

Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv

RISIKOVURDERING FOR NESJENDAMMENE

DOK.NR. 20150624-04-R-R

REV.NR. 0 / 2018-04-27



Foto Sira Kvina

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

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

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

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



Prosjekt

Prosjekttittel: Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv
Dokumenttittel: Risikovurdering for Nesjendammene
Dokumentnr.: 20150624-04-R
Dato: 2018-04-27
Rev.nr. / Rev.dato: 0 /

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Energi Norge / Sira-Kvina
Kontaktperson: Eve Cathrin Walseth (EnergiNorge)/Rolv Guddal (Sira Kvina)
Kontraktreferanse: Oppdragsbekreftelse 31. Oktober 2016.

for NGI

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

Sammendrag

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

- «State-of-the-art» oversikt over risikoanalyser for dammer i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv.
- Risikoanalyser av fire norske dammer, Dam Dravladalen, Dam Nyhellervatn, Dam Nesjen og Dam Strandfossen.

Denne rapporten beskriver resultater fra analysene for Nesjendammene. Risiko-vurderingsanalysene av Nesjendammene siktet mot fire formål:

- vurdere sikkerhet og bruddsannsynlighet for Nesjendammene før rehabilitering
- kvantifisere effekten av planlagte rehabiliteringstiltak på sikkerheten
- etablere hvilke tiltak som er de mest virkningsfulle
- vurdere hele anlegget samlet.

Risikovurderingene ble hovedsakelig gjennomført med hendelsestre-analyser. I tillegg ble det gjort probabilistiske analyser av stabiliteten av Sekundærdam 1 under islat. For hver bruddårsak og bruddmekanisme ble det anslått en årlig bruddsannsynlighet.

Det beste estimatet for bruddsannsynlighet for Dam Nesjen før rehabilitering er på 5 ganger pr 100.000 år og ca. 9 ganger pr 1.000.000 år etter rehabilitering. Den beregnede sannsynligheten er lavere enn den internasjonalt rapporterte bruddfrekvensen for brudd forårsaket av indre erosjon. En analyse av konsekvensene viser at Nesjen Hoveddammen har tolerabel eller akseptabel risiko, både før og etter rehabilitering. Varsling er et viktig tiltak for å redusere konsekvensene av et eventuelt brudd. En gjennomgang av varslingsrutiner kan være en god investering for å redusere risikoen ytterligere.

Det bør vurderes om å tillate "overtopping" på Sekundærdam 4 for å redusere bruddsannsynligheten på Hoveddammen. "Overtopping" ved Sekundærdam 4 vil føre til en reduksjon i magasinnivået og umiddelbart minke belastningen på Hoveddammen ved en ekstrem hendelse og dermed redusere betraktelig også bruddsannsynligheten for Hoveddammen. Ved rehabiliteringen anbefales det derfor å heve damkjernen og damkronen ved Sekundærdam 4 mindre enn for de andre dammene, på en slik måte at det blir Sekundærdam 4 som har lavest kritisk vannstand ved fare for "overtopping". Konsekvensene ved "overtopping" eller dambrudd i Sekundærdam 4 er langt lavere enn for de andre Nesje-fyllingsdammene.

Risikovurderingene av Sekundærdam 1 viser at den beregnede bruddsannsynligheter ligger rundt 10^{-5} /år når det antas at islasten på 100 kN/m har en returperioden på 500 år. Usikkerheten i både størrelse og returperiode i islasten har en stor påvirkning på den beregnede bruddsannsynlighet. Beregninger med mye kortere returperiode enn 500 år vil øke bruddsannsynlighet merkbart. Sira-Kvina bør prøve å bedre kvantifisere islasten, siden usikkerheten i islasten betyr så mye for den beregnede bruddsannsynligheten. Dessuten bør friksjonsvinkelen mellom betong og fjell vurderes nærmere.

Innhold

1	Bakgrunn.....	6
2	Om Nesjendammene.....	6
	2.1 Hoveddammen	7
	2.2 Sekundærdammene	8
	2.3 Planer for rehabilitering/Anbefalte rehabiliteringstiltak	9
3	Analysen for Nesjendammene.....	10
	3.1 Analyse av damsystemet som helhet	10
	3.2 Metodikk	11
	3.3 Deterministiske analyser av skråningsstabilitet	12
	3.4 Beregning av årlige bruddsannsynligheter	13
	3.5 Estimat av sannsynligheter i hendelsestrærne	13
4	Identifisering av utløsningsårsak og bruddmekanismer.....	14
5	Analysen av bruddsannsynlighet.....	15
	5.1 Oversikt over analysene	15
	5.2 Resultater fra hendelsestre-analysene	16
	5.2.1 Før rehabilitering	16
	5.2.2 Etter rehabilitering	17
	5.2.3 Sammenligning av sannsynlighetene før og etter rehabilitering	17
	5.3 Analyse av Sekundærdam 1 (platedam)	18
	5.4 Diskusjon om årlige bruddsannsynlighet	20
6	Konsekvens- og risikoanalyse.....	21
	6.1 Eksponerte objekter	21
	6.2 Intensitet av dambruddbølgen	21
	6.3 Konsekvenser i form av liv og helse	22
	6.3.1 Antall omkomne fra Brown og Gosden 2004-studie	22
	6.3.2 Antall omkomne fra DVN 1998-studie	24
	6.4 Konsekvenser i form av materielle tap	24
	6.5 Akseptabel og tolerabel risiko	25
7	Konklusjoner.....	28
8	Anbefalinger.....	29
	Acknowledgement.....	29
	Referanser.....	29

Vedlegg

Vedlegg A	Nesjendammene
Vedlegg B	Sikkerhetsvurdering av Sekundærdam 1 (betong platedam)
Vedlegg C	Beskrivelse av sannsynlighetene i hendelsestre-analysene
Vedlegg D	Betraktninger om årlig sannsynlighet for lekkasje som kan lede til indre erosjon
Vedlegg E	Hendelsestre-analyser for Nesjendammene

1 Bakgrunn

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

- «State-of-the-art» oversikt over risikoanalyser for dammer i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv.
- Risikovurderinger av fire norske dammer, Dam Dravladalen, Dam Nyhellervatn, Dam Nesjen og Dam Strandfossen.

Risikoanalysene ble gjennomført delvis via en "workshop" hvor sakkyndige fra flere instanser ble samlet og bidro til vurderingene. Risikovurderingsanalysene av Nesjendammene sikter mot fire formål:

- vurdere sikkerhet og bruddsannsynlighet for Nesjendammene før rehabilitering;
- kvantifisere effekten av planlagte rehabiliteringstiltak på sikkerheten;
- etablere hvilke tiltak som er de mest virkningsfulle;
- vurdere hele anlegget samlet.

Denne rapporten beskriver resultater fra analysene for Nesjendammene. Hovedrapporten fokuserer på resultater og lærdom fra analysene. Mer detaljer om analysene og resultatene er beskrevet i vedleggene.

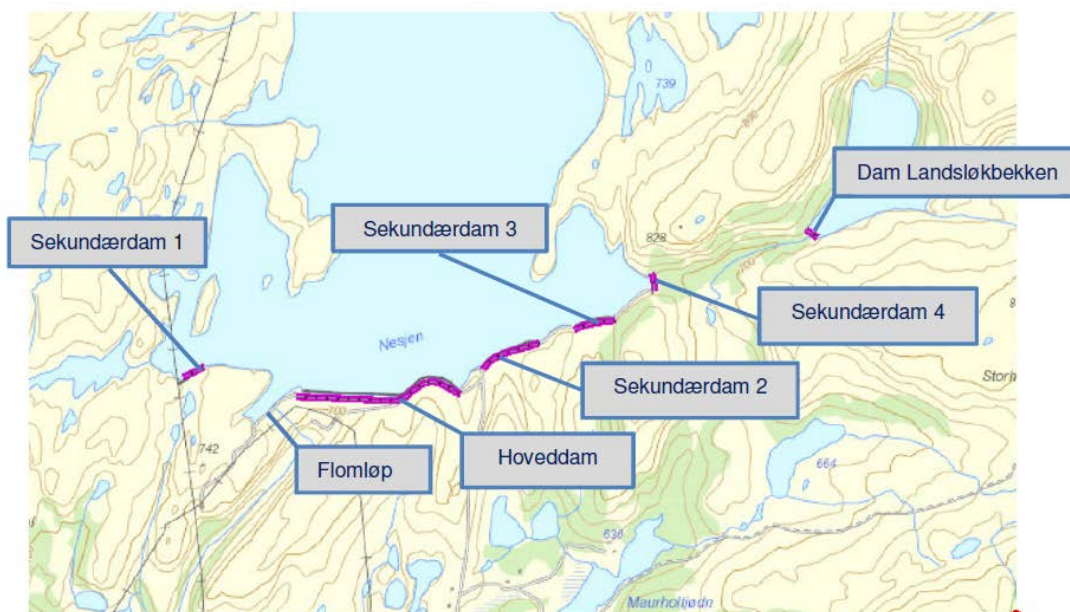
2 Om Nesjendammene

Nesjendammene ligger i Kvinesdal kommune i Vest-Agder fylke og eies av Sira-Kvina kraftselskap. Nesjen er reguleringsmagasin samt inntak for Solhom kraftverk.

Nesjen hoveddam er en steinfyllingsdam med tilnærmet sentral tetningskjerne av morene. Den ble bygget i årene 1966-1968. Nesjen sekundærdam 2, 3 og 4 ligger i tilknytning til hoveddammen og er bygget som steinfyllingsdam med morenetetning. I tillegg til sekundærdammene er det også bygget en 10 meter høy platedam i betong (sekundærdam 1) som fungerer som flomløp i tillegg til hovedflomløpet. Sikkerheten av platedammen er også vurdert. Landsløkbekken inntaksdam inngår også i damsystemet. Brudd ved Landsløkbekken inntaksdam ikke vil berøre noen boligenheter. Figur 1 viser plassering av dammene. Nøkkeldata for Nesjendammene er:

Nedbørsfelt:	230 km ²
Oppdemmet magasinivolum:	274,3 mill m ³
Høyeste regulerte vannstand (HRV):	715 moh
Laveste regulerte vannstand (LRV):	677 moh
Entreprenør:	Brødrene Hauge AS
Kontrollør:	NGI

Nøkkeldata for fyllingsdammene	Hoveddam	Sekundærdam 2	Sekundærdam 3	Sekundærdam 4
Damlengde (m)	675	225	170	75
Volum (1000 m ³)	560	148	61	
Største damhøyde (m)	50	19	15	15
Nivå topp morenekjerne (moh)	716,5	716,5	716,5	716,5
Nivå, damkrone (moh)	720	718,5	718,5	718,5
Fribord (Q ₁₀₀₀) til morene kjerne	0,3m	0,3m	0,3m	0,3m
Damklasse	4	4	4	3



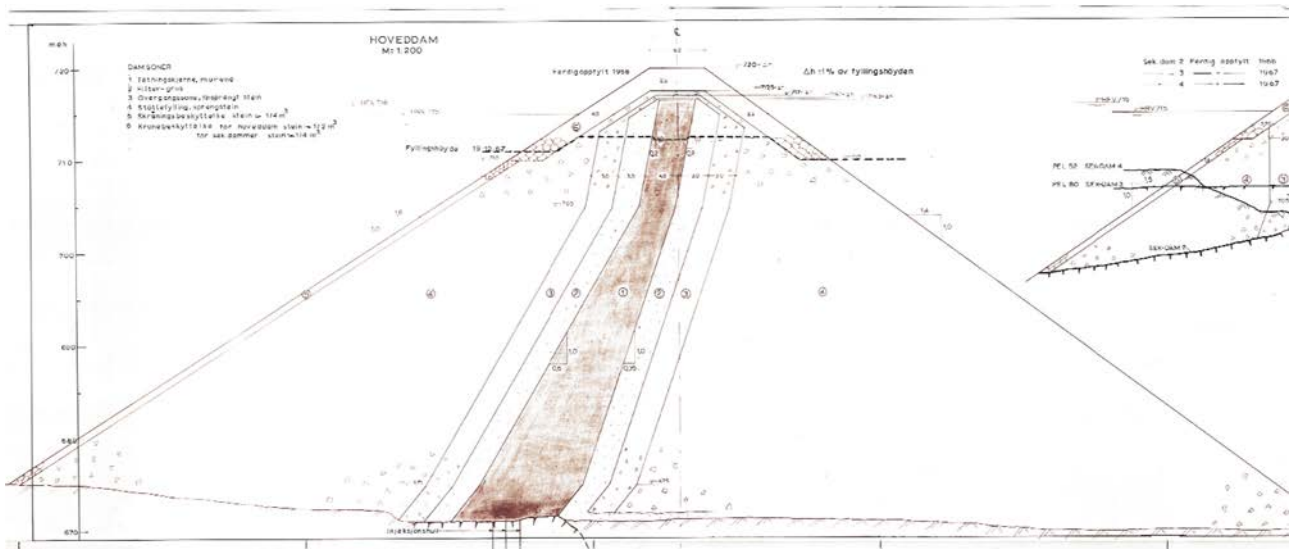
Figur 1. Magasin med dammer ved Nesjen (Norconsult, 2015b).

Hoveddammen og sekundæredammene 2 og 3 er plassert i klassifiseringsklasse 4, og sekundærdammen 4 i klassifiseringsklasse 3. Sekundærdam 1 (platedammen) er plassert i klassifiseringsklasse 2 og Landsløkbekken inntaksdammen er plassert i klassifiseringsklasse 1.

Det har ikke vært registret noen unormale hendelser på hverken fyllingsdammene eller betongplatedammen. Oppstrøms skråning er derimot ikke bygget etter dagens krav, men på grunn av stort innslag av stor blokk, synes skråningen å være stabil (Norconsult, 2015b).

2.1 Hoveddammen

Hoveddammen består av seks damsoner: tetningskjerne, filter, overgangssone, støttefylling, skråningsbeskyttelse og kronebeskyttelse. Tverrsnitt av hoveddammen er vist i Figur 2.

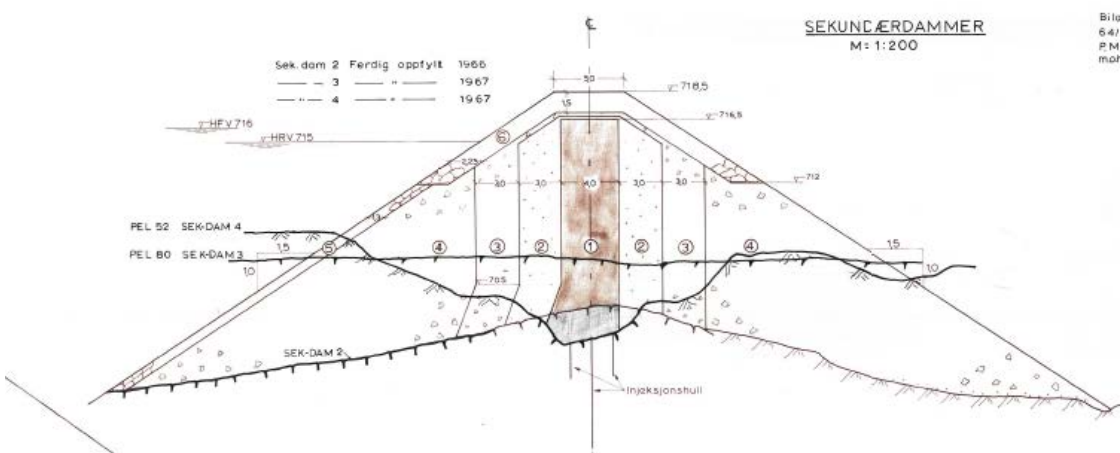


Figur 2. Tverrsnitt av Nesjen. Hoveddam, med damsoner 1: tetningskjerne, morene; damsoner 2: filter-grus; damsoner 3: overgangssone, finsprengt stein; damsoner 4: støttefylling, sprengstein; damsoner 5: skråningsbeskyttelse; og damsoner 6: kronebeskyttelse (NGI, 1968).

2.2 Sekundærdammene

Sekundærdam 1 er en betongplatedam med massivdamanslutninger på begge sider. Dammen er 87 m lang med største høyde på ca. 9 m målt til topp av damkrona. Netto overløp er ca. 75,2 m som ligger på kt. 715,0 tilsvarende HRV i magasinet. Dammen er i sin helhet fundamentert på fjell.

Sekundærdammene 2, 3 og 4, alle fyllingsdammer, består i likhet med hoveddammen av 6 damsoner: tetningskjerne, filter, overgangssone, støttefylling, skråningsbeskyttelse og kronebeskyttelse. Tverrsnitt av sekundærdammene er vist i Figur 3.



Figur 3. Tverrsnitt av sekundærdammene 2,3 og 4 ved Nesjen, NGI (1968).

2.3 Planer for rehabilitering/Anbefalte rehabiliteringstiltak

Fyllingsdammene

Fyllingsdammene ved Nesjen ble revurdert av Sweco Grøner i 2004, resultatene er rapportert i Norconsult (2015a). Revurderingsrapporten har følgende konklusjoner, Norconsult (2015a):

- Oppstrøms skråning er ikke bygget etter dagens krav, men da innslaget av stor blokk er stor synes skråningen å være stabil.
- Det er ingen plastring av nedstrøms skråning, men denne har et dekk sjikt av grovfraksjonert sprengstein
- Instrumenteringen er mangelfull. Dammene mangler et lekkasjemålesystem og det er for få målingsbolter i skråninger og på kjerne.

NVEs kommentarer til avvikene var:

- Damkroner og nedstrøms skråning har ikke en tilfredsstillende utførelse, både når det gjelder kronedimensjoner og steinstørrelse (beredskapsmessige krav)
- Det bør vurderes om tetningskjernen bør heves

Det er ikke nevnt noe om oppstrøms skråning bør rehabiliteres, noe som kan tolkes slik at selv om det er konstatert avvik til regelverket anses oppstrøms skråning som stabil.

Tappelukene ble revurdert av Norconsult AS i 2012. Hovedkonklusjonen er at tappelukene har tilfredsstillende styrke og kapasitet. Imidlertid anbefales det å rehabilitere hydraulikkaggregatet inklusive den elektriske utrustningen. NVE har godkjent revurderingen i 2013.

Følgende rehabiliteringstiltak skal gjennomføres på samtlige av fyllingsdammene:

- Heve damkrona til kote 721,60 inklusive setningsmonn, henholdsvis til kote 720,5 for Sekundærdam 4.
- Påbygging av nedstrøms damskråninger med plastret stein slik at tilfredsstillende stabilitet og dremskapasitet oppnås.
- Ombygging av damtoppene skjer ved at:
 - Morenekjernen heves til ca. kt. 717,8 med toppbredde minimum 2,0 m.
 - Nytt kronevern bygges opp med yttersteiner på minimum 1,0 m³ for klasse 4-dammene og 0,5 m³ for Sekundærdam 4 (klasse 3). Sonen føres ned til 6 m henholdsvis 5 m under HRV i begge damskråninger.
 - Bredden av damkronene økes til 6,5 m, henholdsvis 5,5 m for Sekundærdam 4.
- Lekkasjemålehus etableres ved alle dammene med kontinuerlig overføring til driftsentralen. Hoveddammen vil få 3 målepunkter.

- Nye setningsbolter monteres på nyplastret overflate i oppstrøms- og nedstrøms skråninger samt på damkronene.
- For tappeluke: Rehabiliterer hydraulikkaggregat inklusive elektriske komponenter for tappelukene.

Platedammen

Tiltaksplan for platedammen er ikke godkjent av NVE, nye tekniske planer er under utarbeidelse. Beregninger i forbindelse med revurdering påviste at platedammens lave partier har for lav veltestabilitet og glidestabilitet ved lasttilfelle HRV+islust.

3 Analyser for Nesjendammene

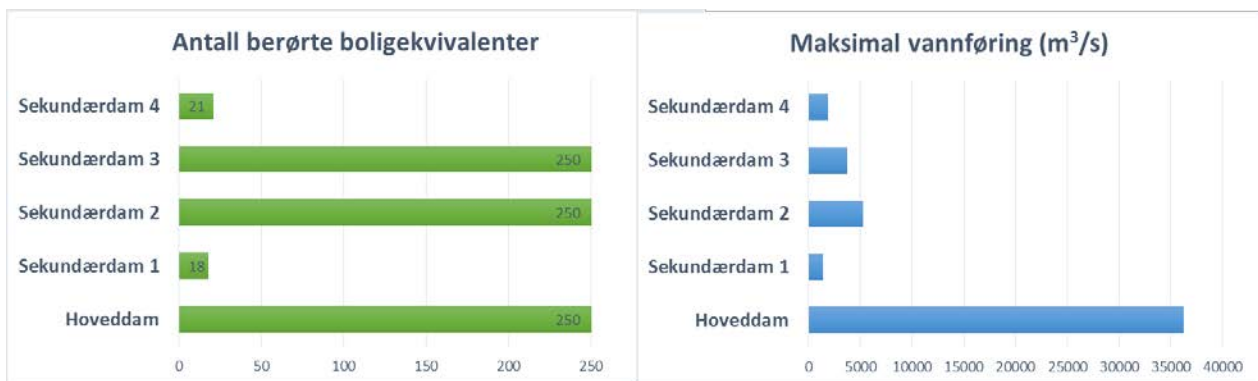
3.1 Analyse av damsystemet som helhet

Som for analyse av enkeltdammer startes det med å vurdere initierende faktorer som kan være ytre påkjenninger, enkeltvis eller i kombinasjon. Deretter vurderes faktorer og tilstander som er felles for hele damsystemet, som f.eks. overløpet og reservoarnivå. For overtoppingsproblemer ble det vurdert hvilken av dammene som hadde lavest tåleevne når det gjaldt strømming over dammen og dermed hvor i damsystemet dambrudd ville oppstå. Under workshopen, ble det henvist til Norconsults beregninger av hvor mye overtopping de ulike dammene tålte, både før og etter rehabilitering. Dette er oppsummert i Tabell 1.

Ideelt sett skulle den av sekunddærdammene som hadde lavest bruddkonsekvenser gå til brudd først for å forhindre brudd i hoveddam eller i øvrige sekunddærdammene, der konsekvensene er større. Bruddkonsekvensene i form av antall berørte og maksimal bruddvannsføring er gitt i Figur 4 for de fire fyllingsdammene og for platedammen, Sekundærdam 1).

Tabell 1. Kritisk vannstand (kotehøyde) for de ulike fyllingsdammene i Nesjen damsystemet.

Fyllingsdam	Kritisk vannstand før rehabilitering	Kritisk vannstand etter rehabilitering
Hoveddam	718,2 m	719,17 m
Sekunddærdam 2	717,35 m	718,94 m
Sekunddærdam 3	717,6 m	719,11 m
Sekunddærdam 4	717,45 m	719,35 m



Figur 4. Antall berørte boligekvivalenter og maksimalvannføring ved et eventuelt dambrudd i de ulike dammene i Nesjen damsystemet.

3.2 Metodikk

Vurderingen av sannsynlighet for brudd for Dam Nesjen ble gjort ved hjelp av hendelsestre-analyse. Sannsynlighetene er beskrevet både med et fast tall og et tallområde som indikerer usikkerheten i sannsynlighetsvurderingen (Vedlegg C). Hendelsestre-analysen gir et beste estimat, en nedre grense og en øvre grense for sannsynlighet for brudd. 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 tilsvarende dammers ytelse under ulike påkjenninger og av tidligere hendelser på fyllingsdammen.
2. Befaring og inspeksjon av dammen for å bli kjent med dammen og grunnforholdene.
3. Identifisering av de viktigste utløsningsårsaker og bruddmekanismer.
4. Etablere enighet om hvilke sannsynligheter ulike verbale beskrivelser av usikkerheter representerer.
5. Oppbygging av hendelsestrær.
6. Estimat av sannsynligheter for hver av enkelthendelsene i hendelsestreet eller nettverket.
7. Evaluering av resultater.
8. Iterasjon.

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

Et essensielt steg i vurderingen er trinn 3: Identifisering av de viktigste utløsningsårsaker og bruddmekanismer, eller "Failure mode screening" på engelsk. Den delen av analysen er

beskrevet i Avsnitt 4. Risikovurderingen bør se på alle plausible bruddmekanismer og utløsende faktorer.

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

3.3 Deterministiske analyser av skråningsstabilitet

Norconsult (2015a) gjennomførte stabilitetsanalyser av de rehabiliterte dammene for oppstrøms- og nedstrøms skråning. Resultatene er vist i Tabell 2 og 3. Den laveste beregnede sikkerhetsfaktor (F_{min}) er gitt for ulike belastningstilstander.

Resultatet av stabilitetsanalysen for dammene viser at de rehabiliterte dammene har tilfredsstillende sikkerhet mot utglidning i alle belastningstilstander med god margin. Før rehabilitering, var den minste sikkerhetsfaktor F_{min} for nedstrøms skråningen under stasjonær tilstand var 1,66. For oppstrøms skråningen, var den minste sikkerhetsfaktor F_{min} under hurtig nedtapping 1,80.

Tabell 2. Resultat av stabilitetsanalyser av rehabilitert hoveddam (Norconsult, 2015a).

DFV: Dimensjonerende Flom Vannstand; HRV: Høyeste Regulerte Vannstand; PMF: Påregnelig Maksimal Flom

Belastningstilstand/skråning	Vannstand	F_{min}
Stasjonærtilstanden, nedstrøms skråning	DFV – 716,6	1,74
Ulykkestilstanden, nedstrøms skråning, 4 m utløpshøyde	PMF	1,36
Hurtig nedtapping, oppstrøms skråning	Fra HRV til 687	1,80
Jordskjelv, nedstrøms skråning*	HRV	1,43
Jordskjelv, oppstrøms skråning*	HRV	1,46

* Pseudo-statisk stabilitetsanalyse

Tabell 3. Resultat av stabilitetsanalyser av rehabiliterte sekundærdammer (Norconsult, 2015a).

DFV: Dimensjonerende Flom Vannstand; HRV: Høyeste Regulerte Vannstand; PMF: Påregnelig Maksimal Flom

Belastningstilstand/skråning	Vannstand	F_{min}
Stasjonærtilstanden, nedstrøms skråning	DFV – 716,6	2,06
Ulykkestilstanden, nedstrøms skråning, 2,5m utløpshøyde	PMF	1,78
Hurtig nedtapping, oppstrøms skråning	Fra HRV til 703	1,50
Jordskjelv, nedstrøms skråning*	HRV	1,87
Jordskjelv, oppstrøms skråning*	HRV	1,44

* Pseudo-statisk stabilitetsanalyse

3.4 Beregning av årlige bruddsannsynligheter

Analysene ble gjennomført på en workshop på NGI 30. og 31. mai 2017. Deltagerne representerte myndighetene, bransjeforening, vassdragstekniske ansvarlige, dameiere og rådgivere. Deltagerlisten er vist i Tabell 4.

På workshopen var alt av relevant bakgrunnsinformasjon om Nesjendammene tilgjengelig. I tillegg var workshopdeltagernes kunnskap om og erfaringer med drift og operasjon av Nesjendammene og andre dammer svært verdifull.

Arbeidet på workshopen omfattet trinn 3 - 8 i åtte-trinns prosedyren beskrevet i delavsnitt 3.2. Alle trinnene ble gjennomført gjennom diskusjon. Under oppbygningen av hendelsestrærne, la deltagerne frem sine synspunkter på sannsynlighetene for hver av enkelthendelsene i hendelsestreet. Sannsynlighetene i analysene i denne rapporten er "konsensus-verdier", etter at gruppen ble enig om sannsynlighet etter en diskusjon.

Tabell 4. Workshop deltagere for risikoanalyse av Nesjendammene.

Representant	Bedrift
Leif Basberg	EN
Per Magnus Johansen	Norconsult
Hilde Marie Kjellesvig	Sweco
Anette Fjeld	Olav Olsen
Rolf Krogh Medalen	NVE
Grethe Midttømme	NVE
Rolv Guddal	Siri-Kvina
Reidar Birkeland	Statkraft
Leif Lia	NTNU
Suzanne Lacasse	NGI
Farrokh Nadim	NGI
Thi Minh Hue Le	NGI
Ørjan Nerland	NGI
Unni Eidsvig	NGI

De viktigste analysetilfellene og samtlige hendelsestrær ble gjennomgått på workshopen. NGI kompletterte analysene etter workshopen og utførte tilleggsanalyser i form av probabilistiske analyser av sikkerhet mot glidning og veltingsstabilitet av betongdammen Sekundærdam 1. Det vil også gjennomføres "stress testing" av damsystemet i 2018 i et samarbeid mellom Sira-Kvina, NGI og University of Texas i Austin, Texas. Disse vil rapporteres separat.

3.5 Estimat av sannsynligheter i hendelsestrærne

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

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

Relasjoner mellom verbal beskrivelse av usikkerhet og sannsynligheter, som ble brukt på workshopen, er beskrevet i Vedlegg C. I dette vedlegget beskrives også tilsvarende relasjoner for bruk av områdetall for sannsynligheter, som kan benyttes for å estimere usikkerheten i vurderingene. Vanligvis kan man gjøre det med en Monte Carlo analyse av beregnede bruddsannsynligheter.

4 Identifisering av utløsningsårsak og bruddmekanismer

Arbeidet med identifisering av bruddmekanismer startet med en gjennomgang av, generelle bruddmekanismer og utløsningsfaktorer, både med hensyn til potensielle svakheter i og rundt dammene og eksterne utløsningsfaktorer, som vist nedenfor. Videre ble det diskutert i hvilken grad og evt. på hvilken måte hver og en av disse var relevante for Nesjendammene.

Potensielle svakheter i og rundt dammene:

- Indre erosjon.
- Stabilitet av støttefyllinger, utglidning av opp- og nedstrøms skråning.
- Skred inn i magasinet utfra geologien.
- Svakheter / erosjon i bergfundament.
- Blokkering av overløp.
- Noe operativt som kan føre til brudd.

