

Til: **Energi Norge**
v/ Dr Eve Cathrin Walseth
Kopi til:
Dato: 2018-08-20
Rev.nr. / Rev.dato: 0 / --
Dokumentnr: 2015 0624-02-TN
Prosjekt: **Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv**
Tittel på notatet: **Anvendelse av risikovurdering i norsk damsikkerhetsarbeid**

Prosjektleder: Suzanne Lacasse
Kontrollert av: Kaare Høeg og Farrokh Nadim

Innhold

1	Formål med sluttnotatet	2
2	Hovedkonklusjoner fra risikovurdering av fem norske steinfyllingsdammer (2016-2018)	3
2.1	Statkrafts Dam Dravladalen	3
2.2	E-COs Dam Nyhellervatn	3
2.3	Sira Kvinas Nesjendammer	3
2.4	Eidsivas Dam Strandfossen	4
2.5	E-COs Dam Viddalsvatn.	4
3	Risikovurdering for norske dammer	5
3.1	Om risikovurdering for dammer	5
3.2	Anvendelse for norske dammer	6
4	Akseptabelt risikonivå	7
4.1	Anbefalinger fra andre land	7
4.2	Anbefaling for norske dammer	8
5	Metodikk for risikovurdering av dammer	10
5.1	Probabilistiske metoder for dammer	10
5.2	Tilfellet med ekstreme hendelser	10
5.3	Deterministiske og probabilistiske analyser	11
6	Anbefalinger	12
6.1	Risikovurdering av norske dammer	12
6.2	Videre arbeid	13
7	Referanser	13
7.1	Siterte referanser	13
7.2	NGI rapporter	13

1 Formål med sluttnotatet

Dammer er og har vært svært viktige for kraftproduksjon og flere andre formål i Norge. De kan imidlertid også innebære en fare for samfunnet om sikkerheten ved anleggene ikke ivaretas. Gjennom to tiår fram til midten av 1970-tallet skjedde en rekke alarmerende dambrudd og hendelser utenlands, for eksempel med Vega de Tera Dam (Spania), Malpasset Dam (Frankrike), Vajont Dam (Italia), Baldwin Hills, Nedre Van Norman, Buffalo Creek Dams og den nybygde Teton Dam (alle i USA) som forårsaket voksende bekymring. Resultatet ble et fornyet fokus på damsikkerhet i en rekke land.

Energi Norge, gjennom sitt prosjekt "Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv (DSHP)", engasjerte NGI til å vurdere muligheter og avgrensninger ved bruk av risikoanalyser for norske dammer. Energi Norges prosjekt med NGI har som mål å gi anbefalinger om anvendelse av risikovurdering av dammer i Norge. Vurderingen besto av:

- ✚ «State-of-the-art» om risikoanalyser for dammer i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv.
- ✚ Vurdering av risiko for dambrudd for Dam Dravladalen (valgt som et eksempelstudie).

Det ble også gjennomført risikovurderinger for fire ytterligere dammer: Dam Nyhellervatn, Nesjendammene, Dam Strandfossen og Dam Viddalsvatn. Dette arbeidet ble gjort i regi av DSHP-prosjektet, i et samarbeid mellom Energi Norge og dameier for hver dam: Statkraft for Dam Dravladalen, E-CO Energi for Dam Nyhellervatn, Sira-Kvina kraftselskap for Nesjendammene, Eidsiva Vannkraft AS for Dam Strandfossen og E-CO Energi for Dam Viddalsvatn.

Rapporter til Energi Norge og dameier presenterer resultatet av arbeidet, henholdsvis «State-of-the-art» om risikoanalyser for dammer (NGI 2016a) og resultatene av risikoanalyser for hver dam. Referanseliste gir en oversikt over NGI rapportene i prosjektet.

Dette sluttnotatet gir anbefalinger om anvendelse av risikovurdering for dammer i Norge og foreslår retningen for videre arbeid. Notatet er en oppdatering av NGIs tidligere sluttnotat 2015 0624-01-TN (NGI 2016c). Det oppdaterte notatet tar med seg erfaringene fra risikovurdering for fem norske dammer.

2 Konklusjoner fra risikovurdering av fem norske steinfyllingsdammer

2.1 Statkrafts Dam Dravladalen

Analysene av Dam Dravladalen i 2016 dokumenterte effektiviteten av rehabiliteringstiltakene som ble utført mellom 1996 og 2012. Bruddsansynlighet ble betydelig redusert med rehabiliteringstiltakene. Det beste estimatet for årlig bruddsannsynlighet for Dam Dravladalen i 2016 er på én gang pr 100.000 år. Den beregnede årlige sannsynligheten er lavere enn den internasjonalt rapporterte bruddfrekvensen for dammer, basert på publiserte tall og ICOLD-statistikk. En tidligere risikovurdering i 1996 hadde ført til at en viktig, og til da nærmest oversett, bruddmekanisme ble identifisert, og ga Statkraft et insentiv til rehabilitering. Risikoredusering skyldes rehabiliteringstiltakene og ikke forskjeller i analysemetodikk fra 1996 til 2016. Tiltaket som bidro mest til reduisering i bruddsannsynlighet er knyttet til flomløpet med et overbygg over eksisterende flomløp og økt kapasitet i tunnelen i flomløpssystemet med mer, som ble igangsatt av Statkraft i lys av resultatene fra 1996-analysene.

