

RAPPORT

Risikovurdering Dam Viddalsvatn

RISIKOVURDERING AV DAM VIDDALSVATN

DOK.NR. 20180156-02-R

REV.NR. 0 / 2018-08-27



(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: **Risikovurdering av Dam Viddalsvatn**
Dokumenttittel: **Risikovurdering av Dam Viddalsvatn**
Dokumentnr.: 20180156-02-R
Dato: 2018-08-27
Rev.nr. / Rev.dato: 0 /

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: E-CO Energi og EnergiNorge
Kontaktperson: Guttorm Mathismoen, E-CO Energi AS
Eve Cathrin Walseth, EnergiNorge
Kontraktreferanse: Oppdragsbekreftelse signert 27. juni 2018

for NGI

Prosjektleder: Suzanne Lacasse
Utarbeidet av: Unni Eidsvig, Kaare Høeg, Farrokh Nadim
Kontrollert av: Kaare Høeg og Suzanne Lacasse

Sammendrag

ECO Energi AS og Energi Norge engasjerte NGI til å gjennomføre risikovurderinger for Dam Viddalsvatn. Formålet med risikovurderingene er å vurdere sikkerhet av Dam Viddalsvatn, spesielt med hensyn til indre erosjon og fjellskred inn i magasinet. Tiltak og effekt av tiltak ble også vurdert som innspill til teknisk plan.

Beregningene tilsier at den totale årlige sannsynlighet for brudd for Dam Viddalsvatn ligger på ca. 10^{-5} /år, forutsatt at det implementeres den minimum rehabiliteringsløsning beskrevet i rapporten. Bruddmekanismer som omfatter indre erosjon er de mest kritiske og dominerer risikobildet for Dam Viddalsvatn. Estimater for årlige bruddsannsynlighet er lavere enn den rapporterte bruddfrekvensen forårsaket av indre erosjon for fyllingsdammer ellers i verden. Benyttes internasjonale risikokriterier for Dam Viddalsvatn kan den beregnede risikoen etter rehabiliteringstiltak som "ytterligere heving av kjernen og toppdam" og/eller "målrettet avgravning" karakteriseres som akseptabel.

I lys av diskusjonene på workshopen, risikovurderingene som er gjort og oppførselen av Dam Viddalsvatn over 65 år anbefaler NGI følgende:

- Med den informasjonen som eksisterer i dag, blant de analyserte tiltakene utover minimum rehabiliteringsløsning, er "Målrettet lokal avgravning i dammens lengderetning ned til kt. 923.5" tiltaket som anses til å gi optimum risikoreduserende effekt. Tiltaket reduserer bruddsannsynligheten med en faktor på 5 (ned til $3 \cdot 10^{-6}$ /år) og bidrar til å bringe risikoen ned til et akseptabelt nivå for alle varslingssituasjoner og antatte potensielle omkomne.
- Ved å kombinere den minimum rehabiliteringsløsning **og** ytterligere heving av kjernen (1.6 m) og topp dam (1.0 m) **og** målrettet avgravning ned til kt. 923.5, ca. 7 m i dammens lengderetning i problemområdene bringer den årlige brudd sannsynlighet videre ned til $2 \cdot 10^{-6}$ /år.
- NGI anbefaler at E-CO ser nøyere på og eventuelt utvide varslingstiltakene siden en varslingsberedskap reduserer risiko betydelig.
- Årlig bruddsannsynlighet som skyldes et fjellskred inn i magasinet med påfølgende flodbølge er av størrelsesorden 10^{-7} . Det anbefales periodisk overvåking av potensielle skredutsatte fjellpartier, f.eks. med INSAR, for å overvåke endringer i bevegelse i fjellet.
- Årlig bruddsannsynlighet som skyldes skade på oppstrøms plastring ligger på 10^{-7} eller lavere. Dagens utforming av oppstrøms plastringen etter 65 år med bølgelast oppfører seg tilfredsstillende selv om den ikke tilfredsstillende dagens krav.
- Hvis et av "avgravning" tiltakene gjennomføres, kan den nye informasjonen om tilstanden i morenekjernen og filteret brukes til å justere, sannsynlighetsestimaterne i rapporten.

På workshopen ble det diskutert bruk av geofysiske metoder for "å kunne se inn i morenekjernen og filtersonene i dammen", og få informasjon om mulige problemområder. NGI anbefaler at E-CO vurderer å gjennomføre geofysiske undersøkelser med ERT-metoden ("Electric Resistivity Tomography" ned til 923,5 m og dypere for å få ytterligere informasjon om mulige problemområder.

Innhold

1	Formål med risikovurderingene	6
2	Om Dam Viddalsvatn	6
3	Risikoanalysene for Dam Viddalsvatn	8
3.1	Metodikk	8
3.2	Risikovurderingsworkshop	8
3.3	Sannsynligheter for vurderingsanalyser av dambrudd	9
4	Oversikt over risikoanalysene for Dam Viddalsvatn	10
4.1	Identifisering av bruddmekanismer	10
4.2	Aktuelle rehabiliteringstiltak	11
4.3	Prioritering av analysene	11
5	Resultater av analysene for Dam Viddalsvatn	13
5.1	Oversikt over analysene	13
5.2	Beregnete årlige bruddsannsynligheter	14
6	Konsekvenser ved dambrudd	17
7	Risikovurdering	19
7.1	Beregnete årlige bruddsannsynligheter	19
7.2	Akseptabel og tolerabel risiko	22
7.3	Risikobilde på Dam Viddalsvatn	25
8	Bruk av ERT for å "se inn i Dam Viddalsvatn"	29
9	Anbefalinger	30
	Acknowledgment	31
	Referanser	31

Vedlegg

Vedlegg A	Beskrivelse av sannsynlighetene i hendelsestre-analysene
Vedlegg B	Årlig sannsynlighet for lekkasje initiering som kan lede til indre erosjon
Vedlegg C	Hendelsestre-analysene for Dam Viddalsvatn
Vedlegg E	Dam Viddalsvatn - Lekkasje målinger og vannstand i magasinet

1 Formål med risikovurderingene

E-CO Energi og Energi Norge engasjerte NGI til å gjennomføre risikovurderinger for Dam Viddalsvatn. Formålet med risikovurderingene er å vurdere sikkerhet av Dam Viddalsvatn, spesielt med hensyn til indre erosjon og fjellskred inn i magasinet. Tiltak og effekt av tiltak skal også vurderes som innspill til teknisk plan.

Risikovurderingene ble gjennomført delvis via en "workshop" hvor sakkyndige fra flere instanser bidro til vurderingene. På risikovurderingsworkshopen ble det fokusert på bruddmekanismer som i hovedsak omfatter indre erosjon og skred inn i magasinet, men det ble også diskutert om andre bruddmekanismer eller bruddårsaker burde vurderes, blant dem erosjon av oppstrøms skråningen under bølgelast.

Følgende rehabiliteringstiltak ble også vurdert i analysene:

- Heving av tetningskjernen og heving av kronen.
- Avgraving av store deler av dammen for kontroll ned til kt. 923,5. Det ble vurdert avgraving langs hele dammen og målrettet avgraving over en kortere strekning i dammens lengderetning på steder det tidligere er registrert indre erosjon og synkehull.
- Avgraving kombineres med utbedring av morenekjernen på de samme stedene.
- Forbedret overvåking: reduksjon av fremmedvann inn i lekkasjemåleanlegget, nedbørs- og temperaturmåling på dammen, vannføringsmåling i elva nedstrøms dammen, fiberkabel i topp dam (som dambruddsvarsling), temperatursensorer i filter for å oppdage lekkasje/lekkasjeveien, etc.
- Ny oppstrøms plastring.

2 Om Dam Viddalsvatn

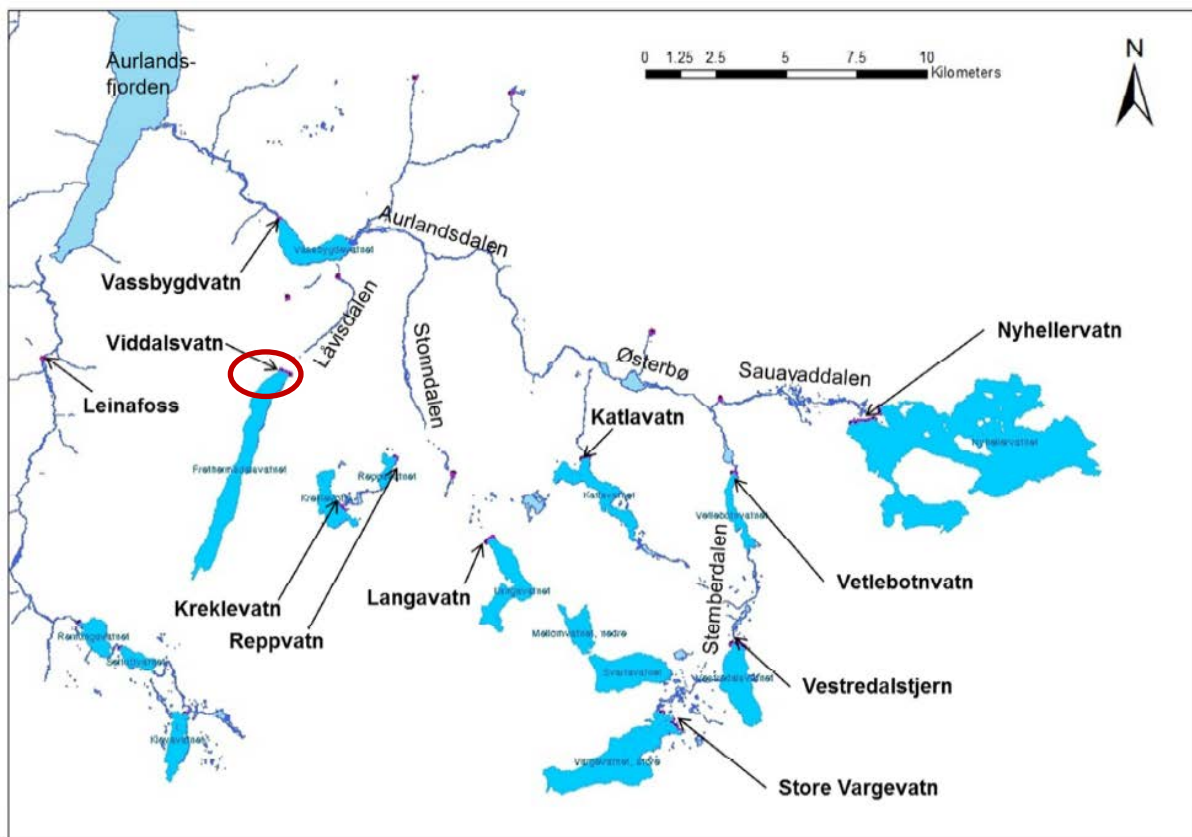
Dam Viddalsvatn ligger ved utløpet av Viddalsvatn og demmer opp Låviselva som renner ut i Vassbygdvatn (Figur 1). Adkomsten til dammen er fra avkjøringen fra RV 50 ved Grimsete og på anleggsvei, ca. 3 km. Veien brøytes ikke om vinteren. Dammen er plassert i konsekvensklasse 4, jf. brev fra NVE av 05.11.2012. Dam Viddalsvatn er en steinfyllingsdam med tetningskjerne av morene (Figur 2). Dammen er for en stor del fundamentert på fjell. En liten del av oppstrøms støttefylling ligger på stedlige grusmasser i det tidligere elveløpet.

Tetningskjernen er todelt, der sone 1A består av morene siktet med sikteåpning 17 cm og sone 1B består av usiktet morene, men uten stein større enn 2/3 av lagtykkelsen (på 80 cm) (NGI, 1997a). Kvaliteten på massetaket for tetningsmassene var jevnt over god, men i begrensede områder fantes det store mengder stein og blokker (NGI, 1972). Videre er dammen bygget med filtersoner bestående av siktet tunnelstein (stort sett granittisk gneis), overgangssoner av tunnelstein, støttefylling av bruddstein og tunnelstein, samt skråningsbeskyttelse og

kronebeskyttelse av bruddstein. Nedstrøms skråning er jevnet med tunnelstein og kledd med matjord.

Nøkkeldata for damanlegg Viddalsvatn

- HRV/LRV – 930/868 moh
- Damlengde – 390 m
- Største damhøyde – 71m (kjerne)
- Damkrone – 935 moh
- Topp tetning – 931,5 + Δh
- Kronebredde – 6 meter
- Skråningshelning – 1:1,6 (oppstrøms og nedstrøms)
- Byggeår – 1970-1972



Figur 1 Oversiktskart som viser beliggenheten av dam Viddalsvatn (tegning:Norconsult)

Informasjon om Dam Viddalsvatn fra E-CO er benyttet i risikovurderingene

3 Risikoanalysene for Dam Viddalsvatn

3.1 Metodikk

Risikoanalysene ble gjort ved hjelp av hendelsestre-analyser. Metoden er forklart i mer detalj i NGI (2016) "State-of-the-Art om risikoanalyser for dammer". Hendelsestre-analysen følger en åtte-trinns prosedyre (Vick 2002; Høeg 1996):

1. Gjennomgang av dammens ytelse under ulike påkjenninger og tidligere hendelser .
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. Estimert av sannsynligheter for hver av enkelthendelsene i hendelsestreet eller nettverket.
7. Evaluering av resultater.
8. Iterasjon

Vurderingen gjøres ofte ved å bringe sammen en gruppe eksperter. Vick (2002) hevdet at en strukturert kollektiv ekspertvurdering kan gi en like god sannsynlighetsvurdering som statistiske analyser: "The collective judgment of experts, structured within a process of debate, can yield as good an assessment of probabilities as mathematical analyses". I mange tilfeller (de fleste) er det ikke mulig å utføre statistiske analyser for det eksisterer ikke et tilstrekkelig datagrunnlag. Hver dam er skreddersydd for forholdene.

Et essensielt steg i vurderingen er trinn 3. "Failure mode screening" eller identifisering av de viktigste utløsningsårsaker og bruddmekanismer. Dette er beskrevet i Kapittel 4.

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

3.2 Risikovurderingsworkshop

Analysene ble gjennomført på en 2-dagers workshop 19. – 20. mars 2018. Deltagerne representerte myndighetene, bransjeforening, vassdragsteknisk ansvarlig, dameiere og rådgivere. Deltakerlisten er vist i Tabell 1.

På workshopen var alt av relevant bakgrunnsinformasjon om Dam Viddalsvatn tilgjengelig. I tillegg var workshopdeltagernes kunnskap om og erfaringer med dammer generelt svært

verdifull. Dette inkluderte vurderinger og beregninger gjort for Dam Viddalsvatn og omfattende erfaringer fra driften av dammen, og andre dammer i Norge.

Tabell 1 Deltagere på risikovurderingsworkshopen

Navn	Bedrift
Eve Cathrin Walseth	EnergiNorge
Guttorm Mathismoen	E-CO Energi
Knut Helge Kjærvik	E-CO Energi
Alf Bjarne Hjelle	E-CO Energi
Olof Dahlen	Norconsult
Richard Duncumb	Multiconsult
Torstein Tjelde	Eidsiva
Øystein Nøtsund	NVE
Lars Grøttå	NVE (dag 1)
Fjola Sigtryggisdottir	NTNU (dag 1)
Kaare Høeg	NGI
Suzanne Lacasse	NGI
Farrokh Nadim	NGI
Unni Eidsvig	NGI

Arbeidet på workshopen omfattet trinn 3 til 8 i åtte-trinns prosedyren som beskrevet i delkapittel 3.1. 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 etter en diskusjon.

De viktigste analysetilfellene og samtlige hendelsestrær ble gjennomgått på workshopen. NGI kompletterte analysene etter workshop'en.

3.3 Sannsynligheter for vurderingsanalyser av dambrudd

3.3.1 Beskrivelse av sannsynligheter i ord og tall

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 skal baseres på etterprøvbare resonnementer. Konsensus oppnås gjennom diskusjon ved bruk av standardbeskrivelser av usikkerhet og sannsynlighet. Relasjonen mellom verbal beskrivelse av usikkerhet og sannsynligheter, som ble brukt på workshopen, er beskrevet i Vedlegg A. I dette vedlegget beskrives også tilsvarende relasjoner

for bruk av områdetall for sannsynligheter, som kan benyttes for å estimere usikkerheten i vurderingene ved Monte Carlo simulering.

3.3.2 Sannsynlighet for lekkasjeinitiering som kan føre til indre erosjon

Lekkasje som kan lede til lokal indre erosjon kan oppstå under normale operative laster. Drivkraften for indre erosjon er vannhøyde i magasinet. Derfor kan det være vanskelig å etablere årlige sannsynligheter for 'initiering av lokal lekkasje'.

For å gjøre et estimat av denne sannsynligheten benyttes derfor statistikk og lekkasjehistorikk for norske fyllingsdammer. I tillegg vurderes lekkasjemålinger og observasjoner som kan indikere lekkasjer ved Dam Viddalsvatn. Bakgrunnen for sannsynlighetsestimatene for lekkasjeinitiering ved Dam Viddalsvatn er gjennomgått i Vedlegg B.

Det skilles videre mellom lekkasje og normal gjennomstrømning i dammen. Vanngjennomstrømning er den forventede vannmengden som strømmer gjennom kjernen, teoretisk beregnet fra permeabiliteten i tetningskjernen. Når vannstrømningen blir vesentlig større enn forventet utfra en gjennomsnittlig permeabilitetsverdi betraktes det som en lekkasje.

4 Oversikt over risikoanalysene for Dam Viddalsvatn

4.1 Identifisering av bruddmekanismer

På workshopen, ble mekanismer og utløsningsfaktorer knyttet til potensielle svakheter i og rundt dammen og potensielle eksterne utløsningsfaktorer gjennomgått. De potensielle svakheter i og rundt dammen var:

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

De potensielle eksterne utløsningsfaktorer inkluderte:

- Flom: om vinter/vår, med mulig is og hardpakket snø som blokkerer overløpet.
- Jordskjelv. Sommer/høst, med ekstrem nedbør.
- Meteoritter og flystyrt.

For identifisering av de viktigste bruddmekanismene ble det sett på dammens historikk, tilstand, egenskaper og resultater av risikoanalysene utført i 1997. For Dam Viddalsvatn ble de viktigste bruddmekanismene («failure modes») og behov for rehabilitering ansett av workshop deltagerne å være relatert til indre erosjon og svekkelse av kjernen og fjellskred inn i magasinet med påfølgende flodbølge og mulig overtopping. Flom med mulig blokkering av overløp med is og hardpakket snø om vinteren ble diskutert men ansett som usannsynlig for Dam Viddalsvatn.

I tillegg ble det diskutert om skader på oppstrøms plastring kunne føre til brudd. Videre ble det diskutert om sprekker i bergfundament under kjernen og filter kunne føre til indre erosjon, kaviteter i kjernen, dannelse av synkehull og mulig dambrudd. Disse tilfellene ble også analysert med hendelsestre-analyser.

4.2 Aktuelle rehabiliteringstiltak

Ved vurdering av aktuelle rehabiliteringstiltak tok analysene utgangspunkt i en minimum løsning for rehabilitering. Minimum rehabiliteringsløsningen omfatter tiltak som uansett skal gjennomføres. Minimum rehabiliteringsløsning består av:

- Heving av kjernen (0,4 m) til kt. 931,9.
- Nytt kronevern, damkrone heves til kt. 936 (1.0 m heving).
- Nedstrøms skråning bygges på 7 m horisontalt i hele høyden.
- Ny plastring nedstrøms fra bermen og opp.
- Tiltak for bedret måling av lekkasjen; avledning av fremmedvann.

I analysene ble følgende rehabiliteringstiltak utover minimum løsningen vurdert:

- Ytterligere heving av kjernen med 1.6 m og damkrone med 1,0 m. Tiltaket kommer i tillegg til minimum rehabiliteringsløsningen definert over, dvs. totalt 2,0 m heving av kjernen og 2,0 m heving av damkronen.
- Avgraving av dammen ned til ca kt 923.5 og utbedring av morenekjerne og filter i de avgravde områdene. I analysene ble det vurdert både målrettet avgraving på steder det tidligere er registrert indre erosjon og synkehull (ca 7 til 20 m i dammens lengderetning) og avgraving i hele dammens lengderetning.
- Nye injiseringer.
- Innføring av et slissevegg gjennom morenekjernen.
- Ytterligere heving av kjernen og damkrone (som ovenfor) og målrettet avgraving av dammen ned til ca kt 923.5 og utbedring av morenekjerne og filter i de avgravde områdene.
- Ny plastring oppstrøms.
- Forbedret overvåkning med nye nedbørs- og temperaturmåling på dammen, vannføringsmåling i elven nedstrøms dammen, fiberkabel i toppdam (som dambruddsvarsling), temperatursensorer, etc.

Det ble spesielt sett på hvilke av de identifiserte brudmekanismene de ulike rehabiliteringstiltakene vil påvirke. Dette er oppsummert i neste delkapittel.

4.3 Prioritering av analysene

Forut for analysene er det gjort en vurdering av hvilke brudmekanismer de ulike rehabiliteringstiltakene kunne påvirke. Deretter ble det satt opp en prioritert liste over analyser for ulike kombinasjoner av brudmekanismer og rehabiliteringstiltak. Tabell 2 oppsummerer

de analysene som ble prioritert. Initierende årsaker og bruddmekanismer som ble diskutert, men som ble nedprioritert er listet i Tabell 3.

