

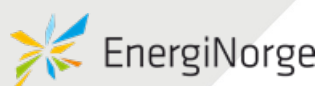


RAPPORT

# Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv

**«STATE-OF-THE-ART» OM RISIKOVURDERINGER FOR DAMMER  
SETT I ET NASJONALT OG INTERNASJONALT PERSPEKTIV**

DOK.NR. 20150624-01-R  
REV.NR. 0 / 2016-07-01



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 **Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv**

**Dokumenttittel:** «State-of-the-art» om risikovurderinger for dammer sett i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv

**Dokumentnr:** 20150624-01-R

**Dato:** 2016-07-01

**Rev.nr. / Rev.dato:** 0 /

## Oppdragsgiver

**Oppdragsgiver:** EnergiNorge

**Kontaktperson:** Dr Leif Basberg

**Kontraktreferanse:** Signert oppdragsbekreftelse 20. oktober 2015.

## for NGI

**Prosjektleder:** Suzanne Lacasse

**Utarbeidet av:** Unni Eidsvig, Farrokh Nadim og Suzanne Lacasse

**Kontrollert av:** Kaare Høeg (ikke slutført)

## 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 risikovurderinger for dammer, sett fra et nasjonalt og internasjonalt perspektiv.
- Nye risikovurderinger for to norske dammer og sammenligning med tidligere risikoanalyser utført i Norge på 1990-tallet.
- Anbefalinger om anvendelse av risikovurderinger for dammer i Norge.

Denne rapporten presenterer «State-of-the-art» for risikovurderinger for dammer i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv. To prosjektrapporter presenterer resultater fra risikovurderinger for to fyllingsdammer i Norge, og et sluttnotat gir anbefalinger om anvendelse av risikovurdering in norsk damsikkerhetsarbeid og for akseptabel risiko for dammer i Norge.

### *Risikostyring og risikovurdering*

Risikostyring er aktiviteter for å identifisere, estimere og kontrollere risiko forbundet med, for eksempel, en dam. Hensikten er å minimere tap ("losses" på engelsk) av alle kategorier. Risikovurdering og risikoanalyser er et vesentlig element i risikostyringsprosessen. ISO har publisert en standard på området, som er utgitt av Standard Norge som *NS-ISO 31000:2009 Risikostyring – Prinsipper og retningslinjer*. Risikostyring<sup>1</sup> består av risikovurdering<sup>1</sup> og risikohåndtering<sup>1</sup>. Rapporten diskuterer i hovedsak risikovurdering og kun kort risikohåndtering.

Risikovurdering er en samlet prosess som består av risikoidentifisering, risikoanalyse og risikoevaluering. Risikovurdering handler om å identifisere farer og uønskede hendelser, analysere fare og risiko og evaluere risiko. I risikoidentifiseringen identifiseres potensielle bruddmekanismer ("failure modes") i form av, for eksempel, hendelseskjeder som beskriver bruddmekanismer for en dam. I risikoanalysen vurderes sannsynlighetene for hendelsene som kan opptre, omfanget av et eventuelt brudd og konsekvensene. I risikoevalueringen vurderes den estimerte verdien enten relativt eller mot fastlagte akseptkriterier.

Rapporten gjennomgår strategier og metoder for å identifisere bruddmekanismer og uønskede hendelser, beregne sannsynligheten for enkelthendelser og sammensatte hendelser for å beregne konsekvensene i form av eventuelle tap av liv, materielle skader eller miljøskader. For risikovurdering brukes oftest hendelsestre-analyse, men feiltre-analyse eller andre kvalitative metoder kan benyttes. De mest vanlige og nyere metoder beskrives i rapporten. En oversikt over standard-dokumenter i Norge er også gitt. Flere land har utgitt retningslinjer for tolerabelt og akseptabelt nivå av individuell og samfunnsmessig risiko, og denne rapporten oppsummerer slike retningslinjer.

### *Bruk av risikovurdering*

I 1996 var Norge blant de første landene som brukte risikovurdering for dammer og arrangerte den første internasjonale konferansen om emnet i Trondheim i 1997.

I utlandet brukes risikovurdering av dammer i Australia, Canada, Spania, UK, USA, Japan og til dels 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 og miljøteknologi. Innen de fleste av disse aktivitetsområdene er Norge blant de mest aktive landene med hensyn til bruk av risikovurdering, sammen med Australia, Canada, USA, Hong Kong og noen land i Asia.

Måten krav til sikkerhet er formulert på påvirker hvilke analyser som gjøres og hvordan det dokumenteres at sikkerheten er ivaretatt. I Norge er sikkerhetskravene for dammer standard-baserte. Forskriftene setter eksplisitte konstruksjonsmessige krav. Sikkerhetsdokumentasjon tillates bare unntaksvis ved dokumentasjon av lav risiko gjennom risikoanalyser med fastsatt

---

<sup>1</sup> Risk management; risk assessment; risk mitigation (or risk treatment in ISO terminology).

minimum pålitelighetsindeks eller maksimum sannsynlighet for brudd. Argumentene mot en risikobasert sikkerhetsdokumentasjon er oftest at risikoanalysene innebærer stor grad av subjektivitet og er vanskeligere etterprøvbare enn eksplisitte dimensjoneringskriterier og deterministiske analyser. Målet med risikovurderingsmetodikken er nettopp å kvantifisere usikkerhetene i en analyse. Det er viktig å være klar over at de samme usikkerhetene som kvantifiseres i en risikoanalyse er også en del av de deterministiske (tradisjonelle) analysene. Risikoanalysene, spesielt når de er brukt sammen med resultater av deterministiske analyser, bringer inn ny innsikt i de forskriftmessige analysene, dimensjoneringskrav og beslutninger om dammens sikkerhet.

Innen den internasjonale faglitteraturen for dammer er følgende referanser av størst interesse og relevans: ICOLD's (2005) Bulletin 130 *"Risk assessment in dam safety management. A reconnaissance of benefits, methods and current applications"*, ANCOLD's (2003) *"Dam Safety Management Guidelines"* og *"Guidelines on Risk Assessment"*, Brown and Gosden's (2004) *"Interim guide to quantitative risk assessment for UK reservoirs"*, Bowles et al (2013) *"Guide to risk assessment for reservoir safety management"*, Fell and Fry (2007) *"The SOA of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations"*, Fell et al's (2015) *"Methods for estimating the probability of failure by internal erosion and piping"*.

Fordelene med å gjennomføre risikoanalyser er mange. Risikoanalyser kan omfatte dambrudd som et resultat av uvanlige kombinasjoner av vanlige hendelser snarere enn som et resultat av ekstreme hendelser, som er i fokus for dagens dimensjoneringsmetoder og -kriterier. Risikoanalyser gir muligheten til å kombinere, på en systematisk måte, 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.

Risikovurdering er meget anvendbar for å identifisere den(de) mest sårbar(e) komponent(er) i en dam. Resultater fra risikoanalyse egner seg godt til å sammenligne sikkerheten av en dam med andre dammer og andre konstruksjoner, og for å uniformere sikkerheten av forskjellige dammer, for eksempel, dammer i samme konsekvensklasse. De egner seg også godt til å sammenligne forskjellige utfall i en kost-nytte analyse. Resultatene fra risikoanalyser kan anvendes over dammens levetid og kan justeres ved en ekstrem hendelse eller ved observasjoner (positive eller negative) av dammens oppførsel.

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. Detaljeringsnivået på analysene velges ut fra formålet og omfanget for analysen. Selv en grovanalyse av risikoen vil bli nyttig for identifisering av risikokilder og problemområder, og hvor risiko kan reduseres med tiltak.

## Innhold

<b>1</b>	<b>Bakgrunn</b>	<b>7</b>
1.1	Damsikkerhet og risikovurdering	7
1.2	NGIs oppgave	7
1.3	Internasjonale brudd- og uhellstatistikk for dammer	8
<b>2</b>	<b>Rammer for risikovurdering og risikostyring</b>	<b>13</b>
2.1	Risikovurdering og risikostyring	13
2.2	Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg i Norge	16
2.3	Bruk av risikovurdering i andre land og krav til damsikkerhet	17
2.4	Risikoaksept: kriterier og anbefalinger	20
<b>3</b>	<b>Risikoidentifisering</b>	<b>26</b>
3.1	Risikoidentifiseringsprosessen	26
3.2	Brudd- og skademekanismer for dammer	26
3.3	Årsaker til og initiering av dambrudd	30
<b>4</b>	<b>Risikovurdering</b>	<b>32</b>
4.1	Oversiktsanalyser for en portefølje av dammer ("Screening level")	32
4.2	Periodisk damsikkerhetsvurdering – Norsk praksis	33
4.3	Brudd- og skademekanisme-fokusert analyse ("Issue evaluation")	33
4.4	Risikoreduseringsanalyse	33
4.5	Metodikk for damrisikoanalyser	34
4.6	Sannsynlighet for enkelthendelser	37
<b>5</b>	<b>Konsekvensanalyse og dambruddsbølgeanalyse</b>	<b>43</b>
5.1	Dambruddsbølgeberegninger	43
5.2	Analyse av konsekvenser	45
<b>6</b>	<b>Risikoevaluering</b>	<b>48</b>
6.1	Rangering av risiko	48
6.2	Kvantitativ risikobeskrivelse og risikoevaluering	48
<b>7</b>	<b>Muligheter og begrensninger ved bruk av risikovurdering</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>Referanser</b>	<b>53</b>
<b>9</b>	<b>Annen relevant litteratur</b>	<b>56</b>

## Vedlegg

Vedlegg A	Oversikt over Standard Norges dokumenter som omhandler risiko
Vedlegg B	Risikovurdering - Trinn i Bowles <i>et al's</i> (2013) rammeverk
Vedlegg C	Kriterier for akseptabel risiko
Vedlegg D	PFMA – "Potential Failure Mode" Analyser
Vedlegg E	Verktøy for probabilistiske beregninger
Vedlegg F	Analyseeksempler
Vedlegg G	"Bayesian Networks". Artikkel i GeoRisk (2015). "A three-level framework for multi-risk assessment" Z.Q. Liu et al (2015)
Vedlegg H	Gjennomføring av risikoanalyser

# 1 Bakgrunn

## 1.1 Damsikkerhet og risikovurdering

Dammer er og har vært svært viktige for kraftproduksjon og flere andre formål, i mange land og spesielt i Norge. Dammer 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, for eksempel med Vega de Tera Dam (Spania), Malpasset Dam (Frankrike), Vajont Dam (Italia), og 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, som begynner rundt slutten av 1970-tallet med systematiske inspeksjonsprogrammer i en rekke land for å vurdere sikkerheten av eksisterende dammer.

I USA hadde kun få stater lover som regulerte damsikkerheten før 1900. Dambrudd på slutten av 1800-tallet og begynnelsen av 1900-tallet bidro til økt fokus og lovgivning om damsikkerhet. Som et resultat av de flere dambrudd på midten av 1970-tallet ble det utstedt en presidenterklæring 23. april 1977 som krevde gjennomgang av rutiner og aktiviteter knyttet til damsikkerhet. Notatet resulterte videre i føderale retningslinjer for damsikkerhet i 1979 med rapportering til "Federal Emergency Management Agency" (FEMA) på toårig basis. FEMA fikk også ansvaret for å koordinere nasjonal damsikkerhet (USACE 2014). Mens de føderale retningslinjene fra 1979 fremholdt at risikobasert analyse var et nytt tillegg til tilgjengelige verktøy for damsikkerhetsvurdering, oppfordret de til å foreta forskning for å avgrense og forbedre teknikkene nødvendig for å bruke risikobasert analyse for damsikkerhetsspørsmål (BoR and USACE(2012):

"Etatene skal hver for seg og i fellesskap støtte forskning og utvikling av risikobasert analyse og metoder som er relatert til sikkerhet av dammer. Denne forskningen bør rettes spesielt til områdene hydrologi, jordskjelvfare og potensialet for dambrudd. Eksisterende arbeid på disse feltene bør videreføres og utvides mer spesifikt på å utvikle risikokonsepter nyttige for å vurdere sikkerhetsaspekter".

Risikovurdering for dammer har vært lite brukt i Norge de siste 15 år, men brukes oftere i andre land. I 1990-årene var Norge blant de fremste innen risikovurdering for dammer, med sine tidlige pålitelighetsanalyser av Dam Trolldalen (Songa), Dam Viddalen, Dam Venemo, Dam Dravladalen og Dam Svartevann. Utviklingen fortsatte i andre land, spesielt i Australia, USA, Canada, Spania, U.K., Sverige og noen land i Asia. I de fleste tilfeller risikovurderinger for dammer brukes til å sammenligne med bruddstatistikk for dammer, for å identifisere bruddårsaker og bruddmekanismer og for å vurdere effekt av og prioritere tiltak ved en avgjørelser i en dimensjonerings- eller rehabiliteringsfase eller ved et uventet uhell eller oppførsel av dammen. Risikovurdering og risikohåndtering brukes mer i mer for bygg og anlegg fasiliteter. Den mest utbredte bruken er antagelig innen olje og gass utvinning og relaterte aktiviteter, gruveindustrien, nukleærenergi og miljøteknologi.

## 1.2 NGIs oppgave

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 risikovurderinger for dammer sett fra et nasjonalt og internasjonalt perspektiv.
- Nye risikovurderinger for to norske dammer og sammenligning med tidligere risikoanalyser utført i Norge på 1990-tallet.
- Anbefalinger om anvendelse av risikovurderinger for dammer i Norge.

Rapporten omhandler rammer for og innhold i risikovurdering, retningslinjer og krav til dampsikkerhet og anvendelser av risikovurdering internasjonalt. Hovedrapporten gir hovedlinjene mens detaljene finnes i vedlegg A til H. Rapporten har seks hovedkapitler:

- Kapittel 2 Rammer og krav for risikovurdering og risikostyring
- Kapittel 3 Risikoidentifisering
- Kapittel 4 Risikovurdering, inkludert metodikk for risikoanalyse av dammer
- Kapittel 5 Konsekvensanalyse og dambruddsbølgeanalyse
- Kapittel 6 Risikoevaluering
- Kapittel 7 Muligheter og avgrensninger av risikovurdering for norske dammer

Referanser og annen relevant litteratur kommer til slutt. Åtte vedlegg kompletterer oversikten over risikovurdering for dammer:

- Vedlegg A Oversikt over Standard Norges dokumenter som omhandler risiko
- Vedlegg B Risikovurdering - Trinn i Bowles *et al's* (2013) rammeverk
- Vedlegg C Kriterier for akseptabel risiko
- Vedlegg D PFMA – "Potential Failure mode" analyser
- Vedlegg E Verktøy for probabilistiske beregninger
- Vedlegg F Analyseeksempler
- Vedlegg G "Bayesian Networks". Artikkel i GeoRisk (2015). "A three-level framework for multi-risk assessment" Z.Q. Liu et al (2015)
- Vedlegg H Gjennomføring av risikoanalyser

## 1.3 Internasjonale brudd- og uhellstatistikk for dammer

### 1.3.1 Fra internasjonal litteratur

Tabell 1-1 viser dambrudd i USA i perioden 1894 – 1995 med angivelse av tapte liv. Ulykker skjer, men ikke ofte. ICOLDs<sup>2</sup> database (1983) inneholder 14,700 dammer (alle typer, fyllingsdammer og betongdammer). Blant disse, 1105 (7.5%) led av noen hendelser ("accidents") eller forverring mens 107 (0.7%) gikk til brudd. ICOLD utga statistikk om hendelser hvor den gjennomsnittlige sannsynligheten for brudd ligger mellom  $10^{-4}$  og  $10^{-5}$  pr år (Londe 1993; ICOLD 1995; Foster et al. 2000; Høeg 2001). Peck (1980), basert på Baecher et al. (1980a; b) og ICOLDs database supplert med amerikanske dam data, ga en sannsynlighet for brudd for dammer i USA og utenlands mellom 2 og  $7 \cdot 10^{-4}$  pr år. Foster et al (2000) rapporterte at sannsynligheten for en hendelse knyttet til nedstrøms skråningsstabilitet var mellom 1 og  $5 \cdot 10^{-4}$  pr år. Fell et al (2015) oppsummerte årsaker for dambrudd for betong- og fyllingsdammer over 15-m høyde (Figur 1-1 og Tabell 1-2).

<sup>2</sup> ICOLD = "International Commission on Large Dams"



For fyllingsdammer noterte Fell *et al* (2015) at sannsynlighet for brudd grunnet indre erosjon og rørdannelse eller skråningsinstabilitet i fyllingsdammer ligger på mellom 0.1 og  $7 \cdot 10^{-3}$  pr år (Tabell 1-2). Statistikk vedrørende fyllingsdammer i Fell *et al* (2015) gjelder for alle typer fyllingsdammer og er ikke nødvendigvis beskrivende for norske fyllingsdammer (hvor mange er steinfyllingsdammer).

Costa (1985) rapporterte at av samtlige dambrudd pr 1985 skyldtes 34 % "overtopping", 30 % defekter i damfundament, 28 % rørdannelse ("piping") og lekkasje og 8 % andre brudd- og skademekanismer. Costa (1985) rapporterte videre at for fyllingsdammer er de tilsvarende tallene 35 % "overtopping", 38 % dannelse av strømningsveier ("piping") og lekkasje, 21 % defekter i damfundamentet og 6% andre brudd- og skademekanismer.

Historiske data kan oversettes til en frekvens for brudd pr dam-år operasjon, eller en årlig sannsynlighet for brudd. Figur 1-2 gir sannsynlighet for dambrudd forårsaket indre erosjon for dammer i USA. Den årlige sannsynligheten for brudd forårsaket av indre erosjon ligger mellom  $10^{-4}$  og  $5 \times 10^{-4}$  pr år. Figuren gir også en liste over faktorene som kan bidra til å øke og forminske sannsynlighetene for brudd.

Fell *et al* (2015) også observerte følgende:

- ✚ "Overtopping", indre erosjon og rørdannelse er de hyppigste årsak for brudd.
- ✚ Skråning instabilitet forårsaker sjelden brudd, men er allikevel ofte observert.
- ✚ Cirka 2/3 av dambrudd forårsaket av indre erosjon og rørdannelse og ca. 1/2 av hendelser forårsaket av indre erosjon og rørdannelse skjer i løpet av de første fem operative år. Men det skjer også brudd på grunn av indre erosjon og rørdannelse i eldre dammer også.
- ✚ Cirka 2/3 av dambrudd forårsaket av skråningsinstabilitet og 1/2 av hendelser forårsaket av skråningsinstabilitet skjer etter de første fem operative år.
- ✚ Forhold mellom brudd og hendelser er forskjellige avhengig av bruddmekanisme. For eksempel, skråningsinstabilitet og rørdannelse fra fyllingen til fundament fører oftere til begrensede hendelser enn rørdannelse innenfor selve fyllingen som oftere kan føre til brudd.
- ✚ Antall (og prosentandel) dammer som erfarer hendelser blir ikke mindre med tid, men prosentandel av dambrudd reduserer med dammens levetid og med årene (dette gjelder ikke "tailingsdammer"), noe som reflekterer bedre teknologi, dimensjonering, dambygging og overvåking.
- ✚ Cirka 79 % av fyllingsdammer er mindre enn 30-m høy. Disse dammer har relativt høyere andel av brudd (og mindre hendelser) enn høyere dammer. Dette kan reflektere bedre design og overvåking for høyere dammer.

Fell *et al* (2015) ga også en oversikt over brudd- og hendelseshyppighet avhengig av hvor indre erosjon og rørdannelse oppstår og om rørdannelse i selve fyllingen og gjennom fundamentet. Fell *et al* (2015) oppsummerte utviklingen og 'detekterbarhet' ("Detectability") av indre erosjon og rørdannelse og ga en del råd om instrumentering av dammer, far starten av og i tilfelle hendelser.

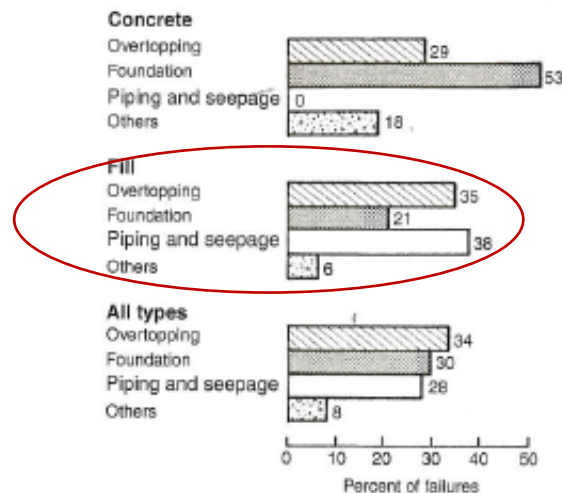
Tabell 1-1. Dambruddsstatistikk fra USA i perioden 1894- 1995 (Hartford and Baecher 2004: "Selected dam failures in the US, year of failure and lives lost" (etter McCann, 1995).

Named dams									
Name	Year	Lives	Name	Year	Lives	Name	Year	Lives	
Mill River, MA	1874	143	East Lee, MA	1968	2	DMAD, UT	1983	1	
South Fork, PA	1889	2209	Lee Lake, MA	1968	2	Bass Haven, TX	1984	1	
Walnut Grove, AZ	1890	150	Virdert Creek, IA	1968	1	Little Falls, DC	1984	5	
Mountjoy Hill, ME	1893	4	Anzalduas, TX	1972	4	Kendall Lake, SC	1990	4	
Angles, CA	1895	1	Black Hills, SD	1972	245	Shadyside, OH	1990	24	
Melzingah I & 2, NY	1897	7	Buffalo Creek, WV	1972	25	Timber Lake, VA	1995	2	
Austin, TX	1900	8	Canyon Lakes, SD	1972	33	<b>Unnamed dams</b>			
Bayless (Austin), PA	1911	80	Lake of the Hills, AK	1972	1	<i>Location</i>			
Lyman, AZ	1915	8	Lakeside, SC	1975	1	Winston, NC	1904	9	
Lower Otay, CA	1916	30	Asheville, NC	976	4	Kansas River, KS	1951	11	
Mammoth, UT	1917	1	Bear Wallow, NC	1976	4	Denver, CO	1965	1	
St Francis, CA	1928	450	Teton, ID	1976	11	Black Hills, SD	1972	245	
Wagner, WA	1938	1	Evans & Lockwood, NC	1977	2	Big Thompson R, CO	1976	144	
Schoellkopf Sta, NY	1956	1	Kelly Barnes, GA	1977	39	Newfound, NC	1976	4	
Baldwin Hills, CA	1963	5	Laurel Run, PA	1977	40	Kansas City, MO	1977	20	
Little Deer Creek, UT	1963	1	Sandy Run, PA	977	5	Texas Hill Co, TX	1978	25	
Moohegan Park, CT	1963	6	Lake Keowee, SC	1978	7	Austin, TX	1981	3	
Swift, MT	1964	19	Swimming Pool, NY	1979	4	Northern, NJ	1984	2	
Two Medicine, MI	1964	9	Eastover Mining, KY	1981	1	Allegheny Co, PA	1986	9	
Skagway, CO	1965	2	Lawn Lake, CO	1982	3	Americus, GA	1994	3	

Tabell 1-2. Brudd- og uhell statistikk for fyllingsdammer opp til 1986 (Foster et al 2000; Fell et al 2015).

Failure mode	Average probability ( $\times 10^{-3}$ /yr)		Timing of incident (%)							
	Failure	Accident	Failure				Accident			
			DC	FF	<5yr	>5yr	DC	FF	<5yr	>5yr
<b>Internal erosion and piping</b>										
Embankment	3.5	6.7	2	48	14	36	0	26	13	61
Foundation	1.7	6.2	5	20	50	25	0	30	24	46
Embankment to foundation	0.2	2.1	0	50	50	0	0	30	27	53
<b>Slope instability</b>										
Downstream	0.5	5.3	18	18	0	64	15	11	25	49
Upstream	0.1	4.2	0	0	100	0	22	2	26	50

DC During construction (under dambygging)  
 FF During first filing (under første vannfylling)  
 <5yr In the first five years of operation (i de første fem år etter første vannfylling)  
 >5yr After the first five years of operation (etter de første fem år)



Figur 1-1. Årsaker for dambrudd for dammer over 15-m høyde i perioden 1900-1975 (etter National Research Council 1983, oppsummert i Fell et al 2015).

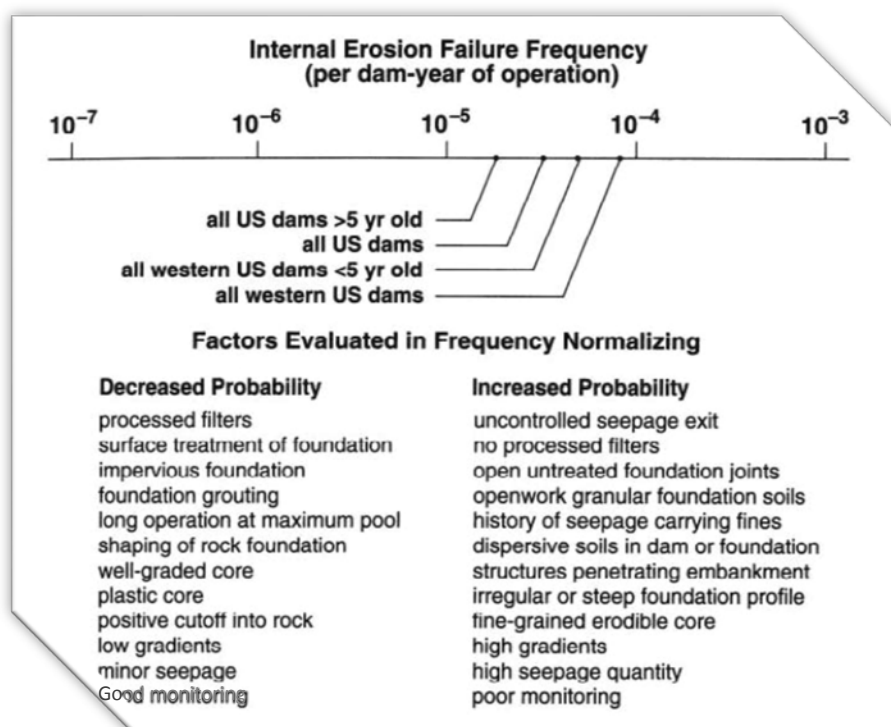


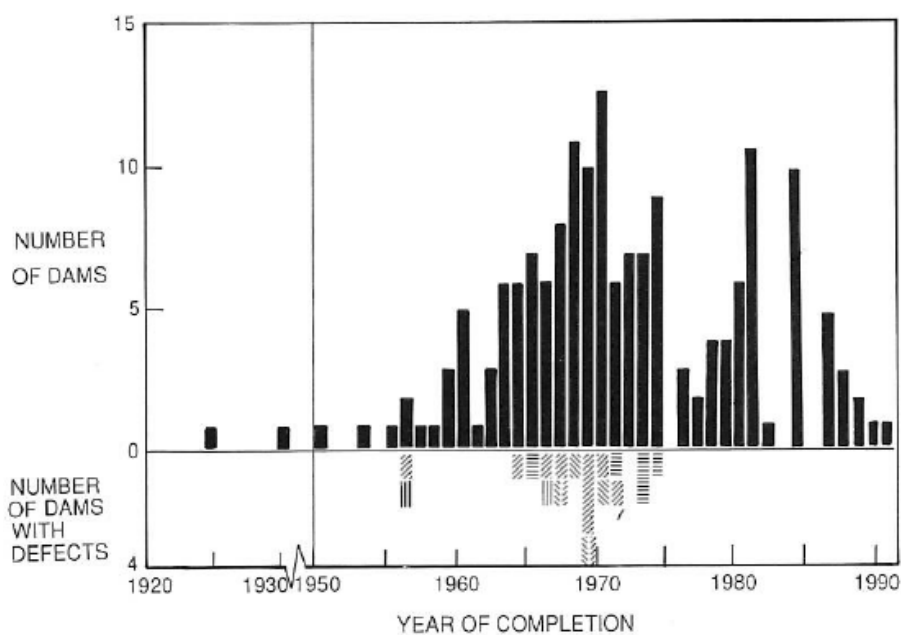
Figure 1-2. Normalisert frekvens (årlig sannsynlighet) for dambrudd som skyldes indre erosjon i USA (von Thun, 1985; Vick, 2002).

Fell *et al* (2015) konkluderte med at en dam vil mest sannsynlig gå til brudd eller erfare hendelser ("accidents") ved første fylling eller innen de første fem år i dammens operative liv. Mange hendelser kunne ha utviklet seg til brudd hvis de ikke hadde vært observert og dammen ikke blitt rehabilitert.

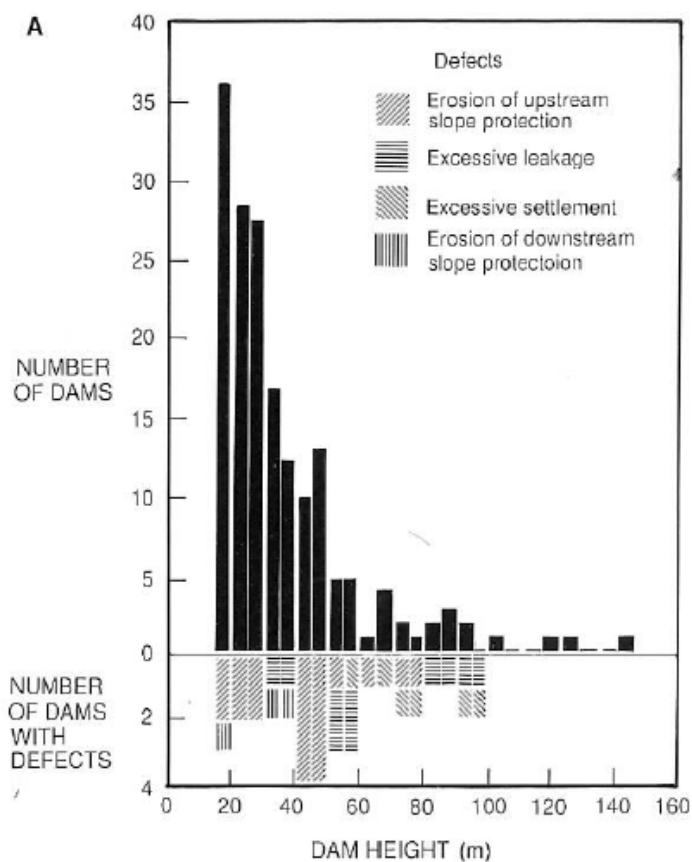
### 1.3.2 Statistikk i Norge

Norge har ca. 330 dammer høyere enn 15m (klassifisert som store dammer i ICOLDs terminologi). Over halvparten av disse dammer er fyllingsdammer (2015 tall). På ingen av de store dammene har det oppstått brudd. Den gode statistikken gjenspeiler at de fleste er steinfyllingsdammer (i motsetning til jorddammer) fundamentert på fjell (Kjærnsli *et al* 1992; Høeg 1996). Noen hendelser har derimot vært observert, spesielt lekkasjer. Midttømme *et al* (2013) gir en oversikt over regler og anbefalinger for norske dammer.

Figur 1-3 and 1-4 viser antall negative hendelser som en funksjon av dam ferdigstilleleseår og dam høyde. Hendelsene omfatter erosjon oppstrøms, store lekkasjer, setninger, og erosjon i nedstrøms skråningsvern. Statistikken viser at ingen dam ferdigstilt etter 1975 har vist tegn på skader. Begge figurer viser at det er kun en liten andel av dammene som har erfart uønskede hendelser, og ingen dam over 100m høy har hatt hendelser. Generelt gjelder Fell *et al's* (2015) konklusjoner for norske fyllingsdammer. Det vil være verdifullt å komplettere statistikken frem til 2016.



Figur 1-3. Antall observerte uønskede hendelser mot dam ferdigstillelsesår (Kjærnsli et al 1992; Høeg 1996).



Figur 1-4. Antall observerte uønskede hendelser mot dam høyde (Kjærnsli et al 1992; Høeg 1996).

## 2 Rammer for risikovurdering og risikostyring

### 2.1 Risikovurdering og risikostyring

Risikohåndtering er en betegnelse for koordinerte aktiviteter for å vurdere, kontrollere og håndtere risikoen knyttet til farer som samfunnet er omgitt av. Formålet med risikostyring er å vurdere og redusere risikoen hvor nødvendig. Relevante standarder for risikovurdering og -håndtering er den internasjonale standarden ISO 31000:2009 standarden "Risk management - Principles and guidelines" og den norske NS 5814:2008 "Krav til risikovurderinger".

Standard Norge har utgitt flere dokumenter om risikoanalyse, risikovurdering, risikohåndtering og risikostyring. Vedlegg A gir en liste over alle Standard Norges dokumenter og en litt mer detaljert innhold i tre av de mest sentrale dokumentene. Standard Norge skriver:

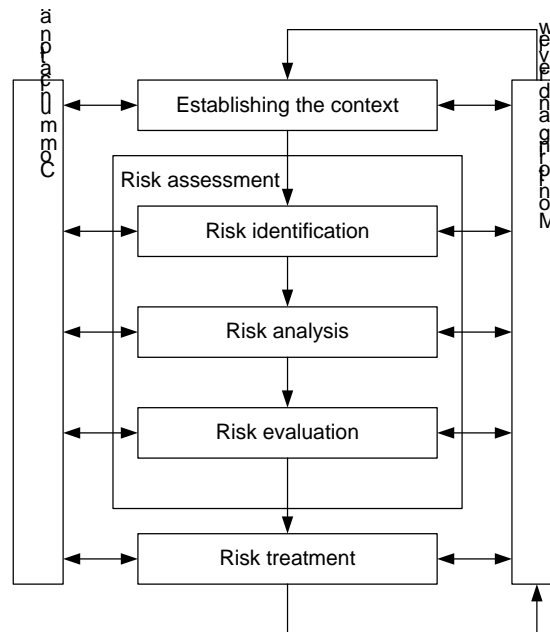
"Den norske standarden, NS 5814 "Krav til risikovurdering", stiller krav til de elementene som kan inngå i en slik prosess. Standarden beskriver også risikovurderingens plass i risikostyring og faktorer som påvirker planlegging og gjennomføringen av risikovurderinger. Dette gjelder for eksempel rammebetingelser og etablering av risikoakseptkriterier.

Risikovurderinger gjennomføres ved å planlegge aktiviteter eller tiltak både ved etablering og ved endringer av eksisterende virksomhet. Uavhengig av formålet er det viktig at risikovurderingen tilpasses i tid slik at resultatet foreligger før beslutninger skal tas. NS 5814 "Krav til risikovurderinger" er (...) et hjelpemiddel for virksomheter slik at de kan beslutte tiltak eller velge løsninger for å forebygge risiko."

Når konteksten for risikovurderingen er etablert er fire trinn viktige i risikovurderingsprosessen (ISO 31000:2009). Trinnene er illustrert i Figur 2-1.

1. Risikoidentifikasjon ("risk identification") hvor potensielle trusler og farer identifiseres. Trinn 1 svarer på spørsmålet: 'Hva kan skje?'
2. Risikoanalyse ("risk analysis") hvor sannsynligheter, potensielle konsekvenser og usikkerheter kombineres. Trinn 2 svarer på spørsmålet: 'Hvor sannsynlig er det at hendelsen skjer og, hvis det skjer, hva er konsekvensene?'
3. Risikoevaluering ("risk evaluation") hvor risikoen evalueres (sammenlignes) i forhold til kriterier for akseptabel eller tolerabel risiko eller i forhold til andre risikoer. Trinn 3 svarer på spørsmålet: 'Er risikoen akseptabel?'
4. Risikohåndtering ("risk treatment" eller "risk mitigation") hvor risikoreduserende tiltak vurderes og settes i gang. Trinn 4 svarer på spørsmålet: 'Hva kan gjøres for å redusere risikoen ned på et akseptabelt nivå?'

Begrepet risikovurdering ("risk assessment") brukes som samlebegrep for Trinn 1 til Trinn 3, det vil si risikoidentifikasjon, risikoanalyse og risikoevaluering. Risikostyringsprosessen ("risk management") er en integrert prosess der risikovurdering og implementering av risikoreduserende tiltak foregår i kontinuerlig dialog og konsultasjon og under kontinuerlig inspeksjon og kontroll. Hele risikostyringsprosessen er også illustrert skjematisk i Figur 2-1.



Figur 2-1. Rammeverk for risikostyringsprosess (etter ISO-31000: 2009).

NS5814:2008 er en generell standard rettet mot fag, bransjer og næringer som ikke har egne standarder for risikovurdering. Standarden gir en beskrivelse av risikovurderingens plass i risikostyring og av faktorer som påvirker planlegging og gjennomføring av risikovurderinger, for eksempel rammebetingelser og etablering av risikoakseptkriterier. Standarden stiller krav til dokumentasjon av risikovurderingen. Risikovurdering inngår som ett av elementene i risikostyring. Andre elementer i risikostyringen kan påvirke planlegging og gjennomføring av risikovurderingen. Felles for alle rammeverk for risikohåndtering er at de inneholder risikotrinnene risiko-identifisering, risikoanalyse og risikoevaluering.

Spesifikt for dammer, vil de ulike stegene i risikovurderingen inneholde (HRW 2012):

**Risikoidentifisering**, hvor omfang og detaljnivå eller kompleksitet av risikovurderingen velges. I dette steget vurderes og identifiseres potensielle skade- eller bruddmekanismer, inkludert forholdet mellom skade- eller bruddmekanismene og de tilhørende følgene og konsekvensene hvis mekanismen(ene) skulle inntre.

**Risikoanalyse**, hvor risikonivået estimeres. Dette innebærer å estimere sannsynligheter og konsekvenser for alle vesentlige skade- eller bruddmekanismer. Resultatene presenteres i et egnet format, slik at de lett kan tolkes og brukes som støtte for beslutninger angående dammens sikkerhet. Tradisjonell (deterministisk) teknisk analyse, pålitelighetsanalyse og erfaring og subjektiv vurdering er viktige komponenter av risikoanalysen.

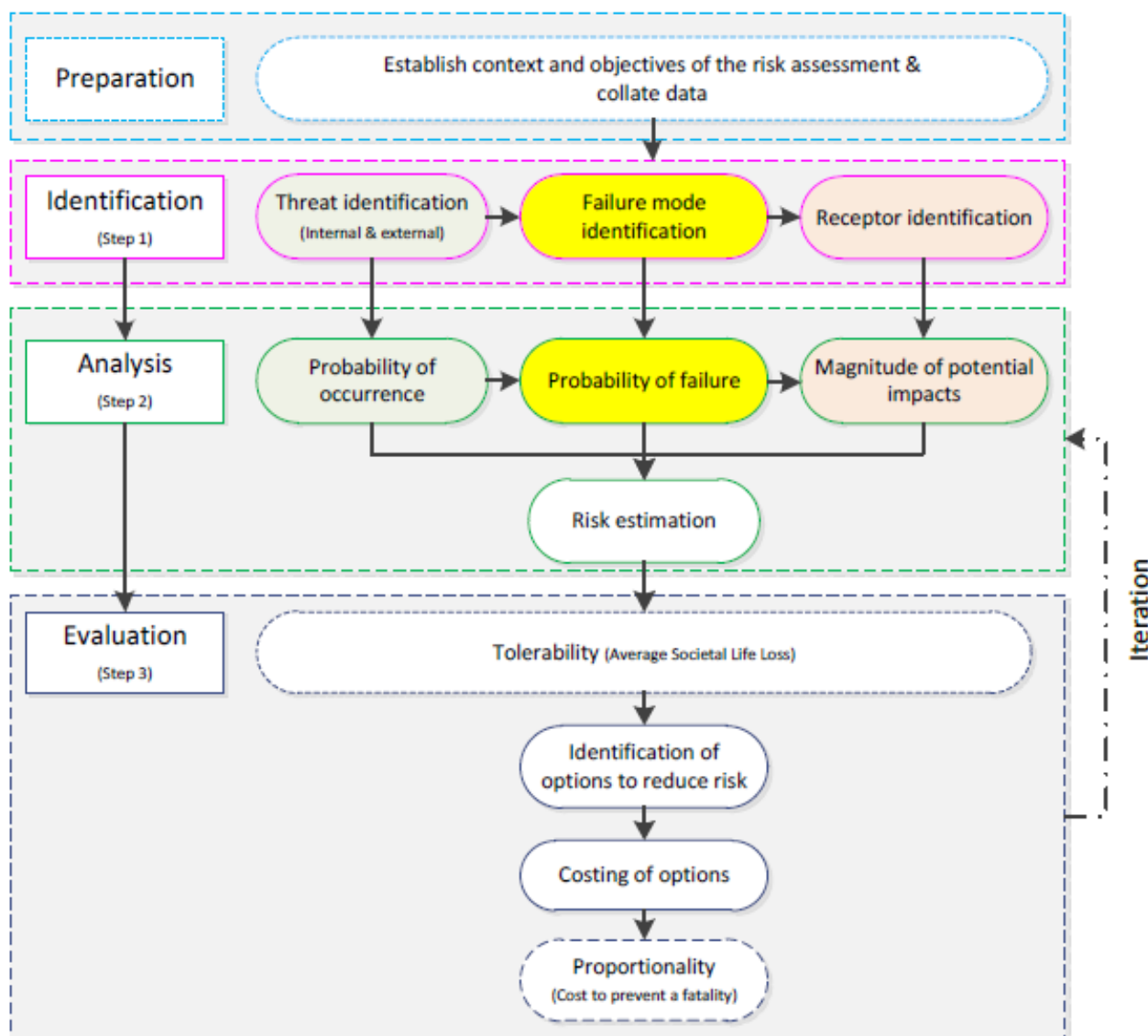
**Risikoevaluering**, hvor betydningen av den beregnede risikoen vurderes: 'Hva betyr den estimerte risikoen og hvordan bruker man denne informasjonen?'