2.2 E-COs Dam Nyhellervatn

Risikovurderingen for Dam Nyhellervatn viser at det beste estimatet for årlig bruddsannsynlighet i 2016 er på to ganger pr 1 million år. Den beregnede årlige sannsynligheten er lavere enn den internasjonalt rapporterte bruddfrekvensen for fyllingsdammer. Analysene viser at kontinuerlig overvåking av lekkasje reduserer betydelig sannsynligheten for at indre erosjon fører til brudd. Med de beregnede bruddsannsynligheter og konsekvenser plasseres Dam Nyhellervatn, uten rehabiliteringstiltak, i sonen med akseptabel og tolerabel risiko når kriterier fra USACE¹ benyttes. Det ligger også flere konservative antagelser bak vurderingene. Dam Nyhellervatn oppfattes derfor som svært trygg. Dam Nyhellervatn har stått med sine dimensjoneringslaster i store deler av sitt levetid, og det er ingen stor endring in dimensjoneringslastene pr i dag. De første 40 år i Dam Nyhellervatn kan oppfattes som fullskala modellforsøk for dammen. Det er rimelig å spørre om dammen må allikevel oppgraderes, gitt at den ikke har visst noen tegn på uønskede hendelser, gitt at den mest kritiske perioden for en fyllingsdam vanligvis er de første fem operative år, ifølge internasjonale dambrudd statistikk.

2.3 Sira Kvinas Nesjendammer

Risikovurderingen for Nesjendammene viser at det beste estimatet for bruddsannsynlighet for Nesjen Hoveddam før rehabilitering er på 5 ganger pr 100.000 år og ca. 9 ganger pr 1.000.000 år etter rehabilitering. Den kritiske bruddmekanisme er indre erosjon. Den beregnede sannsynligheten på Nesjen er lavere enn den internasjonalt rapporterte bruddfrekvensen for brudd forårsaket av indre erosjon. En analyse av konsekvensene viser at Nesjen Hoveddammen har tolerabel og akseptabel risiko, både før og etter rehabilitering. Analysene viser også at det vil være gunstig 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

¹ USACE: US Army Corps of Engineers

redusere betraktelig bruddsannsynligheten for Hoveddamen. 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 Nesjendammene.

2.4 Eidsivas Dam Strandfossen

Risikovurderingsanalysene for Dam Strandfossen hadde som formål å identifisere de mest kritiske bruddårsaker og bruddmekanismer og vurdere effekt av risikoreduserende tiltak for brudd i inntakskanalen. Analysene fokuserte på potensielle bruddårsaker og bruddmekanismer for inntakskanalen og fare- og konsekvensreduserende potensiale av enkelte tiltak. Risikovurderingene viste at det var en relativt høy bruddsannsynlighet for inntakskanalen sammenlignet med andre norske damanlegg. Den totale årlig bruddsannsynligheten ligger på ca. én gang pr 1.000 år, noe som ikke er akseptabelt i henhold til internasjonale krav. Risikoreduserende tiltak er dermed påkrevd. Den mest kritiske bruddmekanismen var brudd i flomverk som førte til erosjon og brudd i inntakskanalen. Det blir hovedsakelig materielle tap ved et brudd i inntakskanalen, derfor er risiko med hensyn til tap av menneskeliv veldig nært tolerabel, selv uten tiltak. Ved en drøfting av risikoreduserende tiltak er erosjonssikring og bygging av damtå for inntakskanalvollene det mest effektive tiltaket for å redusere bruddsannsynlighet i systemet. En sperredam sør for kraftverket reduserer ikke bruddsannsynlighet men eliminerer praktisk talt konsekvensene for Elverum sentrum.

2.5 E-COs Dam Viddalsvatn

Formålet med risikovurderingene var å vurdere sikkerhet av Dam Viddalsvatn, spesielt med hensyn til indre erosjon og fjellskred inn i magasinet. Tiltak og effekt av tiltak skulle også vurderes som innspill til teknisk plan. Beregningene tilsier at den totale årlige sannsynlighet for brudd for Dam Viddalsvatn ligger på ca. én gang pr 100.000 år, forutsatt at det implementeres den "minimum rehabiliteringsløsning" beskrevet i rapporten. Bruddmekanismer som omfatter indre erosjon er de mest kritiske. Estimater for årlige bruddsannsynlighet forårsaket av indre erosjon på én gang pr 100.000 år er lavere enn den rapporterte bruddfrekvensen for fyllingsdammer ellers i verden. Benyttes internasjonale risikokriterier for Dam Viddalsvatn vil den beregnede risikoen kunne karakteriseres som akseptabel eller på grensen av uakseptabel, avhengig av rehabiliteringstiltak som skal innføres. Med resultatene fra analysene av dammen med forskjellige rehabiliteringstiltak er det mulig å identifisere det optimale tiltaket.