Tabell 2 Prioriterte analyser

Årsak	Prioriteringsbegrunnelse	Vurderte tiltak
Indre erosjon	<ul style="list-style-type: none"> – Tidligere hendelser med indre erosjon – Korfordelingen av filter – Kvaliteten av morene kjernen – Bruddmekanismer som omfattet indre erosjon ble identifisert som de mest kritiske i vurderingene som ble gjort i 1997. 	<p>Analysene omfatter minimum rehabiliteringsløsningen alene og kombinert med følgende tilleggs rehabiliteringstiltak:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ingen tiltak utover minimum- løsningen. – Ytterligere heving av kjernen (1,6 m) og damkrone (1,0 m). – Nye injiseringer. – Avgraving av dammen ned til ca kt. 923,5 i en avgrenset lengde og utbedring av morenekjerne og filter i de avgravde områdene. – Avgraving av dammen ned til ca kt. 923,5 i hele damlengde og utbedring av morenekjerne og filter i de avgravde områdene. – Innføring av slissevegg gjennom morenekjernen. – Forbedret overvåking
Fjellskred og flodbølge inn i magasinet	<ul style="list-style-type: none"> – Magasinet er langt og smalt og har bratte skråninger på hver side bestående primært av fyllitt. Fjellpartiene er derfor skredutsatt. – Øya som er synlig inne i magasinet kan være resultat av et stort skred ca. 10,000 år siden. – Flodbølge fra fjellskred kan føre til overtopping og ødeleggelse av oppstrøms- og nedstrøms skråning. – Kartlegging av Raudnosi, et fjellparti på Østsiden av Viddalsvatnet, avdekket sprekker i fjellet. – Volumet som står i fare for utglidning kan være mellom 1 og 2 mill. m³. – Derimot har fire radarmålingskampanjer rundt de kritiske fjellpartiene vist liten bevegelse i fjellområdet. 	<p>Analysene omfatter minimum rehabiliteringsløsningen alene og kombinert med følgende tilleggs rehabiliteringstiltak:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Overvåkningsprogram for bevegelser i fjellsiden – Ny plastrings oppstrøms
Bølgelast	<p>Bruddmekanismer som omfatter bølgelast vil ha positiv effekt av tiltaket "Ny oppstrøms plastring". Bilder fra oppstrøms plastring viser mye stor stein. Plastringen ser bra ut. Skråningen er derimot ikke plastret etter dagens standard. Derfor bør stabiliserende effekt av ny plastring vurderes.</p>	<p>Analysene omfatter minimum rehabiliteringsløsningen alene og kombinert utbedret oppstrøms plastring.</p>

Tabell 3 Nedprioriterte analyser

Årsak/bruddmekanisme	Begrunnelse for nedprioritering
Indre erosjon gjennom sprekker i bergfundamentet	Det ble gjort grundige injiseringsarbeider av bergfundamentet under bygging. Analyse av bruddmekanismen vil i liten grad bidra til avklaring omkring rehabiliteringsløsninger. Analysen ble satt på venteliste.
Flom kombinert med blokkering av overløp om vinteren/våren	Flomberegningene er konservative. Det er mye vann i systemet og menneskelige feil kan skje. Men analyse av menneskelige feil vil ikke bidra til avklaring omkring valg av rehabiliteringstiltak. Det ble ikke ansett som sannsynlig at overløpet vil blokkeres om vinteren, basert på tidligere erfaring ved snørike vintre. Bruddmekanismen får derfor lavere prioritet.
Lekkasje under dammen	Målinger med Willowstick kan indikere lekkasjevei under dammen. Undersøkelsene inneholder mange usikkerhetsfaktorer og betydelig lekkasjevei under dammen ble ansett som usannsynlig blant workshop deltagerne. Lekkasje under dammen som bruddmekanisme ble nedprioritert.
Islast på oppstrøms plastring	Magasinet vil ha is på vinterstid, men på grunn av stor gjennomstrømning er vanligvis ikke isdekket like stort som for sammenlignbare magasiner. Det er derimot ikke god dokumentasjon på det. Magasinnivået er vanligvis lavt på vinteren.
Jordskjelv	De nyeste beregninger av jordskjelvlaster er betydelig lavere enn lastene som ble benyttet i risikoanalysene i 1997. Den gang ble brudds sannsynligheten under jordskjelv vurdert til å være 10^{-5} /år. Brudds sannsynligheter forårsaket av jordskjelvlaster for dagens dam (som er utbedret siden 1997) vil derfor være mye mindre enn 10^{-5} /år, selv uten minimum rehabiliteringsløsningen.

5 Resultater av analysene for Dam Viddalsvatn

5.1 Oversikt over analysene

Tretten hendelsetre-analyser eller vurderinger ble gjennomført for Dam Viddalsvatn (Tabell4). Alle analyser ble gjennomført med minimum rehabiliteringsløsning som består av:

- Heving av kjernen (0,4 m) til kt. 931,9
- Nytt kronevern, damkrone heves til kt 936 (1,0 m heving)
- Nedstrøms skråning bygges på 7 m horisontalt i hele høyden
- Ny plastring av nedstrøms skråning fra bermen og opp
- Tiltak for bedret måling av lekkasjen; avledning av fremmedvann

Tabell 4 Gjennomførte vurderinger for Dam Viddalsvatn

Vurdering	Mekanisme/årsak som kan føre til dambrudd, med forskjellige rehabiliteringstiltak
A	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, 1. iterasjon
B	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, 2. iterasjon
C	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, 3. iterasjon. Forutsetter fastlagt grenseverdi for lekkasje for rutinemessig senkning av magasinet, dvs. magasinet tappes ned ved lekkasjer over dette grensenivået.
D	Indre erosjon med ytterligere heving av kjernen (1,6 m) og damkronen (1,0 m)
E	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning og med injisering
F	Indre erosjon og målrettet avgraving ned til kt. 923,5 ca.7m i dammens lengderetning i problemområdene, samt evt. utbedring av morenekjerne og filter i disse områdene. Ellers minimum rehabiliterings løsning.
G	Indre erosjon og avgraving ned til kt. 923 langs hele dammen, samt utbedring av morenekjerne og filter over kt. 923.5. Ellers minimum rehabiliterings løsning.
H	Indre erosjon med innføring av slissevegg gjennom morenekjernen, med minimum rehabiliteringsløsning.
I	Indre erosjon med forbedret overvåking (nye sensorer, fiberkabler etc) med minimum rehabiliterings løsning.
J	Indre erosjon med ytterligere heving av kjernen (1,6 m) og damkronen (1,0 m) og målrettet avgraving ned til kt. 923,5 ca.7m i dammens lengderetning i problemområdene, samt evt. utbedring av morenekjerne og filter i disse områdene. Ellers minimum rehabiliterings løsning.
K	Fjellskred inn i magasinet som gir flodbølge og overtopping, med minimum rehabiliteringsløsning.
L	Fjellskred inn i magasinet som gir flodbølge og overtopping, med minimum rehabiliteringsløsning og stabiliserende effekt av ny plastring på oppstrøms side.
M	Bølgelast på oppstrøms skråning med minimum rehabiliteringsløsning.
N	Bølgelast på oppstrøms skråning med minimum rehabiliteringsløsning og effekt av ny plastring på oppstrøms side.

Analysene ble i hovedsak gjennomført i form av hendelsestre-analyser. Hendelsestrærne med minimum rehabiliteringsløsning ble først etablert, deretter besto videre arbeid i å vurdere og kvantifisere effekten av rehabiliteringstiltak på de ulike hendelsene i disse trærne. For enkelte av analysene var det mer hensiktsmessig med en diskusjon omkring effekter av det rehabiliteringstiltaket uten å kvantifisere ytterligere bruddsannsynlighet.

5.2 Beregnede årlige bruddsannsynligheter

5.2.1 Bruddsannsynlighet fra hver hendelsestre-analyse

Tabell 5 oppsummerer resultatene fra både hendelsestre-analysene og diskusjonene. Vedlegg C beskriver hver analyse og presenterer hendelsestrærne grafisk med en forklaringstabell for sannsynlighetene som er brukt i analysene.

Tabell 5 Resultater fra bruddsannsynlighets-analyser

Nr	Hendelsestre	Innhold i analysen	Årlig bruddsannsynlighet
Indre erosjon			
HT1	Indre erosjon, iterasjon 1	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning*, 1. iterasjon	$1,3 \cdot 10^{-4}$ /år
HT2	Indre erosjon, iterasjon 2	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning*, 2. iterasjon	$1,4 \cdot 10^{-5}$ /år
HT3	Indre erosjon, iterasjon 3	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning*, 3. iterasjon. Forutsetter fastlagt grenseverdi for lekkasje for rutinemessig senkning av magasinet	$1,5 \cdot 10^{-5}$ /år
HT4	Indre erosjon og ytterligere heving	Indre erosjon, minimum rehabiliteringsløsning*, og ytterligere heving av kjernen (1,6 m) og topp dam (1,0 m)	$7,4 \cdot 10^{-6}$ /år
---	Indre erosjon og injisering	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning* og med injisering <i>Diskusjon:</i> Bruddsannsynlighet blir omtrent uendret sammenlignet med HT4. En kunne kanskje senke årlige sannsynlighet for initiering av lekkasje, men injisering brukes primært for å løse en lekkasjesituasjon, ikke som forebyggende tiltak.	ca. $7,4 \cdot 10^{-6}$ /år
HT5	Indre erosjon og begrenset avgraving ned til kt. 923,5	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning* og målrettet lokal avgraving ned til kt. 923,5 ca. 7m i dammens lengderetning i "problemområdene", samt utbedring av morenekjerne og filter i disse områdene. Self-healing som for Anayse HT3.	$3,0 \cdot 10^{-6}$ /år
HT6	Indre erosjon og avgraving ned til kt. 923,5 langs hele dammen	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning* og avgraving ned til kt. 923,5 langs hele dammen, og utbedring av morenekjerne og filter over kt. 923,5. <i>Diskusjon:</i> Liten reduksjon av bruddsannsynlighet sammenliknet med HT5.	$1,8 \cdot 10^{-6}$ /år
HT7	Indre erosjon og slissevegg	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning* og med innføring av slissevegg gjennom morenekjernen. <i>Diskusjon:</i> Det var delte meninger på workshopen om denne virkelig burde komme lavere ut enn ved total avgraving (Analyse HT6). Videre drøfting resulterte i at analyser HT6 og HT7 har omtrent like sannsynligheter.	$8,9 \cdot 10^{-8}$ /år <i>Etter diskusjon ble bruddsannsynligheten vurdert til ca. $1,8 \cdot 10^{-6}$/år</i>
---	Indre erosjon og forbedret overvåking	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning* og forbedret instrumentering. <i>Diskusjon:</i> Med reduksjon av fremmedvann inn i lekkasjemåleanlegget, nedbørs- og temperaturmåling på dammen, vannføringsmåling i elva nedstrøms dammen, fiberkabel i topp dam (som dambruddsvarsling), temperatursensorer i filter for å oppdage	ca. $1,5 \cdot 10^{-5}$ /år

Nr	Hendelsestre	Innhold i analysen	Årlig bruddsannsynlighet
		lekkasje/lekkasjeveien, etc. vurderes allikevel bruddsannsynligheten omtrent uendret.	
HT8	Indre erosjon og ytterligere heving og begrenset avgraving ned til kt. 923,5	Indre erosjon med rehabiliteringstiltak fra både hendelsetre HT4 og HT5: Indre erosjon, minimum rehabiliteringsløsning*, og ytterligere heving av kjernen (1,6 m) og topp dam (1,0 m), og målrettet avgraving ned til kt. 923,5, ca. 7m i dammens lengderetning i "problemområdene", samt utbedring av morenekjerne og filter i disse områdene. I forhold til HT4 og HT5 analysene er høyere (mer konservative) sannsynlighetsverdier brukt for vurdering av "ikke-self-healing" lekkasje. Den konservative sannsynlighetsverdien for vurderingen av synkehullsdybde er beholdt den samme som i HT4 og HT5 analysene.	$2,2 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
Fjellskred inn i magasinet			
HT9	Fjellskred og flodbølge	Fjellskred inn i magasinet med påfølgende flodbølge og dam overtopping, med minimum rehabiliteringsløsning*	$6,6 \cdot 10^{-7}/\text{år}$
---	Fjellskred og påfølgende flodbølge, ny plastring	Fjellskred i magasinet med påfølgende flodbølge og dam overtopping, med minimum rehabiliteringsløsning* og forbedret oppstrøms plastring <i>Diskusjon:</i> Sannsynlighet blir vel redusert; ny plastring blir av liten betydning for så små bruddsannsynligheter. Siden sannsynligheten allerede ligger så lavt blir den absolutte sannsynlighetsreduksjonen svært liten	ca. $6,6 \cdot 10^{-7}/\text{år}$
Bølgelast på oppstrøms plastring			
HT10	Bølgelast på oppstrøms skråning	Bølgelast som kan skade oppstrøms skråning, med minimum rehabiliteringsløsning*.	$\ll 5,6 \cdot 10^{-7}/\text{år}$
HT11	Bølgelast på ny oppstrøms plastring	Bølgelast som kan skade oppstrøms skråning, med minimum rehabiliteringsløsning* og effekt av ny plastring på oppstrøms side	$\ll 2,8 \cdot 10^{-8}/\text{år}$

*Minimum rehabiliteringsløsning består av:

- Heving av kjernen (0,4 m) til kt 931,9
- Nytt kronevern, damkrone heves til kt 936 (1,0 m heving)
- Nedstrøms skråning bygges på 7 m horisontalt i hele høyden
- Ny plastring av nedstrøms skråning fra bermen og opp
- Tiltak for bedret måling av lekkasjen; avledning av fremmedvann

5.2.2 Total bruddsannsynlighet

Den totale bruddsannsynligheten er summen av sannsynlighetene for alle bruddmekanismer og alle bruddårsak. For dam Viddalsvatn er den totale bruddsannsynligheten summen av sannsynlighetene for brudd forårsaket av indre erosjon, fjellskred i magasinet og bølgelast på

oppstrøms skråning. Bruddårsaker og utløsningsmekanismer som ikke ble analysert under workshopen eller i denne rapporten anses å ha enda lavere årlige bruddsannsynligheter og vil dermed ikke bidra til en økning i den totale årlige bruddsannsynlighet.

Bruddsannsynligheter for fem forskjellige rehabiliteringsalternativer er vist i Tabell 6a og 6b for henholdsvis indre erosjon og for alle mulige bruddmekanismer.

Indre erosjon dominerer de andre bruddmekanismer. Derfor er de totale bruddsannsynligheter tilnærmet de samme som de beregnede bruddsannsynlighetene for indre erosjon.

Tabell 6a Bruddsannsynlighet (indre erosjon) for fem rehabiliteringstiltak alternativer

Rehabiliteringstiltak	Hendelsetre	Bruddsannsynlighet
Minimum rehabiliteringsløsning	HT3	$1,5 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
Minimum rehabiliteringsløsning og ytterligere heving av kjernen og toppdam	HT4	$7,4 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
Minimum rehabiliteringsløsning og målrettet lokal avgravning ned til kt. 923,5 ca. 7m i dammens lengderetning i "problemområdene"	HT5	$3,0 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
Minimum rehabiliteringsløsning og ytterligere heving av kjernen og toppdam og målrettet lokal avgravning	HT8	$2,2 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
Minimum rehabiliteringsløsning og avgravning langs hele dammen	HT6	$1,5 \cdot 10^{-6}/\text{år}$

Tabell 6b Total bruddsannsynlighet for fem rehabiliteringstiltak alternativer

Rehabiliteringstiltak	Hendelsetrær for total årlig bruddsannsynlighet	Total bruddsannsynlighet
Minimum rehabiliteringsløsning	HT3 + HT9 + HT11	$1,6 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
Minimum rehabiliteringsløsning og ytterligere heving av kjernen og toppdam	HT4 + HT9 + HT11	$8,0 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
Minimum rehabiliteringsløsning og målrettet lokal avgravning ned til kt. 923,5 ca. 7m i dammens lengderetning i "problemområdene"	HT5 + HT9 + HT11	$3,6 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
Minimum rehabiliteringsløsning og ytterligere heving av kjernen og toppdam og målrettet lokal avgravning	HT8 + HT9 + HT11	$2,8 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
Minimum rehabiliteringsløsning og avgravning langs hele dammen	HT6 + HT9 + HT11	$2,1 \cdot 10^{-6}/\text{år}$

6 Konsekvenser ved dambrudd

Konsekvensene av dambrudd er store for dam Viddalsvatn. Bebyggelse nedstrøms Dam Viddalsvatn, hvor vannstandsstigning blir 1 m eller mer, omfatter totalt 112 bolighus og 5

barnehager eller skoler, med totalt 148 berørte personer i følge en DNV studie fra 1998. Berørte veier omfatter E16, Fv 50, Fv 242 og Fv 243.

Overtopping kombinert med 1000-årsflom og brudd pga. indre erosjon (rørerosjonsbrudd) kombinert med middelflom i Dam Viddalsvatn gir maksimalvannføringer på hhv. ca 55 000 og 65 000 m³/s ut av dammen. I Aurlandsdalen nedenfor Vassbygdvatnet blir maksimalvannføringen redusert noe til ca. 50 000 m³/s i begge tilfeller, noe som gir vannstandstigninger på 10 til 20 m. Vannet stiger kraftig i Vassbygdvatnet, så vannet skyller opp i Vassbygdi. Bølgefronten ankommer Vassbygdi etter 20 minutter og Aurlandsvangen etter 40 minutter. Bølgetoppen når Aurlandsvangen etter en drøy time (NVK Vandbygningkontoret, 2003).

DNV(1998) beregnet konsekvensene av et eventuelt dambrudd for befolkningen som bor nedstrøms en dam. DNV estimerte et antall på 260 eksponerte personer. DNV beregnet "Probability of Loss of Life" (PLL) for fem tilfeller for Dam Viddalsvatn (Tabell 7):

- Tilfelle 1. Varsling og beredskap i Aurlandsvangen; området rundt Vassbygdvatn får et «lydvarsel».
- Tilfelle 2. Som i Tilfelle 1, og befolkningen har forhåndskunnskap om hvor og hvordan de skal evakuere når varsel om dambrudd blir gitt.
- Tilfelle 3. Én-times varsel (dvs driftssentralen varsler politiet én (1) time før brudd skjer).
- Tilfelle 4. Som i Tilfelle 3, men med to (2) timers forvarsel.
- Tilfelle 5. Som i Tilfelle 1, med det er et "tyfonanlegg" installert for varsling av dambrudd.

Tabell 7a "Probability of Loss of Life" (PLL) og veiet antall omkomne for Dam Viddalsvatn (DnV 1998)

Varsling-tilfelle	Probability of Loss of Life (PLL)	Veiet antall omkomne	% omkomne av eksponert befolkning
1	0.12	200	77%
2	0.09	158	61%
3	0.09	15	6%
4	0.02	3	1%
5	0.06	92	35%

I DNVs studie kan antall omkomne reduseres fra 200 to 3 avhengig av type varsling som kan gis til befolkningen. DNV studien antall eksponerte på 260 er derimot ikke representativ for dagens situasjon.

I en senere klassifiseringsanalyse utført for E-CO Energi konkluderte Norconsult i 2012 at antall berørte boligeqvivalenter for Dam Viddalsvatn er 251, det vil si 600 berørte personer, hvis man bruker 2,4 personer pr boligeqvivalent. Dette antallet tar ikke hensyn til befolkningsgruppene, varslingstid eller oppholdstid i boligenhetene. (DNVs studie tok hensyn til befolkningsgruppene og varslingstid). En vurdering av befolkningsgruppe og oppholdstid vil kunne imidlertid redusere sannsynlighet for og potensielt antall omkomne.

I vurdering av risiko knytte til Dam Viddalsvatn vil antall eksponerte fra den nyeste klassifiseringsanalyse av Norconsult 600 personer, bli brukt. Å bruke maksimum antall eksponerte person som potensielt antall omkomne er veldig konservativt.

I vurderingen av antall omkomne er varsling Tilfelle 1 og Tilfelle 3 (én-times varsel) i Tabell 7a vurdert. Potensielle antall omkomne vil da være 462 for Tilfelle1 og 36 for Tilfelle 3 hvis en bruker 600 eksponerte personer som utgangspunkt.

Tabell 7b "Probability of Loss of Life" (PLL) og veiet antall omkomne for Dam Viddalsvatn (2012 tall)

Varsling-tilfelle	Probability of Loss of Life (PLL)	Veiet antall omkomne
1	0.12	462
3	0.09	36

Tilfelle 3 er valgt av følgende grunn: NVE, i pågående saksgang på Viddalsvatn, viser til at et brudd vil utvikle seg på rett i overkant av en time (med Fröhlichs formel for overtopping). I hendelsestre-analysene er det antatt at dersom E-CO ikke har oppfattet økt lekkasje før man begynner på en konkret utvikling av et brudd, vil dette ikke skje når dammen overtoppes heller. Det vil komme en ny mulighet når vannføringen ut av bruddet blir så stor at dette kan oppdages visuelt i Vassbygdi/friluftsanlegg Aurland 1, men da er bruddutviklingen kommet i gang. Med en slik utvikling estimeres at tid for varsling kan settes til maksimum en time (G. Mathismoen, personlig kommunikasjon pr epost 13.mai 2018).

7 Risikovurdering

7.1 Beregnede årlige bruddsannsynligheter

Basert på diskusjonene på workshopen og de beregnede årlige bruddsannsynligheter trekkes følgende konklusjoner om bruddmekanismer og rehabiliteringstiltak.