BS EN 31010 (BSI 2010) stipulerer følgende:

"Risk assessment is that part of risk management, which provides a **structured process** that identifies how objectives may be affected, and analyses the risk in term of consequences and their probabilities before deciding on whether further treatment (risk reduction) is required".

Bowles et al (2013) presenterte alternative illustrasjoner av rammeverket for risikovurdering og risikohåndtering for dammer basert på BSIs metodikk. Illustrasjonene er mer eksplisitte enn Figur 2-1 men innebærer de samme trinnene som ISO (2009).

Figur 2-2 og 2-3 gjengir Bowles *et al's* illustrasjoner av rammeverket for risikovurdering. Vedlegg B gir mer informasjon om risikovurdering i Figur 2-3, både kvalitativt og kvantitativt.

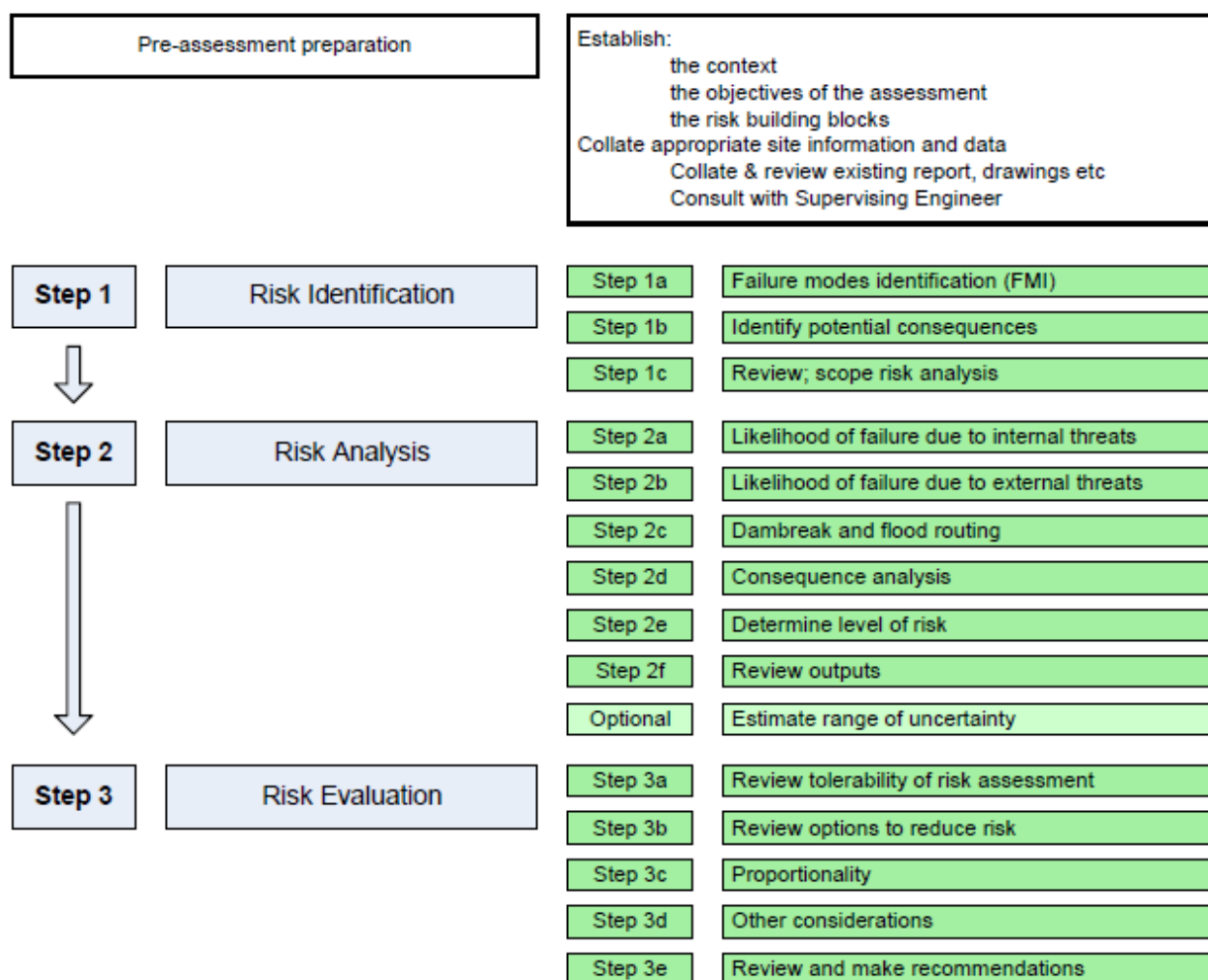


Figur 2-2. Illustrasjon av risikovurdering og risikohåndtering for dammer (Bowles et al 2013).

## 2.2 Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg i Norge

Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (2009), også kalt damsikkerhetsforskriften, kommer til anvendelse på norske vassdragsanlegg. Forskriften stiller spesifikke, konstruksjonsmessige krav til anleggene og krav til driften av anleggene. Det stilles også krav til den ansvarlige (normalt vassdragsanleggseieren) og dennes organisasjon, rådgivere og foretak som bygger vassdragsanlegg som omfattes av forskriften.

Grunnlaget for kravene følger av anleggenes plassering i en av fem konsekvensklasser (KK) avhengig av konsekvensene av brudd, svikt eller feilfunksjon. Det er kun konsekvensene som bestemmer konsekvensklassen, og ikke sannsynligheten for konsekvensene. Jo større konsekvenser, dvs. høyere konsekvensklasse, desto mer omfattende og strengere krav. Konsekvensklassene er basert på antall potensielt berørte boenheter, potensiell skade på infrastruktur og andre viktige samfunnsfunksjoner og potensiell skade på miljø og eiendom, etter kriteriene vist i Tabell 2-1.



Figur 2-3. Trinn i risikovurdering for dammer (Bowles et al 2013).



NVE(2014) har utarbeidet en veileder til forskriften. Denne veilederen går nærmere inn på hvilke vassdragsanlegg som skal klassifiseres, kriteriene som danner grunnlaget for plassering i de forskjellige konsekvensklassene og detaljert beskrivelse av krav til dokumentasjon.

Ved omregning til boenheter forutsettes at begrepet "boenhet" tilsvarer en bygning hvor det bor/oppholder seg 2,2 personer (som er gjennomsnittlig antall personer i en husholdning i Norge) i et helt døgn. Et bolighus blir da én boenhet forutsatt at det inneholder én leilighet. Andre bygninger omregnes til boenheter etter antall personer normalt til stede og deres oppholdstid.

Tabell 2-1. Konsekvensklasser (KK) med tilhørende kriterier (NVE 2014).




KK	Antall boenheter	Infrastruktur, samfunnsfunksjoner	Miljø og eiendom
4	> 150		
3	21-150	Skade på sterkt trafikkert veg eller jernbane, eller annen infrastruktur, med spesielt stor betydning for liv og helse.	Stor skade på spesielt viktige miljøverdier eller på fremmed
2	1 – 20	Skader på middels trafikkert veg eller jernbane eller annen infrastruktur med stor betydning for liv og helse.	Stor skade på viktige miljøverdier eller på fremmed eiendom.
1	Midlertidig oppholdssted tilsv. < 1 permanent boenhet	Skader på mindre trafikkert veg eller annen infrastruktur med betydning for liv og helse.	Skade på miljøverdier eller fremmed eiendom.
0	0	Ubetydelig skade	Ubetydelig skade

## 2.3 Bruk av risikovurdering i andre land og krav til damsikkerhet

Tradisjonelt har damsikkerhetsvurderinger vært basert på analyser av stabilitet, hydrologi og andre identifiserbare element i prosjektene og beslutninger tatt på bakgrunn av deterministiske laster som inkluderer ekstremhendelser som sannsynlige kraftigste jordskjelv og maksimum flom. Krav til damsikkerhet har tradisjonelt vært utformet som et sett av konstruksjonsmessige krav. Slike kriterier er nyttige for tilstander som kan analyseres numerisk.

Likevel har damindustrien i utlandet erfart at brudd og feilfunksjoner har skjedd med dammer som tilsynelatende var bygget i henhold til kriteriene, eller med dammer hvor det ikke var praktisk gjennomførbart å tilfredsstillte kriteriene. Med slike erfaringer har risikoinformert beslutningstaking ("risk-informed decision making") blitt et akseptert supplement til tradisjonelle analyser for vurdering av damsikkerhet (Charlwood 2010).

ANCOLD (2003) beskriver mulige roller for risikovurdering i bedømmelse av damsikkerheten:

-  en forbedring av den tradisjonelle metoden,
-  et alternativ til den tradisjonelle (deterministiske) tilnærmingen,
-  en eneste grunnlag for beslutninger.







ANCOLD (2003) støttet i den tiden bare den første av disse rollene, som svarer til det som blir omtalt som risikoinformert beslutningstaking. Men bruk av retningslinjene i ANCOLD (2003) og risikovurderingsteknikker har utviklet seg siden og flere av statene i Australia har akseptert den andre av disse rollene, dvs. bruk av tradisjonelle (deterministiske) tilnærminger sammen med risikovurderingstilnærminger i sikkerhetsforskrifter (Barker 2011). Altså, risikovurdering ikke som et alternativ til deterministiske analyser, men sammen med deterministiske analyser.

I Canada aksepteres også dokumentasjon av dammens sikkerhet basert på dokumentasjon av damsikkerheten gjennom risikoanalyser. I Sverige og USA benyttes risikoanalyser kun i risikoinformert beslutningstaking også i dokumentasjon av damsikkerheten. For prioritering av dammer i en portefølje er risikobaserte teknikker benyttet i stor grad, spesielt hvis samtlige dammer i damporteføljen har samme eier. "U.S. Bureau of Reclamation" eier, opererer og vedlikeholder 350 dammer klassifisert i "høy" eller "betydelig" fareklasse. De benytter risikobaserte teknikker for å vurdere sine dammer og for å prioritere damsikkerhetsstudier og påfølgende modifikasjoner. Formålet med studiene og tiltak er å oppnå den største risikoreduksjonen over hele damporteføljen med tilgjengelige midler (Charlwood 2010).

Damsikkerhet og bruk av risikoanalyser i Sverige, Australia, Canada og USA er oppsummert nedenfor. Dagens (2016) praksis er oppsummert nedenfor.

### Sverige

I Sverige er det ingen obligatorisk krav om at en risikoanalyse av dammer skal gjennomføres. Risikoanalyse har blitt brukt i noen få tilfeller i damsikkerhetsarbeidet. Imidlertid har utviklingen gått mot en risikoanalytisk tenkemåte. Grunnlaget for dette er "vurderingsbasisen" i kombinasjon med "konsekvensklassifiseringen" som er gitt i den svenske kraftbransjens retningslinjer for damsikkerhet. Alle kraftselskaper anvender disse i vurdering av damsikkerhet. Bruken av "brudd- og skademekanismer" og hendelseskjeder for å beskrive et hendelsesforløp er blitt stadig vanligere. (Åke Nilsson, WSP Sverige, personlig kommunikasjon). En samlet regulering av damsikkerhet ble innført i miljølovgivningen den 1 juli 2014 i henhold til loven (2014:114) endring av miljølovgivningen og i tre forskrifter. Reguleringen påvirker dammer der dam-svikt kan føre til konsekvenser av betydning fra et sosialt synspunkt eller truer menneskeliv. Forskriften omfatter (Maria Bartsch, Svenska Kraftnät, personlig kommunikasjon):

-  Damsikkerhets-klassifisering.
-  Konsekvensutredning.
-  Sikkerhetsstyringssystem.
-  Helhetsvurderinger av dammers sikkerhet.
-  Damsikkerhetsrapportering.
-  Årlige tilsynsavgifter.

### Australia

I Australia er damsikkerhet ansvaret til de individuelle statene. Noen stater (som New South Wales) har utviklet spesifikt regelverk, mens andre stater har et mer generelt regelverk som definerer ansvar. Den "Australian National Committee on Large Dams" (ANCOLD) har utgitt retningslinjer for risikovurdering og retningslinjer for design i forhold til jordskjelv og flom (ANCOLD 2003) New South Wales Government Dams Safety Committee (2006) la frem "Risk Management Policy

Framework For Dam Safety", som regulerer damsikkerheten. Sikkerhetskravene skiller mellom målbasert regulering (basert på risikoakseptkriterier) og standardbasert regulering (basert på eksplisitte krav). Normalt kreves det 'standard-basert' dokumentasjon av sikkerheten, men i enkelte tilfeller benyttes 'mål-basert' dokumentasjon av sikkerheten. I disse tilfellene gjelder akseptkriterier for New South Wales (med mål en årlig sannsynlighet for brudd, se neste delkapittel). Utviklingen går i retning av økt bruk av målbaserte tilnærminge. De første endringene er:

- ✚ Brudd- og skademekanismeanalyse ("Failure Mode Analysis", FMA) kreves som en del av sikkerhetsdokumentasjonen for dammer med potensiale for tap av liv.
- ✚ Nye sikkerhetskrav kreves for flomkapasitet for dammer.
- ✚ Sikkerhetskrav for dammer er forbedret gjennom inkorporering av risikostyringssystemer.
- ✚ Risikovurdering aksepteres som et verktøy i damsikkerhetsstyringen.

### Canada

Regulering av dammer i Canada er et provinsielt/territorielt ansvar. Canada har ikke noe føderalt tilsynsorgan eller overordnet program som styrer utviklingen av kravene for sikker forvaltning av dammer. Den Canadiske Dam Foreningen ("Canadian Dam Association", CDA) er en frivillig organisasjon dannet på 1980-tallet som tilbyr dameiere, operatører, konsulenter, leverandører og offentlige etater et nasjonalt forum for å diskutere damsikkerhet. CDA utarbeidet retningslinjer for damsikkerhet ("Dam Safety Guidelines" 2007 (CDA 2007; 2013) med fem hovedtemaer:

- ✚ damsikkerhetsforvaltning,
- ✚ drift,
- ✚ vedlikehold og overvåking,
- ✚ beredskap,
- ✚ damsikkerhetsgjennomgang, inkludert analyse og vurdering.

Ingen av Canadas provinser refererer eksplisitt til CDAs damsikkerhetsretningslinjer i lovgivning eller regulering, men noen provinser har benyttet deler av disse i lovgivning og regulering (Campbell *et al* 2010). Reguleringene i Alberta og British Columbia krever ikke eksplisitte risikovurderinger, men ekskluderer det heller ikke (ICOLD 2005). Myndighetene aksepterer dokumentasjon av damsikkerheten gjennom risikoanalyser. Resultatene av risikoanalyser i ulike former har blitt presentert myndighetene i British Columbia for ulike BC Hydro prosjekter. De ulike former for analyser har bidratt til å øke forståelsen av ulike aspekter av damsikkerheten og bedret kommunikasjonen, men har ikke blitt benyttet som eneste basis for eierens beslutninger og lovmessig godkjenning. I British Columbia reguleres damsikkerhet i 'vannloven' ("Water Act"). Dammene klassifiseres ut fra alvorlighet av verste potensielle konsekvens etter kriterier for tap av liv, miljø, kulturelle verdier, infrastruktur og økonomi. Alvorlighetsklassen avgjør hvor ofte det kreves aktiviteter knyttet til damsikkerheten som for eksempel inspeksjon, instrumentering og damsikkerhetsgjennomgang.

### USA

Lover og regulering av damsikkerhet varierer fra stat til stat. Den "Federal Emergency Management Agency" (FEMA) forvalter nasjonale damsikkerhetsprogrammet, som koordinerer alle føderale damsikkerhetsprogrammer og bistår stater i å forbedre sine reguleringer og programmer i forhold til damsikkerhet. FEMA (2015) presenterer "Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management" med retningslinjer for risikohåndtering av dammer. Retningslinjene

presenterer de generelle prinsippene for risikostyring og risikoinformerte beslutninger. Retningslinjer for damssikkerhet ble utgitt av "U.S. Bureau of Reclamation" og "US Army Corps of Engineers" ("Bureau of Reclamation" 2011; USACE 2014).

### UK

I Storbritannia, risikovurderinger som har vært utført for store dammer med kvantitative metoder med forenklete analyser og med detaljerte kvantitative analyser (Tier 2 to Tier 3 analyser som beskrevet i Vedlegg B).

## 2.4 Risikoaksept: kriterier og anbefalinger

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). Den individuelle risikoen innebærer altså en risikoøkning som kommer i tillegg til den underliggende sannsynligheten for å miste livet, dersom faren ikke eksisterte. Krav til individuell risiko formuleres som en årlig sannsynlighet. Tabell 2-2 oppsummerer retningslinjer for øvre grense av individuell risiko i Australia, USA og UK.

Risiko for flere dødsfall refereres til 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/politisk ansvar og flere personer kan miste livet. I dette perspektivet inkluderes hendelser med lav sannsynlighet og store konsekvenser.

Tabell 2-2. Sammenligning av kriterier i tre land for individuell risiko knyttet til dammer<sup>3</sup>.

Land/organisasjon	Øvre grense for individuell risiko	Referanse
Australia (ANCOLD)	10 <sup>-4</sup> /år for eksisterende dammer 10 <sup>-5</sup> /år for nye dammer eller store utvidelser	ANCOLD (2003)
Australia - New South Wales stat	10 <sup>-4</sup> /år for eksisterende dammer 10 <sup>-5</sup> /år for nye dammer eller store utvidelser	Eddleston (2015)
USA (U.S. Army Corps of Engineers)	10 <sup>-4</sup> /år	USACE (2014)
Storbritannia	10 <sup>-4</sup> /år	Eddleston (2015)

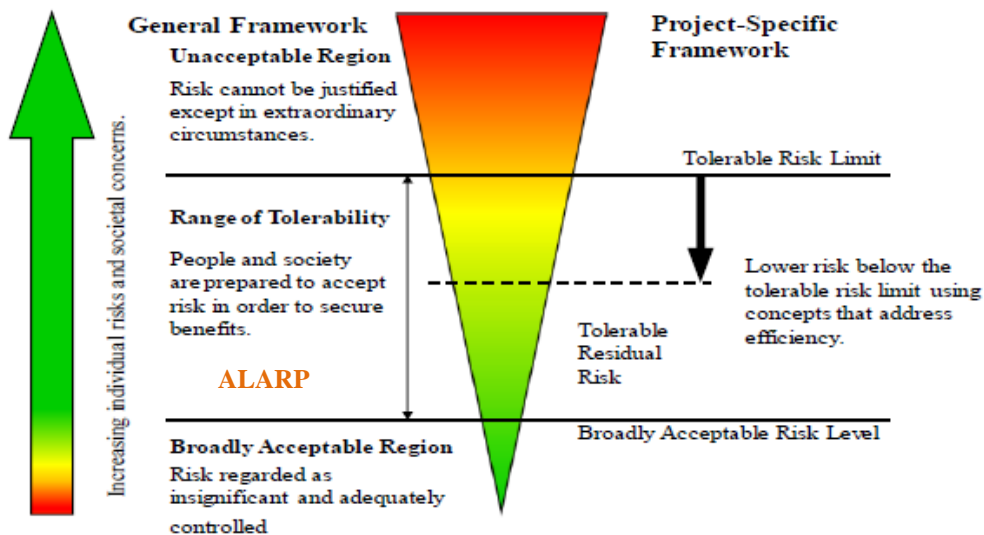
Hvor individuell risiko er kun en enkel sannsynlighet er samfunnsmessig risiko en årlig (vanligvis) sannsynlighetsfordeling over antall konsekvenser (for eksempel dødsfall). Regulering knyttet til mat, narkotika og miljø baserer seg på individuell risiko. Bygg og anlegg, naturfarer og transport styres vanligvis utfra hensyn til samfunnsmessig risiko. Samfunnsmessig risiko uttrykkes ved en årlig sannsynlighetsfordeling og skal inkludere hendelsene fra alle lasttilfeller, alle randbetingelser, alle bruddmekanismer og alle typer populasjonssårbarhet.

<sup>3</sup> Øvre grensen er for den mest eksponerte personen.

"The Health and Safety Executive" (HSE) i UK har et velkjent rammeverk for å evaluere risiko, det såkalte "Tolerability of Risk"-diagrammet (HSE 2010). Figur 2-4 er brukt for å kommunisere om risiko og vurdere om risiko skal reduseres. Rammeverket refereres til av Australia (ANCOLD 2003), Canada (CDA 2007) og USA (Munger *et al* 2009; USACE 2011). HSE's "Tolerability of Risk" rammeverk er basert på hvordan risiko styres i enhver individs liv. Individuell og samfunnsmessig risiko hører til én av tre kategorier (HSE, 2010; Le Guen 2010), som vist på venstre side av Figur 2-4.

- ✚ **"Broadly acceptable:** risks that people commonly live with in ordinary life (for example, health risks associated with using mobile phones).
- ✚ **Unacceptable:** risks are generally believed by individuals and society to be not worth taking regardless of the benefits (for example, building residential areas on toxic landfills)
- ✚ **Range of tolerability:** individuals and society are willing to live with the risks so as to secure certain benefits, provided that they are confident that they are being properly managed, and that they are being kept under review and reduced still further if and as practicable (for example, vehicular and airline travel)".

Med få unntak, risiko som er uakseptabel skal reduseres ned til "tolerabelt" nivå, uavhengig av kostnadene, minst til ALARP-området (Figur 2-4) (fra Engelsk "As Low as Reasonably Practicable"). Risiko i ALARP området omtales som "Tolerabel". I dette intervallet mellom akseptabel og uakseptabel risiko bør risikoen reduseres så mye som praktisk rimelig. Som regel vil det være en kost-nytte vurdering som avgjør hva som oppfattes som 'praktisk rimelig' hvor risikoreduserende tiltak skal implementeres.



Figur 2-4. Akseptabel og tolerabel risiko etter HSE (2001) og Munger *et al* (2009).

Bowles *et al* (2013) ga et eksempel på forskjellige kriterier for å evaluere risiko. Disse er gjengitt i Tabell 2-3 fra tre standpunkter, "egalitære" hensyn, brukshensyn og teknisk hensyn, og for en hybrid risiko som prøver å ta hensyn til så mange aspekter som mulig. Det er i dag ikke en unik 'standard' for hva en tolerabel risiko er, eller hvordan eller i hvilken enhet den skal uttrykkes.

Tabell 2-3. Alternative risikokriterier (Bowles et al (2013) basert på HSE (2001)).

Risk criteria	Principle
Equity based	'All individuals have unconditional rights to certain levels of protection'
Utility based	'Comparison between the incremental benefits of the measure to prevent the risk of injury or detriment, and the cost <sup>1</sup> of the measure'
Technology based	'The idea that a satisfactory level of risk prevention is attained when 'state of the art' control measures (technological, managerial, and organisational) are employed to control risks whatever the circumstances.'
Applied	Typically a hybrid of the pure criteria summarised above. The generalised framework for tolerability of risk (TOR) developed by HSE (2001) is intended 'to capitalise on the advantages of each of the above 'pure criteria' while avoiding their disadvantages' and to resemble the decision process that people use in 'everyday life'.

<sup>1</sup> Where cost is considered can include time and effort in addition to monetary aspects.

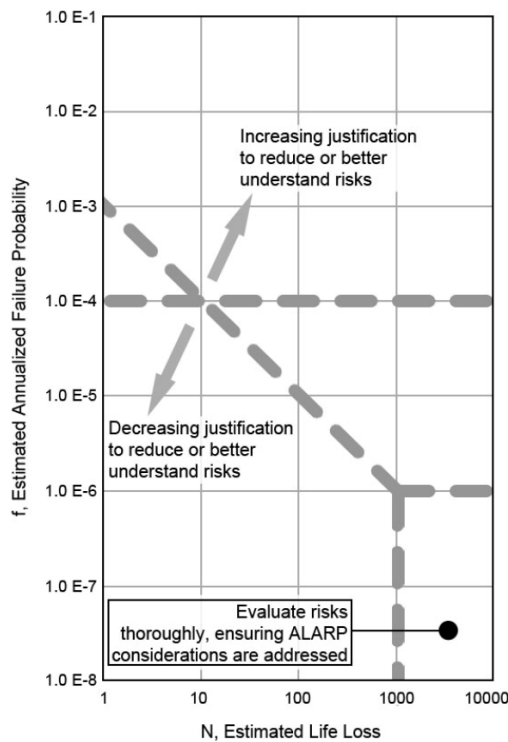
Risiko uttrykkes oftest ved såkalte  $F-N$  kurver eller  $f-N$  kurver, der  $F$  er kumulativ frekvens av hendelser og  $f$  er frekvens av hendelser.  $F-N$  kurver viser kumulativ frekvens ( $F$ ) og konsekvens ( $N$ , tall som beskriver konsekvensene) av hendelsene. Frekvens av hendelser som forårsaker, for eksempel, minst  $N$  dødsfall fremstilles som en funksjon av  $N$  i et koordinatsystem der begge akser er logaritmiske. Kurvene er ofte konstruert fra historiske data for å illustrere og sammenlikne risikoverdier som følge av ulike ulykkeshendelser som for eksempel dambrudd, flyulykker og skred. Aksen  $N$  kan angis også i andre verdier som, for eksempel, skadekostnader, antall stengte veier, mengde av forurensning eller radioaktivitet etc.

De fleste akseptkriterier for risiko opererer ikke med et skarpt skille mellom akseptabel og uakseptabel risiko. Vanligvis defineres det en øvre grense for risikoen (grense mot uakseptabel risiko) og en nedre grense (grense mot akseptabel risiko). I intervallet mellom akseptabel og uakseptabel risiko bør risikoen reduseres så mye som praktisk rimelig (tidligere omtalt som ALARP-området, "As Low as Reasonably Practicable").

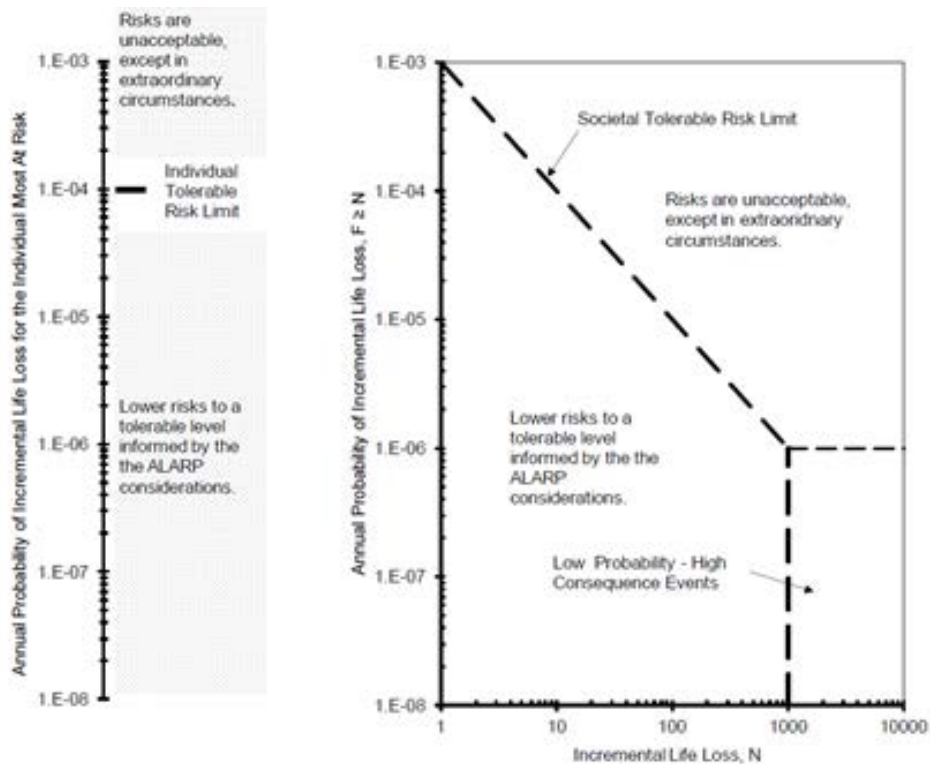
Eksempler på retningslinjer for øvre grense av akseptabel eller tolerabel samfunnsmessig risiko for dammer, er vist i Figur 2-5 til 2-8:

- Figur 2-5 Bureau of Reclamation(2011) (i form av  $f-N$  kurve).
- Figur 2-6 U.S. Army Corps of Engineers (2014) (krav til individuell risiko og  $F-N$  kurve).
- Figur 2-7 ANCOLD (2003) (i form av  $F-N$  kurve).
- Figur 2-8 New South Wales (NSW 2006) Dam Safety Committee (i form av  $F-N$  kurve)

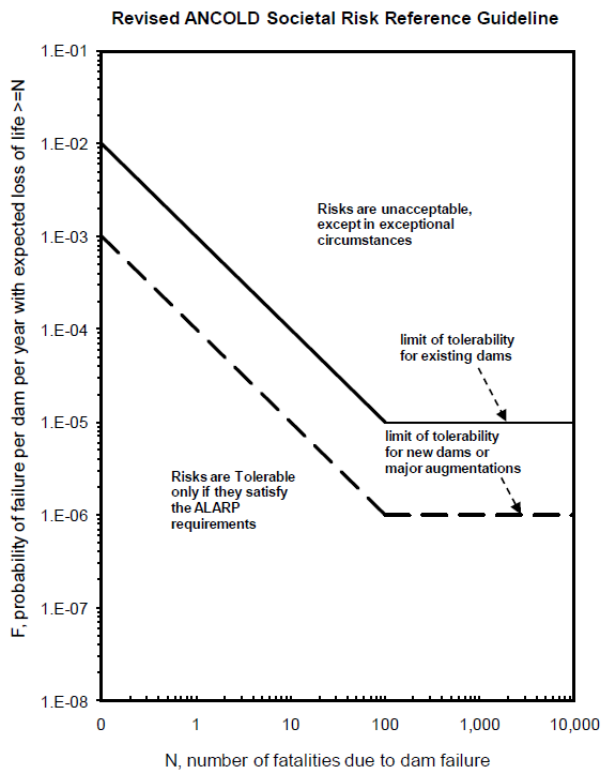
Bruken av  $F-N$  kurver for å evaluere risiko startet i 1990-årene under påvirkning fra ANCOLD (1994), BC Hydro (1993) og USBR (von Thun, 1996). Baecher et al (2015) oppsummerte utviklingen av kriteriene for akseptable risiko Nederland, UK, Hong Kong, Canada-USA og Australia. Dette er gjengitt i vedlegg C. Det nyeste bidraget er fra USACE (2014) i Figur 2-6.



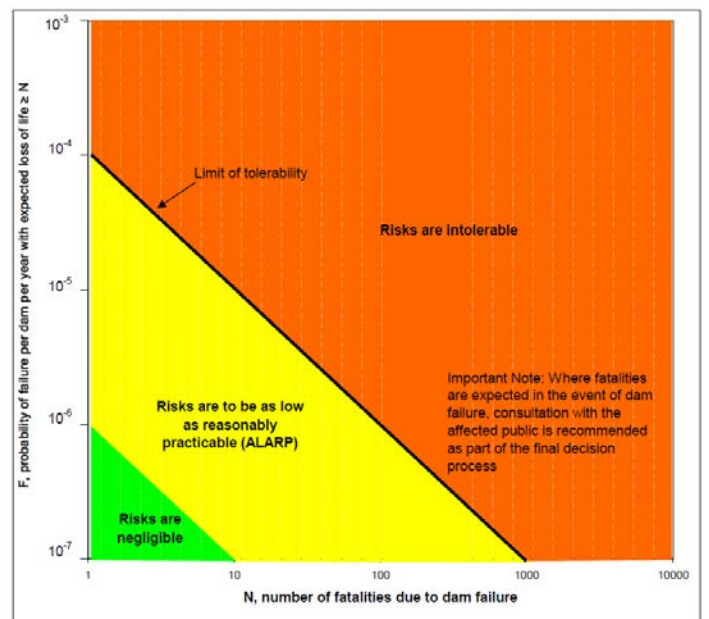
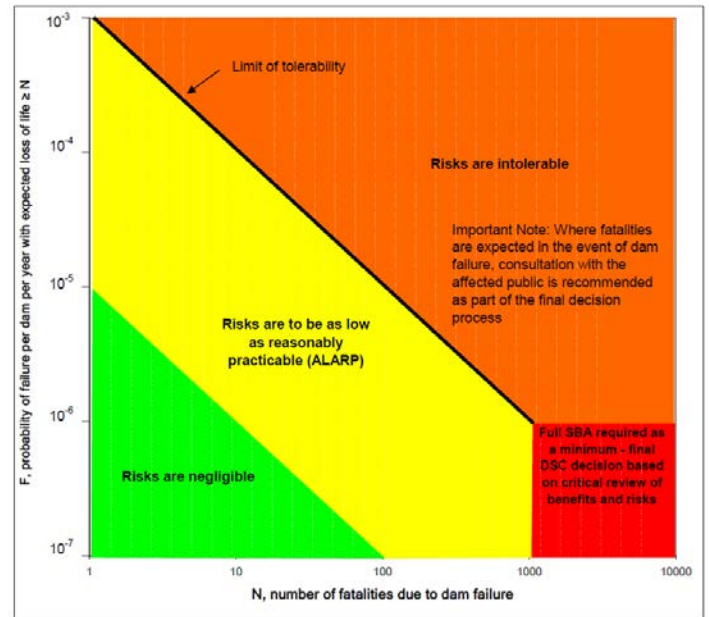
Figur 2-5. Retningslinjer for risikoaksept fra Bureau of Reclamation (2011).



Figur 2-6. Anbefalte risikoakseptkriterier fra U.S. Army Corps of Engineers (USACE 2014): anbefalinger for individuell risiko (venstre) og anbefalinger for samfunnsmessig risiko (høyre).



Figur 2-7 Retningslinjer for samfunnsmessig risiko fra F-N kurver fra ANCOLD (2003).



Figur 2-8. Retningslinjer for samfunnsmessig risiko for eksisterende (øvre) og nye dammer/store utvidelser (nedre) fra NSW (2006) (SBA = standards-based approach).

Figur 2-9 samler veiledninger for akseptabel risiko fra flere land i et F-N diagram. Ikke alle gjelder eksklusivt for dammer, flere er av generell karakter. Tallene er allikevel nokså sammenlignbare. For ett dødsfall er akseptable årlig sannsynlighet for brudd mellom  $10^{-2}$  to  $10^{-3}$ . For 10 dødsfall er årlig akseptabel risiko, i snitt, ca.  $10^{-4}$ . For 100 dødsfall er årlig akseptabel risiko mellom  $10^{-5}$  og  $10^{-6}$ .



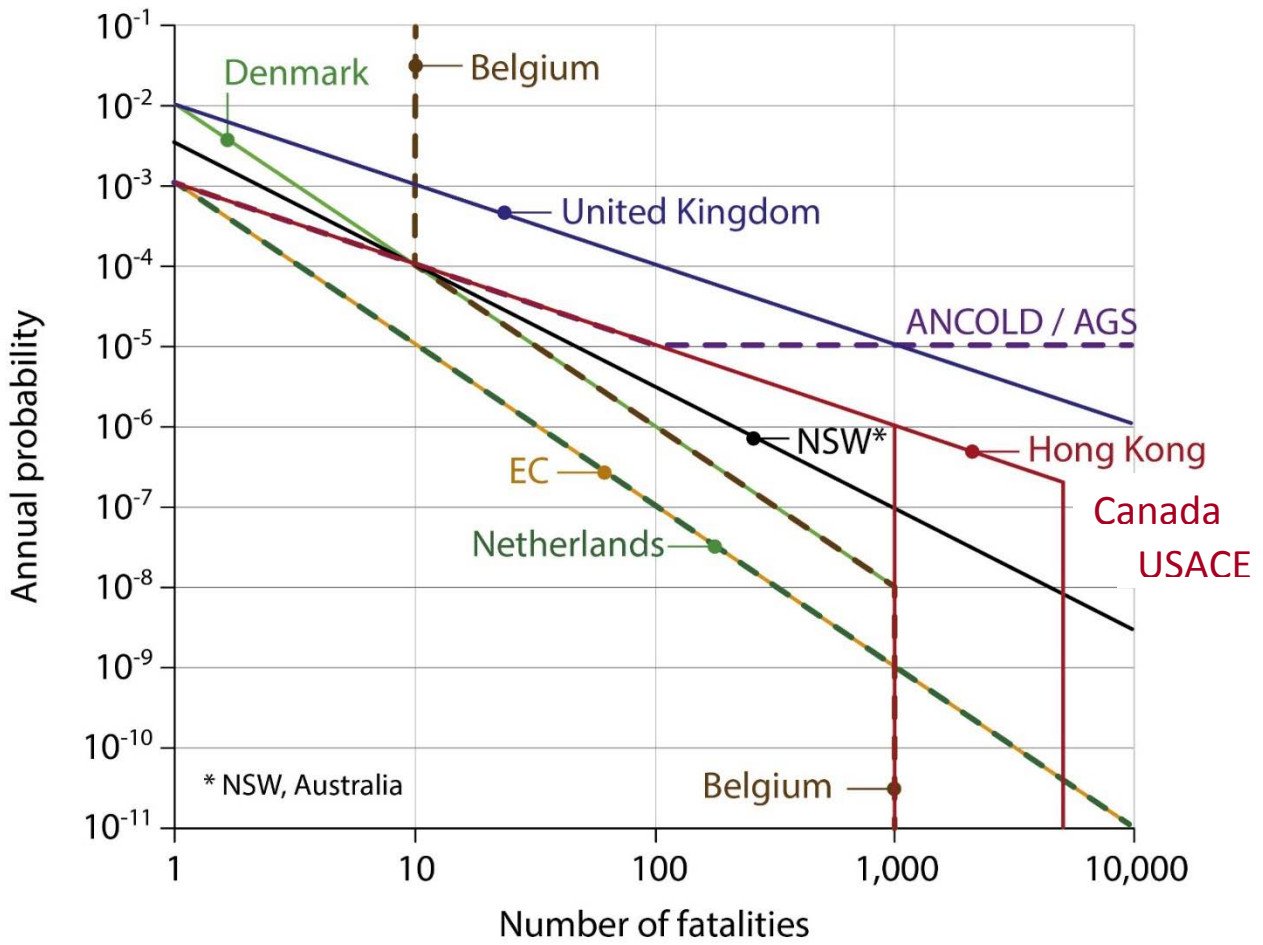


Figure 2-9. Risiko veiledninger fra flere land (etter Ho, Ken 2008, personlig kommunikasjon).

## 3 Risikoidentifisering

### 3.1 Risikoidentifiseringsprosessen

I risikoidentifiseringsprosessen for dammer beskrives potensielle brudd- og skademekanismer ("failure mode screening"). Mekanismer av interesse er de som kan resultere i et ukontrollert utslipp av oppdemmet vann. En potensiell brudd- og skademekanisme analyse er et viktig første skritt, antagelig det viktigste, i gjennomføringen av en risikoanalyse. Identifiseringen krever en detaljert gjennomgang og vurdering av dammens ytelse (for eksempel, gjennom instrumentering og observasjoner). Informasjon om frekvenser av ytre påkjenninger (som flom og jordskjelv) er også nødvendig for å kunne vurdere potensielle brudd- og skademekanismer initiert av de tilhørende ytre påkjenningene. Synspunkter og erfaringer fra de med førstehåndsinformasjon om dammen (som operatører, inspektører og oppsynsmenn) er essensielt.

Målet med en brudd- og skademekanisme analyse er å (1) identifisere de stedsspesifikke realistiske mulige brudd- og skademekanismer for en dam; (2) gi komplette beskrivelser av potensielle brudd- og skademekanismer, inkludert den initierende hendelsen, den progressive utviklingen av mekanismen som fører til et ukontrollert utslipp fra magasinet og konsekvensene; og (3) gi en generell beskrivelse av omfanget av bruddet, inkludert identifisering og dokumentering av faktorer som gjør brudd- og skademekanismen mer sannsynlig og faktorer som gjør det mindre sannsynlig. På samme måte identifiseres og dokumenteres faktorer som kan påvirke alvorlighetsgraden av konsekvensene (FEMA 2015).

Vick (2002) foreslo å starte risikoidentifiseringen med følgende spørsmål:

- ✚ Hvilke forhold kan lede til uønskede hendelser?
- ✚ Hvilke aspekter ved geologi, design eller konstruksjon kan anses som en svakhet?
- ✚ Hvilke undersøkelser, laboratorieforsøk eller numeriske analyser er tilgjengelige eller bør gjøres?
- ✚ Hvilke indikasjoner kan undersøkelsene, sammen med overvåkingsdata, gi, når det gjelder viktige fysiske egenskaper som kan ligge skjult i dammen eller i fundamentet?
- ✚ Er tilgjengelig informasjon konsistent og kan den valideres?