3 Risikovurdering for norske dammer

3.1 Om risikovurdering av dammer

I utlandet brukes risikovurdering av dammer i Australia, Canada, Spania, UK, USA, og til dels Japan og Sverige. Risikovurdering og risikohåndtering brukes i økende grad i dag for alle typer bygg og anlegg, infrastruktur og store konstruksjoner. Den mest utbredte bruken er innen olje- og gassutvinning, kjernekraftindustrien, dammer, gruveindustrien, samferdsel og miljøteknologi. Innen flere av disse aktivitetsområdene er Norge blant de mest aktive landene med hensyn til bruk av risikovurdering, sammen med Australia, Canada, USA og Hong Kong.

Målet med en risikovurdering er å evaluere usikkerheter i en analyse og kvantifisere deres effekt på funksjonalitet og sikkerhet av dammen. Tradisjonelle (deterministiske) analyser kan ikke gi et komplett bilde av sikkerheten fordi usikkerhetene påvirker selve sikkerhetsvurderingen. Fordelene med å gjennomføre risikoanalyser av dammer er som følger:

- ✦ Risikoanalyser gir muligheten til å kombinere resultater fra ingeniørbaserte analyser, observasjoner, tidligere erfaring, statistiske verdier, ekspertvurderinger og annen informasjon og data i en beslutningsprosess med hovedhensikt å skaffe beslutningsgrunnlag for risikostyring. Dette passer godt til en kompleks konstruksjon som et damanlegg.
- ✦ Risikoanalyser kan omfatte dambrudd som et resultat av uvanlige kombinasjoner av vanlige hendelser snarere enn kun som et resultat av ekstreme hendelser.
- ✦ Resultater fra risikoanalyse egner seg best til å sammenligne sikkerheten av en dam med andre dammer og andre konstruksjoner, og for å være konsekvent med hensyn til vurdering av sikkerheten av dammer i samme konsekvensklasse.
- ✦ Resultatene fra risikoanalyser kan anvendes over hele dammens levetid og kan justeres ved en ekstrem hendelse eller ved observasjoner (positive eller negative) av dammens oppførsel.
- ✦ Risikoanalyser egner seg godt til å sammenligne forskjellige utfall i en kost-nytte analyse.
- ✦ Gjennomføring av en risikoanalyse fordrer en proaktiv tankegang og en identifisering av aktuelle og potensielle problemområder. Dette gir et begrunnet grunnlag for å iverksette tiltak for reduksjon av risiko og for å optimalisere bruken av ressurser på tiltak.
- ✦ Detaljeringsgrad på analysene velges ut fra formål, omfang, usikkerheter og konsekvensene av uønskede hendelser for analysen. Selv en grovanalyse av risikoen vil bli nyttig for identifisering av risikokilder og problemområder.
- ✦ Risikobegreper letter kommunikasjonen blant fagområdene, og med myndigheter og publikum.
- ✦ Oppfatningen av at risikoanalyser er kompliserte og dyre å gjennomføre gjelder ikke lenger. Utvikling av metodene og utvidelse av anvendelsesområdene gjør at metodikken og programpakkene er lett tilgjengelige, og konseptene kan benyttes uten stor vanskelighet.

- ✦ "Risk-informed decision-making" ("risiko-bevisst beslutningstaking") er satt som krav i ISO2015:2394. Kravet innarbeides også i ICOLDs veiledere. Trenden vil forsterkes med til og det blir økende krav til risikovurdering av dammer i fremtiden.

Det er viktig å påpeke at et eventuelt dambrudd under ekstreme hendelser påfører kun en inkrementell² økning i risiko i forhold til risiko mennesker og materielle verdier allerede er eksponert for under ekstraordinære hendelser som flom og jordskjelv.

3.2 Anvendelse for norske dammer

Risikovurdering av norske dammer bør brukes i følgende tilfeller:

- ✦ Dammer i høy konsekvensklasse (konsekvensklasse 4), spesielt for å være konsekvent med hensyn til vurdering av sikkerheten for dammer i Norge.
- ✦ Dammer hvor det observeres en endring i oppførsel eller hvor det forventes en endring i ytre belastning (for eksempel grunnet klimaendringer).
- ✦ Dammer hvor dameieren må velge den(de) mest effektive rehabiliteringstiltak.
- ✦ Dammer hvor det er behov for kost-nytte analyser for å vurdere den mest effektivt brukten av vedlikeholdsbudsjettet.
- ✦ Dammer hvor det er relativt store kostnader forbundet med en eventuell rehabilitering eller andre endringer i forhold til opprinnelig dimensjonering.
- ✦ I en større dam-portefølje for å sikre at de riktige tiltakene prioriteres og blir gjennomført.
- ✦ Dammer eller serier av dammer hvor det er 'fare' (mulighet) for "påfølgende" effekter ("cascading effects") og store skader på infrastrukturen og miljø.
- ✦ Når det er et ønske om å velge riktig instrumentering for overvåkning og oppfølging.
- ✦ Ved planlegging av beredskapstiltak i forbindelse med et potensielt dambrudd.
- ✦ Dammer som kan være utsatt for terrorisme eller sabotasje: Det ligger et spesielt ansvar på myndighetene å sørge for at kritiske damanlegg ikke kan utsettes for "tilsiktete aksjoner/villede handlinger" (terror eller sabotasje).