7.1.1 Bruddsannsynligheter for forskjellige mekanismer

- Bruddmekanismer som omfatter indre erosjon er de mest kritiske. Den mest representative beregnede årlige bruddsannsynlighet forårsaket av indre erosjon etter at minimum rehabiliteringsløsning har blitt implementert ligger på $1,5 \cdot 10^{-5}$ /år. Brudd forårsaket av indre erosjon dominerer den beregnede totale buddsannsynlighet for Dam Viddalsvatn.
- Beregnet bruddsannsynlighet under et fjellskred inn i magasinet med påfølgende flodbølge, også med minimum rehabiliteringsløsning, ligger på $6,6 \cdot 10^{-7}$ /år, og er ca. 25 ganger mindre sannsynlig enn et brudd som skyldes indre erosjon. Årsaken til lavere bruddsannsynlighet enn for indre erosjon er den estimerte hyppigheten av skred over 200.000 m³ (20%), den pågående overvåking av relevante fjellpartier og resultater fra radar observasjoner i 2016 og 2017. Det er allikevel usikkerheter i estimatene. Det anbefales at INSAR data fra det

nasjonale InSAR kunnskapssenter ved NGU brukes til årlig eller halvårlig overvåking av skråningene rundt Dam Viddalsvatn.

- Beregnet bruddsannsynlighet knyttet til bølbelast som skader den eksisterende oppstrøms skråningen, med innført minimum rehabiliteringsløsning, er meget lav ($\ll 5.6 \cdot 10^{-7}/\text{år}$). Ny plastring på oppstrøms side vil føre til en liten reduksjon i bruddsannsynligheten. Rehabilitering av oppstrøms plastring allikevel ikke som et nødvendig eller kostnadseffektivt risikoreduserende rehabiliteringstiltak, selv om oppstrøms plastringen ikke tilfredsstillende dagens krav.

7.1.2 Indre erosjon og rehabiliteringstiltak

- Tiltaket "Ytterligere heving av kjernen og damkronen" reduserer bruddsannsynligheten knyttet til indre erosjon med en faktor på 2 og dermed bidrar til økt sikkerhet for dammen. (Analyse HT4 sammenliknet med analyse HT3).
- Tiltaket "Målrettet lokal avgraving i dammens lengderetning ned til kt. 923.5" reduserer bruddsannsynligheten knyttet til indre erosjon med en faktor på 5 og dermed bidrar til økt sikkerhet for dammen. (Analyse HT5 sammenliknet med analyse HT3).
- Tiltaket "Ytterligere heving av kjernen og damkronen" **og** Tiltaket "Målrettet lokal avgraving i dammens lengderetning ned til kt 923.5" med noe mer konservative estimater for "self-healing" etter lekkasje reduserer bruddsannsynligheten knyttet til indre erosjon med en faktor på 7 og dermed bidrar til økt sikkerhet for dammen. (Analyse HT8 sammenliknet med analyse HT3).
- Tiltaket "Avgraving langs hele damlengden" reduserer bruddsannsynligheten knyttet til indre erosjon med en faktor på ca. 10 relativt til den minimum rehabiliteringsløsning. (Analyse HT6 sammenliknet med analyse HT3). Hvis man tar i betraktning omfanget av tiltaket, bør man vurdere om tiltaket er en kostnadseffektiv måte for å redusere risikoen, sammenliknet med den målrettede lokal avgraving.
- Tiltaket "Injisering" vil også kunne redusere bruddsannsynligheten knyttet til indre erosjon med en faktor på 2 (som tiltaket "ytterligere heving av kronen og kjernen"). Allikevel på grunn av usikkerheter i selve injiseringsprosessen, bør injisering vurderes brukt primært for å løse en lekkagesituasjon og helst ikke som et forebyggende tiltak.
- Tiltaket "Slissevegg" vil kunne redusere bruddsannsynligheten knyttet til indre erosjon med en faktor på ca. 10 relativt til den minimum rehabiliteringsløsning (Analyse HT6 sammenliknet med analyse HT3), noe som tilsvarer risikoredusering som for "Avgraving langs hele damlengden" tiltaket. Her også, hvis man tar i betraktning omfanget av tiltaket, bør man vurdere om tiltaket er en kostnadseffektiv måte for å redusere risikoen.

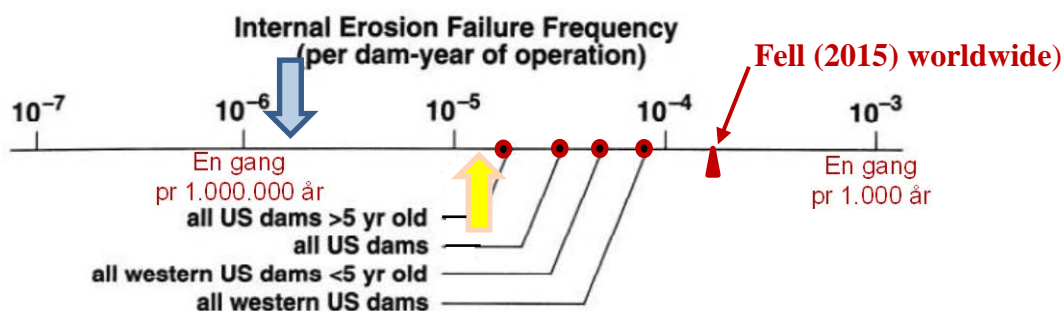
7.1.3 Sammenligning med bruddsannsynlighet for andre dammer

Med minimum løsningen for rehabilitering er den beregnede bruddsannsynlighet som skyldes indre erosjon for Dam Viddalsvatn $1,5 \cdot 10^{-5}/\text{år}$. Dette er en lavere bruddsannsynlighet enn det som er observert for andre fyllingsdammer på verdens basis. Dette er illustrert i Figur 3.

- 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 på grunn av indre erosjon mellom 3 og $9 \cdot 10^{-5}/\text{år}$.
- Fell (2015) rapporterte statistikk tall for fyllingsdammer fra 1800 til 1986, basert på Foster et al. (2000). Antall dammer i databasen er 11192 "store" dammer¹. Fell (2015) beregnet en årlig bruddsannsynlighet fra observasjoner i samme perioden, år 1800 til 1986. Bruddsannsynligheten etter først fylling av magasinet er på $2 \cdot 10^{-4}/\text{år}$. Fells årlige bruddsannsynlighet (også vist i Figur 3) ligger høyere enn ICOLD statistikken i Figur 3.

Figur 3 viser årlige bruddsannsynligheter for Dam Viddalsvatn med bruddsannsynlighet for andre dammer i verden. Gul pil viser årlig bruddsannsynlighet for Dam Viddalsvatn med minimum løsningen for rehabilitering (analyse HT3), og blå pil viser årlig bruddsannsynlighet for Dam Viddalsvatn med minimum rehabiliteringsløsning **og** ytterligere heving av kjernen og toppdam **og** målrettet lokal avgravning ned til kt. 923,5 ca. 7m i dammens lengderetning i "problemområdene" (analyse HT8). Tallene for Dam Viddalsvatn som er vist i Figur 3 er hentet fra Tabell 6a.

Et utvalg av flere av Fells' statistikk tall er reproduisert i Tabell 8, med andel brudd og uønskede hendelser (i prosent) i snitt for forskjellige bruddmekanismer og til forskjellige tider i en dam levetid. Statistikken viser at ca. 67% av dambrudd 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. Statistikken viser også at det er mye oftere brudd i mindre dammer (mindre enn 30 m høy) enn i de høye dammer.



Figur 3. Indre erosjon: Sammenligning av Dam Viddalsvatns årlig bruddsannsynlighet med bruddsannsynlighet for andre dammer; Minimum rehabiliteringsløsning vises med gul pil; Minimum rehabiliteringsløsning **og** ytterligere heving av kjernen og toppdam **og** målrettet lokal avgravning vises med blå pil.

¹ I henhold til ICOLDS definisjon for "store dammer" (damhøyde ≥ 15 m).

Tabell 8. 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 st fill.	0-5yrs	>5yrs	Constr.	1 st 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

1st fill. er under første fylling av reservoaret

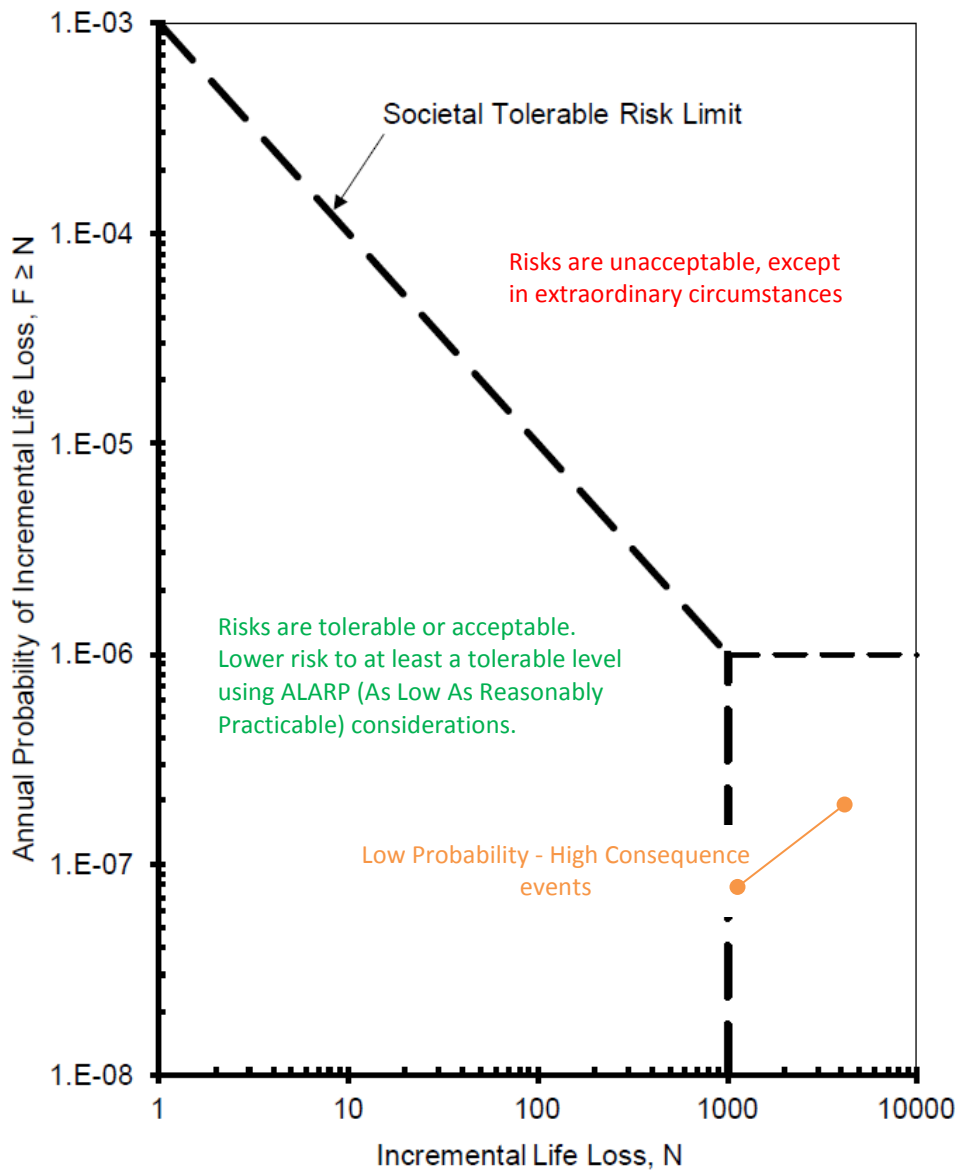
0-5 yrs er i de første 5 operative år, etter første fylling

>5 yrs er etter de første 5 operative år.

7.2 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 4 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.

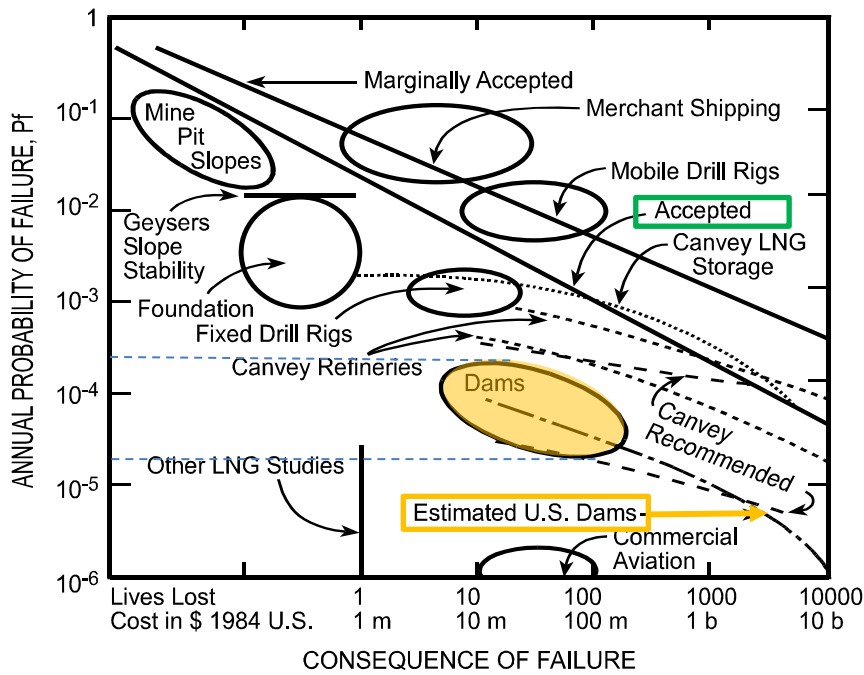


Figur 4. Anbefalte risikoakseptkriterier for samfunnsmessig risiko (USACE, 2014).

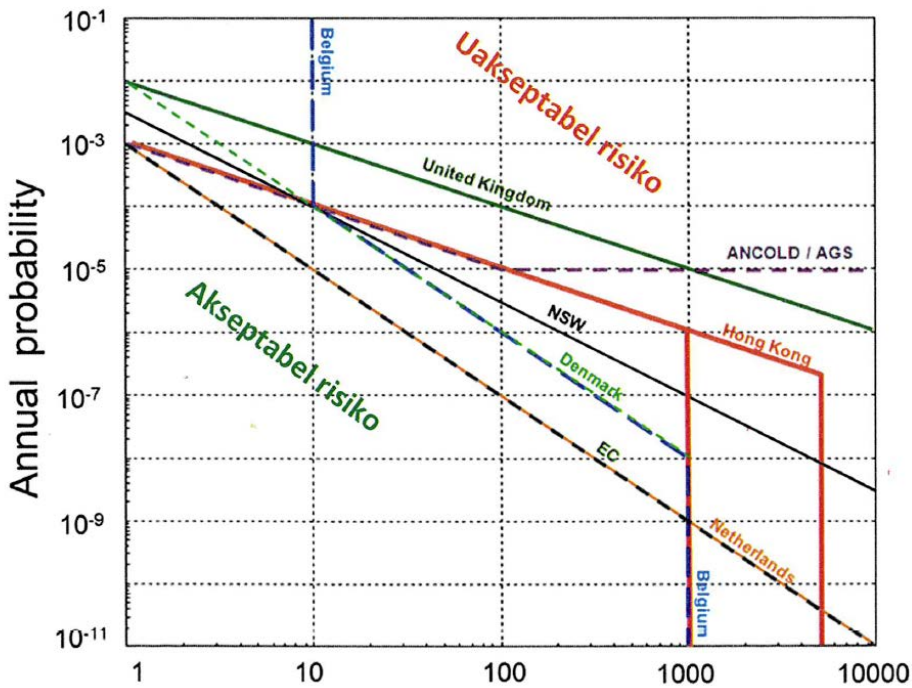
I Norge finnes det ikke risiko-krav for dammer. En sannsynlighet på 10^{-4} /år er en mye brukt øvre grense for akseptabel risiko for 10 omkomne i utlandet, og i offshore industrien i Norge.

USACE (2014) i Figur 4 setter 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 5 viser de aller første (1984) anbefalte akseptabel-risiko kurver, med en vurdering av hvor i diagrammet plasseres forskjellige strukturtyper og hendelser.



Figur 5. Risikoaksept for samfunnsmessig risiko (Whitman, 1984).



Figur 6. Risikoaksept for samfunnsmessig risiko. Sammenligning av krav i forskjellige land.

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".

Figur 6 samler eksisterende krav i flere land, pr dagens dato. Risikoverdiene som er vist i Figur 4, 5 og 6 er mye lavere enn "risikoen ved å leve", for eksempel under eksponering fra naturfarer eller andre menneske-skapte farer, drive enkelte sportslige aktiviteter, eller å kjøre bil.

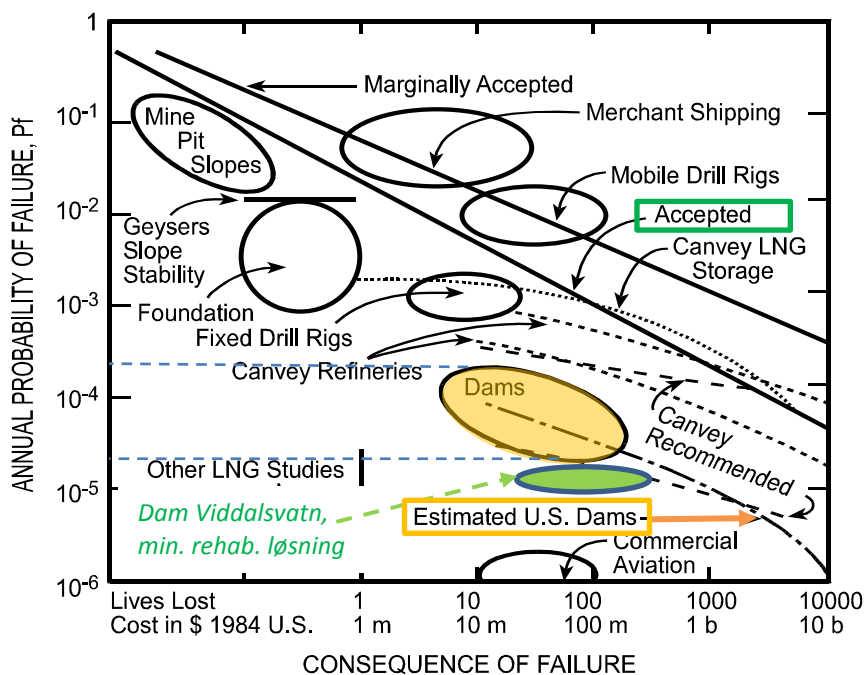
Alle tre risikodiagrammer er brukt i neste avsnitt for å vurdere risikoen knyttet til Dam Viddalsvatn.

7.3 Risikobilde på Dam Viddalsvatn

Årlig bruddsannsynlighet og bruddkonsekvens uttrykt som et mulig (potensielt) antall omkomne er sammenlignet med de tre risikodiagrammer med "internasjonale krav" i Figur 7, 8, og 9. Bruddsannsynlighetstall for Dam Viddalsvatn i disse tre figurer er hentet fra Tabell 6a og 6b.

7.3.1 Whitmans (1984) risikodiagram

Figur 7 viser at Dam Viddalsvatn (grønn ellipse) med minimum rehabiliteringsløsning ligger i den akseptable risikosonen på risikodiagrammet. Ellipsen dekker 36 til 462 omkomne (Kapittel 6, Tilfelle 1 og Tilfelle 3), som er det mest pessimistiske anslag på antall omkomne. Høyt antall omkomne tilsvarer uten varsling, lavt antall omkomne tilsvarer én-time varsling.



Figur 7. Risiko for Dam Viddalsvatn (grønn ellipse) i Whitmans (1984) risikodiagram.

7.3.2 USACE (2014) diagram

Figur 8 viser risikoen for Dam Viddalsvatn på USACEs risikodiagrammet. Ellipsene i diagrammet viser risikoen for Dam Viddalsvatn for fem rehabiliterings situasjoner:

- Minimum rehabiliteringsløsning.
- Minimum rehabiliteringsløsning **og** ytterligere heving av kjernen med 1.6 m og damkrone med 1,0 m, i tillegg til minimum rehabiliteringsløsningen.
- Minimums rehabiliteringsløsning **og** målrettet lokal avgraving av dammen ned til ca kt 923.5 og utbedring av morenekjerne og filter i de avgravde områdene på steder det tidligere er registrert indre erosjon og synkehull (ca. 7 til 20 m i dammens lengderetning).
- Minimum rehabiliteringsløsning **og** ytterligere heving av kjernen med 1.6 m og damkrone med 1,0 m, i tillegg til minimum rehabiliteringsløsningen **og** målrettet lokal avgraving av dammen ned til ca kt 923.5 og utbedring av morenekjerne og filter i de avgravde områdene på steder det tidligere er registrert indre erosjon og synkehull (ca. 7 til 20 m i dammens lengderetning).
- Minimum rehabiliteringsløsning **og** avgraving av dammen ned til ca kt 923.5 og utbedring av morenekjerne og filter i de avgravde områdene i hele dammens lengderetning.

