	40	50	---	---	1.35	1.87
	$c$	kPa	10	2	0	20	1.69	2.21	1.51	1.66
	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	20.5	0.5	18	23	1.99	1.92	1.58	1.59
Piezom. linje		m	1438	1	1433	1443	1.95	1.95	1.66	1.48

HRV = 1438 m og HFV = 1439 m

Friksjonsvinkelen i steinfyllingen har den største påvirkningen på sikkerhetsfaktoren for både glideflate A og B. For eksempel, sikkerhetsfaktoren for den grunnere glideflate A øker fra 1.7 til 2.3 for friksjonsvinkelen fra 45° til 55°. Kohesjon i steinfyllingen har også betydelig påvirkning men kun på glideflate A.

Tyngdetetthet for begge morene og sprengstein har liten effekt på sikkerhetsfaktoren. Piezometrisk linje viser betydelig påvirkning på sikkerhetsfaktor for den dypere glideflate B, men påvirker ikke sikkerhetsfaktor for den grunnere glideflate A. Glideflate A ligger utenfor sonen med mettet materialer. Parametriske analysene viser at material parametrene i morene har liten effekt på sikkerhetsfaktor for begge glideflatene, fordi glideflatene krysser ingen eller kun en liten del av morenen.

De parametriske analysene gir et område for verdien av sikkerhetsfaktor for Glideflater A og B. To tilfeller i de parametriske analyser gir sikkerhetsfaktorer lavere enn 1,5 for Glideflate B: når friksjonsvinkelen i steinfyllingen og filteret er antatt på sitt laveste verdi på 40 grader (FS = 1,35) og når poretrykket (piezometrisk linjen) er antatt på sitt høyeste (FS = 1.48).

## B6 Probabilistiske analyser

### B6.1 Metodikk og inngangsparametere

Probabilistiske analyser er utført ved å benytte SLOPE/W (GeoSlope, 2012) og inngangsparametere i Tabell 3. Inngangsparametre er valgt basert på parametrene brukt av Norconsult. Som nevnt er disse inngangsverdier vurdert som konservative og gir noe litt lavere sikkerhetsfaktor enn hva som er aktuelt.

I SLOPE/W verktøyet spesifiserer man for hver usikker parameter en normalisert probabilistisk fordeling som genererer tilfeldige ("random") tall. De tallene genereres innenfor bredden av minimum og maksimum verdier in Tabell B3. Sannsynlighetsfordelingene og minimum og maksimum verdier ble basert på Figur B1 og anbefalingene i Lacasse og Nadim (1996) og Phoon og Kulhawy (1999). Figur B5 og B6 viser eksempler av en lognormal probabilistisk fordeling for friksjonsvinkel i steinfyllingen og normal probabilistisk fordeling for kohesjon, også i steinfyllingen.

Tabell B3. Inngangsparametre for NGIs probabilistiske analyser

Materiale/ Poretrykk- forhold	Parameter	Enhet	Inngangs- verdi	Probabilistisk fordeling			
				Snitt	Standard- avvik	Min - max verdi	Fordeling (PDF)
Morene	$\phi'$	°	33	3	0.5	33 - 40	Lognormal
	c	kPa	10	0	2	0 - 20	Normal
	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	23	0	0.5	20.5 - 25.5	Normal
Steinfylling, filter, over- gangssoner	$\phi'$ (A)	°	45	3	1	45 - 56	Lognormal
	$\phi'$ (B)	°	40	3	1	40 - 51	Lognormal
	c	kPa	0			deterministisk	---
	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	20.5	0	0.5	18 - 23	Normal
Piezometrisk linje	--	m	1438	0	0.5	1435.5-1440.5	Normal

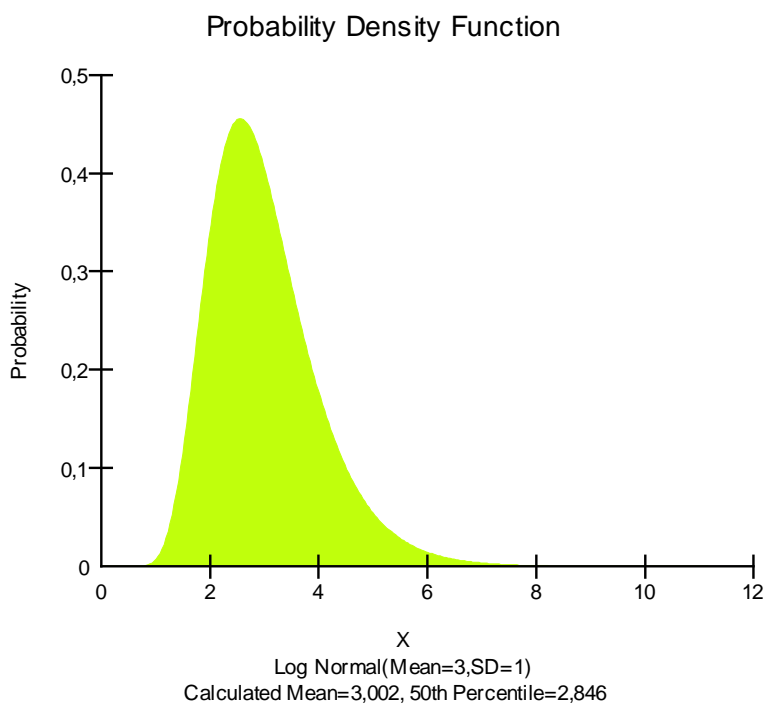
Monte-Carlo simuleringer ble brukt for å analysere bruddsannsynlighet for både Glideflate A og Glideflate B. To forutsetninger ble benyttet i stabilitetsanalysen:

- I Monte Carlo analysene merket 'homogen' er parameterverdiene konstante innenfor hver sone i én simulering, men varierer fra simulering til simulering. Det vil si at hver analyse bruker forskjellige inngangs parametre som er generert tilfeldig ("randomly").
- I Monte Carlo analysene merket 'skiver' varierer parametrene tilfeldig ("randomly") fra skiver til skiver i hver likevekts betraktning simulering.

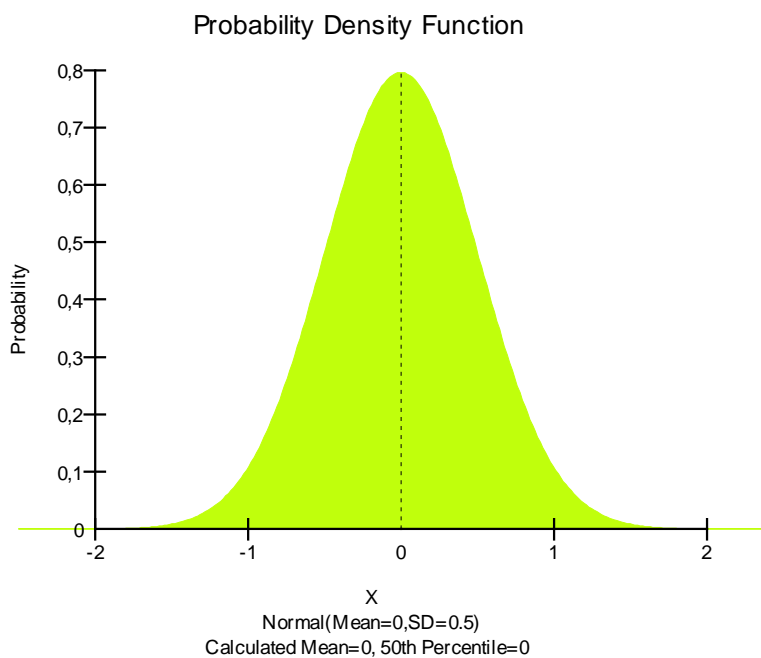
## B6.2 Resultater

Figur B7 til B14 viser kumulative og tetthets fordelingsfunksjon og stolpediagram for sikkerhetsfaktor for Glideflater A og B, basert på 1000 Monte Carlo simuleringer.

Figur	Illustrasjon	Glideflate	Analyse
B7	Kumulativ fordeling	A	'homogen'
B8	Stolpediagram	A	'homogen'
B9	Kumulativ fordeling	A	'skiver'
B10	Stolpediagram	A	'skiver'
B11	Kumulativ fordeling	B	'homogen'
B12	Stolpediagram	B	'homogen'
B13	Kumulativ fordeling	B	'skiver'
B14	Stolpediagram	B	'skiver'



Figur B5. Eksempel på normalisert lognormal probabilistisk fordeling for friksjonsvinkel i steinfylling



Figur B6: Eksempel på normalisert normal probabilistisk fordeling for kohesjon i steinfylling

Resultatene fra Monte-Carlo simuleringene viser at bruddsannsynlighet for nedstrøms skråningen er meget lav for både glideflate A og B og for både "homogen" og "skivet" analysene. Tabell B4 oppsummerer resultatene. Sannsynlighetene baseres seg på en lognormal fordeling for sikkerhetsfaktor, som vist i Figur B8, B10, B12 og B14). Bruddsannsynlighet er høyest for den dypere glideflate B. Den "nominelle"<sup>1</sup> (ikke årlige) bruddsannsynlighet ligger på  $7 \cdot 10^{-7}$  (tilnærmet  $10^{-6}$ ). Bruddsannsynlighet er enda lavere for Glideflate A. Årsaken for at 'skive'-analysen gir lavere standardavvik enn 'homogen'-analyse er at i "skiver"-analyse er det en kompenserende effekt i analysene mellom de skivene med lavere skjærstyrke og skivene med høyere skjærstyrke. De probabilistiske resultatene er oppsummert i Tabell B5.

Tabell B4: Snitt og standard avvik, sikkerhetsfaktor (FS) nedstrøms skråning (1 000 simuleringer)

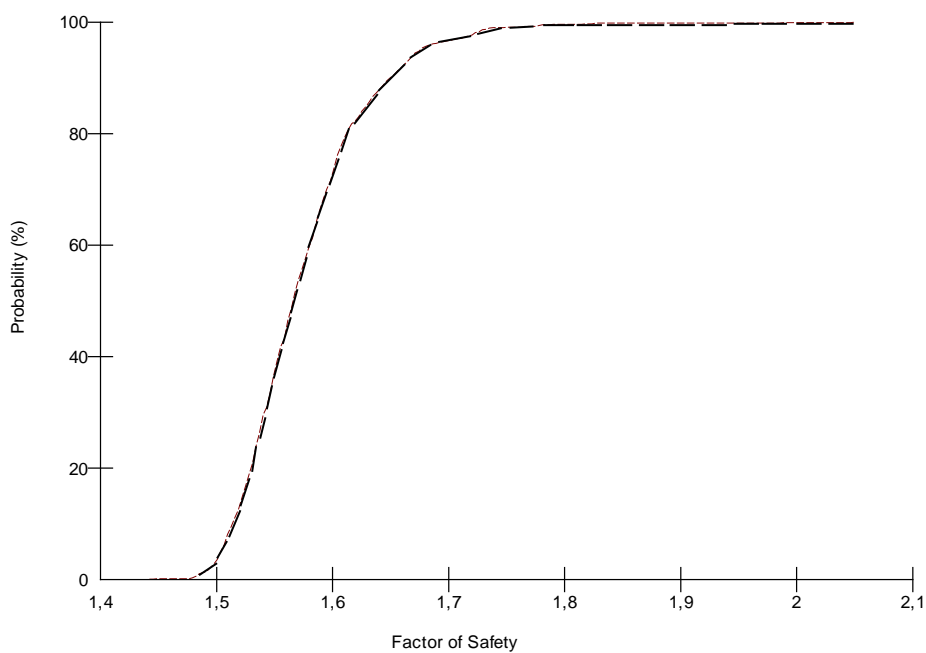
Glideflate og analyse	Snitt FS	Standardavvik FS	Laveste beregnet FS*	Høyeste beregnet FS*	Bruddsannsynlighet $P_f$
A - Homogen	1.58	0.06	1.44	2.05	$< 10^{-7}$
A - Skiver	1.58	0.01	1.54	1.63	$< 10^{-7}$
B - Homogen	1.32	0.05	1.21	1.71	$7 \times 10^{-7}$
B - Skiver	1.32	0.01	1.39	1.37	$< 10^{-7}$

\* Minimum og maksimum FS fra probabilistisk fordelingen med de minimum og maksimum verdier i Tabell B3.