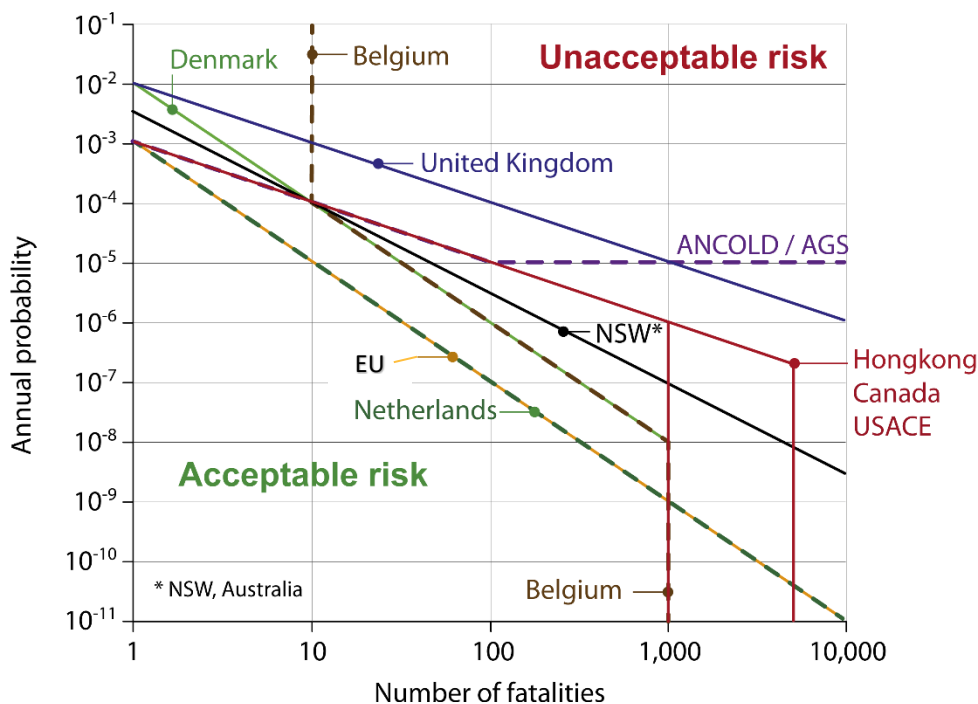
² Inkrementell risiko er definert av ICOLD: "Incremental losses or damage, which dam failure might inflict on upstream areas, downstream areas, at the dam, or elsewhere, over and above any losses which might have occurred for the same natural event or conditions, had the dam not been there or not failed."

4 Akseptabelt risikonivå

4.1 Anbefalinger fra andre land

NGI (2016a; 2016b) presenterte veiledninger for akseptabel risiko i andre land enn Norge basert på praksis i flere land. Resultatene er oppsummert i Figur 1 i såkalte 'F-N' kurver med årlig bruddsannsynlighet (frekvens F) vs antall (N) forventet omkomne. De fleste anbefalinger er for dammer. Anbefalingen fra Hong Kong, derimot, som er den mest anvendte i verden, er for skråninger i Hong Kong. Et slikt F-N diagram illustrerer meget effektivt risikobildet for en dam, og er ofte brukt til å sammenligne risiko forbundet med konstruksjoner. Diagrammet illustrer også at det er nødvendig å vurdere både bruddsannsynlighet (faren) og bruddkonsekvens for å evaluere risiko ved et anlegg. F-N diagrammer er også svært nyttige for å sammenligne anlegg i og mellom porteføljer. Diagrammet bruker vanligvis rød fargen for uakseptabel risiko og grønn fargen for akseptabel risiko. Oransje farge signaliserer at flere analyser bør foretas.

Det kan også legges inn i F-N diagrammet et område fra akseptabel opp til et toleransenivå for uakseptabel risiko som kalles ALARP-området ("As Low As Reasonably Practicable"), hvor risikoen skal reduseres så langt som praktisk mulig. Der er det "omvendt bevisbyrde", det vil si at bevisbyrden ligger på å vise hvorfor et tiltak ikke kan implementeres. Dette innebærer at identifiserte tiltak skal implementeres, med mindre det kan dokumenteres at det er et misforhold mellom ulemper, gjennomførbarhet, kostnader eller nytte.