Risikobildet under indre erosjon bruddmekanisme

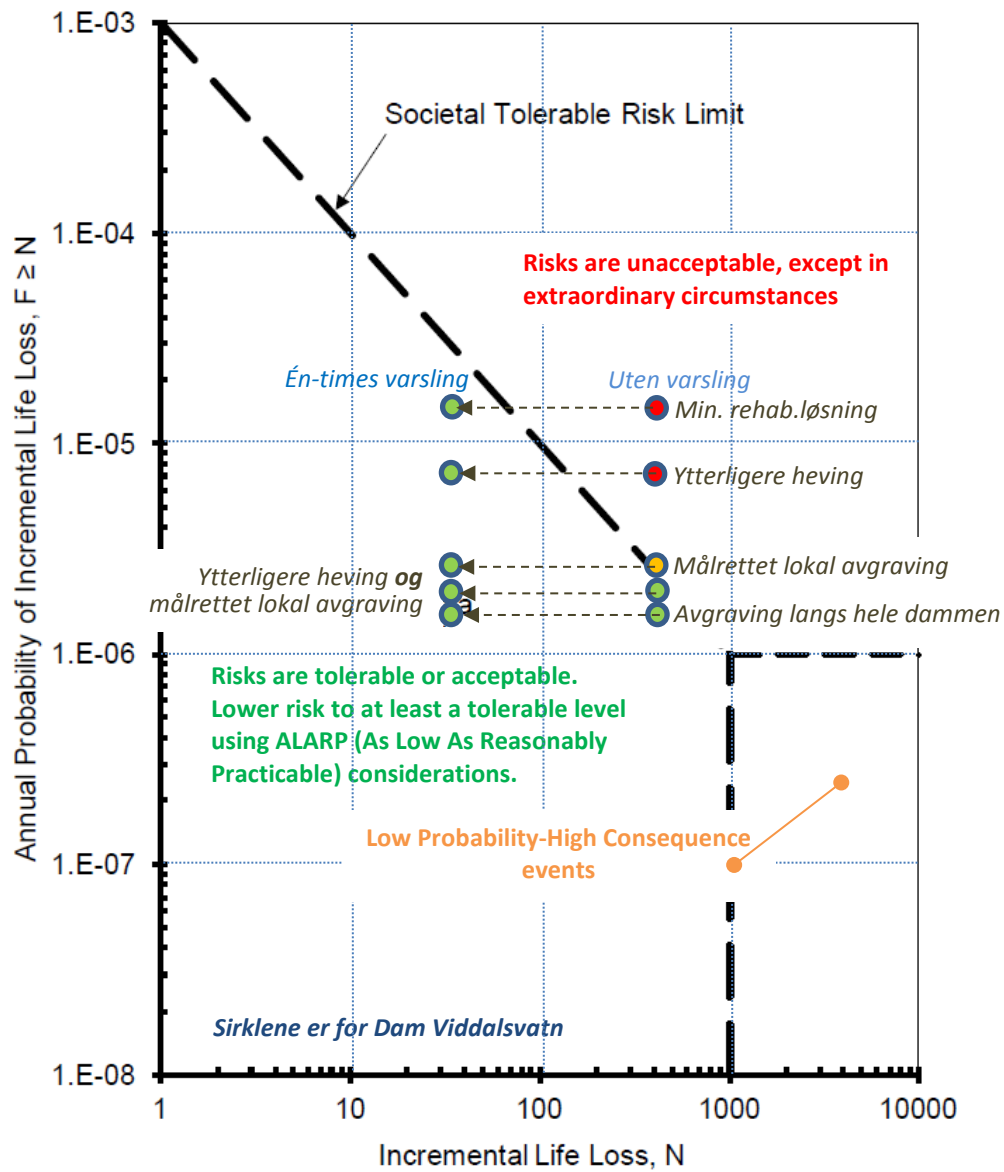
Indre erosjon er den dominerende bruddmekanisme. Figur 8a gir risikobildet for indre erosjon tilfellet. Sirklene i figuren representerer Dam Viddalsvatn for 462 omkomne (Kapittel 6, varsling-tilfelle 1) og for 36 omkomne (Kapittel 6, varsling-tilfelle 3). Fargen på sirklene indikerer følgende: Rødt: "Uakseptabel" risiko; Grønn: "Akseptabel" risiko; Oransje: "Mellom uakseptabel og akseptabel risiko, bør vurderes nøyere". Med en beregnet bruddsannsynlighet for Dam Viddalsvatn med minimum rehabiliteringsløsning på $1,5 \cdot 10^{-5}$ /år og de beregnede konsekvensene på potensielt 462 omkomne ligger Dam Viddalsvatn i området uakseptabel risiko (Figur 8). Med én-times varsling, som er et mer realistisk tilfelle, er risikoen akseptabel.

Risikobilde under alle bruddmekanismer samlet

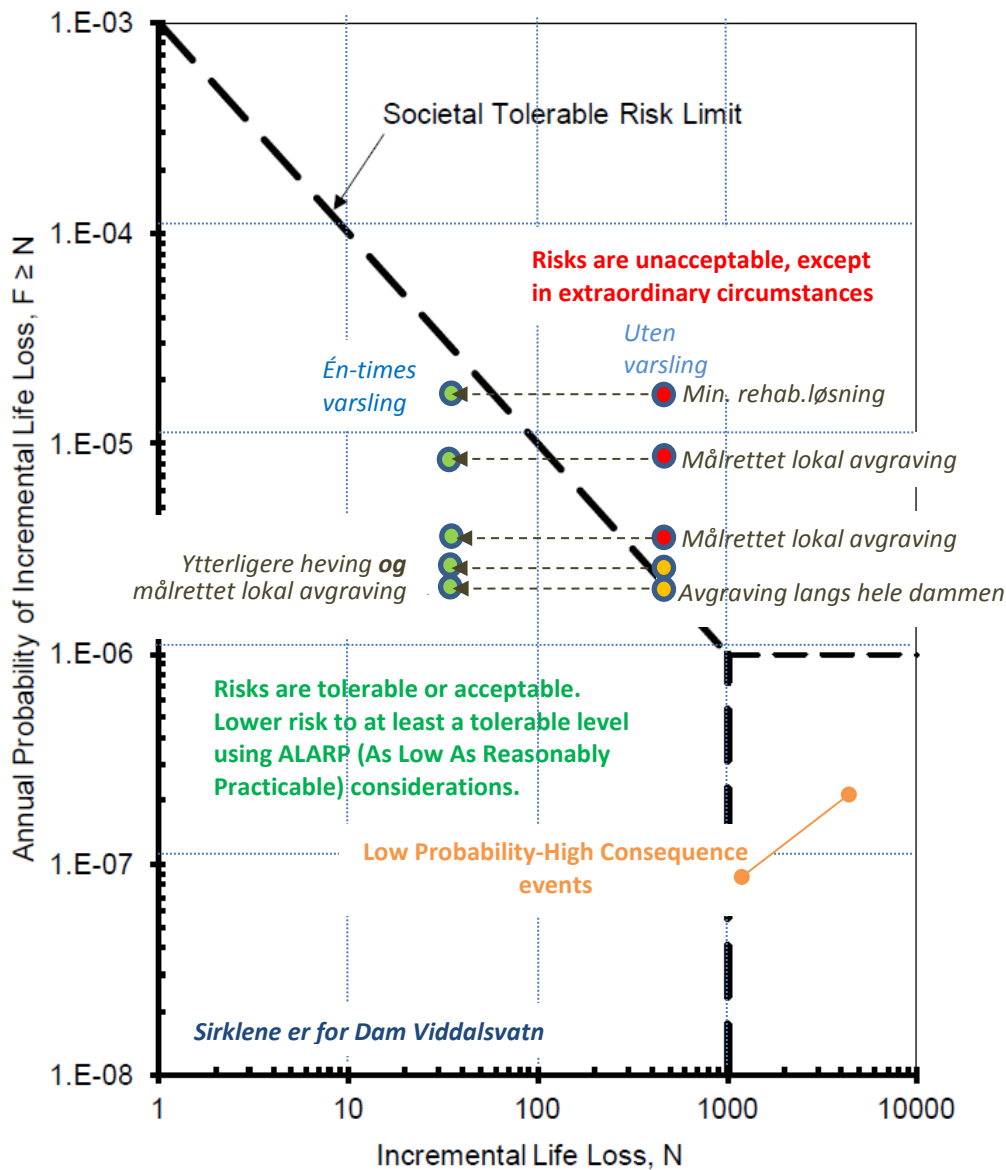
Figur 8b gir risikobildet for alle bruddmekanismer samlet. Sirklene i figuren representerer Dam Viddalsvatn for 462 omkomne (Kapittel 6, varsling-tilfelle 1) og for 36 omkomne (Kapittel 6, varsling-tilfelle 3). Risikobildet er nesten likt bildet for indre erosjon mekanismen.

Risikoreduserende effekt av varsling

Risikoredusering effekten for hver rehabiliteringstiltak utover minimum rehabiliteringsløsning er klart vist i risikobildet i Figur 8a og b. Risikoen er akseptabel med hver av rehabiliterings-tiltakene som er vist. Effekt av varsling er betydelig med hensyn til risikoredusering. Med én-times varsling blir risikoen lavere, og akseptable for alle for alle rehabiliterings situasjoner, også for den minimum rehabiliteringsløsning. Man kommer til samme konklusjon er hvis antall eksponerte personer er halvert (Kapittel 6).



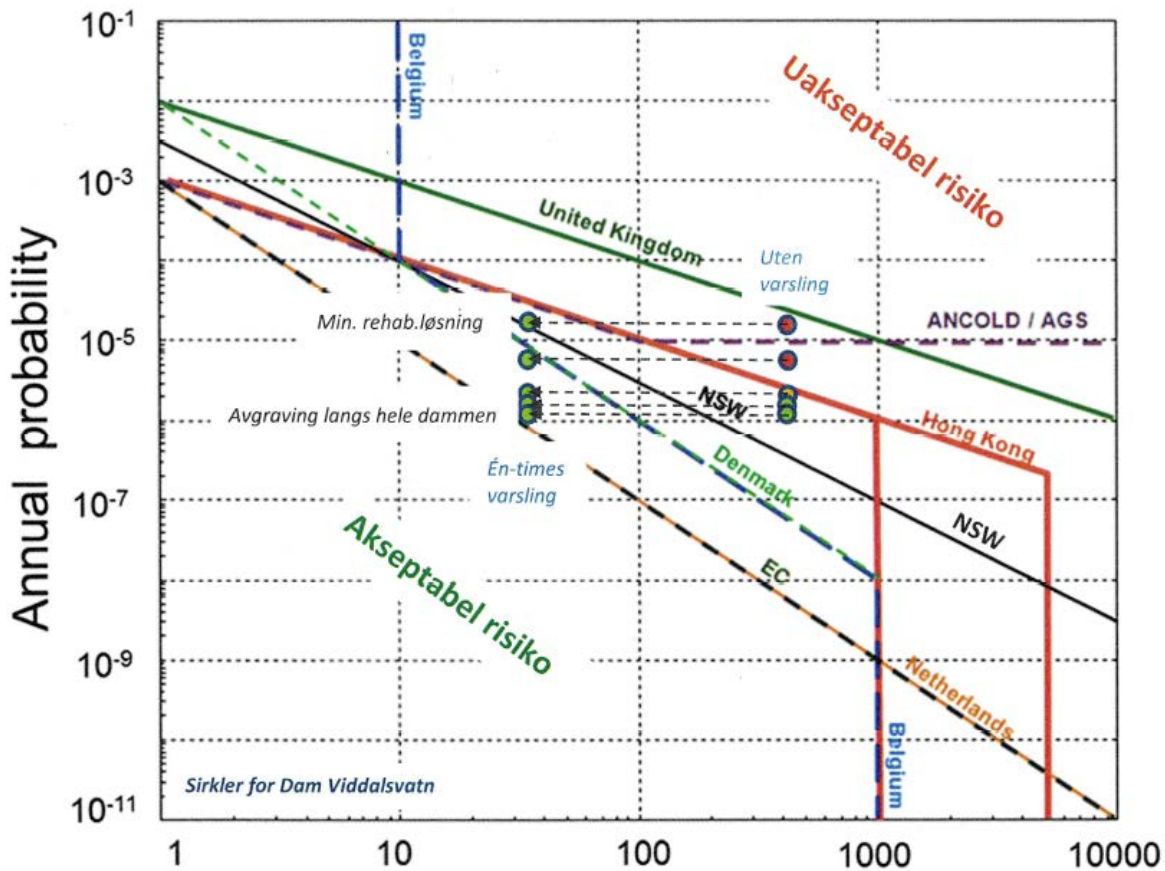
Figur 8a. Risiko for Dam Viddalsvatn pga indre erosjon i USACEs (2014) risikodiagram.



Figur 8b. Risiko for Dam Viddalsvatn for samlede bruddmekanismer i USACEs (2014) risikodiagram.

7.3.3 Risikodiagram fra flere land

Figur 9 viser tilsvarende ellipser for Dam Viddalsvatn på det internasjonale risikodiagrammet. Ellipsene viser risiko for Dam Viddalsvatn for de samme fem rehabiliteringssituasjoner og samme tilfeller og med samme symbolikken som i Figur 8. Observasjoner er omtrent de samme som for USACEs risikodiagrammet hvis men bruker Hong Kong's eller ANCOLDs (Australian Geomechanics Society) sikkerhetskrav.



Figur 9 Risiko for Dam Viddalsvatn pga indre erosjon i det internasjonale (2014) risikodiagrammet.

8 Bruk av ERT for å "se inn i Dam Viddalsvatn"

På workshopen ble det også diskutert bruk av geofysiske metoder for "å kunne se inn i morenekjernen og filtersonene i dammen", og få informasjon om mulige problemområder. NGI foreslår at en undersøkelse av denne typen bør vurderes anvendt før den endelige avgjørelse om tilleggs rehabiliteringstiltak blir endelig. En av metodikkene, ERT eller "Electrical resistivity tomography"², kan for eksempel anvendes. ERT har i stor grad vært benyttet for jordfyllingsdammer og NGIs spesialister innen ERT og geofysiske målinger forventer at ERT ville fungere like bra med steinfyllingsdammer. NGI anbefaler at E-CO vurderer å gjennomføre geofysiske undersøkelser med ERT-metoden ned til 923,5 m og dypere for å få ytterligere

² "Electrical resistivity tomography (ERT) or electrical resistivity imaging (ERI) is a geophysical technique for imaging sub-surface structures from electrical resistivity measurements made at the surface or by electrodes in one or more boreholes. If the electrodes are suspended in the boreholes, deeper sections can be investigated. It is closely related to the medical imaging technique electrical impedance tomography method".

informasjon om mulige problemområder. Undersøkelsene kunnen godt gjøres etter at damkronen har blitt tatt av. Hvis undersøkelsene utføres:

- På basis av resultatene fra de geofysiske undersøkelsene, vurdere de to avgraving-tiltakene, dets omfang og vinningene dette vil kunne gi.
- Revurdere enkelte av sannsynlighetene bestemt i analysene HT3 (indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning) og HT5 og HT6 (indre erosjon med to forskjellige avgraving-opsjoner i tillegg til minimum rehabiliteringsløsning) og HT8 med den nye informasjonen fra geofysiske undersøkelsene.
- Med den nye informasjon vurdere på nytt risikosituasjonen for Dam Viddalsvatn, og hvilket(e) rehabiliteringstiltak som er optimum.

9 Anbefalinger

Beregningene tilsier at den totale årlige sannsynlighet for brudd for Dam Viddalsvatn ligger på ca. $1 \cdot 10^{-5}$ /år, forutsatt at det implementeres den minimum rehabiliteringsløsning som er beskrevet i rapporten, og at det etableres rutiner for nedtapping av magasinet ved lekkasjer over et visst grensenivå. Bruddmekanismer som omfatter indre erosjon er de mest kritiske og dominerer risikobildet på Dam Viddalsvatn.

Estimatet for årlig bruddsannsynlighet er lavere enn den rapporterte bruddfrekvensen for fyllingsdammer forårsaket av indre erosjon ellers i verden (Figur 7). Benyttes internasjonale kriterier for Dam Viddalsvatn vil den beregnede risikoen karakteriseres som akseptabel, med rehabiliteringstiltakene som ble analysert (Figur 8 og 9). Sammenlignet med den minimum rehabiliteringsløsning, har de ytterligere risikoreducerende rehabiliteringstiltak følgende effekt:

- Tiltaket "Ytterligere heving av kjernen og damkronen" reduserer bruddsannsynligheten knyttet til indre erosjon med en faktor på 2.
- Tiltaket "Målrettet lokal avgraving i dammens lengderetning ned til kt. 923.5" reduserer bruddsannsynligheten knyttet til indre erosjon med en faktor på 5.
- Tiltaket "Ytterligere heving av kjernen og damkronen" **og** Tiltaket "Målrettet lokal avgraving i dammens lengderetning ned til kt 923.5" reduserer bruddsannsynligheten knyttet til indre erosjon med en faktor på 7.
- Tiltaket "Avgraving langs hele damlengden" reduserer bruddsannsynligheten knyttet til indre erosjon med en faktor på ca. 10.

I lys av diskusjonene på workshopen, risikovurderingene som er gjort og oppførselen av dam Viddalsvatn over 65 år anbefaler NGI følgende:

- Med den informasjonen som eksisterer i dag, blant de analyserte tiltakene utover minimum rehabiliteringsløsning, er tiltaket "Målrettet lokal avgraving i dammens lengderetning ned til kt 923.5" og en kombinasjon av "ytterligere heving av kjernen og damkronen og målrettet avgraving" som anses til å gi optimum risikoreducerende effekt. Tiltaket reduserer

bruddsannsynligheten med en faktor på 5 og 7 og bidrar til å bringe risikoen ned til et akseptabelt nivå for alle varslings situasjoner og antatte potensielle omkomne.

- Årlig bruddsannsynlighet som skyldes et fjellskred inn i magasinet med påfølgende flodbølge, med minimum rehabiliteringsløsning innført, er av størrelsesorden 10^{-7} . Det anbefales periodisk overvåking av potensielle skredutsatte fjellpartier, som gjort tidligere, for å overvåke om det er endringer i bevegelse i fjellet, for eksempel med INSAR data fra det nasjonale InSAR kunnskapssenter ved NGU når det åpnes i slutten av 2018. Det anbefales da årlig eller halvårlig overvåkning av skråningene rundt Dam Viddalsvatn.
- Årlig bruddsannsynlighet som skyldes skade på oppstrøms plastring, med minimum rehabiliteringsløsning innført, men uten forbedring av selve plastringen oppstrøms, ligger på 10^{-7} eller lavere. Rehabilitering oppstrøms vil ikke redusere bruddsannsynligheten av Dam Viddalsvatn i tilfelle en flodbølge som etterfølger et fjellskred i magasinet. Vurderingen som er gjort viser at dagens utforming av oppstrøms plastringen etter 65 år med bølgelast oppfører seg tilfredsstillende selv om den ikke tilfredsstiller dagens krav.
- Det anbefales ingen tilleggs instrumentering annet enn forbedret måling av lekkasjen med avledning av fremmedvann, som allerede er en del av minimum rehabiliteringsløsningen. Det er viktig å videreføre de gode overvåkings programmene som gjennomføres i dag. Endringer i dammens oppførsel i fremtiden bør følges nøye. 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.
- NGI anbefaler at E-CO ser nøyer på og eventuelt utvide varslings tiltakene, siden en slik beredskap reduserer risiko betydelig.
- De to tiltakene, enten "Målrettet lokal avgravning" eller "Avgravning langs hele damlengden", hvis de gjennomføres, vil gi mer informasjon om tilstanden i morenekjernen og filteret. Denne informasjon bør også brukes til å sjekke, eventuelt justere, sannsynlighetsestimaterne i hendelsestrærne i rapporten.

På workshopen ble det også diskutert bruk av geofysiske metoder for "å kunne se inn i morenekjernen og filtersonene i dammen", og få informasjon om mulige problemområder. NGI foreslår at ERT eller "Electrical resistivity tomography", kunne for eksempel anvendes, for eksempel etter at damkronen har blitt tatt av. Med den nye informasjon, kan en vurdere på nytt risikosituasjonen for Dam Viddalsvatn, og hvilke rehabiliteringstiltak som er optimum.

Acknowledgment

NGI takker workshopdeltagerne for deres bidrag til analysene.

Referanser

DNV(1998). Risikoanalyse av brudd på Dam Svartevatn og Dam Viddalsvatn, Rapport nr. 97-3744, rev. 01, 20. april 1998.

- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. og Foster, M. (2015). Geotechnical Engineering of Dams. 2nd 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.
- NGI (2016). Damsikkerhet 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 (1997a). Oslo Energi - revurdering av dammer. Dam Viddalsvatn, rap. Nr. 970003-01, 25. april 1997.
- NGI (1972). Geoteknisk kontrollrapport. Kontrollrapport 68/601 av 3.mai 1972.
- NKV Vandbyggningskontoret (2003) Dambruddsbølgeberegninger Aurlandsvassdraget utarbeidet for E-Co Vannkraft, Offentlig rapport, dokument 21463.doc, Januar 2003.
- 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.
- 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

BESKRIVELSE AV SANNSYNLIGHETENE I HENDELSESTRE-ANALYSERR

Innhold

A1. Estimert av sannsynligheter

2

A1. Estimat av sannsynligheter

For analysene av Dam Viddalsvatn ble sannsynlighetene først estimert ved hjelp av Tabell A1. 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 A1 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 A1. Tallområdene foreslått av IPCC¹ (2012) ble diskutert på workshop'en, og verdiene som deltagerne ble enige om, ble brukt videre i analysene.

Tabell A2 presenterer i samme format som Tabell A1 de omforente verdiene som ble brukt på workshop'en. Tallområdene i Tabell A2 kan brukes 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 A1. Estimat av sannsynligheter med enkeltverdier for hendelsestre-analyse

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

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

Tabell A2. Estimat av sannsynligheter med områdetall for hver kategori

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

Vedlegg B

Årlig sannsynlighet for initiering av lekkasje

Innhold

B1	Introduksjon	2
B2	Årlig og 'absolutt' sannsynlighet	2
B3	Sannsynlighet for initiering av lekkasje	4
	B3.1 Tilnærming 1 – statistikk fra alle fyllingsdammer i Norge	4
	B3.2 Tilnærming 2 – statistikk for Folgefonnområdet	4
B4	Sannsynlighet for initiering av lekkasje over dammens levetid	4
B5	Anbefalt verdi for hendelsetre-analyser, Dam Viddalsvatn	5
B6	Referanser	5

B1 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. En sannsynlighetsverdi på 0,3/år (30% pr år) ble brukt for initiering av indre lekkasje i hendelsestre-analysene for Dam Viddalsvatn. Estimert er den høyeste verdien som ble brukt for norske dammer så langt, og skyldes de observerte lekkasjene i starten av levetiden av Dam Viddalsvatn.