Eksterne utløsningsfaktorer:

- Flom:
 - Sommer/høst: Bresmelting som forårsaker økt vannmengde i magasinet.
 - Vinter/vår: is/hardpakket snø som blokkerer overløp.
- Bølge- eller is-belastning som fører til ustabilitet på oppstrøms side.
- Jordskjelv.
- Meteoritter eller Flystyrt.

Under diskusjonene kom det opp innspill på utløsende faktorer, potensielle svakheter og potensielle bruddmekanismer for Nesjendammene. Disse ble deretter sortert og prioritert. Det ble besluttet under gjennomføringen av analysene bestemt hvilke analyser som skulle gjøres for rehabiliterte dammer. Det ble bestemt å ikke gjøre analyser for "tilsiktete aksjoner"¹ /villede handlinger som terror eller sabotasje. Dette må ses på av myndighetene som har ansvar for samfunnssikkerhet.

¹ Ordbruk i NVEs veileder

5 Analyser av bruddsannsynlighet

5.1 Oversikt over analysene

Tabell 5 oppsummerer diskusjonen om de viktigste brudd- og utløsningsmekanismer for Nesjendammene. Analysene omfatter både hendelsestre-analysene fra workshopen og analysene videreført av NGI i etterkant av workshopen. Tabell 6 gir en oversikt.

Tabell 5. Identifikasjon av de viktigste utløsningsmekanismene og bruddmekanismene.

Utløsningsmekanisme	Bruddmekanisme	Dam	Oppfølging
Jordskjelv	Setning, overtopping	Hoveddam	Sjekke platedammen
Flom	Overtopping	Hoveddam Sekundær- dam 2, 3	Effekt av rehabilitering. Feil ved rehabilitering, menneskelig svikt tas som en hendelse i treet.
Tilstopping av overløpet	Overtopping	Hoveddam	I "Flom" analyse
Lekkasje, HRV	Indre erosjon	Hoveddam	Analyse med separate bruddmekanismer (ustabil damtå + utglidning, synkehull). Effekt av rehabilitering.
Kombinasjon med skade på dammen	Flom, og andre bruddmekanismer	Hoveddam	Introdueres som en hendelse i trærne
"Domino effekt"	Overtopping, kollaps	Alle dammer	Trenger en skisse av hvordan alle dammene påvirker hverandre. Hvor langt oppstrøms bør man gå? Behandles under "stress testing"-analysen.
Indre erosjon i Roskred dammen	Overtopping	Alle dammene	Samme skisse som ovenfor, behandles under "stress testing" –analysen.
"Kontakterosjon mot oppsprukket fjell"	Lekkasje og erosjon i sprekkene	Hoveddam, Sekundær- dammer	Er det forskjell i fjellfundamentene?
Islast	Skade på platedam	Platedam	Separat probabilistisk analyse.
"Ageing" av betongdam	Overtopping eller platedam kollaps	Platedam	Separat probabilistisk analyse, se på om det er dårligere kapasitet.

Tabell 6. Oversikt over prioriterte analyser for Nesjendammene.

Bruddmekanisme	Metode	Analyser
Indre erosjon		Før og etter rehabilitering
Flom	Hendelsestre-analyse	Før og etter rehabilitering
Erosjon i bergfundamentet		Ikke skadet dam og skadet dam
Jordskjelv		Før rehabilitering
"Domino effekt"	"Stress testing"	Utføres i eget prosjekt i 2018
Glidning og velting av platedammen (Sek.dam 1)	Deterministisk og probabilistisk analyse av stabilitet	Sammenligne med resultater fra hendelsestre-analyser

5.2 Resultater fra hendelsestre-analysene

Tabell 7 gir en oversikt over hendelsestre-analysene. Vedlegg E presenterer detaljene for hver hendelsestre-analyse, med forklaringer og begrunnelser for valg av sannsynlighetsverdier for hver gren i trærne. Vedlegg E gir resultater i grafisk form for de mest sentrale hendelsestre-analysene. Vedlegg D oppsummerer betraktningene som ble gjort for å kvantifisere årligsannsynlighet for initiering av lekkasje (inngangsverdi i hendelsestreet for indre erosjon).

Tabell 7. Oversikt over hendelsestre-analyser av Dam Nesjen, før og etter rehabilitering.

Hendelse	Figur nr i Vedlegg E
Indre erosjon, før rehabilitering (iterasjon 1)	E1
Indre erosjon, før rehabilitering (iterasjon 2)	E2
Indre erosjon, etter rehabilitering	E3
Flom, før rehabilitering	E4
Flom, før rehabilitering	Avsnitt E1.3
Flom, rehabilitering med heving av damkronen og av kjernen	E5
Flom, tiltak på overløpet	E6
Jordskjelv	E7
Erosjon i bergfundamentet, før rehabilitering	E8

5.2.1 Før rehabilitering

Analysene er gjennomført med beste estimat av sannsynlighetsverdier (Vedlegg C, Tabell C2). Tabell 8 gir best-estimat bruddsannsynligheter fra hendelsestre analysene.

Tabell 8. Oversikt over hendelsestre-analyser av Dam Nesjen, før rehabilitering

Hendelse	Årlig sannsynlighet for brudd, $P_i/\text{år}$
Indre erosjon, før rehabilitering (iterasjon 1)	$3,6 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
Indre erosjon, før rehabilitering (iterasjon 2)	$7,6 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
Flom, før rehabilitering	$2,9 \cdot 10^{-7}/\text{år}$
Jordskjelv	$1,0 \cdot 10^{-8}/\text{år}$
Erosjon i bergfundamentet, før rehabilitering	$5,0 \cdot 10^{-6}/\text{år}$
Sammenlagt	$5,5 \cdot 10^{-5}/\text{år}$

Effekt av en skade på en hoveddammen under en PMF-flom ble vurdert. Analysen følger hendelsestreet i Figur E4. Bruddsannsynligheter blir noe høyere enn for analysen i Figur E4. Endelig estimat av bruddsannsynlighet avhenger av hvor mye dammen er skadet.

Bayesisk nettverksanalyse kombinert med Monte Carlo simulering vil kunne illustrere den probabilistiske fordelingen av bruddsannsynlighet og gi et endra bedre estimat av bruddsannsynlighet.²

5.2.2 Etter rehabilitering

På samme måte som i forrige delavsnitt ble analysene gjennomført med beste estimat av sannsynlighetsverdier (Appendix C, Tabell C2). Tabell 9 gir resultatene for beste-estimat analysene.

Tabell 9. Oversikt over hendelsestre-analyser av Dam Nesjen, etter rehabilitering

Hendelse	Årlig sannsynlighet for brudd, P_f /år
Indre erosjon, etter rehabilitering*	$8,4 \cdot 10^{-6}$ /år
Flom, med heving av damkronen og av kjernen	$1,8 \cdot 10^{-7}$ /år
Flom, tiltak på overløpet	$2,0 \cdot 10^{-8}$ /år
Jordskjelv	$1,0 \cdot 10^{-8}$ /år
Erosjon i bergfundamentet**	$5,0 \cdot 10^{-6}$ /år
Sammenlagt	$9,1 \cdot 10^{-6}$/år

*Inkluderer alle rehabiliteringstiltak: damtåforsterkning, fiberkabler og lekkasjeovervåkning

- Kun damtåforsterkning + fiberkabler: $P_f = <1,6 \cdot 10^{-5}$ /år
- Kun lekkasjeovervåkning: $P_f = 3,4 \cdot 10^{-5}$ /år

**Samme tall som før rehabilitering er benyttet her, men denne vil reduseres til ca $1,5 \cdot 10^{-6}$ /år om det automatiske lekkasjemålesystemet er i stand til å fange opp lekkasje gjennom bergfundamentet.

5.2.3 Sammenligning av sannsynlighetene før og etter rehabilitering

For bruddmekanismene flom og indre erosjon ble analysene av dambrudd gjort for tilfellene før og etter rehabilitering. Sammenligningen er oppsummert i Tabell 10. For indre erosjon viser analysene at rehabiliteringstiltak som automatisk lekkasjemålesystem, fiberkabler og forsterket damtå samlet reduserer sannsynligheten for dambrudd med ca. en størrelsesorden.

Tilsvarende viser analysene for flom at det å kunne utføre tiltak på overløpet reduserer bruddsannsynligheten med ca. en størrelsesorden. For tiltaket som omfatter heving av damkroner for hoveddam og sekundærdammer, er imidlertid reduksjonen av bruddsannsynligheten for hoveddammen langt mindre; kun en halvering av bruddsannsynligheten oppnås. Dette skyldes at heving av kjerner og damkroner både har positive og negative effekter på bruddsannsynligheten for hoveddammen. Hevingen av hoveddammen gjør at den tåler høyere vannivåer og dermed har lavere sannsynlighet for å gå til brudd. Heving av sekundærdammene kan imidlertid ha effekter som øker bruddsannsynligheten ved hoveddammen.

² Bayesisk nettverksanalysen, kombinert med Monte-Carlo simulering, gir en probabilistisk fordeling for sannsynlighetene og dermed mer realistiske verdier for beregnede bruddsannsynlighetene.

beregningene for å vurdere bruddsannsynlighet ble islasten antatt å være representativ for en 500-års islast som "base-case". I SORM-analyser av stabilitet ble hele den probabilistiske fordelingen av islasten, dvs alle returperioder, inkludert i analysen.

Effekt av usikkerheten i returperioden i islasten på 100 kN/m ble også vurdert. En returperiode på 10 år for 100 kN/m islasten ble også analysert.

De deterministiske last-verdiene benyttet av Norconsult ble anvendt i SORM-analysene som snittverdier, unntatt for friksjonsvinkelen mellom betong og fjell. Norconsult brukte en friksjonsvinkel på 50 grader (Norconsult, 2017). NGI vurderte et snitt på 45 grader som det beste estimatet for friksjonsvinkel, og et standard avvik på 3 grader. De to mest kritiske pilarene, Pilar 2 og Pilar 5, ble analysert med SORM-metoden. Tabell 11 oppsummerer de beregnede årlige bruddsannsynlighetene fra SORM-analysene.

Tabell 11. Årlige bruddsannsynlighet for Pilar 2 og 5 i Sekundærdam 1 (betong platedam) for en islast på 100 kN/m med en returperiode på 500 år.

Pilar	Årlig bruddsannsynlighet (SORM), P_f årlig	Årlig pålitelighetsindeks, β årlig
2	$1,0 \cdot 10^{-5}$ /år	4,3
5	$1,3 \cdot 10^{-5}$ /år	4,2

Den beregnede bruddsannsynligheten for hver av Pilar 2 og Pilar 5 er på 10^{-5} /år. Den ene og mest signifikante usikre parameteren er islasten. På den ene siden oppfører den maksimale islasten seg som en kortvarig støtlast: Når islasten er på sitt høyeste, bryter isen sammen og lasten er straks mye mindre. På den annen siden, hvis returperioden for islasten på 100 kN/m er kortere enn 500 år, øker bruddsannsynligheten. For en 10-års returperiode for den 100 kN/m islasten øker den beregnede bruddsannsynligheten til $3 \cdot 10^{-3}$ /år og $2 \cdot 10^{-4}$ /år for henholdsvis pilar 2 og 5. Den usikkerheten i både størrelse og returperiode i islasten har dermed en meget stor påvirkning på den beregnede bruddsannsynlighet. Med et eventuell bruddsannsynlighet som $3 \cdot 10^{-3}$ /år må tiltak til.

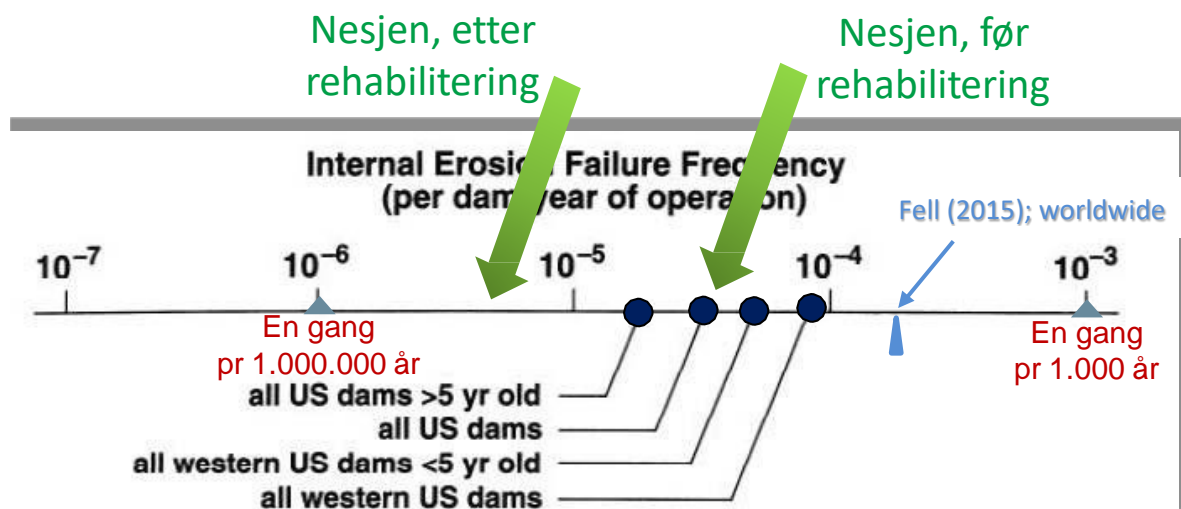
For en enda mer komplett analyse kan man foreta en systemanalyse (med alle pilarer og med programvaren SYSREL) for å beregne en bruddsannsynlighet for samtlige 15 pilarer. De beregnede årlige bruddsannsynligheter for Pilar 2 og Pilar 5 er på 10^{-5} /år. Sikkerhetsfaktorene for den andre pilarene, basert på Norconsults beregning, er mye høyere enn for Pilar 2 og 5. De andre pilarene vil ikke bidra mye til å øke bruddsannsynlighet. Det er estimert i Vedlegg B at bruddsannsynligheten vil øke ved en systemanalyse med samtlige pilarer til ca. $2 \cdot 10^{-5}$ /år med en islast på 100 kN/m med returperiode på 500 år, og muligens til $3,5 \cdot 10^{-3}$ /år med en islast på 100 kN/m med returperiode på 10 år.

Det anbefales at Sira-Kvina prøver å bedre kvantifisere islasten, både størrelse og returperiode, siden usikkerheten i islasten betyr så mye for den beregnede bruddsannsynligheten. Dessuten bør friksjonsvinkelen mellom betong og fjell vurderes nærmere enn gjort i disse beregningene. Det anbefales også at integriteten av fjellboltene verifiseres.

5.4 Diskusjon om årlige bruddsannsynlighet

Nesjen Hoveddam har lave beregnede årlige bruddsannsynligheter når bruddmekanisme er indre erosjon. Sannsynlighetstallene som er beregnet er ikke absolutte verdier, men relative verdier, og mest nyttige for sammenligning (se også diskusjon i avsnitt 7). Basert på observert hyppighet av brudd 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 $9 \cdot 10^{-5}$ /år. Figur 6 viser årlige bruddsannsynligheter for Nesjen Hoveddam. Før rehabilitering, har Nesjen Hoveddam samme årlige bruddsannsynlighet som fyllingsdammer i USA. Etter rehabilitering er årlige bruddsannsynlighet betydelig lavere enn for den internasjonalt rapporterte bruddfrekvensen for dammer, basert på publiserte tall og ICOLD-statistikk (Figur 6).

Fell (2015) rapporterte statistikk tall for fyllingsdammer fra 1800 til 1986, basert på Foster et al. (2000). Antall dammer i databasen er 11.192 "store" dammer³ på verdens basis. Fell beregnet en årlig bruddsannsynlighet fra observasjoner i samme perioden. Bruddsannsynligheten etter først fylling av magasinet er på $2 \cdot 10^{-4}$ /år. Fells årlige bruddsannsynlighet (også vist i Figur 6) er høyere enn ICOLDS statistikk. Hoveddammen på Nesjen har mye lavere årlig bruddsannsynlighet enn hva Fells omfattende statistikk tilsier, både før og etter rehabilitering.



Figur 6. Sammenligning med bruddfrekvens som skyldes indre erosjon for fyllingsdammer i verden (ICOLD og Fell statistikk). Beregnet årlig bruddsannsynlighet for Nesjen Hoveddam før og etter rehabilitering er markert med grønne piler og tekst.

Konsekvensene ved dambrudd i Nesjen Hoveddam er store (avsnitt 6). Det er derfor viktig å videreføre tilsynet i henhold til kravene, som gjøres i dag og å implementere de gode overvåkingsprogrammene som er beskrevet i tiltaksplanen. Endringer i dammens oppførsel bør følges nøye, og klimaendringer kan påvirke sikkerhetsnivået. Et overvåkingsprogram bør

³ I henhold til ICOLDS definisjon for "store dammer" (damhøyde ≥ 15 m).

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.

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

6 Konsekvens- og risikoanalyse

6.1 Eksponerte objekter

Brudd ved Nesjen hoveddam gir store konsekvenser i nedstrøms vassdrag. Dambrudd ved Nesjen hoveddam vil medføre dominobrudd på dam Homstøl (som ligger ved Homstølvatnet nedstrøms Nesjendammene). Det ligger ca. 250 bolighus nedstrøms Nesjen (10 ved Risnes, 3 ved Smidsnes og Nordbø, 10 på Netlandsnes, ca.10 ved Lindefjell, 3 ved Kvinlog, ca.10 ved nedre Kvinlog, 4 ved Narvestad, 2 ved Saga, 3 ved Homsmoen, ca. 40 ved Storekvina, ca.10 ved Rafoss, ca. 3 ved Trælandsfoss, ca. 50 mellom Liknes og Øye, ca. 100 i Liknes sentrum). Øvrig infrastruktur som blir berørt av dambruddet omfatter:

- 17 Broer (ved Landsløk, Knabeneset, Astdøla, Risnes, Netlandnes, Nordstrand, Solli, Lindeland, Rjuganfossen, Nedre Kvinlog, Narvestad, Oksestien, Storekvina, Storekvina jernbanebru, Trælandsfoss, Åmot, Faret).
- Hytter ved Geithomtjørni, Asdalsstølen, Dyrlistølen, Risøyni
- Veier: Riksvei V 42 , Riksvei 465, E39
- Industri: Trælandsfoss fabrikk, Øye smelteverk

6.2 Intensitet av dambruddbølgen

Intensiteten av dambruddbølgen vurderes fra maksimal vannstandsstigning på 17,2 m for Risnes og 12,4 for Liknes. Bølgefronten vil nå Risnes 1 t og 16 min og Liknes 3t og 36 min etter nedbryting og totalt dambrudd. Maksimal vannstandsstigning vil bli 11,1 m etter 4 t og 40 min. Vannstandsstigning for de øvrige tettstedene nedstrøms ligger mellom 10 og 20 m.

6.3 Konsekvenser i form av liv og helse

6.3.1 Antall omkomne fra Brown og Gosden 2004-studie

For å beregne konsekvensene uttrykt ved antatt omkomne, kan en studie av Brown og Gosden i Storbritannia anvendes. Figur 7 viser sammenhengen mellom omkomne og intensitet av vannutslippet (hastighet og strømningsdybde).

Først ble antall eksponerte personer beregnet utfra antall boenheter, og gjennomsnittlig antall personer per boenhet i Norge (2,2 personer per boenhet). Antall eksponerte personer er dermed 250-boenheter ganger 2,2 personer, eller 550 personer.

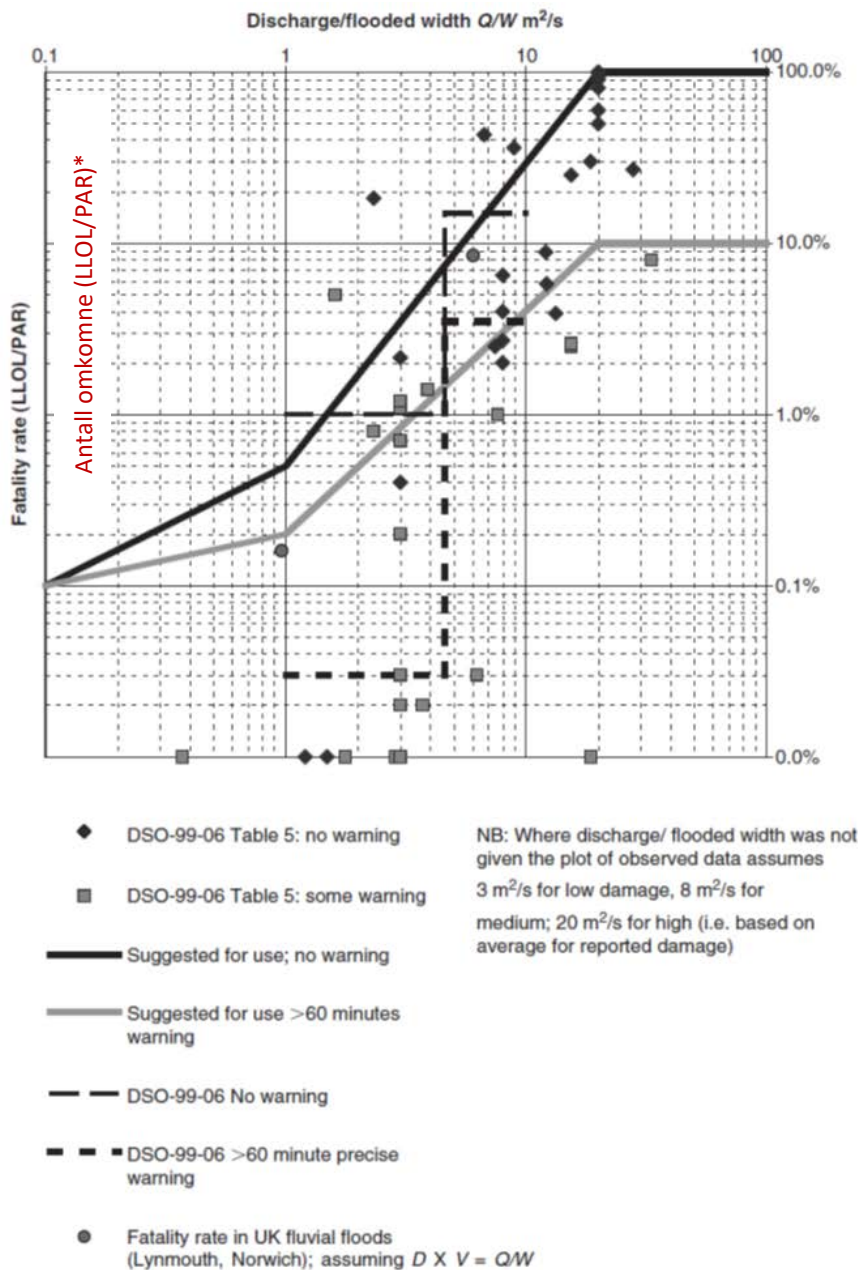
Maksimal beregnet vannstandsstigning vil være mellom 10 og 20 meter for de fleste bebygde steder nedstrøms dammen. Tilsvarende gjennomstrømnings volum per sekund og per meter flombredde (Q/W i Figur 7) er mellom 70 og 140 m^2/s (Tabell 12), basert på dambruddbølgeberegning in Vedlegg A.

Tabell 12. Beregning av Q/W (parameter som brukes i Figur 7) som funksjon av vannstandsstigning.

Vannstandsstigning (m)	Gjennomstrømnings volum per sekund og per meter flombredde* (Q/W i Fig. 7)
5	35 m^2/s
10	70 m^2/s
15	105 m^2/s
20	140 m^2/s

* Strømningshastigheten er 7m/s (eller ca. 25 km/t). Dette er beregnet ut fra avstander og ankomsttider for dambruddbølgen, samt fra bølgetopphastigheter beskrevet i Figur 10 i Vedlegg A.

Antall omkomne basert på Brown og Gosden (2004) beregnes fra den nedre kurve i Figur 7, siden ankomsttiden for dambruddbølgen er over en time til bebygde områder. Det regnes med at det er god tid til varsling (ca. 6-12 timer ifølge VTA Rolv Guddal) i tilfelle et brudd forårsaket av indre erosjon på Nesjen Hoveddam. Ankomsttiden er lengre for tettsteder lengre nedstrøms og gir følgelig lenger varslingsstid. Antall omkomne er derfor mindre enn 10% av antall eksponerte personer, det vil en maksimum antall på 55 (Tabell 13). Antall omkomne vil antagelig være nærmere halvparten av 55, eller ca. 30.



Figur 7. Sammenheng mellom omkomne og fluks av vannutslippet (Brown and Gosden, 2004). (*"Fatality rate": LLOL = Sannsynlig antall omkomne etter brudd; PAR=Befolkning i fare, hvis brudd inntreer)⁴

Tabell 13. Beregnet antall tapte liv fra Figur 7 og Tabell 12.

Antall omkomne beregnet fra grå kurven i Figur 7 med varslingstid over en time	
Antall eksponerte	Antall omkomne med varsling
550	55

⁴ LLOL = "Likely Loss Of Life"; PAR= "Population At Risk, in the event of dam failure").

6.3.2 Antall omkomne fra DNV 1998-studie

DNV(1998) beregnet konsekvensene av et eventuelt dambrudd for befolkningen som bor nedstrøms en dam. Tre dammer ble vurdert: dam Viddalsvatn, Dam Svartevann og Dam Songa. DNV beregnet "Probability of Loss of Life" (PLL) for hver dam.

For Dam Viddalsvatn, som, blant de tre, antagelig er den mest sammenlignbare med Nesjen Hoveddam, ble fem varslingsstilfeller vurdert:

- Tilfelle 1. Varsling og beredskap i dalen; området 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 14 en oversikt over gir de DNV-beregnete PLL og estimert prosent antall omkomne i tilfelle dambrudd.

Tabell 14. "Probability of Loss of Life" (PLL) og antall omkomne for Dam Viddalsvatn (DnV 1998)

Tilfelle	Probability of Loss of Life (PLL)	% omkomne av eksponert befolkning
1	$1,2 \cdot 10^{-1}$	77%
2	$9,5 \cdot 10^{-2}$	61%
3	$9,2 \cdot 10^{-3}$	6%
4	$1,7 \cdot 10^{-3}$	1%
5	$5,5 \cdot 10^{-2}$	35%

I vurdering av risiko settes antall eksponerte personer til 550 (avsnitt 6.3.1). Basert på varsling informasjon hvis et brudd forårsaket av indre erosjon skulle skje, foreslår DNVs studie at 6% av den eksponerte populasjon vil omkomme, det vil si 33 personer.

I DNVs studie ble to andre dammer også vurdert. For Dam Svartevann ble antall omkomne 2% av eksponert befolkning (det vil si 11 personer hvis 550 personer er eksponert) når det var to timers varsel. For Dam Songa, ble estimert antall omkomne lik 0.

6.4 Konsekvenser i form av materielle tap

For beregning av skader forårsaket av dambruddbølgen må en kombinasjon av hastighet og dybden av strømmen inngå som inngangsparameter (Brown and Gosden, 2004). Skader forårsaket av dambruddbølgen er beregnet etter Tabell 15. Ut fra Tabell 14 vil samtlige bygninger med $D \times V$ høyere enn $7 \text{ m}^2/\text{s}$ bli totalt ødelagt. Samtlige eksponerte boligheter vil havne i denne kategorien. Tabell 16 viser materielle tap og beregnet risiko, hvis kostnadene for gjenoppbygging antas å ligge på 2 – 5 mill NOK per boenhet.

Tabell 9. Bygningsødeleggelse som funksjon av hastighet og dybde (etter Brown and Gosden, 2004)

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

Tabell 106. Beregnet materielle tap og risiko for antall boligekvivalenter på 250.