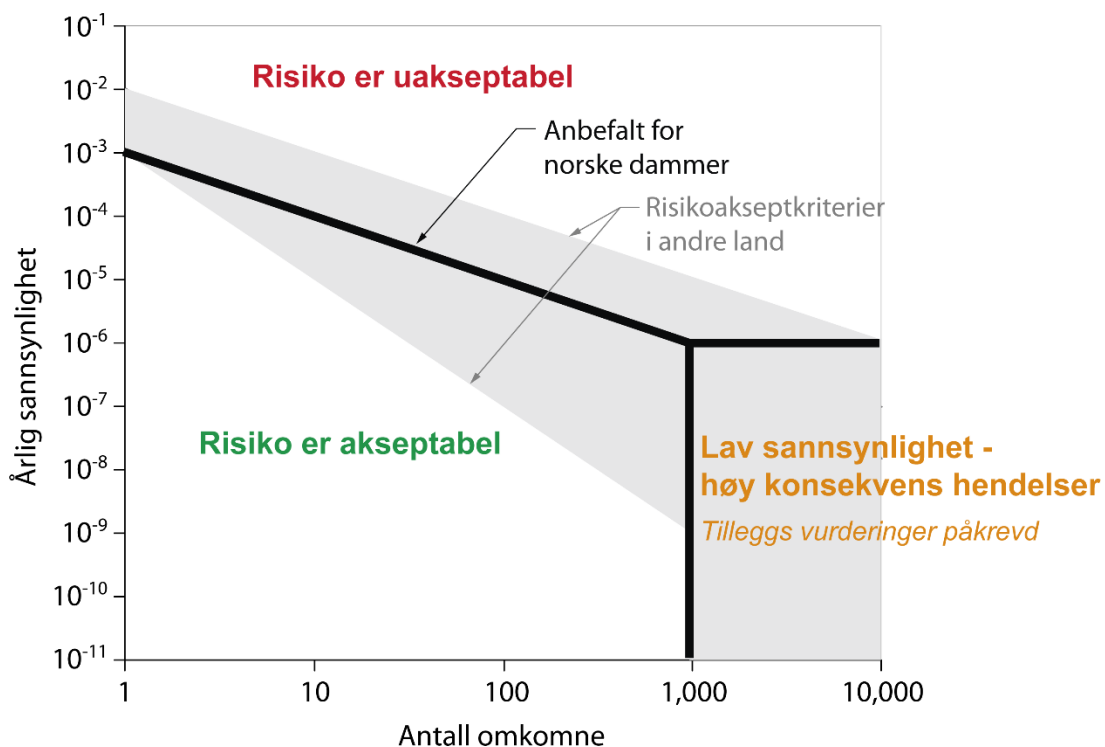


Figur 1. Veiledning for akseptabel og uakseptabel risiko i flere land (NGI 2016a)
 ANCOLD/AGS: "Australian National Committee on Large Dams/ Australian Geomechanics Society"
 NSW: New South Wales, Australia; EU: European Union; USACE: US Army Corps of Engineers

4.2 Anbefaling for norske dammer

NGI anbefaler at det opprettes retningslinjer for akseptabel og uakseptabel risiko for norske dammer. NGI anbefaler at kurvene i Figur 2 benyttes som veiledende akseptabel og uakseptabel risiko for dammer i Norge. Anbefalte F-N diagrammet tilsier at årlig bruddsannsynlighet skal ligge på maksimum 10^{-4} hvis 10 personer kan omkomme, maksimum 10^{-5} hvis 100 kan omkomme og maksimum 10^{-6} hvis 1000 personer kan omkomme. For tilfeller med meget lav sannsynlighet ($<10^{-6}/\text{år}$) og meget høye konsekvenser (>1.000 omkomne) vil det være påkrevet med helt spesielle tilleggs analyser (avsnitt 5.2).

Den anbefalte grensen mellom akseptabel og uakseptabel risiko for norske dammer er lik den som benyttes for skrånninger i Hong Kong, og for dammer i Canada og i USA (USACE³). Den anbefalte grensen mellom akseptabel og uakseptabel risiko er noe mer konservativ enn snittet av anbefalingene fra andre land som har publisert slike retningslinjer. Anbefalingen ligger nær anbefalingen for grensen mellom akseptabel og uakseptabel risiko for dammer i Australia.