En verdi på initiering av lekkasje på 0,3/år betyr statistikk-messig at det er helt sikker at det vil utvikle seg lekkasje i løpet av de kommende 40 pr. Det er viktig å notere seg at initiering av lekkasje er kun initiering og ikke automatisk "piping"/erosjon).

Valgte verdier baserer seg på to statistiske tilnærminger og observasjoner av lekkasje gjennom årene for Dam Viddalsvatn og andre norske steinfyllingsdammer.

B2 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.

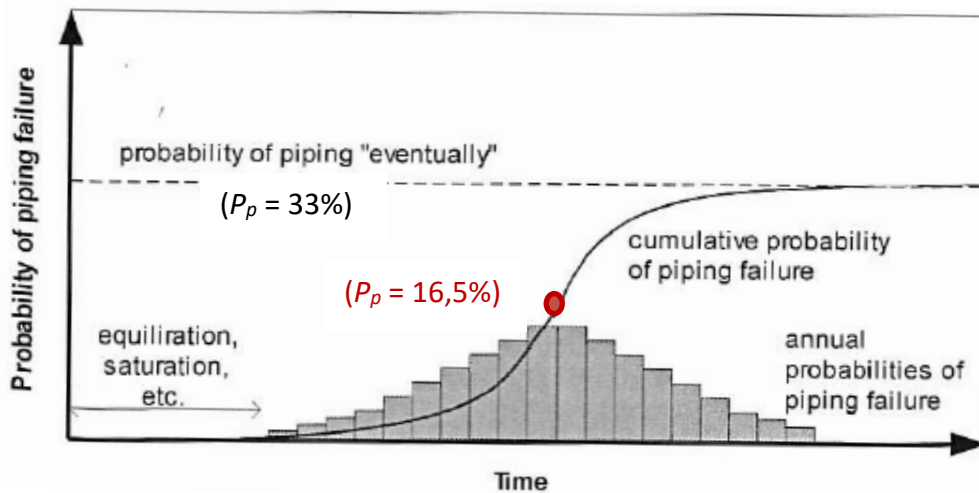
For å analysere indre erosjon har man ofte satt inn en tilfeldig "defekt" ("flaw") hvor lokal lekkasje og indre erosjon starter. Defekten er antatt til å kunne skje hvor som helst i dammen. Utviklingen av indre erosjon, selv med en defekt, er vanskelig å forutsi. Utviklingen er avhengig av fysiske prosesser 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 B1.

Selv om alle usikkerhetene er "epistemiske"¹, kan sannsynligheten allikevel gjøres til årlig sannsynlighet ved å se på usikkerhetene om hvor lang tid det vil ta for indre erosjon å utvikle seg.

De årlige sannsynligheter (stolpediagram i Figur B1, eller stigningen (gradienten) på den kumulative kurven) endrer seg med tid. Den starter med null (tid lik 0), øker til en maksimum-verdi ved den mest sannsynlige tid for at brudd vil finne sted (med antagelse at det vil i det hele tatt 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 B1, 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 B3 nedenfor.



Figur B1. Tidsavhengig sannsynlighet for indre erosjon i løpet av en dams levetid, gitt en sannsynlighet for indre erosjon på 33% (etter Hartford og Hicher 2015)².

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

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

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

² Indre erosjon/rørdannelse = "piping" i figuren.

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

B3 Sannsynlighet for initiering av lekkasje

B3.1 Tilnærming 1 – statistikk fra alle fyllingsdammer i Norge

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

Hvis man antar 180 steinfyllingsdammer i Norge, med en gjennomsnitt operasjonstid (inntil nå) på 40 år (1970-2010), og hvis man antar at 40% av steinfyllingsdammene har hatt initiering av to (2) lokale lekkasjer gjennom kjernen i disse 40 år, kan den årlige sannsynlighet for "lekkasje-initiering" beregnes fra:

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

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

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

B3.2 Tilnærming 2 – statistikk for Folgefonnområdet³

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

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

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

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

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

B4 Sannsynlighet for initiering av lekkasje over dammens levetid

Basert på de to tilnærmingene ovenfor, anbefaler NGI at en verdi på 1 til 5 % per år som inngangsverdi for årlig sannsynlighet for initiering av lokal lekkasje gjennom kjernen på steinfyllingsdammer.

³ Tallene kan også sees på for Aurlandanleggene, og tallene vil trolig bli lavere.

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 eksempelberregning av sannsynlighet for lekkasje for Dam Viddalsvatn 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 B1.

Table B1. Sannsynlighet for lekkasje over en 40-årsperiode for forskjellige årlige sannsynligheter for lekkasje-initiering.

Plekkage initiering, årlig	Plekkage 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 B1 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 %.

B5 Anbefalt verdi for hendelsetre-analyser, Dam Viddalsvatn

I hendelsetre-analysene som er gjennomført i Vedlegg C og presentert i hovedrapporten, er sannsynligheten for at lekkasje vil oppstå satt til 30 % og 10 % pr år. Tallet variere for forskjellige iterasjoner. Det betyr at for Dam Viddalsvatn er det vurdert som helt sikkert at lekkasje vil bli initiert i den resterende operative år.

Tabell B1 gir tall for 40 år. Med så høye årlige sannsynligheter som 10 og 30 % pr år er tallene for $P_{\text{lekkage over 100 år}}$ tilnærmet de samme (enda høyere) for en forventet levetid på 100 år.

B6 Referanser

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

Vedlegg C

HENDELSESTRE-ANALYSER FOR DAM VIDDALSVATN

Innhold

C1	Innledning	2
C2	Oppsummering av resultatene fra hendelsestre-analysene	3
C3	Hendelsestrær for indre erosjon	5
C4	Hendelsestrær for fjellskred inn i magasinet	19
C5	Hendelsestrær for bølgelast på oppstrøms skråning	22

C1 Innledning

Det ble utført hendelsestre-analyser av Dam Viddalsvatn på workshop 19.-20. mars 2018. Analysene ble komplementert av NGI etter workshopen. Dette vedlegget gir resultater fra analysene i grafisk form for de mest sentrale bruddmekanismene. Samlede resultater er oppsummert i hovedrapporten. Tabell C1 gir en oversikt over analysene.

Tabell C1. Oversiktstabell over hendelsestre-analyser for Dam Viddalsvatn

Mekanisme/årsak	Figur nr.
HT1 Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, 1. iterasjon	C1
HT2 Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, 2. iterasjon	C2
HT3 Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, 3. iterasjon. Forutsetter fastlagt grenseverdi for lekkasje for rutinemessig senkning av magasinet	C3
HT4 Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning og ytterligere heving av kjernen (1.6 m) og topp dam (1.0 m)	C4
HT5 Indre erosjon og målrettet avgraving ned til kt. 923.5; ca 7 m i dammens lengderetning i problemområdene, samt evt. utbedring av morenekjerne og filter i disse områdene	C5
HT6 Indre erosjon og avgraving ned til kt. 923.5; langs hele dammen, samt utbedring av morenekjerne og filter over kt. 923.5.	C6
HT7 Indre erosjon med innføring av slissevegg gjennom morenekjernen.	C7
HT8 Hendelsestreanalyse for fjellskred inn i magasinet med påfølgende flodbølge og dam overtopping, med minimum rehabiliteringsløsning.	C8a C8b
HT9 Bølgelast på oppstrøms skråning med minimum rehabiliteringsløsning.	C9
HT10 Bølgelast på oppstrøms skråning med minimum rehabiliteringsløsning og effekt av ny plastring på oppstrøms side	C10

Metoden som ble brukt for analysene er beskrevet i hovedrapporten (Seksjon 3.1). For analysene ble tallverdiene i Tabell A1, og de verbale beskrivelsene i samme tabell brukt for å velge sannsynlighetene for hendelsen. (Vedlegg A). Hendelsestrærne viser hver hendelse og sannsynlighetstallene for hvert tilfelle. Sannsynlighetene ble bestemt under workshopen. Resultatene fra hendelsestre-analysene har følgende struktur:

- Titlene ovenfor trærne viser hoved-hendelsene langs grenene i analysen. Hver hendelse er tildelt en bokstav som svarer til teksten i forklaringstabellen som følger hvert tre. Forklaringstabellen gir begrunnelsen for sannsynlighetene som er valgt for hver gren i hendelsestreet.
- Sannsynlighet for brudd for en gren er produktet av sannsynlighetene for hver hendelse langs grenen.
- Hendelseskjeder som resulterer i dambrudd er markert med en svart trekant ▲.
- Hendelseskjeder som ikke resulterer i dambrudd er markert med en åpen sirkel or ordet STOP.
- Den totale bruddsannsynligheten knyttet til hver bruddmekanisme eller -årsak er summen av sannsynlighetene for hver gren som resultater i dambrudd i ett hendelsestre.
- Den totale sannsynligheten for dambrudd er summen av sannsynligheter for alle bruddmekanismer og alle bruddårsak.
- I alle analyser er den årlige sannsynligheten for brudd beregnet.

C2 Oppsummering av resultatene fra hendelsestre-analysene

Resultatene (hendelsestre og forklaringstabell) er presentert under tre kategorier:

- Hendelsestrær for indre erosjon (Figur og Tabell C1 til C7).
- Hendelsestrær for fjellskred inn i magasinet (Figur og Tabell C8 a og b).
- Hendelsestrær for bølgelast på oppstrøms skråning (Figur og Tabell C9 til C10).

Alle analyser ble gjennomført for DamViddalsvatn med utført "Minimum rehabiliterings-løsning", som består av:

- Heving av kjernen (0,4 m) til kt 931,9
- Nytt kronevern, damkrone heves til kt 936 (1,0 m heving)
- Nedstrøms skråning bygges på 7 m horisontalt i hele høyden
- Ny plastring av nedstrøms skråning fra bermen og opp
- Tiltak for bedret måling av lekkasjen; avledning av fremmedvann

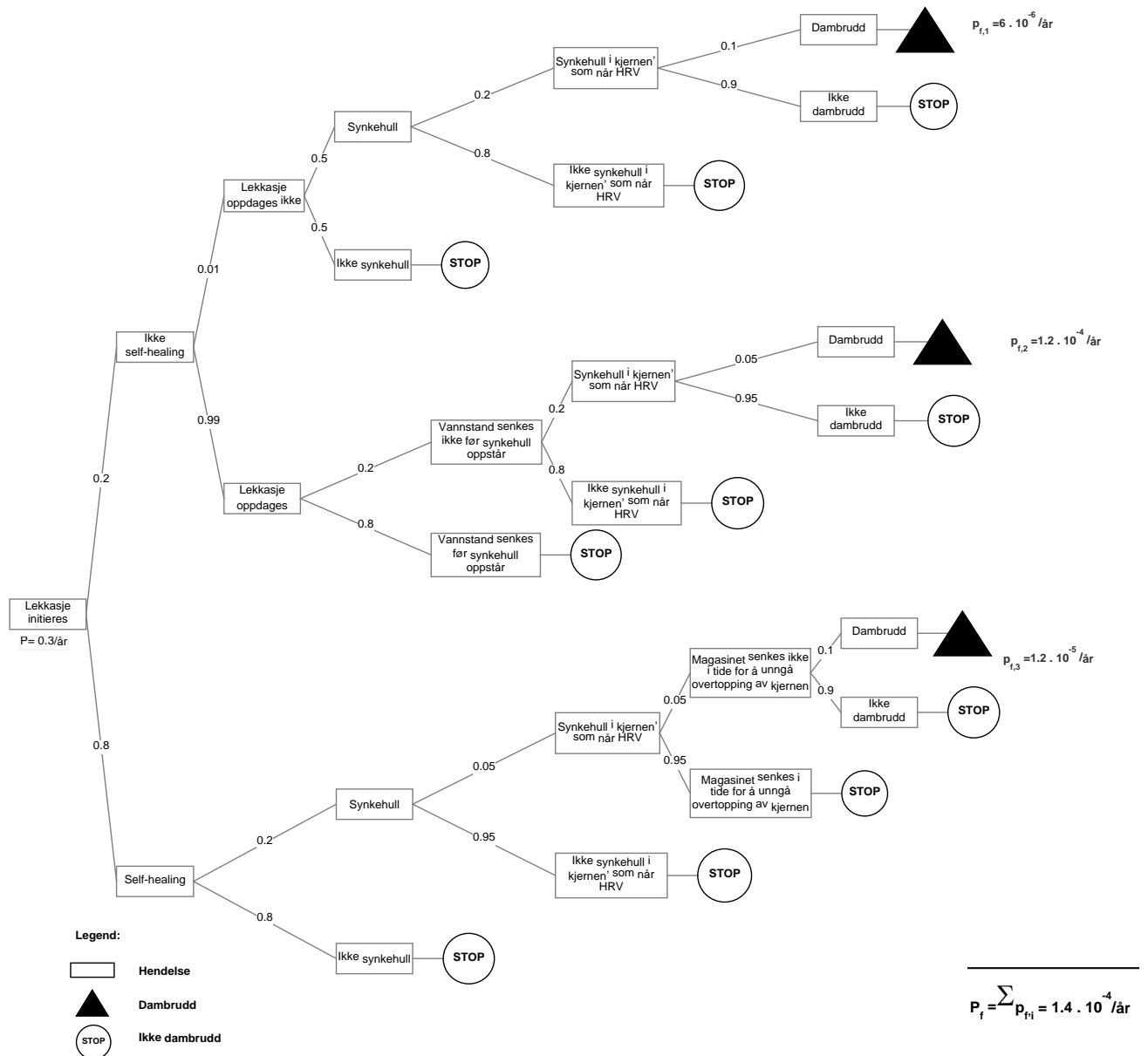
Bruddsannsynlighetene for hver hendelsestre-analyse kan oppsummeres som følger:

Nr	Hendelsestre	Innhold i analysen	Pf årlig
Indre erosjon			
HT1	Indre erosjon, iterasjon 1	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning*, 1. iterasjon	$1,4 \cdot 10^{-4}/\text{år}$
HT2	Indre erosjon, iterasjon 2	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning*, 2. iterasjon	$1,4 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
HT3	Indre erosjon, iterasjon 3	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning*, 3. iterasjon. Forutsetter fastlagt grenseverdi for lekkasje for rutinemessig senkning av magasinet	$1,5 \cdot 10^{-5}/\text{år}$

Nr	Hendelsestre	Innhold i analysen	Pfårlig
HT4	Indre erosjon og ytterligere heving	Indre erosjon, minimum rehabiliteringsløsning*, og ytterligere heving av kjernen (1,6 m) og topp dam (1,0 m)	$7,4 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
---	Indre erosjon og injisering	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning* og med injisering. <i>Diskusjon:</i> Bruddsansynlighet blir omtrent uendret. En kunne kanskje senke årlige sannsynligheten for initiering av lekkasje, men brukes primært for å løse en lekkasjesituasjon, ikke forebyggende.	ca. $7,4 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
HT5	Indre erosjon og begrenset avgraving ned til kt. 923,5	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning* og målrettet avgraving ned til kt. 923,5 ca. 7m i dammens lengderetning i "problemområdene", samt utbedring av morenekjerne og filter i disse områdene; self-healing som for analyse HT3	$3,0 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
HT6	Indre erosjon og avgraving ned til kt. 923,5 langs hele dammen	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning* og avgraving ned til kt. 923,5 langs hele dammen, og utbedring av morenekjerne og filter over kt. 923,5. <i>Diskusjon:</i> Liten reduksjon av sannsynligheten sammenliknet med HT5	$1,8 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
HT7	Indre erosjon og slissevegg	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning* og med innføring av slissevegg gjennom morenekjernen. <i>Diskusjon:</i> Det var delte meninger på workshopen om denne virkelig burde komme lavere ut enn ved total avgraving (Analyse HT6). Videre drøfting resulterte i at analyser HT6 og HT7 har omtrent like sannsynligheter.	$1,8 \cdot 10^{-7}/\text{år}$ <i>Etter diskusjon ble Pf vurdert til ca.</i> $1,8 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
---	Indre erosjon og forbedret overvåking	Indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning* og forbedret instrumentering. <i>Diskusjon:</i> Med reduksjon av fremmedvann inn i lekkasjemåle-anlegget, nedbørs- og temperaturmåling på dammen, vannføringsmåling i elva nedstrøms dammen, fiberkabel i topp dam (som dambruddsvarsling), temperatursensorer i filter for å oppdage lekkasje/lekkasjeveien, etc. vurderes allikevel bruddsansynligheten omtrent uendret.	ca. $1,5 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
Fjellskred i magasinet			
HT8	Fjellskred og påfølgende flodbølge	Fjellskred inn i magasinet med påfølgende flodbølge og dam overtopping, med minimum rehabiliteringsløsning*	$6,6 \cdot 10^{-7}/\text{år}$
---	Fjellskred og påfølgende flodbølge, ny plastring	Fjellskred inn i magasinet med påfølgende flodbølge og dam overtopping, med minimum rehabiliteringsløsning* og forbedret oppstrøms plastring <i>Diskusjon:</i> Sannsynlighet blir redusert. Siden sannsynligheten allerede ligger så lavt blir den absolutte sannsynlighets-reduksjonen svært liten. Ny plastring blir av liten betydning for så små bruddsansynligheter.	ca. $6,6 \cdot 10^{-7}/\text{år}$
Bølgelast på oppstrøms plastring			
HT9	Bølgelast på oppstrøms skråning	Bølgelast som kan skade oppstrøms skråningen, med minimum rehabiliteringsløsning*.	$<5,6 \cdot 10^{-7}/\text{år}$
HT10	Bølgelast på ny oppstrøms plastring	Bølgelast som kan skade oppstrøms skråningen, med minimum rehabiliteringsløsning* og effekt av ny plastring på oppstrøms side	$<2,8 \cdot 10^{-8}/\text{år}$

C3 Hendelsestrær for indre erosjon

Lekkasje initieres	Self-healing?	Lekkasje oppdages?	Synkehull?	Vannstand senkes før synkehull oppstår?	Synkehull i kjernen, som når HRV?	Magasinet senkes i tide for å unngå overtopping av kjernen?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F	G	H

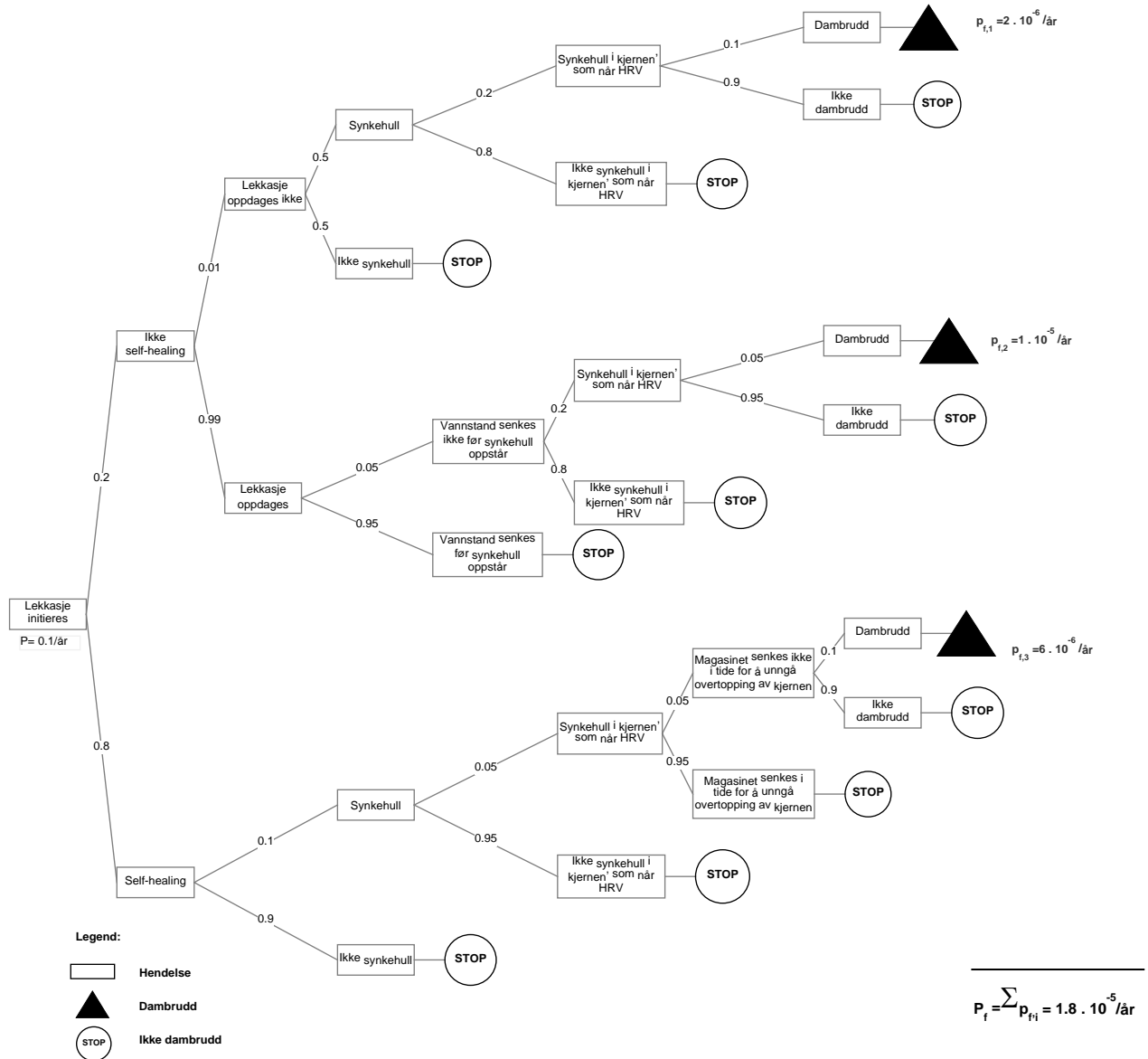


Figur C1 Hendelsestre HT1 for indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, 1. iterasjon