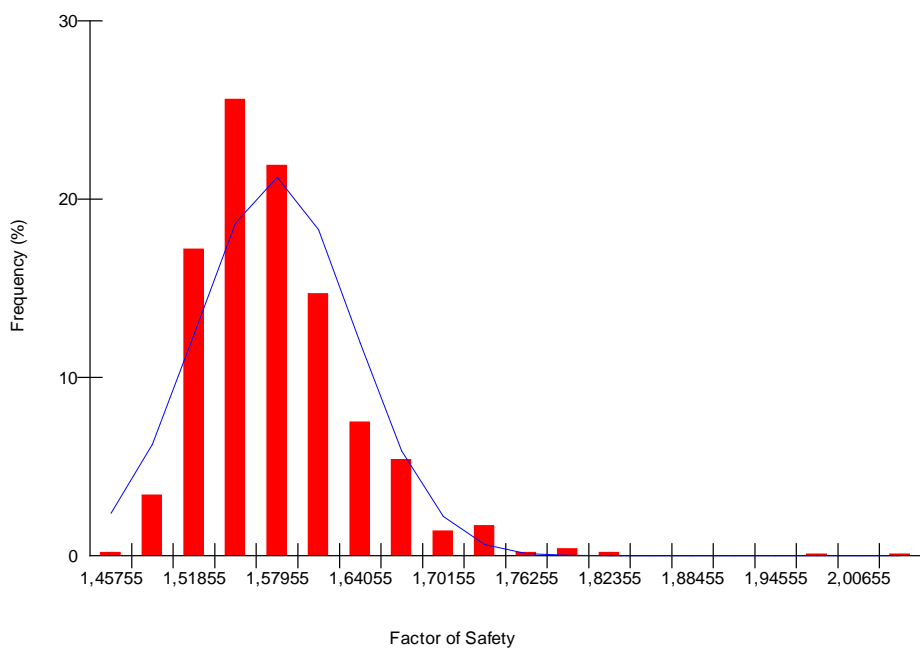
Tabell B5: Resultat fra probabilistiske analysene av nedstrøms skråningsstabilitet

Glideflate	Snitt sikkerhetsfaktor, FS	Bruddsannsynlighet
Grunnere glideflate A	1.58	$P_f < 10^{-10}$
Dypere glideflate B	1.32	$P_f = 7 \cdot 10^{-7}$

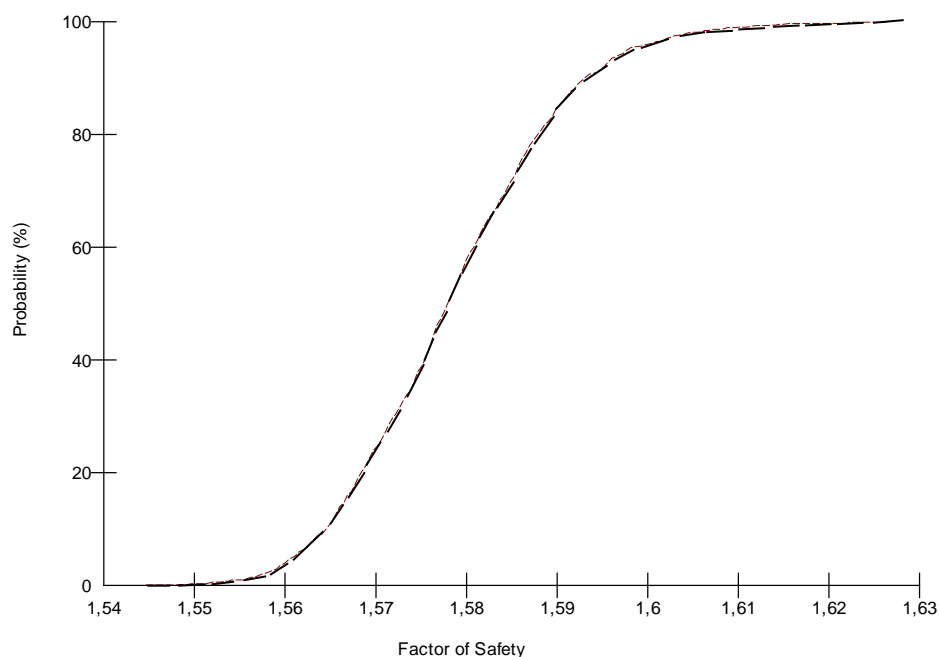
<sup>1</sup> I byggt teknisk forskrift benyttes begrepet «nominell sannsynlighet» om hvor ofte en hendelse kan inntreffe.



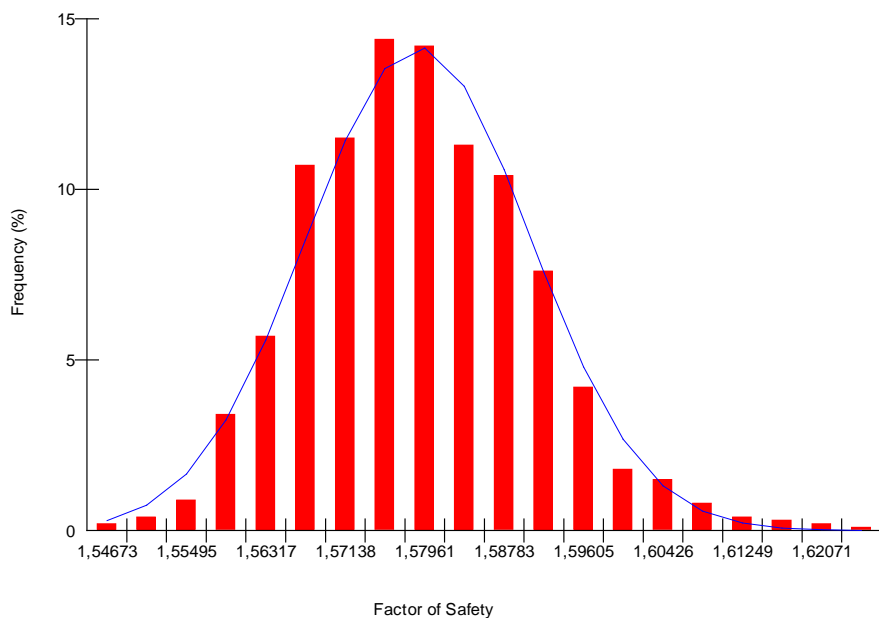
Figur B7. Kumulativ probabilistisk fordeling for sikkerhetsfaktor – Glideflate A ("homogen analyse")



Figur B8. Probabilistiske fordelingsfunksjon for sikkerhetsfaktor – Glideflate A ("homogen analyse")

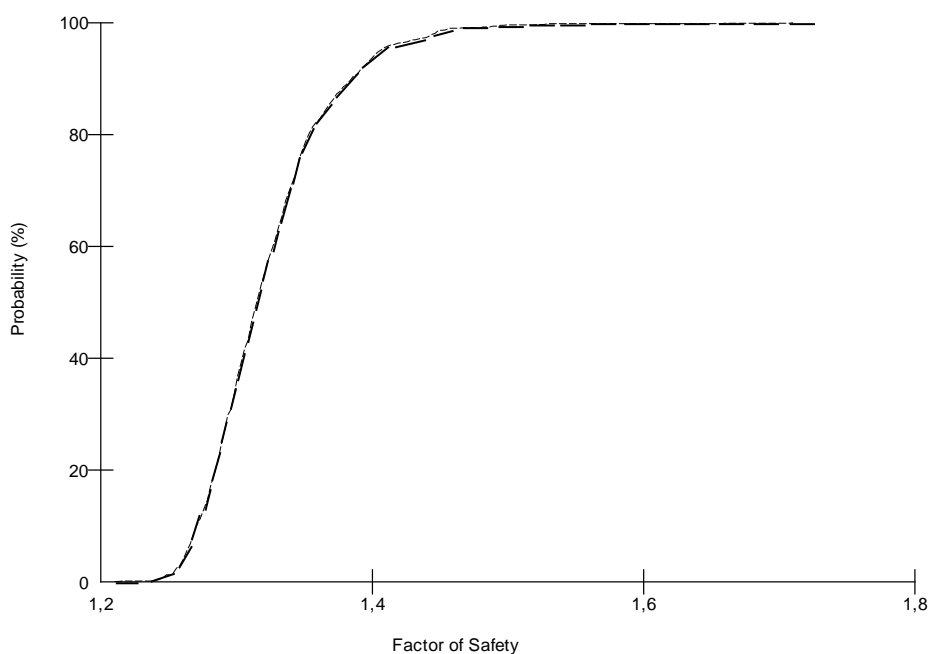


Figur B9. Kumulativ probabilistisk fordeling for sikkerhetsfaktor – Glideflate A ("skive analyse")

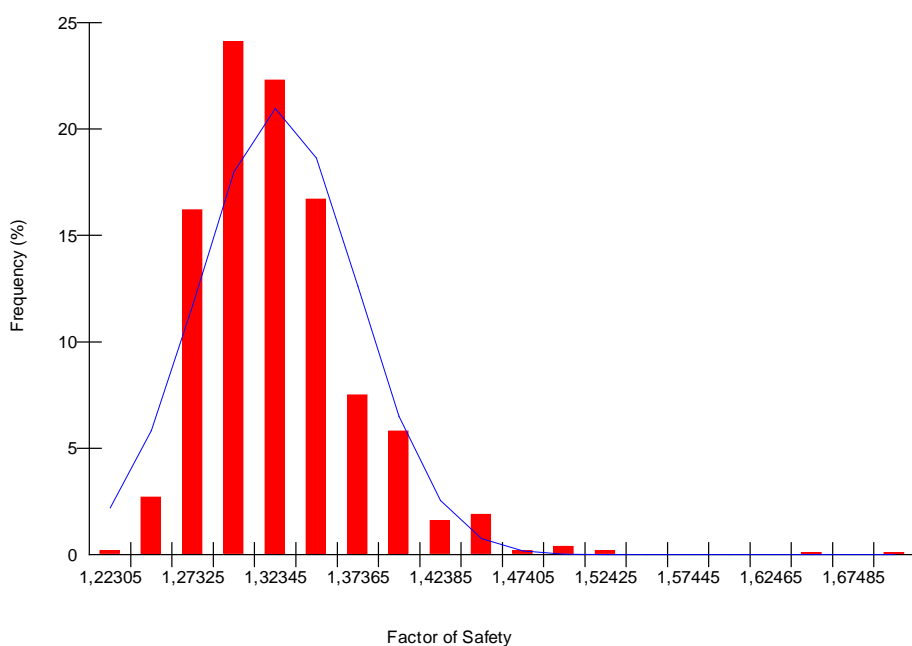


Figur B10. Probabilistiske fordelingsfunksjon for sikkerhetsfaktor – Glideflate A ("skive analyse")

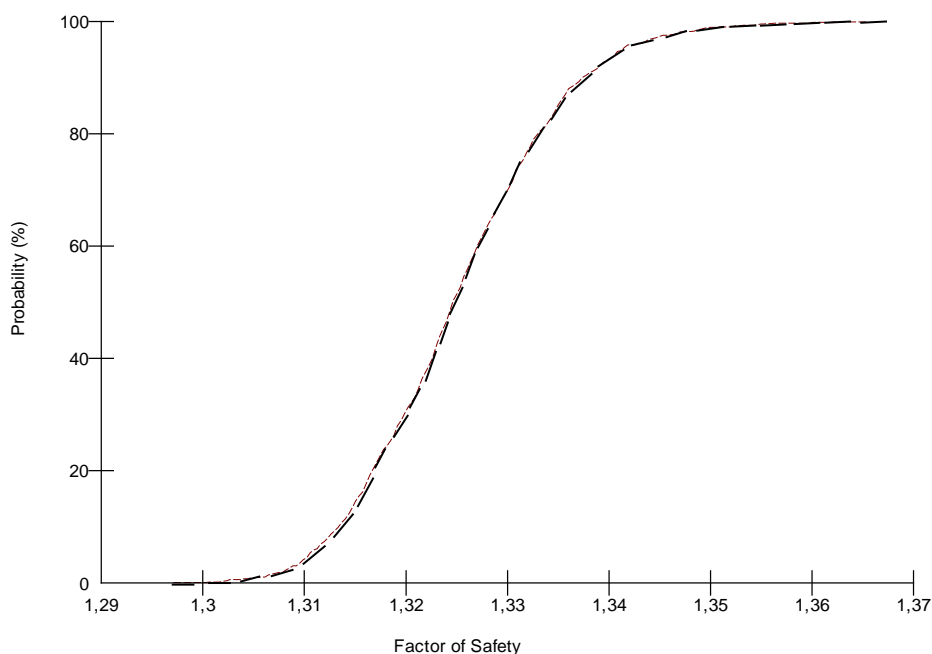




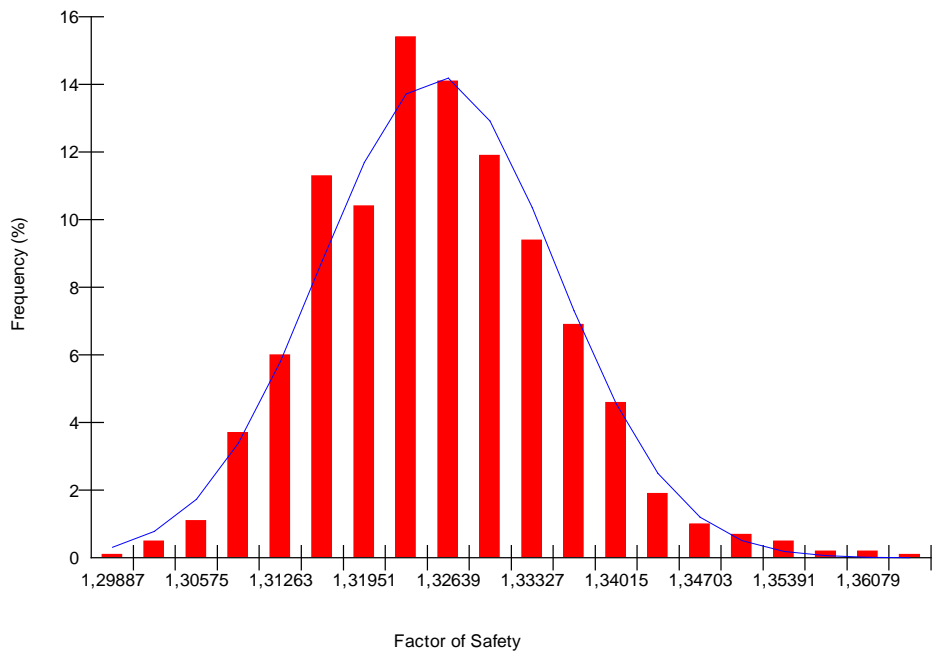
Figur B11. Kumulativ probabilistisk fordeling for sikkerhetsfaktor – Glideflate B ("homogen analyse")



Figur B12. Probabilistiske fordelingsfunksjon for sikkerhetsfaktor – Glideflate B ("homogen analyse")



Figur B13. Kumulativ probabilistisk fordeling for sikkerhetsfaktor – Glideflate B ("skive analyse")



Figur B14. Probabilistiske fordelingsfunksjon for sikkerhetsfaktor – Glideflate B ("homogen analyse")

## B7 Konklusjoner

Deterministiske stabilitetsanalyser av nedstrøms skråningen under stasjonær tilstand på Nyhellervatn Hoveddam viser en sikkerhetsfaktor på 1,42, som er noe lavere enn forskriften på 1,5. Kritisk glideflate er svært grunn inn i skråningen. Sensitivitetsanalyser viser at friksjonsvinkelen i steinfyllingen er den parameteren som påvirker mest sikkerhetsfaktor an nedstrøms fyllingen, og at det er svært få tilfeller i de sensitivitetsanalyser som gir en sikkerhetsfaktor lavere enn 1,5 for nedstrøms skråningen.