Verktøy for å visualisere og analysere kjeder av hendelser blir omhandlet i Kapittel 4.

### 3.2 Brudd- og skademekanismer for dammer

Generelle brudd- og skademekanisme-kategorier kan gis for dammer. For eksempel kan hovedgrupper av feilmønstre kategoriseres som: hydraulisk overtopping (flom som overstiger dam magasinet kapasitet), indre erosjon og/eller rørdannelse gjennom eller forbi dammen, massebevegelse og skrånings instabilitet eller strukturelt brudd i materiale i damkonstruksjonen, bevegelse og/eller brudd i damfundamentet, setninger og sprekkdannelse i betong- eller fyllingsdammer (ICOLD 2005; FEMA(<http://www.fema.gov/why-dams-fail>)).

For fyllingsdammer sier en nylig statistikk at over 95 % av dambrudd tilskrives an av de tre brudd- og skademekanismer (Personlig kommunikasjon, ISGSR 2015 Rotterdam):

- Overtopping
- Indre erosjon
- Instabiliteter i skråninger eller fundament

I en risikovurdering må disse generelle kategoriene vanligvis spesifiseres nærmere ved å gå dypere inn i systemet, og ved å utføre analysen på et mer detaljert nivå (ICOLD 2005). Risiko-identifiseringsprosessen heter på engelsk "Potential Failure Mode Analysis" (eller PMFA). Vedlegg D gir mer detalj om PMFA for overtopping og for indre erosjon.

### 3.2.1 Overtopping

Overtopping av dammer kan blant annet være forårsaket av flom som følge av ekstrem nedbør, setninger som følge et seismisitet eller brudd i oppstrøms magasin med påfølgende bølger i magasinet. Overtopping kan videreutvikle seg til dambrudd. Nøkkelfaktorer for overtoppingsrisikoen er i følge 'BoR and USACE' (2012):

- ✚ Damtype (materialet dammen består av).
- ✚ Type av overtopping (kontinuerlig strøm eller bølger).
- ✚ Faktorer viktige for erosjonsprosess i nedstrøms skråning.
- ✚ Flomfrekvens.
- ✚ Overløpskapasitet.
- ✚ Konfigurasjon av overløp og luker.
- ✚ Blokkering av overløpet av rasmasser og drivved i magasinet.
- ✚ Dybde og varighet av overtoppingen.
- ✚ Den faktiske formen på damkronen, spesielt høyden på laveste punkt.

Brown and Gosden (2004) gikk systematisk gjennom faktorer som må analyseres i en brudd- og skademekanismeanalyse. Faktorene oppgis for ulike initierende hendelser. De viktigste initierende hendelsene for overtopping for UK magasiner er gitt som ekstrem nedbør og brudd i oppstrømsmagasin. Andre initierende hendelser som vind- og skred-genererte bølger blir vanligvis også gjennomgått. Bidragsfaktorene som må analyseres i en brudd- og skademekanisme analyse er vist i Tabell 3-1 og 3-2 for ekstrem nedbør og brudd i oppstrøms magasin i UK. Brown and Gosden (2004) presenterte også bidragsfaktorer som må analyseres i brudd- og skademekanismer som går på intern instabilitet i en fyllingsdam. I tillegg til faktorene som er nevnt i tabellene bør det også tas hensyn til menneskelige feil og operasjonell svikt, som operasjon av lukene.

### 3.2.2 Indre erosjon

Hendelseskjeder som initieres av interne årsaker eller indre erosjon kan ikke fullt ut analyseres kvantitativt ved hjelp av modeller (Bowles *et al* (2013); Fell *et al* (2015); BoR and USACE (2012). Bowles *et al* (2013) anbefaler å bruke historiske data for kvantifisering av slike initierende hendelser. Selv om tallene er viktige, er følgende aspekter ved risikoanalysen enda viktigere:

- ✚ Utvikle en forståelse av dammens styrker, svakheter og sårbarheter i forhold til ulike indre brudd- og skademekanismer, og
- ✚ Vise oppbygning av "caset" eller hendelseskjeden for tallene som presenteres og anbefalte handlinger.

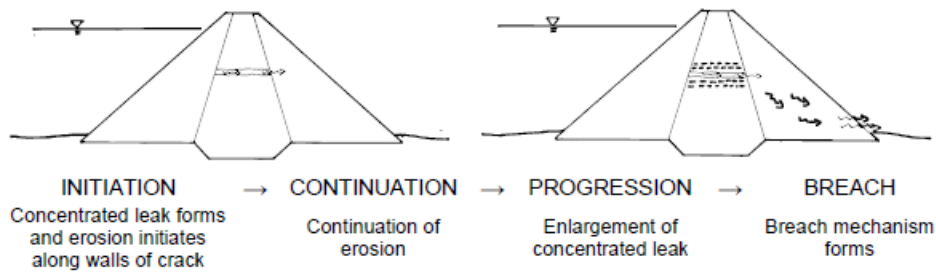
Tabell 3-1. Bidrag til brudd- og skademekanismer initiert av ekstrem nedbør (Brown og Gosden 2004).

Beskrivelse	Medvirkende faktor som bør vurderes i sannsynlighetsberegningene	
	Sannsynligheten for at en forringelsesmekanisme oppstår	Sannsynligheten for at demningen svikter gitt at en av forringelsesmekanismene inntreffer
Tilstand av dammen	Overløpskapasitet	Jevnheten/skjevhet og bredden på damkronen.
	Hindringer i overløp	Motstandsdyktighet mot erosjon av damkronen og nedstrøms materiale (både tilstedeværelse av vegetasjon og underliggende materiale).
	Magasin overflate	Eroderbarheten av skuldre/tå.
	Flom fribord	Skråningsstabiliteten i støttefylling/fundament
	Vegetasjon/trær rundt magasinet	
	Geometri og detaljering av støtteforbygninger	---
	Bratte skråninger i magasinet (forekomst av tidligere skred?)	
Andre	Magasinnivå før ekstremnedbøren	
	Hvis det er overløps- og utløpsluker: Varsling som gir mulighet for operasjon av lukene.	---
	Varighet av innstrømning	

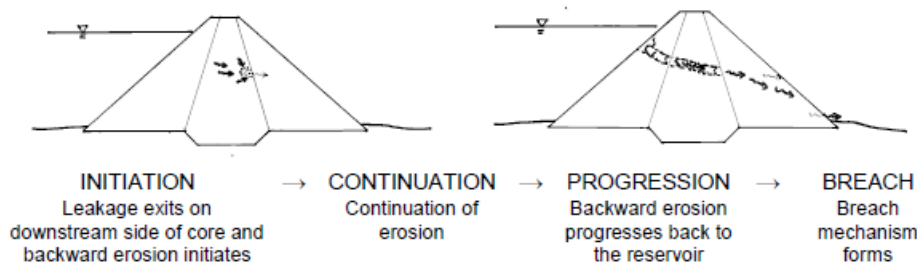
Tabell 3-2. Bidragsfaktorer til feilmøder initiert av brudd i oppstrøms magasin (Brown and Gosden 2004).

Beskrivelse	Medvirkende faktor som bør vurderes i de ulike sannsynlighetsberegningene	
	Sannsynligheten for at en forringelsesmekanisme oppstår	Sannsynligheten for at demningen svikter gitt at en av forringelsesmekanismene inntreffer
Tilstand av dammen	Som Tabell 3-1	Som Tabell 3-1
Andre	Magasinnivå før brudd av oppstrøms dam.	
	Hvis det er overløps og utløps luker: Varsling som gir mulighet for operasjon av lukene.	
	Tilstand av oppstrøms dam.	
	Utviklingshastigheten av dambrudd i oppstrøms dam.	---
	Demping av strømming mellom magasinene, for eksempel skog.	
	Vannvolumer i oppstrøms magasin.	

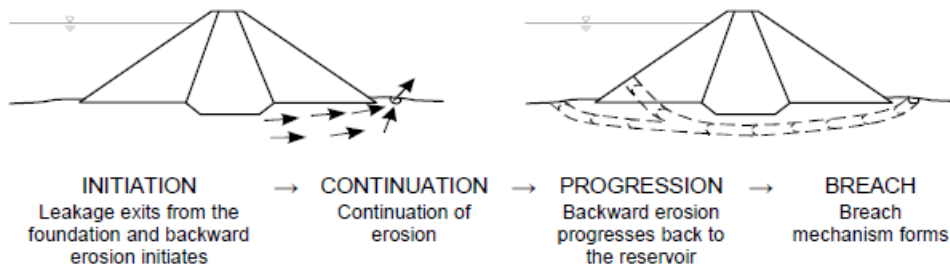
Den indre erosjonsprosessen kan deles inn i fire faser: 1) initiering av erosjon; 2) videreføring av erosjon; 3) progresjon av erosjon og 4) initiering av brudd. Eksempler på prosessen for erosjon i fyllingsdam er illustrert i Figur 3-1 og 3-2 og for erosjon i damfundamentet i Figur 3-3 og 3-4, gjengitt etter BoR and USACE (2012).



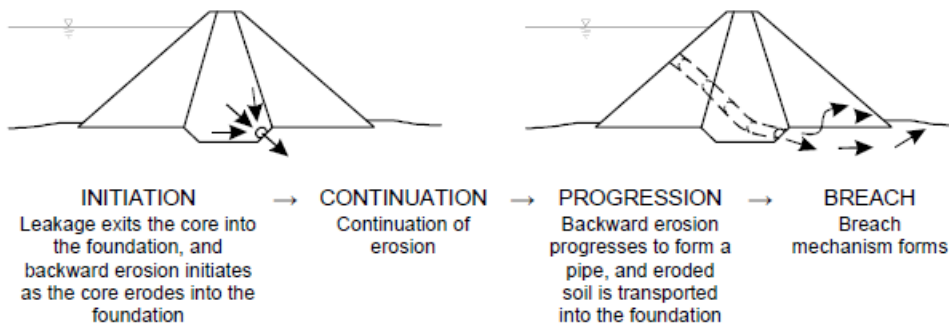
Figur 3-1. Indre erosjon i fyllingsdam initiert av konsentrert lekkasje (BoR and USACE 2012).



Figur 3-2. Indre erosjon i fyllingsdam initiert av bakoverrettet erosjon (BoR and USACE 2012).



Figur 3-3. Indre erosjon i damfundamentet initiert av bakoverrettet erosjon (BoR and USACE 2012).



Figur 3-4. Indre erosjon fra fyllingsdam inn i damfundamentet (BoR and USACE 2012).

### 3.3 Årsaker til og initiering av dambrudd

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). Brown and Gosden (2004) anså flom forårsaket av ekstremnedbør eller av brudd i oppstrøms magasin, samt intern instabilitet som de viktigste årsakene til dambrudd i Storbritannia. BoR and USACE (2012) fokuserte på flom og jordskjelv blant ytre påkjenninger.

Identifikasjon av farer utenfor systemet kan være relativt ukomplisert. Imidlertid kan identifisering av interne feilårsaker være mer komplisert og kan innebære behandling av interaksjoner mellom feilmoduser av undersystemer (ICOLD 2005).

Bowles *et al* (2013) og BoR and USACE (2012) vektla operasjonelle feil som en viktig tilleggs årsak til dambrudd. Operasjonelle feil kan ha utspring i utstyr, instrumentering, kontrollsystemer eller prosessfeil. Et eksempel på dette er feil i operasjon av portene eller lukene som kan skyldes mekanisk eller elektrisk feil, feil i kontroll systemet eller feil i beslutningsprosessen.

Bowles *et al* (2013) foreslo strategier for gjennomføring av analysene på ulike nivå med ulik detaljeringsgrad, der Nivå 1 har den laveste detaljeringsgraden og Nivå 3 har den høyeste detaljeringsgraden, som beskrevet i Kapittel 2 av rapporten og i vedlegg B. Tabell 3-3 viser sammenhengen blant initierende årsak, brudd- og skademekanisme og bruddtype for Nivå 1 analyse (laveste detaljeringsnivå). Tilsvarende tabell for Nivå 2 analyse finnes i vedlegg D (Tabell D1).

For å finne sannsynligheten for ulike intensiteter av ytre påkjenninger benyttes ofte farekurver. For å beregne sannsynlighet for dambrudd gitt ulike intensiteter av ytre påkjenninger benyttes ofte kurver for dammens respons på de ulike lastene ("system response curves"). Fremgangsmåte for å fremstille og benytte farekurver for jordskjelv og flom for ulike returperioder og intensiteter er gitt i vedlegg E.

Tabell 3-3. Ytre påkjenninger, feilmoduser og bruddtype, Nivå 1, forenklet fra Bowles et al (2013).

Initiation threat (root cause)	Progression (failure mode)	Breach	
<b>Embankment dams</b>			
Floods	Crest overtopping leading to scour	Embankment collapse	
	Spillway chute overtopping		
Wind generating waves	Crest overtopping by waves leading to instability of downstream slope		
Various, e.g., wave overtopping, intense rainfall	Saturation of downstream slope, leading to instability		
	Internal erosion – piping through the embankment *		
Deterioration of body, or foundation of dam	Piping through foundation, or from embankment into foundation		
	Piping along interface between structure and embankment		Local collapse along interface with structure
	Leakage from pipe/through culvert leads to internal erosion along interface between structure and embankment		
<b>Concrete dams and service reservoirs</b>			
Flood (excessive inflow for service reservoir)	Crest overtopping leading to scour/erosion of earthfill supporting concrete gravity structure – instability of gravity structure		Blocks slide/overturn
	Sliding/overturning on lift joint		
	Sliding/overturning in foundation		
Earthquake	Sliding/overturning on lift joint		
	Sliding/overturning in foundation		
Deterioration of foundation of dam	Differential settlement initiated stability failure *		
Other deterioration	---		

\* Failure mode should be included in all risk assessments

## 4 Risikovurdering

Valg av type risikoanalyse som bør gjennomføres vil variere med formålet med analysen. Nivået av informasjon og usikkerhetene som ligger til grunn for risikoestimatene vil også variere fra dam til dam. Vanligvis vil mer detaljerte risikoanalyser (med fokus på brudd- og skademekanismer og risikoredusering) i større grad benytte detaljerte analyser og gjennomføre studier for å redusere usikkerhetene.

Detaljerte risikoanalyser vil generelt bli ledet av en erfaren sakkyndig person og fortrinnsvis en kvalifisert tverrfaglig gruppe. FEMA (2015) klassifiserer risikovurderingene inn i 5 generiske hovedtyper av vurderinger: (1) potensiell brudd- og skademekanisme analyse (PFMA), (2) oversiktsanalyse av en portefølje av dammer ("Screening level"), (3) periodisk dampsikkerhetsvurdering, (4) brudd- og skademekanisme fokusert analyse ("Issue evaluation") og (5) risikoreduseringsanalyse. Potensiell brudd- og skademekanismeanalyse (PFMA) er beskrevet som en del av risikoidentifiseringsprosessen i Kapittel 3. De øvrige 4 hovedtypene av risikovurderinger er beskrevet kort nedenfor.

### 4.1 Oversiktsanalyser for en portefølje av dammer ("Screening level")

En oversiktsrisikoanalyse blir typisk utført for en portefølje av dammer. Målet er å (1) identifisere potensielle brudd- og skademekanismer, og (2) utvikle relative risikoestimer for hver dam slik at den relative risikoen blant dammene kan rangeres og gi grunnlag for prioriteringer av videre studier eller av utbedringer.

Informasjon om belastninger, konsekvenser, samt selve analysen som er knyttet til mulige brudd- og skademekanismer kan være veldig enkel og begrenset. Den består typisk av data som allerede er tilgjengelige eller innhentet umiddelbart før analysen. En oversiktsrisikoanalyse kan være et verdifullt verktøy for å identifisere usikkerheter knyttet til mulige brudd- og skademekanismer og til dam sikkerhetsspørsmål. Oversiktsrisikoanalyser kan enten gjøres kvantitativt eller kvalitativt (FEMA 2015).

Mange av de store dameierne i USA har utviklet systemer for prioritering av iverksetting av tiltak for sine dammer. Noen stater i Australia har lignende tilnærminger (Eddleston 2015). BC Hydros dam-prioriteringssystem rangerer dammer ved hjelp av et sårbarhets indeks ("Vulnerability index") som en erstatning for sannsynlighetsberegninger av fremtidig svikt i dammens funksjon (Rigbey 2015). Sårbarhets indeksen gir en sammensatt rangering fra god praksis eller gjeldende standarder, basert på alle kjente problemer og mangler, både faktiske og potensielle mangler som kan oppstå under normale og spesielle ytre påkjenninger. Manglene rangeres på bakgrunn av en rekke ulike variabler som ser på grad av avvik fra design i forhold til god praksis, i hvilken grad mangler kan være betydningsfulle for dammens sikkerhet, frekvens av testing og overvåking og effektivitet av forebyggende tiltak.



## 4.2 Periodisk damsikkerhetsvurdering – Norsk praksis

Det stilles krav til gjennomføring av periodisk damsikkerhetsvurdering i Norge, kalt revurdering. Revurdering er en grundig undersøkelse og tilstandsanalyse av et etablert vassdragsanlegg som skal klarlegge om anlegget har et tilfredsstillende sikkerhetsnivå. Vassdragsanlegg i konsekvensklasse 2, 3 og 4 (KK, Tabell 2-1) skal revurderes minst hvert 15.år og vassdragsanlegg i konsekvensklasse 1 minst hvert 20.år. Revurdering skal også foretas hvis det gjennom interntilsyn eller på annen måte avdekkes svakheter og mangler ved anlegget eller endringer i lastforutsetninger som kan påvirke sikkerhetsnivået ved anlegget (Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg 2009).

En omfattende vurdering av dammens sikkerhet på et gitt tidspunkt bør omfatte en risikoanalyse (FEMA 2015). Risikoanalysen for en periodisk dam sikkerhetsvurdering kan utføres av en person, men det er klare fordeler om det engasjeres et lite team for vurderingen. En periodisk risikoanalyse fokuserer på alle mulige feilmoduser som anses som realistiske ved dammen. Ved revurdering skal det gjennomføres nye flomberegninger dersom tidligere godkjente flomberegninger er basert på beregning av tilløpsflom som er eldre enn 15 år for anlegg i konsekvensklasse 2, 3 og 4 eller eldre enn 20 år for anlegg i konsekvensklasse 1. Flomberegninger og andre beregninger skal gjennomføres på nytt dersom det er gjort endringer på anlegg eller er avdekket store feil eller usikkerheter i datagrunnlaget, Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (2009).

## 4.3 Brudd- og skademekanisme-fokusert analyse ("Issue evaluation")

I en brudd- og skademekanisme fokusert analyse undersøkes det om én eller flere bestemte potensielle brudd- og skademekanismer kan kreve ytterligere prosjekteringsanalyser, studier eller undersøkelser for å støtte en kvantitativ risikoanalyse. Disse støtteaktivitetene gjennomføres for å redusere usikkerhet og øke troverdigheten til risikoestimaterne. Vanligvis vil feltundersøkelser, programmer for materialtesting, detaljerte studier og analyser, eller en kombinasjon av disse, utføres for å gi informasjon for risikoanalysen. Analyser og studier kan fokusere på laster, strukturell respons, konsekvenser, eller på en kombinasjon av disse. Denne type analyse utføres vanligvis med en gruppeleder, erfaren innen risikoanalyse, og gruppe som har erfaring og bakgrunn knyttet til den eller de potensielle feilmoduser som blir evaluert.

## 4.4 Risikoredueringsanalyse

En risikoreduksjonsanalyse brukes til å anslå restrisikoen etter at potensielle dam modifikasjoner eller ikke-strukturelle tiltak er iverksatt. Det innebærer vanligvis å gjennomgå risikoestimer fra en eksisterende risikoanalyse, bestemme hvilke hendelser som vil bli påvirket av endringene, og å re-estimere sannsynligheten for disse hendelsene. Under risikoreduksjonsanalysen, vurderes ulike risikoreduerende tiltak og det mest hensiktsmessige alternativet velges (analysen tar også hensyn til andre faktorer som kostnader for implementasjon av tiltak, risiko i konstruksjonsfasen, miljømessige og andre faktorer). I tillegg er det nødvendig å analysere risikoen med de valgte utbedringstiltakene iverksatt, for å verifisere at risikoen reduseres til ønsket nivå.

## 4.5 Metodikk for damrisikoanalyser

Det finnes ulike teknikker for å visualisere og estimere kritikaliteten av potensielle brudd- og skademekanismer:

- ✚ Bruk av hendelseskjeder og hendelsestre-analyse.
- ✚ Feiltre-analyse.
- ✚ Bayesisk nettverk ("Bayesian network) analyse.
- ✚ Brudd- og skademekanismer, effekt og kritikalitet analyser (FMECA).

Hendelseskjeder har den fordel at de er tettere knyttet til observasjonsmetode på følgende måter:

- ✚ De viser hovedmekanismen av forringelse som kan lede til dambrudd for en initierende årsak.
- ✚ De kan vise samtlige potensielle feilmoduser.
- ✚ De kan inkludere kommentarer og begrunnelser for valg, både når det gjelder sannsynligheten for at en mekanisme vil inntreffe og sannsynligheten for dambrudd gitt at mekanismen inntreffer.
- ✚ Hendelseskjeder kan også benyttes for å analysere konsekvensene av dambruddet.

Hendelseskjedene kan visualiseres gjennom hendelsestrær, som er den vanligste og mest brukte metoden for å gjøre risikoanalyser for dammer. De følgende avsnittene gjennomgår analyser ved hjelp av hendelsestrær, feiltre-analyse, Bayesisk nettverk, og FMECA analyser ("Failure Mode-Effects-Criticality Analysis"). Alle er relevante for sannsynlighetsberegninger for hendelser i hendelsestreet.

Metodene bruker en tilnærmet seks-trinn prosedyre (Vick 2002; Høeg 1996):

1. Befaring og inspeksjon av dammen for å bli kjent med dammen og grunnforholdene.
2. "Failure mode screening", eller valg av utløsningsårsaker og bruddmekanismer.
3. Bygging av modellen (feiltre, hendelsestre, Bayesisk nettverk eller FMECA).
4. Estimert av sannsynligheter for hver hendelse.
5. Evaluering av resultater.
6. Iterasjon.

En slik evaluering er ofte gjort ved å bringe sammen en gruppe eksperter. Vick (2002) foreslo at

"The collective judgment of experts, structured within a process of debate, can yield as good an assessment of probabilities as mathematical analyses".

### 4.5.1 Hendelsestre-analyse

Et hendelsestre er et logisk diagram med forgreninger som sprer seg utover som et tre. Hendelsestreet viser mulige ikke-overlappende hendelseskjeder og utfall som kan føre til skade etter en uønsket hendelse. Analysen kan anvendes både kvalitativt og kvantitativt. Hendelsestreanalysen kan vurdere avdempende og forverrende hendelser, ved å ta hensyn til tilleggssystemer, funksjoner og barrierer i vurdering av responsen på den initierende uønskede hendelsen.

Hendelsestre-analyser kan benyttes for modellering, beregning og risikorangering av ulike scenarier utløst av en initierende uønsket hendelse. Hendelsestreanalyse kan benyttes både i risikoidentifiseringsfasen og i risikovurderingsfasen. Metoden kan brukes kvalitativt og kvantitativt.

I en kvantitativ risikoanalyse vil neste steg etter at hendelsestreet er definert, være å fastsette sannsynligheten for de enkelte hendelsene i treet. Sannsynligheten som gis er betingede, gitt at alle hendelsene tidligere i hendelseskjeden har inntruffet. Beregning av sannsynligheter for hendelsene i hendelsestreet blir gjennomgått senere i kapittelet. Sannsynligheten for en hendelseskjede (én spesifikk forgrening i hendelsestreet) fås ved å multiplisere alle sannsynlighetene langs forgreningen.

For hver kjede av hendelser må det også bestemmes hvilken konsekvens den gir. Det er vanlig å dele inn i konsekvensklasser, for eksempel i form av potensielt utstrømmet vannvolum. Sannsynligheten for hver konsekvensklasse fås ved å summere opp sannsynlighetene for samtlige hendelseskjeder som leder til den bestemte konsekvensklassen. I en risikoreduseringsanalyse kan hendelsestrær benyttes for å vurdere hvordan utfallet påvirkes av ulike utbedrings- eller risikoreduserende tiltak.

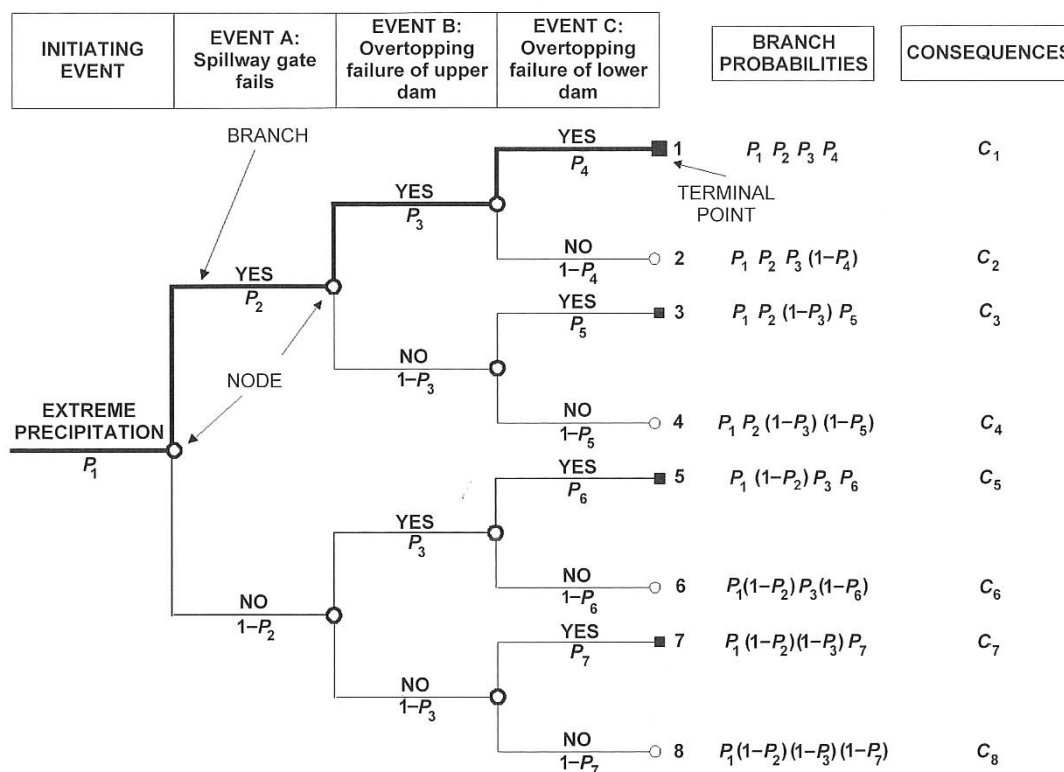
Figur 4-1 viser essensielle trekk ved en hendelsestre-analyse benyttet i risikoanalyser for dammer. Disse omfatter en initierende hendelse (indre eller ytre), hendelser som beskriver systemets respons på hendelsen, om hendelseskjedene leder til brudd eller ikke og hvilke konsekvenser hver av hendelseskjedene vil få. Figur 4-1 viser også hvordan sannsynlighetene for hver hendelseskjede fås ved å multiplisere sannsynlighetene langs hendelseskjeden.

Vedlegg F gir tre eksempler av risikoanalyser for dammer med hendelse-tre analyser: hendelseskjeder for rørdannelse ("piping"), hendelsestre for konsekvens og hendelsestre for brudd i fyllingsdam utsatt for flom.

#### 4.5.2 Feiltre-analyse

Feiltre-analyser anvendes først og fremst for identifisering og utredning av årsaker til at uønskede hendelser inntreffer. Utgangspunktet er en uønsket hendelse, en såkalt topphendelse. Hendelsen dekomponeres suksessivt ned til ønsket detaljnivå for at feilene som har forårsaket topphendelsen skal oppdages. Metoden kan ha både kvalitativ og kvantitativ i karakter.

En feiltre-analyse består av tre steg: konstruksjon av feiltreet, identifisering av hvilke kombinasjoner av hendelser som har forårsaket topphendelsen og en vurdering av sannsynligheter. I konstruksjonen av feiltreet beskrives topphendelsen og de feilhandlinger og feilfunksjoner som kan være de bakenforliggende årsakene til topphendelsen. Det skjer gjennom ulike logiske operatører som for eksempel de mest brukte "ELLER" og "OG". Disse viser om topphendelsen er forårsaket av en enkelthendelse eller flere hendelser i kombinasjon. De identifiserte feilhandlinger og feilfunksjoner dekomponeres videre ned i mindre hendelser. I neste steg identifiseres de hendelsene som påbegynte kjeden, også kalt basishendelsene. Deretter gjøres en kartlegging av spesifikke kombinasjoner av hendelser.



Figur 4-1. Essensielle trekk ved et hendelsestre i risikoanalyse for dammer (Hartford and Baecher 2004).

Feiltrær benyttes oftest i kombinasjon med hendelsestrær, som et verktøy for å beregne sannsynligheten for enkelthendelser i hendelsestreet. Men feiltrær kan også benyttes i risikoidentifisering eller i overordnet risikoanalyse. Ved analyse av feilmoduser som omfatter feiloperasjoner og kompliserte interaksjoner mellom systemer kan det være mer hensiktsmessig å benytte feiltrær (BoR and USACE 2012). Eksempel der feiltre –analyse er brukt for en overordnet risikoanalyse er gitt i vedlegg F.

### 4.5.3 Bayesisk nettverk analyse ("Bayesian Network")

"Bayesisk nettverk"-metoden er relativt ny og er beskrevet i noe detalj i vedlegg G i en nyere fagartikkel forfattet av NGI (Liu *et al* 2015). Flere av faguttrykkene er fortsatt kjent kun på engelsk. den av Liu *et al* 2015. Bayesisk nettverksanalyser er et alternative til hendelsestre-analyser og kan lett suppleres med Monte Carlo analyser for å ta hensyn til usikkerheter i sannsynlighetsverdiene på hendelsestrærne og for å kvantifisere den probabilistiske fordelingen av sannsynlighetene for brudd.

En Bayesisk nettverk (BN) (på engelsk "Bayesian network", "Bayes net" eller "causal network") er en probabilistisk modell uttrykt som:

$$B_s = G(Z, E)$$

hvor  $B_s$  er nettverkets struktur,  $Z$  er vector med usikre parametre ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ ), og  $E \in Z \times Z$  er et sett "buer" som gir forholdet mellom de probabilistiske hendelsene. Hver  $Z_i$  parameter er definert som et diskretvariabel eller et continuum. Den kombinerte sannsynlighet kan uttrykkes som (se vedlegg G):

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

hvor  $pa(z_i)$  er assosiert med  $z_i$ . Et eksempel på anvendelse er gitt i Vedlegg G og i NGI (2016).

#### 4.5.4 Brudd- og skademekanisme-effekt-kritikalitet analyser (FMECA)

Brudd- og skademekanisme- og effekt analyser (FMEA- "Failure Mode and Effects Analysis") er en systematisk, proaktiv metode for å evaluere en prosess eller et system for å identifisere hvor og hvordan uønskede hendelser kan oppstå. Analysen vurderer den relative innvirkningen av ulike typer svikt for å identifisere komponenter med størst behov for forbedring. FMEA består av gjennomgang av:

- ✚ Alle potensielle feilmoduser av ulike deler av systemet/prosessen (Hva kan gå galt?)
- ✚ Årsakene til svikten i systemet/prosessen (Hvorfor skjer svikten?)
- ✚ Brudd- og skademekanismen (Hvordan oppstår svikten?)
- ✚ Effekter (Hva er konsekvensene for systemet/prosessen ved svikt i de ulike komponentene?)
- ✚ Tiltak (Hvordan kan svikt unngås eller negative effekter av svikt bekjempes?)

FMEA-analysen blir brukt for å evaluere uønskede hendelser i prosesser og for å forhindre dem ved å korrigere prosessene proaktivt heller enn å reagere på uønskede hendelser etter de har inntruffet. Fokuset på forebygging reduserer risikoen både for brukere og operatører av systemet. Analysen er spesielt nyttige for å evaluere en ny prosess før implementering og for å vurdere av effekten av en foreslått endring av en eksisterende prosess.

FMECA-tilnærmingen ("Failure Mode-Effects-Criticality Analysis") utvider FMEA-analysen slik at hver identifisert feilmodus rangeres i forhold til viktighet og "kritikalitet". Kritikalitetsanalysen er vanligvis kvalitativ eller semi-kvantitativ, men kan kvantifiseres ved å bruke observerte sviktfrekvenser. FMECA-analysen er en metodikk for å kartlegge hvilke måter et utstyr, en prosess eller lignende kan feile på, hvilken effekt det har lokalt og globalt samt kritikaliteten av denne feilen. Kritikalitet er her definert som en kombinasjon av konsekvens og hyppighet.

I risikoanalyse for dammer kan FMEA og FMCEA metodikken benyttes for deler av systemet eller for enkelthendelser i en hendelseskjede.

BoR and USACE (2012) utga retningslinjer for gjennomføring av risikoanalyser for dammer. Retningslinjene er gjengitt i vedlegg H, inkludert en typisk agenda for et arbeidsmøte med risikoanalyser av dammer.

## 4.6 Sannsynlighet for enkelthendelser

Sannsynlighetene for enkelthendelser i hendelsetreet kan beregnes ved hjelp av 3 ulike hovedstrategier (hver av strategiene er beskrevet i delkapitlene nedenfor):

- ✚ Statistiske estimat/bruk av historiske data: f.eks. benytte statistikk for å beregne sannsynlighet for initiering av intern erosjon
- ✚ Probabilistisk analyse: beregning av sannsynlighet ut fra en fysisk modell der det tas hensyn til usikkerhetene i modell parameterne og usikkerhetene forbundet med modellen
- ✚ Ekspertvurdering: vurdering av sannsynligheter basert på tidligere erfaring, enten vurdert av en ekspert eller av en gruppe av eksperter.

#### 4.6.1 Bruk av statistikk, empiriske data

Sannsynligheter kan beregnes statistisk hvis det foreligger empiriske data fra tidligere hendelser. Slike data kan for eksempel være systematiske observasjoner av nedbørmengder og andre værparametere, vann-nivå i magasinet, jordskjelvaktivitet eller sviktfrekvensen av ulike komponenter i dam-systemet. Hvis datamengden er stor kan det utvikles farekurver, som beskriver sannsynligheten for at en gitt parameter (for eksempel vann-nivå eller jordskjelvintensitet) overstiger ulike nivåer. Farekurver for seismisk analyse og magasin nivå er beskrevet i vedlegg E.

På konsekvenssiden kan historiske data på dødelighet eller andre konsekvenser av dambrudd benyttes for å forutsi omfanget av konsekvensene ved fremtidig dambrudd.

#### 4.6.2 Fysiske/numeriske modeller der usikkerheter inkluderes

##### Probabilistisk analyse

I en probabilistisk analyse vil det typisk benyttes samme modell som en ville ha benyttet for deterministisk analyse, men inngangsparameterne beskrives som sannsynlighetsfunksjoner og det benyttes egnet metodikk for å beregne sannsynligheten ut fra fysisk modell, dens usikkerhet og usikkerhetene i inngangs parameterne. En mye brukt metode er Monte Carlo Simulering som består i å kjøre en rekke analyser med ulike kombinasjoner av de usikre inngangsparametere hentet fra de respektive sannsynlighets funksjonene. Det er da nødvendig å beskrive inngangsparameterne med en sannsynlighetsfunksjon med angivelse av middelværdi, standard avvik og probabilistisk fordelingsfunksjon. Det finnes også andre teknikker for å gjøre probabilistiske vurderinger som FOSM og FORM (nevnt i vedlegg E).

Eksempler på sannsynligheter som kan beregnes vha. probabilistiske metoder er probabilistisk stabilitetsanalyse. I en probabilistisk stabilitetsanalyse beregnes en sannsynlighetsfunksjon for sikkerhetsfaktoren (ofte formulert som forholdet mellom motstand og belastning) ved hjelp av sannsynlighetsfunksjoner for inngangsparameterne. Videre beregnes sannsynligheten for at sikkerhetsfaktoren er mindre enn 1, dvs. at belastning er større en motstand som gir instabilitet. Ytterligere beskrivelse av probabilistiske metoder finnes i vedlegg E.

##### Feiltre-analyser

Feiltre-analyser kan benyttes for å beregne sannsynlighet for hendelser i hendelsestreet eller som overordnet rammeverk for å bestemme sannsynligheten for dambrudd. Hartford og Baecher (2004) gir eksempler på feiltre-analyse for beregning av sannsynligheter i hendelsestrær. Et eksempel er vist i Figur 4-2. For beregning av sannsynligheter må først sannsynligheten for basishendelsene (hendelsene nederst i feiltreet) estimeres. Sannsynlighetene beregnes deretter oppover i treet ved

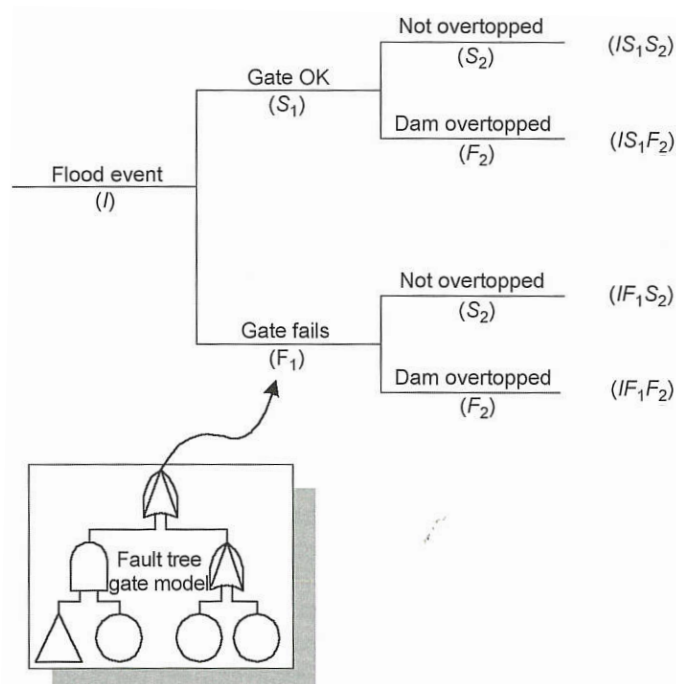
hjelp av regneregler for de logiske operatorene, helt opp til beregning av sannsynligheten for topphendelsen.

Usikkerheter i overordnet hendelsestre-analyse

Sannsynligheter kan beregnes fra usikkerhetene. Imidlertid vil også selve sannsynlighets-estimatene være forbundet med usikkerheter. Håndtering og kvantifisering av disse usikkerhetene kan gjøres gjennom:

- ✚ Sensitivitetsanalyser for sannsynlighetsberegninger av hendelsene i hendelsestreet og for den beregnede risikoen: Hvor mye kan de ulike sannsynlighetsestimatene variere med varierende parameterverdier eller varierende antagelser? Hvor mye kan risikoen variere? Man bør prøve å unngå kombinasjoner som antar "best case" eller "worst case" av alle parametre samtidig.
- ✚ Usikkerhetsanalyser for sannsynlighetsberegningene i hendelsestreet eller for den beregnede risikoen ved matematisk kombinasjon av alle usikkerhetene eller gjennom probabilistisk analyse.

BoR and USACE (2012) foreslo å definere sannsynlighetene i hendelsestreet som sannsynlighetsfordelinger og å bruke Monte Carlo simulering i beregningen av sannsynligheten for dambrudd.



Figur 4-2. Feiltre for beregning av sannsynligheten for feil ved operasjon av en port (Hartford og Baecher 2004).

### 4.6.3 Ekspertvurderinger og verbale sannsynligheter

I risikoanalyser av dammer vil det oppstå situasjoner der det ikke finnes modeller eller statistikk for å beregne sannsynligheter. Sannsynligheter kan da anslås ved hjelp av subjektive sannsynlighetsmetoder basert på 'graden-av-tro' (på engelsk "degree of belief"). Sannsynlighetene kan da anslås som et estimat eller som en spennvidde av mulige sannsynligheter. Ulike publiserte

forhold mellom verbal beskrivelse av sannsynlighet og tallverdier er vist i Tabell 4-1. Ytterligere sammenhenger mellom verbal beskrivelse av sannsynlighet og kvantitativ sannsynlighet er gitt i Tabell 4-2 og 4-3. Anbefalingene fra BoR og USACE (2012), som gitt i Tabell 4-3 samsvarer med venstre kolonne i Tabell 4-1.