Tabell C1 Forklaringstabell for hendelsestre HT1 Indre Erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, lt. 1

A Lekkasje initieres	B: Ikke self- healing	C Lekkasje oppdages ikke	D Synkehull	E Vannstand	F Dypt nok synkehull	G Senking av magasinet i tide?	H Dambrudd
<p>Snitt for norske dammer er 0.02/ år. Pga lekkasje-historikken er sannsynligheten langt høyere på dam Viddalsvatn. (Vedlegg C) $p=0.3/\text{år}$.</p>	<p>Dårlig filter; mye lavere sannsynlighet for self-healing enn for andre norske dammer. Dammen har hatt flere 'gulp' som har helet seg selv og vist evne til self-healing. (antar her at selv-heal kan skje gjennom dannelse av synkehull. (Mye diskusjon om dette) $P[0.2; 0.8]$.</p>	<p>Oppdages lekkasjen? Svært sannsynlig at lekkasjemålesystemet virker, svært få utfall i målingene. På vinteren under rasfare langs adkomstvei kan dammen være utilgjengelig, men da er magasinnivået lavt. $P[0.01; 0.99]$.</p>	<p><u>Ikke self-healing:</u> Oppstår det synkehull? Før eller siden vil det bli et synkehull hvis lekkasjen ikke oppdages, men det tar tid. "As likely as not". $P[0.5; 0.5]$</p> <p><u>Hvis self-healing:</u> To synkehull i dammens levetid, dvs $P[0.2; 0.8]$</p>	<p>Senkes vannstanden i magasinet før synkehull oppstår? Det er stor tappekapasitet og nedtapping kan også gjøres fjernstyrt. Det finnes ikke lekkasjegrenser for magasinsenking. Nedtapping av magasinet blir startet da det ble målt lekkasje på 90l/s. $P[0.2; 0.8]$</p> <p><u>Hvis self-healing og synkehull oppstår:</u> Synkehull dypt nok til å nå HRV? For at et synkehull skal påvirke dammens sikkerhet må det være i kjernen og dypt nok til å nå HRV. Største synkehull som er observert 1 m dypt. $P[0.05; 0.95]$</p>	<p>For at et synkehull skal påvirke dammens sikkerhet må det være i kjernen og dypt nok til å nå HRV. Største synkehull som er observert var 1-1,5 m dypt. Nå er det større vannmengder og dermed større sannsynlighet enn i hendelse D. $P[0.2; 0.8]$ (2 gren)</p> <p><u>Hvis self-healing og synkehull:</u> Erfaring viser at lekkasjemålesystemet fungerer over 99% av tiden. Utviklingen av synkehull vil ta tid og senkekapasiteten for magasinet er god: 1.5m per dag, med bunntappelue $P[0.05; 0.95]$</p>	<p><u>Hvis self-healing og synkehull:</u> Erfaring viser at lekkasjemålesystemet fungerer over 99% av tiden. Utviklingen av synkehull vil ta tid og senkekapasiteten for magasinet er god: 1.5m per dag, med bunntappelue $P[0.05; 0.95]$</p>	<p><u>Øvre gren:</u> Dammen tåler høy vanngjennomstrømning og punkt-lekkasje på toppen. Veldig robust kronevern. Synkehullet må være både dypt og bredt for at dammen skal gå til brudd. $P[0.1; 0.9]$</p> <p><u>Midtre gren:</u> Med lavere vannstand (etter oppdaget lekkasje og senking av magasinet) er sannsynligheten for dambrudd lavere: $P[0.05; 0.95]$</p> <p><u>Nedre gren:</u> Fra self-healing og synkehull tåler dammen høy vanngjennomstrømning og punktlekkasje på toppen. Veldig robust kronevern. Synkehullet må være både dypt og bredt for at dammen skal gå til brudd. $P[0.1; 0.9]$</p>

Lekkasje innitieres	Self-healing?	Lekkasje oppdages?	Synkehull?	Vannstand senkes før synkehull oppstår?	Synkehull i kjernen, som når HRV?	Magasinet senkes i tide for å unngå overtopping av kjernen?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F	G	H

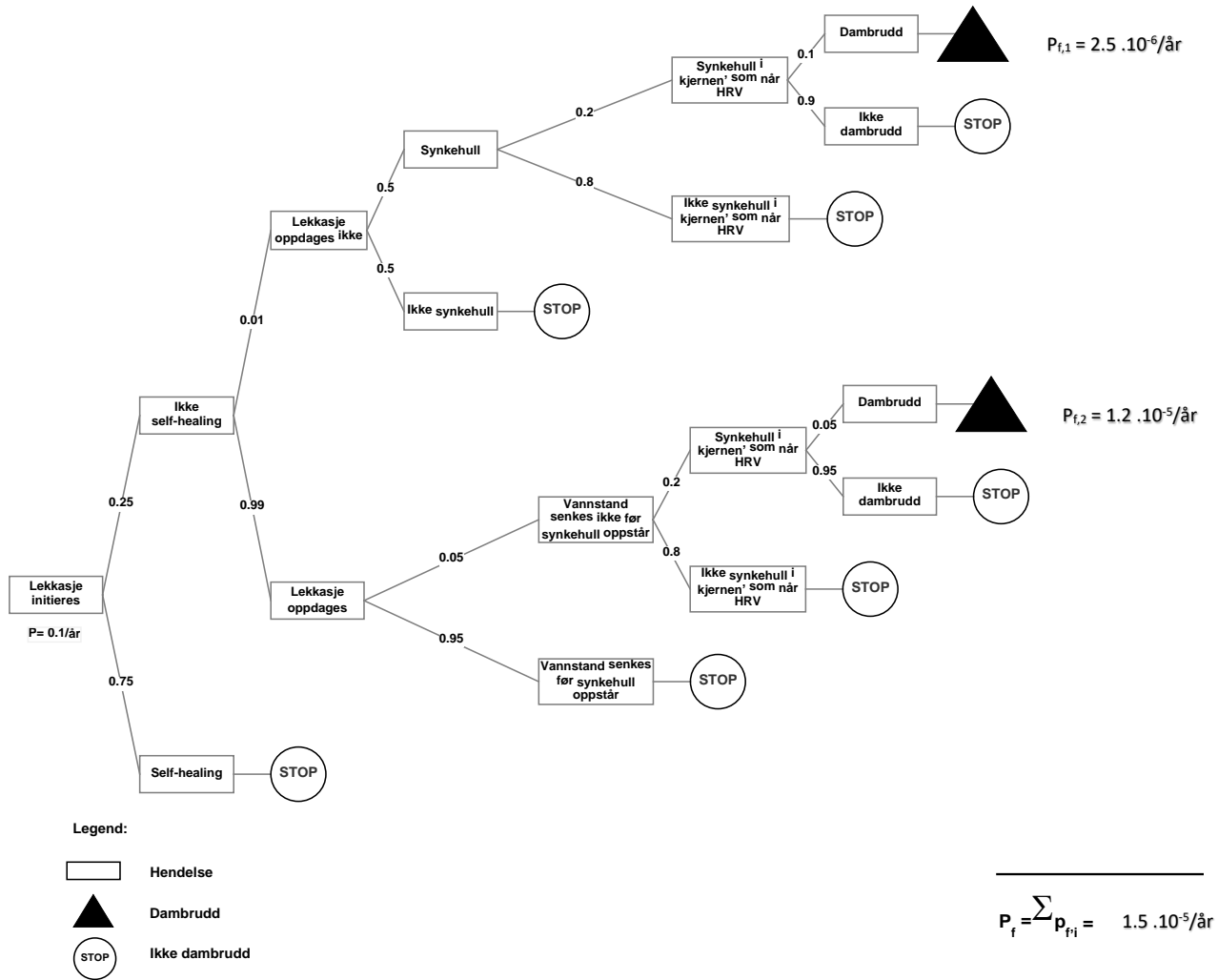


Figur C2 Hendelsestre HT2 for indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, 2. iterasjon

Tabell C2 Forklaringstabell for hendelsestre HT2 Indre Erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, lt. 2

A Lekkasje initieres	B: Ikke self-healing	C Lekkasje oppdages ikke	D Synkehull	E Vannstand	F Dypt nok synkehull	G Senking av magasinet i tide?	H Dambrudd
<p>Snitt for norske dammer er 0.02/år. På grunn av lekkasjehistorikken er sannsynligheten langt større på Dam Viddalsvatn. Det er ikke observert lekkasje siden 1980. Observerte lekkasjer vil være de lekkasjene som ikke har helet seg selv, med $P = 0.1/\text{år}$, svarer det til en lekkasje hvert 50. år som ikke heler seg selv. $p = 0.1/\text{år}$</p>	<p>Dårlig filter; mye lavere sannsynlighet for self-healing enn for andre norske dammer. Dammen har hatt flere 'gulp' som har helet seg selv og vist evne til self-healing. (antar her at selv-heal kan skje gjennom dannelse av synkehull. (Mye diskusjon om dette) $P[0.2; 0.8]$.</p>	<p>Oppdages lekkasjen? Svært sannsynlig at lekkasjemålesystemet virker, svært få utfall i målingene. På vinteren under rasfare langs adkomstvei kan dammen være utilgjengelig, men da er magasinnivået lavt. $P[0.01; 0.99]$.</p>	<p><u>Ikke self-healing:</u> Oppstår det synkehull? Før eller siden vil det bli et synkehull hvis lekkasjen ikke oppdages, men det tar tid. "As likely as not". $P[0.5; 0.5]$</p> <p><u>Hvis self-healing:</u> Siden synkehullene oppsto i dammens første leveår justeres sannsynligheten ned til $P[0.1; 0.9]$.</p>	<p>Senkes vannstanden i magasinet før synkehull oppstår? Det er stor tappekapasitet og nedtapping kan også gjøres fjernstyrt. Det finnes ikke lekkasjegranser for magasinsenking. Nedtapping av magasinet blir startet da det ble målt lekkasje på 90l/s. $P[0.2; 0.8]$</p> <p><u>Hvis self-healing og synkehull oppstår:</u> Synkehull dypt nok til å nå HRV? For at et synkehull skal påvirke dammens sikkerhet må det være i kjernen og dypt nok til å nå HRV. Største synkehull som er observert 1 m dypt. $P[0.05; 0.95]$</p>	<p>For at et synkehull skal påvirke dammens sikkerhet må det være i kjernen og dypt nok til å nå HRV. Største synkehull som er observert var 1-1,5 m dypt. Nå er det større vannmengder og dermed større sannsynlighet enn i hendelse D. $P[0.2; 0.8]$ (2 gren)</p> <p><u>Hvis self-healing og synkehull:</u> Erfaring viser at lekkasjemålesystemet fungerer over 99% av tiden. Utviklingen av synkehull vil ta tid og senkekapasiteten for magasinet er god: 1.5m per dag, med bunntappelue $P[0.05; 0.95]$</p>	<p><u>Hvis self-healing og synkehull:</u> Erfaring viser at lekkasjemålesystemet fungerer over 99% av tiden. Utviklingen av synkehull vil ta tid og senkekapasiteten for magasinet er god: 1.5m per dag, med bunntappelue $P[0.05; 0.95]$</p>	<p><u>Øvre gren:</u> Dammen tåler høy vanngjennomstrømning og punktlekkasje på toppen. Veldig robust kronevern. Synkehullet må være både dypt og bredt for at dammen skal gå til brudd. $P[0.1; 0.9]$</p> <p><u>Midtre gren:</u> Med lavere vannstand (etter oppdaget lekkasje og senking av magasinet) er sannsynligheten for dambrudd lavere: $P[0.05; 0.95]$</p> <p><u>Nedre gren:</u> Fra self-healing og synkehull tåler dammen høy vanngjennomstrømning og punktlekkasje på toppen. Veldig robust kronevern. Synkehullet må være både dypt og bredt for at dammen skal gå til brudd. $P[0.1; 0.9]$</p>

Lekkasje initieres	Self-healing?	Lekkasje oppdages?	Synkehull ?	Vannstand senkes før synkehull oppstår?	Synkehull i kjernen, som når HRV?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F	G

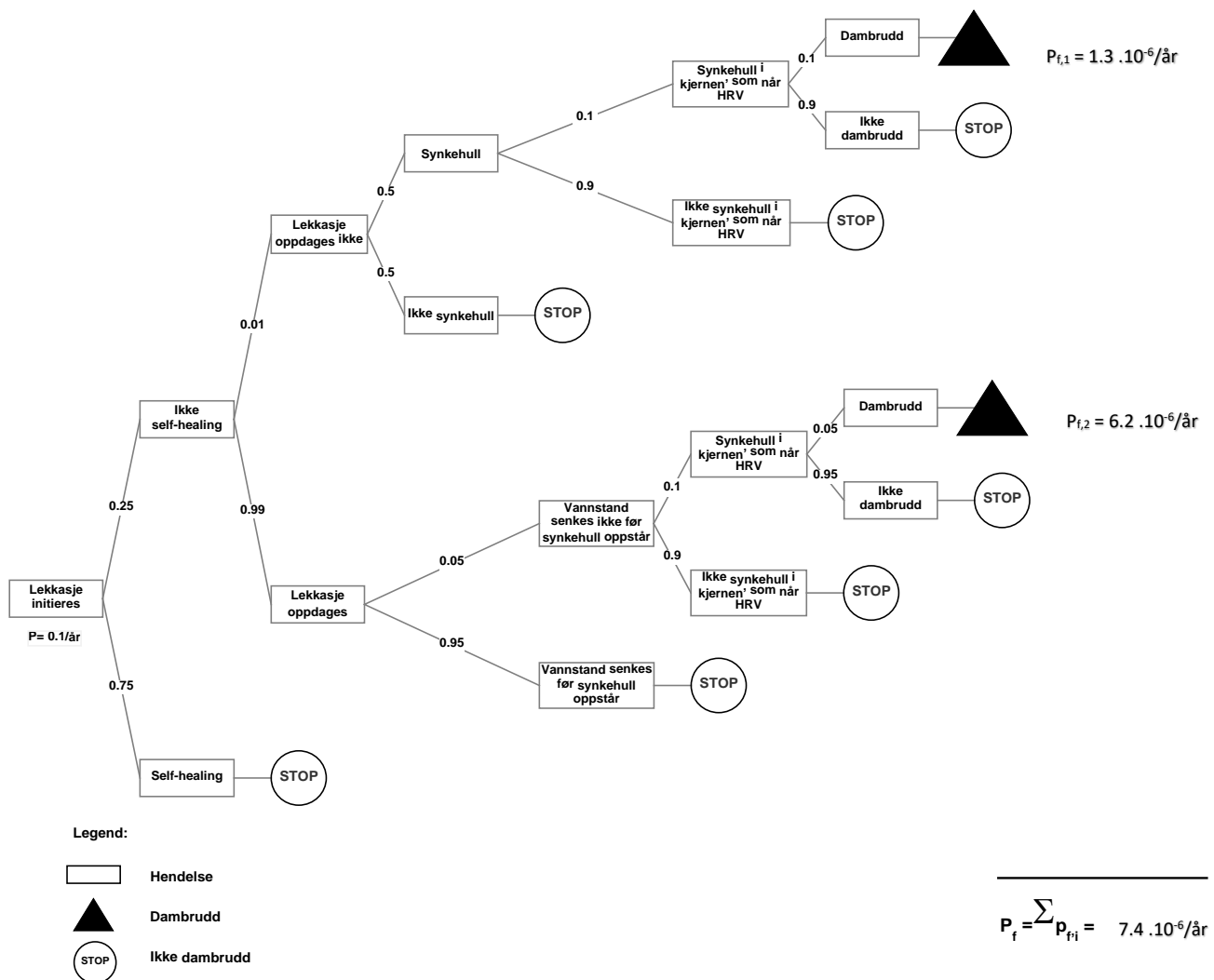


Figur C3 Hendelsestre HT3 for indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, 3. iterasjon

Tabell C3 Forklaringstabell for hendelsestre HT3 Indre Erosjon med minimum rehabiliteringsløsning, It. 3

A Lekkasje initieres	B: Ikke self-healing	C Lekkasje oppdages ikke	D Synkehull	E Vannstand	F Dypt nok synkehull	G Dambrudd
<p>Snitt for norske dammer er 0.02/år. På grunn av lekkasjehistorikkene er sannsynligheten langt større på Dam Viddalsvatn. Det er ikke observert lekkasje siden 1980. Observerte lekkasjer vil være de lekkasjene som ikke har helet seg selv, med $P = 0.1/\text{år}$, svarer det til en lekkasje hvert 50. år som ikke heler seg selv. $p = 0.1/\text{år}$</p>	<p>Dårlig filter; mye lavere sannsynlighet for self-healing enn for andre dammer. Men dammen har, gjennom gulp som har helet seg selv, vist evne til self-heal. Denne iterasjonen av analysen antar at self-healing begrepet ikke er forenelig med dannelse av synkehull; self-healing skjer uten skade på dammen. Synkehull er ikke en selv-healing mekanisme, men en skade. $P[0.25; 0.75]$</p>	<p>Oppdages lekkasjen? Svært sannsynlig at lekkasjemålesystemet virker, svært få utfall i målingene. På vinteren under rasfare langs adkomstvei kan dammen være utilgjengelig, men da er magasinnivået lavt. $P[0.01; 0.99]$.</p>	<p>Oppstår det synkehull? Før eller siden vil det bli et synkehull hvis lekkasjen ikke oppdages, men det tar tid. "As likely as not". $P[0.5; 0.5]$</p>	<p>Senkes vannstanden i magasinet før synkehull oppstår? Det er stor tappekapasitet og nedtapping kan også gjøres fjernstyrt. Her antas det at det etableres rutinemessig senkning av magasinet ved lekkasjer over et visst nivå. $P[0.05; 0.95]$</p>	<p>For at et synkehull skal påvirke dammens sikkerhet må det være i kjernen og dypt nok til å nå HRV. Største synkehull som er observert var 1-1,5 m dypt. Nå er det større vannmengder og dermed større sannsynlighet enn i hendelse D. $P[0.2; 0.8]$ $P[0.2; 0.8]$</p>	<p><u>Øvre gren:</u> Dammen tåler høy vanngjennomstrømning og punktlekkasje på toppen. Veldig robust kronevern. Synkehullet må være både dypt og bredt for at dammen skal gå til brudd. $P[0.1; 0.9]$</p> <p><u>Nedre gren:</u> Med lavere vannstand (etter oppdaget lekkasje og senking av magasinet) er sannsynligheten for dambrudd lavere: $P[0.05; 0.95]$</p>

Lekkasje initieres	Self-healing?	Lekkasje oppdages?	Synkehull ?	Vannstand senkes før synkehull oppstår?	Synkehull i kjernen, som når HRV?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F	G

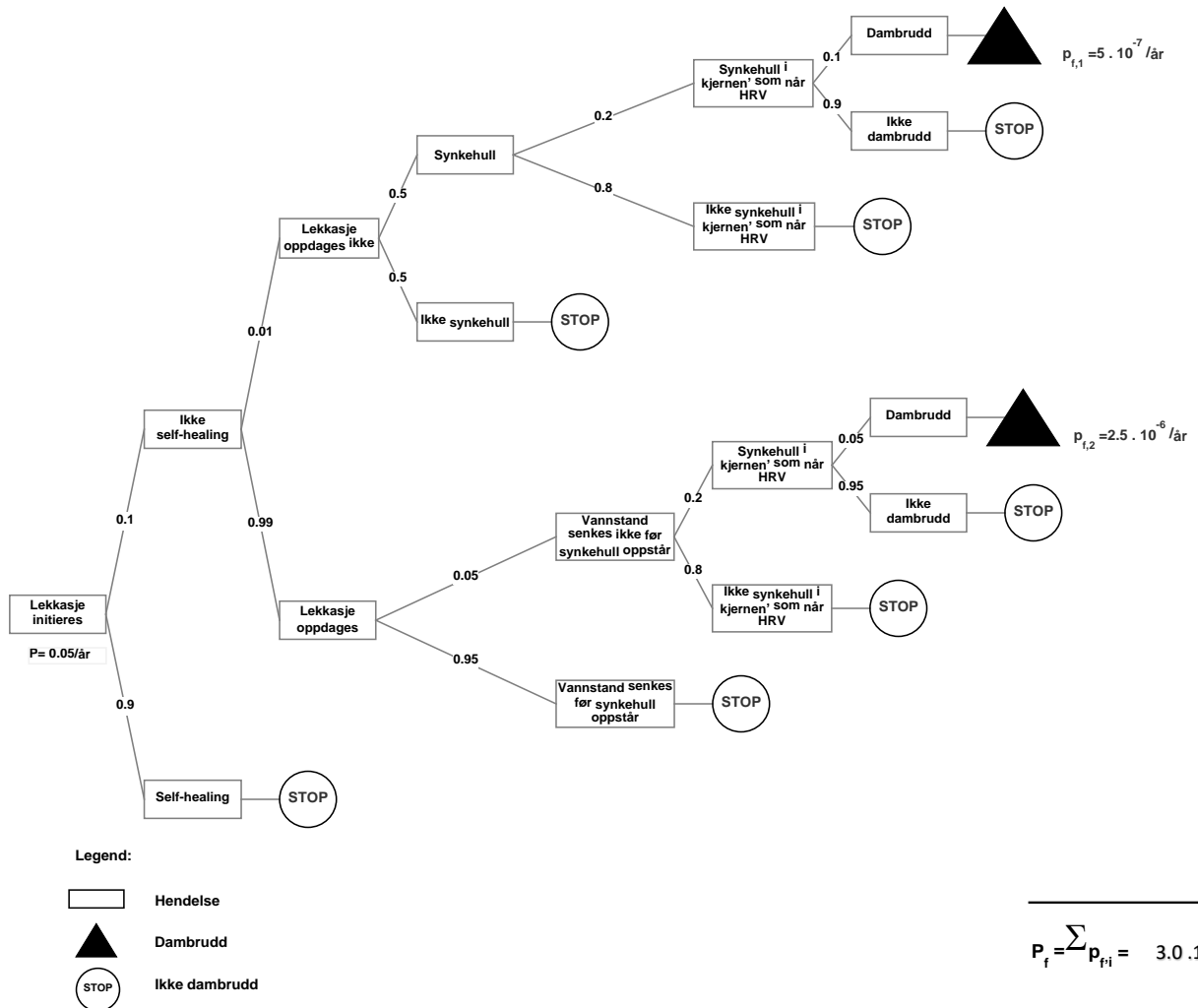


Figur C4 Hendelsestre HT4 for indre erosjon med med minimum rehabiliteringsløsning og ytterligere heving av kjernen (1,6 m) og damkronen (1,0 m). Indre erosjon Iterasjon 3 er startpunktet.