Probabilistiske analyser gjennomført med 1000 Monte Carlo simuleringer gir en meget lav nominell bruddsannsynlighet for den mest kritiske glideflate:  $7 \cdot 10^{-7}$ , eller ca.  $10^{-6}$ . Årlig bruddsannsynlighet er desto enda mindre.

Det er observert i flere instanser innen geoteknikk at sikkerhetsfaktor ikke er en god nok indikator for margin til et potensielt brudd. Ofte vil en glideflate med høyere sikkerhetsfaktor ha høyere bruddsannsynlighet enn en annen glideflate med lavere sikkerhetsfaktor. Dette skyldes usikkerhetene i analysene som påvirker bruddsannsynlighet, fordi en deterministisk beregning av sikkerhetsfaktor ikke eksplisitt tar hensyn til usikkerheten ei analysen. En deterministisk sikkerhetsfaktor under 1,5 for eksempel betyr ikke nødvendigvis en høyere bruddsannsynlighet enn en sikkerhetsfaktor på 1,8.

## Referanser

- EBL (2003). Stability and Breaching of dams. Report on Sub-Project 1: Shear Strength of Rockfill and Stability of Dam Slopes. Oslo. Publication No. 123-20033. [EBL (Energibedriftenes landsforening) er nå EnergiNorge]
- Lacasse, S. and Nadim, F. (1996). Uncertainties in Characterizing Soil Properties (Keynote Lecture). *ASCE Geotechnical Special Publication. Uncertainty in the geologic environment: from theory to practice*. Vol 1. 49-75.
- Leps, T.M. (1970). Review of shearing strength of rockfill. *ASCE Journal of Soil mechanics and Foundation Engineering*. 96(4): 1159-1170.
- Leps (1988). Rockfill dams design and analysis. Ch, 12 in *Advanced dam engineering*. Jansen, R.B. (ed). Van Nostrand reinhold. ISBN 0-442-24397-9.
- NGI (2002). Shear Strength of Rockfill and Stability of Dam Slopes. NGI Report 20011042-1. Oslo. December 2002.
- Norconsult (2013). Dam Nyhellervatn, Aurlandsanleggene, Revurdering av dam og luker, Dokument nr.:5123699\_rev\_nyh\_E01
- Norconsult (2012a). Flomberegninger for Aurlandsanleggene, Aurland III, Dam Nyhellervatn, Dokumentnr. 5111971\_3\_02, revisjon 2, 10. mai 2012.
- Norconsult (2012b). Klassifisering, Aurlandsanleggene, Dokument nr.:511971\_kl\_01, revisjon 1, 28. mars 2012.
- Phoon, K., and Kulhawy, F. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*. (36): 612-624.



# Vedlegg C

## BESKRIVELSE AV SANNSYNLIGHETENE I PROBABILISTISKE ANALYSENE

### Innhold

C1 Estimat av sannsynligheter

2

## C1 Estimat av sannsynligheter

For analysene av Dam Nyhellervatn ble sannsynlighetene først estimert ved hjelp av Tabell C1. Denne tabellen gir en verbal beskrivelse (på engelsk, som er språket disse konseptene ble utviklet i, og med en tilnærmet oversettelse til norsk) og sannsynligheten som assosieres med hver av de verbale beskrivelsene. Tabell C1 gir verdiene for det beste estimatet av sannsynlighetene, og baserer seg på tidligere erfaringer, arbeid av Høeg (1996) og Vick (2002) og analyser gjort for tidligere dammer.

IPCC (2012) foreslo at sannsynligheter bør beskrives ved hjelp av et tallområde for å uttrykke usikkerheten tallene er forbundet med, istedenfor for å benytte enkeltverdier som i Tabell C1. Tallområdene foreslått av IPCC (2012) ble diskutert på workshop'en, og verdiene som deltagerne ble enige om, ble brukt videre i analysene.

Tabell C2 presenterer i samme format som Tabell C1 de omforente verdiene som ble brukt på workshop'en. Tallområdene i Tabell C2 vil brukes for Dam Nyhellervatn for å beregne nedre og øvre grense på sannsynlighetene med hendelsestre-metoden, og for å utføre Monte-Carlo simuleringene i forbindelse med Bayesianske nettverks-analysene.

Tabell C1. Estimat av sannsynligheter med enkeltverdier 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 C2. Estimert av sannsynligheter med områdedetall 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





# Vedlegg D

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

### Innhold

<b>D1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>2</b>
<b>D2</b>	<b>Årlig og 'absolutt' sannsynlighet</b>	<b>2</b>
<b>D3</b>	<b>Sannsynlighet for initiering av lekkasje, Dam Dravladalen</b>	<b>3</b>
	D3.1 Tilnærming 1 – statistikk fra alle fyllingsdammer i Norge	3
	D3.2 Tilnærming 2 – statistikk for Folgefonnområdet	4
	D3.3 Anbefalt verdi for hendelsetre-analyse	4
<b>D4</b>	<b>Referanser</b>	<b>5</b>

## D1 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 0,02/år ble brukt i hendelsestre-analysene i Vedlegg E. Estimater er en øvre grense og baserer seg på to tilnærminger som ble gjort for Dam Nyhellervatn.

## D2 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 D1. Selv om alle usikkerhetene er "epistemiske"<sup>1</sup>, 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 D1, 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

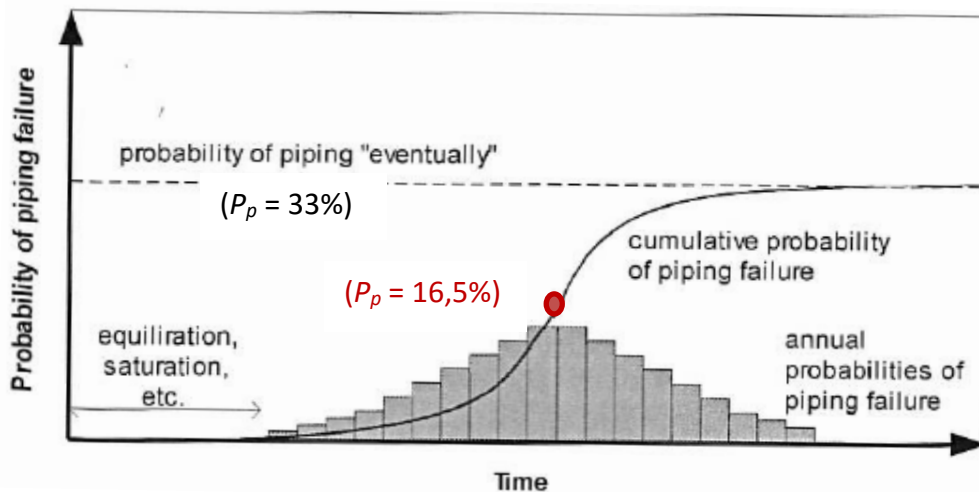
---

<sup>1</sup> 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  $g$ ."

tatt 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 D1, 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 D3 nedenfor.



Figur D1. Tidsavhengig sannsynlighet for indre erosjon i løpet av en dams levetid, gitt en sannsynlighet for indre erosjon på 33% (etter Hartford og Hicher 2015)<sup>2</sup>.

## D3 Sannsynlighet for initiering av lekkasje, Dam Dravladalen

### D3.1 Tilnærming 1 – statistikk fra alle fyllingsdammer i Norge

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

Hvis man antar 1180 steinflingsdammer i Norge, med en gjennomsnitt operasjonstid (inntil nå) på 40 år (1970-2010), og hvis man antar at 40% av steinflingsdammene har hatt initiering av to (2) lokale lekkasjer gjennom kjernen i disse 40 år, kan den årlige sannsynlighet for "lekkasje-initiering" beregnes fra:

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

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

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

<sup>2</sup> Indre erosjon/rørdannelse = "piping" i figuren.

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

## D3.2 Tilnærming 2 – statistikk for Folgefonnområdet

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

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

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

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

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.

## D3.3 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 er 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 D1.

Table D1. 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 D1 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 E og presentert i hovedrapporten, er sannsynligheten for at lekkasje vil oppstå i løpet av en periode på 40 år på ca 50% (med en inngangs-sannsynlighetsverdi på 0,02/år).

## **D4 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. 25<sup>th</sup> ICOLD Congress. Stavanger June 2015. Q. 98.R.20, pp. 305-326.



# Vedlegg E

## HENDELSESTRE-ANALYSER AV DAM NYHELLERVATN I 2017

### Innhold

<b>E1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>2</b>
<b>E2</b>	<b>Hendelsestre-analyser</b>	<b>2</b>
E2.1	Indre erosjon (Figur E1, E2 og E3)	3
E2.2	Lekkasje gjennom kjernen og berg fundamentet (Figur E4)	4
E2.3	Flom (Figur E5)	4
E2.4	Oppstrømstabilitet: Bølge- og is belastning (Figur E6, E7 og E8)	5
E2.5	Jordskjelv (Figur E9)	5
<b>E3</b>	<b>Oppsummering av bruddsannsynlighet</b>	<b>6</b>

## E1 Introduksjon

Det ble utført flere hendelsestre-analyser av Dam Nyhellervatn i workshopen 4. og 5. april 2017. Vedlegg E gir detaljerte resultater i grafisk form for de fem mest sentrale hendelsestre-analysene. De viktigste diskusjonene og konklusjonene er oppsummert i hovedrapporten. Tabell E1 gir en oversikt over de fem analysene. Hendelsestrærne finnes i Figur E1 til E9.

Tabell D 1. Oversikt over hendelsestre-analyser av Dam Nyhellervatn

Hendelse	Figur nr
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 1)	E1
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 2)	E2
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 3)	E3
Lekkasje gjennom kjernen og bergfundamentet	E4
Flom	E5
Oppstrøms skråningsstabilitet under bølge belastning	E6, E7
Oppstrøms skråningsstabilitet under is belastning	E6, E8
Jordskjelv	E9

## E2 Hendelsestre-analyser

Metoden som ble brukt for analysene er kort beskrevet i hovedrapporten. For Dam Nyhellervatn analysene ble tallverdiene, tallområdeverdiene og de verbale beskrivelsene i Vedlegg C for å sette sannsynlighetene for hendelsene som ble vurdert. Sannsynlighetene ble bestemt i konsensus under workshopen.

Hendelsestrærne i Figur E1 til E9 viser hver hendelse og tilhørende sannsynlighet for hver gren i hendelsestrærne. Hvert hendelsestre bruker følgende struktur/semantikk:

- Tabellen ovenfor trærne viser etappene i analysen. Sannsynlighetene i hver etappe gir en begrunnelse i påfølgende tabeller.
- Bruddsannsynlighet for en gren i et hendelsestre er produktet av sannsynlighetene for samtlige uavhengige hendelser langs grenen.
- Hendelseskjeder som resulterer i dambrudd er markert med svart trekant ▲, mens hendelseskjeder som ikke leder til dambrudd er markert med åpen sirkel med ordet STOP.
- Bruddsannsynligheten knyttet til en bruddmekanisme eller bruddårsak i et hendelsestre er summen av sannsynlighetene for hver gren som resultater i dambrudd.

I alle analyser er det den årlige sannsynligheten for brudd som er beregnet. Den totale sannsynligheten for brudd for Dam Nyhellervatn er summen av bruddsannsynlighetene for samtlige mekanismer og årsak.



## E2.1 Indre erosjon (Figur E1, E2 og E3)

Indre erosjon er vanligvis forårsaket av indre lekkasje. Hendelsestre-analyse for tilfellet «indre erosjon» har følgende utvikling: lekkasje finner sted; vil lekkasjen «selv-repareres» («self-healing»)?; vil lekkasjen bli oppdaget?; vil rehabiliteringstiltak være tilstrekkelig og effektive?; vil indre erosjon forårsake "unravelling" av tåa?; vil ustabil tå forårsake en utglidning?; vil synkehull finne sted hvis damtåa er stabil?; vil det være mulig å reparere synkehull?; og til slutt vil dambrudd skje som en følge av enn eller flere av disse hendelsene?

En av de største vanskelighetene med 'indre erosjon' hendelsestreet er å etablere tidvis (daglig, månedlig, årlig) sannsynlighet for "lekkasjeinitiering". Sannsynlighetsestimater på 0.02/år som ble brukt for vurdering av indre lekkasje er basert på erfaring i Norge, internasjonalt og statistiske betraktninger og tilstanden av dam Nyhellervatn som har hatt svært lite lekkasje (Vedlegg D). Dette tallet er konservativt, gitt observasjonene på Dan Nyhellervatn, og kunne godt reduseres til 0.01/år eller enda lavere.

Med en inngangsverdi på 1/50 pr år (0.02/år) flo lekkasje n ble forløpet på hendelsene som kan føre til dambrudd vurdert. Videre var det stor usikkerhet om "selv-healing" eller ikke, så en sannsynlighetsverdier på 0.5 ble brukt. Erfaring med norske dammer bidro til å bestemme, for eksempel, sannsynlighet for "self-healing", oppdagelse av lekkasje (pluss dagens regler om overvåking av lekkasje), og effektivitet av rehabiliteringstiltakene.