Tap og risiko	Total materielle tap	
	Gjenoppbyggingskostnader på 2 mill./boligenhet	Gjenoppbyggingskostnader på 5 mill./boligenhet
Beregnet tap	500 mill. NOK	1250 mill. NOK
Beregnet risiko ¹ der total brudds sannsynlighet er $1 \cdot 10^{-5}/\text{år}$	5 000 NOK/år	12 500 NOK/år

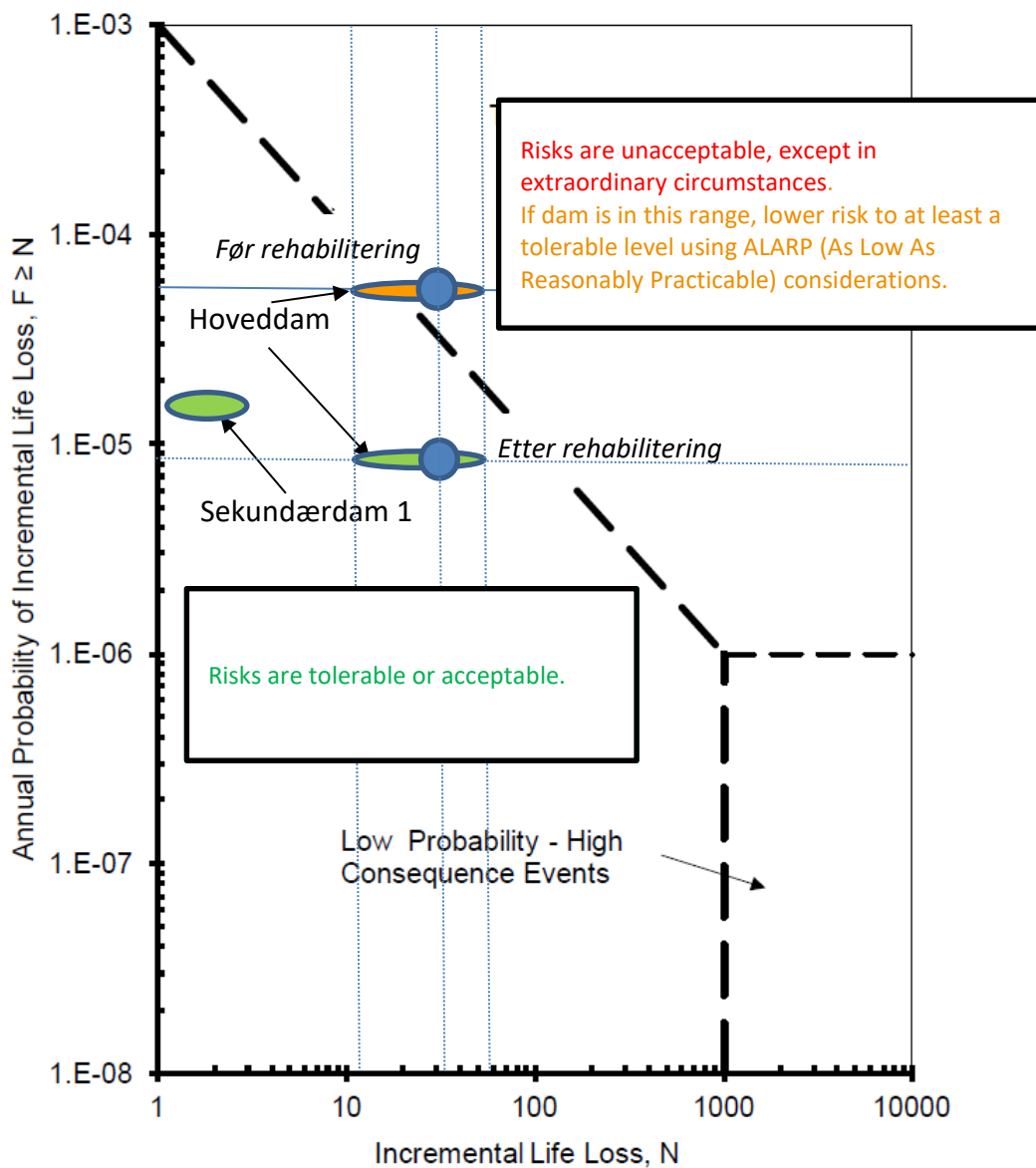
¹ Risiko = sannsynlighet x konsekvens

6.5 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. For risiko som uttrykker menneskelige tap, skilles det mellom 'individuell risiko' og 'samfunnsmessig risiko'. Med 'individuell risiko' menes sannsynligheten for at et individ mister livet som følge av faren i løpet av en referanseperiode (vanligvis ett år). Grensen for individuell risiko formuleres som en årlig sannsynlighet. I Norge finnes det ikke slike grenser, men $10^{-3}/\text{år}$ er en mye brukt øvre grense for akseptabel risiko for ett dødsfall. Risiko for flere dødsfall under én samme hendelse refereres som 'samfunnsmessig risiko'. Samfunnsmessig risiko defineres som risikoen for en omfattende eller storskala skade fra en hendelse, der konsekvensene er i en slik målestokk at det fremkaller et sosialt eller politisk ansvar og flere personer kan miste livet. I Figur 8 med USACEs kriterier angis sannsynligheten på $10^{-4}/\text{år}$ som øvre grense for akseptable risiko for 10 omkomne, $10^{-5}/\text{år}$ for 100 omkomne og $10^{-6}/\text{år}$ for 1000 omkomne. Disse grenser brukes av myndigheter både i utlandet og i norsk offshore industri. Diagrammet, såkalt 'F-N' diagrammet, viser årlig brudds sannsynlighet (frekvens F) mot antall (N) forventet omkomne.

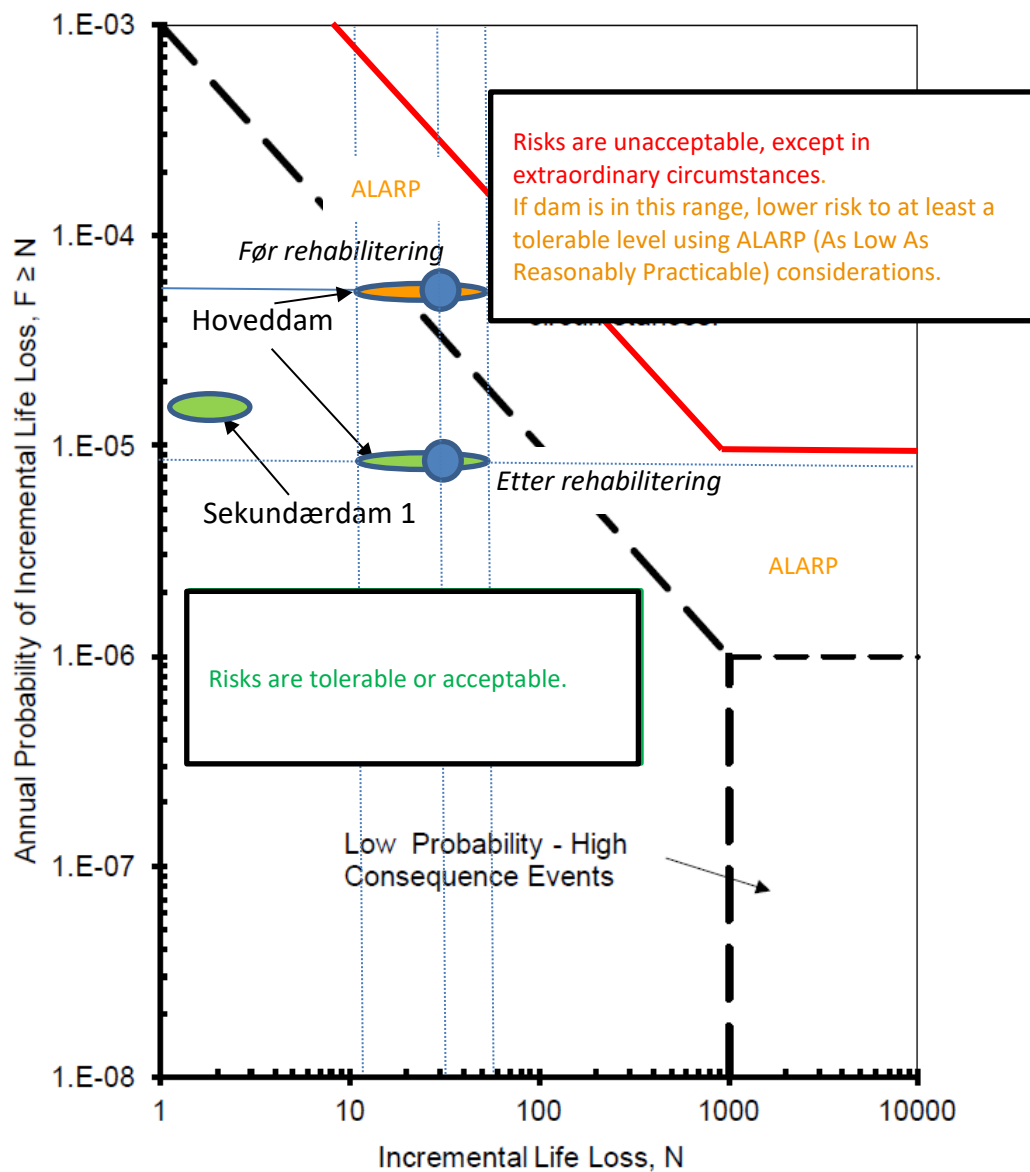
Figur 8 viser grafisk de beregnede brudds sannsynligheter ved Nesjen Hoveddam på $5,5 \cdot 10^{-5}/\text{år}$ før rehabilitering og $9,1 \cdot 10^{-6}/\text{år}$ etter rehabilitering. Sannsynlighetene er vist mot det estimerte antall omkomne fra 11 til 55 personer, hvor 33 er vurdert som best estimat (delavsnitt 6.3).

Nesjen Hoveddammen før rehabilitering ligger rett på grensen for akseptabel risiko når kriterier fra USACE (2014) benyttes. Figuren viser også tydelig den gunstige effekten av rehabilitering, hvor risikoen er betydelige lavere en akseptabel grensen.



Figur 8. USA risikoakseptkriterier for samfunnsmessig risiko (USACE; 2014), og risikobilde for Nesjen Hoveddam før og etter rehabilitering, med henholdsvis oransje og grønn ellipse. Blå sirkelen er best estimat. Grønn ellipsen til venstre er for Sekundærdam 1 (betong platedammen).

I praksis er risiko forbundet med Nesjen Hoveddam før rehabilitering tolerabel, gitt at den ligger så nær grensen og har ikke vist noe tegn til negativ utvikling. I mange F-N diagrammer legges det inn et område fra akseptabel opp til et toleransenivå som kalles ALARP-området ("As Low As Reasonably Practicable"), hvor risikoen skal reduseres så langt som praktisk mulig men kreves ikke å være så lav som akseptabel risiko-grensen. ALARP-området brukes ofte for eksisterende dammer som oppfører seg på en tilfredsstillende måte. Figur 9 illustrerer et slikt ALARP-området, basert på to veiledninger utgitt i Australia.



Figur 9. USA risikoakseptkriterier for samfunnsmessig risiko (USACE; 2014) med ALARP-området for eksisterende dammer anbefalt av ANCOLD 2003 og NSW 2006 (begge i Australia).

Figur 8 og 9 viser også risikobildet for Sekundær Dam 1 (platedammen), hvor det er antatt samme 'gjennomstrømningsvolum per sekund og per meter flombredde' som for Nesjen Hoveddam (konservativ antagelse). Figur 4 ble brukt for å vurdere antall boenheter. Her også er det tatt hensyn til én-times varsel. Sekundær Dam 1 har akseptable risiko.

7 Konklusjoner

Analysene viser at Nesjen Hoveddam etter rehabilitering, med en beregnet årlig bruddsannsynlighet på $9 \cdot 10^{-6}$ pr år (eller 9 ganger pr 1 million år), har et akseptabelt risikonivå. Før rehabilitering har Nesjen Hoveddam et tolerabelt risikonivå. Hoveddammen. Både før og etter rehabilitering, har et lavere årlig bruddsannsynlighet enn sannsynlighetsverdier fra internasjonal statistikk. Den mest kritiske bruddmekanismen er indre erosjon. De planlagte rehabiliteringstiltakene reduserer beregnet bruddsannsynlighet betraktelig, pga. forsterkning av damtå, automatisk lekkasjemåling og fiberkabler. Etter rehabilitering er det fortsatt indre erosjon som gir den høyeste beregnede bruddsannsynligheten, men bruddsannsynligheten er redusert med en faktor på ca. 6 som følge av rehabiliteringstiltakene. Noen timers varsling ved et eventuelt brudd er viktig, i det at det er store konsekvenser ved et brudd i hoveddammen. Analysene viser at de planlagte tiltak med heving av damkronen og toppen av morenekjernen har liten effekt på beregnet bruddsannsynlighet under flom.

For Nesjendammene var det spesielt viktig å vurdere den totale sikkerheten på det samlede damanlegget med hoveddam og flere sekundærdammer. Et viktig moment som kom opp under denne sikkerhetsvurderingen på workshopen var om det i ekstreme situasjoner skal tillates skader eller hendelser på Sekundærdam 4 for å redusere bruddsannsynligheten på Hoveddammen. Konsekvensene ved overtopping eller dambrudd i Sekundærdam 4 er langt lavere enn for de andre fyllingsdammene (Figur 4). En hendelse ved Sekundærdam 4 vil føre til en reduksjon i magasinnivået og umiddelbart minke belastningen på Hoveddammen og dermed redusere betraktelig også bruddsannsynligheten for Hoveddammen. Ved rehabiliteringen bør det vurderes å heve damkjernen og damkronen ved Sekundærdam 4 mindre enn for de andre dammene, på en slik måte at det blir Sekundærdam 4 som har lavest kritisk vannstand ved fare for overtopping.

Risikovurderingene av Sekundærdam 1 (betong platedam) viser at den beregnede bruddsannsynlighet ligger rundt 10^{-5} /år (én gang pr 1000.000 år) når det antas at islasten på 100 kN/m har en returperioden på 500 år. Den ene og mest signifikante parameteren som påvirker resultatet er størrelsen på islasten. Usikkerheten i både størrelse og returperiode i islasten har en meget stor påvirkning på den beregnede bruddsannsynlighet. Beregninger med mye kortere returperiode enn 500 år kan øke bruddsannsynlighet til 10^{-5} /år. Sira-Kvina bør prøve å bedre kvantifisere islasten. Dessuten bør friksjonsvinkelen mellom betong og fjell vurderes nærmere.

Analysene viser også viktigheten av å etablere gode og driftssikre systemer for instrumentering og overvåking. God sikkerhet mot dambrudd omfatter gode overvåkingsprogrammer. En konklusjon fra workshopen er at instrumentering og observasjoner av dammer i Norge bør økes. Dagens praksis vektlegger dette for lite. Selv enkle systemer kan gi nyttig informasjon. Det bør alltid være lekkasjemålere installert på fyllingsdammer. Når det "vipper" rundt sikkerhetskravet kan instrumenteringsresultater være en god dokumentasjon og kan gi vekt til argumentasjon for å kunne gi dispensasjon fra enkelte forskriftsmessige krav for en dam som dokumenterte flere år med tilfredsstillende oppførsel. Endringer i dammens oppførsel bør følges nøye, og klimaendringer kan påvirke fremtidig sikkerhetsnivå. Et godt

overvåkningsprogram bør også ha beredskapsplaner med tiltak mot uventet oppførsel, skulle noe uventet skje. Det er anbefalt at man vurderer mulige utfordringer i fremtiden og har en plan for hva man bør gjøre hvis disse utfordringene skulle inntreffe.

8 Anbefalinger

Med de planlagte rehabiliteringstiltakene har Nesjen Hoveddam et akseptabelt risikonivå. NGI anbefaler følgende:

- De mest effektive rehabiliteringstiltakene er automatisk lekkasjemålesystem, fiberkabler og forsterket damtå. Tiltak på overløpet og heving av damkrone og kjerne på hoveddam og sekundærdammene har derimot liten effekt på den beregnede årlige bruddsannsynlighet som var allerede lav (og akseptable) før rehabilitering. Det bør vurderes om disse siste tiltakene bør gjennomføres i sin helhet.
- Varsling er et viktig tiltak for å redusere konsekvensene av et eventuelt brudd. En gjennomgang av varslingsrutiner kan være en god investering for å redusere risikoen ytterligere.
- Det er viktig å vurdere den totale sikkerheten på det samlede damanlegget med hoveddam og flere sekundærdammer. NGI anbefaler at ved rehabiliteringen at damkjernen og damkronen ved Sekundærdam 4 heves mindre enn for de andre dammene, på en slik måte at det blir Sekundærdam 4 som har lavest kritisk vannstand ved fare for "overtopping". Ved ekstreme tilfeller av flom for eksempel vil det, på denne måte, bygges inn en svakhet ved fyllingsdammen som har svært lave konsekvenser ved et eventuelt brudd. "Overtopping" av Sekundærdam 4 vil straks redusere bruddsannsynligheten i Hoveddammen, og dermed øke sikkerheten ved en ekstremt situasjon hvor "overtopping" av dammen er en fare.
- Risikovurderingene av Sekundærdam 1 (betong platedam) viser at antagelsene om størrelsen og returperiode av islasten påvirker sterkt den beregnede årlige bruddsannsynligheten. Det anbefales at Sira-Kvina prøver å bedre kvantifisere islasten, både størrelse og returperiode. Det anbefales at friksjonsvinkelen mellom betong og fjell vurderes nærmere. Det anbefales også at integriteten av fjellboltene verifiseres.

Acknowledgment

NGI takker workshopdeltagerne for deres bidrag til analysene. NGI ønsker også å takke Sira-Kvina for tillatelse til å bruke Nesjendammene i analysen.

Referanser

ANCOLD (2003) *Guidelines on Risk Assessment*. Australian National Committee on Large Dams. 2003. Sydney, New South Wales, Australia.

- Brown and Gosden (2004). Interim guide to quantitative risk assessment for UK reservoirs, published by Thomas Telford Publishing, London, ISBN 0 7277 3267 6.
- 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.
- Høeg, K. (1996). Performance Evaluation, Safety Assessment and Risk Analysis for Dams. Hydro-power and Dams. V 6. 3. 8p.
- NGI (2016). Dam sikkerhet i et helhetlig perspektiv. "State-of-the-Art" om risikoanalyser for dammer. NGI rapport til Energi Norge. Rapportnr 2015 0624-01-R-01. Datert 2016-06-01.
- Norconsult (2015a). Teknisk plan - Rehabilitering av fyllingsdammer ved Nesjen, inklusive tappeluke.
- Norconsult (2015b). Teknisk plan - Tiltak på betongdammer ved Nesjen.
- Norconsult (2017). Vurdering av friksjonsvinkel for Sekundærdam 1. Teknisk Notat til Sira Kvina Kraftselskap, Oppdragsnr.: 5142319, 8. november 2017.
- NSW (2006). (NSW-DSC New South Wales Government Dams Safety Committee). *Risk Management Policy Framework for Dam Safety*. New South Wales, Australia, August 2006.
- 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.
- STRUREL (2017). Structural reliability analysis software "COMREL". www.strurel.de.
- Vick, S. (2002). *Degrees of Belief. Subjective Probability and Engineering Judgment*. ASCE Press. 405 pp.

Vedlegg A

NESJENDAMMENE

Innhold

A1	Bakgrunn	2
	A1.1 Formål med risikoanalysene	2
A2	Nesjendammene	2
	A2.1 Hoveddam	4
	A2.2 Sekundærdammer	7
	A2.3 Planer for rehabilitering/Planlagte tiltak / Anbefalte rehabiliteringstiltak	8
A3	Beregninger og analyser av stabilitet	10
	A3.1 Flomberegninger	10
	A3.2 Jordskjelv	11
	A3.3 Beregninger av stabilitet med nye tiltak	11
A4	Konsekvensanalyser	12
	A4.1 Dambruddsbølgeberegninger hoveddam	13
	A4.2 Berørt infrastruktur	16
	A4.3 Konsekvenser av dambrudd i sekundærdammene	16
A5	Instrumentering på Nesjendammene	17
	A5.1 Lekkasjemålesystem	17
	A5.2 Målinger av deformasjoner	19
	A5.3 Måling av vindstyrke	21
A6	Kritiske situasjoner/initierende hendelser [konfidensielt]	21
	Kilder	22

A1 Bakgrunn

Dokumentet oppsummerer generelle forhold rundt Nesjendammene, og enkelte observasjoner som ble gjort under drift. Dokumentet har til hensikt å fungere som en introduksjon og gi nyttig bakgrunnskunnskap til workshop'en 'Risikovurdering av Nesjendammene'.

A1.1 Formål med risikoanalysene

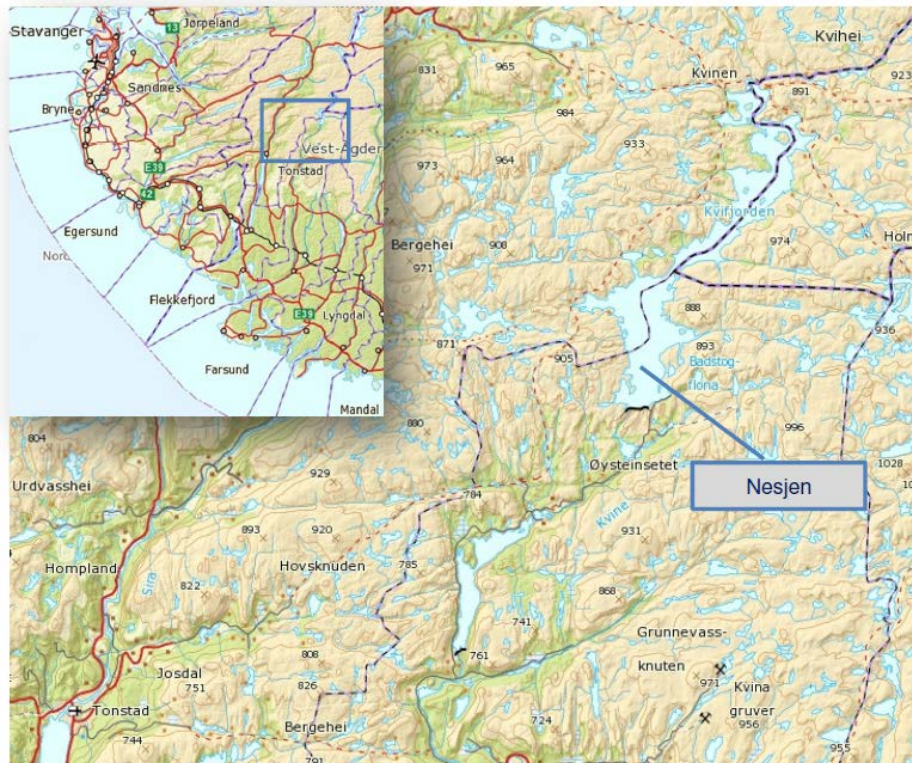
Analysene sikter mot fire formål:

- vurdere sikkerhet og risiko for brudd for Nesjendammene i dag (før rehabilitering)
- kvantifisere effekten av planlagte rehabiliteringstiltak på sikkerheten
- etablere hvilke tiltak som er de mest virkningsfulle
- vurdere hele anlegget samlet.

På workshopen skal deltagerne først enes om hvilke potensielle bruddårsaker og bruddmekanismer som skal analyseres.

A2 Nesjendammene

Nesjendammene ligger i Kvinesdal kommune i Vest-Agder fylke (Figur 1) og eies av Sira-Kvina kraftselskap. Nesjen er reguleringsmagasin samt inntak for Solhom kraftverk.



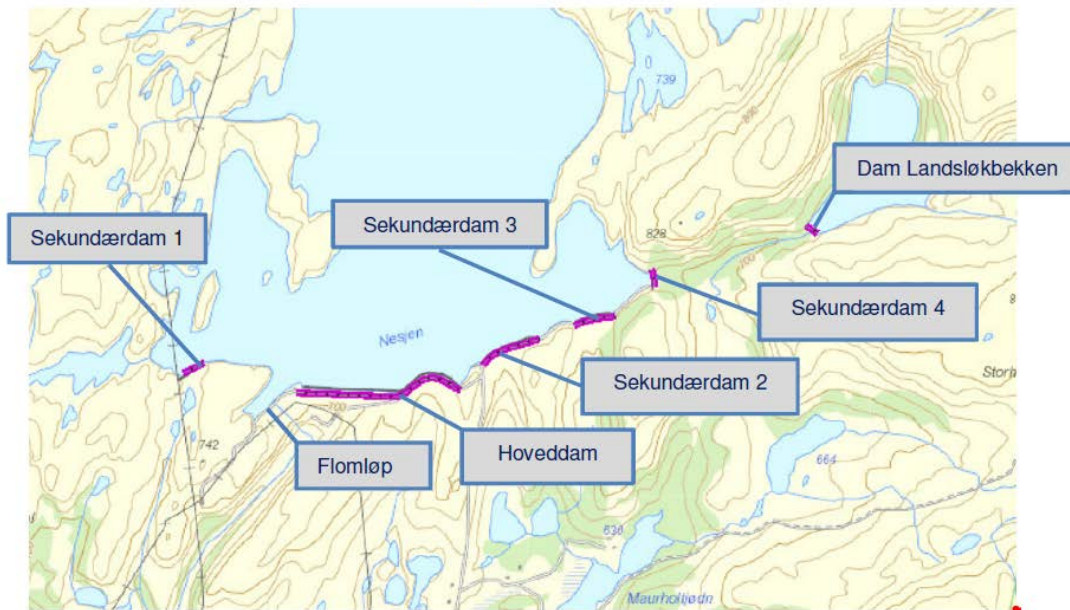
Figur 1 Beliggenhet av Nesjendammene (Norconsult 2015b).

Nesjen hoveddam (Figur 2) er en steinfyllingsdam med sentral tetningskjerne av morene. Den ble bygget i årene 1966-1968. Nesjen sekundærdam 2, 3 og 4 ligger i tilknytning til hoveddammen og er bygget som steinfyllingsdam med morenetetning. I tillegg til sekundærdammene er det også bygget en 10 meter høy platedam i betong (sekundærdam 1) som fungerer som flomløp i tillegg til hovedflomløpet.

Nøkkeldata:

Nedbørsfelt: 230 km²
 Oppdemmet magasinvolum: 274,3 mill m³
 Høyeste regulerte vannstand (HRV): 715 moh
 Laveste regulerte vannstand (LRV): 677 moh
 Entreprenør: Brødrene Hauge AS
 Kontrollør: NGI

Nøkkeldata	Hoveddam	Sekundærdam 2	Sekundærdam 3	Sekundærdam 4
Damlengde (m)	675	225	170	75
Volum (1000 m ³)	560	148	61	
Største damhøyde (m)	50	19	15	15
Høyde, morenekjerne (moh)	716,5	716,5	716,5	716,5
Høyde, damkrone (moh)	720	718,5	718,5	718,5
Fribord (Q ₁₀₀₀) over morene kjerne	0,3m	0,3m	0,3m	0,3m
Damklasse	4	4	4	3



Figur 2 Magasin med dammer ved Nesjen (Norconsult, 2015b).

Det har ikke vært registret noen unormale hendelser på hverken fyllingsdammene eller betongplatedammen. Oppstrøms skråning er derimot ikke bygget etter dagens krav, men på grunn av stort innslag av stor blokk, synes skråningen å være stabil (Norconsult, 2015b).

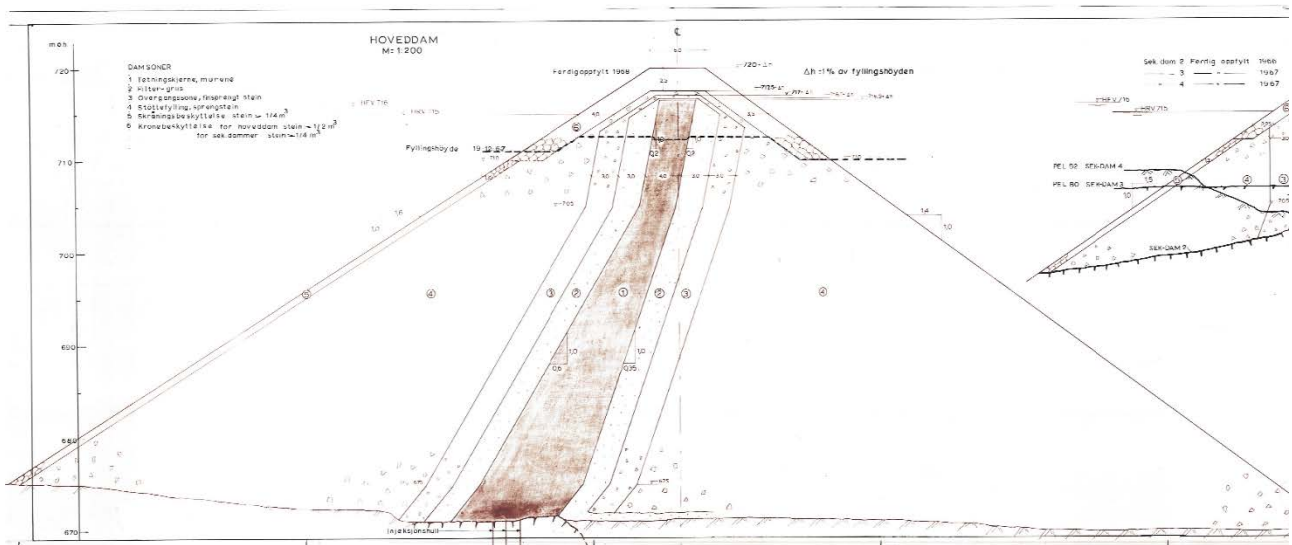
Deformasjonsmålinger.

Fugro Survey AS utførte i oktober 2008 og i september 2012 bakkelasermålinger over vann og multistråle ekkolodd målinger under vannivået. Terreteknikk utførte laserscanning av hele dammene sommeren 2014, ved lav vannstand i Nesjenmagasinet.

Konklusjonene fra utførelsen med laser og multistråle ekkolodd, er at store deler av oppstrøms skråningsareal bare har hatt mindre deformasjoner siden 2008. Målingene viste arealer med bevegelser større enn 200 mm i damskråningene, som synes å være til stor del knyttet til de store blokkene som over tid vil oppleve en viss rotasjon. Årsaken til denne bevegelsen er sannsynligvis forårsaket av belastningen under høy/lav vannstand.