Tabell C4 Forklaringstabell for hendelsestre HT4 for Indre Erosjon med minimum rehabiliteringsløsning og ytterligere heving av kjernen (1,6 m) og damkronen (1,0 m). Indre erosjon Iterasjon 3 er startpunktet.

A Lekkasje initieres	B: Ikke self-healing	C Lekkasje oppdages ikke	D Synkehull	E Vannstand	F Dypt nok synkehull	G Dambrudd
<p>Snitt for norske dammer er 0.02/år. På grunn av lekkasjehistorikken er sannsynligheten langt større på Dam Viddalsvatn. Det er ikke observert lekkasje siden 1980. Observerte lekkasjer vil være de lekkasjene som ikke har helet seg selv, med $P = 0.1/\text{år}$, svarer det til en lekkasje hvert 50. år som ikke heler seg selv. $p = 0.1/\text{år}$</p>	<p>Dårlig filter; mye lavere sannsynlighet for self-healing enn for andre dammer. Men dammen har, gjennom gulp som har helet seg selv, vist evne til self-heal. Denne iterasjonen av analysen antar at self-healing begrepet ikke er forenelig med dannelse av synkehull; self-healing skjer uten skade på dammen. Synkehull er ikke en self-healing mekanisme, men en skade. $P[0.25; 0.75]$</p>	<p>Oppdages lekkasjen? Svært sannsynlig at lekkasjemålesystemet virker, svært få utfall i målingene. På vinteren under rasfare langs adkomstvei kan dammen være utilgjengelig, men da er magasinnivået lavt. $P[0.01; 0.99]$.</p>	<p>Oppstår det synkehull? Før eller siden vil det bli et synkehull hvis lekkasjen ikke oppdages, men det tar tid. "As likely as not". $P[0.5; 0.5]$</p>	<p>Senkes vannstanden i magasinet før synkehull oppstår? Det er stor tappekapasitet og nedtapping kan også gjøres fjernstyrt. Her antas det at det etableres rutinemessig senkning av magasinet ved lekkasjer over et visst nivå. $P[0.05; 0.95]$</p>	<p>Sannsynligheten for at synkehullet er dypt nok er halvparten eller mer så stort som for It.3 (uten ytterligere heving av kronen og kjernen), siden kjernen er hevet og synkehullet må være dypere for å nå ned til HRV. Sannsynlighet-verdiene reduseres også fordi synkehullet må være 1.6 m dypere enn for It. 3, vet vil si nesten dobbelt så dypt. Reduseres med en faktor på 2, kunne har vært lavere sannsynligheter. $P[0.1; 0.9]$ $P[0.1; 0.9]$</p>	<p><u>Øvre gren:</u> Dammen tåler høy vanngjennomstrømming og punktlekkasje på toppen. Veldig robust kronevern. Synkehullet må være både dypt og bredt for at dammen skal gå til brudd. $P[0.1; 0.9]$</p> <p><u>Nedre gren:</u> Med lavere vannstand (etter oppdaget lekkasje og senking av magasinet) er sannsynligheten for dambrudd lavere: $P[0.05; 0.95]$</p>

Lekkasje initieres	Self-healing?	Lekkasje oppdages?	Synkehull ?	Vannstand senkes før synkehull oppstår?	Synkehull i kjernen, som når HRV?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F	G

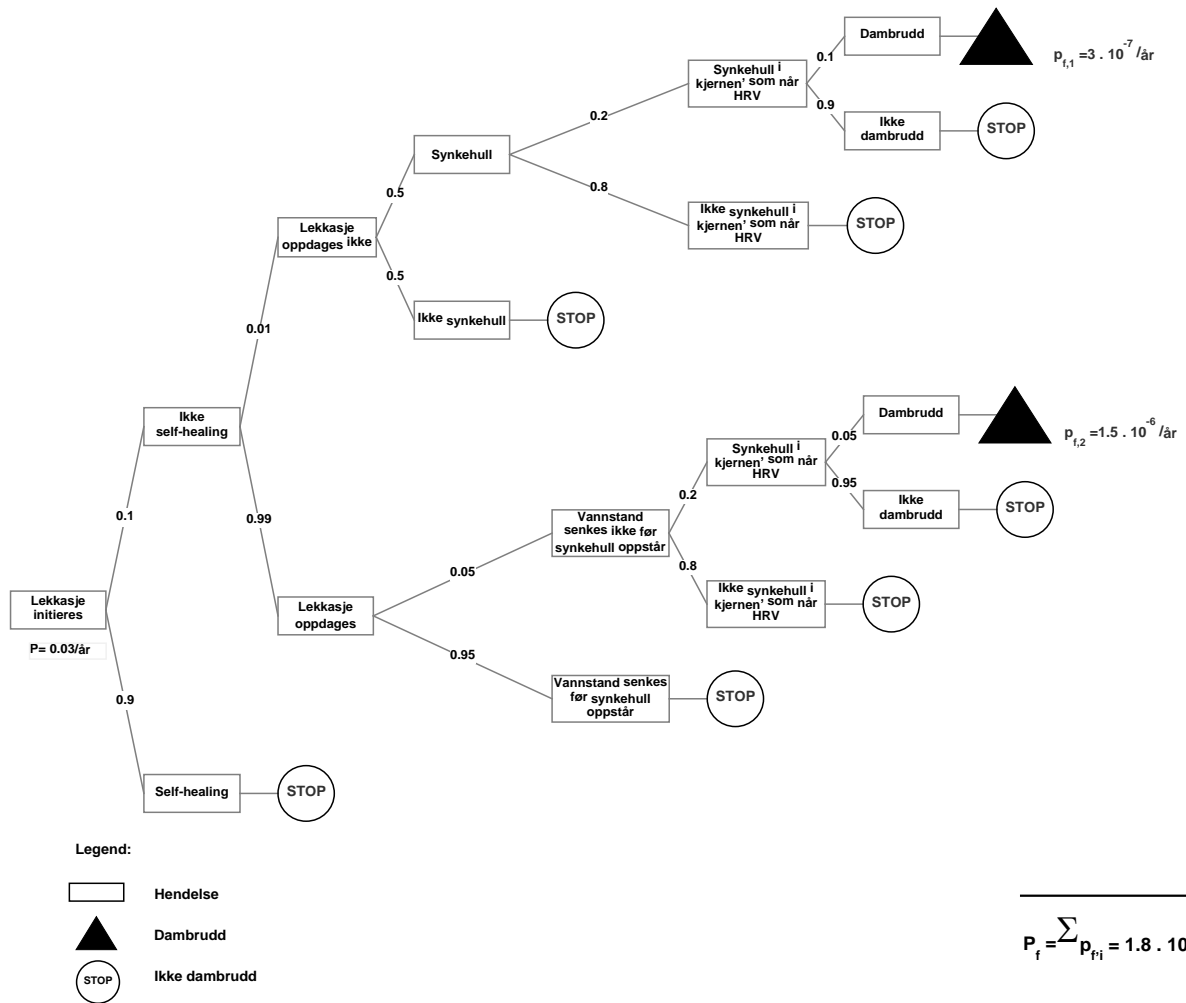


Figur C5 Hendelsestre HT5 for indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning og målrettet avgraving ned til kt. 923,5 ca. 7m i dammens lengderetning i "problemområdene", samt utbedring av morenekjerne og filter i disse områdene.

Tabell C5 Forklaringstabell for hendelsestre HT5 for Indre Erosjon med minimum rehabiliteringsløsning og målrettet avgraving ned til kt. 923,5.
 Indre erosjon Iterasjon 3 er startpunktet.

A Lekkasje initieres	B: Ikke self-healing	C Lekkasje oppdages ikke	D Synkehull	E Vannstand	F Dypt nok synkehull	G Dambrudd
<p>Utbedrede problemområder gir mindre sannsynlighet for initiering av lekkasje enn i treet med It.3, hvis vi antar at disse områdene er hovedårsaken til høye sannsynligheter for initiering av lekkasje</p> <p>p=0.05/år</p>	<p>Høyere sannsynlighet pga. bedre filter i problemområdene.</p> <p>P[0.1; 0.9]</p> <p>(Muligens litt for optimistisk self-healing sannsynlighet her, stor forbedring gjelder kanskje mer for total avgraving).</p>	<p>Oppdages lekkasjen? Svært sannsynlig at lekkasjemålesystem et virker, svært få utfall i målingene. På vinteren under rasfare langs adkomstvei kan dammen være utilgjengelig, men da er magasinnivået lavt. P[0.01; 0.99].</p>	<p>Oppstår det synkehull? Før eller siden vil det bli et synkehull hvis lekkasjen ikke oppdages, men det tar tid. "As likely as not". P[0.5; 0.5]</p>	<p>Senkes vannstanden i magasinet før synkehull oppstår? Det er stor tappekapasitet og nedtapping kan også gjøres fjernstyrt. Her antas det at det etableres rutinemessig senkning av magasinet ved lekkasjer over et visst nivå. P[0.05; 0.95]</p>	<p>For at et synkehull skal påvirke dammens sikkerhet må det være i kjernen og dypt nok til å nå HRV. Største synkehull som er observert var 1-1,5 m dypt. Nå er det større vannmengder og dermed større sannsynlighet enn i hendelse D. P[0.2; 0.8] P[0.2; 0.8]</p>	<p><u>Øvre gren:</u> Dammen tåler høy vanngjennomstrømming og punktlekkasje på toppen. Veldig robust kronevern. Synkehullet må være både dypt og bredt for at dammen skal gå til brudd. P[0.1; 0.9]</p> <p><u>Nedre gren:</u> Med lavere vannstand (etter oppdaget lekkasje og senking av magasinet) er sannsynligheten for dambrudd lavere: P[0.05; 0.95]</p>

Lekkasje initieres	Self-healing?	Lekkasje oppdages?	Synkehull ?	Vannstand senkes før synkehull oppstår?	Synkehull i kjernen, som når HRV?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F	G

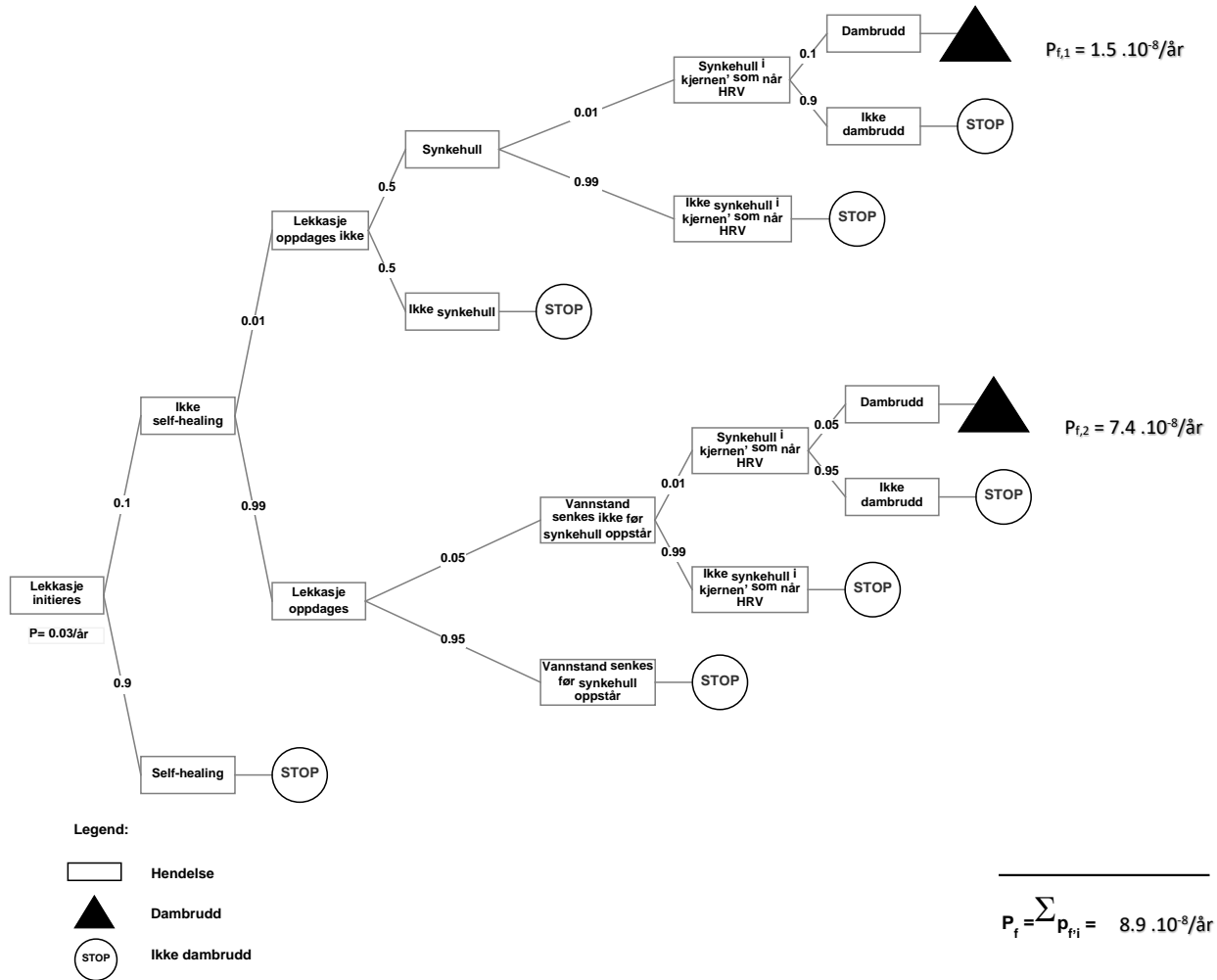


Figur C6 Hendelsestre HT6 for indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning og avgraving ned til kt. 923,5 langs hele dammen, og utbedring av morenekjerne og filter over kt. 923,5.

Tabell C6 Forklaringstabell for hendelsestre HT6 for Indre Erosjon med minimum rehabiliteringsløsning og avgraving ned til kt. 923,5 langs hele dammen, og utbedring av morenekjerne og filter over kt. 923,5. Indre erosjon Iterasjon 3 er startpunktet.

A Lekkasje initieres	B: Ikke self-healing	C Lekkasje oppdages ikke	D Synkehull	E Vannstand	F Dypt nok synkehull	G Dambrudd
<p>Utbedrede problemområder gir mindre sannsynlighet for initiering av lekkasje enn under It.1 hvis vi antar at disse områdene er hovedårsaken til høye sannsynligheter for initiering av lekkasje. Med utgravingen får E-CO svar på hvordan har tidligere injeksjoner påvirket dammens kvalitet. Det blir en stor forbedring av svakhetssoner. P (initiering av lekkasje bør være titt høyere enn gjennomsnittet i Norge. p=0.03/år</p>	<p>Høyere sannsynlighet pga. bedre filter i toppen av dammen. P[0.1; 0.9]</p>	<p>Oppdages lekkasjen? Svært sannsynlig at lekkasjemålesystem et virker, svært få utfall i målingene. På vinteren under rasfare langs adkomstvei kan dammen være utilgjengelig, men da er magasinnivået lavt. P[0.01; 0.99].</p>	<p>Oppstår det synkehull? Før eller siden vil det bli et synkehull hvis lekkasjen ikke oppdages, men det tar tid. "As likely as not". P[0.5; 0.5]</p>	<p>Senkes vannstanden i magasinet før synkehull oppstår? Det er stor tappekapasitet og nedtapping kan også gjøres fjernstyrt. Her antas det at det etableres rutinemessig senkning av magasinet ved lekkasjer over et visst nivå. P[0.05; 0.95]</p>	<p>For at et synkehull skal påvirke dammens sikkerhet må det være i kjernen og dypt nok til å nå HRV. Største synkehull som er observert var 1-1,5 m dypt. Nå er det større vannmengder og dermed større sannsynlighet enn i hendelse D. P[0.2; 0.8] P[0.2; 0.8]</p>	<p><u>Øvre gren:</u> Dammen tåler høy vanngjennomstrømning og punktlekkasje på toppen. Veldig robust kronevern. Synkehullet må være både dypt og bredt for at dammen skal gå til brudd. P[0.1; 0.9]</p> <p><u>Nedre gren:</u> Med lavere vannstand (etter oppdaget lekkasje og senking av magasinet) er sannsynligheten for dambrudd lavere: P[0.05; 0.95]</p>

Lekkasje initieres	Self-healing?	Lekkasje oppdages?	Synkehull ?	Vannstand senkes før synkehull oppstår?	Synkehull i kjernen, som når HRV?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F	G



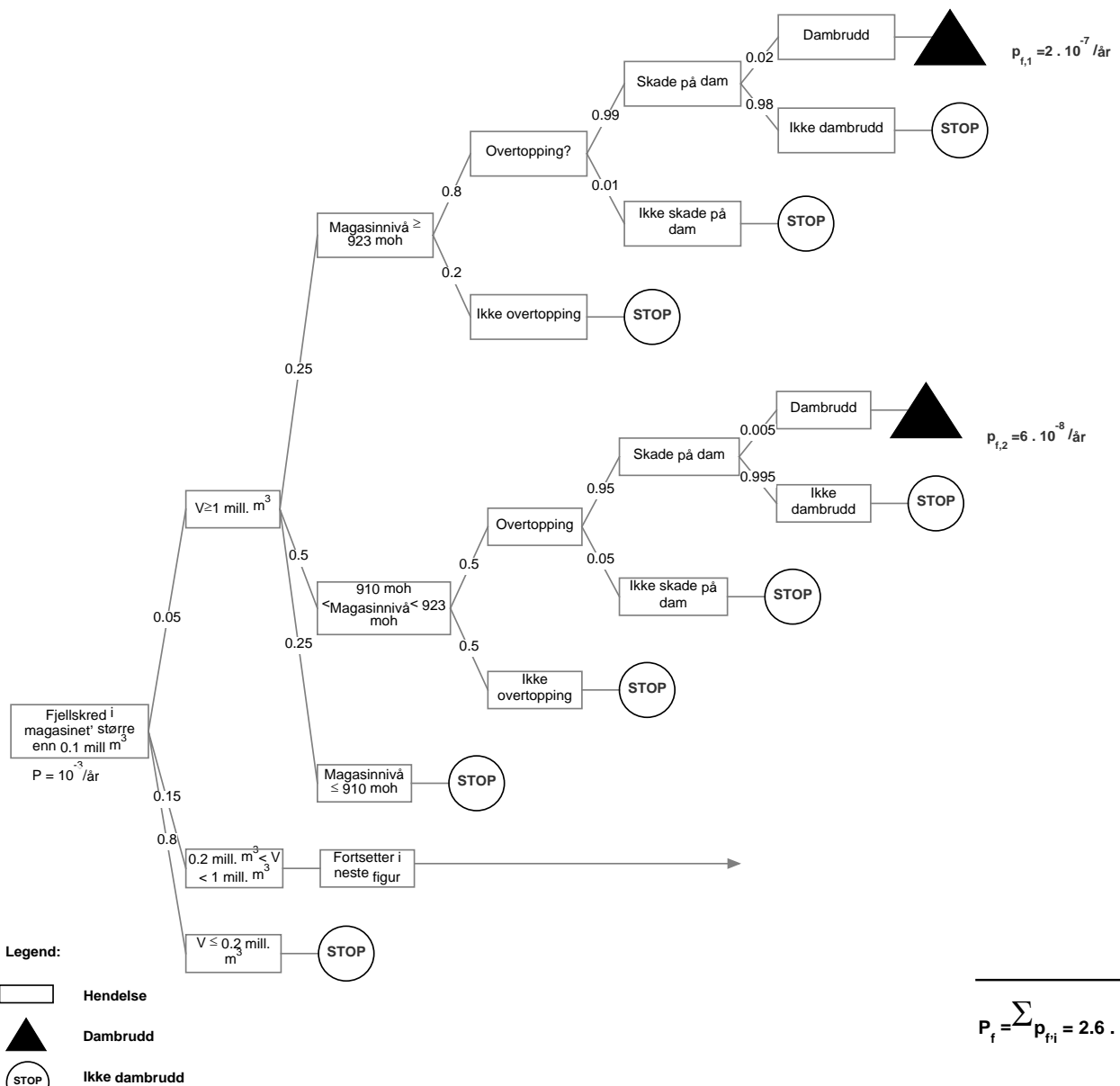
Figur C7 Hendelsestre HT7 for indre erosjon med minimum rehabiliteringsløsning og med innføring av slissevegg gjennom morenekjernen.