Stabilitet av damtåa er avhengig av hvor lang tid det tar fra lekkasje oppstår til den oppdages og om rehabiliteringstiltakene er tilstrekkelige. Dam Nyhellervatn har et godt, kontinuerlig overvåkningssystem, så sannsynlighet for at lekkasjen ikke blir oppdaget er svært lav (estimert 2% (tilsvarende «very unlikely» verbal beskrivelse i Vedlegg C). Når lekkasje blir oppdaget kan rehabiliteringstiltak (f.eks. senkning av magasinet, åpning av bunntappeluke, osv) implementeres. Sannsynlighet for at disse tiltakene er ikke tilstrekkelige ble vurdert som lav, ca. 10%. "Unravelling" av damtåa kan skje men sannsynlighet for ustabil damtåa er mye høyere om lekkasjen ikke er oppdaget. I tilfellet ustabil damtåa, vurderes "utglidning" å være like sannsynlig som "ikke utglidning". I tilfellet av 'stabil damtåa' er dannelse av synkehull mye mer sannsynlig om lekkasjen ikke er oppdaget enn om lekkasjen er oppdaget. Sannsynligheten for at et synkehull ikke kan repareres er høyere for 'ikke oppdaget' lekkasje enn for 'oppdaget' lekkasje. Mer detaljer om tankerekken for hele treet finnes i forklaringstabellen som følger hvert tre. I Figur E1 er det fire grener i hendelsestreet som fører til dambrudd med sannsynligheter mellom  $10^{-7}$ /år og ca.  $10^{-6}$ /år. Summen av bruddsannsynlighetene på de fire grenene er på cirka  $6 \cdot 10^{-6}$ /år.

Figur E2 og E3 viser to andre iterasjoner av indre erosjon mekanismen som ble gjennomført på workshopen. Iterasjon 2 ble gjennomført av en gruppe av nye deltagere på dag 2 av workshopen og som kjente til iterasjon 1. I dette hendelsestreet er sannsynligheten for "utglidning" og "synkehull" inkludert i etappen "destruktiv/ikke destruktiv erosjon". Iterasjon 2 ga en bruddsannsynlighet på  $2 \cdot 10^{-7}$ /år.

Figure E3 (3. iterasjon) viser, etter NGIs vurdering, det mest egnede hendelsestreet for vurdering av indre erosjon på Dam Nyhellervatn. I denne iterasjonen foreslo NGI å øke sannsynlighet for "oppdaget" lekkasje fra 90% (iterasjon 1) til 98% (iterasjon 3) på grunn av det avanserte og kontinuerlig overvåknings- og varslingsystemet på Dam Nyhellervatn. Data ble gjort tilgjengelig ot slutten av workshopen. I tillegg blir sannsynlighet for tilstrekkelig tiltak økt fra 90% (iterasjon 1) til 95% (iterasjon 3) på grunn av det godt beredskapet som er på plass for Dam Nyhellervatn. Iterasjon 3 har bruddsannsynlighet på  $1 \cdot 10^{-6}$  per år.

## E2.2 Lekkasje gjennom kjernen og berg fundamentet (Figur E4)

Under workshopen ble det diskutert om lekkasje og erosjon gjennom oppsprukket bergfundament bør differensieres fra lekkasje gjennom selve dammen (f.eks. gjennom tetningssone, filtersone, overgangssone, støttefylling). Slike hendelser er kjent fra steinfyllingsdammer i Sverige, men det har ikke skjedd dambrudd i Sverige på grunn at dette. Dammen måtte derimot repareres.

Hendelse-analysen har følgende utvikling: lekkasje finner sted; vil lekkasjen reparere seg selv ("self-healing"); vil utvasking av kjernen oppstå; vil sprekkene tettes over tid; vil dambrudd skje. Lekkasje gjennom bergfundament har ikke skjedd i dammens første 40 år. Det ble vurdert at en konservativ sannsynlighet for at lekkasje initieres bør være mindre enn en gang over dammens levetid (100-150 år). Sannsynlighet for initiering av lekkasje og erosjon gjennom oppsprukket bergfundament ble derfor satt på 1%.

Injeksjonsarbeid har blitt utført for dammen, og fjell av dårlig kvalitet har blitt fjernet mellom 10 og 15 m dybde. Hendelsene "ikke self-healing" og "utvasking av kjernen" er usannsynlige, men kunne forårsake store lekkasjer. Sannsynlighet for disse to hendelser ble satt til 5% mens noen mente at disse verdier var for høye. Tetting av sprekkene er nesten like usannsynlig som sannsynlig, og ble derfor gitt en sannsynlighet på 40%. Kun en gren i hendelsestreet fører til dambrudd. Sannsynlighet for dambrudd ble beregnet til  $3,7 \cdot 10^{-7}$  pr år.

## E2.3 Flom (Figur E5)

Hendelsestre-analysen for tilfellet 'flom' har følgende utvikling: flom med en viss-returperiode finner sted; vil fribord bli redusert til nivå som kan føre til betydelig tilstopping av overløp?; vil overløp bli tilstoppet?; vil kjernen blir overtoppet?; vil det føre til skade på dammen og eventuelt dambrudd?

Analysen delte flommens returperioder inn i tre nivåer:  $Q < Q_{100}$  som ikke fører til kritisk flomstigning;  $Q_{100} < Q < Q_{1000}$  hvor det ble vurdert som 5% sannsynlig at fribordet blir mindre enn 6 m; og  $Q > Q_{1000}$  hvor det ble vurdert som 20% sannsynlig for at fribordet blir mindre enn 6 m. Om vinteren kna overløpet bli tettet av is og hardpakket snø, men en slik hendelse er usannsynlig (10%) på Dam Nyhellervatn. Overtopping av kjerne på grunn av tilstoppet overløp kan skje, men er svært usannsynlig (0.1%) fordi sperredammen Øljo vil da fungere som overløp.

To grener i hendelsestreet fører til dambrudd. Dammens bruddsannsynlighet under "flom" er svært lav, og er estimert til  $6.5 \cdot 10^{-9}$  pr år.

## E2.4 Oppstrømstabilitet: Bølge- og is belastning (Figur E6, E7 og E8)

Oppstrømstabilitet på Dam Nyhellervatn kan bli svekket av belastning fra bølgebelastning på sommerhalvåret og fra isbelastning på vinterhalvåret. Etter diskusjon ble det konkludert at sjansen for ustabilitet på oppstrøms side er like stor på grunn av bølge som på grunn av is. Hver gren har derfor sannsynlighet på 50% (Fig. E6). Hendelsestre-analyser for bølge- og isbelastning ble utført separat, men med tilnærmet samme hendelsesforløp (Fig. E7 og E8).

Sannsynlighet for bølge- eller isbelastning som gir høyere enn 1.32 m er veldig lav (ca. 2%). Det ble rapportert under workshopen at Dam Nyhellervatn har allerede blitt belastet med dimensjonerende bølge, og ingen skade oppsto. Derfor ble sannsynlighet for betydelig erosjon på oppstrømside vurdert til svært lav (1%). Det er gode inspeksjonsrutiner som er allerede implementert for dammen. Sannsynlighet for at erosjon ikke oppdages er derfor også svært lav. Erosjonsprosessen mot dambrudd, om det skulle skje, vil ta tid til å utløse ustabilitet. Hvert hendelsestreet har en gren som fører til dambrudd. Samlet bruddsannsynlighet forårsaket av enten bølge- eller isbelastning er på  $10^{-8}$  pr år.

## E2.5 Jordskjelv (Figur E9)

Hendelsestre-analyse under "jordskjelv" har følgende utvikling: et jordskjelv med en maksimum akselerasjon ( $A_{\max}$ ) fører til setninger i damkronen; overtopping kan inntreffe avhengig av setninger og vannstandnivå; slutt dambrudd.

Figur E10 gir det nyeste seismiske kartet for Norge med koordinater for Dam Nyhellervatn. Maksimum akselerasjon («peak ground acceleration», PGA) er estimert fra kartene for forskjellige returperioder.

I analysene ble en maksimum jordskjelvakselerasjon verdi med returperiode på ca 500 år (475 år), eller  $A_{\max} = 0.15g$ , brukt. Setninger i damkronen mindre enn 2.3m var ansett som ikke kritiske, men overtopping kunne skje for setninger større enn 2.3m. Om overtopping skjer er avhengig av om både damkronesetning og vannstand i magasinet under jordskjelvet. Om jordskjelvet fører til setninger er større enn 4.5 m er overtopping sannsynlig (70%). Om vannstanden er høyere enn HRV ('høyeste regulert vannstand') kan overtopping også skje ved setninger mindre enn 4.5m. Mer detaljer om tankerekken for hele treet finnes i forklaringstabellen som følger hvert tre. To grener i hendelstreet fører til dambrudd. De to grenene har en sannsynlighet for brudd på  $7 \cdot 10^{-8}$  pr år og  $2 \cdot 10^{-7}$  pr år. Årlig bruddsannsynlighet for Dam Nyhellervatn under jordskjelv er dermed  $2.7 \cdot 10^{-7}$ .

## E3 Årlige bruddsannsynlighet

Den årlige bruddsannsynlighetene beregnet ovenfor for hendelsestrærne i Figur E1 til E9 er oppsummert som "best estimat" i Tabell E2.

Analysene ble også gjennomført med "områdetall" i vurderingen av sannsynlighetene (Vedlegg C). Disse lavere og høyere grenser er også vist i Tabell E2, som nedre og øvre estimater.

I Tabell E2 er det beste estimatet av den årlige bruddsannsynlighet lik eller lavere enn  $10^{-6}$ . Disse sannsynligheter er svært lave og, som diskutert i hovedrapporten, lavere enn for de fleste dammer utenlands.

Når øvre verdier av 'områdetall' brukes er årlig bruddsannsynlighet høyere, opp til  $5 \cdot 10^{-5}$  for indre erosjon (iterasjon 3 er best analyse), mens det nedre estimatet er meget lavt ( $< 10^{-7}$ ). Spredningen av sannsynlighetsverdier illustrerer effekten av usikkerhetene, men spredningen er urealistisk stor.

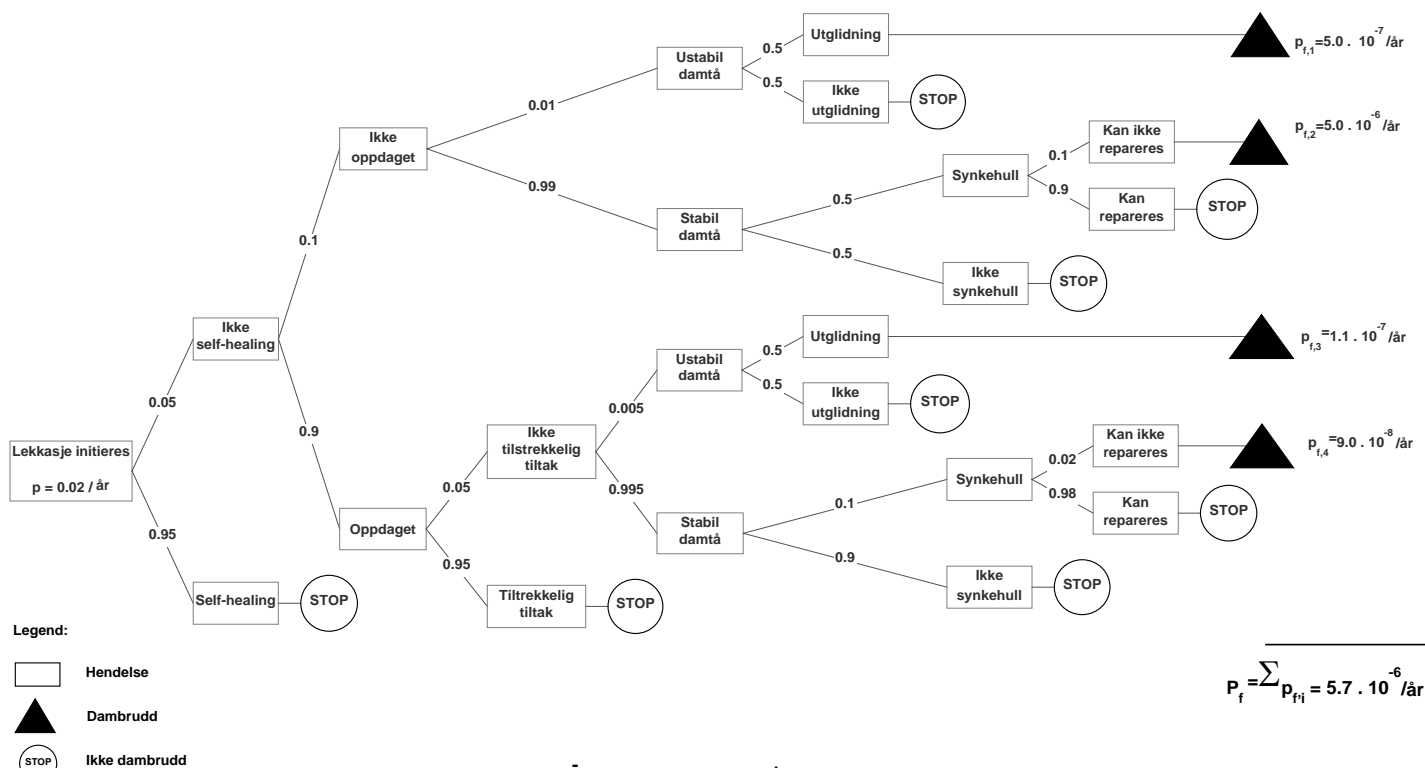
Nedre og øvre estimat i Tabell E2 gir et urealistisk resultat fordi alle minimumsverdier er brukt samtidig for det ene estimatet og alle maksimumsverdier er brukt samtidig for det andre estimatet. Et verktøy for å få en mer realistisk sannsynlighetsfordeling er å bruke "Bayesian networks" kombinert med Monte Carlo simulering.

Tabell D2. Årlig bruddsannsynlighet, Nyhellervatn - Best estimat og nedre og øvre grense estimater.