A2.1 Hoveddam

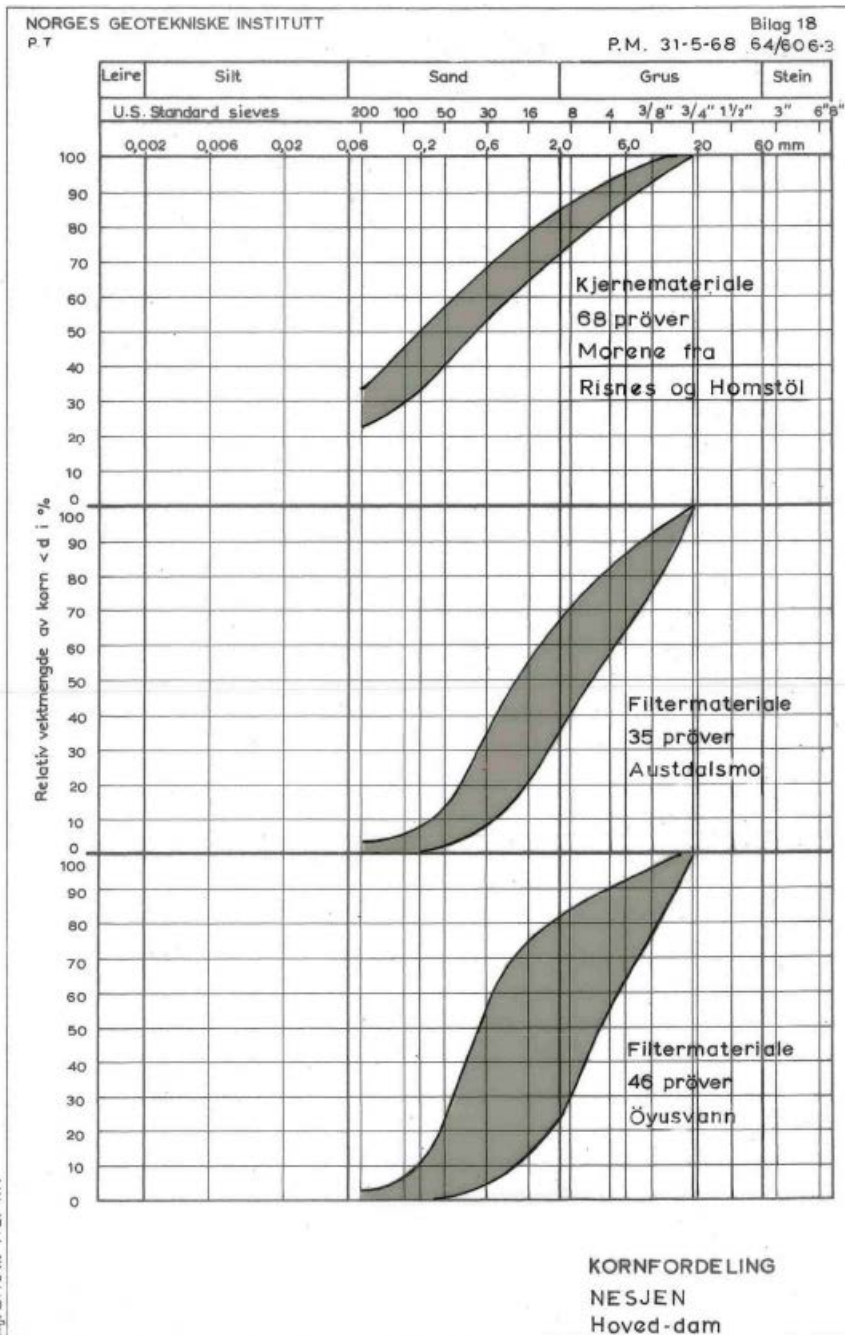
Hoveddammen består av 6 damsoner: tetningskjerne, filter, overgangssone, støttefylling, skråningsbeskyttelse og kronebeskyttelse. Tverrsnitt av hoveddammen er vist i Figur 3.



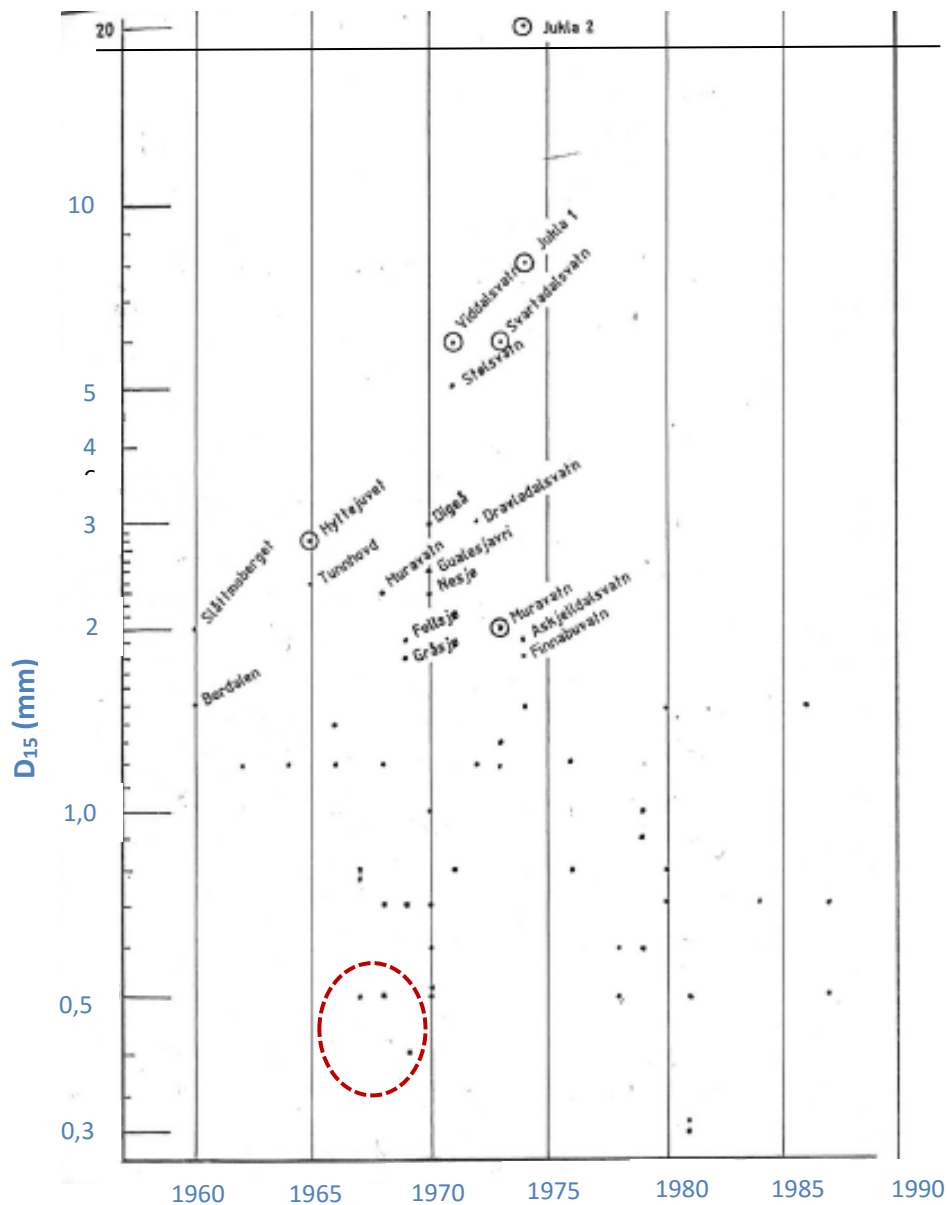
Figur 3 Tverrsnitt av Nesjen. hoveddam. Damsoner: 1: tetningskjerne, morene; 2: Filter-grus; 3: Overgangssone, finsprengt stein; 4: støttefylling, sprengstein; 5: Skråningsbeskyttelse; 6: Kronebeskyttelse (NGI, 1968).

Kornfordeling fra kjerne og filter materiale (sone 2 og 3) er vist i Figur 4.

Figur 5 viser byggeår og D_{15} i filtersonen for norske dammer, der D_{15} står for maskestørrelsen (siktstørrelsen) hvor 15% av filtermaterialet passerer. Ved fremstilling av figuren er det de maksimale verdier av D_{15} som er brukt. Fremstillingen viser at det har oppstått lekkasjer i de fire dammene som har D_{15} større enn 5mm. I to av de ni dammene med D_{15} mellom 2 og 5 mm er det likeledes oppstått lekkasje. Ingen dammer med D_{15} mindre enn 2 mm har vært utsatt for lekkasjer. Et unntak er Songa dammen hvor det er registrert flere kortvarige lekkasjer. På samtlige dammer, med unntak for Songa, ble lekkasjer registrert ved første gangs fylling av magasinet.



Figur 4 Kornfordeling for kerne- og filtermateriale for Nesjen hoveddam (NGI, 1968).



Figur 5 Dam ferdigstillelsesår mot D_{15} (i mm) i sone 2 (filter). Sirklene viser dammer hvor det er observert lekkasje (Kjærnsli 1992). Rød ellipse indikerer verdiene for Nesjendammen.

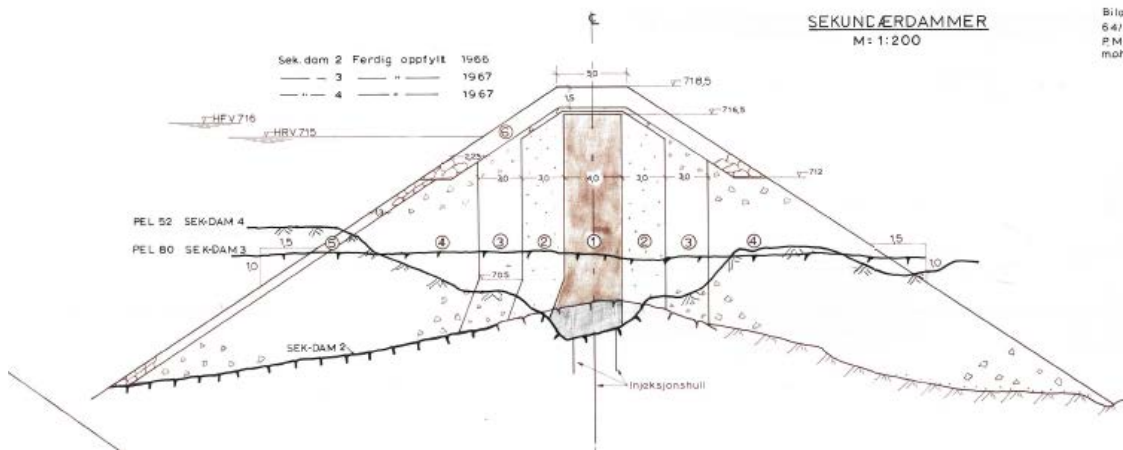
A2.2 Sekundærdammer

A2.2.1 Sekundærdam 1 - Platedam

Sekundærdam 1 er en betongplatedam med massivdamanslutninger på begge sider. Dammen er 87 m lang med største høyde på ca. 9 m målt til topp av damkrone. Netto overløp er ca. 75,2 m som ligger på kt. 715,0 tilsvarende HRV i magasinet. Dammen er i sin helhet fundamentert på fjell.

A2.2.2 Sekundærdam 2, 3 og 4

Sekundærdammene 2, 3 og 4 består i likhet med hoveddammen av 6 damsoner: tetningskjerne, filter, overgangssone, støttefylling, skråningsbeskyttelse og kronebeskyttelse. Tverrsnitt av sekundærdammene er vist i Figur 6.



Figur 6 Tverrsnitt av sekundærdammene 2,3 og 4 ved Nesjen, NGI (1968).

A2.3 Planer for rehabilitering/Planlagte tiltak / Anbefalte rehabiliteringstiltak

Fyllingsdammene ved Nesjen ble revurdert av Sweco Grøner i 2004, rapportert i Norconsult (2015a). Revurderingsrapporten har følgende konklusjoner, Norconsult (2015a):

- Oppstrøms skråning er ikke bygget etter dagens krav, men da innslaget av stor blokk er stor synes skråningen å være stabil.
- Det er ingen plastring av nedstrøms skråning, men denne har et deksjikt av grovfraksjonert sprengstein
- Instrumenteringen er mangelfull. Dammene mangler et lekkasjemålesystem og det er for få bolter i skråninger og på kjerne.

NVEs kommentarer til avvikene var:

- Damkrone og nedstrøms skråning har ikke en tilfredsstillende utførelse, både når det gjelder kronedimensjoner og steinstørrelse (beredskapsmessige krav)
- Det bør vurderes om tetningskjernen bør heves

Det er ikke nevnt noe om oppstrøms skråning bør rehabiliteres, noe som kan tolkes slik at selv om det er konstatert avvik til regelverket anses oppstrøms skråning som stabil.

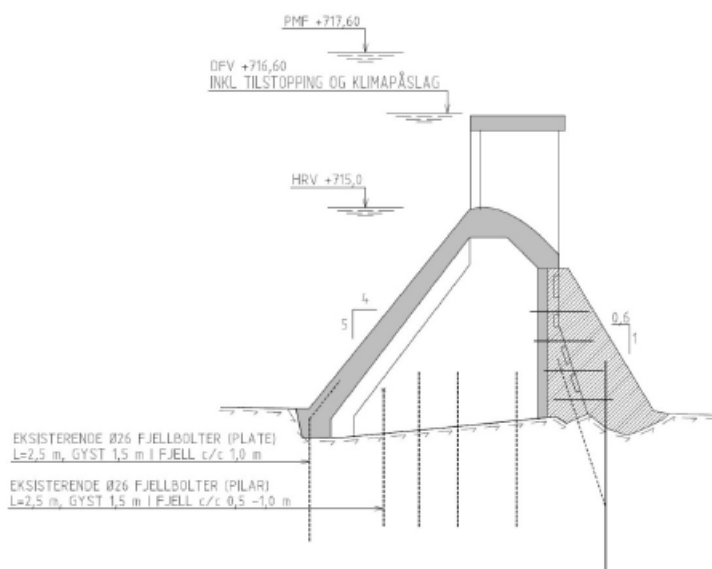
Tappelukene ble revurdert av Norconsult AS i 2012. Hovedkonklusjonen er at tappelukene har tilfredsstillende styrke og kapasitet. Imidlertid anbefales det å rehabilitere hydraulikkaggregatet inklusive den elektriske utrustningen. NVE har godkjent revurderingen i 2013.

Følgende rehabiliteringstiltak skal gjennomføres på samtlige av fyllingsdammene:

- Heve damkrona på alle dammene til kote 721,60 inklusive setningsmonn.
- Påbygging av nedstrøms damskråninger med plastret stein slik at tilfredsstillende stabilitet og dremskapasitet oppnås.
- Ombygging av damtoppene skjer ved at:
 - Morenekjernen heves til ca. kote 717,8 med toppbredde minimum 2,0 m.
 - Nytt kronevern bygges opp med yttersteiner på minimum 1,0 m³ for klasse 4-dammene og 0,5 m³ for sekundærdam 4 (klasse 3). Sonen føres ned til 6 m henholdsvis 5 m under HRV i begge damskråninger.
 - Bredden av damkronene økes til 6,5 m, henholdsvis 5,5 m for sekundærdam 4.
- Lekkasjemålehus etableres ved alle dammene med kontinuerlig overføring til driftsentralen. Hoveddammen vil få 3 målepunkter
- Nye setningsbolter monteres på ny plastret overflate i oppstrøms- og nedstrøms skråninger samt på damkronene.
- For tappeluke: Rehabiliter hydraulikkaggregat inklusive elektriske komponenter for tappelukene.

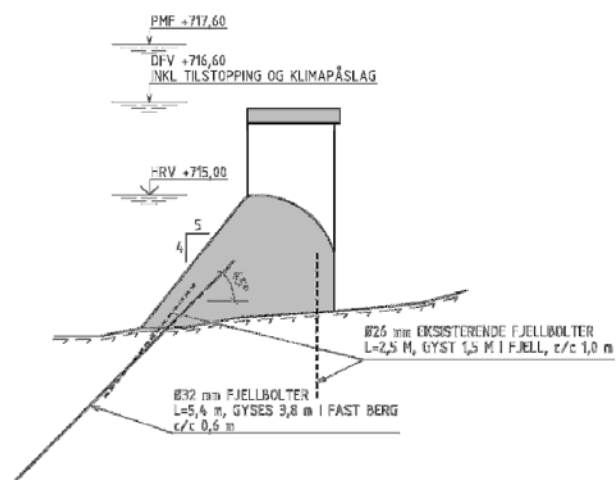
A2.3.1 Planlagte tiltak, sekundærdam 1 og dam Landsløkbekken- platedam

Tiltaksplan for platedammene er ikke godkjent av NVE, nye tekniske planer er under utarbeidelse. Beregninger i forbindelse med revurdering påviste at platedammens lave partier har for lav veltestabilitet og glide stabilitet ved lasttilfelle HRV+islast. Planlagt løsning for platedammen innebærer en påstøp på nedstrøms side av pilarene.



Figur 7 Planlagt løsning for rehabiliterings av sekundærdam1-platedam (Norconsult, 2015b).

Gravitasjonsdammen på begge sider av platedammen forsterkes med Ø32 mm fjellbolter c/c 0,6 m. Fjellbolter settes i seksjoner med damhøyde større enn 1 m.



Figur 8 Planlagt løsning for å forsterke gravitasjonsdammen på begge sider av Sekundærdam 1, platedammen (Norconsult, 2015b).

A3 Beregninger og analyser av stabilitet

A3.1 Flomberegninger

Høyeste historiske flomvannstand er på 715,89 moh. Dette ble registrert to ganger, 17.10.1983 og 06.07.1990.

Norconsult AS utførte flomberegningene for Sira-Kvina vassdraget i 2010. Flomberegningene er godkjent av NVE i brev av 27.4.2010. I forbindelse med sikringstiltak på dammene engasjerte Sira-Kvina Norconsult til å beregne klimapåslag på 20% på gjeldende flomberegninger for dam Nesjen. Tabell 1 og 2 viser resultatet av flomberegningene, henholdvis med og uten klimapåslag. Klimapåslag er tatt hensyn til ved å legge til 20 % på tilsiget for Q_{1000} . For bruddgrensetilstanden er det lagt til grunn 25 % tilstopping for både overløpsterskel ved hoveddammen og sekundærdam 1.

Tabell 1 Gjeldende flomverdier for Nesjen godkjent av NVE (Norconsult, 2015a).

Hendelse	Tilsig (m ³ /s)	Døgntilsig (l/skm ²)	Avløp (m ³ /s)	HRV (moh.)	Damkjerne (moh.)	Vannstand (moh.)
Q_{1000}	627	1061	511	715,00	716,50	716,20
Bruddgrensetilstand (tilstopping)	627	1061	513	715,00	716,50	716,38
PMF	1611	2960	1487	715,00	716,50	717,60

Q_{1000} : 1000-årsflom

PMF : Påregnelig maksimal flom

Tabell 2 Flomverdier med klimapåslag på gjeldende flomberegninger

Hendelse	Tilsig (m ³ /s)	Døgntilsig (l/skm ²)	Avløp (m ³ /s)	HRV (moh.)	Damkjerne (moh.)	Vannstand (moh.)
1,2 Q_{1000}	797	1280	619	715,00	716,50	716,36
Bruddgrensetilstand (tilstopping)	797	1280	596	715,00	716,50	716,60

A3.2 Jordskjelv

Det dimensjonerende jordskjelv med gjentaksintervall 1/475 år (etter NS 3491) er ved Nesjen 0,05g. Ved å benytte en jordskjelvkoeffisient på to (gjentaksintervallet blir da betydelig lengre enn 475 år) er det i analysen benyttet følgende tall for horisontal og vertikal akselerasjon:

$$a_h = 0,1g$$

$$a_v = 0,033g \text{ (1/3 av horisontal last)}$$

A3.3 Beregninger av stabilitet med nye tiltak

Norconsult (2015a) gjennomførte stabilitetsanalyser av de rehabiliterte dammene på oppstrøms- og nedstrøms skråning under ulike belastningstilstander. Resultatene er vist i Tabell 3 og 4.

Tabell 3 Resultat av stabilitetsanalyser av rehabilitert hoveddam: Tabellen viser den minste beregnede sikkerhetsfaktor (F_{min}) for ulike belastningstilstander (Norconsult, 2015a).

Belastningstilstand/skråning	Vannstand	F_{min}
Stasjonært tilstanden, nedstrøms skråning	DFV – 716,6	1,74
Ulykkestilstanden, nedstrøms skråning 4 m utløpshøyde	PMF	1,36
Hurtig nedtapping, oppstrøms skråning	Fra HRV til 687	1,80
Jordskjelv, nedstrøms skråning	HRV	1,43
Jordskjelv, oppstrøms skråning	HRV	1,46

DFV: Dimensjonerende FlomVannstand
 HRV: Høyeste Regulerte Vannstand
 PMF: Påregnelig Maksimal Flom

Tabell 4 Resultat av stabilitetsanalyser av rehabiliterte sekundær dammer: Tabellen viser den minste beregnede sikkerhetsfaktor (F_{min}) for ulike belastningstilstander (Norconsult, 2015a).

Belastningstilstand/skråning	Vannstand	F_{min}
Stasjonært tilstanden, nedstrøms skråning	DFV – 716,6	2,06
Ulykkestilstanden, nedstrøms skråning 2,5m utløpshøyde	PMF	1,78
Hurtig nedtapping, oppstrøms skråning	Fra HRV til 703	1,50
Jordskjelv, nedstrøms skråning	HRV	1,87
Jordskjelv, oppstrøms skråning	HRV	1,44

DFV: Dimensjonerende FlomVannstand
 HRV: Høyeste Regulerte Vannstand
 PMF: Påregnelig Maksimal Flom

Resultatet av stabilitetsanalysen for dammene viser at de rehabiliterte dammene har tilfredsstillende sikkerhet mot utglidning i alle belastningstilstander med god margin.

A4 Konsekvensanalyser

I områdene fra Nesjen og ned til Risnes er eneste bebyggelse noen spredte hytter. Ved Risnes er det derimot flere hus samt områder som blir benyttet til jordbruk. Nedstrøms Risnes ligger det noen få spredte gårder og ca 5,5 km nedstrøms ligger Netland og Netlandsnes hvor det er lokalisert flere hus samt et kapell. Videre nedover er det ingen bebyggelse før ved Nordstrand og ved Moland hvor det er noen få bygninger. Områdene nedstrøms Moland er ikke beskrevet. Fra Nesjen til Risnes går det en kommunal /privat vei som følger Kvina store deler av strekningen. Oppstrøms Landsløk går veien på østsiden av Kvina, men langs resten av strekningen går den langs vestsiden. Fylkesvei 465 følger Kvina store deler av strekningen fra Risnes til Moland på vestre side. Flere steder ned mot elva, men også enkelte strekninger i noe høyereliggende terreng.

NGI (2013) gjorde en oversiktskartlegging av potensiale for skredgenererte flodbølger i norske dammer. Nesjendammene er ikke inkludert på listen over de dammene som er identifisert med størst potensiale for skredgenererte flodbølger. Men det at den ikke er identifisert kan også skyldes mangel på data. Vurdering av skredfare og skredgenererte bølger må derfor vurderes separat.

A4.1 Dambruddsbølgeberegninger hoveddam

I dambruddsbølgeberegningene, Norconsult (2005), skal to ulike bruddsituasjoner ved Nesjen hoveddam analyseres:

1. 1000-års flom (Q_{1000}) i vassdraget og brudd ved overtopping av dammen.
2. Middelflom (Q_M) i vassdraget og brudd ved rørosjon i dammen ved 1/3 av damhøyden.

Bruddene forutsettes å starte i det avløpsflommen når sin maksimale verdi for henholdsvis middelflommen og 1000-års flommen. Bruddet anses som en gradvis utvidelse.

Antagelsene for dambrudd gir følgende verdier for Nesjen hoveddam:

Tabell 5 Parametere brukt i dambruddsbølgeberegningene (Norconsult 2005)

Bruddårsak	k_0	H_{magasin} [m]	H_{damfot} [m]	H [m]	V_{magasin} [m ³]	b_{maks} [m]	T [t]	B [m]	Z	b [m]	T_{kor} [t]	b_{kor} [m]
1000-års flom	1.4	716.05	671.7	44.3	3.51E+08	1	2.79	281	4.0	88	1.92	1
Middelflom	1	715.45	671.7	43.8	2.81E+08	60	2.51	187	2.6	40	2.51	60

Symbolforklaring til Tabell 5:

B : Midlere bruddbredde;

T : bruddtiden;

V_{magasin} er magasinets volum (i m³) ved begynnende brudd,

h_d er høyden fra bunn av ferdig brudd til vannstand ved start av brudd i m

k_0 er 1,4 ved overtopping (Q_{1000}) og 1,0 ved rørosjon (Q_M),

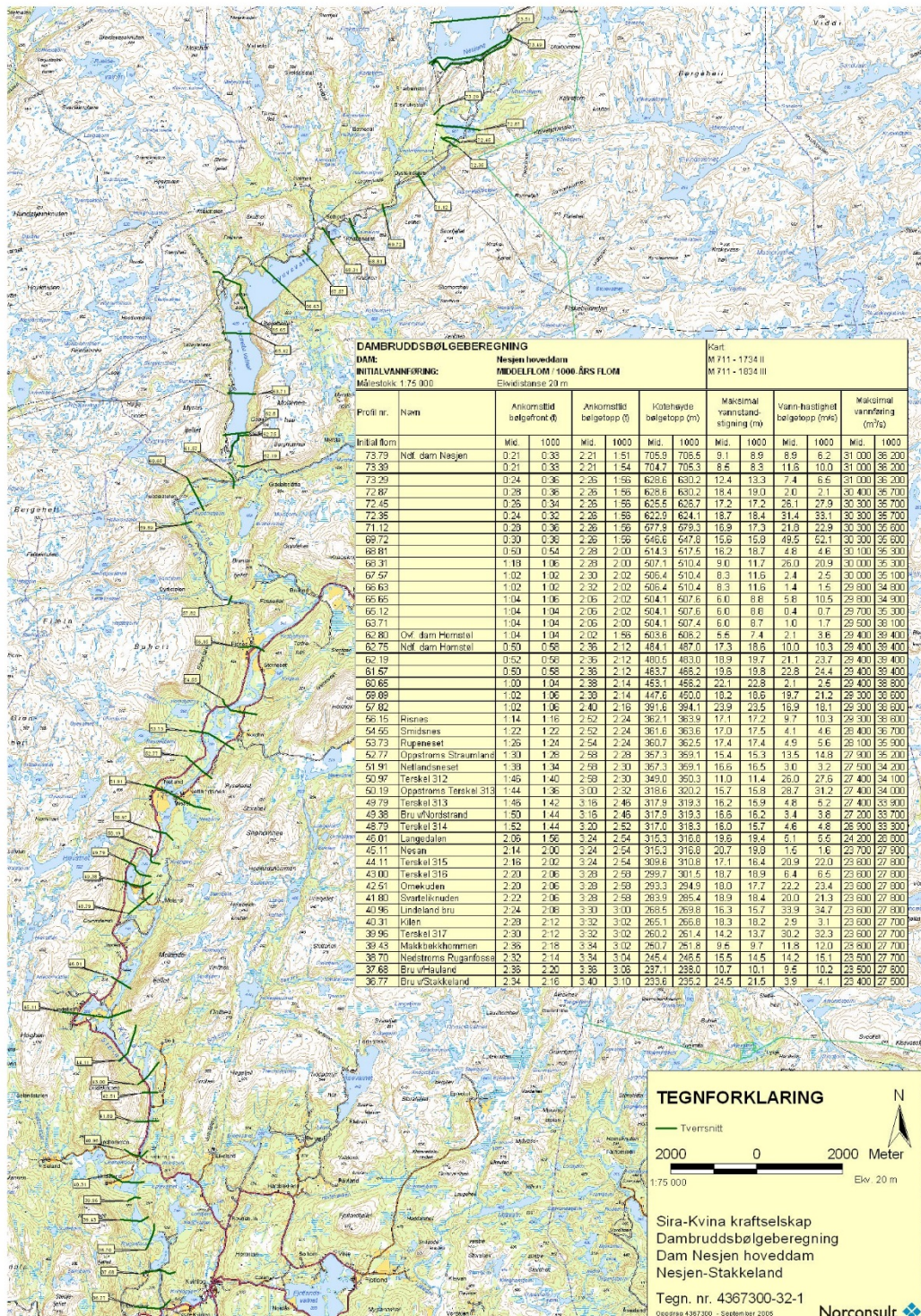
b_{maks} er størst mulig bruddbredde ved fundamentet til dammen,

b er bunnbredde på bruddet lik,

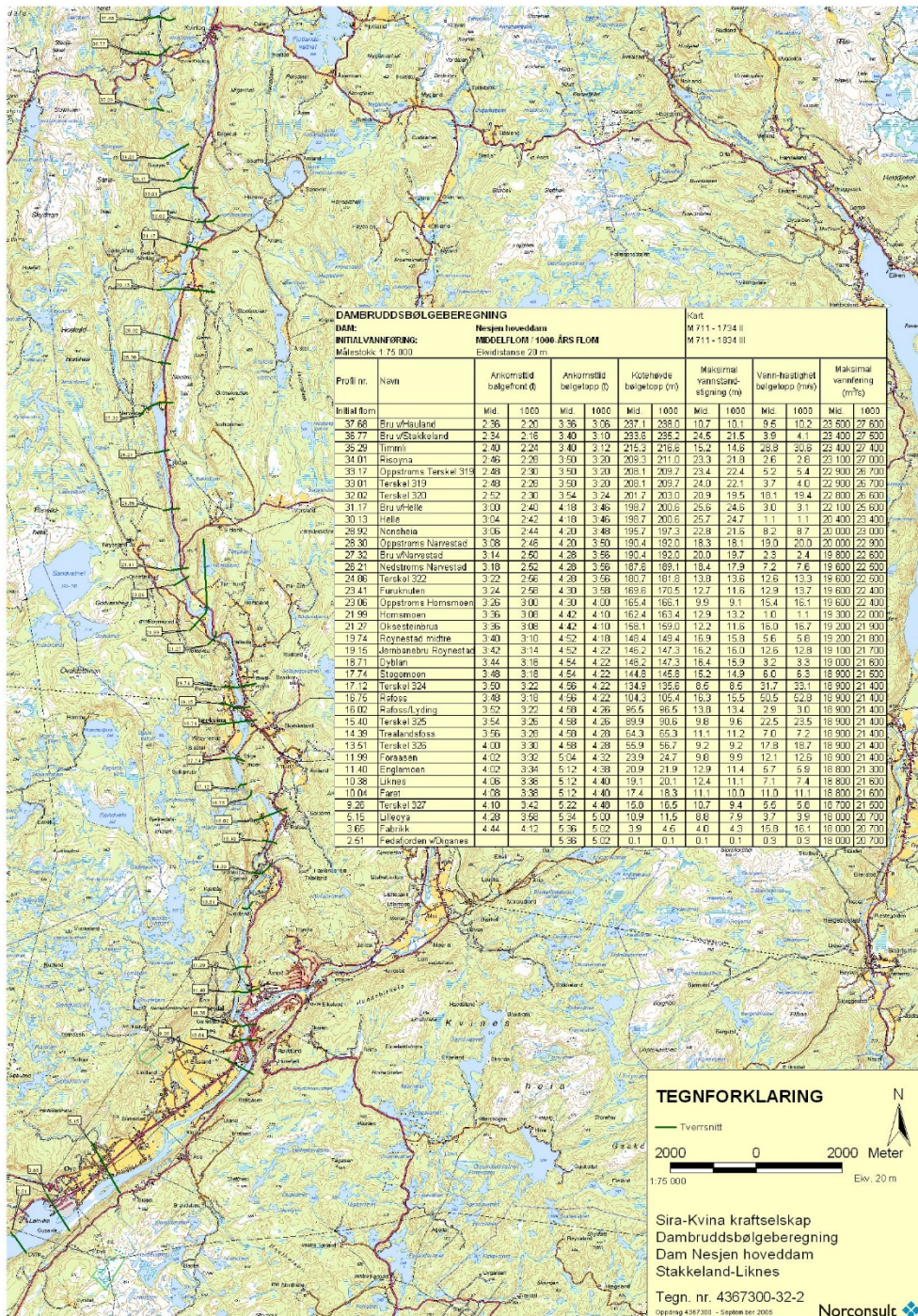
Z er sidehelningen på bruddet

b_{kor} og T_{kor} : korrigert bruddbredde og bruddtid. dersom b er større enn b_{maks} .