Tabell C7 Forklaringstabel for hendelsestre HT7 for Indre Erosjon med minimum rehabiliteringsløsning og med innføring av slissevegg gjennom kjernen. Indre erosjon Iterasjon 3 er startpunktet.

A Lekkasje initieres	B: Ikke self-healing	C Lekkasje oppdages ikke	D Synkehull	E Vannstand	F Dypt nok synkehull	G Dambrudd
<p>Slissevegg hindrer lekkasje gjennom kjernen. Sannsynligheten settes til litt høyere enn gjennomsnittet i Norge.</p> <p>p=0.03/år</p>	<p>Dårlig filter; mye lavere sannsynlighet for self-healing enn for andre dammer. Men dammen har, gjennom gulp som har helet seg selv, vist evne til self-heal.</p> <p>P[0.1; 0.9]</p>	<p>Oppdages lekkasjen? Svært sannsynlig at lekkasjemålesystem et virker, svært få utfall i målingene. På vinteren under rasfare langs adkomstvei kan dammen være utilgjengelig, men da er magasinnivået lavt. P[0.01; 0.99].</p>	<p>Oppstår det synkehull? Før eller siden vil det bli et synkehull hvis lekkasjen ikke oppdages, men det tar tid. "As likely as not". P[0.5; 0.5]</p>	<p>Senkes vannstanden i magasinet før synkehull oppstår? Det er stor tappekapasitet og nedtapping kan også gjøres fjernstyrt. Her antas det at det etableres rutinemessig senkning av magasinet ved lekkasjer over et visst nivå. P[0.05; 0.95]</p>	<p>På grunn av slisseveggen kreves et mye større synkehull enn under It.3 for at det skal bli en kritisk situasjon for dammen.</p> <p>P [0.005; 0.995] eller P[0.01; 0.99] Brukte P[0.01; 0.99].</p>	<p><u>Øvre gren:</u> Dammen tåler høy vanngjennomstrømming og punktlekkasje på toppen. Veldig robust kronevern. Synkehullet må være både dypt og bredt for at dammen skal gå til brudd. P[0.1; 0.9]</p> <p><u>Nedre gren:</u> Med lavere vannstand (etter oppdaget lekkasje og senking av magasinet) er sannsynligheten for dambrudd lavere: P[0.05; 0.95]</p>

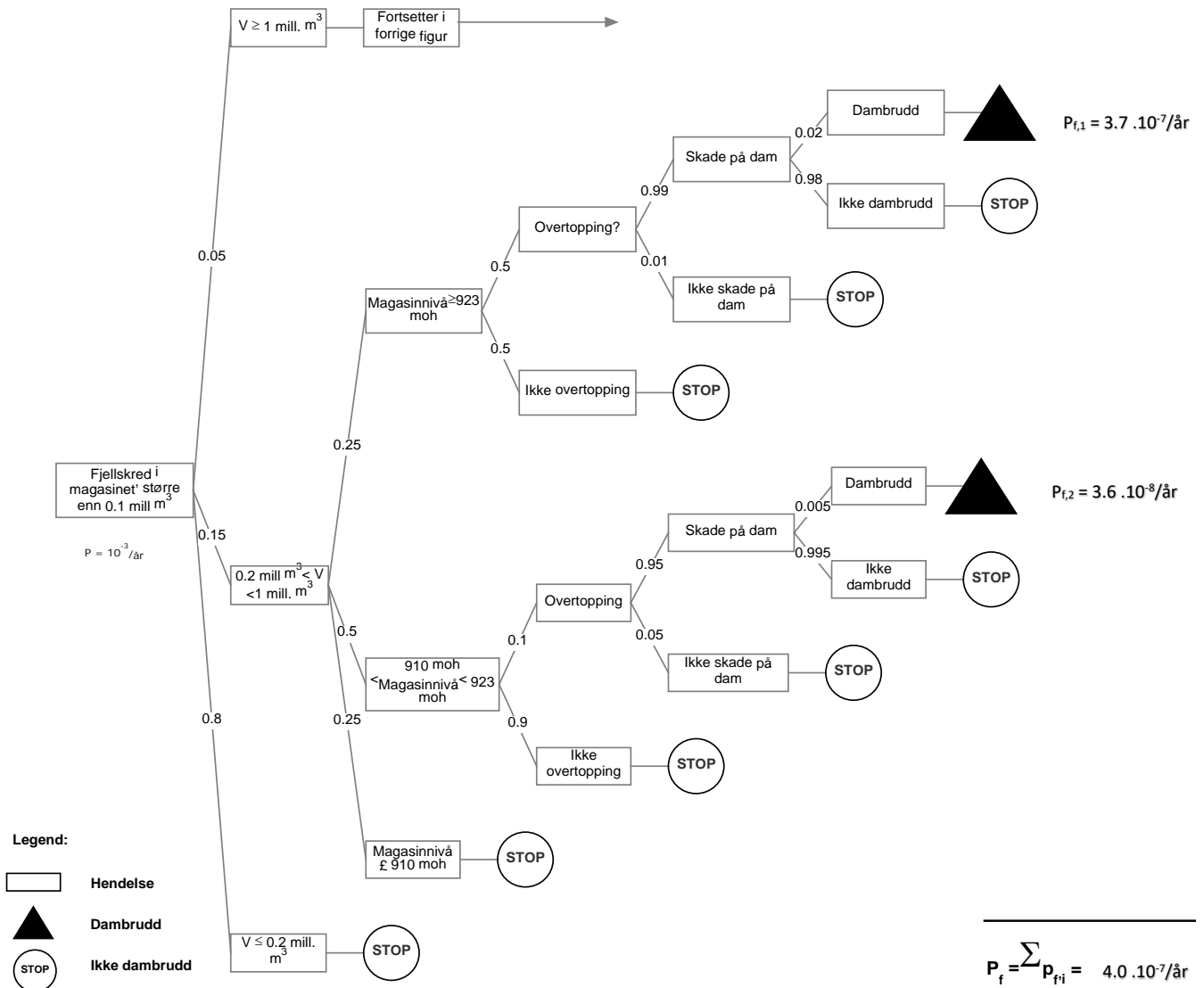
C4 Hendelsestrær for fjellskred inn i magasinet

Fjellskred i magasinet, større enn 0.1 mill m ³	Fjellskred volum?	Magasinnivå?	Overtopping?	Skade på dam?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F



Figur C8a Hendelsestre HT8 for fjellskred inn i magasinet med påfølgende flodbølge og dam overtopping, med minimum rehabiliteringsløsning. Del 1: fjellskredvolum større enn 1 mill. m³.

Fjellskred i magasinet, større enn 0.1 mill m ³	Fjellskred volum?	Magasinnivå?	Overtopping?	Skade på dam?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F



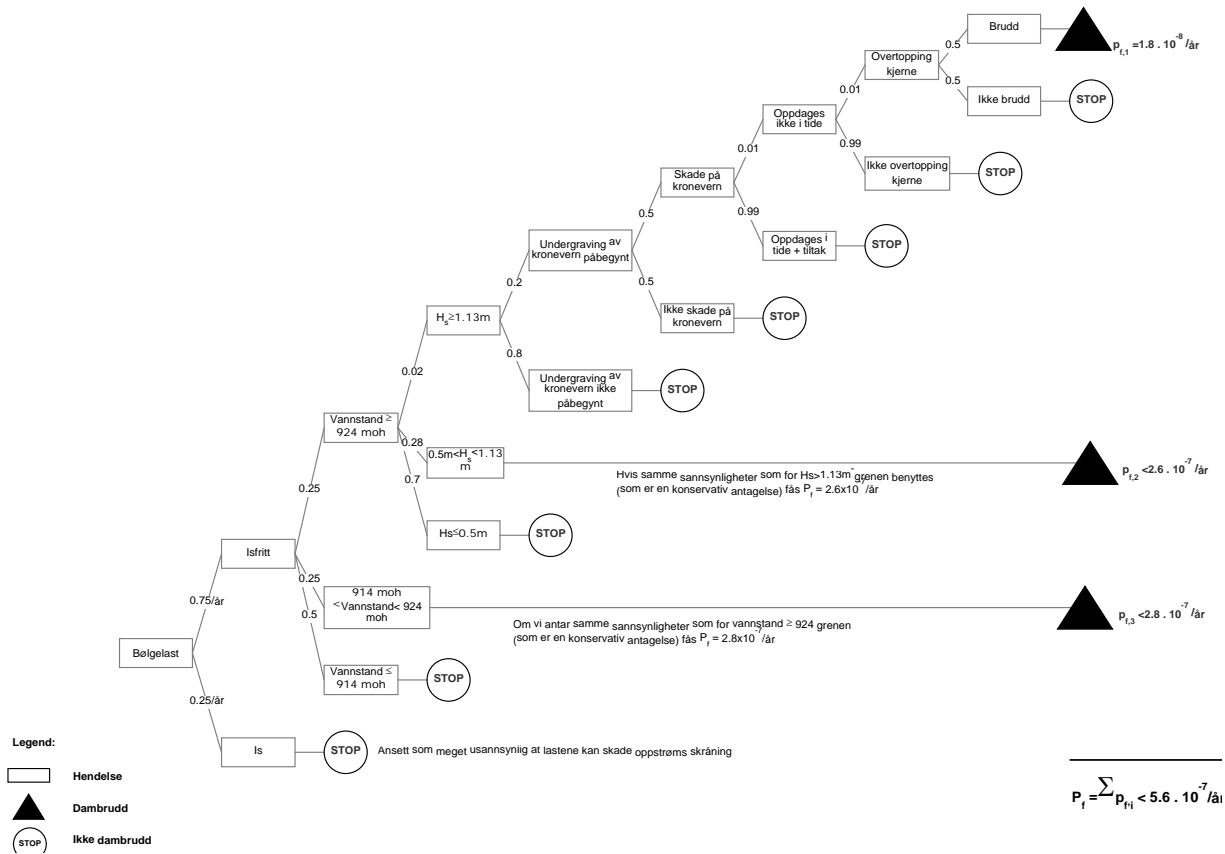
Figur C8b Hendelsestre HT8 for fjellskred inn i magasinet med påfølgende flodbølge og dam overtopping, med minimum rehabiliteringsløsning. Del 2: fjellskredvolum mindre enn 1 mill. m³.

Tabell C8 Forklaringstabell for hendelsestre HT8 for Fjellskred inn i Magasinet med påfølgende flodbølge og dam overtopping, med minimum rehabiliteringsløsning, alle fjellskredvolum (Figur D8a og D8b)

A Fjellskred i magasinet	B Fjellskredvolum	C Magasinnivå	D Overtopping	E Skade på dam	F Dambrudd
<p>Vi ser på fjellskred med volum (V) over 0.1 mill m³. Tok utgangspunkt i sannsynligheten for skred i Storfjorden-området (Åknes) som ligger på 10⁻⁴/år. Har det skjedd skred før på området? Øy utenfor Raudnosi området som ser ut som et tidligere skred av betydelig størrelse. Overtopping vil skje, ikke nødvendigvis dambrudd. p for de største skredene i Norge er beregnet til ca. 10⁻⁴/år. p= 10⁻³/år</p>	<p>V>1mill m³ 0.2 mill. m³<V≤1 mill. m³ V≤ 0.2 mill. m³</p> <p>Mindre fjellskred forekommer hyppigere enn større fjellskred.</p> <p>P[0.05; 0.15 ;0.8]</p>	<p>Større enn HRV-7m; mellom HRV-7m og HRV-20m; Mindre enn HRV-20m.</p> <p>Basert på magasinkurver gjennom året.</p> <p>P[0.25; 0.5; 0.25]</p>	<p>Baseres på observasjoner fra modellforsøk (NTNU).</p> <p>Fig. D8a P[0.8; 0.2] P[0.5; 0.5]</p> <p>Fig. D8b P[0.5; 0.5] P[0.1; 0.9]</p>	<p>Stor sannsynlighet for en eller annen form for skade på dammen, da den ikke er dimensjonert for bølger av denne størrelsen.</p> <p>Fig. D8a P[0.99; 0.01] P[0.95; 0.05]</p> <p>Fig. D8b P[0.99; 0.01] P[0.95; 0.05]</p>	<p>Overtopping betyr ikke dambrudd</p> <p>Fig. D8a P[0.02;0.98] P[0.005;0.995]</p> <p>Fig. D8b P[0.02;0.98] P[0.005;0.995]</p>
Samme hendelsestreet, men med forbedret plastring oppstrøms					
Som ovenfor	Som ovenfor	Som ovenfor	Som ovenfor	Litt lavere sannsynligheter enn ovenfor	Som ovenfor

C5 Hendelsestrær for bølgelast på oppstrøms skråning

Bølgelast	Is?	Vannstands-nivå?	Størrelse av H _s ?	Undergraving av kronevern påbegynt?	Skade på kronevern?	Oppdages i tide?	Overtopping?	Dambrudd
A	B	C		D	E	F	G	H

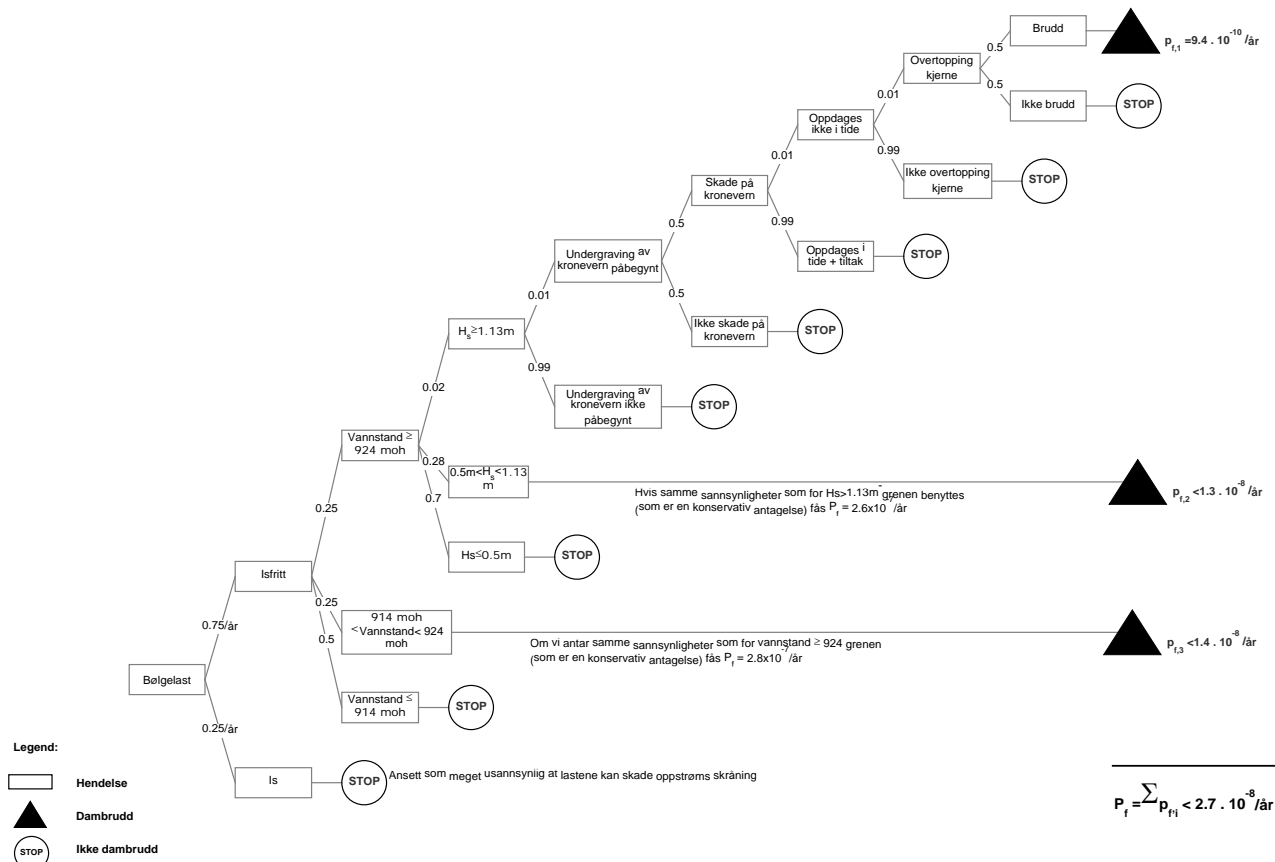


Figur C9 Hendelsestre HT9 for bølgelast som kan skade oppstrøms skråning, med minimum rehabiliteringsløsning på Dam Vidalsvatn

Tabell C9 Forklaringstabell for hendelsestre HT9 for Bølgelast som kan skade oppstrøms skråning, med minimum rehabiliteringsløsning på Dam Viddalsvatn

A Isfritt	B Vannstand	C Bølgehøyde	D Undergraving av kronevern	E Skade på kronevern	F Oppdages ikke i tide	G Overtopping kjerne	H Dambrudd
<p>Isfritt store deler av året. Sjeldent is på vinteren; islast kan utelukkes.</p> <p>p= 0.25/år P= 0.75/år</p>	<p>≥924 moh 914-924 moh ≤914 moh</p> <p>Basert på magasin-kurver gjennom året.</p> <p>P[0.25;0.25; 0.5]</p>	<p>Dimensjonerende bølge er basert på 50-års vindlast.</p> <p>P[0.02; 0.28; 0.7]</p>	<p>Må skje umiddelbart under kronevernet. Ingen observerte skader i dette området.</p> <p>P[0.2; 0.8]</p>	<p>Usikkerhet om dette ville gi skader på kronevernet.</p> <p>P[0.5; 0.5]</p>	<p>Spesialtilsyn ved sterk vind. Ikke nødvendig å oppdage en skade ved første gangs undersøkelse, da utviklingen av bruddmekanismen tar lang tid.</p> <p>P[0.01; 0.99]</p>	<p>Må mye til for at overtopping skjer. Lite sannsynlig.</p> <p>P[0.01; 0.99]</p>	<p>Liten tid å gjøre tiltak for å forhindre dambrudd i en overtoppings-situasjon. "usikker, derfor:</p> <p>P[0.5;0.5]</p>

Bølgelast	Is?	Vannstands-nivå?	Størrelse av H _s ?	Undergraving av kronevern påbegynt?	Skade på kronevern?	Oppdages i tide?	Over-topping?	Dambrudd
A	B	C		D	E	F	G	H



Figur C10 Hendelsestre HT10 for bølgelast som kan skade oppstrøms skråningen, med minimum rehabiliteringsløsning og effekt av ny plastring på oppstrøms side

Tabell C10 Forklaringstabell for hendelsestre HT10 for Bølgelast som kan skade oppstrøms skråningen, med minimum rehabiliteringsløsning og effekt av ny plastring på oppstrøms side

A Isfritt	B Vannstand	C Bølgehøyde	D Undergraving av kronevern	E Skade på kronevern	F Oppdages ikke i tide	G Overtopping kjerne	H Dambrudd
<p>Isfritt store deler av året. Sjeldent is på vinteren; islast kan utelukkes.</p> <p>p= 0.25/år P= 0.75/år</p>	<p>≥924 moh 914-924 moh ≤914 moh</p> <p>Basert på magasin-kurver gjennom året.</p> <p>P[0.25;0.25; 0.5]</p>	<p>Dimensjonerende bølge er basert på 50-års vindlast.</p> <p>P[0.02; 0.28; 0.7]</p>	<p>Må skje umiddelbart under kronevernet. Ingen observerte skader i dette området. Plastring oppstrøms gjør denne sannsynligheten mye mindre enn i tilfellet uten forbedring av plastring oppstrøms.</p> <p>P[0.01; 0.99]</p>	<p>Usikkerhet om dette ville gi skader på kronevernet.</p> <p>P[0.5; 0.5]</p>	<p>Spesialtilsyn ved sterk vind. Ikke nødvendig å oppdage en skade ved første gangs undersøkelse, da utviklingen av bruddmekanismen tar lang tid.</p> <p>P[0.01; 0.99]</p>	<p>Må mye til for at overtopping skjer. Lite sannsynlig.</p> <p>P[0.01; 0.99]</p>	<p>Liten tid å gjøre tiltak for å forhindre dambrudd i en overtoppings-situasjon. "usikker, derfor:</p> <p>P[0.5;0.5]</p>

Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Risikovurdering av Dam Viddalsvatn		Dokumentnr./Document No. 20180156-02-R
Dokumenttype/Type of document Rapport / Report	Oppdragsgiver/Client E-CO Energi og Energi Norge	Dato/Date 2018-08-27
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document according to contract NGI		Rev.nr.&dato/Rev.no.&date 0 /
Distribusjon/Distribution ÅPEN		
Emneord/Keywords Dam, steinfylling, indre erosjon, rehabiliteringstiltak, risikovurdering, brudds sannsynlighet, risiko		

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

Dokumentkontroll/Document control					
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev/Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll av/ Self review by:	Sidemannskontroll av/ Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Inter-disciplinary review by:
0	Originaldokument	UKE 2018-04-04	KH og SL 2018-04-12/18 SL 2018-08-13	E-CO juni 2018 Workshop deltagere august 2018	

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date 2018-08-27	Prosjektleder/Project Manager Suzanne Lacasse
----------------------------------------------------------------------------	--------------------------------	---------------------------------------------------------

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

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

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

www.ngi.no

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

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

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

www.ngi.no