I analysene gjennomført i Norge ble tallverdiene i Tabell 4-4 både i 1996 og 2016. Tabell 4-4 gir en verbal beskrivelse (på engelsk med en tilnærmet oversettelse på norsk) og sannsynligheten som assosieres med nytt hver av de verbale beskrivelsene. Tabell 4-4 baserer seg på tidligere erfaringer, arbeid av Høeg (1996) og Vick (2002) og tidligere analyser for dammer. IPCC (2012) foreslo at et tallområde bør brukes for å beskrive sannsynligheter i stedet for de enkelte faste tall i Tabell 4-4 for å uttrykke større usikkerhet. Tabell 4-5 presenterer tallområde-verdier som ble brukt i analysen av norske dammer i 2016.

For subjektiv sannsynlighetsvurdering er det fordelaktig om flere eksperter er involvert i å gjøre estimatene. Subjektiv estimering er derfor vanligvis gjort i grupper av eksperter med bred erfaring. Gruppemedlemmer kan bidra i diskusjoner som gjør at gruppen som helhet kommer frem til en mer omfattende begrunnelse for et estimat enn det hver enkelt kunne klart på egenhånd. Imidlertid synes noen land (Canada og Australia) å ha tatt et steg tilbake og bruker "Verbal Descriptors" heller enn "Subjective Probabilities".

Tabell 4-1. Sammenligning av publiserte verbal beskrivelse av sannsynlighet og sannsynlighetsverdier for betinget sannsynlighet og årlig sannsynlighet (Fell, R. (2015) personlig kommunikasjon).

Verbal Descriptor	Conditional Probability				Annual Probability		
	USBR (2003)	Vick (1992)	Bowden <i>et al.</i> (2003)	Reagan <i>et al.</i> (1989)	AGS (2000) Appendix G	De Ambrosio & Mostyn (2004)	Moon & Wilson (2004)
Virtually certain	0.999	0.99	0.999	0.9	Approx 0.1 *	$\geq 0.1^*$	$> 0.2^*$
Very likely	0.99	0.9		0.85			0.2 to 0.02
Likely	0.9			0.7	Approx 0.01	$\geq 0.01$	0.02 to 0.002
Neutral (even chance)	0.5	0.5		0.5			
Unlikely	0.1		0.001	0.15	Approx 0.0001	$\geq 0.0001$	$< 0.0002$
Very unlikely	0.01	0.1	0.0001	0.1			$<< 0.0002$
Virtually impossible	0.001	0.01	0.000001	0.02	$< 0.000001^*$	$< 0.000001^*$	

Note: \* Verbal descriptor similar

Tabell 4-2 Verbal beskrivelse av sannsynlighet og kvantitativ sannsynlighet (Barneich et al 1996).

Description of Condition or Event	Order of Magnitude of Probability Assigned
Occurrence is virtually certain	1
Occurrences of the condition or event are observed in the available database	$10^{-1}$
The occurrence of the condition or event is not observed, or is observed in one isolated instance, in the available database; several potential failure scenarios can be identified.	$10^{-2}$
The occurrence of the condition or event is not observed in the available database. It is difficult to think about any plausible failure scenario; however, a single scenario could be identified after considerable effort.	$10^{-3}$
The condition or event has not been observed, and no plausible scenario could be identified, even after considerable effort.	$10^{-4}$



Tabell 4-3 Verbal beskrivelse og verdi av betinget sannsynlighet (BoR and USACE 2012).

Verbal beskrivelse	Sannsynlighet
Virtually Certain	0.999
Very Likely	0.99
Likely	0.9
Neutral	0.5
Unlikely	0.1
Very Unlikely	0.01
Virtually Impossible	0.001

Tabell 4-4. Estimert av sannsynligheter med enkelte tall for hver kategori av usikkerhet.

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 4-5. Estimert av sannsynligheter med områdetall for hver kategori av usikkerhet.

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

## 5 Konsekvensanalyse og dambruddsbølgeanalyse

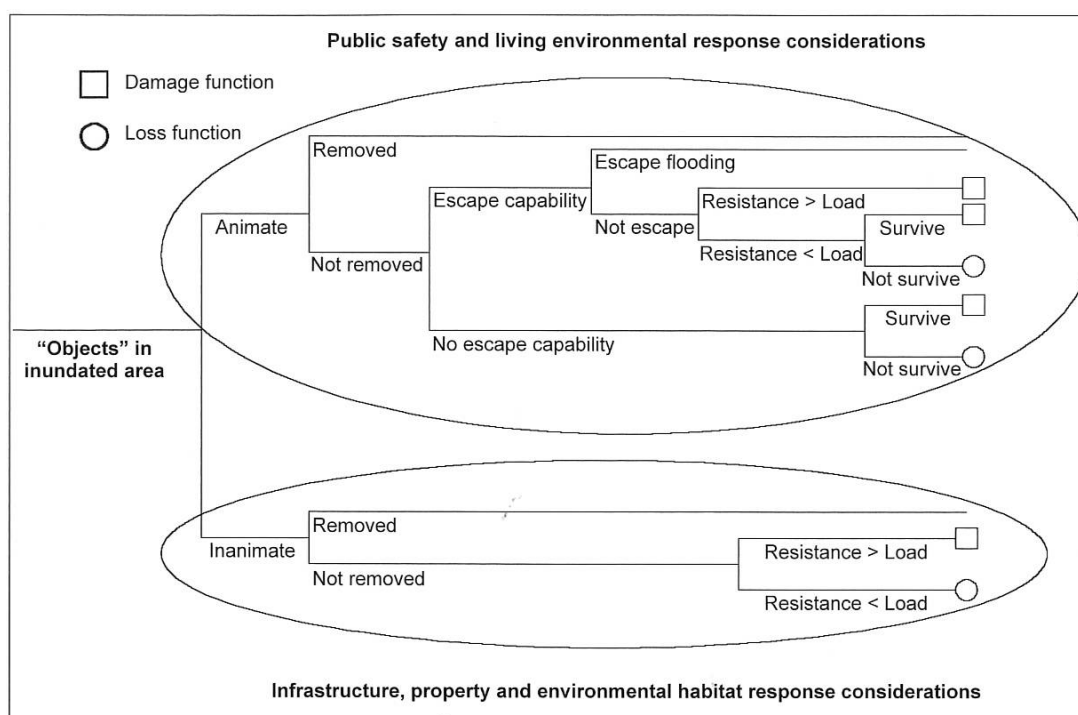
Forståelse av konsekvensene av et dambrudd er fundamentalt for risikovurderingen. Konsekvensene kan omfatte befolkningssikkerhet (tap av liv og personskader), økonomiske og finansielle konsekvenser (skader på dammen, skader på eiendom og infrastrukturer nedstrøms) og miljømessige konsekvenser, samt immaterielle verdier, som tap av renommé, virksomhet og arbeidsplasser. Viktige steg i en konsekvensanalyse er:

- ✚ Valg av scenarier og konsekvensklasse: hvor stort er utstrømmet vannvolum?
- ✚ Identifisering av potensielt oversvømt område og intensiteten av strømmingen i dette området, gjennom dambruddsbølgeberegninger.
- ✚ Hvilke objekter er eksponert i nedstrøms område? Her sees det på eksponering både i tid og rom, som også omfatter om dambruddet er varslet eller ikke. Hendelsestrær kan benyttes for modellering av eksponering som vist i Figur 5-1.
  - For romlig eksponering gjøres det en flommodellering/dambruddsbølgeberegning som avhenger av bruddscenariet, bruddparametere og nedstrøms forhold.
  - For analyse av tidsmessig eksponering kan det være aktuelt å se på hvordan folkets oppholdsmønster varierer med tid på dagen, ukedag (for eksempel hverdager i forhold til helger) og sesongvariasjoner. Tidsmessig eksponering vil også avhenge av om dambruddet er varslet, varslings tid, kvalitet og tydelighet i varsling og påfølgende instruksjoner
- ✚ Tap av liv og materielle ødeleggelser beregnes gjennom relasjoner for dødelighet og skader som funksjon av intensitet av dambruddsbølgen, der intensiteten uttrykkes ved en kombinasjon av hastighet og dybde.

### 5.1 Dambruddsbølgeberegninger

Dambruddsbølgeberegninger kan enklest gjøres ved hjelp av 1D modeller. 1D modellering benytter en linje som følger elveløpet for å definere strømningsbanen, og et tverrsnitt for å definere kanalens geometri. Imidlertid gir 2D modeller bedre resultater, spesielt hvis nedstrøms terreng inneholder store, flate områder. 2D modeller representerer en kontinuerlig terrengoverflate og utbredelsen beregnes fra tyngdekraften, bevegelsesmengde og terrengform. I en 2D modell er samtlige punkter beregnet, slik at ingen interpolasjon er nødvendig.

NVE (2014) ga en kort prosedyre for forenklede dambruddsbølgeberegninger. Forenklede dambruddsbølgeberegninger kan gjøres ved å beregne maksimal bruddvannføring og deretter bruke denne som grunnlag for en stasjonær vannlinjeberegning for å finne maksimal vannstand (oversvømt område). Stasjonære beregninger kan begrenses til de områdene langs vassdraget som er nødvendig for vurdering av konsekvensklasse (for eksempel bebygde områder). Bruddbølgen kan eventuelt rutes gjennom innsjøer/magasiner dersom disse forventes å dempe bølgen betydelig. Innsjøer/magasiner må eventuelt beskrives med magasinkurver. Retningslinjer for dambruddsbølgeberegninger angir beregningsmessige (teoretiske) bruddåpninger for ulike damtyper.



Figur 5-1. Samlet responsmodell for konsekvensvurderinger (Hartford og Baecher 2004).

Ved forenklete beregninger kan følgende formel for bruddvannføring benyttes:

$$Q = C \cdot H^{1.5} \cdot L$$

hvor Q er bruddvannføring i m<sup>3</sup>/s, C er overløpskoeffisient, H er største høyde for dammen i m og L er lengden av bruddåpning i m. For små inntaksdammer regnes normalt L lik lengden av dammen målt langs damkronen, dvs at hele dammen regnes å bryte sammen. C-verdien kan settes til 1,3 dersom det er liten til moderat helning nedstrøms dammen. Dersom avløpsforholdene nedstrøms dammen er gode, for eksempel dersom dammen ligger på toppen av en foss, bør uansett C-verdien økes til ca. 1,5-1,6. Dersom nevnte formel gir urimelig høy bruddvannføring, eksempelvis der kun en liten del av dammen har største høyde, kan dammen deles opp og formelen brukes for hver av delene. Total bruddvannføring for dammen blir summen av bruddvannføringene for delene. En alternativ tilnærming til en riktigere beregning er å sette inn dammens maksimale høyde, men en redusert "midlere lengde" i formelen for bruddvannføring.

Ved klassifisering av små dammer med lite magasin kan det regnes konservativt ved at maksimal bruddvannføringen, beregnet etter formelen ovenfor, forflytter seg nedover vassdraget uten demping til samløpet med annet vassdrag eller innsjø. Alternativt kan det foretas en beregning av hvordan utstrømmende vannmengde avtar over tid og en vurdering av hvordan bruddbølgen dempes nedover vassdraget.

Den enkleste teknikken for å beregne maksimal vannføring i en lokasjon, er Mannings likning:

$$Q = \frac{(A^{5/3} S_0^{1/2})}{n P^{2/3}}$$

der  $Q$  er maksimal vannføring ("peak discharge") i beregningspunktet med enhet  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $A$  er flommens tverrsnitts areal (i  $\text{m}^2$ ),  $S_0$  er helning ("slope") langs dalen,  $n$  er Mannings' ruhets koeffisient,  $P$  er våt omkrets (i m) av dalseksjonen. Tverrsnittet av oversvømt område forenkles til å ha form som et trapes.

Dambruddsbølgens utbredelsesområde/rekkevidde er så langt nedstrøms at den ikke lenger innebærer noe fare for liv eller materielle ødeleggelser. Brown and Gosden (2004) oppsummerte ulike strategier for å beregne utbredelseslengden ved gjennomføring av detaljerte analyser eller ved å benytte faste relasjoner mellom utbredelseslengde og magasin størrelse eller utslippsvolum.

## 5.2 Analyse av konsekvenser

### 5.2.1 Tap av liv

Faktorer som påvirker antall dødsfall som følge av dambrudd omfatter (Hartford og Baecher 2004):

- ✚ Årsak og type dambrudd.
- ✚ Antall eksponerte personer.
- ✚ Varslingstiden.
- ✚ Flomdybder og hastigheter nedstrøms før dambrudd.
- ✚ Flomdybder og hastigheter nedstrøms etter dambrudd.
- ✚ Muligheter for å se eller høre dambruddsbølgen før den kommer.
- ✚ Tid på dagen, ukedag og tid på året.
- ✚ Værforhold, inkludert luft og vanntemperaturer.
- ✚ Hvilke aktiviteter eksponerte personer er beskjeftiget med.
- ✚ Generell helse av befolkningen.
- ✚ Bygningstyper som eksponerte personer befinner seg i.
- ✚ Vellykkethet i evakueringen.

Eksponert befolkning (som tas med i konsekvensberegningene) settes i Brown and Gosden (2004) til befolkning i områder der både produktet av dybde og hastighet er større enn  $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$  og flomdybden er større enn  $0.5\text{m}$ . Modeller som viser dødeligheten i den eksponerte befolkningen som funksjon av varslingstid, kvalitet i varslingen og intensiteten i dambruddsbølgen er vist i Figur 5-2 og Tabell 5-1. Figur 5-2 og Tabell 5-1 ser på andel av den totale befolkningen (før evakuering). BoR and USACE (2012) definerer dødeligheten som andel av den ikke-evakuerte befolkningen som mister livet. Da blir dødeligheten kun en funksjon av intensitet av dambruddsbølgen.

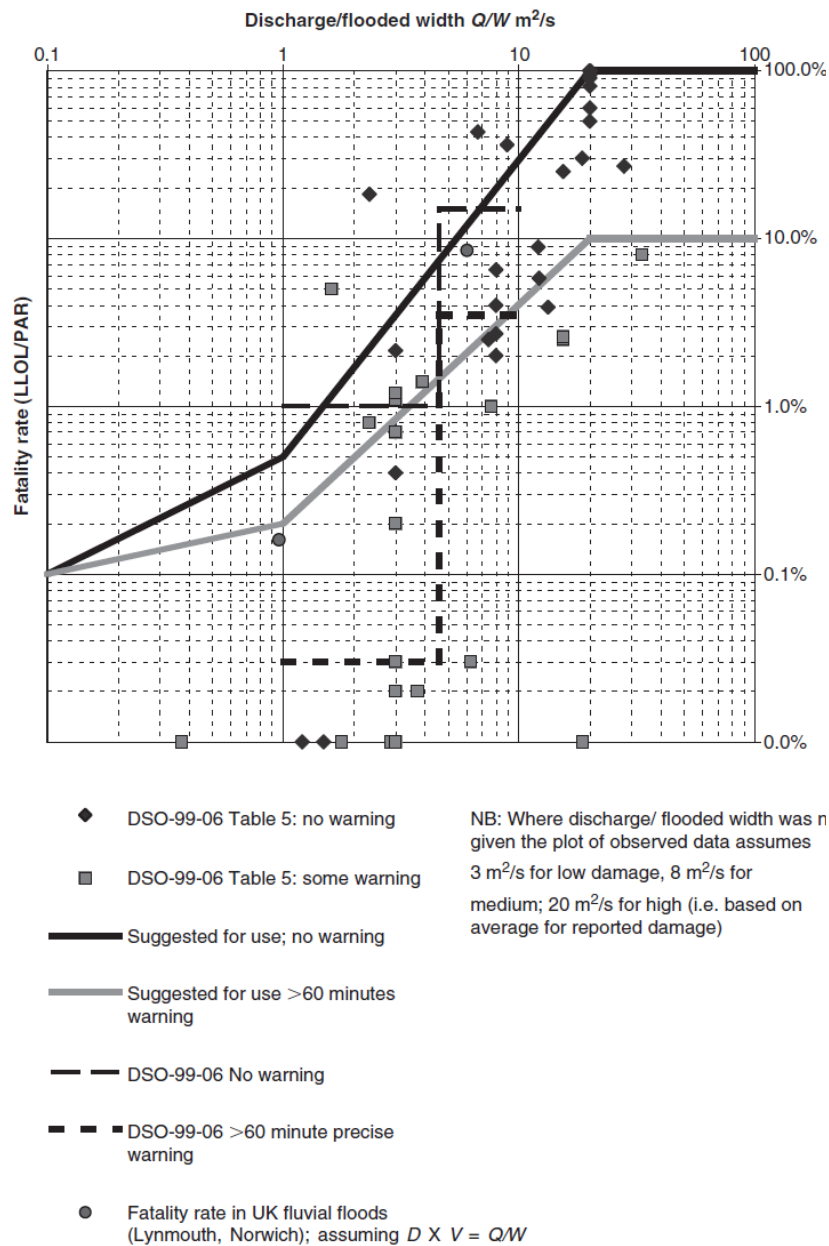
### 5.2.2 Materielle ødeleggelser

Det er noen likheter mellom ødeleggelser forårsaket av en dambruddsbølge og av elveflom, slik at noen av teknikkene for å beregne materielle ødeleggelser for elveflom også kan benyttes for å beregne ødeleggelser forårsaket av dambruddsbølge. Det er imidlertid også noen betydelige forskjeller som må tas hensyn til:

- ✚ Hastigheter og dybder forårsaket av flom fra dambrudd kan være høyere enn for elveflom, hvilket resulterer i større strukturelle skader (f.eks. bygninger som er ødelagt strukturelt eller vasket vekk)

- ✚ Dambruddflommen har større sannsynlighet for å inntreffe uten varsling og uten en gradvis oppbygging av vann-nivå, men isteden som en bølge av vann og rasmasser som kommer nedover dalen.

For beregning av skader forårsaket av dambruddsbølgen må en kombinasjon av hastighet og dybden av strømmen inngå som inngangsparameter (Brown og Gosden 2004). Skader forårsaket av dambruddsbølge er foreslått beregnet etter Tabell 5-2. BoR and USACE (2012) refererer til en noe mer detaljert modell som også tar hensyn til bygningstype i Tabell 5-3.



Figur 5-2. Sammenheng mellom dødelighet og vannutslippet (Brown og Gosden 2004).

Tabell 5-1. Anbefalte tall for dødelighet fra DSO-99-06.

Flood severity	Warning time (minutes)	Flood severity understanding	Fatality rate (fraction of people at risk expected to die)	
			Suggested	Suggested range
HIGH	No warning	not applicable	0.75	0.30 to 1.00
	15 to 60	vague	Use the values shown above and apply to the number of people who remain in the dam failure floodplain after warnings are issued. No guidance is provided on how many people will remain in the floodplain.	
		precise		
	more than 60	vague		
precise				
MEDIUM	No warning	not applicable	0.15	0.03 to 0.35
	15 to 60	vague	0.04	0.01 to 0.08
		precise	0.02	0.005 to 0.04
	more than 60	vague	0.03	0.005 to 0.06
precise		0.01	0.002 to 0.02	
LOW	No warning	not applicable	0.01	0.0 to 0.02
	15 to 60	vague	0.007	0.0 to 0.015
		precise	0.002	0.0 to 0.004
	more than 60	vague	0.0003	0.0 to 0.0006
precise		0.0002	0.0 to 0.0004	

Tabell 5-2. Alvorlighet av bygningsødeleggelse som funksjon av hastighet og dybde (Brown og Gosden 2004)

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

Tabell 5-3. Skadekriterier på bygninger fra RESCDAM (BoR and USACE 2012)

Building type	Partial damage	Total damage
Wood-framed	$v \cdot d \geq 2\text{ m}^2/\text{s}$	unanchored $v \cdot d \geq 3\text{ m}^2/\text{s}$
		anchored $v \cdot d \geq 7\text{ m}^2/\text{s}$
Masonry, concrete & brick	$v \geq 2\text{ m/s}$ & $v \cdot d \geq 3\text{ m}^2/\text{s}$	$v \geq 2\text{ m/s}$ & $v \cdot d \geq 7\text{ m}^2/\text{s}$

## 6 Risikoevaluering

Risikoanalyser kan gjøres både semi-kvantitativt (rangering av risikoen) og kvantitativt (tallfesting av risikoen). Følgende avsnitt gjennomgår kort hvordan risikoen kan presenteres og evalueres for disse to ulike strategiene.

### 6.1 Rangering av risiko

Rangeringen av risiko kan foregå ved å kategorisere sannsynlighet og konsekvens i klasser. I Figur 6-1 spesifiseres kategorier for sannsynlighet utfra sannsynlighetsverdiene. Det defineres konsekvensklasser for ulike konsekvenstyper som sikkerhet, miljø, økonomi, omdømme og pålitelighet. Videre kan risikoen vurderes og illustreres i en risikomatrise, som også kan inneholde akseptkriterier.

Risikonivået kan også rangeres direkte i et ønsket antall kategorier, for eksempel risikonivå 1, 2, 3, 4 og 5 eller risikonivå Lav, Middels og Høy. Figur 6-1 viser risikomatrise fra BC Hydro, der risikoen deles inn i 15 undernivåer (indikert med tall) og 3 hovednivåer (indikert med farge). Ved å rangere risikoen på denne måten kan risikonivåer fra ulike dammer sammenliknes, som et grunnlag for prioritering. Hvis det er formulert risikoakseptkriterier ved hjelp av kategoriene, kan en slik rangering også benyttes for å identifisere områder der iverksetting av tiltak er nødvendig.

### 6.2 Kvantitativ risikobeskrivelse og risikoevaluering

Kvantitative risikobeskrivelse tallfester:

- ✚ Sannsynligheten for dambrudd (eller annen negativ konsekvens forbundet med dammen) i form av årlig sannsynlighet.
- ✚ Eksponert befolkning eller potensielt antall dødsfall som følge av dambruddet.
- ✚ De økonomiske tapene som følge av dambruddet (f.eks. nedstrøms skader, rehabiliteringskostnader, tap av driftsinntekter, miljøskader, etc.).

Risikoen kan beregnes som produktet av sannsynlighet og konsekvens. Denne verdien uttrykker et statistisk forventet tap pr år som følge av faren og kan typisk ha benevnelse 'tapte liv pr år' eller 'kNOK per år' for tap av materielle verdier. For materielle tap kan estimert risiko, blant annet, benyttes for å sammenligne og analysere gjennomsnittlige kostnader eller tap ved en potensiell fare. Kostnader for aktuelle riskoreduserende tiltak kan også beregnes. Et kvantitativt risikoestimat kan også presenteres som et punkt (eller evt. en kurve) i et koordinatsystem med fare langs den ene aksene og konsekvens langs den andre aksene eller som en celle i en risikomatrise med kvantitativt definerte kategorier for fare og konsekvens.

Oftest, brukes *F-N* diagrammene i Kapittel 2 for å sammenligne sannsynlighet for brudd med verdier brukt ellers i samfunnet.



FREQUENCY (YEARLY)		FREQUENCY OF CONSEQUENCE		BC Hydro Corporate Risk Matrix								
$f \geq 100$	At least 100 times every year	L9		10	11	12	13	14	15	16		
$10 \leq f < 100$	At least 10 times every year	L8		9	10	11	12	13	14	15		
$1 \leq f < 10$	At least once every year	L7		8	9	10	11	12	13	14		
$1/10 \leq f < 1$	At least once every 10 years	L6		7	8	9	10	11	12	13		
$1/100 \leq f < 1/10$	At least once every 100 years	L6		6	7	8	9	10	11	12		
$1/1,000 \leq f < 1/100$	At least once every 1,000 years	L4		5	6	7	8	9	10	11		
$1/10K \leq f < 1/1,000$	At least once every 10,000 years	L3		4	5	6	7	8	9	10		
$1/100K \leq f < 1/10K$	At least once every 100,000 years	L2		3	4	5	6	7	8	9		
$1/1M \leq f < 1/100K$	At least once every 1,000,000 years	L1		2	3	4	5	6	7	8		
CONSEQUENCE TYPE			CONSEQUENCE SEVERITY									
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7			
Safety	Worker		First Aid	Treatment by Medical Professional	Temporary Disability	Permanent Disability	Fatality	Multiple Fatalities				
	Public		Near Miss	First Aid	Treatment by Medical Professional	Temporary Disability	Permanent Disability	Fatality	Multiple Fatalities			
Environmental *			Minor	Low	Moderate	High	Extreme	Catastrophic				
Financial Loss			\$10K to \$100K	\$100K to \$1M	\$1M to \$10M	\$10M to \$100M	\$100M to \$1B	\$1B to \$10B	> \$10B			
Reputational *			Limited complaints to company or shareholder	Negative local profile	Small but vocal minority of customers critical	Many customers critical	Loss of trust- strategic change imposed by regulator and/or shareholder	Loss of consent to operate				
Reliability	Supply		N/A	N/A	Require voluntary load reduction	Localized load shedding	Significant load shedding required	BC load shedding spreads to WECC				
	Customer (hours lost per event)		< 5K	5K to 50K	50K to 500K	500K to 5M	5M to 50M	50M to 500M	> 500M			

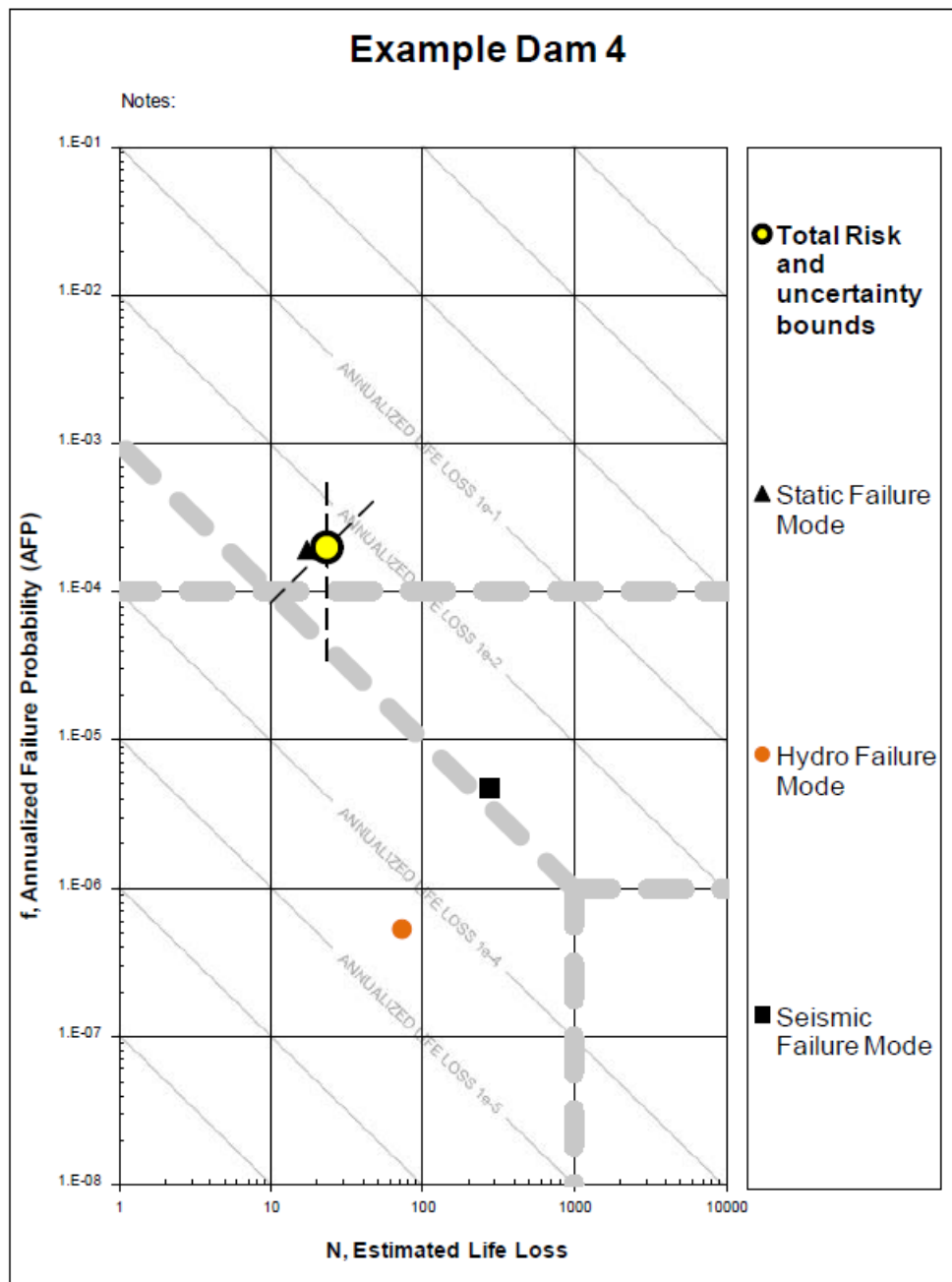
Figur 6-1. Risikomatrix fra BC Hydro (Rigby 2015).

Figur 6-2 viser et eksempel der beregnede risikoer sammenliknes med retningslinjer for akseptabel risiko for dammer. De beregnede risikoene vises som punkter i diagrammet med konsekvens i form av antall dødsfall langs første aksene og sannsynlighet langs andre aksene. Her ligger den sammenlagte risiko beregnet for de analyserte feilmodusene over anbefalt tolerabel risiko og risikoen bør reduseres.

Hvis risikoen ligger i tolerabelt område foretas en risikoreduksjon etter ALARP prinsippet, dvs. risikoreduksjon så langt som praktisk rimelig. Beslutninger om hva som er praktisk rimelig risikoreduksjon bør ta hensyn til følgende aspekter (FEMA 2015):

- Kostnadene og kostnadseffektiviteten av ytterligere risikoreduksjon.
- Graden av sikkerhet eller usikkerhet ved forskjellige aspekter av problemet.
- En presedens av sammenlignbare beslutninger på andre prosjekter.

- ✚ Muligheten for at identifiserte svakheter ikke er rimelig å utbedre på en praktisk måte.
- ✚ Sjansen for suksess for en handling.
- ✚ Tid for å implementere utbedringen.
- ✚ Andre hensyn.



Figur 6-2. Eksempel på ulike feilmøder fremstilt separat og sammenlagt (total risk) sammen med retningslinjer for øvre grense av tolerable risiko i F-N diagrammet (BoR 2011).

## 7 Muligheter og begrensninger ved bruk av risikovurdering

Målet med en risikovurdering er å evaluere usikkerheter i en analyse og kvantifisere effektene av usikkerhetene på damsikkerheten. Tradisjonelle (deterministiske) analyser kan ikke gi et komplett bilde av sikkerheten fordi usikkerhetene påvirker selve sikkerhetsvurderingen. Fordelene med å gjennomføre risikoanalyser er mange.

- ✚ Risikoanalyser kan omfatte dambrudd som et resultat av uvanlige kombinasjoner av vanlige hendelser snarere enn kun som et resultat av ekstreme hendelser. Tradisjonelle sikkerhetsforskrifter er mest opptatte av eksisterende hendelser (laster).
- ✚ Risikoanalyser gir muligheten til å kombinere, på en systematisk måte, 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.
- ✚ Risikovurdering har stor nytte for å identifisere den(de) mest sårbar(e) komponent(er) i en dam.
- ✚ Resultater fra risikoanalyse egner seg godt til å sammenligne sikkerheten av en dam med andre dammer og andre konstruksjoner, og for å uniformere sikkerheten av forskjellige dammer, for eksempel, dammer i samme konsekvensklasse. Risikoanalyser egner seg godt til å sammenligne forskjellige utfall i en kost-nytte analyse.
- ✚ Resultatene fra risikoanalyser kan anvendes over dammens hele levetid og kan justeres ved en ekstrem hendelse eller ved observasjoner (positive eller negative) av dammens oppførsel.
- ✚ Gjennomføring av en risikoanalyse fordrer en proaktiv tankegang og en identifisering av aktuelle og potensielle problemområder. Dette gir et begrunnet grunnlag for å prioritere og iverksette tiltak for reduksjon av risiko og for å optimalisere bruken av ressurser på tiltak.
- ✚ Detaljeringsnivået på analysene velges ut fra formålet og omfanget for analysen. Selv en grovanalyse av risikoen vil bli nyttig for identifisering av risikokilder og problemområder.
- ✚ Risikobegreper gjør kommunikasjonen blant forskjellige fagområder, myndigheter og publikum lettere.

Risikovurdering bør brukes for norske dammer i følgende tilfeller:

- ✚ Dammer i høy konsekvensklasse (konsekvensklasse 3 og høyere), spesielt med tanke på å uniformere sikkerheten for slike 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 prioritere og velge den(de) mest effektive rehabiliteringstiltak.
- ✚ Dammer hvor det er behov for kost-nytte analyser for å vurdere den mest effektivt bruken 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 dampportefølje 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 overvåking og oppfølging.
- ✚ Ved planlegging av beredskapstiltak i forbindelse med et potensielt dambrudd.
- ✚ Dammer som kan være utsatt for terrorisme eller sabotasje.

Måten krav til sikkerhet er formulert på påvirker hvilke analyser som gjøres og hvordan det dokumenteres at sikkerheten er ivaretatt. I Norge er sikkerhetskravene for dammer standardbaserte. Forskriftene setter eksplisitte konstruksjonsmessige krav. Argumentene mot en risikobasert sikkerhetsdokumentasjon er oftest at risikoanalysene innebærer stor grad av subjektivitet og er vanskeligere etterprøvbare enn eksplisitte dimensjoneringskriterier og deterministiske analyser. Målet med risikovurderingsmetodikken er nettopp å kvantifisere usikkerhetene i en analyse. Det er viktig å være klar over at de samme usikkerhetene som kvantifiseres i en risikoanalyse er også en del av de deterministiske (tradisjonelle) analysene. Risikoanalysene, spesielt når de er brukt sammen med resultater av deterministiske analyser, bringer inn ny innsikt i de forskriftmessige analysene, dimensjoneringskrav og beslutninger om dammens sikkerhet.

Risikoanalyser kan omfatte dambrudd som et resultat av uvanlige kombinasjoner av vanlige hendelser snarere enn som et resultat av ekstreme hendelser, som er fokus for tradisjonelle designmetoder og dimensjoneringskriterier. Risikoanalyser er en systematisk måte å kombinere ekspertvurderinger, tilgjengelig erfaring, informasjon og data i en beslutningsprosess med hovedhensikt å skaffe beslutningsgrunnlag for velbegrunnet risikostyring. I risikoanalyser for dammer gjennomgås små og store potensielle hendelser som kan inngå i en kjede av hendelser som leder til skader og kanskje dambrudd. Gjennomføring av en risikoanalyse fordrer en proaktiv tankegang, og gjennom analysen identifiseres aktuelle og potensielle problemområder for den spesifikke dammen. Dette gir et godt grunnlag for å iverksette tiltak for reduksjon av risikoen og å optimalisere bruken av ressurser på tiltak. Detaljeringsnivå på analysene må velges ut fra formålet og budsjettet for risikoanalysene. En grovanalyse av risikoen krever naturligvis mindre ressurser enn en detaljert kvantitativ analyse, men kan gi stor nytte angående identifisering av risikokilder/problemområder og redusering av risiko.

## 8 Referanser

- Allen, F. R., Garlick, A.R., Hayns, M.R. and Taig, A.R. (1992). The Management of Risk to Society from Potential Accidents : The Main Report of the UKAEA Working Group on the Risks to Society from Potential Major Accidents : With an Executive Summary. London; New York: Elsevier Applied Science.
- ANCOLD (1994). *Guidelines on risk assessment*. Australian Committee on Large Dams.
- ANCOLD (2003) *Guidelines on Risk Assessment*. Australian National Committee on Large Dams. 2003. Sydney, New South Wales, Australia.
- AS/NZS 4360:1999. Australian/New Zealand Standard, Risk Management Standards Australia, Standards New Zealand.
- Australian Geomechanics Society 2000. Landslide risk management concepts and guidelines. Austr. Geomechanics Soc. Sub-Comm. on Landslide Risk Management, *Australian Geomechanics*, 35: 49-92.
- Baecher, G., Paté, M.E. and deNeufville, R. (1980a). Dam Failure in Benefit/Cost Analysis. ASCE Jour. Geot. Eng. Div., Vol. 106, No. GT1, pp 101–116.
- Baecher, G., Paté, M.E. and deNeufville, R. (1980b). Fisk of Dam Failure in Benefit-Cost Analysis. Water Resources Research, V. 16, No. 3, pp. 449–456.
- Baecher, G.B., Abedinsohi, F. and Patev, R.C (2015). Societal Risk Criteria for Loss of Life - Concepts, History, and Mathematics”. Report prepared for the Reliability Models for Major Rehabilitation Program, Headquarters US Army Corps of Engineers & USACE Risk Management Center, Denver. 85pp.
- Barker, M. (2011) Australian risk approach for assessment of dams, 21st Century Dam Design -Advances and Adaptations, 31st Annual USSD Conference ; CA , USA; 2011.
- Barneich, J., Majors,D., Moriwaki, Y., Kulkarni, R. and Davidson, R. (1996), “Application of Reliability Analysis in the Environmental Impact Report (EIR) and Design of a Major Dam Project,” *Geotechnical Special Publication No.58*, American Society of Civil Engineers, New York, V 2, pp. 1367-1382.
- BC Hydro (1993). Guidelines for Consequence – Based Dam Safety Evaluations and Improve- ments. H2528 Interim. Vancouver: BC Hydro.
- BoR and USACE(2012) Best Practices in Dam Safety and Levee Safety Risk Analysis. Bureau of Reclamation and U.S. Army Corps of Engineers. 2012., Denver, Colorado.
- Bowles, D., Brown, A., Hughes, A., Morris, M., Sayers, P., Topple, A., Wallis, M. og Gardiner, K. (2013). Guide to risk assessment for reservoir safety management. Volume 2: Methodology and supporting information, Report SC090001/R2, Flood and Coastal Erosion Risk Management Research and Development Programme. Environment Agency, Horizon House, Deanery Road, Bristol, BS1 9AH, [www.environment-agency.gov.uk](http://www.environment-agency.gov.uk).
- Brown, AJ and Gosden, JD (2004) Interim guide to quantitative risk assessment for UK reservoirs, published by Thomas Telford Publishing, London, ISBN 0 7277 3267 6.
- BSI (British Standards Institution), 2010. BS EN 31010: 2010. Risk management. Risk assessment techniques. London: BSI.
- BoR - Bureau of Reclamation. 2011. *Dam Safety Public Protection Guidelines*. Dam Safety Office, Denver, Colorado. August. Web site: (<http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/documents/PPG201108.pdf>)
- Campbell, P., Dolbec, M., Ford, G., Haack, G. I., Heisler, N. Jolley, W., Kamel, R. Stan Kaczmarek, S. Marcoux, L., McLean, C., Moulding, T., Passey, M., Roy, A. Xueqing(Grant) S., Theakston, J., Karyn M. Wog, K. M. (2010) Regulation of Dams and Tailings Dams in Canada, CDA 2010 Annual Conference, Niagara Falls, ON, Canada, Oct 2-7.
- CDA (2009) .Defra and Environment Agency. Scoping Study for a Guide to Risk Assessment of Reservoirs. Joint Defra/Environment Agency Flood and Coastal Erosion Risk.
- CDA (2007; 2013). Dam Safety Guidelines 2007 (2013 Edition), Canadian Dam Association, [www.cda.ca](http://www.cda.ca).

- Charlwood, R. (2010) Civil works and dam safety: Incorporating risk-informed decisions, Hydro review, April 2010, [www.hydroworld.com](http://www.hydroworld.com).
- Costa, J. E. (1985). "Floods from dam failures." U.S. Geological Survey, Open-File Rep. No. 85-560, Denver, 54.
- Eddleston, M. (2015) A review of international approaches to risk assessments in dam engineering, *Hydropower & Dams Issue Four, 2015*
- Fell, R., Foster, M., Davidson, R., Cyganiewicz, J., Sills, G. and Vroman, N. (2008). A unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping. UNICIV Report R 446. Univ. of New South Wales, School of Civil and Environmental Eng., Sydney, Australia 2051. ISBN:85841 314 9. (2 volumes: The Guidance Document; The Supporting Document). [www.engineering.unsw.edu.au/civeng/uniciv-reports](http://www.engineering.unsw.edu.au/civeng/uniciv-reports).
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. og Foster, M. (2015). Geotechnical Engineering of Dams. 2<sup>nd</sup> edition. CRC Press, Taylor and Francis Group. 1348 p.
- Fell R. and Fry, J.J. (2007). The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations. In *Internal Erosion of Dams and their Foundations*. Ed. R. Fell and J.J. Fry. Taylor and Francis, London, pp. 1-24.
- Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S. og Leroi, E. (2005). State of the Art Paper 1 A framework for landslide risk assessment and management. Landslide Risk Management. Eds Hungr O. Fell, R. Couture, R. and Eberhardt, E. International Conference. Vancouver 2005. Proc. pp. 3-25.
- FEMA(2015) Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management, FEMA P-1025, Federal Emergency Management Agency, January 2015.
- Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (2009). Damsikkerhetsforskriften. tilgjengelig på <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-12-18-1600>.
- 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.
- Fridolf (2004) Dam safety in a hydrological perspective – case study of the historical water system of Sala silver mine. PhD Thesis, KTH, Stockholm Mai 2004. ISRN KTH/LWR/LIC 2021-SE, ISBN 91-7283-779-9
- Hartford, D. N. D. and Baecher, G. B. (2004): Risk and uncertainty in dam safety. Thomas Telford Publishing, ISBN: 0 7277 3270 6.
- HRW(2012); Morris, M., Wallis, M., Brown, A., Bowles, D., Gosden, J., Hughes, A, Topples, A., Sayers, P. and Gardiner, K.(2012) Reservoir safety risk assessment – a new guide, British Dam Society Annual Conference, Leeds, 2012
- HSE (2001). *Reducing risk, protecting people* (R2P2), (Health and safety executive) HSE's decision-making process. HMSO, Norwich, UK.
- Høeg, K. (1996). Performance Evaluation, Safety Assessment and Risk Analysis for Dams. *Hydropower and Dams*. V 6:3. 8pp.
- Høeg, K. (2001). Embankment-dam engineering, safety evaluation and upgrading. Proc. ICSMGE, Istanbul, 2001.
- ICOLD (1995). Dam failures - statistical analysis, Bulletin No. 99. ICOLD, Paris, France.
- ICOLD (2005) Risk assessment in dam safety management. A reconnaissance of benefits, methods and current applications, ICOLD Bulletin 130.
- IPCC (2012). "Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change adaptation". A Special Report of Working Group I and Working Group II of the International Panel on climate change. [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf)
- Kjærnsli, B. Valstad, T. and Høeg, K. (1992). Rockfill Dams. Design and Construction. *Hydropower development*, V 2:10. 148pp.