Oversiktskart og tabeller for dambruddsbølgeberegninger for Nesjen hoveddam er vist i Figur 9 og 10.



Figur 9 Dambruddsbølge beregninger for Nesjen hoveddam angitt for ulike tverrsnitt som vist i kartet, for ankomsttider mellom 0 - 2t 34min (Norconsult, 2005).



Figur 10 Dambruddsbølge beregninger for Nesjen hoveddam angitt for ulike tverrsnitt som vist i kartet for ankomsttider mellom 2t34min og 4t 36 min (Norconsult, 2005).

Bruddårsak 1: 1000-års flom (Q_{1000}) i vassdraget og brudd ved overtopping av dammen

Nesjen hoveddammen vil for situasjon 1 få et fullt utviklet brudd etter 1 t og 55 min og tilhørende maksimal vannføring på 36 200 m³/s. Bølgefronten vil nå Risnes 1 t og 16 min etter initiering av brudd. Maksimal vannstand nås etter 2 t og 24 min og vannstandsstigningen vil da være 17,2 m. Bølgetoppen vil nå Liknes 3 t og 36 min etter bruddet starter. Maksimal vannstandsstigning vil bli 11,1 m etter 4 t og 40 min.

Bruddårsak 2: Middelflom (Q_m) i vassdraget og brudd ved rørosjon i dammen ved 1/3 av damhøyden

Ved situasjon 2 vil bruddet utvikle seg i løpet av 2 t og 30 min og tilhørende maksimal vannføring vil være 31 000 m³/s. Bruddbølgen vil nå Risnes ca. 1 time og 14 min etter bruddet starter. Maksimal vannstandsstigning vil bli 17,1 m etter 2 t og 52 min. Bruddbølgen når Liknes 4 t og 6 min etter bruddets start. Bruddbølgen gir ved denne situasjonen en vannstandsstigning på ca. 12,4 m etter 5 t og 12 min.

A4.2 Berørt infrastruktur

Brudd ved Nesjen hoveddam gir store konsekvenser i nedstrøms vassdrag. Dambrudd ved Nesjen hoveddam vil medføre dominobrudd på dam Homstøl (som ligger ved Homstølvatnet nedstrøms Nesjendammene).

Infrastruktur som blir berørt av dambruddet omfatter:

- 17 Broer (ved Landsløk, Knabeneset, Astdøla, Risnes, Netlandsnes, Nordstrand, Solli, Lindeland, Rjuganfossen, Nedre Kvinlog, Narvestad, Oksestien, Storekvina, Storekvina jernbanebru, Trælandsfoss, Åmot, Faret).
- Hytter ved Geithomtjørni, Asdalsstølen, Dyrlistølen, Risøyni
- Ca. 250 Bolighus: (10 ved Risnes, 3 ved Smidsnes og Nordbø, 10 på Netlandsnes, ca.10 ved Lindefjell, 3 ved Kvinlog, ca.10 ved nedre Kvinlog, 4 ved Narvestad, 2 ved Saga, 3 ved Homsmoen, ca. 40 ved Storekvina, ca.10 ved Rafoss, ca. 3 ved Trælandsfoss, ca. 50 mellom Liknes og Øye, ca. 100 i Liknes sentrum)
- Veier: Riksvei V 42 , Riksvei 465, E39
- Industri: Trælandsfoss fabrikk, Øye smelteverk

A4.3 Konsekvenser av dambrudd i sekundærdammene

Det er gjennomført dambruddsbølgeberegninger for Nesjen sekundærdammer 1, 2, 3 og 4, Sweco Grøner (2005).

Et brudd ved Nesjen sekundærdam 1 vil medføre at vannstand og vannføring nedstrøms øker svært raskt ettersom brudd på en platedam forutsettes å inntreffe momentant. Bruddåpningen er allikevel relativt liten i forhold til det store vannmagasinet i Nesjen slik at vannstanden i de områdene som blir utsatt for et dambrudd vil holde seg høy over lengre tid.

Sekundærdammene 2, 3 og 4 til Nesjen er alle steinfyllingsdammer og bruddet vil utvikle seg over tid. Dette vil ha lite å si for den maksimale vannstanden nedstrøms ettersom Nesjen magasinet er så stort at vannstanden i magasinet vil senkes lite før fullt brudd er utviklet. Bruddtiden vil derimot ha stor betydning for ankomsttid til bølgetoppen som vil være langt lengre enn for brudd på platedammen. Felles for brudd på alle Nesjen sekundærdammene er at bølgen vil dempes svært langsomt pga. den store "halen" på bølgen som inneholder hele magasinivolumet til Nesjen magasinet. Ingen av sekundærdammene til Nesjen vil medføre dominobrudd på dam Homstøl, selv om bruddet på sekundærdam 2 er svært nær. Vannstanden i Homstøl magasinet er da kun 0,1 meter under kronenivået. Konsekvensene ved brudd på Nesjen sekundærdam 2 og 3 er vurdert å være så store at beregningene utføres for et forholdsvis lang strekning nedstrøms Risnes. Vannstandsøkning ved Risnes som følge av dambrudd i sekundærdam 2 og 3 ble beregnet til henholdsvis 6,0 og 5,2 meter ved en dimensjonerende flom.

For brudd på Nesjen sekundærdam 1 og 4 er derimot konsekvensene mindre og dambruddsbølgeberegninger er gjennomført ned til Moland hvor de avsluttes. Bruddene vil påvirke flere bygninger på Risnes og Netland. På Smidsnes, Fosseli og Netlandsnes vil enkelt bygninger bli berørt. Brudd ved Nesjen sekundærdam 1 og 4 vil medføre at vannstanden ved Risnes vil stige med henholdsvis 1,3 og 2,1 meter ved dimensjonerende flom og 2,1 og 3,0 meter ved middelflom. Henholdsvis 18 og 21 boligenheter vil berøres, i tillegg vil et bedehus.

A5 Instrumentering på Nesjendammene

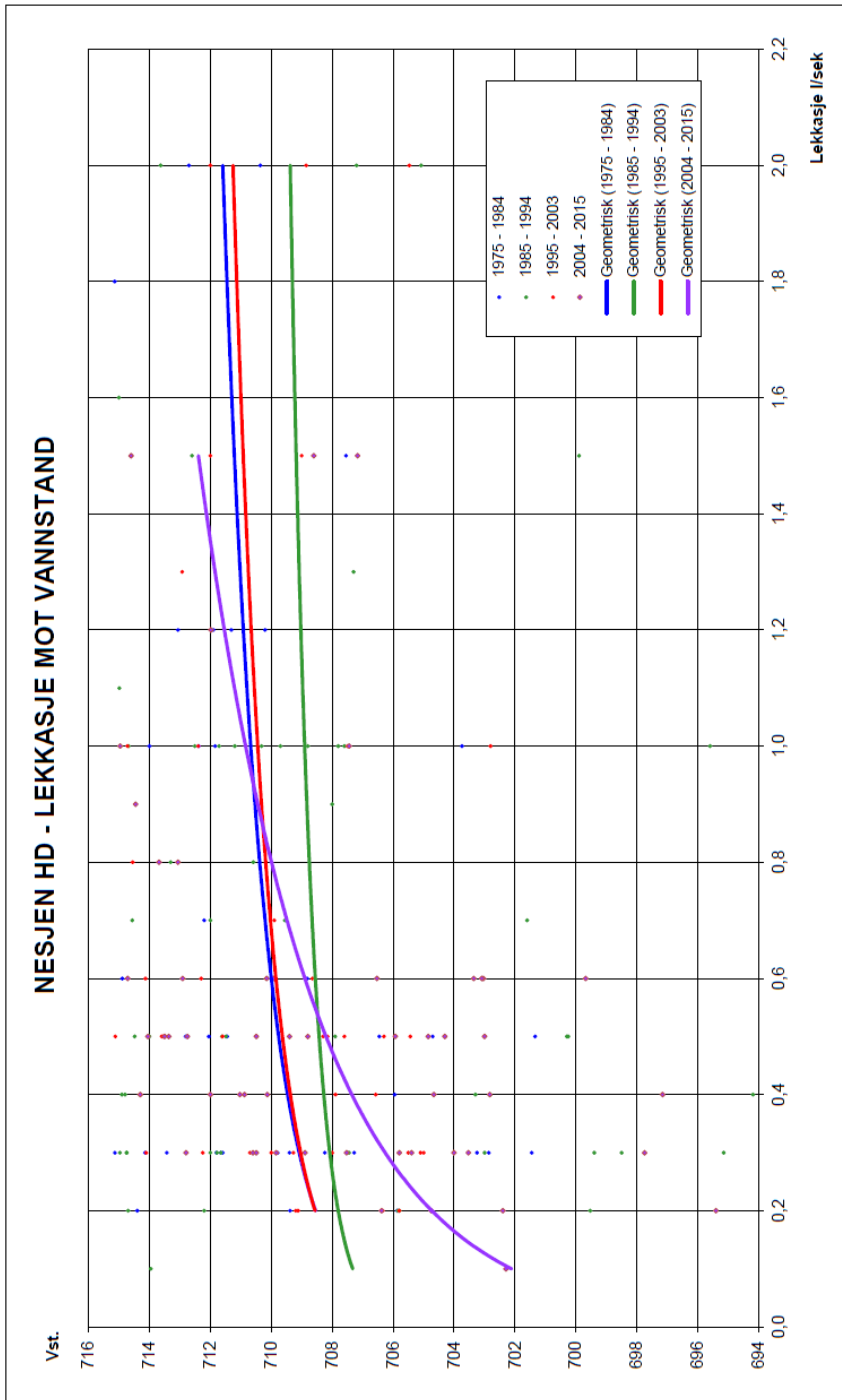
Innsatsplan for Kvina-vassdraget formulerer påkrevet innsats definert ut fra grenseverdier for vannstand, lekkasje og vindstyrke (Sira-Kvina, 2007).

A5.1 Lekkasjemålesystem

Dagens lekkasjemålingssystem:

NGI (1968) anbefalte at det ble igangsatt daglige målinger av vannlekkasjen nedenfor hoveddammen. Vannlekkasje gjennom sekundærdammene undersøkes rent visuelt og dersom det oppstår lekkasje av betydning bør denne måles på samme måte som ved hoveddammen. Det anbefales også at magasinivået noteres samtidig med lekkasjemålingen og at nedbørmengden måles daglig, for å kunne se nedbørens innvirkning på lekkasjemålingene.

Målt lekkasje ved Nesjen hoveddam (i l/s) er vist i Figur 11.



Figur 11 Lekkasje ved Nesjen hoveddam som funksjon av vannstand for perioden 1975-2015.

Utbedring av lekkasjemålingssystem ved rehabilitering:

Det vil være behov for 3 lekkasjemålesystemer. Alle målehus vil installeres med overføring av data til driftssentralen

A5.2 Målinger av deformasjoner

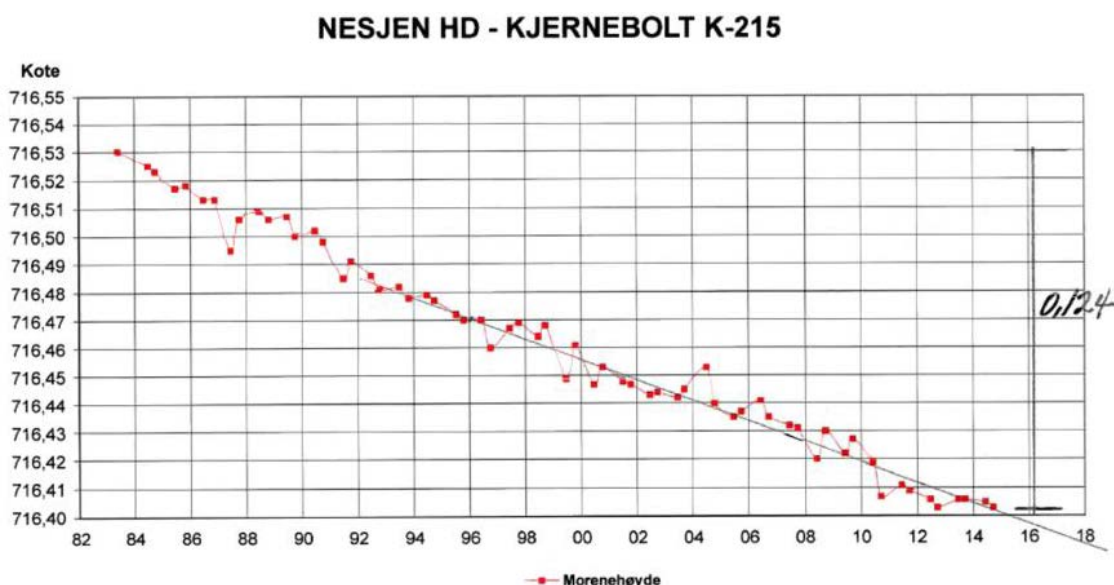
Deformasjonsmålinger

Fugro Survey AS utførte i oktober 2008 og i september 2012 undersøkelser med bakkelaser over vann og multistråle ekkolodd under vannivået.

Konklusjonene er at store deler av oppstrøms skråningsareal bare har mindre deformasjoner siden 2008. Undersøkelsene viste arealer med bevegelser større enn 200 mm i damskråningene, som synes å være til stor del knyttet til de store blokkene som over tid vil oppleve en viss rotasjon. Årsaken til denne bevegelsen er sannsynligvis forårsaket av belastningssituasjonen høy/lav vannstand.

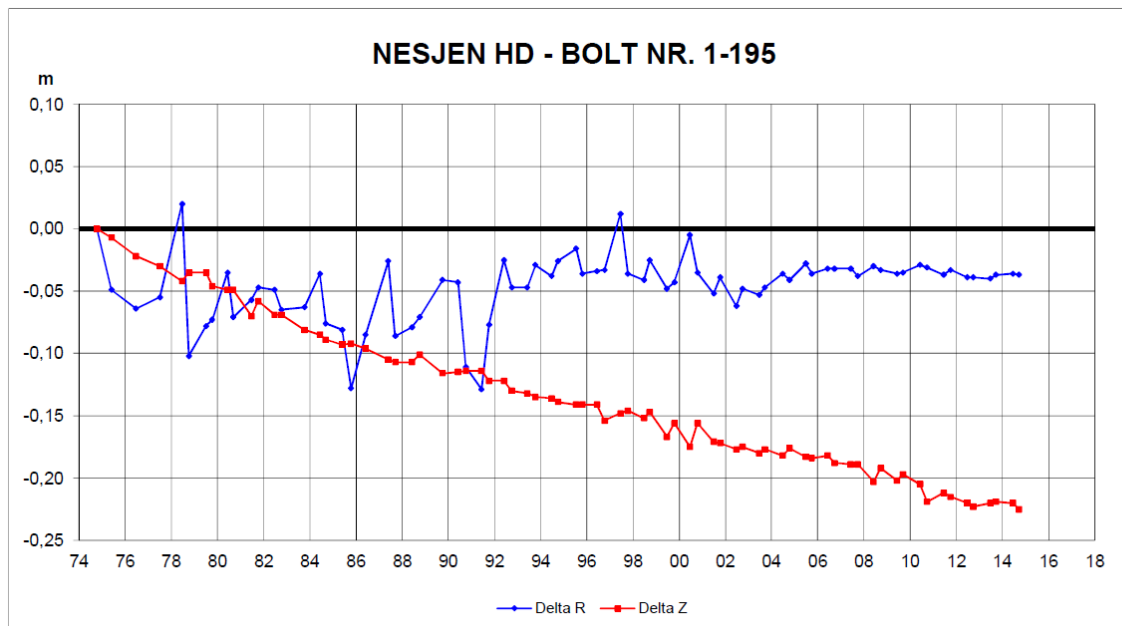
De 18 boltene på krone og i nedstrøms skråning har blitt innmålt siden 1974. De tre kerneboltene har blitt målt siden etableringen av boltene i 1983.

Målte bevegelser over tid er vist i Figur 12 og 13.



Figur 12 Setning av kjernebolt K-215 (Norconsult, 2015a).

Setningshastigheten har vært ganske lineær siden første innmåling i 1983 (Figur 12). Det normale er at setningshastigheten avtar. På den andre siden, er en kryptsetning på ca. 0,009 % pr. år sammenliknbart med andre dammer bygget på samme tid.



Figur 13 Deformasjonsmålinger, bolt 1 -195 (plassert på oppstrøms side av damkrona) (Norconsult, 2015a).

Den bolten på damkrona som har hatt størst vertikal setning, 225 mm, er bolt 1 – 195, plassert på dammens oppstrøms side av krona. Deformasjonene er vist i Figur 13. Det er normalt for fyllingsdammer med sentral plassert tetningskjerne at oppstrøms støttefylling får en større setning enn nedstrøms. Dette skyldes at steinen vekselvis blir mettet og drenert. Ved at steinens enaksiale trykkstyrke er lavere i mettet tilstand, vil nedknusningen i steinenes kontaktpunkter knuses lettere i oppstrøms skråning, hvilket fører til en større setning.

Krypsetningen tilsvarer 0,01 %/år, hvilket er i samsvar med andre dammer bygget på samme tid (dam Songa, Tunsbergdalsvatn, Viddalsvatn m.fl.). Basert på innmålinger på 21 bolter over 40 år viser Nesjen hoveddam en litt mindre enn gjennomsnittlig setning over tid.

Utvidelse av deformasjonsmålinger ved rehabilitering:

Etter påbygging vil det monteres bolter på dammens ytre skråninger og krone. Oppstrøms foreslås en bolterekke ved ca. HRV-nivå. Bolterekker under dette nivå vil ikke være tilgjengelig store deler av sesongen, og bør erstattes av bolter på utvalgte enkeltblokker man har mistanke om beveger seg.

På krone, morenetetning forslås bolter etter følgende mønster:

- Damkrone, alle dammer: Overflate bolter, begge sider, c – c 25 meter
- Topp av tetning. De tre eksisterende boltene på hoveddammen reetableres på samme pelnummer, og suppleres med ytterligere bolter slik at c – c i gjennomsnitt blir ca. 50 m. Nye bolter på sekundærdammene, c – c 50 m.

A5.3 Måling av vindstyrke

Det er installert to vindmålere for Kvina-vassdraget. Disse er plassert på dam Svartevann og ved Duge (like nedenfor dam Svartevann).

A6 Kritiske situasjoner/initierende hendelser [konfidensielt]

NB. Informasjonen i dette kapitlet er hentet fra Innsatsplan og Analyseplan for Kvina-Vassdraget, som er konfidensielle dokumenter.

Et dambrudd kan starte med en spesifikk initierende hendelse som utvikler seg og til slutt resulterer i et ukontrollert utslipp fra magasinet. Et ukontrollert utslipp kan også skyldes en kombinasjon av flere initierende hendelser eller hendelser under utvikling. Initierende hendelser kan være flom forårsaket av ekstrem nedbør eller av dambrudd i oppstrøms magasiner, vind- eller skred-genererte bølger i magasinet, jordskjelv, design- og konstruksjon feil i forbindelse med normale hydrauliske belastninger og menneskelig handlinger (feil i drift og operasjon, sabotasje etc).

I Sira-Kvina (2015) identifiseres følgende mulige kritiske situasjoner for hoveddammen og sekundærdammene:

- Tilstopping i flomløpet med snø eller is, eller iskjøving ved tapping/overløp
- Gjentetting av flomløpet av trær, flytetorv og annet flytende
- Steinskred eller snøskred mot dammene som fører til skader på dammene
- Steinskred eller snøskred mot magasinet som kan gi flodbølge mot dammene
- Jordskjelv som kan gi kritiske rystelser av dam og damfot
- Ekstrem flomvannstand i magasinet
- Stor lekkasje gjennom dam (for fyllingsdammene: forårsaket av oppsprekking i kjerne pga. deformasjoner eller setninger i fundament eller dam. For platedammen: forårsaket av oppsprekking, skade på fuge eller andre skader)
- Stor lekkasje i damfundament, pga. forvitring eller sprekker i damfot
- For fyllingsdammene: Skader på plastring på fyllingsdammenes vannside
- For platedam: Store bølger mot dammen ved sterk vind fra nordlig eller østlig retning.

Disse potensielle situasjoner kan representere initierende hendelser eller hendelser under utvikling i en risikoanalyse. På workshopen vil vi kartlegge om det er andre kritiske situasjoner utover denne listen.

Kilder

- Kjærnsli, B. (1992). Sikkerhet av norske fyllingsdammer mot brudd forårsaket av indre erosjon og derav følgende øket lekkasje gjennom og under dammen. Rapport til "Prosjekt damsikkerhet". NGI rapport nr. 904084-1. 22 januar 1992.
- Møller, I. : Norske Dammer, bind 1 og 2. Energi Forlag AS, www.energi-nett.no, ISBN 978-82-92931-00-4
- NGI (2003). Tsunami modelling and prediction. Pre-project: Slide-generated waves in reservoirs, NGI report 20031100-1, 30 November 2004.
- NGI (1968). Geoteknisk kontroll av Nesjen hoveddam og sekundærdammer.
- Norconsult (2015a). Teknisk plan - Rehabilitering av fyllingsdammer ved Nesjen, inklusive tappeluke.
- Norconsult (2015b). Teknisk plan - Tiltak på betongdammer ved Nesjen
- Norconsult (2005). Dambruddsbølgeberegninger Strekningen Roskrepp-Fedafjorden, Oppdragsnr. 4367300, 13. September 2005.
- Sira-Kvina (2007). Innsatsplan Kvina-Vassdraget (konfidensiell)
- Sira-Kvina (2015). Analyseplan Kvina-vassdraget (konfidensiell)
- Sweco Grøner (2005). DBBB sekundærdammer Nesjen, Sira-Kvina, Rapport nr. 127480-01, 16. Juni 2005.

Vedlegg B

SIKKERHETSVURDERING AV SEKUNDÆRDAM 1 (BETONG PLATEDAM)

Innhold

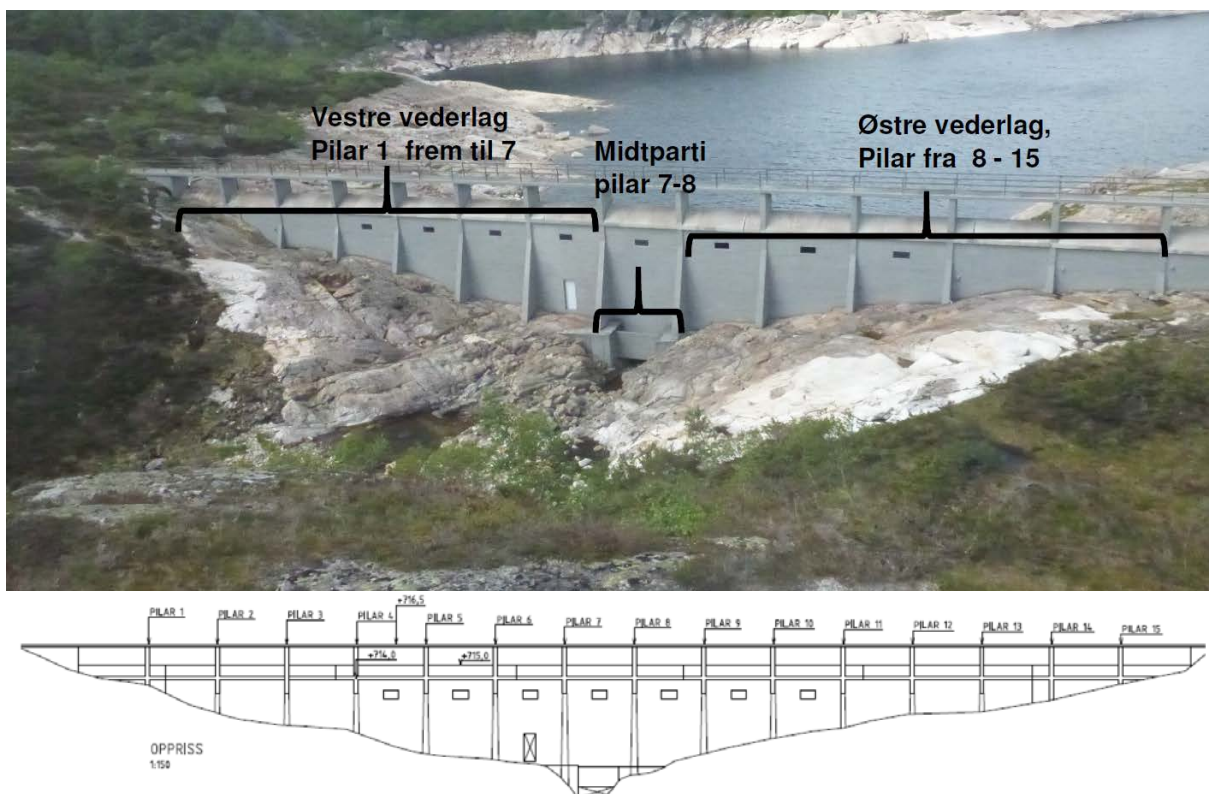
B1	Problemstilling	2
B2	Sikkerhet mot glidning og velting for Pilar 2	3
	B2.1 Parametre	3
	B2.2 Metodikk	4
	B2.3 Resultater for Pilar 2	5
B3	Sikkerhet mot glidning og velting for Pilar 5	8
	B3.1 Parametre	8
	B3.2 Resultater for Pilar 5	9
B4	Diskusjon	11
	Referanser	12

B1 Problemstilling

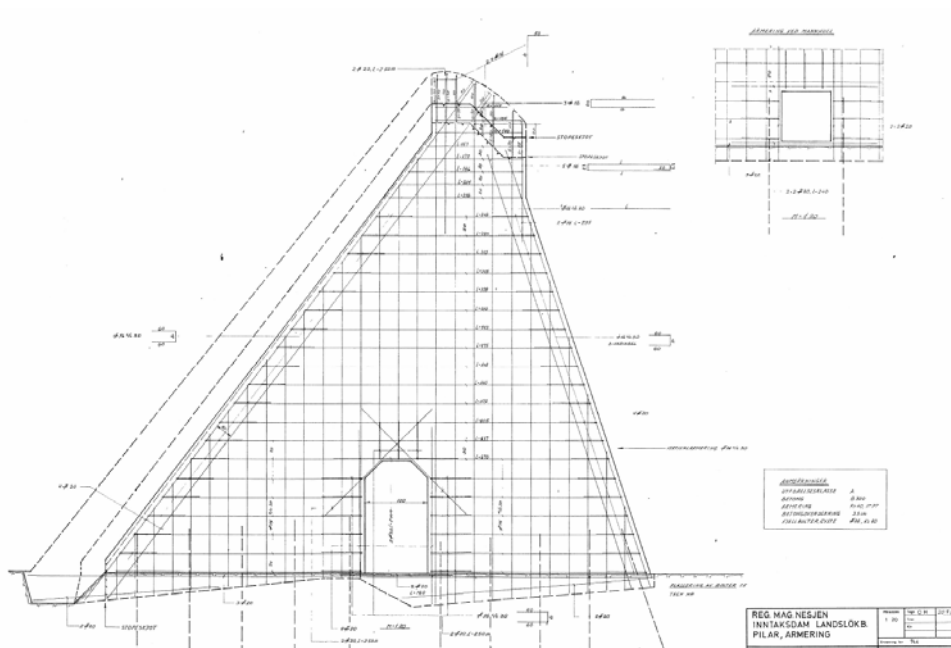
Under workshopen ble det en diskusjon om sikkerheten mot glidning og velting av Sekundærdam 1 under islast. Sekundærdam 1 er en betong platedam. Figur B1 (neste side) viser platedammen med 15 pilarer, og Figur B2 viser armeringen av pilarene. Figur 3B viser et snitt av en typisk pilar i Sekundærdam 1.

Workshoppedeltagerne diskuterte muligheten av å vurdere bruddsannsynlighet med en hendelses-tre-analyse. For en veldefinert problemstilling som glidning og velting av en betongpilar eksisterer det mer egnede probabilistiske verktøy. En "Second Order Reliability Analysis" (SORM), med software COMREL (STRUREL, 2017) ble utført.