Bruddmekanisme eller bruddårsak	Årlig bruddsannsynlighet, $P_f/\text{år}$		
	Nedre estimat	Best estimat	Øvre estimat
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 1)	$3.0 \cdot 10^{-8}$	<b><math>5.7 \cdot 10^{-6}</math></b>	$6.8 \cdot 10^{-4}$
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 2)	$1.0 \cdot 10^{-9}$	<b><math>2.1 \cdot 10^{-7}</math></b>	$1.9 \cdot 10^{-6}$
Indre erosjon for årsaket av lekkasje (iterasjon 3)	$7.8 \cdot 10^{-8}$	<b><math>1.5 \cdot 10^{-6}</math></b>	$5.3 \cdot 10^{-5}$
Lekkasje gjennom kjernen og bergfundamentet	$1.0 \cdot 10^{-8}$	<b><math>3.7 \cdot 10^{-7}</math></b>	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Flom	$8.0 \cdot 10^{-11}$	<b><math>6.5 \cdot 10^{-9}</math></b>	$1.8 \cdot 10^{-6}$
Oppstrøms stabilitet under bølgebelastning	$3.1 \cdot 10^{-10}$	<b><math>1.0 \cdot 10^{-8}</math></b>	$1.3 \cdot 10^{-6}$
Oppstrøms stabilitet under isbelastning	$3.1 \cdot 10^{-10}$	<b><math>1.0 \cdot 10^{-8}</math></b>	$1.3 \cdot 10^{-6}$
Jordskjelv	$7.0 \cdot 10^{-8}$	<b><math>2.7 \cdot 10^{-7}</math></b>	$7.4 \cdot 10^{-6}$
<b>Årlig sannsynlighet for brudd, alle tilfeller</b>	---	<b><math>2.2 \cdot 10^{-6}</math></b>	---

Det best estimatet for den årlige bruddsannsynligheten er på  $2 \cdot 10^{-6}$  (eller to ganger per 1 million år), noe som er svært usannsynlig.

Lekkasje initieres	Self-healing	Erosjon oppdages	Tiltak	Damtå	Utglijning	Synke-hull	Reparasjon	Dambrudd
A	B	C	D	E1: Øvre E2: Nedre	F1: Øvre F2: Nedre	G1: Øvre G2: Nedre	H1: Øvre H2: Nedre	I

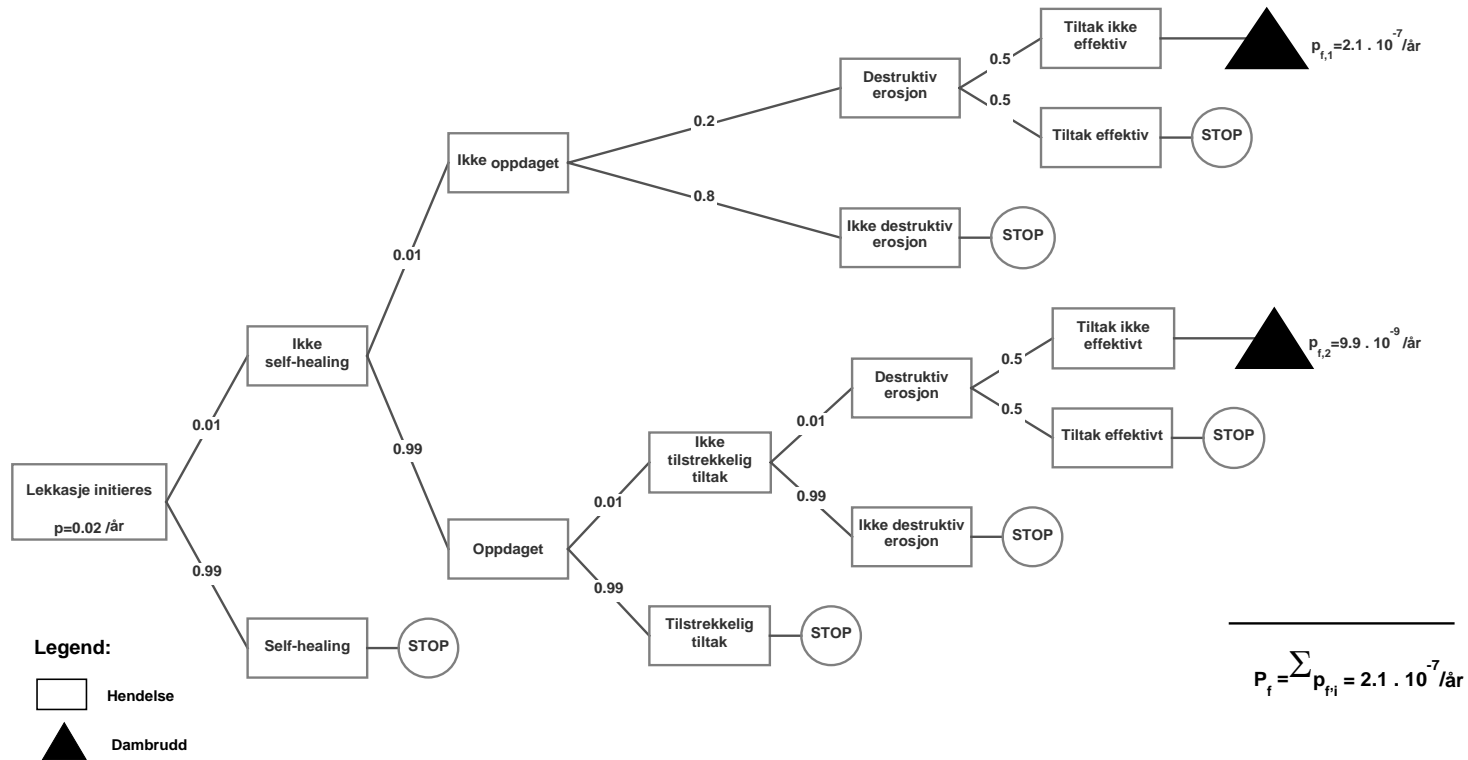


Figur E1. Hendelsestre for indre erosjon, best-estimat sannsynligheter (iterasjon 1)

Figur E1a. Forklaring for sannsynligheter i vurderingen av indre erosjon i Figur E1 (iterasjon 1)

HENDELSE	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
<b>A</b> Lekkasje	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alle dammer har lekkasje</li> <li>Ekstremt lite lekkasje observert for Nyhellervatn, ikke knyttet til indre erosjon.</li> <li>Ingen unormal lekkasje. Under høst regn, dam oppførere seg helt normalt.</li> <li>Hvis vannstand &gt; 1m, vil det endre sannsynlighet av forskjellige grener?</li> <li>Skille mellom vanngjennomstrømning (som kan beregnes) og unormal lekkasje.</li> <li>Benyttet <math>P</math> som et snitt for norske dammer, konservativt for Nyhellervatn-</li> </ul>	$P = 0.02/\text{år}$ Kunne godt ha vært 0.01/år eller 0.005/år lavere, fordi Dam Nyhellervatn ikke har vist lekkasje
<b>B</b> Selv-healing	<ul style="list-style-type: none"> <li>Avhengig av filter: fra 80-tallet, ny standard/kriteria for filter.</li> <li>God kvalitet på filtrene. Lav <math>D_{15}</math> (Vedlegg A)</li> <li>Kornfordeling sjekket mot nye filterkriterier.</li> </ul>	$P[0.05; 0.95]$
<b>C</b> Oppdaget	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hvor lang tid før lekkasje blir oppdaget?</li> <li>Analysen forenkler situasjonen</li> <li>Kontinuerlig overvåking, automatisk alarm til driftssentralen. Systemet er testet og det er gjort lekkasje simuleringer i periodisk tilsyn.</li> <li>Varsling om signalet fra lekkasjekummen faller ut.</li> </ul>	$P[0.1; 0.9]$
<b>D</b> Effektivt tiltak	<ul style="list-style-type: none"> <li>Senke magasinet; åpne bunntappeluke; kjøre aggregat, kjøre full drift på kraftstasjonen.</li> <li>Ved lekkasje på over 50 l/s settes det høyt beredskap; alt vann inn stoppes.</li> <li>Tiltak kan tilpasses enhver utvikling.</li> <li>Kan man gjøre tiltak om vinteren like effektivt? Adgang?</li> <li>Bør definere bedre "Hva er et effektivt tiltak?"</li> </ul>	$P[0.05; 0.95]$
<b>E</b> Stabil damtå	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lekkasje må være ganske høy for å lage problem for tåa!</li> <li>Øvre, "ikke oppdaget": eventuell lekkasjer må fylle opp mellom kjernen og lekkasjefangdam, veldig usannsynlig.</li> <li>Nedre, "oppdaget" og "tiltak ikke effektivt": enda mer usannsynlig siden vann inn stoppes og nedtapping begrenser vannmengde og forkorter varighet.</li> </ul>	<i>E1: "ikke oppdaget":</i> $P[0.01; 0.99]$ <i>E2: "oppdaget" og "tiltak ikke effektivt"</i> $P[0.005; 0.995]$
<b>F</b> Utglidning	<ul style="list-style-type: none"> <li>Under alle forutsetninger i hendelses-grenene kan det skje eller ikke skje en utglidning (sannsynlighet: usikker, vet ikke).</li> </ul>	$P[0.5; 0.5]$
<b>G</b> Synkehull	<ul style="list-style-type: none"> <li>Synkehull er vanlig; spesielt hvis det er vertikal kabler inn i kjernen, noe som vanskeliggjør komprimering. På Nyhellervatn er det en kabel inn i kjernen 10m under krona, men a en annen type instrumentering enn nevnt over.</li> <li>Øvre gren: sannsynlighet: usikker, vet ikke.</li> <li>Nedre gren: Tiltak er iverksatt og har delvis effekt (mindre vannmengde) enn ved "ikke oppdaget", selv om det kategoriseres som "Ikke effektivt"</li> </ul>	<i>G1: Øvre gren:</i> $P[0.5; 0.5]$ <i>G2: Nedre gren:</i> $P[0.1; 0.9]$
<b>H</b> Kan repareres	<ul style="list-style-type: none"> <li>Øvre gren: Utviklingen fra synkehull til brudd tar tid</li> <li>Nedre gren: Mindre vannmengde enn ved "Ikke oppdaget", selv om tiltaket kategoriseres som "ikke effektivt"</li> </ul>	<i>H1: Øvre gren:</i> $P[0.1; 0.9]$ <i>H2: Nedre gren:</i> $P[0.02; 0.98]$
<b>I</b> Dambrudd	4 grener som fører til dambrudd med henholdsvis brudd sannsynlighet på: $5.0 \times 10^{-7}/\text{år}$ , $5.0 \times 10^{-6}/\text{år}$ , $1.1 \times 10^{-7}/\text{år}$ og $9.0 \times 10^{-8}/\text{år}$ .	$P_f = 5.7 \times 10^{-6}/\text{år}$ $(P_f = 2.9 \times 10^{-6}/\text{år}$ hvis $p_{\text{lekkasje}} = 0.01/\text{år}$ er brukt)

Lekkasje initieres	Self-healing	Erosjon oppdages	Tiltak	Erosjon	Tiltak	Dambrudd
A	B	C	E	D1: Øvre D2: Nedre	F1: Øvre F2: Nedre	G



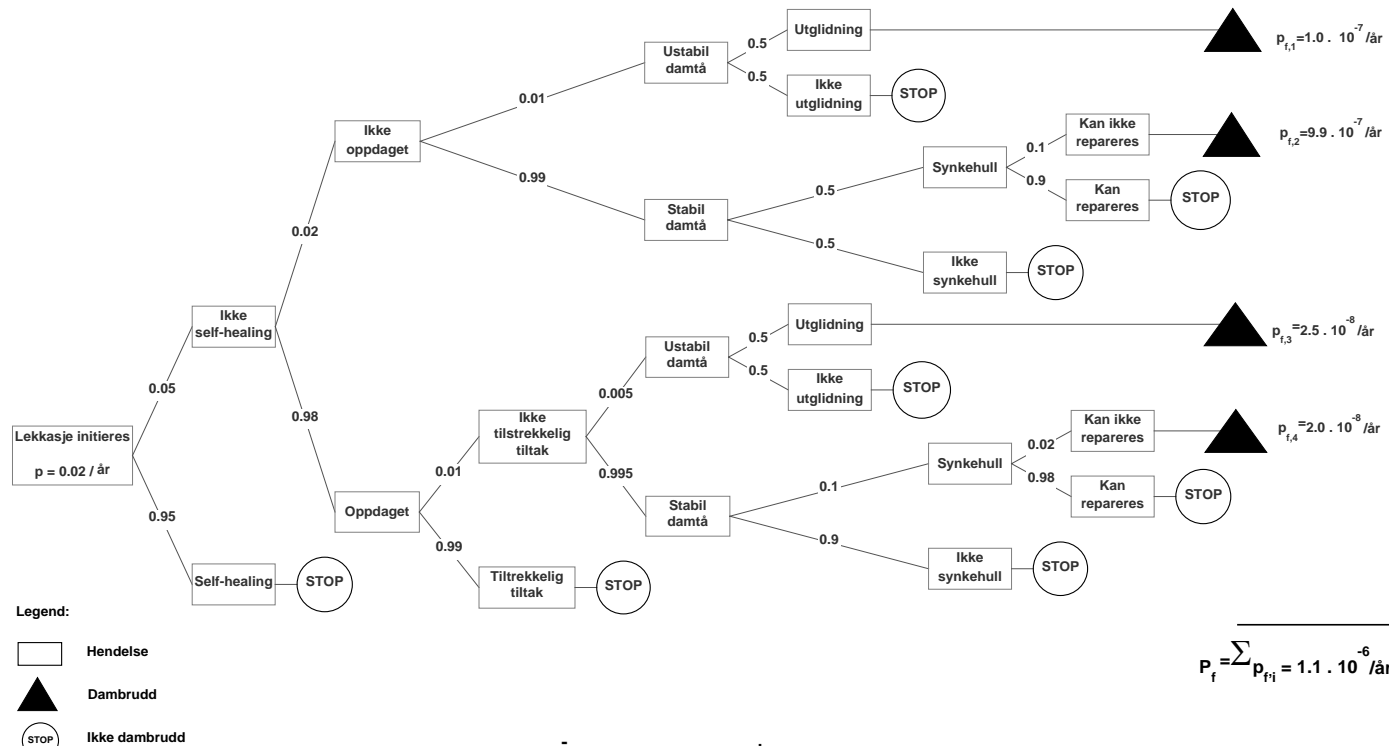
Figur E2. Hendelsestre for indre erosjon, best-estimert sannsynligheter (iterasjon 2) - uavhengig analyse

Figur E2a. Forklaring for sannsynligheter i vurderingen av indre erosjon i Figur E2 (iterasjon 2).