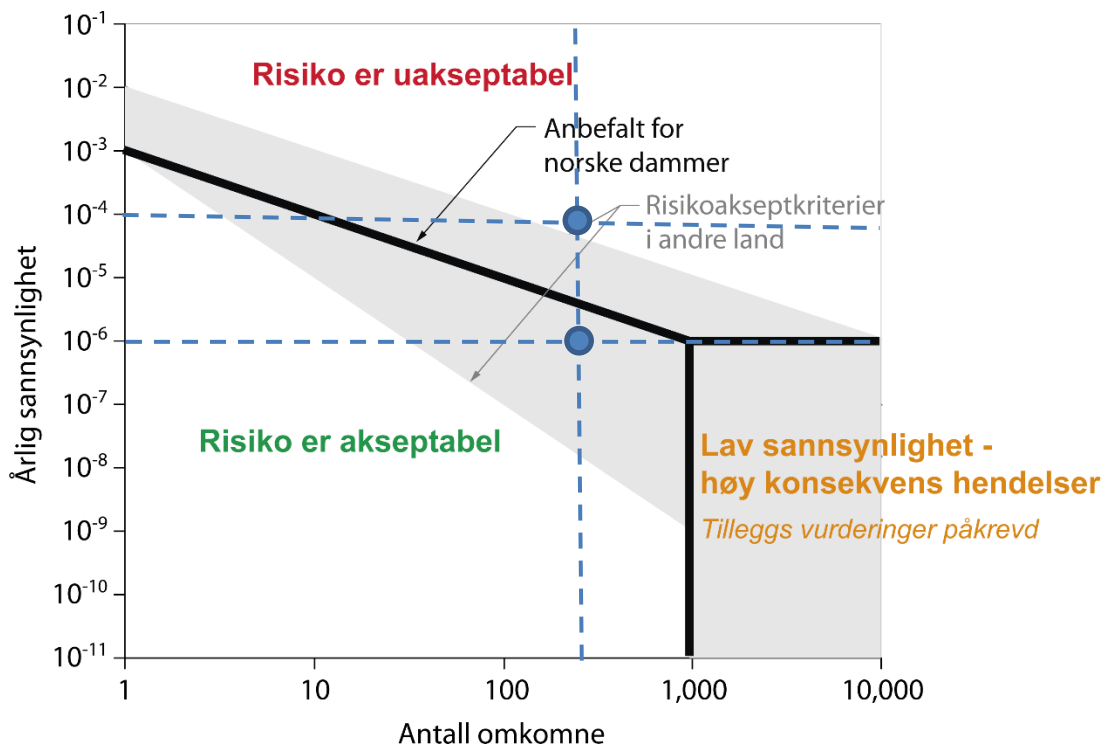


Figur 2. Anbefaling F-N diagram for akseptabel risiko for norske dammer.

Retningslinjene kan godt opprettes som midlertidig ("interim" på engelsk) som mange andre land har gjort før over en periode hvor man bygger erfaring med anbefalingen.

³ US Army Corps of Engineers, USACE

I dag bruker det norske regelverket konsekvensklasser KK4 til KK0 (NVE, 2014; OED, 2009) for å klassifisere dammer og identifisere behov for rehabilitering. To dammer klassifisert i KK4 men med årlige bruddsannsynligheter på henholdsvis 10^{-4} og 10^{-6} danner meget forskjellige risikobilder. Figur 3 illustrerer de to tenkte tilfeller, med beregnet årlig bruddsannsynlighet på 10^{-4} og 10^{-6} , og hvor konsekvensen er 250 omkomne⁴. Dammen med årlig bruddsannsynlighet på 10^{-6} har akseptabel risiko ifølge internasjonale veiledninger, mens dammen med årlig sannsynlighet på 10^{-4} fører til en uakseptabel risiko og bør rehabiliteres for å redusere risiko.



Figur3. Illustrasjon av to dammer med samme konsekvens men forskjellige årlig bruddsannsynlighet.

⁴ Horisontalaksen og vertical aksene er begge logaritmiske.

5 Metodikk for risikovurdering av dammer

5.1 Probabilistiske metoder for dammer

Metodene er delt i tre kategorier: kvalitative metoder, enklere kvantitative metoder og mer omfattende kvantitative metoder. Metodene nedenfor anses som de mest egnede for analyser av risiko for dammer og er forklart i NGI (2016a).

Kvalitative metoder

- ✚ Risikomatriser med kvalitativ vurdering av fare (sannsynlighet for brudd) og konsekvens.
- ✚ FMEA⁵ med kvalitativ identifisering av bruddmekanismer og effekter.
- ✚ FMECA⁵ med identifikasjon av bruddmekanismer, effekter, kritikalitet og tiltak.
- ✚ LCI (Life-Cycle Inventory) diagrammer.
- ✚ "The Observational Method" hvor analyser med best estimat og med verst tenkelige parametere er gjennomført og beredskapstiltak for uventede hendelser er planlagt.

Enklere kvantitative metoder

- ✚ Feiltre-analyse (ofte i kombinasjon med hendelsestre-analyse).
- ✚ Hendelsestre-analyse.
- ✚ Bayesisk oppdatering i lys av hendelser og observasjoner.

Mer komplekse kvalitative metoder

- ✚ Hendelsestre-analyse koblet med Monte Carlo simulering.
- ✚ Bayesisk nettverk ("Bayesian Network").
- ✚ Bayesisk nettverk koblet med Monte Carlo simulering.
- ✚ FORM /SORM⁶ analyser av enkelte mekanismer som kan uttrykkes eksplisitt matematisk.

Det er også mulig, og ikke uvanlig, å kombinere flere av disse metodene når risikovurdering gjennomføres. Det kommer også alltid inn en dose "engineering judgment". FMECA, hendelsestre-analyse og Bayesisk nettverk anses som de mest anvendbare og omfattende metoder for dammer, mens den andre metoder anvendes gjerne for å vurdere deler av anlegget for å danne kunnskap til FMECA, hendelsestre og Bayesisk analysene.

5.2 Tilfellet med ekstreme hendelser

For en hendelse som har 'meget lav sannsynlighet og meget høye konsekvenser', for eksempel forventet maksimum flom (PMF), tsunami eller jordskjelv med lang returperiode, er det vanskelig å bruke probabilistiske metoder alene fordi det er liten erfaring som kan bidra til å tallfeste sannsynligheter. Ekstreme hendelser kan forårsake mange dramatiske og alvorlige konsekvenser (kollaps i transportmidler og strømforsyning, omfattende evakuering etc) før en dam eventuelt vil gå til brudd. De fleste samfunnsmessige sikkerhetsberedskapstiltak vil da

⁵ FMEA = Failure Mode and Effect Analysis
FMECA = Failure Modes, Effects and Criticality Analysis

⁶ FORM = First Order Reliability Method
SORM = Second Order Reliability Method

allerede ha vært utløst. Et mulig dambrudd vil da forårsake en økning i risiko (inkrementell risiko) som allerede er høy.