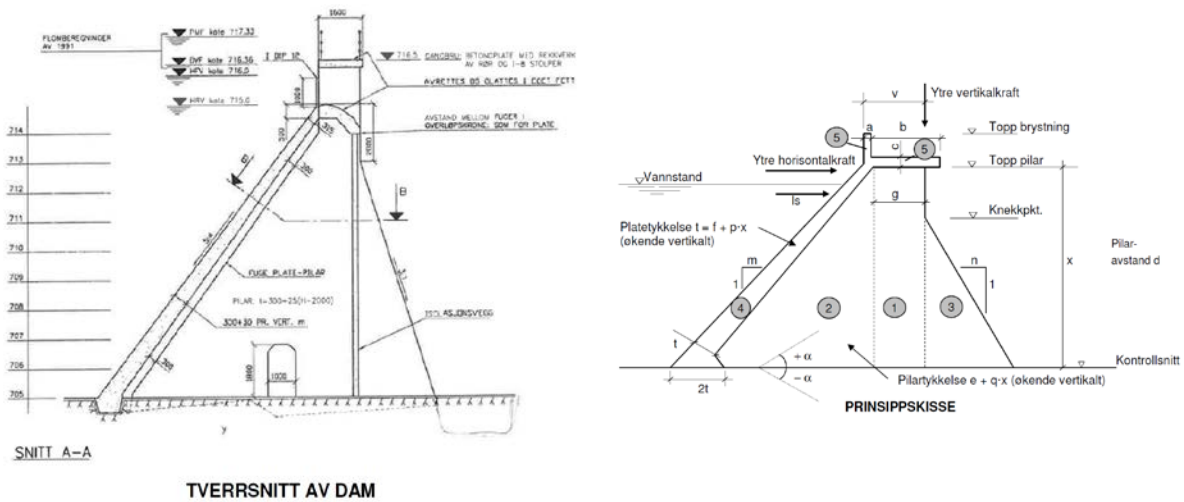
De deterministiske beregningene fra Norconsult (personlig kommunikasjon) var tilgjengelige. Basert på Norconsults vurdering er Pilar 2 og 5 de to mest kritiske pilarene. Islasten er vurdert av Norconsult og er fastsatt til 500 kN, dvs 100 kN/m over en bredde på 5 m. I de probabilistiske beregningene for å vurdere bruddsannsynlighet ble islasten antatt å være representativ for en ti-års islast. Hele den probabilistiske fordelingene av islasten over alle returperioder ble inkludert i SORM analysen.



Figur B1. Sekundærdam 1 (Platedam) med 15 pilarer. Pilar 2 og 5 er nr. 2 og nr. 5 fra venstre (Norconsult, 2017).



Figur B2. Typisk armering i en pilar, Sekunddærdam 1 (Platedam).



Figur B3. Snitt av en typisk pilar i Sekunddærdam 1 (Platedam).

B2 Sikkerhet mot glidning og velting for Pilar 2

B2.1 Parametre

For Pilar 2 var sikkerhet mot glidning, ($FS_{glidning}$), beregnet til 1,44 av Norconsult. Tabell B1 gir en oversikt over input verdier for Norconsults analyser.

For de probabilistiske analyser av Pilar 2, ble følgende verdier brukt:

- *Vanndybde ved HRV:* $(715 - 711,4) = 3,6$ m (\Rightarrow WH1 = 324, WV = 259) (Tabell B1).
- *Vanndybde:* En uniform probabilistisk fordeling ble brukt, med minimum og maksimum verdier 2,6 og 3,6 m (dvs 1 m under HRV, og HRV).
- *Islast:* Norconsult brukte en islast på 500 kN (100 kN/m \times 5 m lengde) i sine deterministiske beregninger (Tabell B1). Som "Base Case" ble en Gumbel probabilistisk fordeling med et snitt på 251 kN og standardavvik på 40 kN brukt for en ett-års islast. Denne fordelingen gir en verdi på 500 kN for 500-års islasten. Som "Sensitivity Case" ble en Gumbel probabilistisk fordeling med et snitt på 275 kN og standardavvik på 100 kN brukt for en ett-års islast. Denne fordelingen gir en verdi på 500 kN for 10-års islast (Figur B4).
- *Boltekraft:* I de deterministiske stabilitetsberegningene antok Norconsult en boltekraft på 340 kN i platedammen, som tilsvarer en boltespenning på 160 MPa. Dette er noe mindre enn de 180 MPa retningslinjene omtaler. I de probabilistiske beregningene ble det antatt en snitt boltespenning på 180 MPa, som gir et snitt på 382,5 kN for boltekraft i plate. Standardavvik ble antatt som 76.5 kN (som tilsvarer en "coefficient of variation" på 20 %). En lognormal probabilistisk fordeling ble også antatt.
- *Vertikal last i boltene:* Snitt = 298,4 kN, hvor lasten er $0,78 \cdot$ Boltekraft.
- *Horisontal motstand fra boltene:* Snitt = 238,5 kN, hvor motstand er $0,6235 \cdot$ Boltekraft.
- *Betong-fjell friksjonsvinkel:* Norconsult brukte en friksjonsvinkel på 50 grader i sine deterministiske beregninger (Norconsult, 2017). "Base Case" i NGIs analyser brukte snitt på 50 grader og et standardavvik på 5 grader. "Sensitivity Case" brukte 45 grader og et standardavvik på 3 grader.

NGI sjekket Norconsults deterministiske sikkerhetsfaktor med Norconsults parametre og beregnet den samme verdi som Norconsult ($FS=1,44$). Med NGIs lavere snittverdien for friksjonsvinkelsnittverdi på 45 grader, ble sikkerhetsfaktor beregnet til $FS=1,21$).

B2.2 Metodikk

Det finnes flere teknikker for å gjøre probabilistiske vurderinger, for eksempel Monte Carlo simulering, FOSM ("first order, second moment" tilnærming) og FORM/SORM ("first- and second-order reliability methods"). For Sekundærdam 1 ble SORM-tilnærmingen (STRUREL, 2017) brukt for å beregne den årlige bruddsannsynligheten.

Av praktiske grunner er det ofte brukt pålitelighetsindeks enn bruddsannsynlighet i probabilistiske vurderinger. Pålitelighetsindeks (β), eller "Reliability index" på engelsk, er ikke en sikkerhetsfaktor mot brudd. Pålitelighetsindeksen¹ representerer antall standardavvik mellom snitt (mest sannsynlige sikkerhetsfaktor) og den kritiske sikkerhetsfaktor ($FS = 1$). Figur B5 viser sammenhengen mellom pålitelighetsindeks og sannsynlighet for brudd.

¹ The Reliability Index (β) represents the number of standard deviations which separate the mean Factor of Safety from the critical Factor of Safety of unity ($= 1$): $\beta = (FS_{mean} - 1) / \sigma_{SF}$

Tabell B1. Deterministiske vurdering av Pilar 2 (Norconsult, personlig kommunikasjon).

Forhold i damfot

Vinkel glideplan, α	-3,0	grader	Friksjonsvinkel	50	grader
Kohesjon	0,0	N/mm ²			

Ytre krefter:

Istrykk	100,0	kN/m		
Horisontalkraft	0,0	kN/m på kotenivå	715,00	
Vertikalkraft	0,0	kN/m med avstand v =	0,75	m

Egenvekt av dam: 23,5 kN/m³

Fjellbolter i damplate (regnes virksomme både for velting og gliding)

Boltdiameter	26	mm	Tillatt boltespenning	160,0	N/mm ²
Bolteavstand	1,0	m	Avstand fra vannsiden	0,2	m

Nesjen Sekundærdam 1 - Stabilitetskontroll
 Platedam
 Bruddkonsekvensklasse 2
 I henhold til "Sikkerhetshåndbok for vassdragsanlegg" samt tilhørende retningslinje for betongdammer.
HØYESTE REGULERTE VANNSTAND + ISTRYKK 100 kN/m

Vertikalkrefter:

Kote	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
711,4	44	37	7	3	0	163	27

Kote	G8	G9	WV	U	PV	ΣF_V
711,4	88	0	259	-73	0	555

Horisontalkrefter:

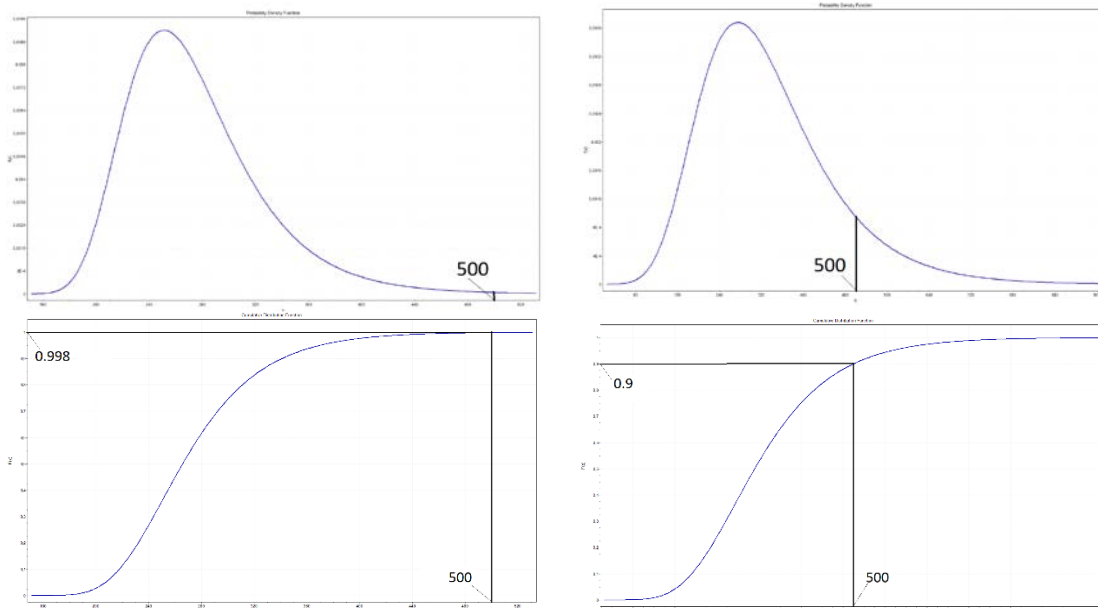
Kote	WH1	WH2	IS	PH	ΣF_H
711,4	324	0	500	0	824

B2.3 Resultater for Pilar 2

Resultatene for Pilar 2 med SORM beregningene med COMREL programvare kan oppsummeres som følger:

Årlig sannsynlighet eller pålitelighet	"Base Case"	"Sensitivity Case"
	500-års islast = 500 kN snitt friksjonsvinkel = 50°	10-års islast = 500 kN snitt friksjonsvinkel = 45°
Årlig bruddsannsynlighet (SORM), P_f årlig	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$3.2 \cdot 10^{-3}$
Årlig pålitelighetsindeks, β årlig	4.26	2.73

Tabell B2 gir en oversikt over andre resultater fra SORM-analysen. I tabell B2 er koordinater (verdi av alle usikre parametrene) gitt for tilfellet hvor det er mest sannsynlig med et brudd. Denne kombinasjonen av parametre i probabilistiske analysen er såkalt "design point".

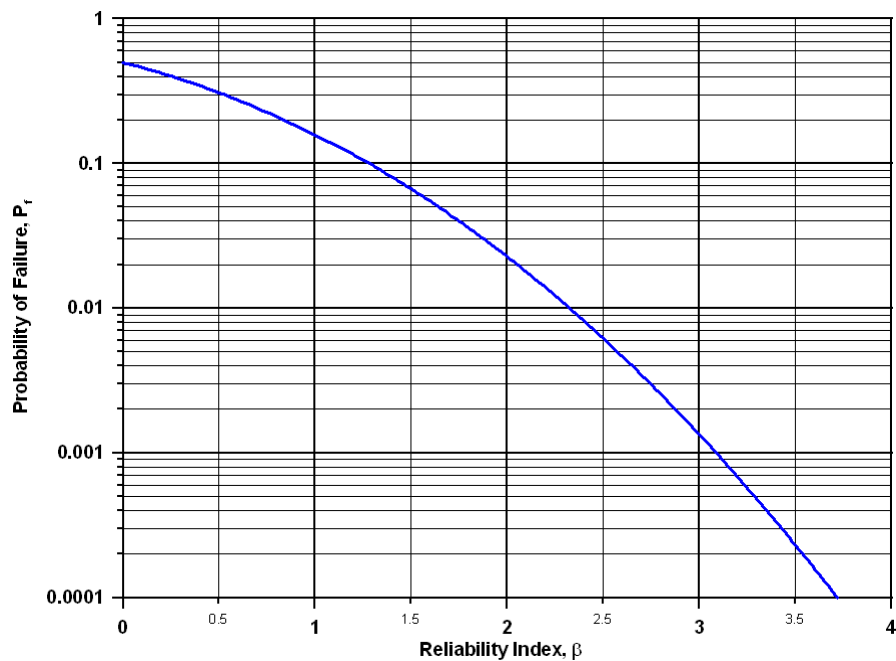


(a) Base Case (500 = 500-års islast)

(b) Sensitivity Case (500 = 10-års islast)

Figur B4 Gumbel fordeling for ett-års maksimum islast:

Venstre: "Base Case" med snitt 251 kN og standardavvik 40 kN; 99,8% prosentil av islasten (markert), tilsvarende 500-års islast, (500-års last= 500 kN); Høyre: "Sensitivity Case" med snitt 275 kN og standardavvik 100 kN; 90% prosentil av islasten (markert), tilsvarende 10-års islast (10-års last = 500 kN).



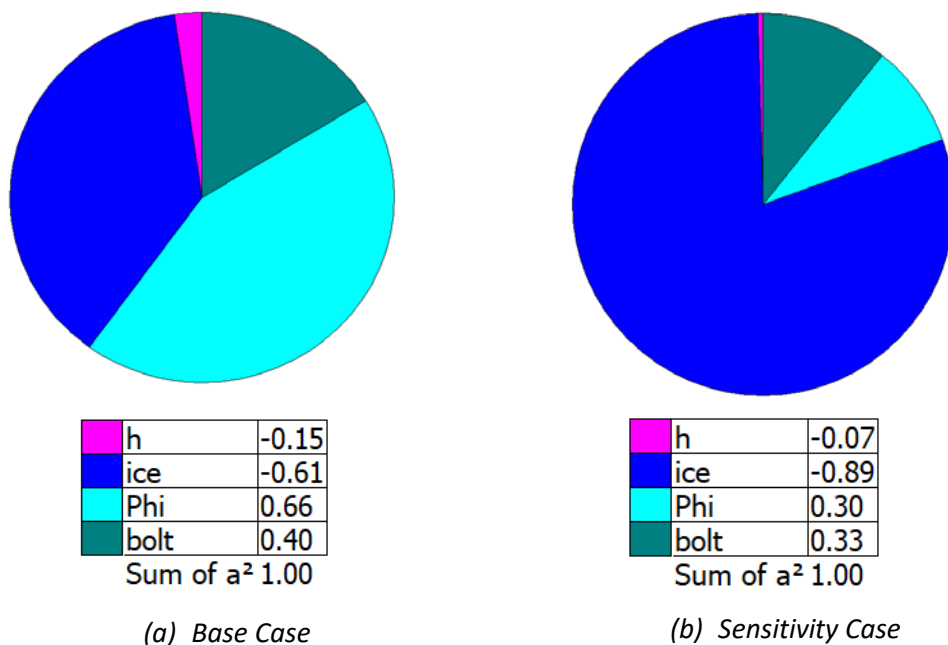
Figur B5. Sammenheng mellom pålitelighetsindeks, β , og sannsynlighet for brudd, P_f .

Tabell B2. Detaljerte resultater fra SORM analyser for Pilar 2 på "Design Point"

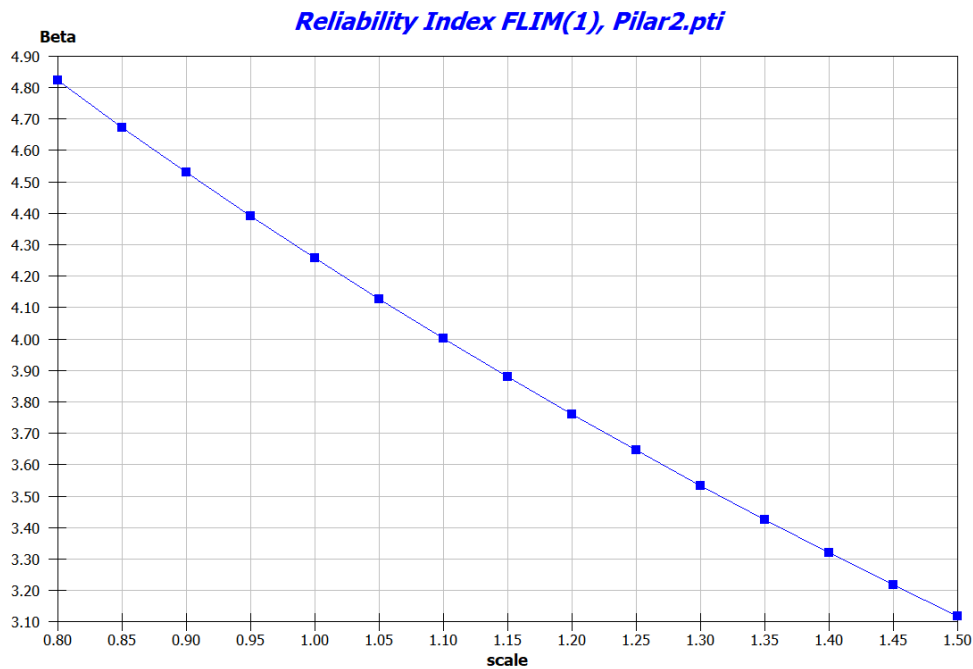
Usikker parameter	Base Case		Sensitivity Case	
	"Design Point"	Snittverdi	"Design Point"	Snittverdi
h: Vanddybde	3,34 m	3,10 m	3,18 m	3,10 m
ice: Islast	401 kN	251 kN	613 kN	275 kN
bolt: Boltekraft	267 kN	382,5 kN	314 kN	382,5 kN
Phi: Friksjonsvinkel betong-fjell	35,9°	50°	42,6°	45°

Figur B6 og B7 presenterer viktige resultater fra analysen. Figur B5 er en illustrasjon av hvilke parametre som er mest viktige i beregningen av bruddsannsynlighet. I dette tilfellet er islasten, med stor margin, den mest signifikante usikre parameteren i analysen.

Figur B6 viser hvordan pålitelighetsindeks varierer med størrelsen av islasten. Det er et entydig forhold mellom pålitelighetsindeks og bruddsannsynlighet.



Figur B6. Sensitivitetsfaktorer for hver usikker parameter i SORM analyser. Base Case, Pilar 2



Figur B7. Variasjon av årlig pålitelighetsindeks med islast (horisontalaksen gir en multipliserende faktor på islasten). Base Case, Pilar 2.

B3 Sikkerhet mot glidning og velting for Pilar 5

B3.1 Parametre

For Pilar 5 var sikkerhet mot glidning ($FS_{glidning}$) beregnet til 1,52 av Norconsult. Tabell B3 gir en oversikt over input verdier for Norconsults analyser.

For de probabilistiske analyser av Pilar 5, ble de samme antagelsene som for Pilar 2 brukt med følgende endringer:

- *Vandybde ved HRV* = $(715 - 708.7) = 6,3$ m (\Rightarrow WH1 = 992, WV = 794 (Tabell 3)).
- *Vandybde*: En uniform probabilistisk fordeling ble brukt, med minimum og maksimum verdier 5,3 og 6,3 m (dvs 1 m under HRV, og HRV)

NGI sjekket Norconsults deterministiske sikkerhetsfaktor med Norconsults parametre og fikk den samme verdi som Norconsult ($FS=1,52$). Med NGIs lavere snittverdien for friksjonsvinkelsnittverdi på 45 grader ("Sensitivity Case"), ble sikkerhetsfaktor beregnet til $FS=1,29$.

Tabell B3. Deterministisk vurdering av Pilar 5 (Norconsult, personlig kommunikasjon).

Forhold i damfot

Vinkel glideplan, α	0,0	grader	Friksjonsvinkel	50	grader
Kohesjon	0,0	N/mm ²			

Nesjen Sekundærdam 1 - Stabilitetskontroll			
Platedam			
Bruddkonsekvensklasse 2			
I henhold til "Sikkerhetshåndbok for vassdragsanlegg" samt tilhørende retningslinje for betongdammer.			
INNDATA			
Geometri (se vedlagte prinsippskisse)			
m =	0,80	n =	0,33
a =	0,00	b =	1,50
e =	0,30	f =	0,30
p =	0,030	q =	0,025
c =	0,50	d =	5,00
g =	1,50		
Høyder, vannstand og kontrollsnitt:			
Topp av pilar:	715,00	Høyeste regulerte vannstand, kote	715,00
Topp av brystning:	715,00	Dimensjonerende flom DFV, kote	716,79
Knekkpunkt:	713,00	Ulykkes flomsituasjon MFV, kote	716,50
Nye flomberegninger 2017			
Kontrollsnitt (kote):	708,70	Pilar 5	

B3.2 Resultater for Pilar 5

Resultatene for Pilar 5 med SORM beregningene med COMREL programvare kan oppsummeres som følger:

Årlig sannsynlighet eller pålitelighet	"Base Case"	"Sensitivity Case"
	500-års islast = 500 kN snitt friksjonsvinkel = 50°	10-års islast = 500 kN snitt friksjonsvinkel = 45°
Årlig bruddsannsynlighet (SORM), $P_{f\text{årlig}}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Årlig pålitelighetsindeks, $\beta_{\text{årlig}}$	4,21	3,54

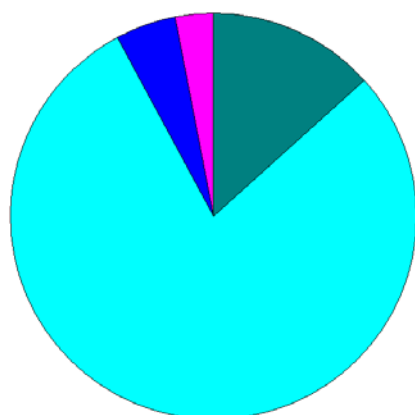
Tabell B4 gir en oversikt over resultater av SORM-analysen. I tabell B4 er koordinater (verdier av alle usikre parametre) gitt for tilfellet hvor det er mest sannsynlig med et brudd. Denne kombinasjonen av parametre i probabilistiske analysen er såkalt "design point".

Figur B8 og B9 presenterer to viktige resultater fra analysen. Figur B7 er en illustrasjon av hvilke parametre som er mest viktige i beregningen av bruddsannsynlighet. I dette tilfellet er islasten, med stor margin, den mest signifikante usikre parameteren i analysen.

Figur B8 viser hvordan pålitelighetsindeks varierer med størrelsen av islasten. Det er et entydig forhold mellom pålitelighetsindeks og bruddsannsynlighet.

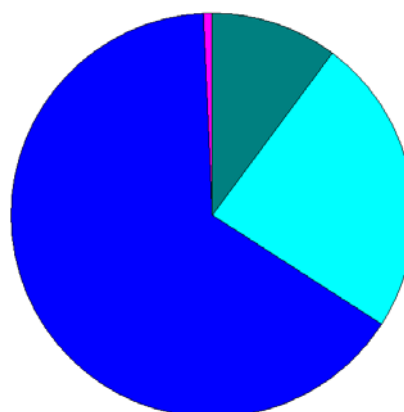
Tabell B4. Detaljerte resultater fra SORM analyser for Pilar 5 på "Design Point"

Usikker parameter	Base Case		Sensitivity Case	
	"Design Point"	Snittverdi	"Design Point"	Snittverdi
h: Vanddybde	6,07 m	5,80 m	5,92 m	5,80 m
ice: Islast	284 kN	251 kN	710 kN	275.00 kN
bolt: Boltekraft	265 kN	382.5 kN	296 kN	382.5 kN
Phi: Friksjonsvinkel betong-fjell	31,3°	50°	39,8°	45°



h	-0.18
ice	-0.22
Phi	0.89
bolt	0.37
Sum of a ² 1.00	

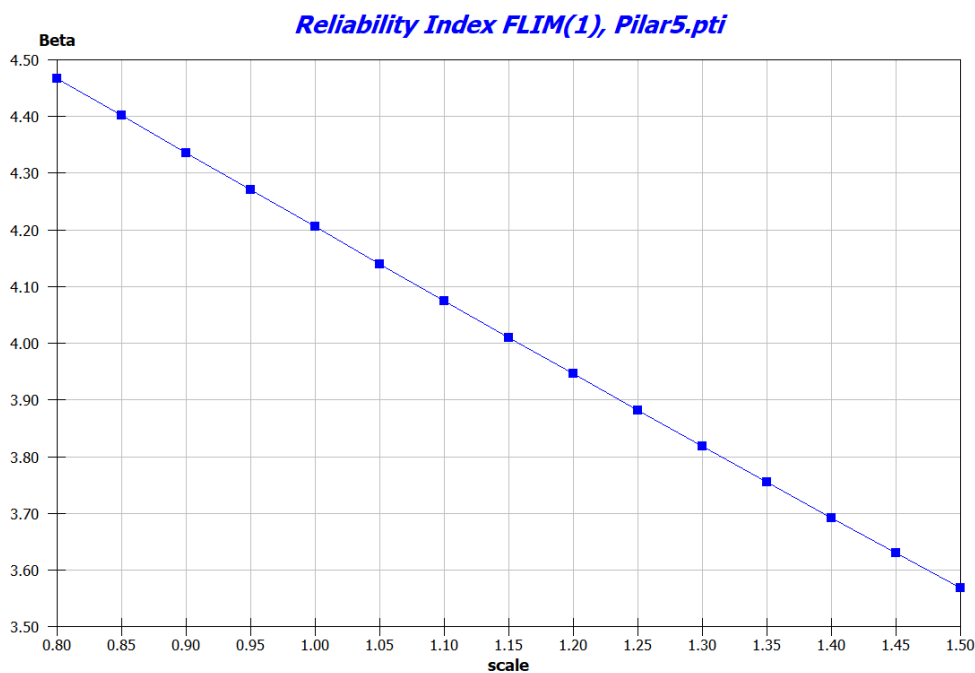
(a) Base Case



h	-0.09
ice	-0.81
Phi	0.49
bolt	0.32
Sum of a ² 1.00	

(b) Sensitivity Case

Figur B8. Sensitivitetsfaktorer for hver usikker parameter i SORM analyser, Pilar 5.



Figur B9 Variasjon av årlig pålitelighetsindeks med islast (horisontalaksen gir en multipliserende faktor på islasten), Base Case, Pilar5.

B4 Diskusjon

De deterministiske verdier benyttet av Norconsult (personlig kommunikasjon) ble anvendt som snittverdier unntatt for friksjonsvinkelen mellom betong og fjell. Norconsult brukte en friksjonsvinkel på 50 grader. NGI vurderte et beste estimat for friksjonsvinkel som 45 grader med et standard avvik på 3 grader (dvs at friksjonsvinkelen kan variere ca. mellom 36 og 54 grader, tilnærmet 3 standardavvik). Disse verdier er ansett som realistiske for friksjonsvinkel mellom betong og et ujevnt, godt fjell.

De to mest kritiske pilarene, Pilar 2 og Pilar 5, ble analysert. For en komplett analyse bør man gjøre en system analyse (med programvare SYSREL) for å beregne en bruddsannsynlighet for samtlige 15 pilarer.

Den beregnede årlige bruddsannsynlighet, P_f årlig, for hver av Pilar 2 og Pilar 5 er på ca 10^{-5} . Den årlig bruddsannsynligheten for hele pilarsystemet vil muligens øke til $P_f = 2 \cdot 10^{-5}$ /år når man tar hensyn til system effekter.

Det anbefales at Sira-Kvina prøver å bedre kvantifisere islasten, siden usikkerheten i islasten betyr så mye for bruddsannsynlighet. Dessuten bør friksjonsvinkelen mellom betong og fjell vurderes nærmere enn gjort i disse beregningene.

Referanser

Norconsult (2017)

Vurdering av friksjonsvinkel for Sekundærdam 1.

Teknisk Notat til Sira Kvina Kraftselskap, Oppdragsnr.: 5142319, 8. november 2017.

STRUREL (2017)

Structural reliability analysis software "COMREL". www.strurel.de

Vedlegg C

BEKSRIVELSE AV SANNSYNLIGHETER

Innhold

C1 Estimert av sannsynligheter

2

C1 Estimat av sannsynligheter

For analysene av Nesjendammene ble sannsynlighetene først estimert ved hjelp av Tabell 1. 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 1 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 1. Tallområdene foreslått av IPCC (2012) ble diskutert på workshop'en, og verdiene som deltagerne ble enige om, ble brukt videre i analysene.

Tabell 2 presenterer i samme format som Tabell 1 de omforente verdiene som ble brukt på workshop'en. Tallområdene i Tabell 2 kan brukes for Nesjendammene for å beregne nedre og øvre grense på sannsynlighetene med hendelsestre-metoden, og for å utføre Monte-Carlo simuleringene i forbindelse med Bayesianske nettverks-analysene.

Tabell C1. Estimat av sannsynligheter med enkeltverider for hendelsestreanalyse

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

Tabell C2. 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 D

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

Innhold

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

D1 Introduksjon

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

En sannsynlighetsverdi på 0,02/år ble brukt i hendelsestre-analysene i Vedlegg E. Estimaten er en øvre grense og baserer seg på to tilnærminger som ble gjort for Dam Nesjen.

D2 Årlig og 'absolutt' sannsynlighet

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

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

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

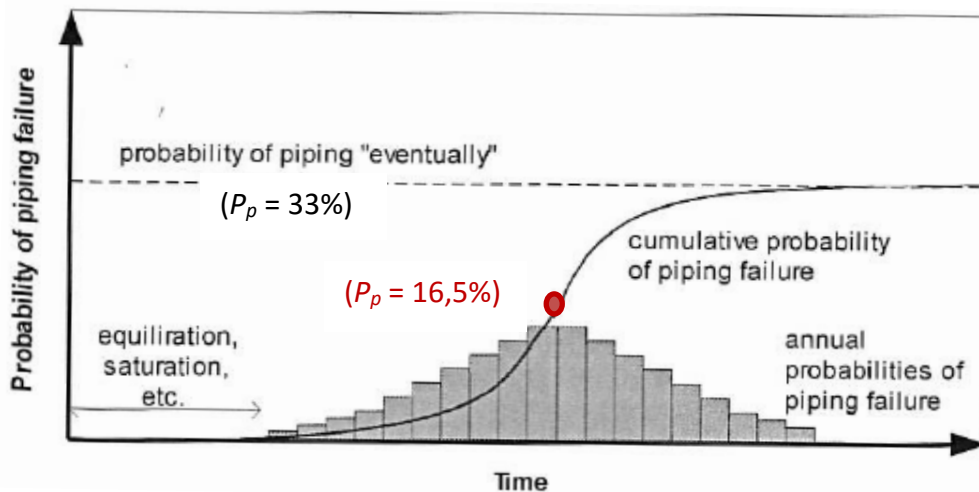
De årlige sannsynligheter (stolpediagram i Figur F1, eller stigningen (gradienten) på den kumulative kurven) endrer seg med tid. Den starter med null (tid lik 0), øker til en maksimum-verdi ved den mest sannsynlige tid for at brudd vil finne sted (med antagelse at det vil i det hele

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 ."