- Kjærnsli, B. (1992). Sikkerhet av norske fyllingsdammer mot brudd forårsaket av indre erosjon og derav følgende øket lekkasje gjennom og under dammen. Rapport til "Prosjekt damsikkerhet". NGI rapportnr 904084-1. 22 januar 1992.
- Le Guen, J., 2010. Exploration of the tolerable risk guidelines for levee systems. Proc. Workshop, Exploration of Tolerable Risk Guidelines for the USACE Levee Safety Program, Washington DC. Alexandria, VA: US Army Corps of Engineers.
- Londe, P. (1993). Safety evaluation using reliability analysis. Proc. Workshop on Dam Safety Evaluation, Grindelwald, Switzerland, V 4, pp. 171–188.
- Midttømme, G.H., Lia, L. og Ruud, A.M. (2013). Risk analyses in Norway – rules, recommendations and practical application for dam safety. Symposium for ICOLD Annual Meeting 2013. 10pp.
- McCann (1995). Personal communication to Professor G.B. Baecher.
- McCann, M. W, Franzinia J. B, Kavazanjian E & Shah H. C. (1985). Preliminary safety evaluation of existing dams. John A. Blume Earthquake Engineering Centre, Dept of Civil Eng., Stanford University US FEMA. Contract EMW-c-0458. Vol. I (Report No 69) Methodology, Volume II (Report No 70)-User manual.
- Munger, D.F., Bowles, D.S., Boyer, D.D., Davis, D.W., Margo, D.A., Moser, D.A., Regan, P.J. and Snorteland, N., 2009. Interim tolerable risk guidelines for the US Army Corps of Engineers dams. *Managing Our Water Retention Systems*. Proc. 29<sup>th</sup> Annual USSD Conf. Nashville, TN, pp. 1125-1142. Denver, CO: United States Society of Dams.
- NGI (2016). Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. Risikovurdering for Dam Dravladalen. NGI rapport til Energi Norge. Rapportnr 2015 0624-01-R-02. Datert 2016-06-01.
- NRC (1996). National Research Council. Understanding Risk: Informing Decisions in a Democratic Society. Washington DC: National Academy Press.
- NSW (2006). (NSW-DSC New South Wales Government Dams Safety Committee). *Risk Management Policy Framework for Dam Safety*. New South Wales, Australia, August 2006.
- NVE (2014). Veileder til damsikkerhetsforskriften. Klassifisering av vassdragsanlegg. Veileder nr. 3/2014.
- Peck, R.B. (1980). Where has all the judgment gone? The Fifth Laurits Bjerrum Memorial Lecture, Oslo, Norway. Canadian Geotechnical Journal. V 40.
- Rigby, S. J. (2015) BC Hydro's Dam Safety Program and Risk Management Process, ANCOLD Proceedings 2015, Contemporary Challenges for Dams
- USACE (2011) US Army Corps of Engineers. Engineering and Design. Safety of Dams – Policy and Procedures. Engineer Regulation ER 1110-2-1156. Washington DC: USACE. [http://publications.usace.army.mil/publications/eng-regs/ER\\_1110-2\\_1156/ER\\_1110-2-1156.pdf](http://publications.usace.army.mil/publications/eng-regs/ER_1110-2_1156/ER_1110-2-1156.pdf).
- USACE (2014). Engineering and Design. Safety of dams – policy and procedures, Department of the Army, ER 1110-2-1156, US Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000, 31 March 2014.
- Vick, S.G. (2002) "Degrees of Belief: Subjective Probability and Engineering Judgement". ASCE Publications. 405 pp.
- von Thun, J. (1985). Application of statistical data from dam failure and accidents to risk-based decision analysis on existing dams. U.S. Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, Colorado.
- von Thun, J.L. (1996). Risk Assessment of Nambe Falls Dam. In Uncertainty in the Geologic Environment, 1:604–35. Madison: ASCE.

## 9 Annen relevant litteratur

- Brown, A. J., Yarwood, G., King, S. and Gosden, J. D. (2008). Application of the Interim Guide to Quantitative Risk Assessment across multiple dam owners by multiple Jacobs offices. *Ensuring reservoir safety into the future*. Thomas Telford, London, 2008
- Gardiner, K.D. and Brown C. (2014). A practical application of UK guidelines for public acceptability of risk of dam failure, *Proceedings*, 18<sup>th</sup> British Dam Society Conference, Belfast; 20 I4.
- Halpin, E. and Escuder-Bueno, I. (2015). Smart governance of infrastructure programs: facing the next generation of challenges and succeeding, 25<sup>e</sup> congrès des grands barrages, *Stavanger. June 2015*.
- Jaynes E. T. (1995). Probability Theory: The Logic of Science, Wayman Crow Professor of Physics, Washington University, St. Louis, MO 63130, U. S. A.
- Jaynes E. T. (2003). Probability Theory: The Logic of Science, V 2 , Cambridge University press. ISBN-13 978-0-511-06589-7 eBook (NetLibrary).
- Kreuzer, H. (2015). The traditional factor of safety: a factor of safety against what? , *Hydropower & Dams Issue Three, 2015*.
- Margo, D.A. Snarteland, N.J. Haden Smith C.and Todaro S.A. (2015). Assessing and addressing hydrological risk at USArmy Corps of Engineers dams and levees, *Hydropower & Dams Issue 4*.
- Svenska Kraftnät, Svensk energi, SveMin (2010)*. System för bedömning av dammsäkerhetsanmärkningar.
- Whitman, R.V. (1996). Organizing and evaluating uncertainties in geotechnical engineering. ASCE Proc. *Uncertainty in the Geologic Environment*. Madison. pp. 1-28.



<b>Dokumentinformasjon/Document information</b>		
<b>Dokumenttittel/Document title</b> «State-of-the-art» om risikovurderinger for dammer sett i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv		<b>Dokumentnr./Document no.</b> 20150624-01-R
<b>Dokumenttype/Type of document</b> Rapport / Report	<b>Distribusjon/Distribution</b> Begrenset/Limited	<b>Dato/Date</b> 2016-07-01
		<b>Rev.nr.&amp;dato/Rev.no.&amp;date</b> 0 /
<b>Oppdragsgiver/Client</b> EnergiNorge		
<b>Emneord/Keywords</b> Dam, damsikkerhet, risikoanalyser		

<b>Stedfesting/Geographical information</b>	
<b>Land, fylke/Country</b>	<b>Havområde/Offshore area</b>
<b>Kommune/Municipality</b>	<b>Felt navn/Field name</b>
<b>Sted/Location</b>	<b>Sted/Location</b>
<b>Kartblad/Map</b>	<b>Felt, blokknr./Field, Block No.</b>
<b>UTM-koordinater/UTM-coordinates</b> Sone: <a href="#">Tast inn sone her</a> Øst: <a href="#">Tast inn koordinater her</a> Nord: <a href="#">Tast inn koordinater her</a>	

<b>Dokumentkontroll/Document control</b> Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
<b>Rev/Rev.</b>	<b>Revisjonsgrunnlag/Reason for revision</b>	<b>Egenkontroll av/ Self review by:</b>	<b>Sidemanns- kontroll av/ Colleague review by:</b>	<b>Uavhengig kontroll av/ Independent review by:</b>	<b>Tverrfaglig kontroll av/ Inter- disciplinary review by:</b>
0	Originaldokument	UKE SL	KH	---	--

<b>Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release</b>	<b>Dato/Date</b> 2016-01-08	<b>Prosjektleder/Project Manager</b> Suzanne Lacasse
--	--------------------------------	---

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

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

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

[www.ngi.no](http://www.ngi.no)

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

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

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

[www.ngi.no](http://www.ngi.no)



# Vedlegg A

## OVERSIKT OVER STANDARD NORGEs DOKUMENTER SOM OMHANDLER RISIKO

### INNHold

A1.	Norske standarder for risikoanalyse, risikovurdering, risikohåndtering og risikostyring	2
A2.	Liste over Standard Norges dokumenter om risiko	2
A3.	Innhold i tre av standardene	3

## A1. Norske standarder for risikoanalyse, risikovurdering, risikohåndtering og risikostyring

Standard Norge har utgitt flere dokumenter om risikoanalyse, risikovurdering, risikohåndtering og risikostyring. Vedlegg A lister alle Standard Norges dokumenter vedrørende risiko.

Standard Norge skriver:

"Den norske standarden, NS 5814 "Krav til risikovurdering", stiller krav til de elementene som kan inngå i en slik prosess. Standarden beskriver også risikovurderingens plass i risikostyring og faktorer som påvirker planlegging og gjennomføringen av risikovurderinger. Dette gjelder for eksempel rammebetingelser og etablering av risikoakseptkriterier.

Risikovurderinger gjennomføres ved å planlegge aktiviteter eller tiltak både ved etablering og ved endringer av eksisterende virksomhet. Uavhengig av formålet er det viktig at risikovurderingen tilpasses i tid slik at resultatet foreligger før beslutninger skal tas.

NS 5814 "Krav til risikovurderinger" er en generell standard rettet mot fag, bransjer og næringer som ikke har egne standarder for risikovurdering. Den er et hjelpemiddel for virksomheter slik at de kan beslutte tiltak eller velge løsninger for å forebygge risiko."

## A2. Liste over Standard Norges dokumenter om risiko

Tabell A1 gir en oversikt over dokumentene som er tilgjengelige hos Standard Norge:

Tabell A1. Norske standarder for risikoanalyse, risikovurdering, risikohåndtering og risikostyring.

Dokumentnr	Tittel
NS 5814	Krav til risikovurderinger
ISO/IEC Guide 51	Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards
<b>SN-ISO Guide 73</b>	<b>Risikostyring - Terminologi (under revisjon)</b>
<b>NS-ISO 31000</b>	<b>Risikostyring - Prinsipper og retningslinjer (under revisjon)</b>
SN-ISO/TR 31004	Risikostyring - Veiledning til implementering av NS-ISO 31000
<b>NS-ISO/IEC 31010</b>	<b>Risikostyring - Metoder for risikovurdering</b>
NEK EN 60300-1	Styring av pålitelighet - Del 1: Styring av pålitelighetsprogram
NEK EN 60300-2	Styring av pålitelighet - Del 2: Retningslinjer for styring av pålitelighet
NEK IEC60300-3-9	Dependability management - 3:9 Application Guide - Risk analysis of technical systems
NEK EN 60812	Analyse teknikk for system pålitelighet-Prosedyre for feil modus og effekt analyse (FMEA)
NEK EN 61025	Feiltreanalyse (FTA)
NEK IEC 61882	Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide
NEK IEC 62198	Project risk management - Application guidelines
NS-EN ISO 22300	Samfunnssikkerhet – Terminologi
NS-EN ISO 23001	Samfunnssikkerhet - Systemer for kontinuitetsplanlegging - Krav
NS-EN ISO 22313	Samfunnssikkerhet - Systemer for kontinuitetsplanlegging - Veiledning
ISO/PAS 22399	Societal security-Guideline for incident preparedness and operational continuity management

### A3. Innhold i tre av standardene

Tre standarder (vist i fet i Tabell B1) er av størst nytte:

Standarden SN-ISO Guide 73 inneholder en meget nyttig oversettelses guide for de viktigste ord innen risiko.

Standarden NS-ISO 31000 omhandler om:

- ✚ Rammeverket for risikovurdering (mandat og forpliktelse, fastsetting av risikostyringspolitikk og integrering i organisasjonens prosesser, kommunikasjons- og rapporteringsmekanismer, risikostyring, overvåking, og kontinuerlig forbedring av rammeverket).
- ✚ Prosessen for risikostyring.
- ✚ Risikovurdering (risikoidentifisering, risikoanalyse, risikoevaluering og risikohåndtering, herunder valg av risikohåndteringsalternativer, risikohåndteringsplaner, overvåking og registrering av informasjon i risikostyringsprosessen).

Standarden NS-ISO/IEC 31010 er på engelsk og har følgende innhold:

- ✚ "Risk assessment principles, including communication and consultation, context, risk assessment, risk treatment and monitoring and review".
- ✚ "Risk assessment process (risk identification, risk analysis, risk evaluation, documentation, monitoring and review of risk assessment and application of risk assessment during life cycle phases)".
- ✚ "Selection of risk assessment techniques".
- ✚ "Types of risk assessment techniques".

"Annexes in the standard include a comparison of risk assessment techniques and tables on the applicability and attributes of some of the tools used for risk assessment. One annex gives examples of the following quantitative or qualitative risk assessment techniques:

- Dose-response curve
- Failure tree analysis
- Event tree analysis
- Cause-consequence analysis
- Ishikawa or Fishbone diagram
- Tree formulation of cause-and-effect analysis
- Human reliability assessment
- Bow tie diagram for unwanted consequences
- System Markov diagram
- State transition diagram
- Sample Bayes' net
- The ALARP concept (As Low as Reasonably Practicable)

- Consequence criteria table
- Risk ranking matrix
- Probability criteria matrix
- Monte Carlo Simulation
- Discussion of conditional, prior and posterior probabilities."

# Vedlegg B

## RISIKOVURDERING – TRINN I BOWLES *ET AL'S* (2013) RAMMEVERK

### Innhold

B1.	Bowles <i>et al's</i> (2013) rammeverk for risikovurdering (UK)	2
B2.	Illustrasjon av rammeverket	2
B3.	Nivåtilnærming ("Tiered approach")	2
B4.	Valg av nivå for risikoanalyser	3



## B1. Bowles *et al*'s (2013) rammeverk for risikovurdering (UK)

Bowles *et al* (2013) foreslår et nivåtilnærming ("tiered approach") med nivå 1, 2 og 3 ("Tier 1, 2 and 3") for å velge metodikk og utføre risikovurdering. Mest parten av teksten er gjengitt (i forkortet form) fra Bowles *et al* (2013) for dammer (kalt "reservoirs" herein). Bowles *et al* (2013) representerer UK praksis. Derfor er vedlegget på engelsk.

## B2. Illustrasjon av rammeverket

Figure B1 illustrates the structured process designed for reservoir safety management and is applicable across all tiers of the system. Note that some steps are optional and may only be appropriate for some reservoirs.

## B3. Nivåtilnærming ("Tiered approach")

In a tiered approach, the quality of tools selected to analyse a specific dam may vary depending on which threat or failure mode dominates the risk of dam failure. Another significant consideration of analytical tools in a tiered approach is that the criterion for what constitutes the 'optimum' tool for a particular user will vary. For example, the owner/undertaker of a small dam who wants to use risk assessment to better understand the issues at the dam, or to check a risk assessment carried out by others, wants simple transparent methods, which could perhaps be applied using a calculator and paper, whereas an engineer or a specialist risk consultant may prefer a AutoCAD or a GIS-based software approach. The Bowles *et al* framework allows for a range of potential users and provides a range of tools for the risk assessment.

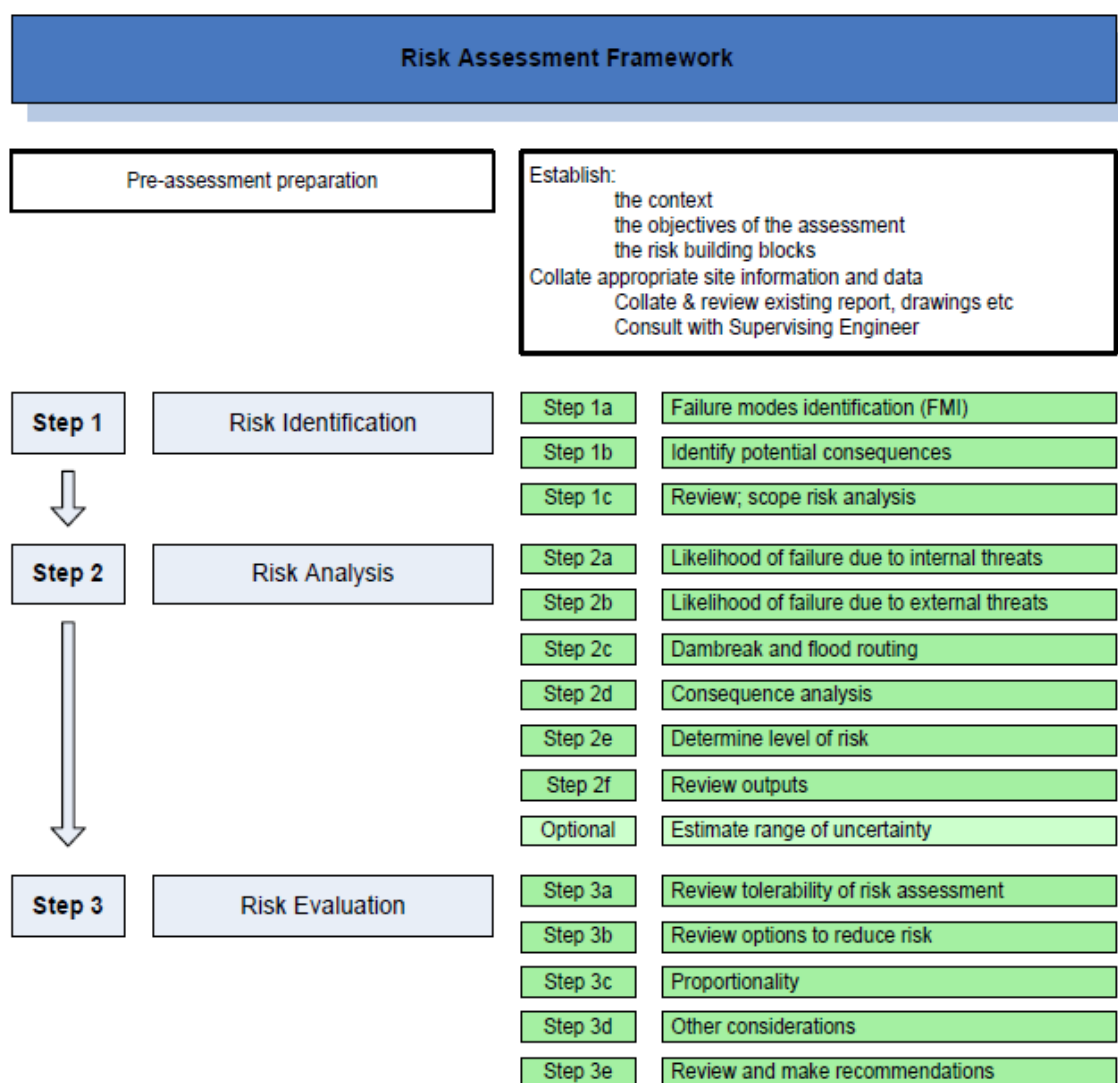
The Bowles *et al* (2013) tiered system consists of three tiers (Table B1):

- ✚ Tier 1 is qualitative. It is the simplest approach, with qualitative assessment of risk only.
- ✚ Tier 2 consists of basic quantitative analytical tools.
- ✚ Tier 3 involves quantitative methods with a range of degrees of detail.

Failure mode identification (FMI) underlies each of the tiered approaches. Table B2 describes the steps in the three-tiered system.

Tabell B1. Nivåtilnærming risikovurderingsanalyse (Bowles *et al* 2013).

Tier	Type of risk assessment	Description
1	Qualitative	Ranking of potential failure modes, order of magnitude likelihood and consequences estimates using a descriptive risk matrix. Optional sensitivity analysis.
2	Basic quantitative	Threshold analysis using manual calculations (that is, with a basic calculator). Optional sensitivity analysis.
3	Detailed quantitative	Range of levels – include system response curves, with range of initiating events (threats) using computer software for risk calculations. Dealing with uncertainty from formal sensitivity analysis to full uncertainty analysis.



Figur B1. Bowles et al's (2013) nivåtilnærming for risikovurdeirng.

## B4. Valg av nivå for risikoanalyser

The selection of the tier of risk assessment to undertake for a particular reservoir depends on a number of factors including:

- the scale of the threats to the dam
- the potential consequences should the dam fail
- the level of confidence in the results that is required

Implicit in a risk-based approach is a tiered approach, where simplistic analysis is carried out first to identify the significant risk contributors, followed by more detailed assessment of these where it is justified. When choosing an appropriate level of risk analysis, one should consider that:

Tabell B2. Beskrivelse av tre nivåer for risikovurdering i Bowles et al (2013)

Step		Tier 1	Tier 2	Tier 3
1a	Failure modes identification (FMI)	Review all available information. Interview supervising engineer and reservoir owner. Consider list of credible and significant core failure modes (internal erosion in embankment to be considered in all cases). If additional credible and significant failure modes are identified, consider using Tier 2 or 3.	As Tier 1 but potential failure modes, starting with blank sheet rather than focusing on core failure modes list. Checklists are used.	As Tier 2 and in addition: <ul style="list-style-type: none"> <li>– involve reservoir team</li> <li>– prepare detailed description of each credible and significant failure mode</li> <li>– develop event trees or fault trees</li> </ul>
1b	Identify potential consequences	Subjective review of Step 1a implications. Normally rainy day only.	Normally simplify to two scenarios (sunny and rainy day).	Move to greater range of consequence scenarios.
1c	Review; scope risk analysis	Determines the risk assessment scope and draws on experience and judgement		
	Uncertainty	Normally consider single point value for each parameter, but with explicit statement about confidence in estimates with the option for simple sensitivity analyses.	Probabilities and consequences are estimated as single point estimate, often selected to be conservative following a precautionary approach.	At entry level uses computer-based calculations including fragility (system response) curves. May extend to using Monte Carlo analysis with frequency (uncertainty) distributions of all inputs that may significantly affect decisions that are to be informed using risk estimates.
Likelihood of failure due to internal threats				
2a	Embankment dams	Uses a matrix of intrinsic condition and current condition.	Uses the probability of failure for the average dam from historic data. Then adjusts to the specific dam using condition mapping score, and adjusts to probability.	Uses event trees built upon detailed analysis and use of US Bureau of Reclamation (USBR) toolbox on piping failure.
	Concrete/masonry dams or reservoirs	Uses a matrix of intrinsic condition and current condition.	Simplified event trees using index stability graphs based on standard parameters.	Uses event trees.
Likelihood of failure due to external threats				
2b	Embankment dams	Uses matrix based on standard parameters.	Dam critical load.	Stability/ seismic analysis using range of input parameters (Monte Carlo) to assess uncertainty.
	Concrete/masonry dams or reservoirs		As for 'Internal threats'.	Event tree with site-specific stability analysis (ranging from limit equilibrium to 2D/3D dynamic).
2c	Dam break and flood routing	Uses existing maps or proportion of dam height plus estimated inundation area.	Simplified breach (Froehlich) and modified CIRIA C542.	Full breach analysis and inundation modelling.
2d	Consequence analysis	People: uses a qualitative assessment of broad scale number of houses, using a 25,000 scale map. Other receptors: simplified using as a minimum 25,000 scale map.	People: uses a simplified quantitative assessment, using 25,000 map and drive down valley. Other receptors: internet based search of government and other databases.	Uses a GIS-based assessment.
2e	Determine level of risk	5 x 5 qualitative matrix based on Best Practices Training Manual (BPTM). Plot one point for overall probability of failure and worst case consequences.	F-N chart with one point for overall risk. Numeric value for individual risk and economic damage.	Multiple failure modes and consequence scenarios.

Step		Tier 1	Tier 2	Tier 3
			Qualitative matrix for other consequences.	
2f	Review outputs	Subjective sanity check on the results. Draws on experience and judgement.		
3	Risk evaluation	Review. 5 x 5 matrix for tolerability.	Review. ALARP calculation for tolerability.	Review.

- ✚ All levels of analysis build from an initial failure modes identification (FMI) process.
- ✚ An initial entry level for risk analysis can be made via any Tier, however the simplest, most rapid assessment method is provided by Tier 1.
- ✚ Tier 1 provides a qualitative assessment of risk; Tier 2 offers the simplest form of quantitative assessment
- ✚ Tier 3 provides a framework for more complex risk assessment, including more detailed analysis of processes and interdependencies. Tier 3 would be used where risks are uncertain and potentially high, requiring a more detailed assessment.
- ✚ For each of the tiers the effort required for analysis is intended to be proportionate to the risk and/or user needs. Tier 1 provides the minimum effort entry level for analysis (qualitative); Tier 2 the minimum effort entry level for quantitative assessment and Tier 3 more complex methods for situations with the potential for higher risks.

Figure B2 summarizes the needs and output associated with each of the three tiers in Bowles *et al's* (2013) approach. Bowles et al (2013) recommended the following for the implementation of Tiers 1, 2 and 3:

A Tier 1 risk assessment is likely to be sufficient for small reservoirs in remote areas with little in the way of potential consequences, whereas as large capacity reservoir with a high dam and significant potential consequences should it fail is likely to require the level of confidence that only a Tier 3 assessment can provide. Exceptions might be when a Tier 1 assessment is sufficient for the large reservoir as an initial assessment to prioritise investment in future efforts for more detailed risk assessment, including supporting studies, and for risk reduction actions. It is worth noting that initial risk assessments that have been completed as part of portfolio risk assessment for such large reservoirs in the UK have generally been conducted at a level of detail in the range of Tier 2 to entry-level Tier 3. Much of the effort needed to conduct a Tier 1 analysis is typical of what might be expected of an inspecting engineer. The process works through a limited FMI process and a qualitative assessment of risk. This can be performed relatively quickly and provides a base assessment of risk which will help identify whether the reservoir has any risk issues of concern. Where there is the potential for significant risk to people or other receptors, a more detailed Tier 2 or 3 assessments might be appropriate to resolve uncertainties and support management decisions.

A Tier 2 analysis provides a base quantitative estimate of reservoir risk, whereas a Tier 1 analysis provides a qualitative estimate. A Tier 2 analysis may be undertaken when risk issues have been identified at Tier 1 that justify moving to Tier 2, or it may selected as the initial risk assessment when the owner/undertaker or inspecting engineer already know that Tier 2 is justified because the risk needs to be quantified to support appropriate management

actions. It may also be selected when there is a threat or failure mode that is considered significant to the safety of the dam but which is not covered at Tier 1. It is the responsibility of the user to identify any significant failure modes that are not addressed in Tier 1 and to move to a Tier 2 or 3 analysis if these failure modes are not included in the Tier 1 approach.

The Tier 3 analysis introduces more complex methods for analysing failure modes and associated consequences, and the important interdependencies between them. This level of analysis entails the use of more complex models and more in-depth methods for identifying potential failure modes and the integration of these analyses within the overall assessment of risk. The extent to which the analyses may be undertaken varies and will depend on the level of understanding and confidence desired for decision-making. The effort required for analysis in each of the tiers is generally proportionate to the level of risk. A Tier 3 analysis may be undertaken where an earlier Tier 1 or 2 analysis has identified high potential risks and the magnitude of these risks justifies the effort required to analyse and reduce the uncertainties around the estimates to adequately.

<i>User Needs</i>	<i>Tier</i>	<i>Outputs</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rapid, simple, qualitative assessment</li> <li>- An initial assessment to understand potential risks</li> <li>- Provides support for a Section 10 assessment</li> </ul>	<b>Tier 1 Qualitative</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Failure Mode Identification</li> <li>- Estimation of likelihood and consequence, represented on an impact matrix (ie. risk described as high, medium, low etc).</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quantitative risk assessment</li> </ul>	<b>Tier 2 Simplified Quantitative</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Failure Mode Identification</li> <li>- Provides numerical estimate of failure probability and risk</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quantitative risk assessment</li> <li>- Detailed consideration of specific processes and risks, including interdependencies</li> </ul>	<b>Tier 3 Quantitative</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Failure Mode Identification</li> <li>- Provides a more refined numerical estimate of failure probability and risk</li> </ul>

Figur B2. Brukerbehov og output for tre-nivå risikovurdering ("Tier 1, 2, 3") (Bowles et al 2013).

# Vedlegg C

## KRITERIER FOR AKSEPTABEL RISIKO

### INNHold

C1.	Utvikling av akseptable risikokriterier i form av <i>F-N</i> kurver	2
C2.	Årlig sannsynlighet for brudd	2
C3.	HSE's (2010) "tolerability of risk" (TOR) rammeverk	2

## C1. Utvikling av akseptable risikokriterier i form av *F-N* kurver

Figur C1 beskriver utviklingen av samfunnsmessig risiko kriterier i Nederland, UK, Hong Kong, Canada-USA og Australia (ANCOLD). Alle kriterier er uttrykk i form av F-N kurver.

## C2. Årlig sannsynlighet for brudd

Den årlige sannsynligheten for brudd er vanligvis uttrykk med et eksponentielt tall. Sannsynligheter for brudd kan relateres til én frekvens for at et brudd kan skje en gang over en tidsperiode. Tallene er gitt i Tabell C2.

Table C1. Eksponentiell sannsynlighet for brudd og frekvens av hendelsen over tid.

Sannsynlighet for brudd Eksponentielt uttrykk	Frekvens for hendelsen over tid
$10^{-0}/\text{år}$	En gang i løpet av ett år
$10^{-1}/\text{år}$	En gang i løpet av 10 år
$10^{-2}/\text{år}$	En gang i løpet av 100 år
$10^{-3}/\text{år}$	En gang i løpet av 1,000 år
$10^{-4}/\text{år}$	En gang i løpet av 10,000 år
$10^{-5}/\text{år}$	En gang i løpet av 100,000 år
$10^{-6}/\text{år}$	En gang i løpet av 1,000,000 år
$10^{-7}/\text{år}$	En gang i løpet av 10,000,000 år
$10^{-8}/\text{år}$	En gang i løpet av 100,000,000 år

## C3. HSE's (2010) "tolerability of risk" (TOR) rammeverk

The process of examining and judging the significance of estimated risks is termed 'risk evaluation'. The Health and Safety Executive (HSE) has a well-established framework for risk evaluations conducted in the UK called the Tolerability of Risk (TOR). The HSE Tolerability of Risk framework is based on the way that risks are managed in everyday life. It aims to be transparent and to encourage the participation of all stakeholders, including those that are at risk.

Except in exceptional circumstances, risks that fall in the unacceptable region must be reduced by structural or non-structural measures, irrespective of the cost, to bring them down into the range of tolerability. Even if a risk is in the 'range of tolerability', it should be reduced to be 'as low as reasonably practicable' (ALARP). The ALARP principle is met when it is deemed grossly disproportionate in terms of expending resources to gain any further reduction in risk. Application of the ALARP principle therefore requires the formulation of risk control (or 'treatment') options. These might, for example, include structural measures, improved monitoring and surveillance, emergency action planning and staff training.

In traditional reservoir safety practice, dam safety is periodically reassessed. These reassessments should include a review and update of any earlier risk assessments as appropriate, as shown by the line that links 'Risk Control' to 'Failure Modes Identification'.

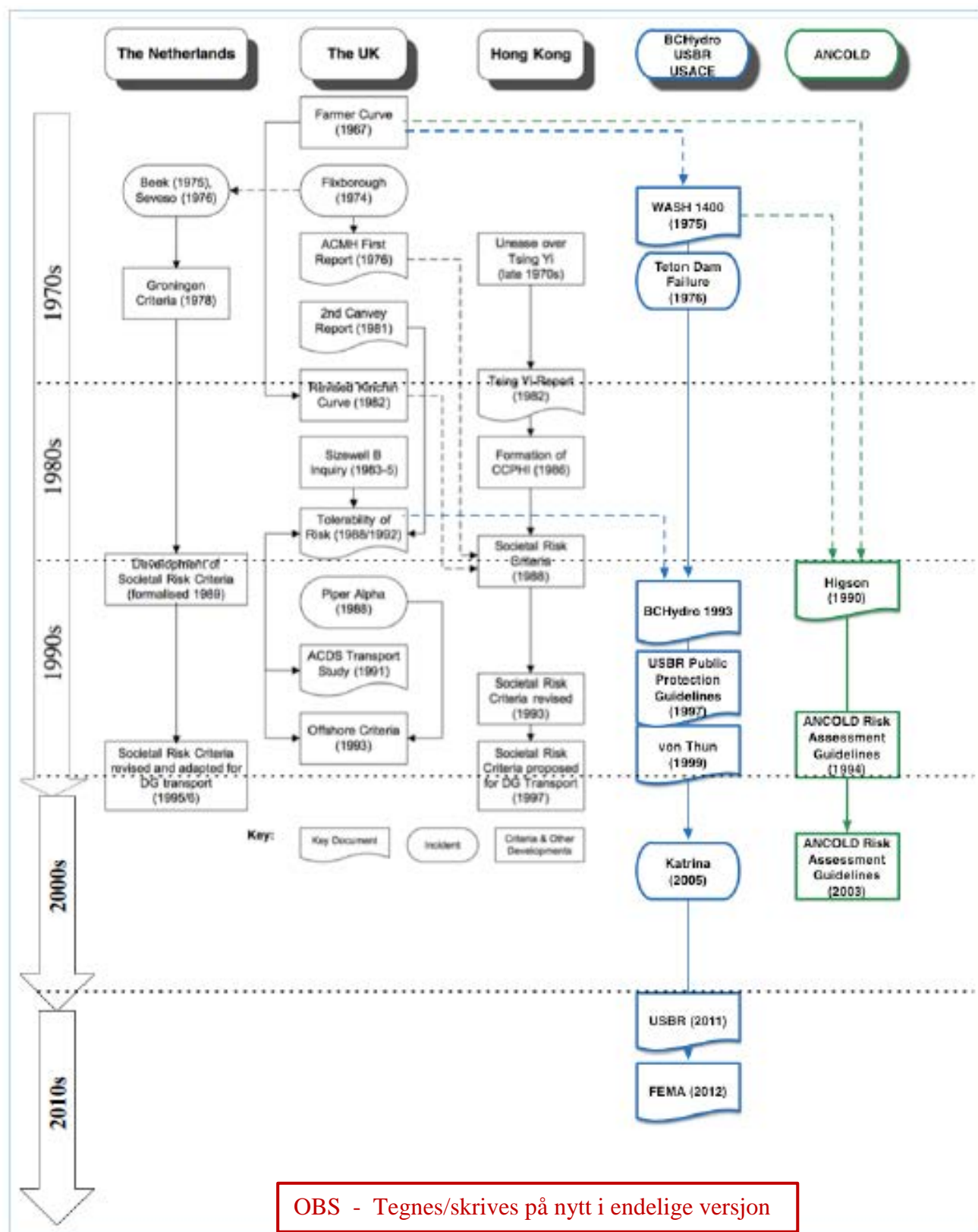
The TOR framework is an approach to managing risks to individuals and to society. Societal risk addresses how large numbers of people might be affected in an event and the potential for triggering a socio-political reaction. Assessed individual and societal risks can be assigned to one of three categories:

**Broadly acceptable** – risks compared with those that people live with every day and which they regard as insignificant and not worth worrying about (for example, health risks associated with using mobile phones).

**Unacceptable** – risks are generally believed by individuals and society to be not worth taking regardless of the benefits (for example, building residential areas on toxic landfills).

**Range of tolerability** – individuals and society are willing to live with the risks so as to secure certain benefits, provided that they are confident that they are being properly managed, and that they are being kept under review and reduced still further if and as practicable (for example, vehicular and airline travel).





OBS - Tegnes/skrives på nytt i endelige versjon

Figur C1. Utvikling av samfunnsmessig akseptabel risiko i fem land (etter Baecher et al 2015).

# Vedlegg D

## PFMA - "POTENTIAL FAILURE MODE" ANALYSER

### Innhold

<b>D1. Introduction</b>	<b>2</b>
<b>D2. Potential failure modes analyses</b>	<b>2</b>
D2.1 Flood Overtopping Failure of Dams	2
D2.1 Internal erosion failure of dams	5
<b>D3. References</b>	<b>8</b>

## D1. Introduction

Teksten og figurine er hentet fra Brown og Gosden (2004), BoR and USACE(2012) og Bowles *et al* (2013). Vedlegget er derfor på engelsk.

## D2. Potential failure modes analyses

There are many ways in which dam failures can occur. Failures occur through the realization of a combination of a threat and failure mode. Mechanisms by which failure can occur can happen rapidly or slowly over time. The probability of failure associated with specific combinations of threat and failure mode varies, but some modes of failure are more common than others. Bowles *et al* (2013) proposed a matrix illustrating the combination of initiating threats and failure modes (Table D1).

### D1.1 Flood Overtopping Failure of Dams

The erosion and breaching process can be subdivided into a sequence of necessary steps, BoR and USACE(2012):

- ✚ Erosion of the surface of the downstream slope, which may consist of vegetation, riprap, or bare soil.
- ✚ Concentrated erosion on the downstream slope causing a deepening of the erosion channel until one or more headcuts are formed on the downstream slope (for conservatism, physically-based dam breach models such as WinDAM B assume that a headcut is formed at the top of the slope / downstream edge of the dam crest; see chapter 15 Modeling Erosion of Rock and Soil for details).
- ✚ Advancement of headcuts upstream, usually accompanied by consolidation of multiple headcuts.
- ✚ When the most upstream headcut advances through the upstream edge of the dam crest, breach is initiated and the breach opening begins to enlarge. (After this point, intervention to save the dam is no longer possible).
- ✚ Headcuts continue to advance upstream, enlarging the breach and releasing reservoir storage.
- ✚ The breach widens as long as hydraulic stresses at the sides of the breach opening are sufficient to exceed the erosion threshold of the soil

#### D2.1.1 Overtopping failure due to extreme rainfall

Brown and Gosden (2004) consider the most common critical mechanisms of deterioration for extreme rainfall:

Table D1. Matrix illustrating the combinations of initiating threats and progression to failure (Bowles et al 2013)

Threat	Progression (failure mode) (code in brackets is carried forward into the Tier 2 methodology)					Liquefaction Foundation (8)	Reactivation of fault (9)	Internal erosion Four types, as ICOLD bulletin (Section 8.1.1) (10)
	Scour (Section 8.2.2) (1)	Adjacent to chute (Section 8.2.3) (2)	Crest wall (Section 8.2.2) (3)	Structural failure of Chute (Section 8.2.3) (4)	Body of embankment (Section 8.2.4) (5)			
Flood (Fl)	Overtop crest and spill over downstream face	Exceed capacity of chute	Wave loading causes shear overturn	Velocity head penetrates behind stones in masonry chute	Overtop crest, fill saturates leading to slope instability	Tensile crack on lift joint	Tensile strength on foundation contact	Elevated hydraulic gradient causes hydraulic fracture
Wind (Wl)	Waves overtop crest, scour fill				Waves overtop crest, saturate fill			
Adverse weather (Aw)	Intense rain causes local scour down mitres/other concentrated run-off				Intense rain saturates downstream slope leading to slope instability	Thick ice sheets forms on reservoir, melts fast generating large lateral load on dam causing dam instability.		
Failure of upstream dam	Similar failure mode to flood (but note that failure of upstream dam should not usually be included as a threat to the downstream dam. This is because the allocated responsibility (at least the cost associated with protecting against the effects of upstream dam failure on the downstream dam) would transfer to the downstream owner. Therefore the normal convention is to attribute the consequences of downstream dam failure to the result of an upstream dam.							
Reservoir drawdown (Rds)					Slow drainage of upstream face			
Earthquake (Eq)					Seismic load causes slope instability	Seismic load causes dam instability	Seismic load causes dam instability	Major displacement on fault
Uncontrolled inflow (In)	Overtop crest and spill over downstream face				Increase pore pressure in fill			
Actions of man (Ma)	Fall to open gates to pass floods				Trees removed – increase in pore pressures and loss of strength of roots. Excavation for services into toe of dam			
Deterioration	Internal threats include deterioration due to features such as stress changes due to consolidation and/or cyclic loading under seasonal changes in reservoir level. The likelihood of embankment dam failure due to internal threats cannot be predicted reliably by analysis, so the likelihood of this is estimated using historic failure rates – see text on internal threats.							
Body of dam (Db)					Flow through crack in core increases pwp in downstream shoulder	Degradation of body (for example alkali-silica reactions) lead to loss of strength/water tightness		May be intermittent/ time related
Dam foundation (Df)							Differential settlement . stress transfer lead to sudden (brittle) failure	May be intermittent/ time related
Interface structure and fill (Di)								Commonly due to hydraulic separation
Structural material through dam (Ds)	Pipe burst within fill supporting core/SR gravity wall erodes fill, loss of support to wall							Leak from old pipe, or through brickwork
Lining to reservoir (Li)							Leakage leads to increased pore pressure in foundation	Leakage leads to increased hydraulic gradients in foundation

CMSR = concrete/masonry dam and/or service reservoirs  
 Coding = flood, leading to overtopping of crest and spill over downstream face – (F11)

- ✚ where the flood inflow exceeds the spillway capacity, such that the embankment fails by overtopping during the duration of the flood in question, and
- ✚ where partial blockage of the weir crest, and separate partial blockage of any downstream control due, for example, to branches of trees, reduces the effective spillway capacity such that (a) occurs.