En system-analyse i et slikt tilfelle kan gjennomføres med "stress testing"-metoden kombinert med flere av de probabilistiske metodene nevnt ovenfor. "Stress testing" er brukt i dag i kjernekraftindustrien og for å teste flysikkerhet og sårbarhet i bank-bransjen. Innen geoteknikk har "stress testing" nylig vært brukt i Hong Kong for å forutsi skredscenarier og sårbarheten av eksisterende beredskap under ekstrem nedbør. Stress testing er et av de nyeste fremtidige verktøyene innenfor risikovurdering. Etter Tōhoku jordskjelvet som forårsaket en tsunamibølge og Fukushima Dai-ichi ulykken påla WENRA ("West European Nuclear Regulation Association") i 2011 og 2012 "stress testing" for alle kjernekraft installasjoner i Europa.

5.3 Deterministiske og probabilistiske analyser

NVEs regelverk er ikke til hinder for at risikovurderinger kan benyttes. Tvert imot kan risikovurderinger være et nyttig verktøy i NVEs vurdering av damsikkerhet.

I Norge er sikkerhetskravene for dammer standardbaserte. Forskriftene setter eksplisitte konstruksjonsmessige krav til dammer. Sikkerhetsdokumentasjon tillates bare unntaksvis ved påvisning av lav risiko gjennom risikoanalyser med et minimumskrav på årlig pålitelighetsindeks ("reliability index") eller et maksimumskrav på årlig bruddsannsynlighet⁷.

Argumentene mot en risikobasert sikkerhetsdokumentasjon er oftest at risikoanalysene innebærer en stor grad av subjektivitet og er vanskeligere på etterprøve enn eksplisitte dimensjoneringskriterier og deterministiske analyser. Målet med risikovurderingsmetodikken er nettopp å kvantifisere usikkerhetene i en analyse. De samme usikkerhetene som kvantifiseres i en risikoanalyse er også med i de deterministiske analysene, men de er ikke eksplisitt tatt hensyn til i en deterministisk analyse. Risikoanalysene bringer i tillegg inn ny innsikt til de forskriftmessige analysene, dimensjoneringskrav og beslutninger om dammens sikkerhet.

Deterministiske analyser og probabilistiske analyser kompletterer hverandre. De bør brukes sammen for å gi maksimum informasjon ved vurdering av damsikkerhet.

⁷ Forenklete definisjoner:

Deterministiske analyser: Analyse av ett bruddscenario, vanligvis med en sikkerhetsfaktor.

Probabilistiske analyser: Analyse av sannsynlighet (og konsekvens) for et større antall bruddscenarier.

Bruddsannsynlighet: Uttrykker hvor trolig en hendelse er og hvor ofte en hendelse opptrer.

Pålitelighetsindeks: Indikator av sikkerhet (høyere tall viser større sikkerhet)

Fare: Bruddsannsynlighet (vanligvis pr tidsenhet).

Konsekvens: Følgen av en hendelse, som skjer videre eller etterpå eller er direkte påvirket av det inntrufne.

Risiko: Kombinerer sannsynligheten og konsekvensen av en hendelse. Begrepet brukes som regel om negative eller farlige hendelser.

Risikoanalyse: Verktøy som benyttes til å skaffe seg oversikt over risiko på en systematisk måte.

6 Anbefalinger

6.1 Risikovurdering av norske dammer

6.1.1 NGI anbefaler at risikovurderinger anvendes for norske dammer mer enn nå

Det ble utført risikoanalyser for flere norske dammer i 1996. Analysene fra 1996 representerte "State-of-the-Art" den gang. Norge var da et foregangsland med bruk av risikovurdering for dammer. En av de første risikokonferanser med stor internasjonale deltagelse ble arrangert i Trondheim i 1997.

Det er en økende trend med bruk av risikoanalyser for bygg og anlegg, for naturfarer og i energisektoren. Det kreves i dag "Risk-informed decisions" (ICOLD konferanse i Wien, juli 2018; ISO2015:2394). Det er enighet i faget om at risikovurderinger gir et bedre og mer komplett bilde av den virkelige sikkerheten enn deterministiske analyser alene. Man bør bruke risikovurderinger for dammer i Norge som i de andre foregangslandene.

6.1.2 Risikoakseptkriterier

Det bør etableres risikoakseptkriterier for dammer i Norge, som vist for eksempel i Figur 2 og 3, som tar hensyn til både faren (årlig bruddsannsynlighet) og konsekvenser når man vurderer damsikkerhet. Norges anbefaling kan godt etableres som midlertidig ("interim" på engelsk) som mange andre land har gjort før.

6.1.3 NGI anbefaler en utveksling av data og erfaringer innenfor områdene damoppførsel og risikovurderinger.

På dette stadiet i utviklingen av risikovurderinger for norske dammer er det viktig at data og erfaringer utveksles nasjonalt og internasjonalt for å unngå kunnskapsbegrensinger og for å sikre at data brukes riktig. Det anbefales at Energi Norge inngår et samarbeid med for eksempel US Army Corps of Engineers, Bureau of Reclamation og BC Hydro og/eller sentrale aktører i Canada og/eller Sverige og/eller Australia. USACE har blant annet et program som omfatter risikovurdering for samtlige av sine dammer i USA.