HENDELSE	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
<b>A</b> Lekkasje	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alle dammer har lekkasje.</li> <li>Ekstremt lite lekkasje observert for Nyhellervatn, ikke knyttet til indre erosjon.</li> <li>Ingen unormal lekkasje. Under høst regn, dam oppfører seg helt normalt.</li> <li>Skille mellom vanngjennomstrømning (som kan beregnes) og lekkasje.</li> <li>Benyttet <math>P</math> som et snitt for norske dammer, konservativt for Nyhellervatn.</li> </ul>	$P = 0.02/\text{år}$ Kunne godt ha vært $0.01/\text{år}$ eller $0.005/\text{år}$ lavere, fordi Dam Nyhellervatn ikke har vist lekkasje
<b>B</b> Self-healing	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gode filtre.</li> <li>Lite lekkasje ved Nyhellervatn.</li> </ul>	$P[0.01; 0.99]$
<b>C</b> Oppdaget	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oppdagelse på et tidlig stadium.</li> <li>Kontinuerlige lekkasjemålinger på dammen. Mer robust lekkasjemålingssystem nå enn før.</li> <li>Høyest sannsynlighet for manglende målinger om vinteren, men da er vannstanden lav.</li> </ul>	$P[0.01; 0.99]$
<b>D</b> Tiltak	<ul style="list-style-type: none"> <li>Senke magasinet; åpne bunntappeluke; kjøre aggregat, full drift på kraftstasjonen.</li> <li>Ved lekkasje på over 50 l/s settes det høyt beredskap; alt vann inn stoppes.</li> <li>Tiltak kan tilpasses enhver utvikling.</li> <li>Kan man gjøre tiltak om vinteren like effektivt? Adgang?</li> </ul>	$P[0.10; 0.90]$
<b>E</b> Destruktiv erosjon	<ul style="list-style-type: none"> <li>Destruktiv erosjon omfatter både ustabil tå og synkehull.</li> <li>Det kan foregå erosjon over lang tid som ikke gjør noen skade.</li> </ul>	<i>D1: Øvre:</i> $P[0.2; 0.8]$ <i>D2: Nedre:</i> $P[0.01; 0.99]$
<b>F</b> Tiltak effektivt	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stor sannsynlighet for effektivt tiltak mot synkehull; trenger mer lekkasje for å grave ut damtåa.</li> <li><i>Øvre og nedre:</i> usikker, men nedre: Mindre vannmengder om det er oppdaget</li> </ul>	<i>F1: Øvre:</i> $P[0.5; 0.5]$ <i>F2: Nedre:</i> $P[0.5; 0.5]$
<b>G</b> Dambrudd	To grener fører til dambrudd.	$P_f = 2.1 \times 10^{-7}/\text{år}$ $(P_f = 1.1 \times 10^{-7}/\text{år}$ hvis $p_{\text{lekkasje}} = 0.01/\text{år}$ er brukt)



Lekkasje initieres	Self-healing	Erosjon oppdages	Tiltak	Damtå	Utglidning	Synke-hull	Reparasjon	Dambrudd
A	B	C	D	E1: Øvre E2: Nedre	F1: Øvre F2: Nedre	G1: Øvre G2: Nedre	H1: Øvre H2: Nedre	I

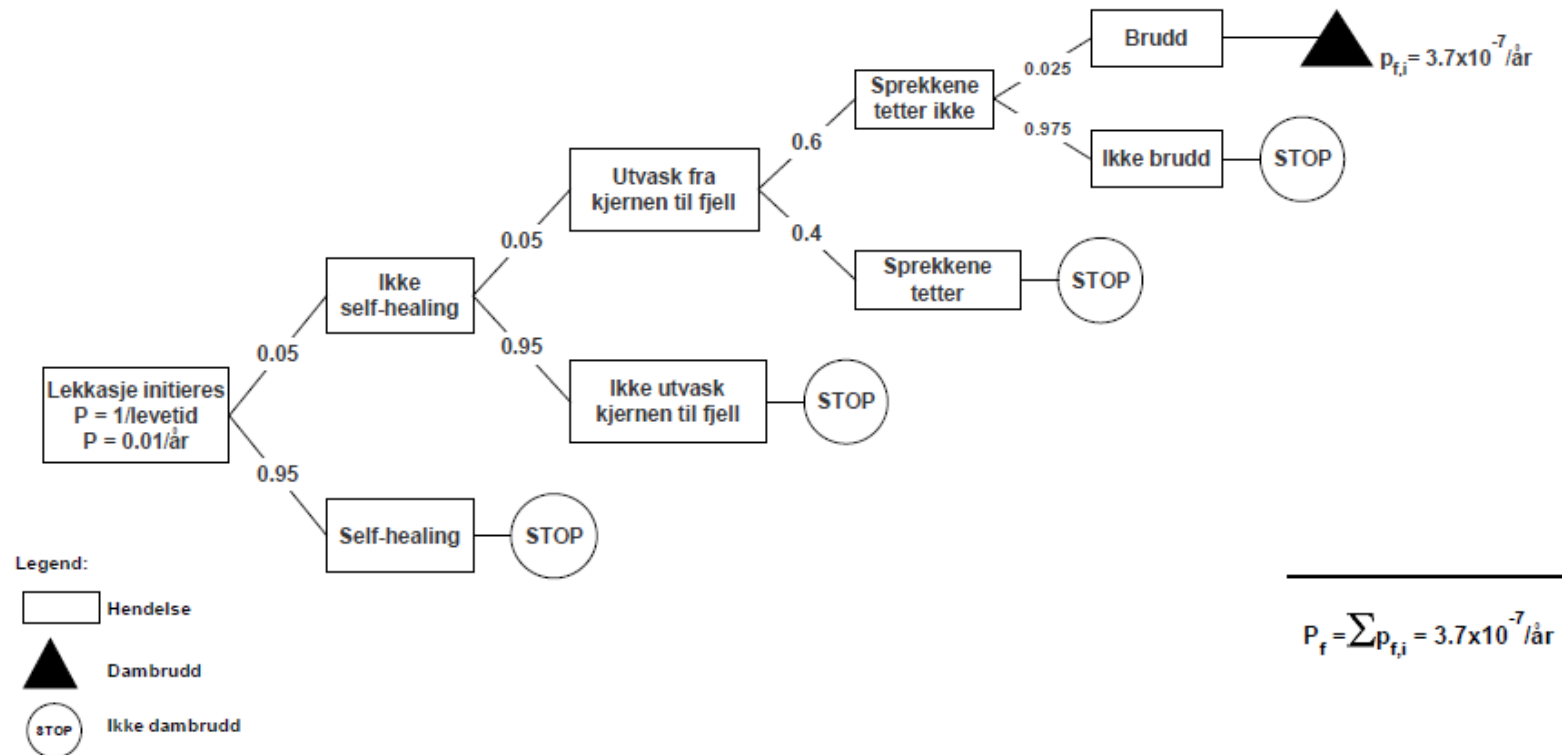


Figur E3. Hendelsestre for indre erosjon, best-estimert sannsynligheter (iterasjon 3) (NGIs anbefaling)

Figur E3a. Forklaring for sannsynligheter i vurderingen av indre erosjon i Figur E3 (iterasjon 3).

HENDELSE	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
<b>A</b> <b>Lekkasje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alle dammer har lekkasje, men ekstremt lite lekkasje observert for Nyhellervatn; ikke knyttet til indre erosjon.</li> <li>Ingen unormal lekkasje. Under høst regn, dam oppførere seg helt normalt.</li> <li>Hvis vannstand &gt; 1m, vil det endre sannsynlighet av forskjellige grener?</li> <li>Skille mellom vanngjennomstrømning (som kan beregnes) og "unormal" lekkasje.</li> <li>Benyttet P representerer gjennomsnitt for norskedammer, som antagelig vil være konservativt for Nyhellervatn som har hatt svært lite lekkasje.</li> </ul>	<p>P=0.02/år          Kunne godt ha vært 0.01/år eller 0.005/år lavere, fordi Dam Nyhellervatn ikke har vist lekkasje</p>
<b>B</b> <b>Selv-healing</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gode filtre.</li> <li>Lite lekkasje ved Nyhellervatn. Mange lekkasjer, f.eks. observert som gulp, har helet seg selv</li> </ul>	P[0.05; 0.95]
<b>C</b> <b>Oppdaget</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hvor lang tid før lekkasje blir oppdaget?</li> <li>Hendelsestre-analysen forenkler av situasjonen.</li> <li>Kontinuerlig overvåking, automatisk alarm til driftssentralen. Systemet er testet og det er gjort lekkasje simuleringer i periodisk tilsyn.</li> <li>Varsling om signalet fra lekkasjekummen faller ut.</li> </ul>	P[0.02; 0.98]
<b>D</b> <b>Effektivt tiltak</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Senke magasinet: åpne bunntappeluke; kjøre aggregater, kjøre full drift på kraftstasjonen. Ved lekkasje på over 50l/s settes det høy beredskap; alt vann inn stoppes. Tiltak tilpasses utvikling av situasjonen. Tidlig varsling (gjennom automatiske lekkasjemålinger) gir god tid til å iverksette tiltak.</li> </ul>	P[0.01; 0.99]
<b>E</b> <b>Stabil damtå</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lekkasje må være ganske høy for å lage problem for tåa.</li> <li>Øvre, fra "ikke oppdaget": Det må store lekkasjer til for å få ustabil tå, må fylle opp mellom kjernen og lekkasjefangdam.</li> <li>Nedre, fra "oppdaget" og "tiltak ikke effektivt": Lavere sannsynlighet siden stopp av vann inn og nedtapping begrenser vannmengder og forkorter varighet.</li> </ul>	<p>E1: Øvre:          P[0.01; 0.99]          E2: Nedre:          P[0.005; 0.995]</p>
<b>F</b> <b>Utglidning</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Under alle forutsetninger i hendelses-treet kan det skje en utglidning eller ikke. Usikker, derfor P= 0.5.</li> </ul>	P[0.5; 0.5]
<b>G</b> <b>Synkehull</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Synkehull er vanlig, spesielt hvis det er instrumentering i kjernen med vertikale kabler, som vanskeliggjør kompaktering rundt instrumentene. På Nyhellervatn er det en kabel inn i kjernen 10m under krona, men dette er en annen type instrumentering enn nevnt over.</li> <li>Nedre gren: Tiltak er iverksatt og antas å ha delvis effekt (mindre vannmengder) enn ved "ikke oppdaget", selv om det kategoriseres som "Ikke effektivt"</li> </ul>	<p>G1: Øvre gren:          P[0.5; 0.5]          G2: Nedre gren:          P[0.1; 0.9]</p>
<b>H</b> <b>Kan repareres</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utviklingen fra synkehull til brudd tar tid</li> <li>Nedre gren: Mindre vannmengder enn ved "Ikke oppdaget", selv om tiltaket kategoriseres som "ikke effektivt"</li> </ul>	<p>H1: Øvre gren:          P[0.1; 0.9]          H2: Nedre gren:          P[0.02; 0.98]</p>
<b>I</b> <b>Dambrudd</b>	Fire gren kan før til dambrudd.	<p><math>P_f = 1.5 \times 10^{-6} / \text{år}</math>  <math>(P_f = 0.8 \times 10^{-6} / \text{år}</math>          hvis <math>p_{\text{lekkasje}} = 0.01 / \text{år}</math> er brukt)</p>

Lekkasje og erosjon i oppsprukket berg	Self-healing	Utvasking	Tetting av sprekker	Dambrudd
A	B	C	D	E