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 F1, er asymptoten, eksempelvis, gitt som en sannsynlighet for indre erosjon ved 'rørdannelse' P_p på 33 %. Slike konsepter er brukt for de to beregningene utført i Seksjon F3 nedenfor.



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

D3 Sannsynlighet for initiering av lekkasje, Dam Dravladalen

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

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

Hvis man antar 1180 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:

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

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

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

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

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

D3.2 Tilnærming 2 – statistikk for Folgefonnområdet

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

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

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

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

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

D3.3 Anbefalt verdi for hendelsetre-analyse

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

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

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

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

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

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

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

(tilnærmet sikkert). Selv ved å bruke kun 3 % som årlig sannsynlighet til initiering av en lokal lekkasje, er sannsynligheten for at lekkasje vil oppstå i løpet av en periode på 40 år på 70 %.

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

D4 Referanser

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

Vedlegg E

PROBABILISTISKE ANALYSER FOR NESJENDAMMENE

Innhold

E1	Hendelsestreanalyser	2
E1.1	Hendelsestrær for indre erosjon	3
E1.2	Hendelsestrær for flom	9
E1.3	Hendelsestre for jordskjelv	16
E1.4	Hendelsestre for erosjon i fundamentet	18
E2	Resultater fra hendelsestre-analysene	20
E2.1	Brudds sannsynlighet fra de enkelte hendelsestrær	20
E3	Domino-effekt av brudd ved Dam Roskrepp	20

E1 Hendelsestreanalyser

Det ble utført flere hendelsestre-analyser av Nesjendammene i workshopen 30. – 31. mai 2017. Vedlegg E gir detaljerte resultater i grafisk form for de fem mest sentrale hendelsestre-analysene. De viktigste diskusjonene og konklusjonene er oppsummert i hovedrapporten. Tabellen nedenfor gir en oversikt over de fem analysene. Hendelsestrærne finnes i Figur E1 til E8.

Oversikt over hendelsestre-analyser av Nesjendammene

Hendelse	Figur nr
Indre erosjon, før rehabilitering (iterasjon 1)	E1
Indre erosjon, før rehabilitering (iterasjon 2)	E2
Indre erosjon, etter rehabilitering	E3
Flom, før rehabilitering	E4
Flom, rehabilitering med heving av damkronen og av kjernen	E5
Flom, tiltak på overløpet	E6
Jordskjelv	E7
Lekkasje gjennom bergfundamentet og kjernen	E8

Metoden som ble brukt for analysene er beskrevet i hovedrapporten (Seksjon 3.1 og 3.2). For analysene ble tallverdiene i Tabell C1, tallområdeverdiene i Tabell C2 og de verbale beskrivelsene i de samme tabellene brukt for å velge sannsynlighetene for hendelsene. (Begge tabellene finnes i Vedlegg C).

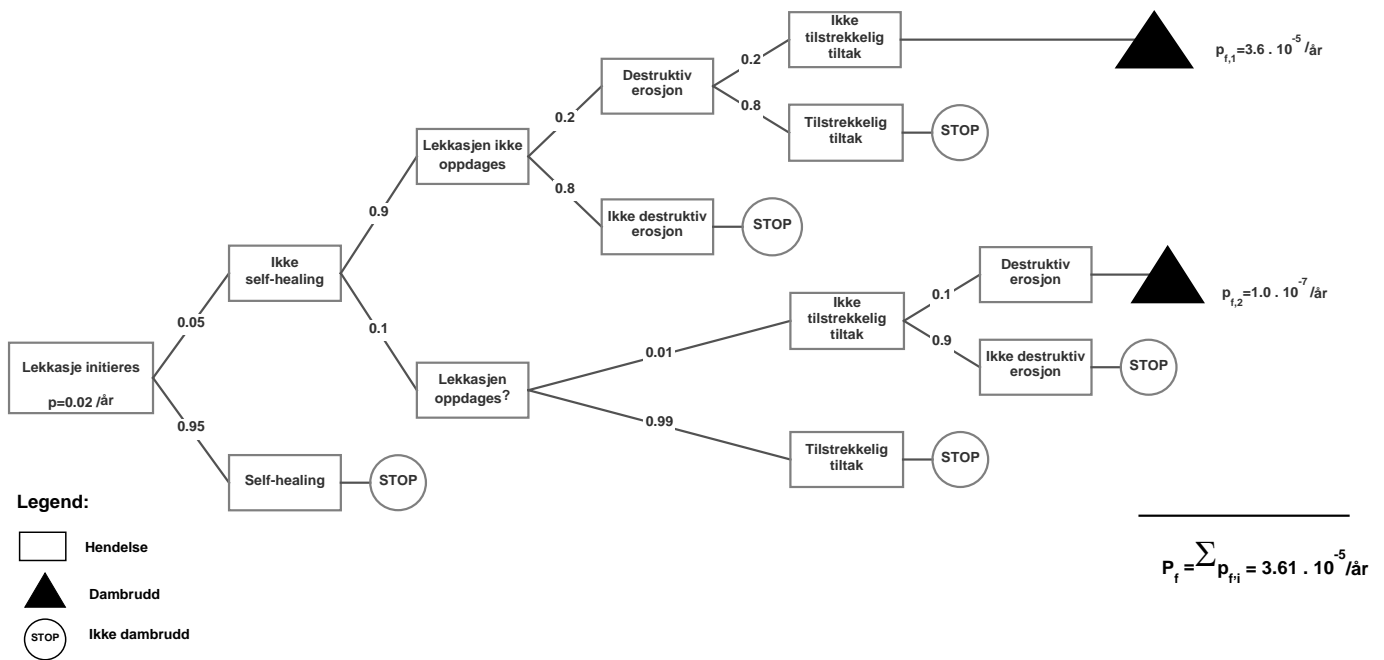
Hendelsestrærne i Figur E1 til E8 viser hver hendelse og sannsynlighetstallene for hvert tilfelle. Sannsynlighetene ble bestemt under workshopen. Hvert hendelsestre bruker følgende struktur/semantikk:

- Bruddsannsynlighet for en gren er produktet av sannsynlighetene for samtlige uavhengige hendelser langs en gren.
- Tabellen ovenfor trærne viser stegene i analysen. Hvert steg er tildelt en bokstav som tilsvarer til teksten i forklaringstabellen vedlagt til hvert trø. Teksten begrunner valgene av sannsynlighetene i den tilhørende forgrening i hendelsestreet.
- Hendelseskjeder som resulterer i dambrudd er markert med svart trekant ▲, mens øvrige hendelseskjeder som ikke resulterer i dambrudd er markert med åpen sirkel med ordet STOP.
- Den totale bruddsannsynligheten knyttet til hver utløsningsmekanisme (hvert hendelsestre) er summen av sannsynlighetene for hver gren som resultater i dambrudd.

I alle analyser er den årlige bruddsannsynligheten beregnet. Den totale bruddsannsynligheten for Nesjendammene er summen av sannsynlighetene for brudd fra alle hendelsene som er plausible for dammen, og for alle bruddmekanismer og –årsak.

E1.1 Hendelsestrær for indre erosjon

Lekkasje initieres?	Self-healing?	Oppdages lekkasjen?	Destruktiv erosjon?	Tilstrekkelige tiltak?	Destruktiv erosjon?	Dambrudd?
A	B	C	D	E	F	G



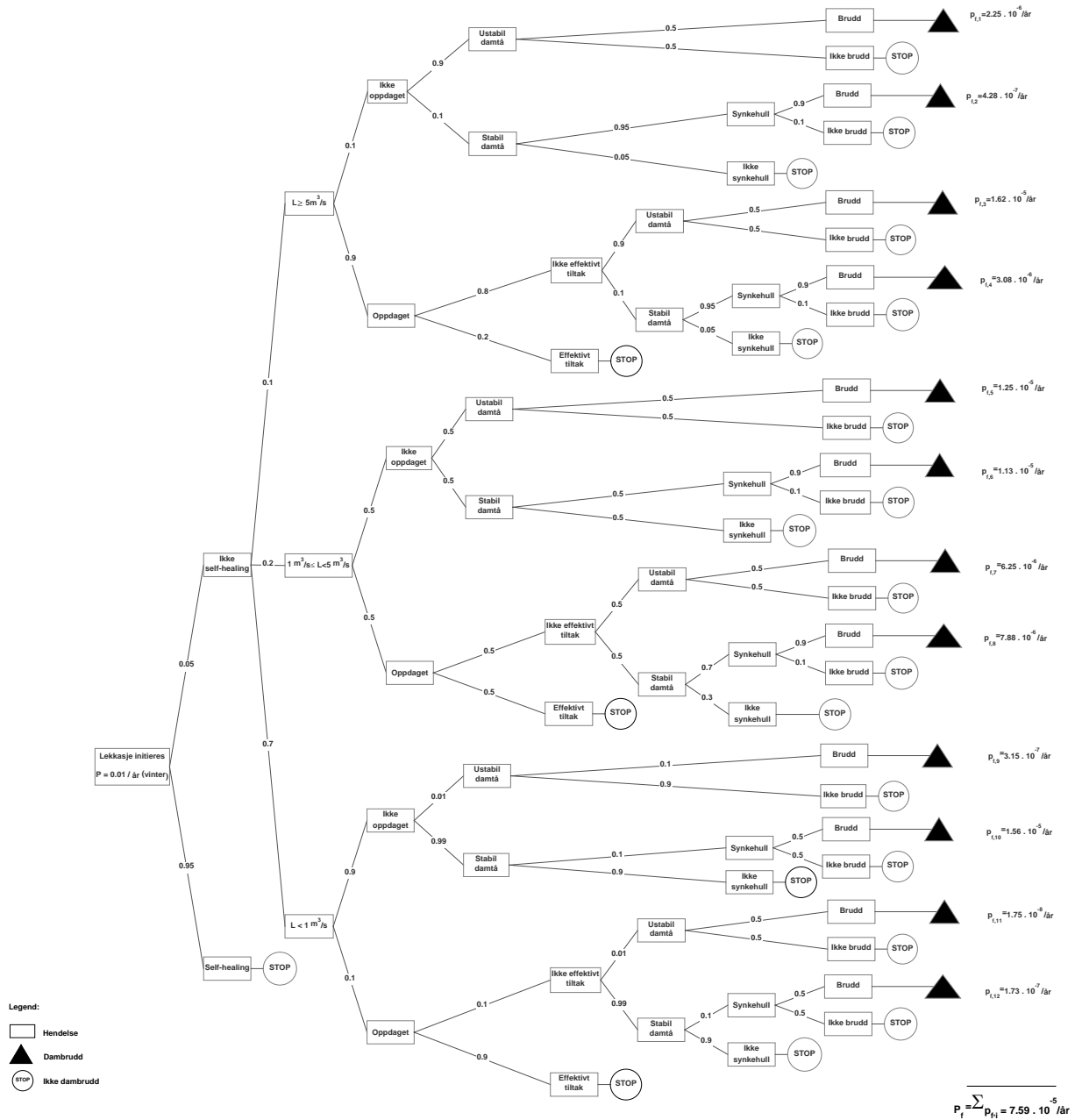
Figur E1. Hendelsestre for indre erosjon før rehabilitering (iterasjon 1).

Tabell E1. Forklaring for sannsynligheene i hendelsestre-for indre erosjon før rehabilitering (It. 1).

A Lekkasje initieres?	B Self healing?	C Oppdages lekkasjen?	D Destruktiv erosjon?	E Effektivt tiltak?
			E Effektivt tiltak?	F Destruktiv erosjon?
Gjennomsnitt norske dammer P=0,02/år (Ingen grunn til hverken bedre eller dårligere enn gjennomsnittet)	Dammene er bygget for å hele seg selv P[0.05; 0.95]	Størst sannsynlighet for å ikke oppdage pga. manglende lekkasjemålingssystem P[0.9; 0.1]	Destruktiv erosjon omfatter her både synkehull og ustabil tå. Litt vanskelig å sette sannsynligheter, da vannivå ikke er spesifisert. Steinfyllingen tåler store mengder vann. P[0.2; 0.8]	Oppdages på et sent stadium: P[0.2; 0.8]
			Mange mulig tiltak, f.eks. Nedtapping; kraftstasjon, initiere brudd i sekundærdammer, Tidlig oppdagelse. P[0.01; 0.99]	Lavere sannsynlighet her, siden vannmengdene er mindre (tiltak er iverksatt) P[0.1; 0.9]

Indre Erosjon - Vinter

Lekkasje initieres?	Self-healing?	Størrelsen på lekkasje?	Oppdages lekkasje?	Ustabil damtå?	Effektivt tiltak?	Ustabil damtå?	Synke-hull?	Dambrudd?
A	B	C	D	E	F	G	H	I



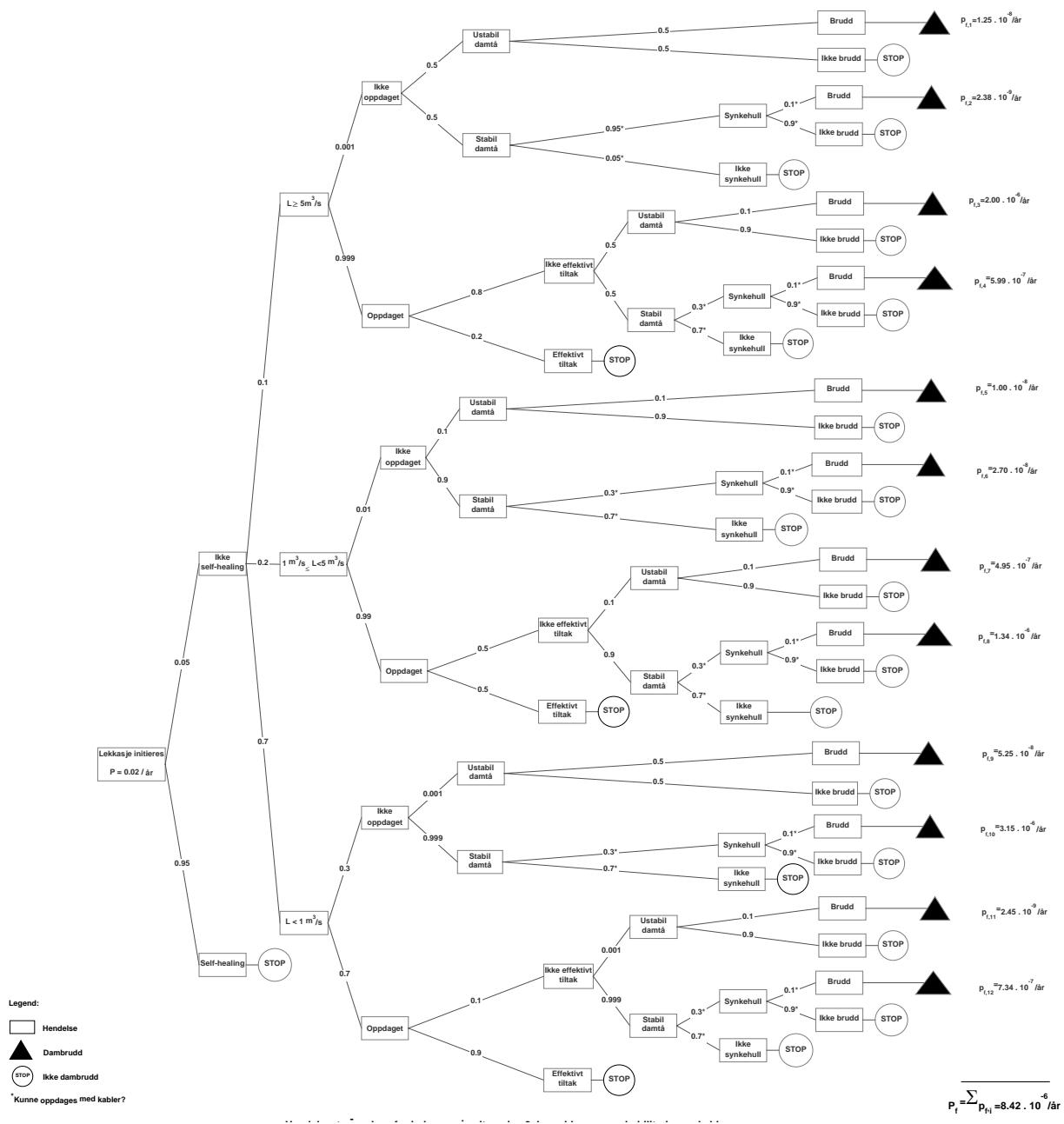
Figur E2. Hendelsestre for indre erosjon før rehabilitering (It. 2).

Tabell E2: Forklaring for sannsynlighetene i hendelsestre for indre erosjon før rehabilitering (It. 2)

A Lekkasje initieres?	B Self-healing?	C Størrelse på lekkasje?	D Oppdaget?	E Ustabilitet i damtå?	F Dambrudd?	G Dambrudd?
<p>Tall basert på statistikk for norske dammer. Nesjen har ikke kontinuerlige lekkasjemålinger som kunne indikere om Nesjen var bedre enn gjennomsnittet.</p> <p>P= 0.02/år</p>	<p>Filteret er laget for self-healing, men kan få separasjon som skaper svakhet gjennom filteret.</p> <p>P[0.05; 0.95]</p>	<p>Konsekutive tall. Ikke observert lekkasjer av de største dimensjonene i Norge</p> <p>P[0.1;0.2;0.7]</p>	<p>Jo større volum og varighet, desto større sannsynlighet for at det blir oppdaget</p> <p>P[0.1; 0.9] P[0.5; 0.5] P[0.9; 0.1]</p>	<p><i>Fra Oppdaget: Effektivt tiltak?</i> Sannsynlig for de største vannlekkasje mengdene, mindre sannsynlig for mindre vannmengder</p> <p>P[0.9; 0.1] P[0.5; 0.5] P[0.01; 0.99]</p> <p><i>Fra Oppdaget: Kun nedtapping er aktuelt tiltak om vinteren.</i></p> <p>P[0.8; 0.2] P[0.5; 0.5] P[0.1; 0.9]</p>	<p><i>Fra Synkehull?</i> Sannsynlighet for dambrudd ved ustabil damtå; samme for alle vannvolumer:</p> <p>P[0.5; 0.5] P[0.5; 0.5] P[0.5; 0.5]</p> <p><i>Fra stabil damtå: Synkehull: Større sannsynlighet for synkehull enn ustabil damtå. Lavere sannsynlighet for synkehull ved lavere vannlekkasjemen mengder.</i></p> <p>P[0.95; 0.05] P[0.7; 0.3] P[0.5; 0.5]</p>	<p>Dambrudd som følge av synkehull:</p> <p>P[0.9; 0.1] P[0.9; 0.1] P[0.9; 0.1]</p>

Indre Erosjon - Vinter

Lekkasje initieres?	Self-healing?	Størrelsen på lekkasje?	Oppdages lekkasje?	Ustabil damtå?	Effektivt tiltak?	Ustabil damtå?	Synke-hull?	Dambrudd?
A	B	C	D	E	F	G	H	I



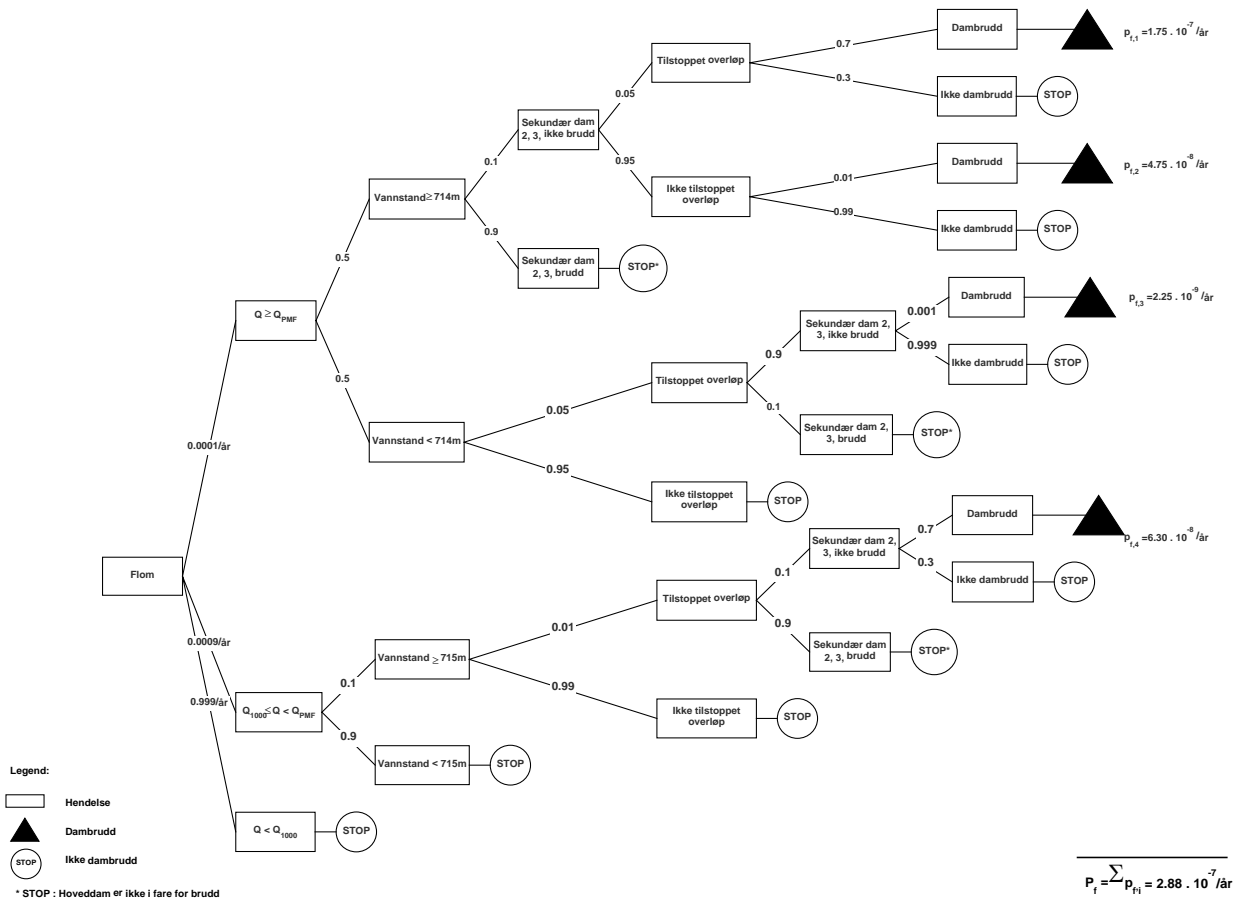
Figur E3. Hendelsestree for indre erosjon etter rehabilitering (Automatisk lekkasjemålesystem, kabler og forsterket damtå)

Tabell E1. Forklaring for sannsynlighetene i hendelsestre Indre erosjon etter rehabilitering (Automatisk lekkasjemålesystem, kabler og forsterket damtå)

A Lekkasje initieres?	B Self-healing?	C Størrelse på lekkasje?	D Oppdaget?	E Ustabilitet i damtå?	I Dambrudd?	I Dambrudd?
<p>Tall basert på statistikk for norske dammer. Nesjen har ikke kontinuerlige lekkasjemålinger som kunne indikere om Nesjen var bedre enn gjennomsnittet.</p> <p>P= 0.02/år</p>	<p>Filteret er laget for self-healing, men kan få separasjon som skaper svakhet gjennom filteret.</p> <p>[0.05;0.95]</p>	<p>Konsevative tall. Ikke observert lekkasjer av de største dimensjonene i Norge.</p> <p>P[0.1; 0.2;0.7]</p>	<p>Jo større volum og varighet, desto større sannsynlighet for at det blir oppdaget. Automatisk lekkasjemålingssystem gir store sannsynligheter for at det oppdages</p> <p>P[0.001; 0.999] P[0.01; 0.99] P[0.3; 0.7]</p>	<p>F Fra Oppdaget: Effektivt tiltak? Sannsynlig for de største vannlekkasje mengdene, mindre sannsynlig for mindre vannmengder P[0.9; 0.1] P[0.5; 0.5] P[0.01; 0.99] Lavere sannsynligheter enn før rehabilitering, siden tåa er forsterket</p>	<p>H Synkehull? Sannsynlighet for dambrudd ved ustabil damtå; avhengig av vannvolumer: P[0.5; 0.5] P[0.1; 0.9] P[0.1; 0.9]</p>	<p>Dambrudd som følge av synkehull: P[0.9; 0.1] P[0.9; 0.1] P[0.9; 0.1]</p> <p>Lavere sannsynlighet for dambrudd som følge av synkehull ved bruk av kabler (tidlig oppdagelse).</p>
				<p>Fra Oppdaget: Kun nedtapping er aktuelt tiltak om vinteren. P[0.8; 0.2] P[0.5; 0.5] P[0.1; 0.9] Tidlig oppdagelse gir økt sannsynlighet for effektivitet av tiltak. (Her er samme sannsynligheter som 'før rehabilitering' beholdt)</p>	<p>G Fra stabil damtå: Synkehull: Større sannsynlighet for synkehull enn ustabil damtå.. Lavere sannsynlighet for synkehull ved lavere vannlekkasjemengder. P[0.95; 0.05] P[0.7; 0.3] P[0.5; 0.5]</p>	

E1.2 Hendelsetrær for flom

Flom (brudd i hoveddam)	Floms størrelse?	Vannstand?	Brudd i Sek. Dam 2 og 3?	Tilstopping av overløp?	Brudd i Sek. Dam 2 og 3?	Dambrudd?
A	B	C	D	E	F	G

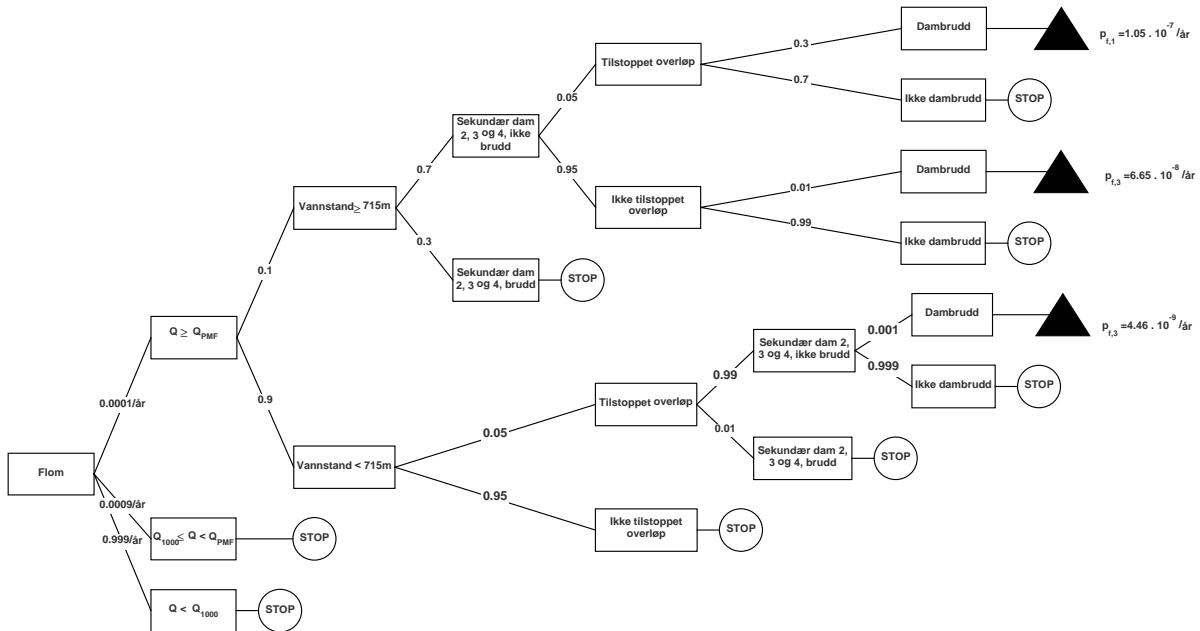


Figur E4. Hendelsetre for flomhendelser før rehabilitering.

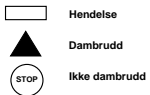
Tabell E2. Forklaring for sannsynligheter hendelsestre for flom før rehabilitering.