Suggested mechanisms of deterioration include:

- Inflow exceeds spillway capacity, causing dam to overtop
- High flows and reservoir levels carry debris towards spillway, and cause partial or complete blockage
- Instability of reservoir rim, leading to flood wave down reservoir
- High surface runoff over surface of dam/at abutments
- Increased reservoir pressure causes hydraulic fracture
- Increased pore pressures in downstream shoulder/foundation
- Increase in load applied to dam
- Other

Factors that may be considered as being relevant to the criticality of the candidate mechanisms of deterioration are shown in Table D2.

*Table D2. Factors contributing to outcome of event sequences initiated by extreme rainfall (Brown and Gosden 2004).*

Feature	Contributory factor which should be considered when assessing	
	The likelihood of a mechanism of deterioration occurring	The likelihood of the dam failing given that a mechanism of deterioration initiates
Intrinsic Condition	Spillway capacity Obstructions in spillway Reservoir surface are Flood freeboard Vegetation/trees around reservoir rim Geometry and detailing of abutments, including presence of mitre drains Steep slopes in reservoir (any with a previous landslide?)	Levelness and width of crest Erosion resistance of crest and downstream face material (both presence of vegetation and underlying material) Erodibility of shoulders/toe Slope stability of shoulders/foundation
Other	Level of reservoir prior to storm (reservoir often empty?) Where there are spillway and outlet gates, the amount of warning given and the time to operate gates Duration of inflow	

Note: excludes contributory factors relating to mechanisms of deterioration deemed to be included with internal threats.

### D2.1.2 Failure due to upstream reservoir

Suggested mechanisms of deterioration include:

- Inflow exceeds spillway capacity, causing dam to overtop.
- Increased reservoir pressure causes hydraulic fracture.

- Increased pore pressures in downstream shoulder/foundation.
- Increase in load applied to dam.
- Other.

Factors that may be considered as being relevant to the criticality of the candidate mechanisms of deterioration are shown in Table D2 (for intrinsic conditions) and in Table D3.

*Table D3 Factors contributing to outcome of event sequences initiated by failure of upstream dam (Brown and Gosden 2014).*

Feature of	Contributory factor which should be considered when assessing	
	The likelihood of a mechanism of deterioration occurring	The likelihood of the dam failing given that a mechanism of deterioration initiates
Intrinsic Condition	As Table 2.1	As Table 2.1
Other	Level of reservoir prior to failure Where there are spillway and outlet gates amount of warning given and time to operate gates Condition of upstream dam Rate of development of breach in upstream dam Attenuation between reservoirs due, for example, to wooded flood plain Volume of water stored in upstream reservoir	

## D2.1 Internal erosion failure of dams

Internal erosion potential failure modes can be categorized into general categories related to the physical location of the internal erosion pathway. Case histories of dam failures can be related to five general categories of internal erosion:

- Internal erosion in the embankment (Fig. D1)
- Internal erosion in the foundation (Fig. D2)
- Internal erosion of the embankment into the foundation (Fig. D3), including along the embankment-foundation contact (Fig. D4)
- Internal erosion along or into embedded structures such as conduits or spillway walls
- Internal erosion into drains such as toe drains, stilling basin underdrains, etc.

The process of internal erosion is generally broken into four phases: 1) initiation of erosion; 2) continuation of erosion; 3) progression of erosion; and 4) initiation of a breach. This is illustrated in the main text of the report (Figs 3-1 to 3-4).

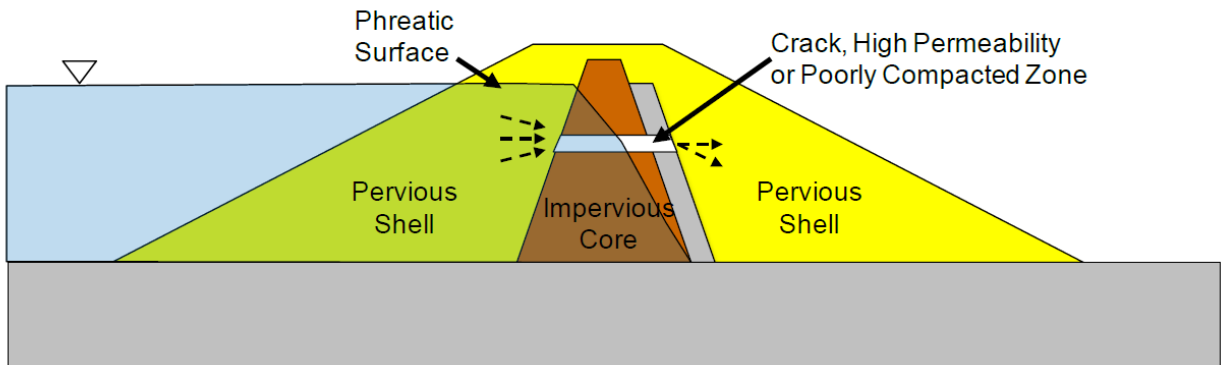


Figure D1. Internal erosion in the embankment

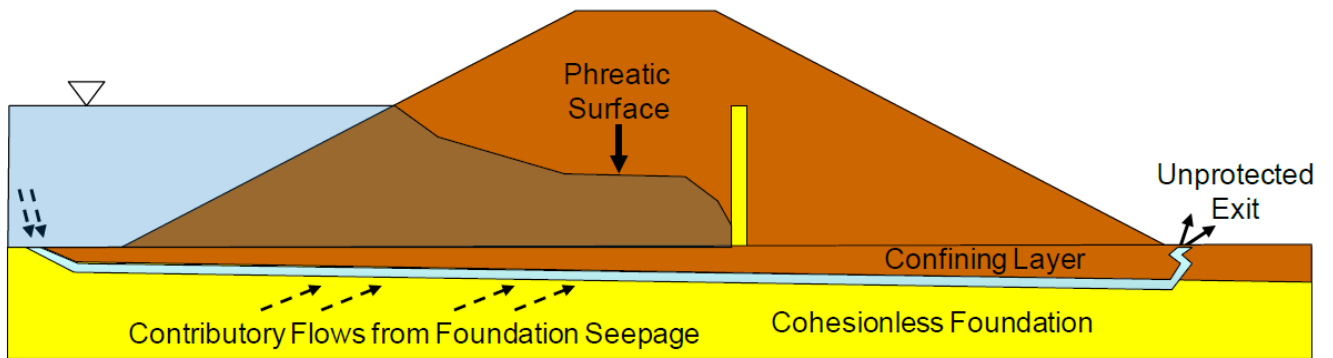


Figure D2. Internal erosion in the foundation

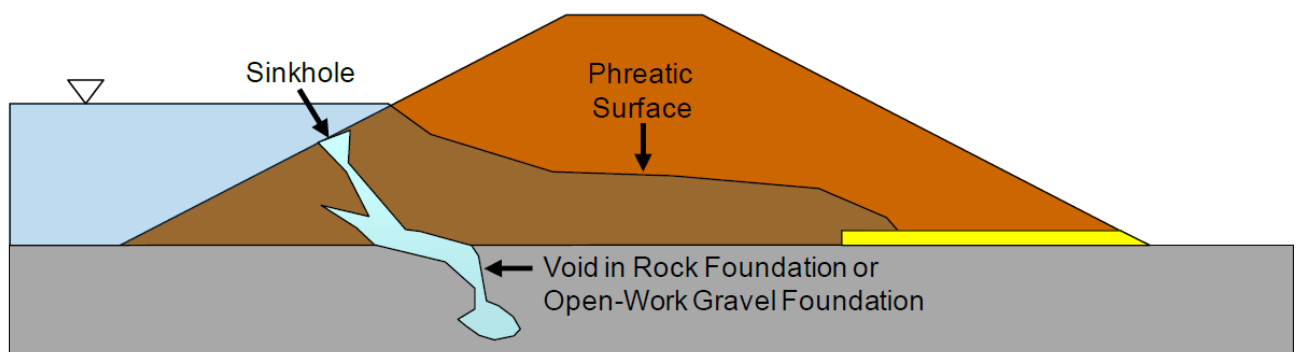


Figure D3. Internal erosion of the embankment into the foundation

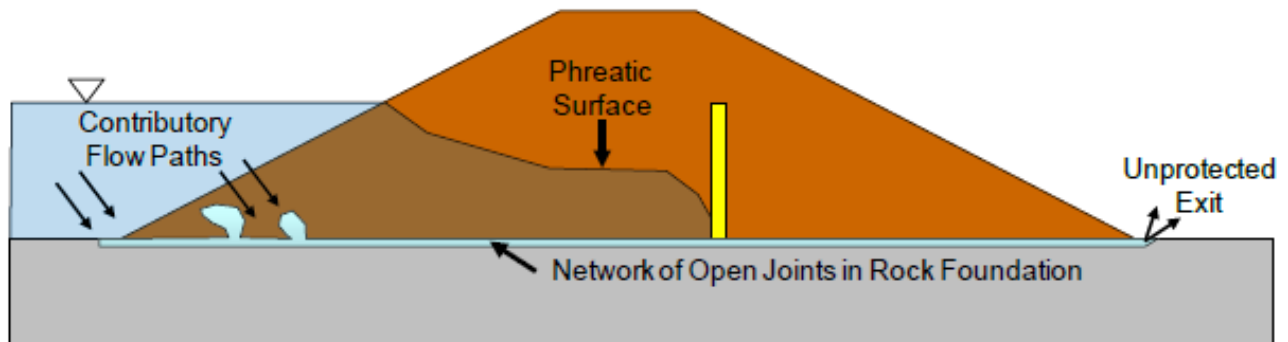


Figure D4. Internal erosion along the embankment-foundation contact

### D2.1.3 Generic Internal Erosion Event Tree

A generic sequence of events was developed for internal erosion failure modes that is based on the four phases of internal erosion: 1) initiation of erosion; 2) continuation of erosion; 3) progression of erosion; and 4) initiation of a breach. In addition, a threshold reservoir elevation (or several different ranges of elevations) and the likelihood of unsuccessful detection and/or intervention are assessed.

- ✚ Reservoir at or above threshold level.
- ✚ Initiation – Erosion starts.
- ✚ Continuation – Unfiltered or inadequately filtered exit exists.
- ✚ Progression – Continuous stable roof and/or sidewalls.
- ✚ Progression – Constriction or upstream zone fails to limit flows.
- ✚ Progression – No self-healing by upstream zone.
- ✚ Unsuccessful detection and intervention.
- ✚ Dam breaches (uncontrolled release of reservoir).

A summary of the generic Internal Erosion Event Tree is given in Table D4.

The statistics of historical failures and embankment dam incidents can provide some insight when estimating the likelihood of a flaw or initiation of internal erosion. However, such rates should be used with caution based on the general method in which they were developed. Whenever historical rates are provided, they may be more representative of the product of several probabilities on the internal erosion event tree.



Table D4. Generic Internal Erosion Event Tree.

<b>Event</b>	<b>Basic Considerations</b>
Reservoir loading	Annualized probability of the reservoir reaching a certain threshold elevation below which the probability of internal erosion initiating is remote.
Flaw (if included as a separate event)	A “flaw” is a crack or gap that is or may become continuous, poorly compacted zone, or high permeability zone in which a concentrated leak may form. For Backward Erosion Piping (BEP), no flaw is required, but a continuous zone of cohesionless soil in the embankment or foundation is required.
Initiation	Does erosion initiate under the seepage gradients or potential leakage conditions? Consider the erodibility of the soil and internal erosion mechanism.
Continuation	Does an unfiltered or inadequately filtered exit exist to allow erosion to continue?
Progression	Will a continuous stable roof form over a developing pipe, or will continuous stable sidewalls be maintained along a crack? Does the upstream zoning fail to constrict or limit flows? Does the upstream zoning fail to self-heal an erosion pathway? Consider the global or horizontal gradient required to advance a pipe to the reservoir.
Unsuccessful Detection and Intervention	Is the location of the seepage or signs of erosion (i.e., particle transport) observable? Are the type and frequency of surveillance, monitoring, and inspection sufficient to detect the seepage? Are adequate personnel, equipment, and materials available to respond? Is the project or affected area on the embankment accessible? Is there sufficient time to intervene based on the rate of erosion? Can the reservoir be drawn down in time to prevent initiation of a breach?
Breach	Gross enlargement of a pipe or concentrated leak. Sloughing or unraveling of the downstream face. Sinkhole development. Slope instability.

### D3. References

- Brown, A.J. and Gosden, J.D. (2004). Interim guide to quantitative risk assessment for UK reservoirs. Thomas Telford Publishing, London, ISBN 0 7277 3267 6.
- BoR and USACE (2012). Best Practices in Dam Safety and Levee Safety Risk Analysis. Bureau of Reclamation and U.S. Army Corps of Engineers. 2012., Denver, Colorado.
- Bowles, D.S., Brown, A., Hughes, A.K., Morris, M., Sayers, P., Topples, A., Wallis, M. and Gardiner K.G. (2013). Guide to risk assessment for reservoir safety management. Environment Agency. UK

# Appendix E

## VERKTØY FOR PROBABILISTISKE BEREGNINGER

### Contents

<b>E1. Hazard curves</b>	<b>2</b>
E1.1 Seismic hazard curves	2
E1.2 Water level exceedance curves	2
E1.3 System response curves for event tree analysis	3
<b>E2. Probabilistic analysis/reliability analysis</b>	<b>4</b>
E1.4 Methods for performing probabilistic analyses	5
<b>E3. References</b>	<b>7</b>

## E1. Hazard curves

Hazard curves commonly describe the probability of exceedance, i.e. the probability that the random variable (e.g. water surface elevation or peak ground acceleration) will exceed a particular value within a particular time period (usually annual). Hazard curves are used to:

- ✚ annualize the risk estimate
- ✚ develop probability inputs for the loading branches of event tree.

In many cases, hazard curves are the most important and most commonly used screening tool in analyzing risks.

### E1.1 Seismic hazard curves

Seismic hazard curves have “annual probability of exceedance” or “return period”, on the vertical axis and peak ground acceleration (PGA, usually expressed in terms gravity, or g) or other measure of seismic loading, such as the response spectra acceleration at a given period of vibration, on the horizontal axis. PGA and peak horizontal acceleration, PHA are often used interchangeably (BoR and USACE 2012).

A hazard curve is developed for each individual earthquake source that might affect the dam. The total rate at which a given ground motion level is exceeded is simply the sum of the rates for these individual sources. The seismic hazard curves are calculated using ground motion attenuation relations that relate PGA or spectral acceleration (SA) to the distance between the seismic source and site, and the magnitude of the earthquake associated with the source. Site conditions are very important, and include the fundamental period of the dam, footwall versus hanging wall location, rupture direction, and foundation characteristics, *i.e.*, “soil” versus “rock”.

Most dam and levee safety studies include several types of hazard curves, depending on the level of study and the type of dam (embankment versus concrete). The most common curve is one showing mean and fractile values for PHA or PGA. Figure E1 shows an example of the mean and fractile hazard curves for PHA.

### E1.2 Water level exceedance curves

Often the level of the reservoir, or water surface stage, is a key loading parameter for evaluating a potential failure mode. Probabilities for branches that follow water surface stage in the event tree are often conditional on the magnitude of the load. Since the forces acting on a structure are generally proportional to the height of the water squared, the probability of failure typically varies with the water surface stage. Consequences are also influenced by the water surface stage and other related parameters such as reservoir volume. Consequences may be low to moderate below a certain stage (e.g. top of active storage), but could increase rapidly above that stage due to increased discharge releases. The probability of attaining a given range in reservoir elevation can therefore be an important consideration in performing a risk analysis.

The period of record data can be used to infer the probability of future water surface stages. The data should be reviewed to verify that the period of record is representative of current operating conditions. If there has been a change in operation somewhere during the record, this must be identified and only data consistent with the expected future operation used in the evaluation.

Reservoir exceedance curves could be solely based on historic recorded reservoir level data, or also include expected levels resulting from floods. An example curve for water level exceedance probability is shown in Figure E2.

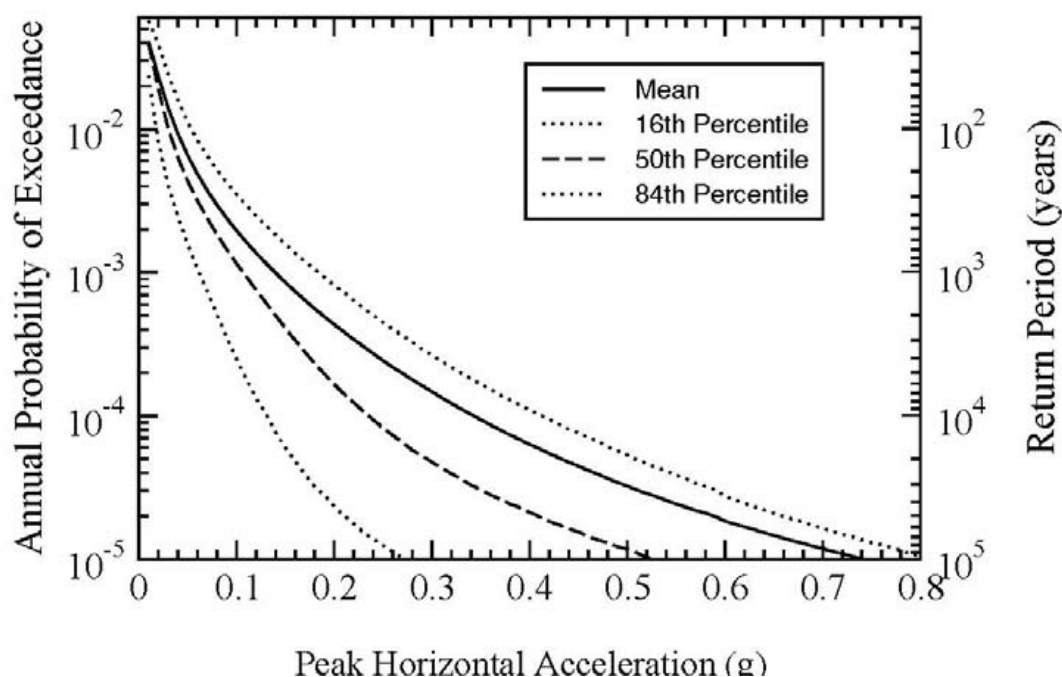


Figure E1. Example of mean and fractile hazard curves for peak ground acceleration (PHA) (BoR and USACE 2012)

### E1.3 System response curves for event tree analysis

Potential failure mode sub-trees can be used to develop system response curves that describe the probability of failure as a function of one or more loading parameters such as water surface elevation or ground acceleration. The event tree is evaluated for multiple loading scenarios. The number and spacing of load scenarios should be sufficient to describe the shape of the system response curve over the full spectrum of potential loads. A curve can be fitted to the resulting data so that the probability of failure can be estimated for any load condition by interpolation. An example system response curve is presented in Figure E3.

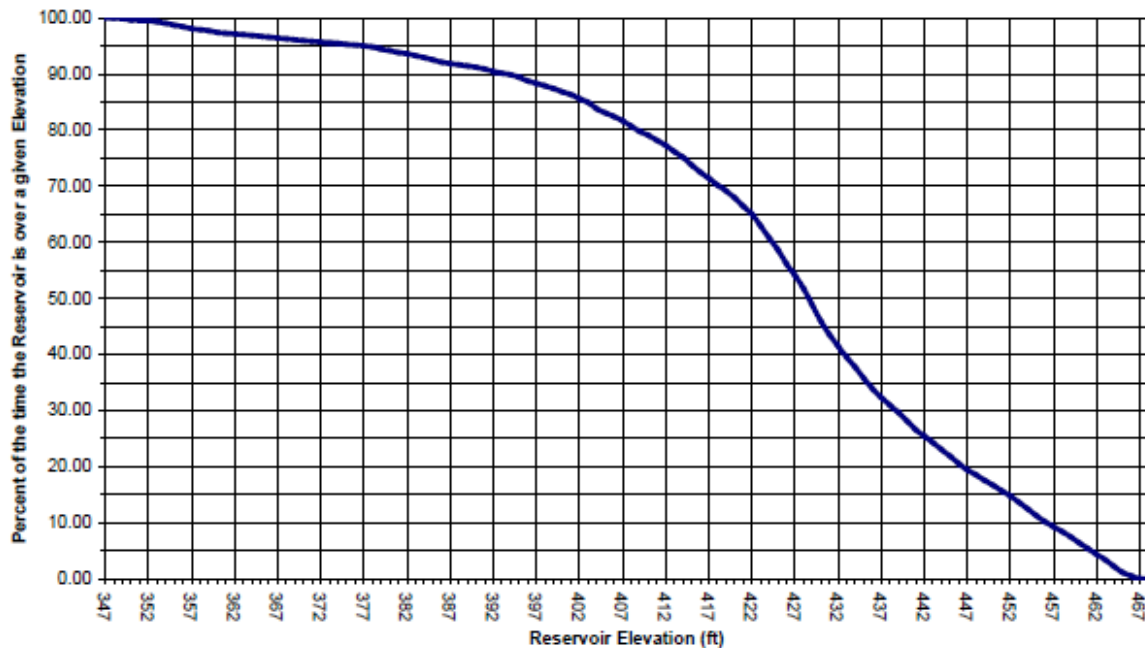


Figure E2. Example of Reservoir Percentage of Time Exceedance Plot (BoR and USACE 2012).

## E2. Probabilistic analysis/reliability analysis

When appropriate models are available, reliability analysis can be a useful tool in estimating response components or “conditional” probabilities (probabilities that are conditional upon given loadings or states). That is, given the loading condition (e.g. reservoir level or earthquake) and state (e.g. liquefied foundation) they help define the failure probability. This may occur for one or more branches of a fairly complex event tree.

A probabilistic failure analysis gives the same insight as a large number of parametric analyses, where all uncertain parameters are varied. The starting point is the same as for a conventional deterministic analysis by establishing an equation defining failure. When a deterministic model to analyse a geotechnical problem exists, a probabilistic analysis can always be established. In a probabilistic analysis uncertainties in each of the parameters in the equation are introduced and need to be quantified. For conventional stability analysis, the input parameters (parameters for load and resistance) are presented as single values and the output is a single value of the safety factor. In probabilistic analyses, each input parameter is formulated as a probability density function, i.e. describing the most probable value and the distribution of uncertainty. The output is a probability density function of the safety factor, from which the probability of failure can be calculated. The probability of failure equals the probability of the safety factor being less than 1. The reliability index,  $\beta$ , is defined as:

$$\beta = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}}$$

where  $\mu_{FS}$  is the mean factor of safety and  $\sigma_{FS}$  is the standard deviation of factor of safety. The parameter  $\beta$ , the reliability index, may be interpreted as the number of standard deviations away from an unsafe situation.

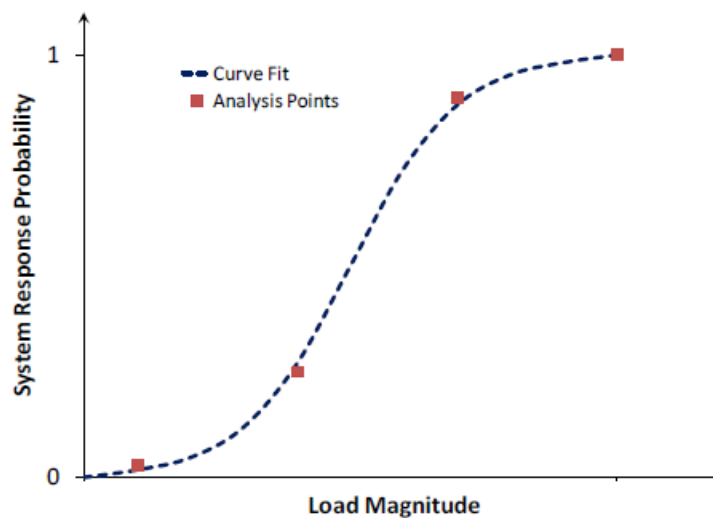


Figure E3. Example system response curve (BoR and USACE 2012).

## E1.4 Methods for performing probabilistic analyses

There are several methods for performing probabilistic analyses. Three commonly used methods are:

- ✚ Monte Carlo Simulation (MCS)
- ✚ First Order Reliability Method (FORM)
- ✚ First Order Second Moment Method (FOSM)

The methods are shortly described below.

### Monte Carlo Simulation (MCS)

A Monte-Carlo simulation is a repeated simulation of problem solution with randomly selected values of variables. The method applies to all problems but can require a large number of simulations. It can be made more efficient with Latin Hypercube sampling (LHS), which is a Monte Carlo simulation optimised by "organised" sampling. It reduces considerably the number of simulations required for a reliable distribution of the response.

Monte Carlo simulation is a powerful technique that is applicable to both linear and non-linear problems. This technique is implemented in commercial slope stability analysis packages (e.g. GEO-SLOPE and @Risk in EXCEL). However, when the probability of failure is very small, the number of simulations required to obtain an accurate result is so large that it renders the application impractical, especially when Monte Carlo simulation is performed around the mean values. A Monte Carlo simulation around the design point is preferable.

### First Order Reliability Method (FORM)

The First-Order Reliability Method, FORM essentially involves (1) transforming a general random vector into a standard Gaussian vector, (2) locating the point of maximum probability density (most likely failure point, design point, or simply  $\beta$ -point) within the failure domain and (3) estimating the probability of failure as  $P_f \approx \Phi(-\beta)$ , in which  $\Phi(\cdot)$  is the standard Gaussian cumulative distribution function.

In FORM a performance function  $G(\mathbf{X})$ , is defined such that  $G(\mathbf{X}) \geq 0$  means that the slope is stable and  $G(\mathbf{X}) < 0$  means that the slope has failed.  $\mathbf{X}$  is a vector of basic random variables including soil properties, load effects, geometry parameters and modelling uncertainty. If the joint probability density function  $F_x(\mathbf{X})$  is known, then the probability of failure  $P_f$  is given by

$$P_f = \int_L F_x(\mathbf{X}) d\mathbf{X}$$

where  $L$  is the domain of  $\mathbf{X}$  where  $G(\mathbf{X}) < 0$ .

In general the above integral cannot be solved analytically, and an approximation is obtained by the FORM approach. In this approach, the general case is approximated to an ideal situation where  $\mathbf{X}$  is a vector of independent Gaussian variables with zero mean and unit standard deviation, and where  $G(\mathbf{X})$  is a linear function. The probability of failure  $P_f$  is then:

$$P_f = P(G(\mathbf{X}) < 0) = P\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i X_i - \beta < 0\right) = \Phi(-\beta)$$

where  $\alpha_i$  is the direction cosine of random variable  $X_i$ ,  
 $\beta$  is the distance between the origin and the hyperplane  $G(\mathbf{X}) = 0$ ,  
 $n$  is the number of basic random variables  $\mathbf{X}$ , and  
 $\Phi$  is the standard normal distribution function.

The vector of the direction cosines of the random variables ( $\alpha_i$ ) is called the vector of sensitivity factors, and the distance  $\beta$  is called the reliability index.

The higher the value of reliability index  $\beta$  computed from Equation 2, the smaller the probability of failure. The square of the direction cosines or sensitivity factors ( $\alpha_i^2$ ), which sum is equal to unity, quantifies in a relative manner the contribution of the uncertainty in each random variable  $X_i$  to the total uncertainty.

The FORM approximation is done in two steps. First, the vector of basic random variables  $\underline{x}$  is transformed into a vector  $\underline{u}$  of independent Gaussian variables with zero mean and unit standard deviation using Rosenblatt's transformation. Second, the (transformed) limit state function is made linear at the point of maximum probability density. This is the most likely "failure" point and is referred to as the "design point". The design point is found by optimisation techniques.

$$\beta = \min \sqrt{\underline{u}^T \underline{u}} \quad \text{for } \{\underline{u} : G(\underline{u}) \leq 0\}$$

This is equivalent with finding the shortest distance from the origin to the limit state surface of the transformed space. An illustration of the design point is given in Figure E4.

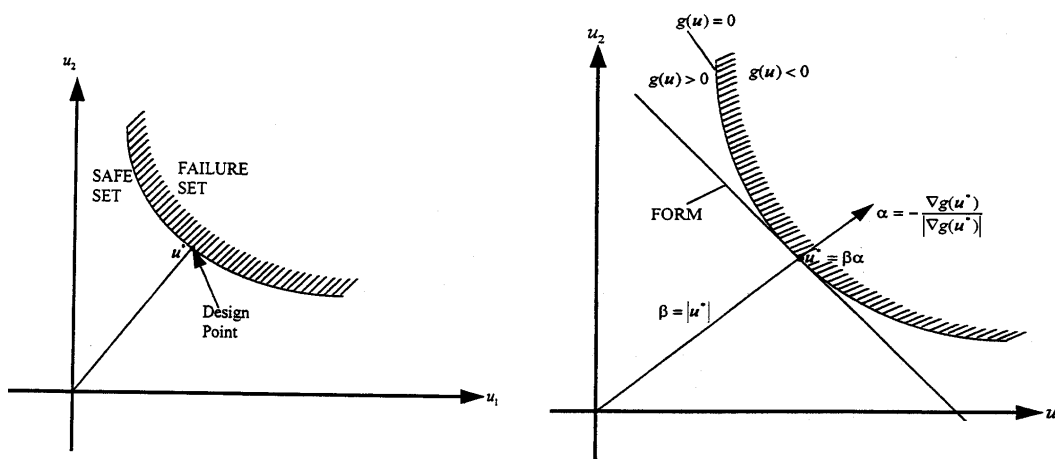


Figure E4. Finding the design point for FORM

### First Order Second Moment Method (FOSM)

The first-order second-moment (FOSM) method, also referenced as mean value first-order second-moment (MVFOSM) method, is a probabilistic method to determine the stochastic moments of a function with random input variables. The name is based on the derivation, which uses a first-order Taylor series and the first and second moments of the input variables. The FOSM approach provides approximations for the mean and standard deviation only. Thus, one must assume the distribution function for the safety factor beforehand to estimate the failure probability.

## E3. References

BoR and USACE(2012) Best Practices in Dam Safety and Levee Safety Risk Analysis. Bureau of Reclamation and U.S. Army Corps of Engineers. 2012., Denver, Colorado.



# Vedlegg F

## ANALYSEKSEMPLER

### Innhold

F1	Introduksjon	2
F2	Feiltre for vurdering av dambrudd	2
F3	Hendelseskjeder for rørdannelse ("piping")	4
F4	Hendelsestre-konsekvensanalyse	4
F5	Hendelsestre-analyse for brudd i fyllingsdam	6
F6	References	6

## F1 Introduksjon

Vedlegg F presenterer fire eksempler for vurdering av sannsynlighet for dambrudd og for konsekvensanalyse:

Eksempel 1: Feiltre for vurdering av dambrudd

Eksempel 2: Hendelseskjeder for rørdannelse ("piping")

Eksempel 3: Hendelsestre for konsekvens

Eksempel 4: Hendelsestre for brudd i fyllingsdam utsatt for flom

Eksemplene er valgt for å vise forskjellige typer vurderinger som er gjort eller bør gjøres i analyser av damsikkerhet. Det første eksemplet illustrerer bruk av feiltre-analyser for "overtopping". Det andre eksemplet sammenligner for seks dammer vurderingene i forbindelse med "piping" (rørdannelse) problemsstillingen. "Piping" viser seg å være den hyppigste bruddårsak/mekanisme for fyllingsdammer. Det tredje eksemplet er et konsekvenshendelsestre som evaluerer sannsynlighet for å kunne evakuere eksponerte personer ved et dambrudd. Det siste eksemplet illustrerer et hendelsestre-analyse med kun flom som årsak og beregning av sannsynligheter for brudd for den ene grenen i treet.

## F2 Feiltre for vurdering av dambrudd

Fridolf (2004) analyserte et komplekst system av kanaler og reservoarer i nærheten av byen Sala i Sverige. Dammene ble bygget for århundrer siden for å levere vannkraft til sølvgruvedrift. Dammene består av lange jordvoller, bare noen få meter høye og ofte dekket med trær. I dag har vannsystemet stor verdi som rekreasjonsområde og som et historisk monument. Totalt lagringsvolum på vannsystemet er anslått til om lag 16 millioner m<sup>3</sup>. Dambruddsanalyse ved hjelp av feiltre ble gjennomført for to dammer. Konsekvensene som ble analysert var tap av liv og personskader, miljøskade, økonomiske konsekvenser og tap av omdømme. Flere risikoreduserende alternativer ble drøftet: flomavledning, heving av damkronen, varslingssystem, beredskaps- og evakuerings plan, flytting av sommerhus, økt overløpskapasitet og flombekjempelse. Flomavledning ble ansett som den mest praktiske og effektive tiltaket.

Feiltreet for denne analysen er vist i Figur F1. Fridolf (2004) analyserte tre potensielle skade – og bruddmekanismer (nivå A i Fig. F1):

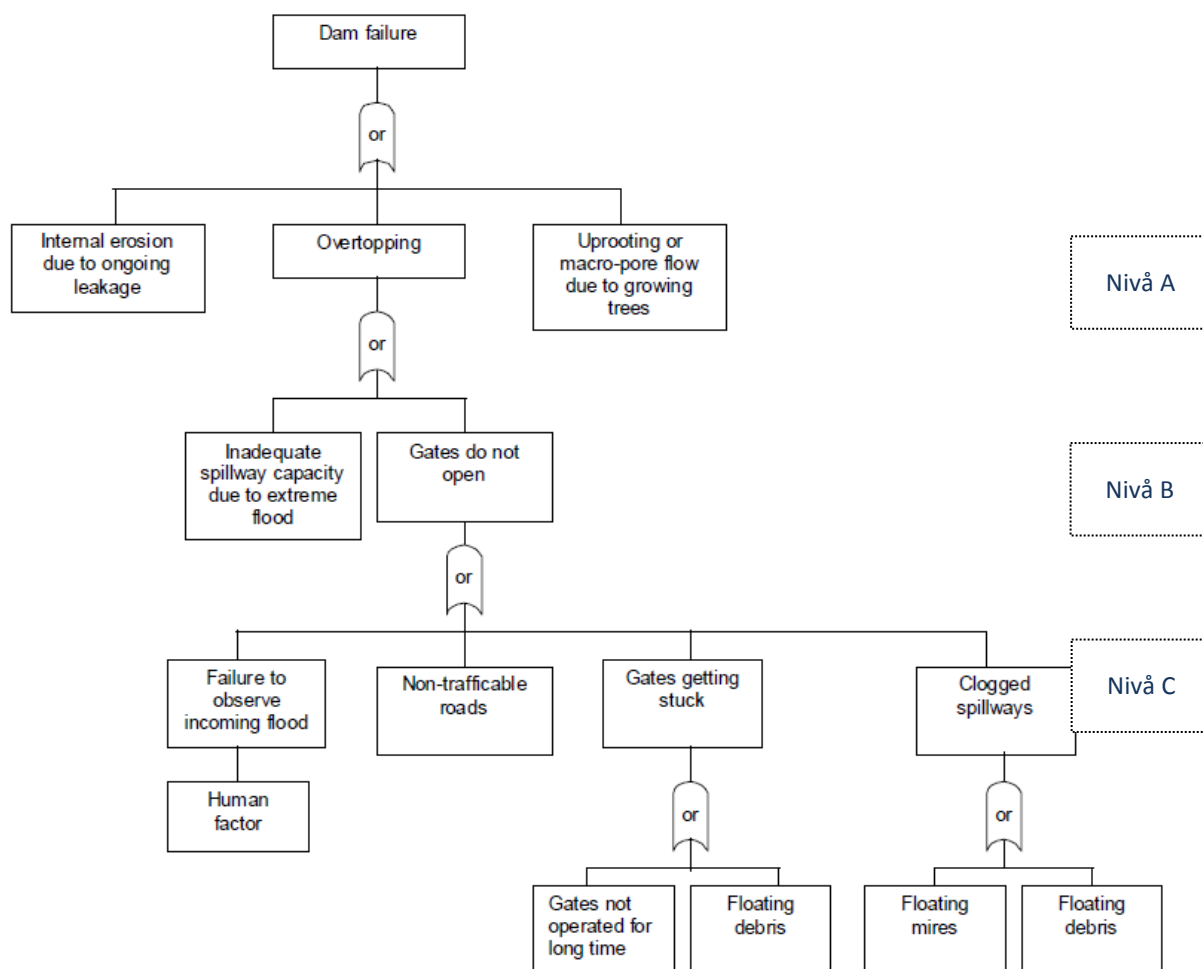
- "Overtopping"
- Indre erosjon
- Ødeleggelse og storskala 'porestrømning' skapt av trær (røtter) som vokser på fyllingsdammen

Kun "overtopping"-analysen er ført videre i figuren. I analysen er flom identifisert som den initierende årsaken. To medvirkende faktorer ble analysert (nivå B og C i Fig. F1):

- Utilstrekkelig kapasitet i overløpet: Ved store flommer er det stor sannsynlighet at overløpet har utilstrekkelig kapasitet. Overløpet kan bli blokkert av drivved eller rasmasser som reduserer eller hindrer utstrømmingen. Det er sannsynlig at det blir

produsert drivved, siden det er mange trær og myrer i området som kan skape problemer. Siden portene i Sala er små vil ikke slike masser passere fritt gjennom.

- Portene blir ikke åpnet: Dette kan skje som følge av:
  - Mangelfull observasjon: vann-nivåer observeres manuelt på daglig basis vår og høst og månedlig eller ved store nedbørsmengder om sommeren.
  - Portene lar seg ikke operere: Portene kan sette seg fast etter å ikke ha vært i bruk i lengre perioder, eller de kan bli sperret av drivved/rasmasser og rester fra myrer.
  - Ufremkommelighet for operativt personell: Flommer og behov for akutthåndtering faller ofte sammen med ekstremværsituasjoner som kan svekke fremkommeligheten til dammen. Noen av dammene i Sala er vanskelig å nå på grunn av dårlige veier.
  - Menneskelige faktorer: Observasjon av vannivå og operasjon av luker og overløp gjøres manuelt, noe som gjør damsikkerheten i Sala sårbart for menneskelige faktorer. I en flomsituasjon kan det oppstå mangel på ressurser, som vil forverre situasjonen.



Figur F1. Feiltre for Sala dam i Sverige (Fridolf 2004).

### F3 Hendelseskjeder for rørdannelse ("piping")

Tabell F1 oppsummerer fremgangsmåten og innhold i publiserte risikoanalyser som analyserer kjeder av hendelser som kan føre til rørdannelse. Hartford og Baecher (2004) oppsummerte seks slike analyser hvorav tre er fra Norge (Dam Viddalsvatn, Dam Dravladalen og Dam Svartevann).

Generelle konklusjoner om rørdannelse kan ikke trekkes ut fra tabellen da enhver dam er en kompleks struktur med unik oppførsel og unike geologiske og konstruksjonsmessige betingelser. I tillegg, er hvert av studiene basert på spesifikk innsikt i hvordan intern erosjon kan begynne, hvordan den initierende hendelsen kan fortsette til erosjon og hvordan erosjonen kan fortsette og til slutt lede til dambrudd (Hartford og Baecher 2004). Allikevel er eksemplene gode og kan brukes som veiledning ved nye analyser om indre erosjon og rørdannelse ("Piping").

Som nevnt i hovedteksten presenterer Fell *et al* (2008; 2015) en detaljert metodikk og flere eksempler for å vurdere sannsynlighet for dambrudd forårsaket av indre erosjon.

Tabell F1. Hendelseskjeder som leder til rørdannelse og dambrudd (Hartford og Baecher (2004)).