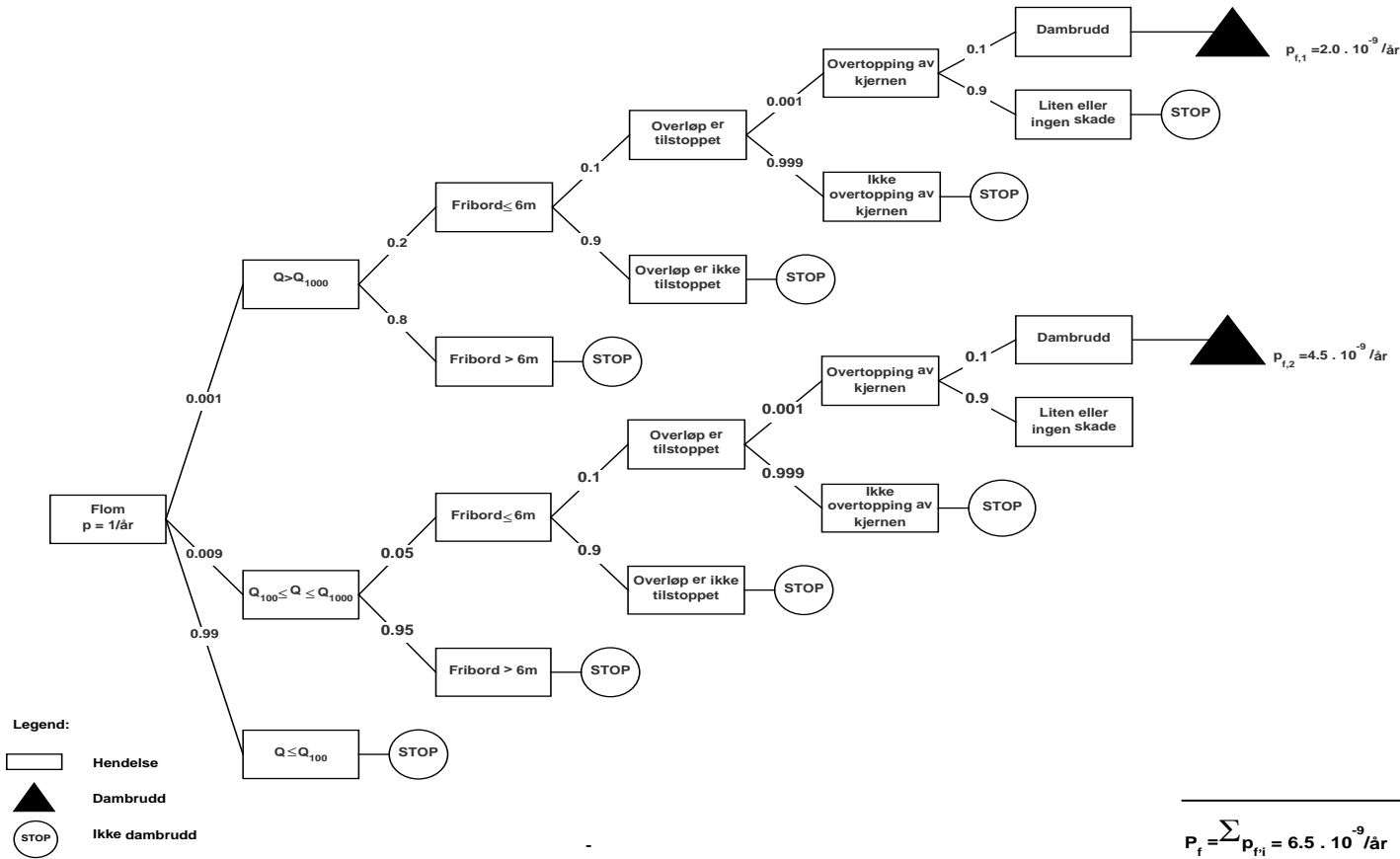


Figur E4. Hendelsestre for lekkasje og erosjon gjennom kjerne og bergfundamentet, best-estimert sannsynligheter

Figur E4a. Forklaring for sannsynligheter i vurderingen av lekkasje og erosjon gjennom kjerne og bergfundamentet i Figur E4.

HENDELSE	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
<b>A</b> Lekkasje gjennom bergfundament	Lekkasje initieres i bergfundament som kan være farlig for erosjon i kjernen. Dette har ikke skjedd i de første 40 år; ingen grunn til å tro at det skal bli verre med tid; det være heller bedre. Levetid ansett som 100-150 år.	P = 1% over dammens levetid
<b>B</b> Self-healing	Under bygging har Injeksjonsarbeidene vært utført samvittighetsfullt. Fjell av dårlig kvalitet er fjernet (10-15m). Men geologisk informasjon mangler.	P[0.05; 0.95]
<b>C</b> Utvasking av kjernen	Store mengder må vaskes ut for å forårsake skade i kjernen, usannsynlig til meget usannsynlig at dette kan skje med dette fjellet.	P[0.05; 0.95]
<b>D</b> Tetting av sprekker	Det er litt mer sannsynlig at sprekkeene ikke tettes enn at de tettes.	P[0.6;0.4]
<b>E</b> Skade fører til brudd	Utvikling fra synke-hull til dambrudd tar tid: det vil kunne oppdages på lekkasjemålinger og det kan gjøres tiltak. Det er mer kritisk om det dannes rør til oppstrøms side. Skade på dam er ikke ensbetydende med dambrudd (Svensk dam som fikk skader pga. synkehull gikk ikke til brudd, men måtte repareres). Ved første vurdering ble sannsynligheten satt til 1% (p=0.01), noen mente dette var for høyt mens andre mente for lavt. Konsensus inn i mellom.	P[0.025; 0.975]
<b>E</b> Dambrudd	En gren fører til dambrudd.	$P_f = 3.7 \times 10^{-7}/\text{år}$

Flom	Flommens returperiode	Flomstigning	Overløp	Overtopping av kjernen	Ødeleggelse	Dambrudd
A	B	C	D	E	F	G

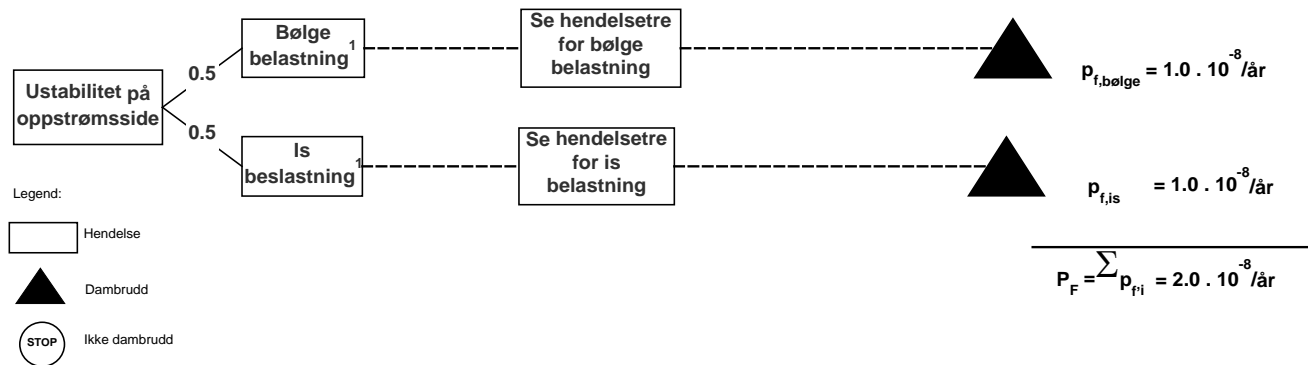


Figur E5. Hendelsestre for flom, best-estimat sannsynligheter.

Figur E5a. Forklaring for sannsynligheter i vurderingen av flom i Figur E5.

HENDELSE	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
<b>A</b> Flom		
<b>B</b> Flomstørrelse	Øvre gren: Flom med 1 000 års returperiode Flom større enn 1 000-års flommen inkluderer også PMF	P[0.001; 0.009; 0.99]
<b>C</b> Fribord	Betrakter både flomstørrelse og magasinnivå før flom. Flomperioder er vår og høst. Lite sannsynlig med fullt magasin på våren (da er flom mest sannsynlig), mer sannsynlig med fullt magasin på høsten. Lavere sannsynlighet for fribord mindre enn 6m ved mindre flomstørrelser.	<i>C1, øvre:</i> P[0.2;0.8] <i>C2, nedre:</i> P[0.05;0.95]
<b>D</b> Tilstopping av overløp	Det skal mye is til før flomløpet blir tilstoppet. Delvis tilstopping er inkludert i flomberegningene. Høyt estimat på tilstopping.	P[0.1; 0.9]
<b>E</b> Overtopping av kjernen	For å få en overtopping av kjernen må vi ha PMF kulminasjon, den må være et helt døgn og flomløpet må være helt tilstoppet, alle tre svært usannsynlig.	P[0.001;0.999]
<b>F</b> Ødeleggelse (skade)	Overtopping vil skje med små mengder vann. Ved overtopping av kjernen vil sperredam Øljo fungere som overløp. Konservativt anslag.	P[0.1; 0.9]
<b>G</b> Dambrudd	To greener fører til dambrudd	$P_f = 6.5 \times 10^{-9}$ per år

Oppstrøms-stabilitet	Belastning	Dambrudd
A	B	C



<sup>1</sup> Seks måneder med bølgebelastning (sommerhalvåret) og seks måneder med isbelastning (vinterhalvåret)

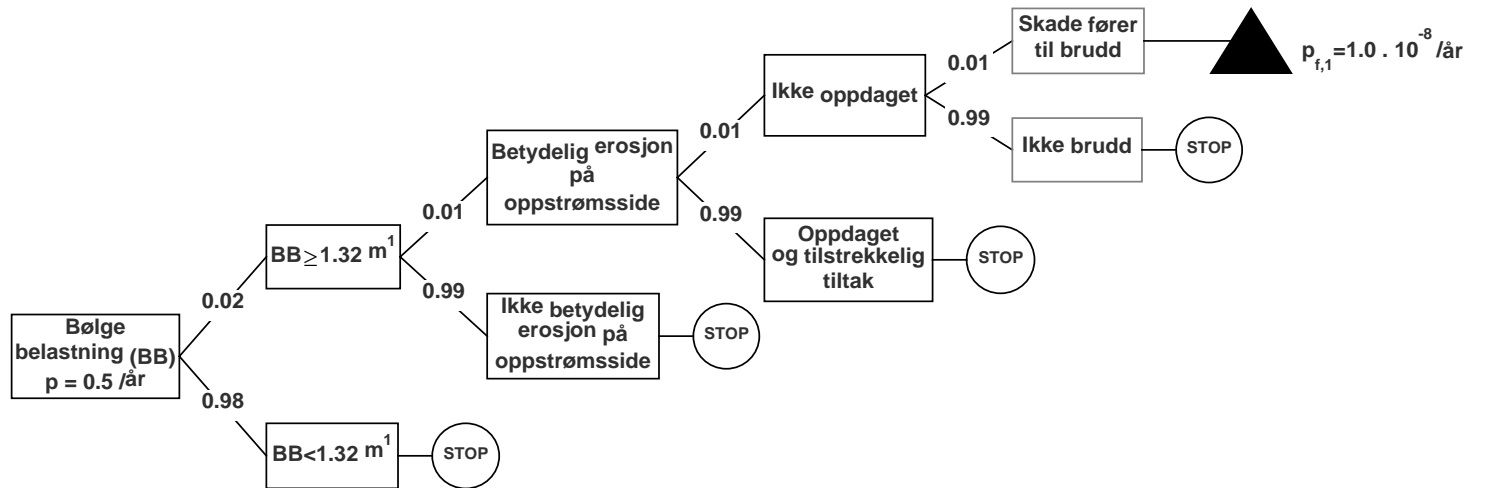
Figur E6. Overordnet hendelsetre-analyse for oppstrøms skråningsstabilitet under bølge- og isbelastning

Figur E6a. Forklaring for sannsynligheter i vurderingen av oppstrøms skråningsstabilitet (Fig. E6).

HENDELSE	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
<b>A</b> Ustabilitet på oppstrøms side	Inneholder ikke sannsynligheter i dette steget; kun navn på bruddmekanisme	
<b>B</b> Belastning	Inndeling i vinterhalvår og sommerhalvår	P : 50% per år
<b>C</b> Dambrudd	Beregnes i trærne nedenfor; Figur D7 og D8	$P_F = 2 \times 10^{-8}$ per år



Bølge belastning for oppstrømsside	Bølgehøyde	Erosjon	Erosjon oppdaget	Ødeleggelse	Dambrudd
A	B	C	D	E	F



Legend:

- Hendelse
- Dambrudd
- STOP Ikke dambrudd

$$P_F = \sum p_{fi} = 1.0 \times 10^{-8} \text{ /år}$$

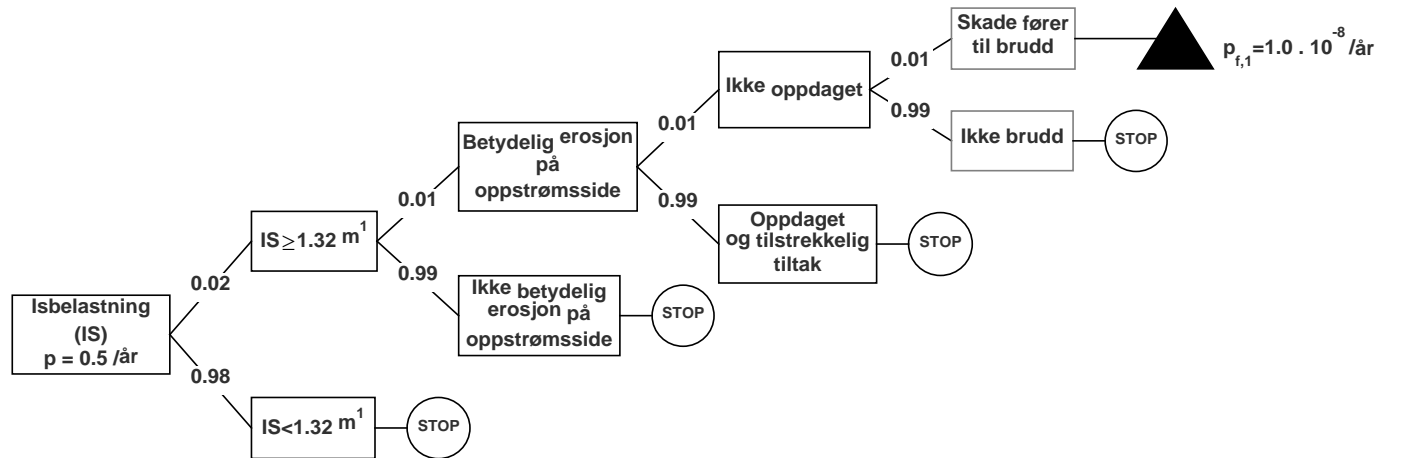
<sup>1</sup> 1,32 m = prosjektert verdi for bølge belastning i Dam Nyhellervatn

Figur E7. Hendelsestre-analyse for oppstrøms skråningsstabilitet under bølgebelastning (sommerhalvåret)

Figur E7a. Forklaring for sannsynligheter i vurdering av oppstrøms skråningsstabilitet under bølgebelastning i Figur E7.