HENDELSE FLOM	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
B Flommens størrelse	Valg av grenser: Dimensjonert for Q_{1000} . Q_{1000} går ikke over kjernen selv med HRV. Øvre gren representerer omtrent Q_{PMF} . Brudd i Dam Roskrepp tas i eget analyse, denne ville være minst 5 PMF.	$P[0.0001;0.0009;0.999]$
C Vannstand	Øvre: Større eller mindre enn 714? Hvis vannivå er lavere enn 714 skjer ingen overtopping, selv med PMF. PMF skjer normalt om høsten. 50% av tiden er vannstanden lavere enn 714. (Mer nøyaktig tall kan finnes ved gjennomgang av dokumentasjon. Nedre, for: $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$: Må ha vannstand på HRV for å være relevant. Derfor vannstand større eller mindre enn HRV, dvs 715.	$P[0.5; 0.5]$ $P[0. 1; 0.9]$
D Brudd i sekundærdam?	Dette er store nok vannmengder over kjernen i Sekundærdam 4 (og nesten for 3), til å vaske ut tåa, jmf. beregninger fra Norconsult. Sannsynlighetene reflekterer usikkerhet i beregningene. Hopper over steget for: $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$, pga neglisjerbar sannsynlighet.	$P[0.9; 0.1]$
E Tilstopping av overløp?	Kun torv som kan stoppe til; få og lave trær i området. Må ha minst 50% tilstopping i øvre gren, mer i nedre. Kritisk magasinnivå 718,2 for Hoveddam Øvre: $P[0.05;0.95]$ Nedre: $P[0.01;0.99]$	$P[0.05; 0.95]$ $P[0.05; 0.95]$ $P[0.01; 0.99]$
F Brudd i sekundærdam? (som følge av tilstoppet overløp)	For vannstand lavere enn 714; må mye tilstopping til for at det skal gå til brudd i sekundærdam. PFor: $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$ og vannstand > 715 : $P[0.9; 0.1]$.	$P[0.1; 0.9]$ $P[0.9; 0.1]$
G Dambrudd?	Øvre $Q > Q_{PMF}$: G1, vannstand > 714 : Store mengder vann kan gå gjennom steinen som ligger på toppen av dammen. Ekspertvurdering, Diskusjon verdier mellom $[0.5;0.5]$ og $[0.9;0.1]$. Siden disse er i samme størrelsesorden endte vi på: $P[0.7; 0.3]$ G2; vannstand ≥ 714 , Ikke brudd i sekundærdam; Ikke tilstoppet overløp; $P[0.01; 0.99]$ G3; vannstand < 714 Svært usannsynlig med dambrudd i hoveddammen når det ikke gikk til brudd i Sekundærdam 3 eller 4 $P[0.001; 0.999]$ Nedre $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$: G4, P for brudd i hoveddam: 0.7 (som over): $P[0.7; 0.3]$	$P[0.7; 0.3]$ $P[0.01; 0.99]$ $P[0.001 ;0.999]$ $P[0.7; 0.3]$
Bruddsannsynligheter	Årlige sannsynligheter for de hendelseskjedene som leder til brudd:: $1.8 \cdot 10^{-7}$; $4.8 \cdot 10^{-8}$; $2.3 \cdot 10^{-9}$; $6.3 \cdot 10^{-8}$.	$P_f = 2.9 \cdot 10^{-7}$ per år

Flom (brudd i hoveddam)	Floms størrelse?	Vannstand?	Brudd i Sek. Dam 2, 3 og 4?	Tilstopping av overløp?	Brudd i Sek. Dam 2, 3 og 4?	Dambrudd?
A	B	C	D	E	F	G



Legend:



$$P_t = \sum p_{t,i} = 1.76 \cdot 10^{-7} / \text{år}$$

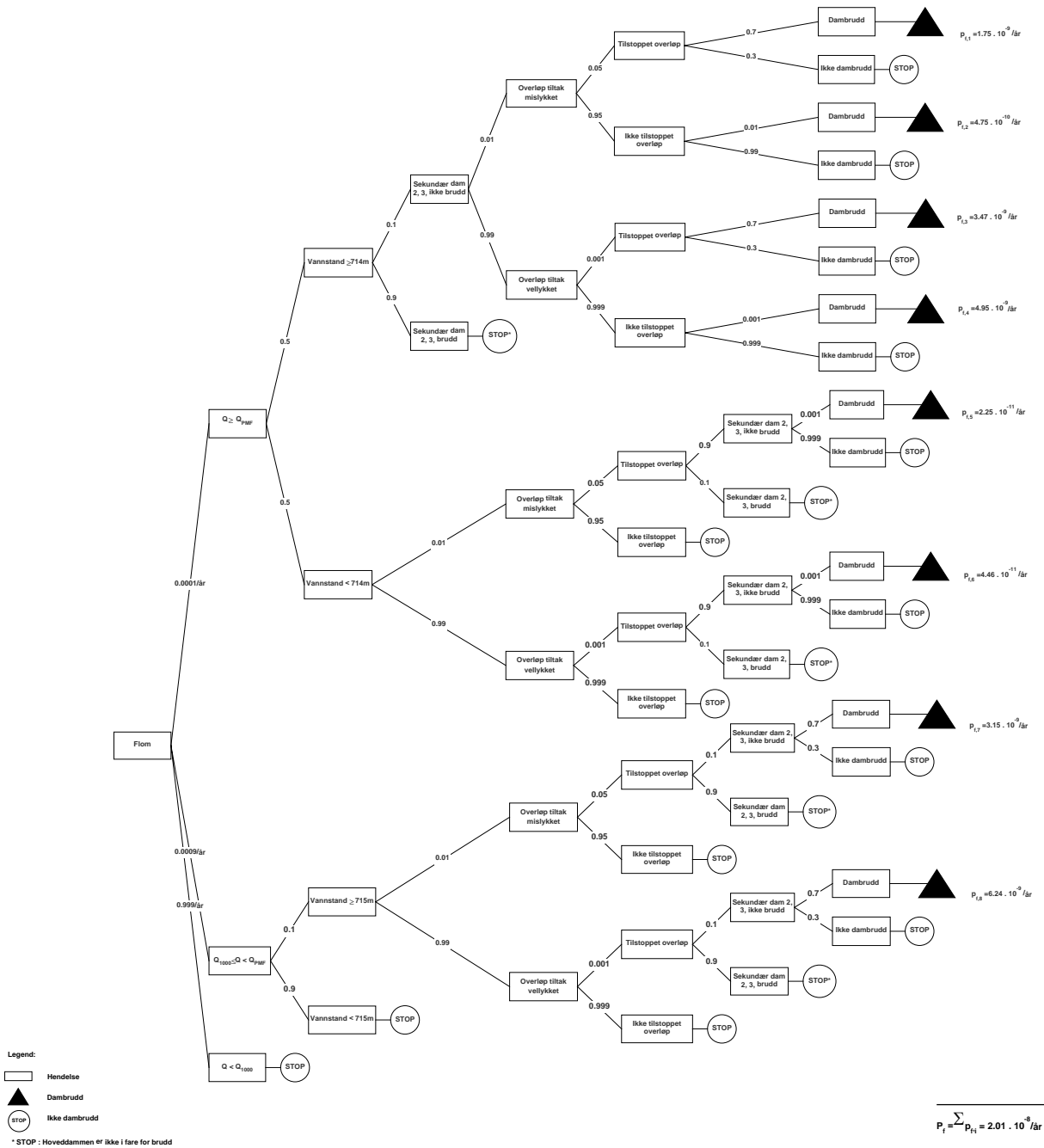
Figur E5. Hendelsestre for flom etter heving av kjerner og damkroner i fyllingsdammene.

Tabell E3. Forklaring for sannsynlighetene i hendelsestre for flomhendelser etter heving av kjerner og damkroner i fyllingsdammene (sannsynlighetene angis med det mest kritiske først)

HENDELSE FLOM	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
B Flommens størrelse	Valg av grenser: Dimensjonert for Q_{1000} . Q_{1000} går ikke over kjernen selv med HRV. Øvre gren representerer omtrent Q_{PMF} . Brudd i Dam Roskrepp tas i eget analyse, denne ville være minst 5 PMF.	$P[0.0001; 0.0009; 0.999]$
C Vannstand	Kjernen heves i rehabiliteringen, vannstand endres til HRV, dvs. 715. Større eller mindre enn 715? Hvis vannivå er lavere enn 715, ingen overtopping selv med PMF. PMF skjer om høsten. 90% av tiden er vannstanden lavere enn 715. (Mer nøyaktig tall kan finnes ved gjennomgang av dokumentasjon). For: $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$: Må ha vannstand høyere enn HRV for å være en bruddmekanisme. Derfor stoppes grenen.	$P[0.1; 0.9]$
D Brudd i sekundærdam?	Øvre: Sekundærdam 4 settes som den svakeste, da den har laveste konsekvenser ved brudd. Lavere sannsynlighet enn før rehabilitering.	$P[0.3; 0.7]$
E Tilstopping av overløp?	Kun torv som kan stoppe til; få og lave trær i området. Kritisk magasinnivå 719,2 for Hoveddam etter rehabilitering. Benytter samme sannsynligheter som før rehabilitering, men disse kan forbedres med tiltak.	$P[0.05; 0.95]$ $P[0.05; 0.95]$
F Brudd i sekundærdam? (tilstoppet overløp)	Lavere sannsynlighet for brudd i sekundærdammene her enn i D, siden vi følger grenen med vannstand lavere enn 715; må mye tilstopping til. Lavere sannsynligheter etter rehabilitering. $P[0.01; 0.99]$, $P(\text{brudd i sekundærdam}) = 0.01$.	$P[0.01; 0.99]$.
G Dambrudd?	Stor mengde vann kan gå gjennom steinen som ligger på toppen av dammen, damtå forsterkes i rehabiliteringen. Lavere sannsynligheter enn før rehabilitering, siden damtå er forsterket: $P[0.3; 0.7]$ Ikke brudd i sekundærdam; Ikke tilstoppet overløp; $P[0.01; 0.99]^*$ Svært usannsynlig med dambrudd i hoveddammen når det ikke gikk til brudd i Sekundærdam 3 eller 4 $P[0.001; 0.999]^*$	$P[0.3; 0.7]$ $P[0.01; 0.99]$ $P[0.001; 0.999]$
Brudd-sannsynlighet	Årlig sannsynlighet for hendelseskjedene som leder til brudd: $1.05 \cdot 10^{-7}$; $6.7 \cdot 10^{-8}$; og $4.5 \cdot 10^{-9}$.	$P_r = 1.8 \cdot 10^{-7}$ per år

* Her ble samme sannsynligheter som før rehabilitering benyttet, siden de var lave i utgangspunktet. Kunne vært justert ned en størrelsesorden.

Flom (brudd i hoveddam)	Floms størrelse?	Vannstand?	Brudd i Sek. Dam 2 og 3?	Overløp tiltak lykkes?	Tilstopping av overløp?	Brudd i Sek. Dam 2 og 3?	Dambrudd?
A	B	C	D	E	F	G	H



Figur E6. Hendelsestre for flomhendelser etter tiltak på overløpet

Tabell E4. Forklaring for sannsynlighet for grenene i hendelsestre for flom og tiltak på overløpet.

HENDELSE FLOM	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
B Flommens størrelse	Valg av grenser: Dimensjonert for Q_{1000} . Q_{1000} går ikke over kjernen selv med HRV. Øvre gren representerer omtrent Q_{PMF} . Brudd i Dam Roskrepp tas i eget analyse, denne ville være minst 5 PMF.	P[0.0001;0.0009;0.999]
C Vannstand	<i>Øvre</i> : Større eller mindre enn 714? Hvis vannivå er lavere enn 714 skjer det ingen overtopping, selv med PMF. PMF skjer normalt om høsten. 50% av tiden er vannstanden lavere enn 714. (Mer nøyaktig tall kan finnes ved gjennomgang av dokumentasjon) Usikkert. <i>Nedre</i> , for: $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$: Må ha vannstand på HRV for å være relevant. Derfor vannstand større eller mindre enn HRV, dvs 715.	P[0.5; 0.5] P[0.1; 0.9]
D Brudd i sekundærdam?	<i>Øvre</i> : Dette er store nok vannmengder over kjernen i Sekundærdam 4 (og nesten for 3), til å vaske ut tåa, jmf. beregninger fra Norconsult. Sannsynligheter reflekterer usikkerhet i beregningene. <i>Nedre</i> : Hopper over dette steget for: $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$, det er neglisjerbar sannsynlighet.	P[0.9; 0.1]
E Vellykket overløpstiltak?	Svært sannsynlig at tiltaket er vellykket	P[0.01;0.99]
F Tilstopping av overløp?	Vellykket tiltak: nesten helt sikkert at overløpet ikke er tilstoppet, P[0.001; 0.999] Mislykket tiltak på overløpet: Kun torv som kan stoppe til; få og lave trær i området. Må ha ca. H50% tilstopping i øvre grener, mer i nedre. Kritisk magasinnivå 718,2 for hoveddam: <i>Øvre</i> : P[0.05;0.95]	P[0.05; 0.95] P[0.001; 0.999] P[0.05; 0.95] P[0.001; 0.999] P[0.05; 0.95] P[0.001; 0.999]
G Brudd i sekundærdam? (som følge av tilstoppet overløp)	<i>For vannstand lavere enn 714</i> : må mye tilstopping til for at det skal gå brudd i sekundærdam. P[0.1;0.9]; P[0.1;0.9] <i>For: $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$ og vannstand >715</i> : P[0.9; 0.1]; P[0.9; 0.1]	P[0.1; .9]; P[0.1; 0.9]. P[0.9; 0.1]; P[0.9; 0.1]
H Dambrudd?	<i>Øvre $Q \geq Q_{PMF}$</i> : <u>G1 og G3, vannstand ≥ 714</u> , tilstoppet overløp: Store mengder vann kan gå gjennom steinen som ligger på toppen av dammen. Ekspertvurdering, diskusjon mellom [0.5;0.5] eller [0.9;0.1]? Siden disse er i samme størrelsesorden endte vi på: P[0.7;0.3]. <u>G2 og G4; vannstand ≥ 714</u> , Ikke brudd i sekundærdam; Ikke tilstoppet overløp; P[0.01;0.99]. <u>G5 og G6; vannstand < 714</u> Svært usannsynlig med dambrudd i hoveddammen når det ikke gikk til brudd i Sekundærdam 3 eller 4 P[0.001; 0.999] <i>Nedre $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$</i> , <u>vannstand ≥ 715</u> , tilstoppet overløp <u>G7 og G8</u> , bruddsannsynlighet i hoveddam: 0.7 (som over) P[0.7; 0.3]	G1: P[0.7; 0.3] G2: P[0.01; 0.99] G3: P[0.7; 0.3] G4: P[0.01; 0.99] G5: P[0.001;0.999] G6: P[0.001;0.999] G7: P[0.7;0.3] G8: P[0.7;0.3]

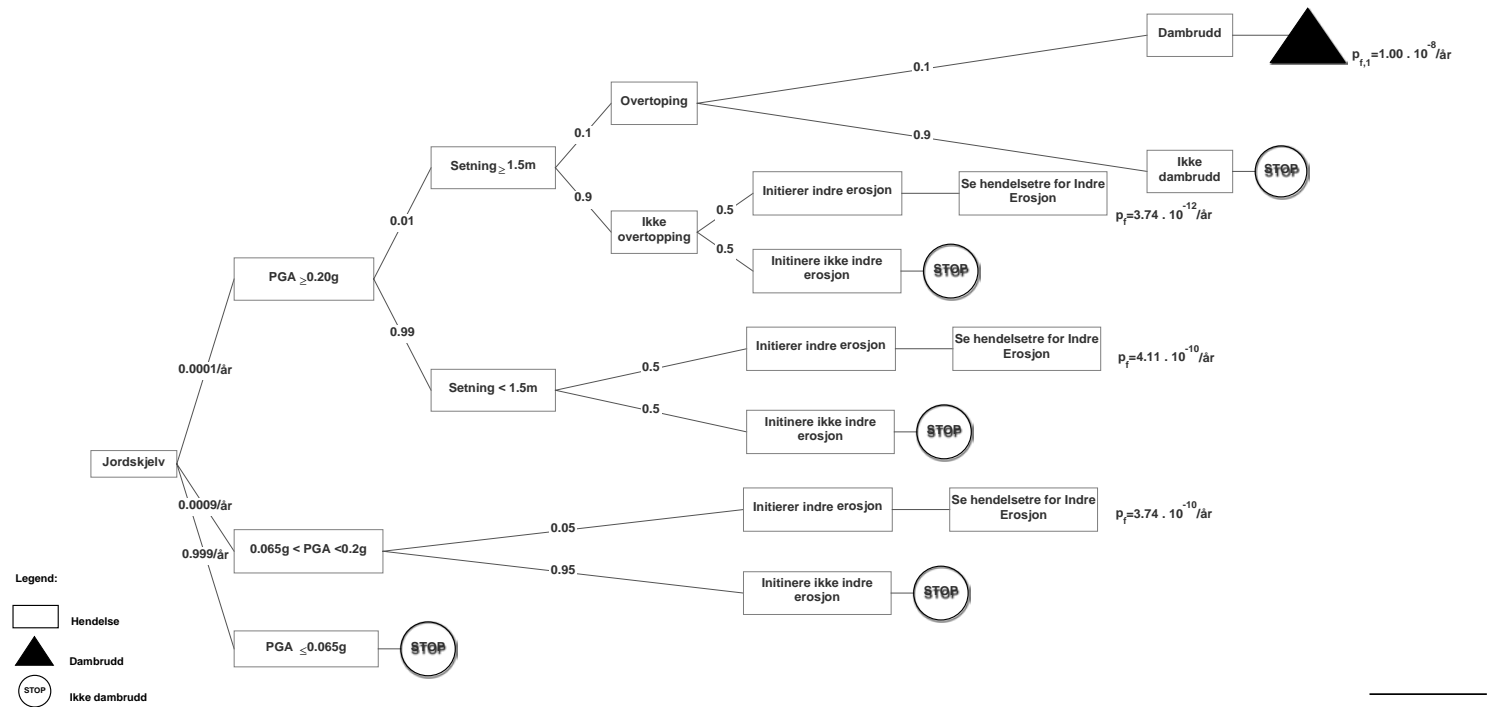
E1.2.1 Analyse av skadet dam utsatt for flom

Denne analysen følger stegene i hendelsestreet i Figur E4: Størrelse på flom ($Q \geq Q_{PMF}$; $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$; $Q \leq Q_{1000}$); Vannstand (Større eller mindre enn 714, evt. 715 for midtre gren), brudd i sekundærdam 2, 3 og/eller 4 (ja eller nei); tilstopping av overløp (ja eller nei); dambrudd (ja eller nei). Samtlige sannsynligheter blir som i Tabell E4, bortsett fra sannsynlighetene for dambrudd, som blir høyere, siden dammen er skadet.

HENDELSE FLOM	FORKLARING	SANNSYNLIGHET
B Flommens størrelse	Definert utfra returperiode	P[0.0001;0.0009;0.999]
C Vannstand	<i>Øvre:</i> Større eller mindre enn 714? Vet ikke! P[0.5; 0.5] <i>Nedre:</i> For: $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$: Må ha vannstand på HRV for å være relevant for dambrudd. Derfor, bruker man Vannstand større eller mindre enn HRV, dvs 715 ? P[0.1; 0.9]	P[0.5; 0.5] P[0. 1; 0.9]
D Brudd i sekundærdam?	Basert på beregninger fra Norconsult. Det er usikkerhet i beregningene: P[0.9; 0.1] Hopper over dette steget for: $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$, fordi det er neglisjerbar sannsynlighet.	P[0.9; 0.1]
E Tilstopping av overløp?	Kun torv som kan stoppe til; få og lave trær i området. Må ha ca 50% tilstopping i øvre gren for å by på problemer, enda mer tilstopping i nedre gren. Øvre: P[0.05; 0.95] Nedre: P[0.01; 0.99]	P[0.05;0.95] P[0.01;0.99]
F Brudd i sekundærdam? (tilstoppet overløp)	For vannstand lavere enn 714; må mye tilstopping til for at det skal gå til brudd i sekundærdammene: P[0.1; 0.9]. For: $Q_{1000} < Q < Q_{PMF}$ og vannstand >715, P[0.9; 0.1]	---
G Dambrudd?	Sannsynlighetene blir høyere her enn i Figur E4, siden vi ser på en skadet dam. Avhenger av omfang av skaden. Alle sannsynligheter i Figur E4 økes med en størrelsesorden.	P[0.99; 0.01] P[0.1; 0.9] P[0.01;0.99] P[0.99;0.01]
Brudd-sannsynlighet	Årlige sannsynligheter for de hendelseskjedene som leder til brudd blir da: $2.5 \cdot 10^{-7}$; $4.8 \cdot 10^{-7}$; $2.3 \cdot 10^{-8}$; og $8.9 \cdot 10^{-8}$	$P_f = 8.3 \cdot 10^{-7} / \text{år}$ som må multipliseres med sannsynligheten for at dammen er skadet

E1.3 Hendelsestre for jordskjelv

Jordskjelv	PGA (Peak Ground Acceleration) ?	Setning av kjernen?	Vannstand som gir overtopping?	Initieres indre erosjon pga jordskjelv?	Hendelsestre-analyse for indre erosjon	Dambrudd?
A	B	C	D	E	F	G



Figur E7. Hendelsestre for jordskjelv, Nesjen Hoveddam

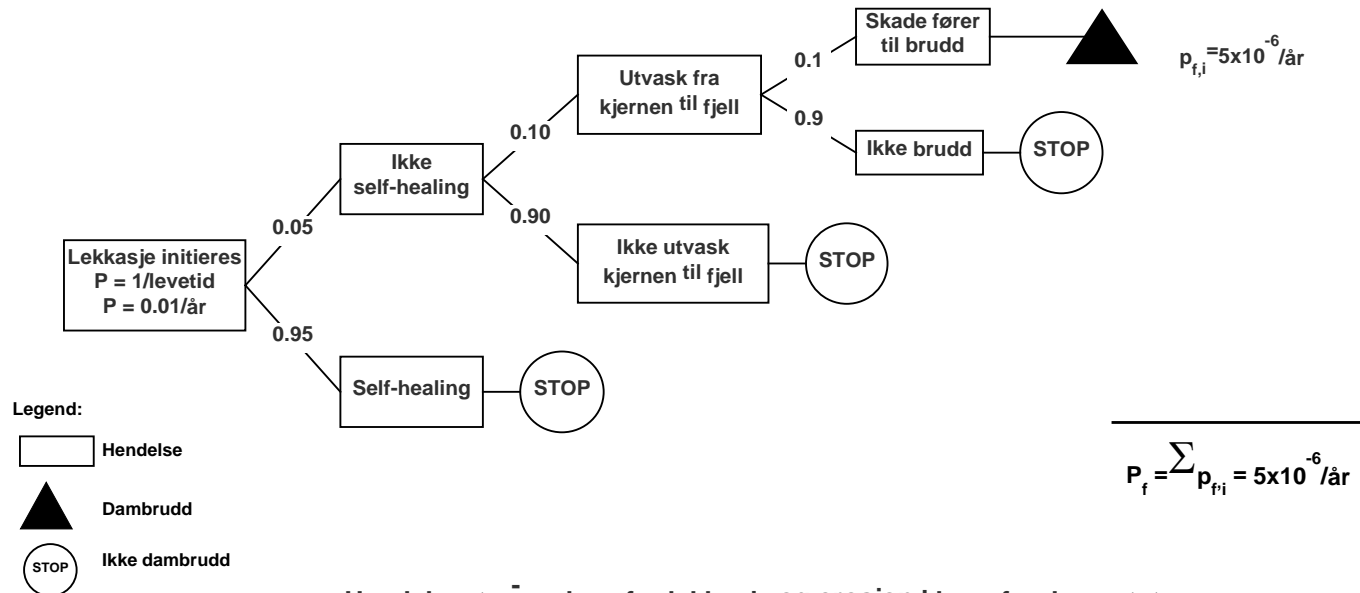
$$P_f = \sum p_{pi} = 1.00 \cdot 10^{-8} / \text{år}$$

Tabell E5. Forklaring for sannsynlighetene i grenene i hendelsestre-analysen for jordskjelv.

	B PGA?	C Setning av kjerne?	D Vannstand som gir overtopping?	E Initieres indre erosjon pga jordskjelv?	F Hendelsestre- analyse for indre erosjon	G Dambrudd?
A Jord- skjelv	<p>PGA = 0,2g tilsvarer et 10.000-års jordskjelv.</p> <p>PGA = 0,065g svarer til 1.000-års jordskjelv.</p>	<p>Avstand mellom HRV og topp kjerne er 1,5m. Erfaringene (flere dammer i USA) viser at setningen kan være en maksimum 0,4% av damhøyden, eller 0,2m for Nesjenhoveddammen (og enda mindre for sekundære dammene, men de har også mindre fribord). Sannsynlighet for at setninger overskrider 1,5m ble vurdert som meget usannsynlig: P[0.01; 0.90].</p>	<p>Som sannsynlighet vurderes andelen av året hvor vannstanden er rundt HRV, dvs. HRV ± 20 cm. Et konservativt anslag ligger på 10% av året: P[0.1; 0.9]</p>	<p>For den midtre PGA grenen kan det initieres indre erosjon. Kvasi- statiske jordskjelvanalyser viser tilfredsstillende oppførsel av steinfyllingsdammer under jordskjelv, og sannsynlighet for indre erosjon er meget lite sannsynlig, : P[0.05; 0.95]. Sannsynlighet for brudd evalueres videre under indre erosjon-treet.</p>	<p>Bruddsannsynligheter overføres til hendelse-analyse for indre erosjon. Sannsynlighetene for disse grenene blir svart lav, så den kan neglisjeres.</p>	<p>Det er stor kapasitet i damtåa både i hoveddammen og i sekundærdammene. Det er gjort beregninger for hver av dammene om hvor mye vann som kan gå over kjernen før dammen går til brudd. For Sekundærdam 4, som er den mest kritiske, tåler damtåa én (1) m vann over kjernen. Sannsynligheten for dambrudd/ikke dambrudd er vurdert til P[0.1;0.9], som ansees som et konservativt estimat.</p>

E1.4 Hendelsestre for erosjon i fundamentet

Lekkasje og erosjon i oppsprukket berg	Self-healing	Utvasking	Skade fører til brudd	Dambrudd
A	B	C	D	E



Figur E8. Hendelsestreanalyse for erosjon, lekkasje og svakhet i bergfundamentet, Nesjen Hoveddam.

Tabell E6. Forklaring for sannsynlighetene i hendelsestreet for erosjon, lekkasje og svakhet i bergfundamentet

HENDELSE	FORKLARING	SANNSYNLIGHET PÅ GRENE
A Lekkasje gjennom kjernen eller bergfundament	Lekkasje kjerne-bergfundament initieres. Dette har ikke skjedd i dammens første 50 år; det er ingen grunn til at det skal gå verre med tid, heller bedre.	P : 1% over dammens levetid, (som er antatt å være 100 - 150 år).
B Self-healing	Injeksjonsarbeidene har vært utført samvittighetsfullt. Dårlig og sprøtt fjell har blitt fjernet. Geologisk informasjon mangler derimot.	P[0.05; 0.95]
C Utvasking av kjernen	Store mengder må vaskes ut for å forårsake skade, usannsynlig at dette kan skje til fjell.	P[0.1; 0.9]
D Skade fører til brudd	Utvikling fra synkehull til dambrudd tar tid. Men det er ikke automatisk lekkasjemålingssystem, så det kan derfor forbli uoppdaget over tid. Skade på dam er ikke ensbetydende med dambrudd (Svensk dam som fikk skader pga. synkehull gikk ikke til brudd, men måtte repareres).	P[0.1; 0.9]
E Dambrudd		$P_f = 5.0 \times 10^{-6}/\text{år}$

E2 Resultater fra hendelsestre-analysene

E2.1 Bruddsansynlighet fra de enkelte hendelsestrær

De årlige bruddsannsynligheter for hver hendelsestre-analyse er oppsummert i Tabell E9. Tabell E10 gir den totale bruddsannsynlighet før og etter rehabilitering.

Tabell E7. Årlig bruddsannsynlighet fra hendelsestre-analysene fra Nesjendammene.

Hendelsestre-analyse	Årlig bruddsannsynlighet, P_f årlig
Indre erosjon, før rehabilitering (iterasjon 1)	$3,6 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
Indre erosjon, før rehabilitering (iterasjon 2)	$7,6 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
Indre erosjon, før rehabilitering - snitt	$5 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
Indre erosjon, etter rehabilitering	$8,4 \cdot 10^{-6}/\text{år}^*$
Flom, før rehabilitering	$2,9 \cdot 10^{-7}/\text{år}$
Flom, rehabilitering med heving av damkronen og av kjernen	$1,8 \cdot 10^{-7}/\text{år}$
Flom, tiltak på overløpet	$2,0 \cdot 10^{-8}/\text{år}$
Jordskjelv	$1,0 \cdot 10^{-8}/\text{år}$
Lekkasje gjennom bergfundamentet og kjernen, før rehabilitering	$5,5 \cdot 10^{-6}/\text{år}$

* Rehabiliteringstiltak damtåforsterkning, kabler og lekkasjeovervåkning er tatt med. Bruddsannsynligheter med enkelte tiltak er:

- Kun damtåforsterkning + kabler: $1,6 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
- Kun lekkasjeovervåkning: $3,4 \cdot 10^{-5}/\text{år}$

Tabell E8 Totale årlige bruddsannsynligheter før og etter rehabilitering

Analyse, Hoveddam	Årlig bruddsannsynlighet, $P_f/\text{år}$
Før rehabilitering	$5,5 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
Etter rehabilitering	$9,1 \cdot 10^{-6}/\text{år}$

E3 Domino-effekt av brudd ved Dam Roskrepp

Brudd i Dam Roskrepp kan føre til domino brudd for Dam Nesjen. Vannmengdene ved et brudd i Dam Roskrepp vil ligge på minst 5 PMF. Analyse av denne situasjonen vil bli gjort ved "stress testing"-prosjektet. I denne analyse vil det bli sett på hvilke sårbarheter i systemet som er mest kritiske under denne ekstreme situasjonen og hvordan sårbarhetene kan reduseres.

For å vurdere sannsynligheten for dambrudd ved Dam Roskrepp kan det gjøres en hendelsestre-analyse for indre erosjon, som er den antatt mest kritiske bruddmekanismen. En slik analyse vil følge de samme stegene for hendelsestre-analysene for indre erosjon i Figurene E2 og E3, men sannsynlighetene for hver av enkelthendelsene må tilpasses situasjonen og forholdene ved Dam Roskrepp.

Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Risikovurdering for Nesjendammene		Dokumentnr./Document no. 20150624-04-R
Dokumenttype/Type of document Rapport / Report	Oppdragsgiver/Client Energi Norge / Siri-Kvina	Dato/Date 2018-04-27
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document according to contract NGI		Rev.nr.&dato/Rev.no.&date 0 /
Distribusjon/Distribution BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
Emneord/Keywords Risikovurdering, dam, fyllingsdammer, indre erosjon, flom, jordskjelv		

Stedfesting/Geographical information	
Land, fylke/Country	Havområde/Offshore area
Kommune/Municipality	Feltnavn/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:	Sidemanns-kontroll av/ Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Inter-disciplinary review by:
0	Originaldokument UTKAST	UKE, TLe 2017-12-22	SL, KH 2018-01-01	Rolv Guddal 2018—01-	

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date 30. april 2018	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