Coursier dam		Viddals-, Dravladals-Svartevatn		Navajo Dam		Como Dam
BC Hydro		NGI		USBR		USBR
Vick and Stewart (1996)		Johansen, Vick and Rikartsen (1997)		Von Thun (1999)		Luehring, Russell, and Mares (2000)
Internal erosion of embankment		Leak occurs	Initiation of fines migrating	Concentrated flow (flaws or joints)	Concentrated flow path	Concentrated flow path
Loss of core integrity			Development of piping	Initiation of piping	Adequate velocity/gradient	Adequate velocity/gradient
Pipe enlargement		Toe unravelling	Toe unravelling	Piping progresses	Openwork materials	Unprotected exit
Crest subsides	Seepage on downstream face	Self-healing	Self-healing	Potential for intervention	Large voids develop	Potential for intervention
Slumping of face		Leakage detection	Leakage detection	Breach	Embankment collapse	Piping initiated
Progressive instability/breach		Drawdown pool	Drawdown pool		Potential for intervention	Erodible materials
		Breach	Breach		Deformation greater than freeboard	Concentrated flow path

### F4 Hendelsestre-konsekvensanalyse

BoR og USACE (2012) gir et eksempel på hendelsestre-analyse for konsekvens av dambrudd av en betong dam. Den eksponerte befolkningen består av campinggjester på to store campingplasser og omkring 1.000 mennesker i tre små landsbyer nedstrøms dammen. Tiden

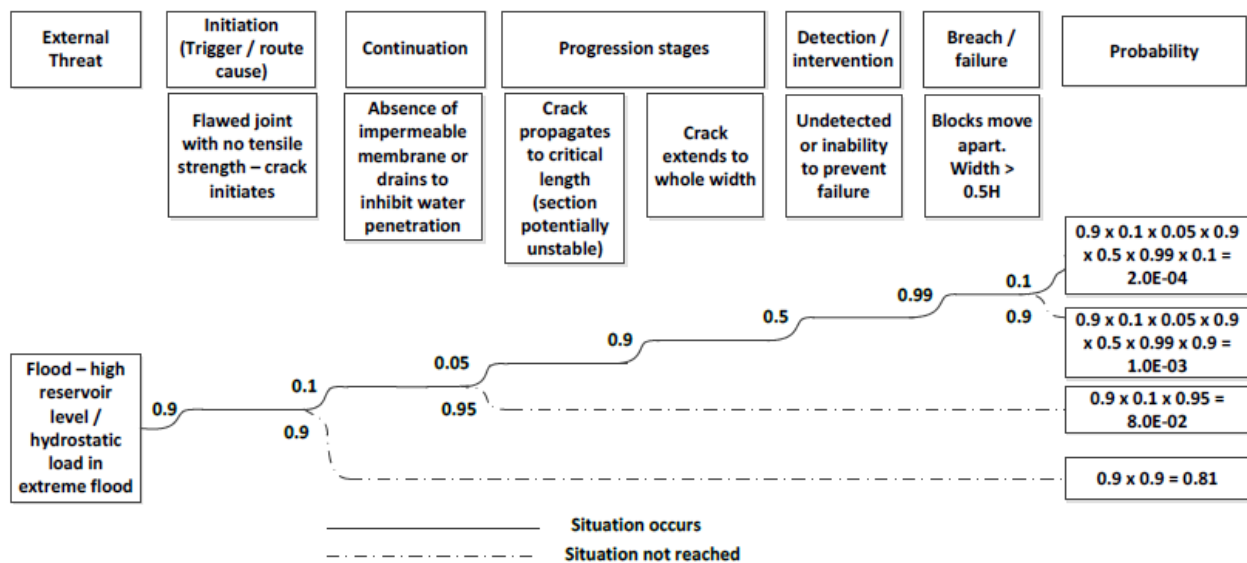


## F5 Hendelsestre-analyse for brudd i fyllingsdam

En hendelsestre-analyse for brudd i fyllingsdam vil generelt inneholde de seks følgende stegene Bowles *et al* (2013):

1. Ytre påkjenning/initierende årsak
2. Initiating/utløsningsmekanisme
3. Videreføring av erosjon
4. Progresjon
5. Oppdagelse/intervensjon
6. Dambrudd

Bowles *et al* (2013) foreslo figur F3 som en illustrasjon av de seks generelle stegene. En analyse er gjort for tilfellet flom. Figuren viser også prinsippet for sannsynlighetsberegningene langs en gren i hendelsestreet, hvor sannsynlighetene langs hver av hendelseskjeden multipliseres. Den totale sannsynligheten for dambrudd utsatt for flom vil være summeringen av alle grenene som kan føre til brudd. I Figur F3 er det bare en gren som fører til dambrudd, og den totale sannsynlighet for brudd er 0.0002, eller  $2 \cdot 10^{-4}$ . Bowles *et al* 2013 presiserer ikke om dette er en årlig sannsynlighet eller ikke.



Figur F3. Generelt hendelsestre og eksempelberegning av dambrudd sannsynlighet (Bowles *et al* 2013).

## F6 References

- BoR and USACE(2012) Best Practices in Dam Safety and Levee Safety Risk Analysis. Bureau of Reclamation and U.S. Army Corps of Engineers. 2012., Denver, Colorado.
- Bowles, D., Brown, A., Hughes, A., Morris, M., Sayers, P., Topple, A., Wallis, M. og Gardiner, K. (2013). Guide to risk assessment for reservoir safety management. Volume 2: Methodology and supporting information, Report SC090001/R2, Flood and Coastal Erosion Risk Management

- Research and Development Programme. Environment Agency, Horizon House, Deanery Road, Bristol, BS1 9AH, [www.environment-agency.gov.uk](http://www.environment-agency.gov.uk).
- Fell, R., Foster, M., Davidson, R., Cyganiewicz, J., Sills, G. og Vroman, N. (2008). *A unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping*. UNICIV Report R 446. Univ. of New South Wales, School of Civil and Environmental Eng., Sydney, Australia 2051. ISBN:85841 314 9. (2 volumes: The Guidance Document; The Supporting Document). [www.engineering.unsw.edu.au/civeng/uniciv-reports](http://www.engineering.unsw.edu.au/civeng/uniciv-reports).
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. og Foster, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams*. 2<sup>nd</sup> edition. CRC Press, Taylor and Francis Group. 1348 pp.
- Fridolf (2004). Dam safety in a hydrological perspective. Aase study of the historical water system of Sala silver mine. PhD Thesis, KTH Stockholm. ISRN KTH/LWR/LIC 2021-SE. ISBN 91-7283-779-9
- Hartford, D. N. D. og Baecher, G. B. (2004). *Risk and uncertainty in dam safety*. Thomas Telford Publ. ISBN: 0 7277 3270 6.
- Johansen, P.M., Vick, S. og Rikartsen, K. (1997). Risk analysis of three Norwegian rockfill dams. *Hydropower 97*. Balkema, Rotterdam. 431-442.
- Luehring, R., Russell, G. og Mares, D. (2000). Risk analysis report, issue evaluation - baseline risk analysis [for Como Dam]. US Bureau of Reclamation. Technical memorandum CQ-8312-19, Bitter Root Project (Montana).
- Vick, S. og Stewart, R.A. (1996). Risk analysis in dam safety practice. *Uncertainties in the Geologic Environment*. ASCE Geotechnical Special Publication No. 58. Madison WN. pp. 586-603.
- Von Thun, L. (1999). Risk analysis for Navajo Dam, USBR. Technical Memorandum NZ-8311-3. Denver CO.

# Vedlegg G

## "BAYESIAN NETWORKS"

Kopi av artikkel i GeoRisk (2015):

"A three-level framework for multi-risk assessment"

Z.Q. Liu, F. Nadim, A.Garcia-Aristizabal, A. Mignan, K. Fleming and B.Q. Luna

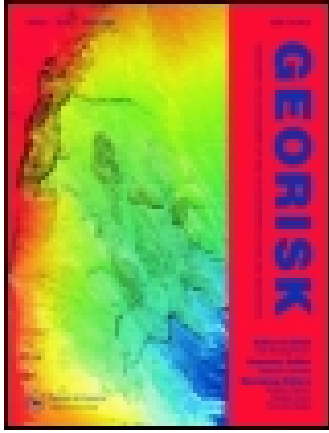


This article was downloaded by: [Norges Geotekniske Institute], [Zhongqiang Liu]

On: 22 June 2015, At: 23:59

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



[Click for updates](#)

## Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/ngrk20>

### A three-level framework for multi-risk assessment

Zhongqiang Liu<sup>a</sup>, Farrokh Nadim<sup>a</sup>, Alexander Garcia-Aristizabal<sup>b</sup>, Arnaud Mignan<sup>c</sup>, Kevin Fleming<sup>d</sup> & Byron Quan Luna<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Norwegian Geotechnical Institute (NGI), Oslo, Norway

<sup>b</sup> Analysis and Monitoring of Environmental Risk (AMRA), Naples, Italy

<sup>c</sup> Institute of Geophysics, Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ), Zurich, Switzerland

<sup>d</sup> Helmholtz Centre Potsdam, German Research Centre for Geosciences (GFZ), Potsdam, Germany

<sup>e</sup> DNV GL, Høvik, Norway

Published online: 22 Jun 2015.

To cite this article: Zhongqiang Liu, Farrokh Nadim, Alexander Garcia-Aristizabal, Arnaud Mignan, Kevin Fleming & Byron Quan Luna (2015): A three-level framework for multi-risk assessment, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, DOI: [10.1080/17499518.2015.1041989](https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1041989)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/17499518.2015.1041989>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

## A three-level framework for multi-risk assessment

Zhongqiang Liu<sup>a\*</sup>, Farrokh Nadim<sup>a</sup>, Alexander Garcia-Aristizabal<sup>b</sup>, Arnaud Mignan<sup>c</sup>, Kevin Fleming<sup>d</sup> and Byron Quan Luna<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Norwegian Geotechnical Institute (NGI), Oslo, Norway; <sup>b</sup>Analysis and Monitoring of Environmental Risk (AMRA), Naples, Italy; <sup>c</sup>Institute of Geophysics, Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ), Zurich, Switzerland; <sup>d</sup>Helmholtz Centre Potsdam, German Research Centre for Geosciences (GFZ), Potsdam, Germany; <sup>e</sup>DNV GL, Høvik, Norway

(Received 15 February 2015; accepted 14 April 2015)

The effective management of the risks posed by natural and man-made hazards requires all relevant threats and their interactions to be considered. This paper proposes a three-level framework for multi-risk assessment that accounts for possible hazard and risk interactions. The first level is a flow chart that guides the user in deciding whether a multi-hazard and risk approach is required. The second level is a semi-quantitative approach to explore if a more detailed, quantitative assessment is needed. The third level is a detailed quantitative multi-risk analysis based on Bayesian networks. Examples that demonstrate the application of the method are presented.

**Keywords:** multi-risk; cascading hazards; time-variant vulnerability; Bayesian network

### 1. Introduction

Many regions of the world are exposed to and are affected by a number of different types of hazards. The assessment and mitigation of the risk posed by those natural and man-made threats at a given location requires a multi-risk analysis approach that could account for the possible interactions among the threats (multi-hazard), including cascading events and interactions at the vulnerability level (time-variant vulnerability). Performing quantitative multi-risk analysis using the methodologies available today presents many challenges (e.g., Kappes et al. 2012; Marzocchi et al. 2012; Mignan, Wiemer, and Giardini 2014). The risks associated with different types of natural hazards, such as volcanic eruptions, landslides, floods and earthquakes, are often estimated using different procedures, leading to the individual results not being comparable (Marzocchi et al. 2012). Furthermore, the events themselves could be highly correlated (e.g., floods and debris flows could be triggered by an extreme storm event), one type of threat could be the result of another (e.g., a massive landslide that is triggered by an earthquake, a so-called cascade effect) or several independent events may occur at around the same time (e.g., hurricanes and earthquakes). However, it also needs to be kept in mind that the potential losses associated with different hazards when considering their interactions may lead to the situation where their combination is much greater than simply the sum of their parts.

It is obvious that a mathematically rigorous approach to multi-risk assessment that addresses all the challenges

named above, as well as the uncertainties in all steps of the analysis, will be complicated and requires considerable resources and expertise (e.g., Komendantova et al. 2014). On the other hand, in many situations, the decision-maker in charge of risk management is constrained to identify the optimum alternatives among those options available, without doing a detailed, rigorous multi-risk analysis. Therefore, the framework recommended in this study is based on a multi-level approach where the decision-maker and/or the risk analyst will not need to use a more sophisticated model than what is required for the problem at hand, or what would be reasonable to use given the available information.

In the following sections, we first outline the concept of multi-hazard assessment and its various components. Next, we deal with time-variant vulnerability. This is followed by a description of the proposed multi-risk analysis framework and the various levels. The multi-risk analysis is then presented, including examples as identified from the EC FP7 Project MATRIX (New Multi-Hazard and Multi-Risk Assessment MethodS for Europe). MATRIX (October 2010 to December 2013) set out to develop methodologies and concepts in multi-hazard and risk assessment, considering hazard and vulnerability interactions, as well as the issue of intangible and indirect losses in addition to direct losses.

### 2. Multi-hazard assessment

The concept of ‘multi-hazard assessment’ may be understood as the process:

\*Corresponding author. Email: [zhongqiang.liu@ngi.no](mailto:zhongqiang.liu@ngi.no)

to determine the probability of occurrence of different hazards either occurring at the same time or shortly following each other, because they are dependent from one another or because they are caused by the same triggering event or hazard, or merely threatening the same elements at risk without chronological coincidence. (European Commission 2010)

From this definition, it is easy to recognise that multi-hazard is a broad concept with different possible interpretations. In general terms, one can split the multi-hazard concept into two possible lines of applications, where multi-hazard assessment may be seen as: (1) the process of assessing different (independent) hazards threatening a given (common) area and (2) a means of identifying and assessing possible interactions and/or cascade effects among the different possible hazardous events.

### **2.1. Different (independent) hazards threatening a given (common) area**

This interpretation of multi-hazard assessment is the most commonly found in the literature. In fact, most of the multi-hazard risk initiatives start from the identification of different hazard sources within a given region of interest and evaluate each individual hazard independently, generally using a hazard-specific assessment methodology. The objective is to identify the spatial distribution of the effects of the different hazards over a range of their respective intensities and to estimate their occurrence probability or return period. The final results, according to the scale of the specific problem, are generally presented as single hazard maps, layers (in a GIS environment), aggregated maps (overlapping all the maps) and hazard curves (for each hazard) that plot the probability (or return period) against the intensity measure of the hazard (e.g., Grünthal et al. 2006; Carpignano et al. 2009; Schmidt et al. 2011).

The main effort within this multi-hazard perspective, as found in the literature, is the harmonisation of the hazard assessment for the different threats. This is generally considered a fundamental requirement in multi-risk analysis to make the risks posed by different threats comparable (e.g., van Westen, Montoya, and Boerboom 2002; Marzocchi et al. 2012, Garcia-Aristizabal et al. 2015). What differentiates the different multi-hazard approaches within this context in the manner in which the harmonisation of the assessment of the different hazards is carried out.

### **2.2. Hazard interactions, triggering or cascade effects**

A multi-hazard assessment considering interaction/triggering effects is, in general, a more demanding process compared with the independent consideration of different hazards. In this type of assessment, the occurrence of one

hazardous event could change the probability of occurrence of another event (leading to potential cascades). The typology of interactions that can be grouped under this name are in fact phenomena in which the physical process of interest is a pure triggering mechanism in which an initial event produces a perturbation that, when acting on a given system, may bring it to an unstable state, forcing it to find a new equilibrium state that matches the changing framework conditions (e.g., a new morphological equilibrium after a debris flow event). Reaching this new equilibrium may imply the occurrence of an event that, in this case, may be said to be triggered by the initial one (Gasparini and Garcia-Aristizabal 2014). The link between the intensity of the triggering event (e.g., the ground shaking caused by an earthquake) and the intensity of the triggered event (e.g., a volume of mass moving down a slope) is governed by complex physical mechanisms that are intrinsically related to the specific triggering and triggered events. This fact and the ubiquitous random effects that may affect these processes make probabilistic approaches the most promising way for the quantitative characterisation of such interactions (e.g., Garcia-Aristizabal et al. 2015; Gasparini and Garcia-Aristizabal 2014). In this way, chains of events can be evaluated in probabilistic terms and can be directly integrated into the risk analysis process. For example, Nadim and Liu (2013) and Zhang (2014) approached hazard interactions and performed multi-risk assessment quantitatively using Bayesian networks.

Although most of the multi-risk literature mentions this as an important item to be considered in hazard and risk assessments, the available studies that explicitly consider cascade effects and interactions remain rare (e.g., Marzocchi et al. 2012; Mignan, Wiemer, and Giardini 2014; Gill and Malamud 2014). A possible explanation could be that the necessary input data, and sometimes the complexity of the hazard 'chains' that can be foreseen, often discourage the analyst to consider such interactions and triggering effects in a holistic multi-risk analysis. This view is in agreement with the feedback obtained from civil protection agencies about multi-risk analysis (Komendantova et al. 2014).

## **3. Time-variant vulnerability**

Time-variant (physical and functional) vulnerability considers the evolution of the probable damage to an element at risk over time, including the history of events. Vulnerability, defined as the probability to experience a certain level of damage as a result of a given intensity of a hazard (e.g., peak ground acceleration in the case of earthquakes), evolves due to both physical effects (ageing, corrosion, damage accumulation from past events, etc.) and human actions (reconstruction and

reinforcement, use changes, population settlement evolution, etc.).

Time-variant vulnerability can be considered as the case in which a cluster of hazards (e.g., earthquakes) or the simultaneous occurrence of two or more hazardous events (not necessarily with a direct linkage between them) may imply changes to the vulnerability of the exposed elements, which in the end may also be reflected in the interactions considered in the final risk assessment. Some recent examples in the literature address the increase in a building's vulnerability to ground shaking due to increased structural load following volcanic ash fall or heavy snowfall or after being subjected to a blast (Lee and Rosowsky 2006; Zuccaro et al. 2008; Asprone et al. 2010; Selva 2013). Another well-known situation is the increased vulnerability of structures to successive shaking during an earthquake cluster or sequence (Jalayer et al. 2011; Iervolino, Giorgio, and Chioccarelli 2014). Zhang, Nadim, and Lacasse (2013) proposed a method to estimate the vulnerability factors for loss of life due to three types of sequential or concurrent slide hazards (slides, rockfall and debris flows).

When considering time-variant vulnerabilities in multi-risk analyses, the process of interest is the additive effect of different events acting on the same elements. More specifically, this kind of interaction is referred to in cases where the occurrence of one event (the first one occurring in time) may alter the response of the exposed elements to another event (that may be of the same kind as the former, but may also be of a different type). In general, the physical processes of interest are those related to the response of the system (the exposed element) to the loads caused by different events, taking in account their additive or cumulated effects (Gasparini and Garcia-Aristizabal 2014).

#### 4. Proposed three-level framework for multi-risk assessment

The proposed multi-risk assessment framework is a multi-level process. It assumes that the end user (decision-maker, risk analyst, etc.) has identified the relevant threats and has carried out an assessment of the risk(s) (at the level of sophistication required for the problem at hand) associated with each single hazard(s). Figure 1 shows the general steps of the multi-risk assessment framework presented in this work. The overall multi-risk assessment process comprises the following stages: (1) risk assessment for single hazards, (2) level 1: qualitative multi-risk analysis, (3) level 2: semi-quantitative multi-risk analysis and (4) level 3: quantitative multi-risk analysis. The details are described below.

In the first step, it is assumed that the risk assessment for the single hazard (which may follow a classical approach) is performed taking into account some harmonisation requirements, as those described by the following stages (Figure 2):

- Definition of space/time assessment window (target area, time window) and the risk metric quantifying the expected losses;
- Threat(s) identification (earthquake, flood, volcano, landslide, etc.);
- Single hazard assessment (rate of occurrence, pathway, intensity measure, etc.);
- Assessment of the vulnerability of the elements at risk (people, buildings, etc.);
- Assessment of the consequences in terms of the chosen metric (loss of life, economic losses, environmental degradation, etc.).

Once the results of the single-hazard risk assessment(s) are available, the user embarks upon the three-level process,

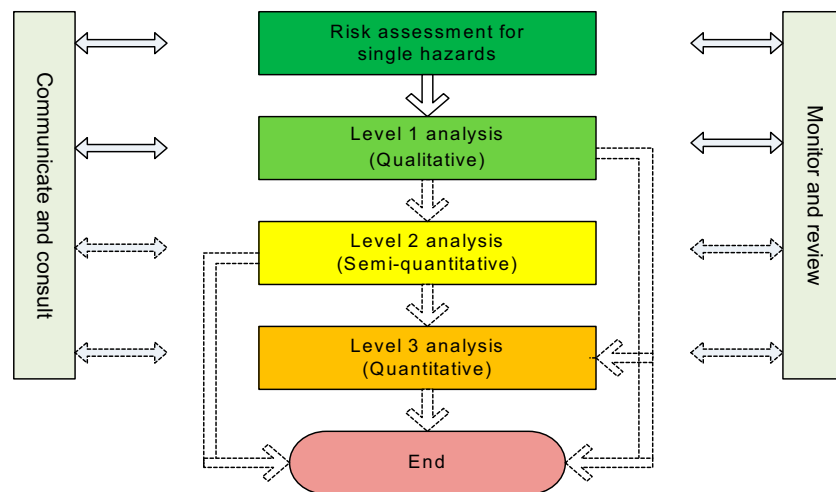


Figure 1. Schematic view of the steps followed in the proposed multi-risk assessment framework.

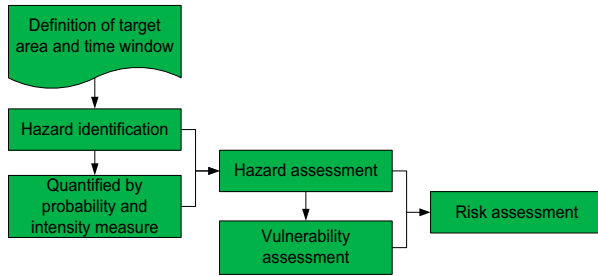


Figure 2. Stages of risk assessment for a single hazard.

which becomes more detailed and rigorous as the user moves from one level to the next. The user moves to a higher level of analysis only if the problem at hand requires a more accurate risk estimate and, equally important, if the data needed for undertaking the more detailed analysis are available. The selection of which of these three levels is to be finally used depends on the outcome of the preliminary risk assessment for the single hazard(s).

#### 4.1. Level 1 analysis

The Level 1 analysis is comprised of a flow chart type list of questions that guides the end user as to whether or not a multi-type assessment approach, which explicitly accounts for cascading hazards and dynamic vulnerability within the context of conjoint or successive hazards, is required. Each question will be supplied with a

comprehensive list of answers that the user could choose from. This process is shown schematically in Figure 3.

The flow chart can include, for example, these questions:

- What is the purpose of the risk assessment exercise? (possible answers: identifying the most critical risk scenarios and choosing the optimal risk mitigation measures, assessing the adequacy of resources and level of preparedness for post-event response, etc.)
- Which natural threats are relevant for your area of interest? (possible answers: earthquakes, landslides, volcanic eruptions, tsunamis, wildfires, winter storms, storm surges and coastal floods, fluvial floods, snow avalanches, other perils, etc.)
- If the user has chosen only one natural hazard from the list, how likely is it that the dominant natural threat could happen more than once during the time window of concern with an intensity that will cause significant loss? (possible answers: very likely, likely, unlikely, very unlikely and virtually impossible)

Note that at this stage, if the user has chosen only one natural hazard from the list and chooses very unlikely or virtually impossible as the answer to the above question, then there is no need to go any further and a more detailed multi-risk assessment would be unnecessary:

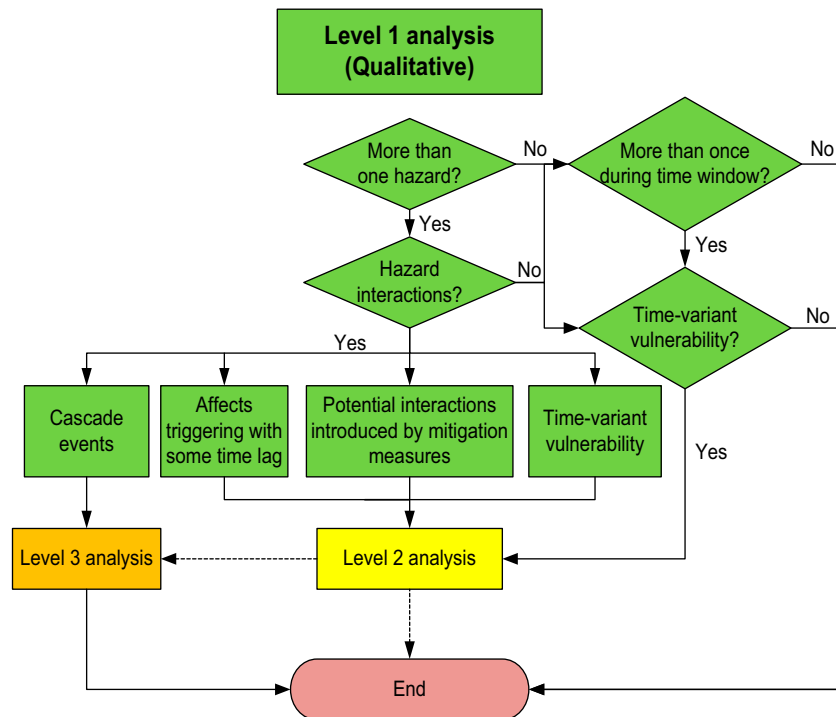


Figure 3. The steps involved in the Level 1 multi-risk analysis.

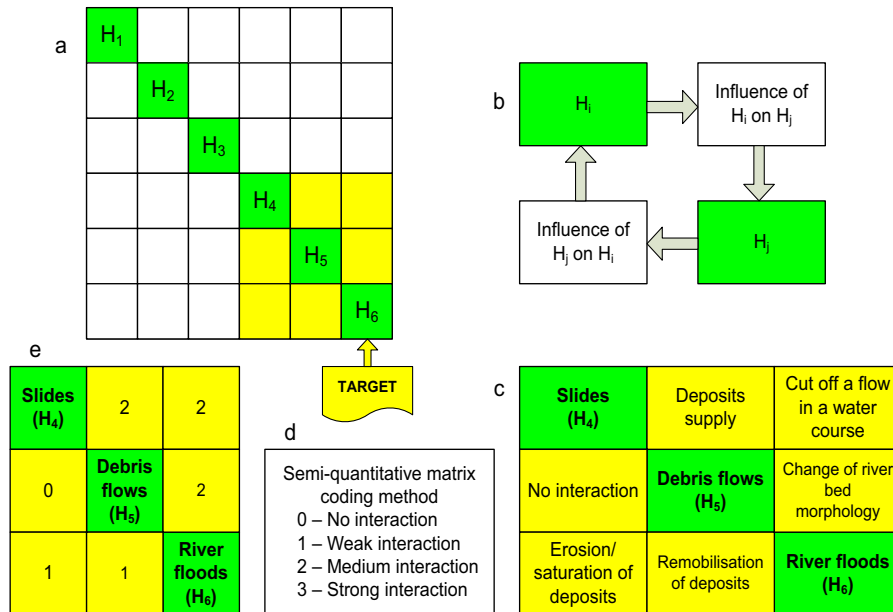


Figure 4. Matrix approach for the identification of the interactions between hazards in the Level 2 analysis (modified after de Simeoni et al. 1999 and Kappes, Keiler, and Glade 2010).

- Cascading events: Could a hazard trigger another hazard in your list (for example: an earthquake triggering a landslide, landslide debris blocking a river and causing flooding when the landslide dam breaks, earthquake causing collapse of flood defence structures and leading to flooding, etc.)? (possible answers: yes or no)
- Conjoint events: Could several hazards in your list occur simultaneously because they are caused by the same external factors (for example: earthquakes and volcanic eruptions are both caused by tectonic processes, winter storms and storm surges, fluvial floods and debris flows caused by extreme precipitation events, etc.), or independently (e.g., hurricanes and earthquakes)? (possible answers: yes or no)
- Dynamic vulnerability: Could the occurrence of one of the hazards in your list significantly influence the vulnerability of some of the elements at risk to another event of the same type or to other hazards (for example: a building partially damaged by an earthquake has a higher vulnerability to the next earthquake or to floods and landslides, ash fall from a volcanic eruption on roof tops will increase the mass and hence may increase its seismic vulnerability, etc.)? (possible answers: yes or no)
- Dynamic hazard: Could the occurrence of one of the hazards in your list significantly influence the occurrence probability of other hazards (for example, a strong earthquake could weaken the soil on a slope and increase the probability of a

landslide during extreme precipitation events, etc.)? (possible answers: yes or no)

Additional questions may, of course, be added, depending upon the case of interest. If the results of the Level 1 analysis strongly suggest that a multi-type assessment is required, then the end user moves on to Level 2 to make a first-pass assessment of the effects of dynamic hazard and time-variant vulnerability (see Figure 4). If cascading events are potentially a concern, the user may go directly to the Level 3 analysis.

#### 4.2. Level 2 analysis

In the Level 2 analysis, the interactions among hazards and dynamic vulnerability are assessed approximately using semi-quantitative methods.

To consider hazard interactions and time-variant vulnerability at this level, we suggest a matrix approach based on system theory. This kind of matrix has been used in various fields, including environmental issues (e.g., Simeoni et al. 1999; de Pippo et al. 2008), rock engineering (e.g., Hudson 1992) and natural hazard assessment (Kappes, Keiler, and Glade 2010; Mignan, Wiemer, and Giardini 2014; Gill and Malamud 2014). The basis of this approach consists of the comprehension and description of the relationships among agents and processes in the evolution of the system.

The matrix approach for the identification of the interactions between hazards in the Level 2 analysis is shown in Figure 4. First, a matrix is developed by means of the choice of pairs of hazards, considered as the basic

components of the system (Figure 4a). This is followed by a clockwise scheme of interaction (Figure 4b), with the description of the actual influence between one hazard and another (Figure 4c). More specifically, each element of the row, which crosses one of the hazards in the mean diagonal, shows the influence of this hazard on the system, whereas each element of the column, which crosses the same hazard analysed, shows the influence of the system on this hazard. Considering the descriptions included in each element of the matrix, they are assigned numerical codes varying between 0 (No interaction) and 3 (Strong interaction) with intervals of 1, as a function of their degree of the interaction intensity (Figure 4d and 4e). Once all the hazard-interaction combinations in the matrix are filled, it is possible to verify the degree of the impact of each hazard on the other hazards and the effect on it from other hazards. In order to avoid the excessive weighting of a single hazard, the sum of the codes for the rows and columns is considered. Table 1 shows the coding result for each hazard in the example considered.

In the example presented in Figure 5, it can be seen that landslides have the maximum number of causes and, therefore, they are the dominant hazard caused by other hazards (i.e. the main kind of triggered events). On the other hand, river flooding is in this example the hazard most influencing other hazards, with the maximum number of effects (i.e. the main kind of triggering events).

Using this scoring system, the maximum possible value of each off-diagonal cell in Figure 5a is 3. Therefore, the maximum possible value for the total sum of each row is  $3 \cdot (n - 1)$ , where  $n$  is the number of hazards. Likewise, the maximum possible value for the total sum of each column is  $3 \cdot (n - 1)$ . This means that the maximum possible value for the total sum of causes and effects is:

$$H_{I, max} = 2 \cdot 3 \cdot n \cdot (n - 1) = 6 \cdot n \cdot (n - 1) \quad (1)$$

where  $n$  is the number of hazards and  $H_I$  is the hazard interaction index.

Therefore, for the example considered in Table 1, the maximum possible value for the hazard interaction index

Table 1. Coding of each hazard in the system.

Number	Hazard	Causes (Rows)	Effects (Columns)	Causes + effects
1	Landslides	4	1	5
2	Debris flows	2	3	5
3	River floods	2	4	6
Total		8	8	16

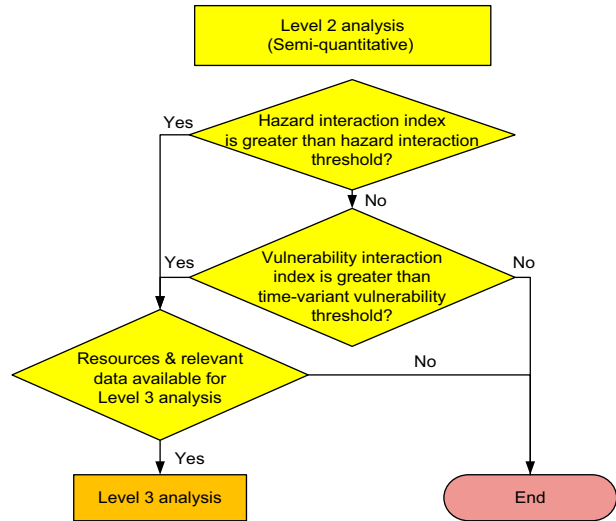


Figure 5. The steps involved in the Level 2 multi-risk analysis.

is  $H_{I, max} = 36$ . The hazard interaction index can be used as a proxy to assess the potential significance of the interactions; likewise, its value might be used to set a reference threshold supporting the decisional problem of moving to a Level 3 analysis. Given the subjectivity, uncertainties and possible excessive or moderate weighting of single hazards, a subjective threshold hazard interaction index  $H_{thre}$  can be defined. In general, a 50% of  $H_{I, max}$  value can be considered as a conservative threshold for considering a more detailed Level 3 analysis. If the hazard interaction index is less than this threshold, Level 3 analysis is not recommended because the additional accuracy gained by the detailed analyses is most likely within the uncertainty bounds of the simplified multi-risk estimates. Otherwise, Level 3 analysis is recommended. In the example above, the threshold hazard interaction index calculated by Equation (1) is  $H_{thre} = 18$  (50% of 36), while the total value of causes and effects is 16; hence, in the example, we do not need to do Level 3 analysis. The logic of the decisional problem involved in the Level 2 analysis is shown in Figure 5.

### 4.3. Level 3 analysis

In the Level 3 analysis, the effects of interactions among hazards and dynamic vulnerability are assessed quantitatively with high accuracy (as high as the available data allows).

For the Level 3 analysis proposed in this framework, a new quantitative multi-risk assessment model based on Bayesian networks (BaNMuR) is introduced to both estimate the probability of a triggering/cascade effects and model the time-variant vulnerability of a system exposed to multiple hazards. The flexible structure and the unique modelling techniques offered by Bayesian

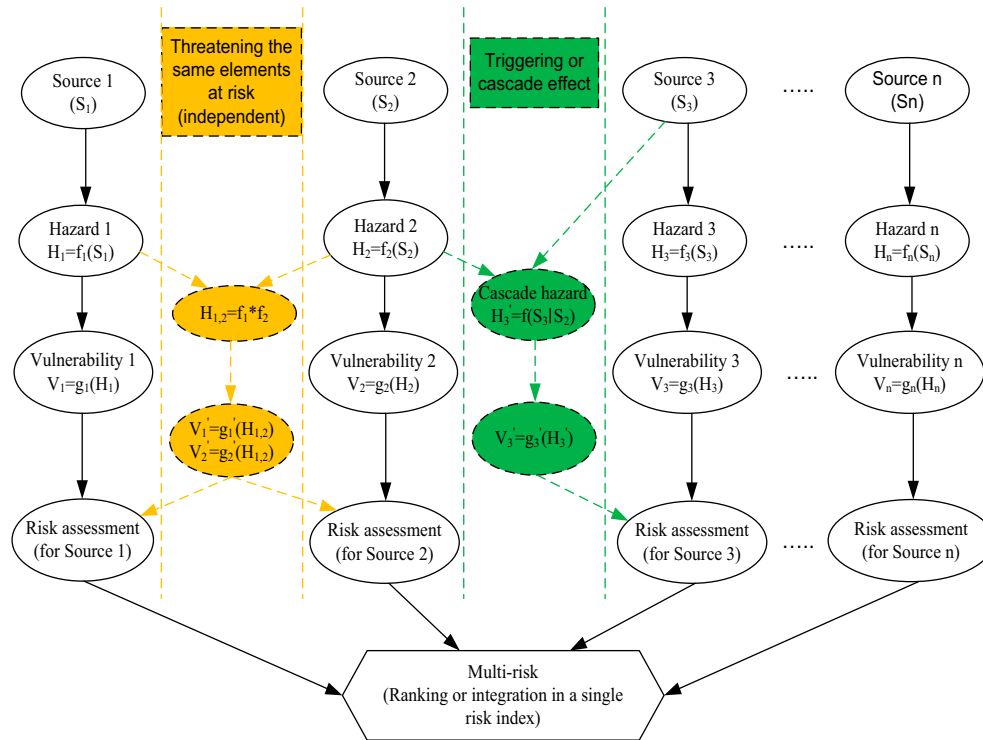


Figure 6. Bayesian network for quantitative multi-risk assessment (modified from Marzocchi et al. 2012).

networks make it possible to analyse interactions and cascading effects, and to handle uncertainties through a simple probabilistic framework. The uncertainties in each hazard/vulnerability and their interrelationships are represented by probabilities. The prior probabilities can be updated with information of specific cases by Bayes' theorem. The uncertainties (mainly epistemic) can be reduced, and the updated multi-risk results could become more reliable based on the new information. In particular, this method is well suited for treating uncertainties associated with hidden geodynamic variables, which are not directly observable (e.g., model uncertainty in causal relationships between unobservable volcanic processes and surface manifestations or monitoring data).

A conceptual Bayesian network multi-risk model may be built as shown in Figure 6. To determine the whole risk from several threats, the network takes into account possible hazards and vulnerability interactions. This would include those events that are:

- (1) Independent, but threatening the same elements at risk with or without chronological coincidence (the column marked in deep orange colour in Figure 6);
- (2) Dependent on one another or caused by the same triggering event or hazard: this is mainly the case of 'cascading events' (the column marked in green colour in Figure 6).

The network presented consists of two main sub-networks for (1) multi-hazard and (2) time-variant vulnerability, as detailed in the following sections.

#### 4.3.1. Multi-hazard analyses

A number of possible scenarios for single hazards and cascade events have been identified for the case study examples identified in the MATRIX project (Garcia-Aristizabal et al. 2012). A Bayesian network as that shown in Figure 7 may be built to describe the interactions between hazards. It is obvious that one hazardous event could trigger a number of other hazardous events.

Once the propagation pattern of the cascade effect is known, the occurrence probability of the cascade effect can be estimated. Generally, the probability of the cascade effect ( $P_{cascade}$ ) is calculated as the multiplication of the probability of the primary event ( $P_{primary}$ ) and the conditional probability of the impacted events ( $P_{conditional}$ ):

$$P_{cascade} = P_{primary} \times P_{conditional} \quad (2)$$

#### 4.3.2. Time-variant vulnerability assessment

Predicting the damage to the elements at risk (e.g., buildings) is critical for the evaluation of economic losses and should be estimated with an acceptable degree of credibility in order to determine the potential losses that are dependent upon the performance of those



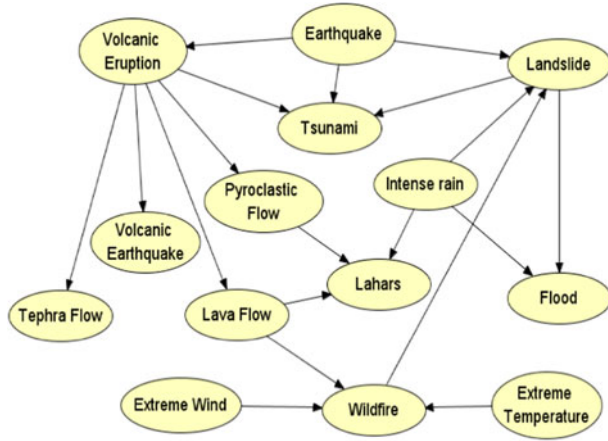


Figure 7. Possible scenarios of multi-hazard interaction, as considered during the MATRIX project (redrawn from Garcia-Aristizabal et al. 2012).

elements subjected to various hazard excitations. Fragility curves represent the cumulative distribution of damage, which specify the continuous probability that the indicated damage-state has been reached or exceeded, and could provide graphical information on the distribution of damage.

The limit state (LS) probability for a structure exposed to a single hazard can be expressed in terms of discrete random variables as follows (Lee and Rosowsky 2006):

$$P_f = \sum_{i=0}^{\infty} P[LS|I = i]P[I = i] \\ = \sum_{x=0}^{\infty} P[D > C|I = i]P[I = i] \quad (3)$$

where  $I$  is the intensity measure of the hazard and  $LS$  (limit state) is the condition in which the load demand due to the hazard is greater than the capacity  $C$ . The conditional probability  $P[LS | I = i]$  is the probability of reaching  $LS$  at a given hazard intensity level,  $I = i$ . The term  $P[I = i]$  is the marginal hazard probability. For continuous random variables, Equation (3) can be expressed as:

$$P_f = \int_{i=0}^{i=\infty} F_r(i)g_I(i)di \quad (4)$$

where  $F_r(i)$  is the fragility function in the form of a cumulative distribution function and  $g_I(i)$  is the hazard function in the form of a probability density function.

In the case of a structure subjected to a multi-hazard situation involving additive load effects (e.g., earthquake + landslide), the convolution concept must be expanded.