HENDELSE	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
<b>A</b> <b>Bølgebelastning</b>	Inndeling i vinterhalvår og sommerhalvår	P = 50% per år
<b>B</b> <b>Bølgehøyde</b>	De fleste stormer kommer fra vest. Vind må komme fra sørøst for å få bølgebelastning på dammen. Dimensjoneringskriteriet er på 50 års returperiode.	P[0.02; 0.98]
<b>C</b> <b>Erosjon</b>	Må ha høy vannstand for at bølgepåvirkning skal gi erosjon: Dammen har fått dimensjonerende bølge mot seg flere ganger tidligere uten skader.	P[0.01; 0.99]
<b>D</b> <b>Erosjon oppdaget</b>	Ved ugunstig vindretning skal det gjennomføres inspeksjon. Det er gode inspeksjonsrutiner.	P[0.01; 0.99]
<b>E</b> <b>Ødeleggelse</b>	Bruddmekanismen må skje over lang tid, det tar for at effekten "spiser seg inn". Små bølger.	P[0.01;0.99]
<b>F</b> <b>Dambrudd</b>		$P_f = 1 \times 10^{-8}$ per år

Isbelastning for oppstrømsside	Ishøyde	Erosjon	Erosjon oppdaget	Ødeleggelse	Dambrudd
A	B	C	D	E	F



Legend:

- Hendelse
- Dambrudd
- STOP Ikke dambrudd

$$P_F = \sum p_{fi} = 1.0 \times 10^{-8} / \text{år}$$

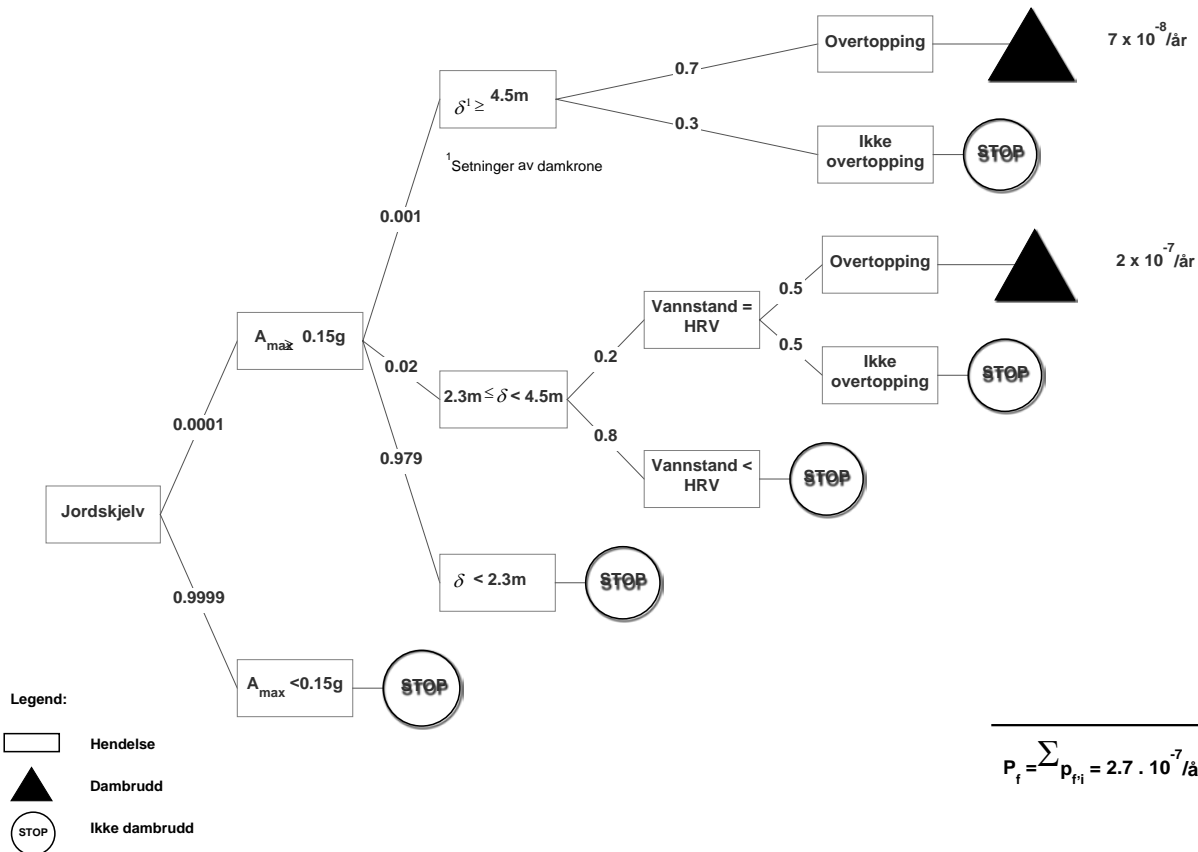
<sup>1</sup> 1,32 m = prosjektert verdi for is i Dam Nyhellervatn

Figur E8. Hendelsestre-analyse for oppstrøms skråningsstabilitet under isbelastning (vinterhalvåret)

Figur E8a. Forklaring for sannsynligheter i vurdering av oppstrøms skråningsstabilitet under isbelastning i Figur E8.

HENDELSE	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
<b>A</b> <b>Bølgebelastning</b>	Inndeling i vinterhalvår og sommerhalvår.	P = 50% per år
<b>B</b> <b>IsbelastningB</b>	Dimensjoneringskriteriet er 50 års returperiode.	P[0.02; 0.98]
<b>C</b> <b>Erosjon</b>	Mekanisme: Vannet fryser fast i dammen og isen bøyer seg ned.	P[0.01; 0.99]
<b>D</b> <b>Erosjon oppdaget</b>	Gode inspeksjonsrutiner.	P[0.01; 0.99]
<b>E</b> <b>Ødeleggelse</b>	Bruddmekanismen må skje over lang tid, det tar for at effekten "spiser seg inn".	P[0.01;0.99]
<b>F</b> <b>Dambrudd</b>		$P_f = 1 \times 10^{-8}$ per år

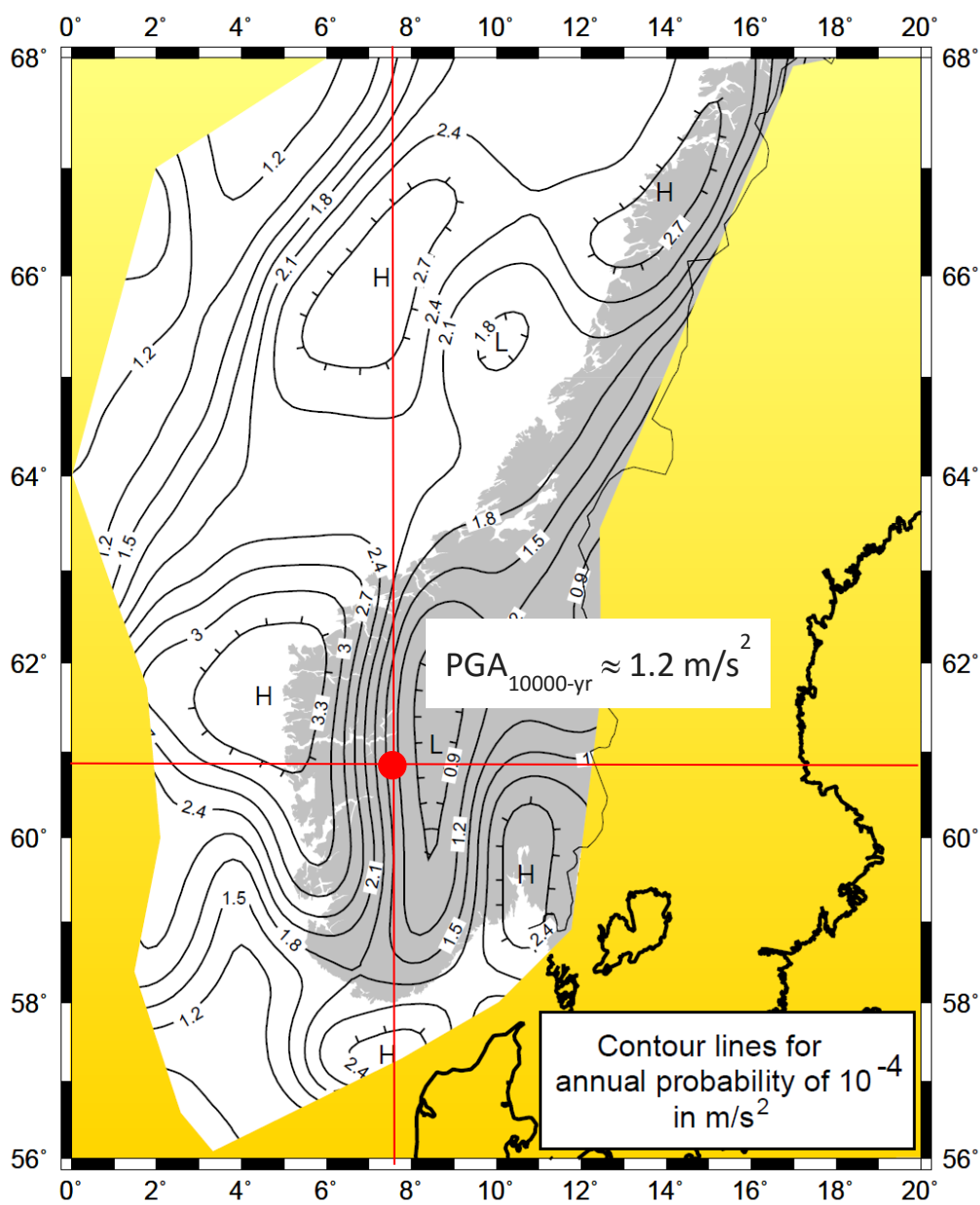
Jordskjelv oppstår	Maksimum akselerasjon	Damkrone setninger	Vannstand	Overtopping av kjernen	Sannsynlighet for dambrudd
A	B	C	D	E	F



Figur E9. Hendelsestre-analyse for dam Nyhellervatn under jordskjelv

Figur E9. Forklaring for sannsynligheter i vurdering av jordskjelv i Figur E9.

HENDELSE	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
<b>A</b> <b>Initiering</b>	De årlige sannsynlighetene (returperiode) for PGA ("peak ground acceleration") $A_{max}$ benyttes for initieringssannsynlighet.	$P = 0.0001$ for 10 000-års jordskjelv
<b>A</b> <b>PGA <math>A_{max}</math></b>	Jordskjelv under 0,15g har neglisjerbar effekt på dammen. Sannsynligheter fra Figur E10.	$P[0.0001/\text{år}; 0.9999/\text{år}]$
<b>C</b> <b>Setning i damkrone</b>	Grensene for setningene (4,5m og 2,3m) tilsvarer et fribord fra HRV til damkronen og toppen av kjernen. Svært sannsynlig med små setninger. Dammen har stått lenge. Beregninger har vist mindre setninger med mye større jordskjelv.	$P[0.001; 0.02; 0.979]$
<b>D</b> <b>Vannstand</b>	Vannstanden ligger rundt HRV ca 20% av året.	$P[0.2; 0.8]$
<b>E</b> <b>Overtopping</b>	<i>Øvre gren:</i> Noe mer sannsynlig at overtopping skjer enn at den ikke skjer. <i>Nedre gren:</i> Usikkert om overtopping vil skje	<i>E1: Øvre gren:</i> $P[0.7; 0.3]$ <i>E2: Nedre gren:</i> $P[0.5; 0.5]$
<b>F</b> <b>Dambrudd</b>	To grener fører til overtopping med sannsynligheter henholdsvis $7 \times 10^{-8}/\text{år}$ og $2 \times 10^{-7}/\text{år}$	$P_f = 2.7 \times 10^{-7}$ per år



Figur E10. Seismisitet i Dam Nyhyellervatn geografisk område.  
 For et 10 000-års jordskjelv, «Peak Ground Acceleration» (PGA) er på  $\approx 1.2 m/s^2$

<b>Dokumentinformasjon/Document information</b>		
<b>Dokumenttittel/Document title</b> Risikovurdering for Dam Nyhellervatn		<b>Dokumentnr./Document no.</b> 20150624-03-R
<b>Dokumenttype/Type of document</b> Rapport / Report	<b>Oppdragsgiver/Client</b> Energis Norge/E-Co	<b>Dato/Date</b> 2018-01-03
<b>Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document according to contract</b> NGI		<b>Rev.nr.&amp;dato/Rev.no.&amp;date</b> 0 /
<b>Distribusjon/Distribution</b> BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
<b>Emneord/Keywords</b> Risikovurdering, dam, fyllingsdammer, indre erosjon, flom, jordskjelv		

<b>Stedfesting/Geographical information</b>	
<b>Land, fylke/Country</b>	<b>Havområde/Offshore area</b>
<b>Kommune/Municipality</b>	<b>Felt navn/Field name</b>
<b>Sted/Location</b>	<b>Sted/Location</b>
<b>Kartblad/Map</b>	<b>Felt, blokknr./Field, Block No.</b>
<b>UTM-koordinater/UTM-coordinates</b> Sone: Øst: Nord:	<b>Koordinater/Coordinates</b> Projeksjon, datum: Øst: Nord:

<b>Dokumentkontroll/Document control</b>					
<b>Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001</b>					
<b>Rev/Rev.</b>	<b>Revisjonsgrunnlag/Reason for revision</b>	<b>Egenkontroll av/ Self review by:</b>	<b>Sidemanns-kontroll av/ Colleague review by:</b>	<b>Uavhengig kontroll av/ Independent review by:</b>	<b>Tverrfaglig kontroll av/ Inter-disciplinary review by:</b>
0	Originaldokument (utkast til E-CO)	UKE, TLe 2017-12-22	SL, KH 2018-01-01	G. Mathismoen 2018-01-15	

<b>Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release</b>	<b>Dato/Date</b> 7. mai 2018	<b>Prosjektleder/Project Manager</b> 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](http://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](http://www.ngi.no)