6.1.4 NGI anbefaler en gradvis endring i krav ved bygging av nye og ved sikkerhetsvurdering av eksisterende dammer i Norge.

Probabilistiske vurderinger og risikoanalyser med fastsatt minimumskrav på pålitelighetsindeks eller maksimumskrav på bruddsannsynlighet bør kunne anvendes i tillegg til deterministiske analyser, for å dokumentere sikkerheten av en dam.

Når en dam oppfattes som svært trygg anbefaler NGI at det vurderes om det er rimelig om en dam som har oppført seg eksemplarisk over flere tiår må allikevel oppfylle de samme krav som en ny dam. En dam som ikke har hatt uønskede hendelser over for eksempel 40 år er de facto et vellykket fullskala modellforsøk for dammen i 40 år, og en full dokumentasjon av tilfredsstillende oppførsel under de lastene som dammen har vært utsatt for i 40 år.

6.2 Videre arbeid

NGI anbefaler at det etableres et program hvor risikovurdering gradvis foretas for alle dammer i Norge med konsekvensklasse 4 og dammer som har vært eksponert for hendelser eller utfordringer. Risikovurdering bør også anvendes ved viktige beslutningsmilepæler og når problemer oppstår, enten plutselig eller ved en vedvarende situasjon.

NGI anbefaler at statistikk over hendelser i norske dammer siden 1992 videre systematiseres, og at måledata tolkes regelmessig. Norge har laget en interessant statistikk over hendelser i fyllingsdammer. Tallene mellom 1950 og 1992 har vært publisert (se for eksempel NGI 2016a; 2016b). Statistikk over hendelser i påfølgende år inntil i dag er ikke systematisert og dermed ikke allment kjent.

NGI anbefaler at kurs om probabilistiske analyser og risikovurderinger etableres for dam bransjen. For å kunne øke kunnskapen om probabilistiske analyser og risikovurderinger innen dam bransjen, anbefaler NGI at det etableres kurs om metodikken og anvendelsen, med praktiske anvendelseseksempler. Kursene kunne, for eksempel, gis i regi av Energi Norge. Dam-eksempler på kursene kunne med fordel velges blant konsekvensklasse KK4 dammer. På denne måten vil gradvis flere norske dammer bli vurdert risikomessig. Energi Norge, i sitt DSHP prosjekt, har allerede tatt steget for at en veileder for dameiers ledelse og VTA skal utarbeides.

7 Referanser

7.1 Siterte referanser

ISO2394:2015. General principles on reliability for structures. ISO/TC 98/SC 2. 111 pp.

NVE (2014). Veileder til damsikkerhetsforskriften. Klassifisering av vassdraganlegg. NVE Veileder3/2014. 37 s.

OED (Olje og energi departementet) (2009). Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften).

7.2 NGI rapporter

NGI (2016a). Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. "State-of-the-Art" om risikovurdering for dammer. NGI rapport til Energi Norge. Nr 2015 0624-01-R-01. Oslo. 2016-07-01.

NGI (2016b). Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. Risikovurdering for Dam Dravladalen. NGI rapport til Energi Norge. Nr 2015 0624-01-R-02. 2016-11-01.

NGI (2016c). Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. Anvendelse av risikovurdering i norsk damsikkerhetsarbeid. NGI sluttnotat til Energi Norge. Nr 20150624-01-TN-01. 2016-07-08

NGI (2018a). Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. Risikovurdering for Dam Nyhellervatn. NGI rapport til Energi Norge. Nr 20150624-01-R-03. 2018-04-29.

NGI (2018b). Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. Risikovurdering for Nesjendammene. NGI rapport til Energi Norge. Nr 20150624-01-R-04. 2018-04-27.

NGI (2018c). Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. Risikovurdering for Dam Strandfossen. 4GI rapport til Energi Norge. Nr 20150624-01-R-05. 2018-04-29.

NGI (2018d). Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. Risikovurdering for Dam Viddalsvatn. NGI rapport til Energi Norge- Nr 20180156-01-R-02. 2018-08-27.

NGI (2016e). Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. Anvendelse av risikovurdering i norsk damsikkerhetsarbeid. NGI sluttnotat til Energi Norge. Nr 20150624-01-TN-02.

Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv - Anvendelse av risikovurdering i norsk damsikkerhetsarbeid		Dokumentnr./Document no. 2015 0624-02-TN
Dokumenttype/Type of document Teknisk notat / Technical note	Oppdragsgiver/Client Energi Norge	Dato/Date 2018-08-20
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/Proprietary rights to the document according to contract Oppdragsgiver / Client		Rev.nr. & dato/Rev.no. & date 0/
Distribusjon/Distribution ÅPEN: Skal tilgjengeliggjøres i åpent arkiv (BRAGE) / OPEN: To be published in open archives (BRAGE)		
Emneord/Keywords Risikovurdering, steinfyllingsdammer, veiledning, akseptabel risiko		

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	2018-08-10 Suzanne Lacasse	2018-08-19 Kaare Høeg Farrokh Nadim	---	

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date 2018-08-20	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 datterselskap 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 laboratory in Oslo, branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

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.