This multi-hazard form is calculated as:

$$P_f = \sum_{i_1=0}^{\infty} \sum_{i_2=0}^{\infty} \dots \sum_{i_n=0}^{\infty} P[LS|I_1 = i_1 \cap I_2 \\ = i_2 \cap \dots \cap I_n = i_n] \times P[I_1 = i_1 \cap I_2 \\ = i_2 \cap \dots \cap I_n = i_n] \quad (5)$$

Equation (4) can also be expressed in terms of continuous random variables, which for the case of independent hazards read as:

$$P_f = \int_{i_1=0}^{i_1=\infty} \int_{i_2=0}^{i_2=\infty} \dots \int_{i_n=0}^{i_n=\infty} F_r(LS|i_1, i_2, \dots, i_n)g_{I_1}(i_1)g_{I_2}(i_2) \\ \dots g_{I_n}(i_n)di_1 di_2 \dots di_n \quad (6)$$

It is worth noting that in the case of dependent hazards, the hazard terms  $g_{I_n}(i_n)$  in Equation (6) should be properly considered. For example, in the case of two dependent events, it is necessary to consider that  $p(I_2 \cap I_1) = p(I_2|I_1)p(I_1)$  (see, e.g., Gasparini and Garcia-Aristizabal 2014).

Figure 8 shows an example of seismic fragility curves for a low rise, low code RC building at the yield (green) and collapse (red) LSs versus the peak ground acceleration (PGA) (Tsionis, Papailia, and Fardis 2011).

For the debris flow fragility curve (Figure 9), we adopt the example provided by Fuchs, Heiss, and Hubl (2007), expressed as:

$$V = 0.11h^2 - 0.22h \quad (7)$$

where  $V$  is the debris flow vulnerability and  $h$  is deposition height, in metre.

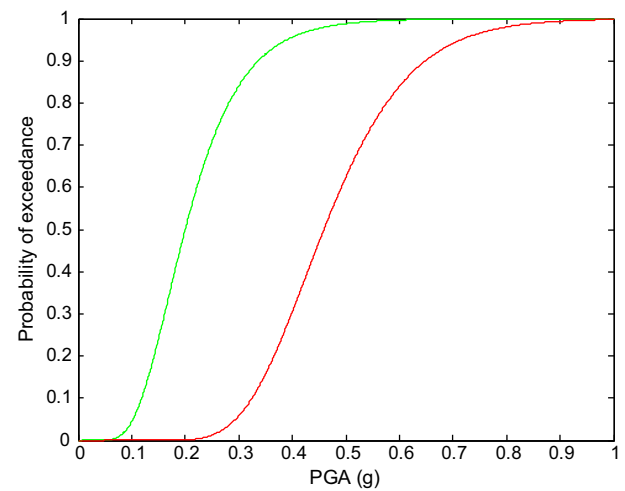


Figure 8. Seismic fragility curves for a low rise, low code RC building for the yield (green curve) and collapse (red curve).

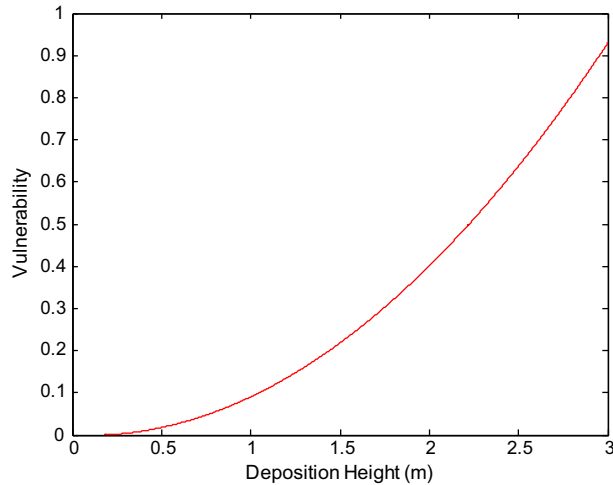


Figure 9. Debris flow fragility curve.  
Source: Fuchs, Heiss, and Hubl 2007.

In the case of a system subjected to two hazards (as is the case with earthquakes and debris flow load considered in this study), an alternative formulation must be sought such that the fragility is expressed in terms of the two demands (hazards). When the vulnerabilities to the hazards are completely independent, the multi-hazard vulnerability factor will be one minus the probability that the building has not collapsed after having been exposed to the two hazards one after the other:

$$1 - P_f = (1 - P_{f1})(1 - P_{f2}) \quad (8)$$

where  $P_f$  is the LS probability for the building exposed to two hazards, and  $P_{f1}$  and  $P_{f2}$  are the LS probabilities for the building at given hazard intensity measures due to hazards  $H_1$  and  $H_2$ , respectively.

Figure 10 shows an example of seismic fragility surface calculated considering debris flow loads. As can be seen, these fragilities are presented over three dimensions, where the  $x$ -axis is the peak ground acceleration, the  $y$ -axis is the deposition height and the  $z$ -axis is the probability of reaching a given LS.

#### 4.3.3. Multi-risk assessment

The expected risk of the exposed elements (e.g., buildings) subjected to potential hazards, assuming that the intensity measure as the hazard parameter is deterministic, can be calculated as:

$$R = P \times L \quad (9)$$

where  $P$  is the probability of the occurrence of damage and  $L$  indicates the corresponding loss. The equation shows that any factor which alters either the probability or the value of the resulting loss affects the related risk. Diverse damage states and associated loss values,  $L_i$  ( $i = 1$  to the number of probable damage states), with a different probability of occurrence, and  $P_i$ , may be envisaged for the elements at risk. The probable risk of the system,  $R$ , can then be estimated as the summation of

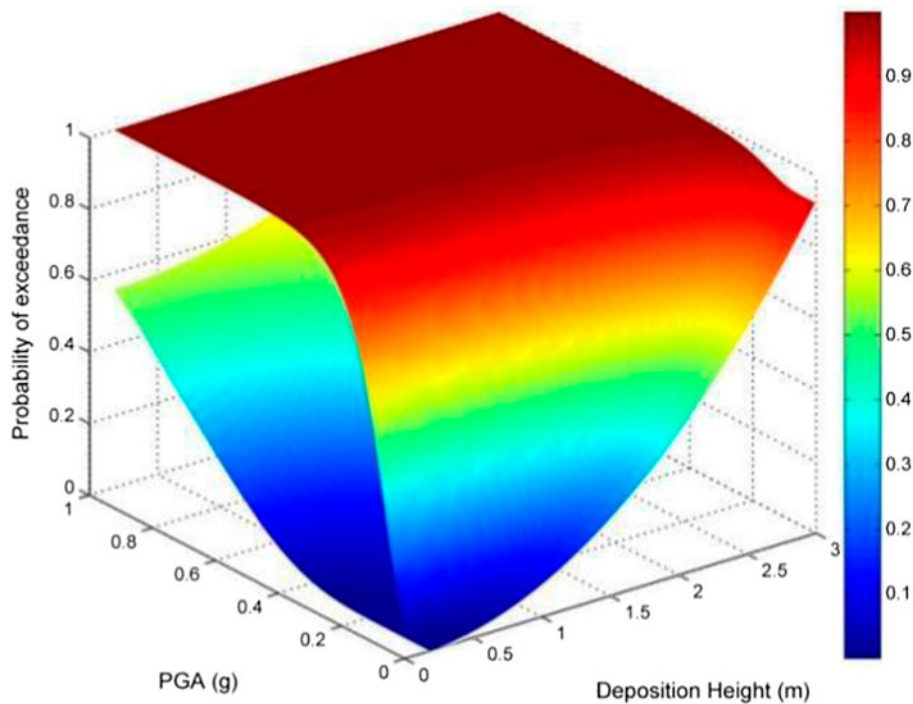


Figure 10. Fragility surface for a scenario involving a seismic event and debris flow for a low rise, low code RC building.

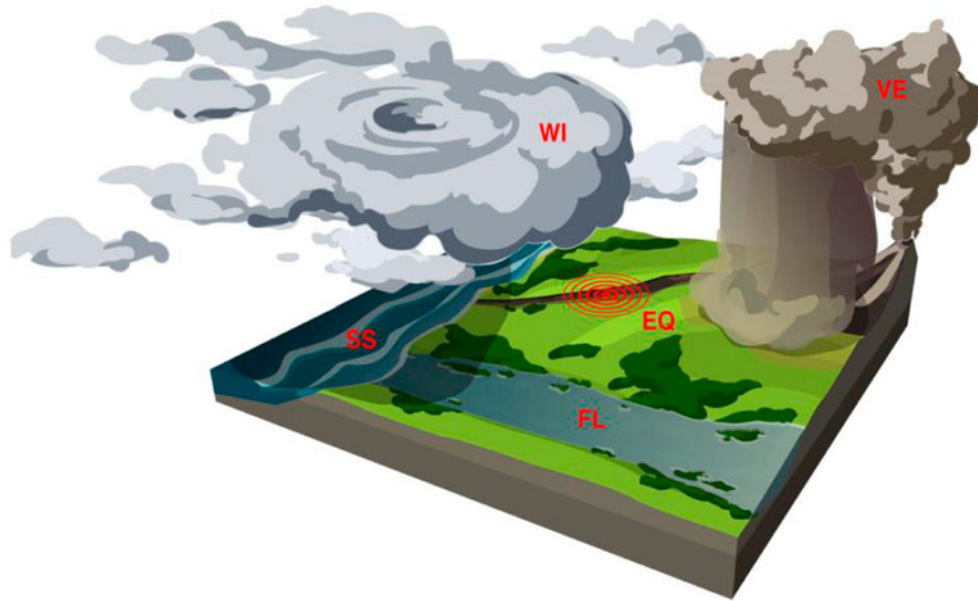


Figure 11. Principal sketch of the Virtual City region as developed within the MATRIX project, redrawn from Mignan (2013). Note: EQ, Earthquake; FL, Flood; SS, Sea submersion; VE, Volcanic eruption; and WI, Wind.

the loss of each damage state:

$$R = \sum P_i \times L_i \quad (10)$$

### 5. Example of quantitative multi-risk assessment

The case described here is based on the Virtual City database, as shown in Figure 11, developed within the scope of the MATRIX project (Mignan 2013; Komendantova et al. 2014).

The Virtual City (Mignan 2013) considers a 100 km by 100 km region threatened by various natural hazard types. The elements at risk consist of 50,000 identical low rise concrete buildings distributed within a 20 km by 20 km area inside the Virtual Region (Figure 12). The average rebuilding cost per unit for the ‘collapse’ damage state of these buildings is assumed to be 200,000 Euro, and the average repair costs for the ‘yielding’ damage state as 50% of the unit rebuilding cost. The earthquake source zone is a 45-km-long linear source (black line in Figure 12), where the start and end points are (0.3, 38.8) and (35, 65), respectively.

This case is used to explain how to perform multi-risk assessment within a complicated system based on the BaNMuR model described above. Therefore, it is not a validation of the performance of the model. The case partly makes use of artificial data (including the earthquake source) and partly typical engineering values (as for the soil parameters and rainfall intensity). The scenarios consider debris flows triggered by both earthquake and precipitation. We take one cell for example, the central coordinate of which is (40.005, 40.005).

#### 5.1. Constructing causal networks for multi-risk assessment

A Bayesian network is built with the program Bayes Net Toolbox (Murphy 2001) on the basis of the MATrix LABoratory (MATLAB) suite, as shown in Figure 13. There are 17 nodes and 19 arcs in the network. The network consists of five main sub-networks for seismic hazard, cascade effect, debris flow hazard, building damage and risk assessment.

#### 5.2. Quantifying the networks

##### 5.2.1. Seismic hazard sub-network

To predict peak ground acceleration at a given site, the distribution of distances from the earthquake epicentre to the site of interest is necessary. The seismic sources are defined by epicentres that are assumed to have equal probability. In the Virtual City, these equal probability locations fall along the line that defines the fault. Using the geometric characteristics of the source, the distribution of the distances can be calculated as shown in Figure 14.

The distribution of earthquake magnitudes in a given region follows a distribution observed by Gutenberg and Richter (1944):

$$\log \lambda_m = a - bM \quad (11)$$

where  $\lambda_m$  is the rate of earthquakes with magnitudes greater than  $M$ , and  $a$  and  $b$  are constants that are generally estimated using statistical analyses of historical observations.

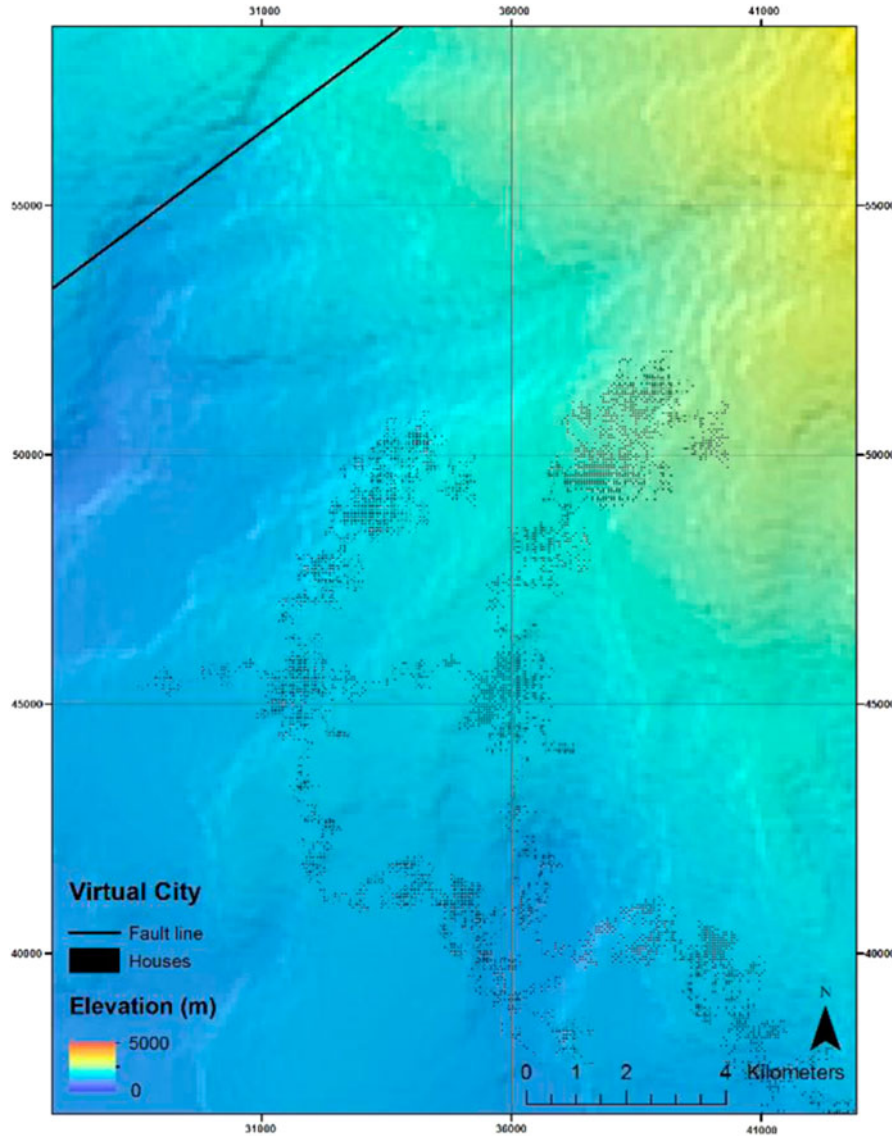


Figure 12. Example locations of the 50,000 buildings and the earthquake source in the MATRIX Virtual City region.

The above-described Gutenberg–Richter recurrence law is generally applied with a lower and upper bound. The lower bound is represented by a minimum magnitude  $m_{min}$  below which earthquakes are ignored due to their lack of engineering importance (usually  $m_{min} = 4$ ). The upper bound is given by the maximum magnitude  $m_{max}$  that a given seismic source can produce, following the empirical relationship of Wells and Coppersmith (1994):

$$m_{max} = 5.08 + 1.16 \log_{10}(L) \quad (12)$$

where  $L$  is the length of the line source. On the basis of the equation above, the line source can produce a maximum magnitude of 7.0.

Setting a range of magnitudes of interest, using the bounds  $m_L$  and  $m_U$ , Equation (13) can be used to

compute the probability that an earthquake magnitude falls within these bounds (Figure 15):

$$P(m_L \leq M \leq m_U | m_{min} \leq M \leq m_{max}) = \frac{\lambda_{m_L} - \lambda_{m_U}}{\lambda_{m_{min}} - \lambda_{m_{max}}} \quad (13)$$

The conditional probabilities of PGA given the magnitude and distance to the epicentre are calculated based on the ground motion prediction equation proposed by Ambraseys et al. (2005) and using a Monte Carlo simulation. The resulting seismic hazard curve is shown in Figure 16.

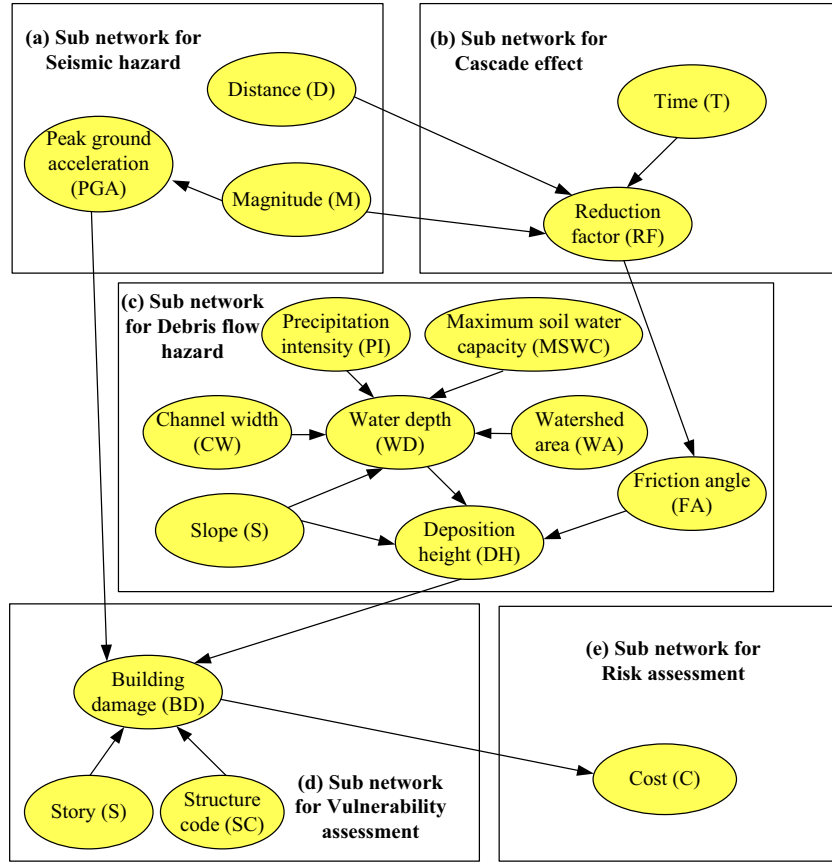


Figure 13. The Bayesian network for a multi-risk assessment considering earthquakes and debris flow.

### 5.2.2. Cascade effect sub-network

Soil properties can be influenced by earthquakes. Post-earthquake soil strengths may be lower than the pre-earthquake (static) strengths for zones that are susceptible to strength loss. As time passes, the progression of soil self-healing will result in increased shear strength compared to that shortly after the earthquake. According to Luna et al. (2013), the reduction factor ( $RF$ ) of soil

shear strength  $f_s$  can be calculated as:

$$f_s = \frac{(\tan \phi')_{After}}{(\tan \phi')_{Before}} = \frac{\gamma_s d_b - \gamma_w d_b}{\gamma_s d_b - \gamma_w d_b + \gamma_w d_w \cdot \frac{1}{1+e^{-1.3M+9.5}} \cdot 10^{-70000M^{-8.1}D} \cdot e^{-0.5T}} \quad (14)$$

where  $\phi'$  is the effective internal friction angle of the soil,  $d_b$  is the depth of the failure surface,  $d_w$  is the water table depth,  $\gamma_s$  is the soil unit weight,  $\gamma_w$  is the specific weight of water,  $D$  is the distance to the epicentre,  $T$  is the time after the earthquake and  $M$  is the earthquake magnitude. The values of these properties for sandy soil following an earthquake are listed in Table 2.

Using the values listed in Table 2, Equation (14) can be simplified to become,

$$f_s = \frac{2}{2 + 0.6 \cdot \frac{1}{1+e^{-1.3M+9.5}} \cdot 10^{-70000M^{-8.1}D}} \quad (15)$$

The conditional probabilities of the  $RF$  given the magnitude and distance to epicentre are calculated using again a Monte Carlo simulation, the results shown in Figure 17.

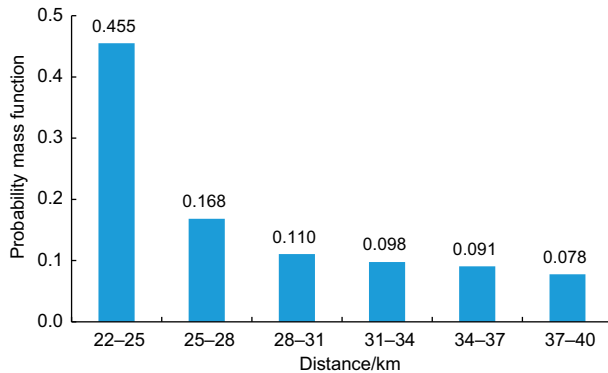


Figure 14. Specification of the discrete probabilities of distance.

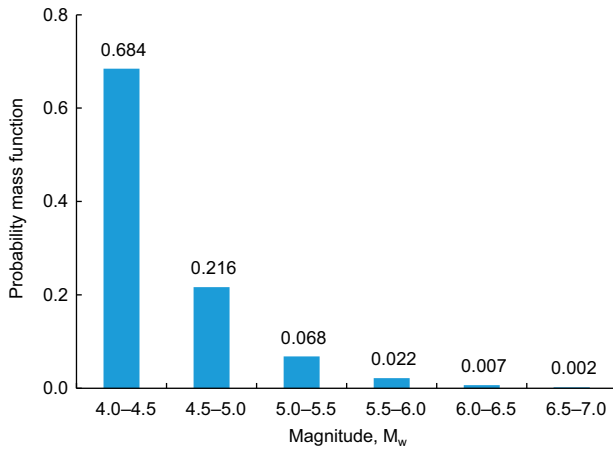


Figure 15. Specification of the discrete probabilities of magnitude.

5.2.3. Debris flow hazard sub-network

Takahashi (1991) proposed a comprehensive theory behind the mechanism of debris flow dynamics. The debris flow deposition height  $DH$  can be quantified as:

$$DH(WD, FA, S) = WD \left[ k_1 \left( \frac{\tan FA}{\tan S} - 1 \right) - 1 \right]^{-1} \quad (16)$$

where  $k_1 = C_b(d_b - 1)$  with  $d_b \approx 2.65$ , the relative density of the grains, and  $C_b \approx 0.7$ , the volumetric concentration of the sediments. The other variables represent the factors outlined in Figure 13.

The watershed area, channel width, slope angle and maximum soil water capacity used herein are shown in Table 3, while the precipitation intensity properties are listed in Table 4.

The debris flow hazard curve can therefore be calculated, as shown in Figure 18.

5.2.4. Building damage sub-network

As introduced in Section 4.3.2, the fragility surface for the RC building subject to earthquake and debris flow can be obtained. The classes of building examined in terms of their storeys include low rise, medium rise and

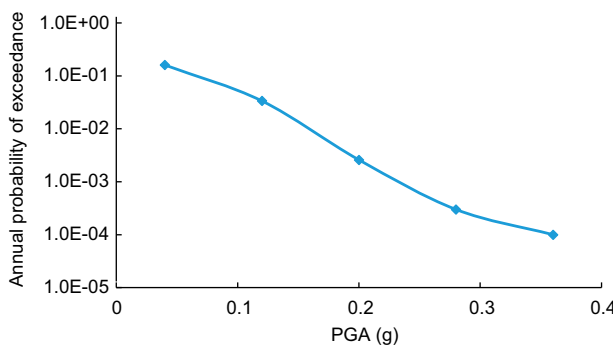


Figure 16. Specification of the discrete probabilities of PGA.

Table 2. Sandy soil properties at a given time following an earthquake.

Water unit weight $\gamma_w$ (N/m <sup>3</sup> )	9800	Ground water depth $d_w$ (m)	1
Soil unit weight $\gamma_s$ (N/m <sup>3</sup> )	20,000	$T$ (year)	1
Failure depth $d_b$ (m)	2	Tangent of effective internal friction angle $\tan \phi'$	0.9

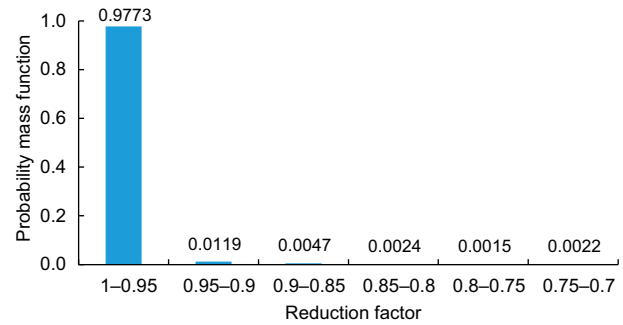


Figure 17. Specification of the discrete probabilities of the  $RF$  for sandy soil after an earthquake using the values listed in Table 2.

high rise, while the states of structure code are low, medium and high. In the following, only results for a low rise, low code building located in the grid specified above are considered.

Table 3. Detailed information of the debris flow's initiation area.

Watershed area $WA$ (m <sup>2</sup> )	2,000,000	Maximum soil water capacity $MSWC$ (m/s)	$5 \times 10^{-9}$
Channel width $CW$ (m)	2	Tangent of slope angle $\tan S$	0.2

Table 4. Precipitation intensity properties.

Return period (years)	Annual frequency	Precipitation intensity (m/s)
1.35	0.7389	0.000002
5	0.2	0.000005
20	0.05	0.00001
100	0.01	0.000015
1000	0.001	0.00002
10,000	0.0001	0.000025

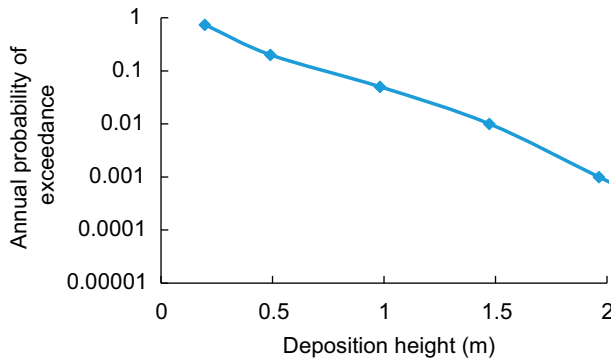


Figure 18. Specification of the exceedance probabilities of deposition height.

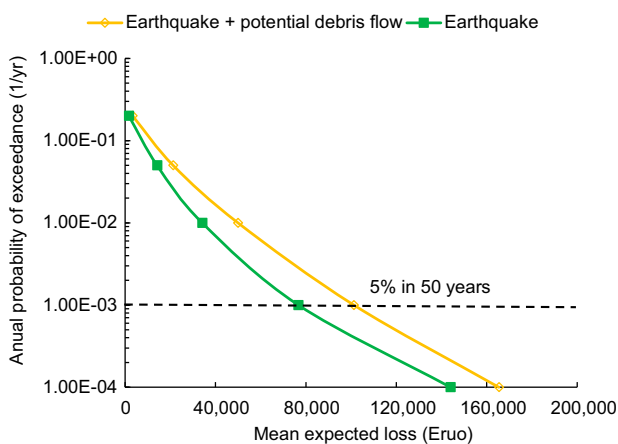


Figure 19. Risk curves for the selected site.

### 5.3. Results

Figure 19 shows the loss hazard curves giving the annual frequency of exceeding various levels of economic loss in terms of a low rise, low code building when exposed to earthquake hazard and multi-hazard (earthquake and potential debris flow hazard) scenarios at selected site. It is worth noting that the mean expected loss will increase with respect to the same return period, when taking into account cascade effects (i.e., sub-network for cascade effect in Figure 13b). For instance, the 5% probability of exceedance in 50-year curves shown has loss values of approximately 77,000 Euro and 100,000 Euro when considering earthquake hazard and both earthquake and potential debris flow hazards, respectively.

## 6. Conclusions

Quantification of all the natural and anthropogenic risks that can affect an area of interest is a basic factor for the development of a sustainable environment, land-use planning and risk mitigation strategies. In this study,

we put forward a consistent framework for multi-risk assessment. The developed procedure consists of three levels: (1) Level 1: qualitative analysis, (2) Level 2: semi-quantitative analysis and (3) Level 3: quantitative analysis.

The qualitative analysis at Level 1 comprises a flow chart algorithm and allows the end user to decide whether or not a more quantitative multi-risk assessment is required. In the semi-quantitative Level 2 analysis, the interactions among hazards and dynamic vulnerability are assessed using qualitative and semi-quantitative methods. To consider hazard interactions and time-variant vulnerability at this level, a matrix approach method based on system theory is suggested. In the quantitative Level 3 analysis, the effects of interactions among hazards and dynamic vulnerability are assessed quantitatively with a high accuracy. In this case, a quantitative multi-risk assessment model based on Bayesian networks is introduced to both estimate the probability of a triggering/cascade effects and model the time-variant vulnerability of a system exposed to multiple hazards. The flexible structure and the unique modelling techniques offered by Bayesian networks make it possible to analyse interactions and cascading effects using a simple probabilistic framework. In this way, multi-risk assessment can be performed step by step. At the same time, the interactions among different threats are considered in a systematic way in a harmonised structure in the recommended framework.

### Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

### References

- Ambraseys, N. N., J. Douglas, S. K. Sarma, and P. M. Smit. 2005. "Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration." *Bulletin of earthquake engineering* 3 (1): 1–53. doi:10.1007/s10518-005-0183-0.
- Asprone, D., F. Jalayer, A. Prota, and G. Manfredi. 2010. "Proposal of a Probabilistic Model for Multi-hazard Risk Assessment of Structures in Seismic Zones Subjected to Blast for the Limit State of Collapse." *Structural Safety* 32 (1): 25–34. doi:10.1016/j.strusafe.2009.04.002.
- Carpignano, A., E. Golia, C. Di Mauro, S. Bouchon, and J.-P. Nordvik. 2009. "A Methodological Approach for the Definition of Multi-risk Maps at Regional Level: First Application." *Journal of Risk Research* 12 (3–4): 513–534. doi:10.1080/13669870903050269.
- De Pippo, T., C. Donadio, M. Pennetta, C. Petrosino, F. Terlizzi, and A. Valente. 2008. "Coastal Hazard Assessment and Mapping in Northern Campania, Italy." *Geomorphology* 97 (3–4): 451–466. doi:10.1016/j.geomorph.2007.08.015.

- European Commission. 2010. "Commission Staff Working Paper: Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management." Brussels: European Commission.
- Fuch, S., K. Heiss, and J. Hubl. 2007. "Towards an Empirical Vulnerability Function for Use in Debris Flow Risk Assessment." *Natural Hazards and Earth System Science* 7 (5): 495–506. doi:10.5194/nhess-7-495-2007
- Garcia-Aristizabal, A., P. Gasparini, and G. UHINGA. 2015. "Multi-risk Assessment as a Tool for Decision-making." In *Climate Change and Urban Vulnerability in Africa, A Multidisciplinary Approach*, edited by S. Pauleit, G. Jorgensen, Kabisch, P. Gasparini, S. Fohlmeister, I. Simonis, K. Yeshitela, A. Coly, S. Lindley, W. J. Kombe, 229–258. Future Cities, Vol. 4, Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-03982-4\_7
- Garcia-Aristizabal, A., W. Marzocchi G. Woo, A. Reveillere, J. Douglas, G. Le Cozannet, F. Rego, C. Colaco, K. Fleming, M. Pittore, S. Tyagunov, S. Vorogushyn, F. Nadim, B. V. Vangelsten, and W. ter Horst). 2012. "Review of existing procedures for multi-hazard assessment, Deliverable D3.1." *New methodologies for multi-hazard and multi-risk assessment methods for Europe (MATRIX)*, contract No. 265138.
- Gasparini, P., and A. Garcia-Aristizabal. 2014. "Seismic Risk Assessment, Cascading Effects." In *Encyclopedia of Earthquake Engineering, SpringerReference*, edited by M. Beer, E. Patelli, I. Kougoumtzoglou, I. Au, 1–20. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-36197-5\_260-1
- Gill, J. C., and B. D. Malamud. 2014. "Reviewing and Visualizing the Interactions of Natural Hazards." *Reviews of Geophysics* 52 (4): 680–722. doi:10.1002/2013RG000445.
- Grünthal, G., A. H. Thieken, J. Schwarz, K. S. Radtke, A. Smolka, and B. Merz. 2006. "Comparative Risk Assessments for the City of Cologne – Storms, Floods, Earthquakes." *Natural Hazards* 38: 21–44, doi:10.1007/s11069-005-8598-0.
- Gutenberg B., and C. F. Richter. 1944. "Frequency of Earthquakes in California." *Bulletin of the Seismological Society of America* 34: 185–188.
- Hudson, J. A. 1992. *Rock Engineering System*. Chichester: Ellis Horwood.
- Iervolino, I., M. Giorgio, and E. Chioccarelli. 2014. "Closed-form Aftershock Reliability of Damage-cumulating Elastic-perfectly-plastic Systems." *Earthquake Engineering Structural Dynamics* 43 (4): 613–625. doi:10.1002/eqe.2363.
- Jalayer F., D. Asprone, A. Prota, and G. Manfredi. 2011. "A Decision Support System for Post-earthquake Reliability Assessment of Structures Subjected to Aftershocks: An Application to L'Aquila Earthquake, 2009." *Bulletin of Earthquake Engineering* 9 (4): 997–1014. doi:10.1007/s10518-010-9230-6.
- Kappes, M. S., M. Keiler, and T. Glade. 2010. "From Single-to Multi-hazard Risk Analyses: A Concept Addressing Emerging Challenges. In *Mountain Risks: Bringing Science to Society. Proceedings of the International Conference*, edited by J.-P. Malet, T. Glade, and N. Casagli, 351–356. Florence: CERIG Editions.
- Kappes, M. S., M. Keiler, K. von Elverfeld, and T. Glade. 2012. "Challenges of Analyzing Multi-hazard Risk: A Review." *Natural Hazards* 64 (2): 1925–1958. doi:10.1007/s11069-012-0294-2.
- Komendantova, N., R. Mrzyglocki, A. Mignan, B. Khazai, F. Wenzel, A. Patt, and K. Fleming. 2014. "Multi-hazard and Multi-risk Decision-support Tools as a Part of Participatory Risk Governance: Feedback from Civil Protection Stakeholders." *International Journal of Disaster Risk Reduction* 8: 50–67. doi:10.1016/j.ijdr.2013.12.006.
- Lee, K. H., and D. V. Rosowsky. 2006. "Fragility Analysis of Woodframe Buildings Considering Combined Snow and Earthquake Loading." *Structural Safety* 28 (3): 289–303. doi:10.1016/j.strusafe.2005.08.002
- Luna B. Q., B. V. Vangelsten, Z. Q. Liu, U. Eidsvig, and F. Nadim. 2013. "Landslides Induced by the Interaction of an Earthquake and Subsequent Rainfall-A Spatial and Temporal Model." *Proceedings of 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, September 2–6.
- Marzocchi, W., A. Garcia-Aristizabal, P. Gasparini, M. L. Mastellone, and A. Di Ruocco. 2012. "Basic Principles of Multi-risk Assessment: A Case Study in Italy." *Natural Hazards* 62 (2): 551–573. doi:10.1007/s11069-012-0092-x.
- Mignan A. 2013. D7.2 MATRIX-CITY User Manual, New Methodologies for Multi-hazard and Multi-risk Assessment Methods for Europe, Deliverable 7.2. 78. accessed December, 2014. <http://matrix.gpi.kit.edu/downloads/MATRIX-D7.2.pdf>.
- Mignan, A., S. Wiemer, and D. Giardini. 2014. "The Quantification of Low-probability-high-consequences Events: Part I. A Generic Multi-risk Approach." *Natural Hazards* 73 (3): 1999–2022. doi:10.1007/s11069-014-1178-4.
- Murphy, K. 2001. "The Bayes Net Toolbox for Matlab." *Computing Science and Statistics* 33: 331–350.
- Nadim, F., and Z. Q. Liu. 2013. "Quantitative risk assessment for earthquake-triggered landslides using Bayesian network." *Proceedings of 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, September 2–6.
- Schmidt, J., I. Matcham, S. Reese, A. King, R. Bell, R. Henderson, G. Smart, J. Cousins, W. Smith, and D. Heron. 2011. "Quantitative Multi-risk Analysis for Natural Hazards: A Framework for Multi-risk Modelling." *Natural Hazards* 58 (3): 1169–1192. doi:10.1007/s11069-011-9721-z.
- Simeoni, U., G. Calderoni, U. Tessari, and E. Mazzini. 1999. "A New Application of System Theory to Foredunes Intervention Strategies." *Journal of Coastal Research* 15 (2): 457–470.
- Selva, J. 2013. "Long-term Multi-risk Assessment: Statistical Treatment of Interaction among Risks." *Natural Hazards* 67 (2): 701–722. doi:10.1007/s11069-013-0599-9.
- Takahashi, T. 1991. *Debris Flow*. Rotterdam: A. A. Balkema. IAHR Monograph.
- Tsionis G., A. Papailia, and M. N. Fardis. 2011. "Analytical Fragility Functions for Reinforced Concrete Buildings and Buildings Aggregates of Euro-Mediterranean Regions-UPAT Methodology." Internal Report, Syner-G project 2009–2012.
- Van Westen, C. J., L. Montoya, and L. Boerboom. 2002. "Multi-hazard Risk Assessment Using GIS in Urban Areas: A Case Study for the City of Turrialba, Costa Rica." *Proceeding of Regional Workshop on Best Practice in Disa*, Bali: Mitigation, 120–136.
- Wells D. L., and K. J. Coppersmith. 1994. "New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement." *Bulletin of the Seismological Society of America* 84: 974–1002.
- Zhang, L. M., F. Nadim, and S. Lacasse. 2013. "Multi-risk assessment for landslide hazards." In *Proceeding of Pacific*



- Rim Workshop on Innovations in Civil Infrastructure Engineering*, edited by S.-S. Chen and A. H.-S. Ang, 321–329. Taipei: National Taiwan University of Science & Technology. National Taiwan University of Science and Technology. ISBN: 978-986-03-7004-1.
- Zhang, S. 2014. “Assessment of Human Risks Posed by Cascading Landslides in the Wenchuan Earthquake Area.” PhD thesis, the Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.
- Zuccaro G., F. Cacace, R. J. S. Spence, and P. J. Baxter. 2008. “Impact of Explosive Eruption Scenarios at Vesuvius.” *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 178 (3): 416–453. doi:[10.1016/j.jvolgeores.2008.01.005](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.01.005).

# Vedlegg H

## GJENNOMFØRING AV RISIKOANALYSER FOR DAMMER

### INNHold

H1. Gjennomføring av en risikoanalyse for en dam

2

## H1. Gjennomføring av en risikoanalyse for en dam

Det anbefales å gjøre risikovurderingen i en gruppe av eksperterter på arbeidsmøter. BoR and USACE (2012) inneholdte retningslinjer for gjennomføring av slike arbeidsmøter. Det anbefales å utnevne gruppeledere som leder gruppene gjennom risikoidentifiseringen (potensiell feilmodus analyse) og risikovurderingsprosessen. Gruppelederen bidrar til prosessen med erfaring med risikovurderinger, konsistens i tilnærming, kunnskap om nyeste teknologi i risikovurderinger og kunnskap om gjeldende praksis. Gruppeleder fungerer også som en ressurs for tekniske innspill og spørsmål fra gruppen.

BoR and USACE (2012) presenterte følgende typiske agenda for et arbeidsmøte med gjennomføring av dam risikoanalyser:

### "Typical Risk Analysis Meeting Agenda

- ✚ Introduction of team members and their responsibilities
- ✚ Quick reviews of:
  - Dam
  - Geology
  - Appurtenant structures
  - Instrumentation data
  - Operations of the reservoir and dam
  - Flood routings
  - Seismicity
  - What's downstream
  - Secondary dam deficiencies
- ✚ Discuss and identify potential failure modes
- ✚ Develop event trees for credible potential failure modes, as appropriate
  - Develop load ranges, where applicable
  - Develop probability estimate distributions for each node
  - Review team's estimates
- ✚ Develop or review loss of life estimates
  - Population at risk
  - Warning time estimates
  - Loss of life
- ✚ Review risk analysis calculations and results
- ✚ Discuss presentation of the results, the conclusions reached, and the recommended actions. As part of this discussion consider the following questions:
  - What failure modes create the highest risk?
  - What load range increments are associated with the highest estimates?
  - What are the uncertainties for the highest risk?
  - What data or analysis would reduce the uncertainty?
  - What is the anticipated range of results from gathering more data/performing more analysis?
  - How would these outcomes impact risk?

- Where do we go? What will it cost?
- + Build the case for the risk estimates and the path forward
- + Brief decision maker on the result of the analysis
- + Set future schedules
  - Draft report sections written
  - Review
  - Next meeting to discuss final results
  - Draft report and Decision Document
  - Agency review
- + Final report and Decision Document"