

Damsikkerhet
i et helhetlig perspektiv

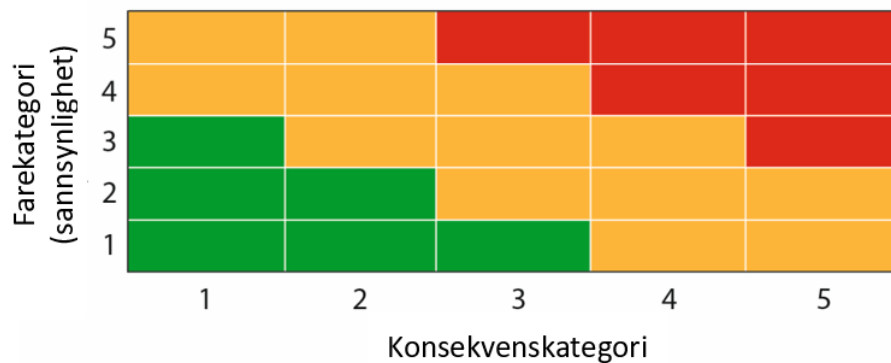
Håndbok

Risikovurdering for dammer i Norge

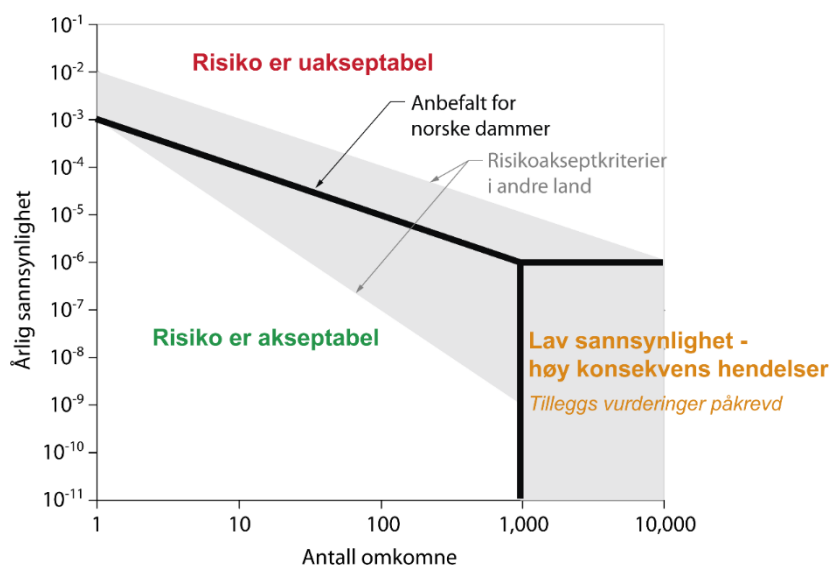


Dam Svartevann (Foto Sira Kvina)

Kvalitativ risikomatrise



Kvantitativ risikodiagram



FORORD

Håndboken er utarbeidet som retningslinje for gjennomføring av risikovurderinger for norske dammer. Målgruppen for håndboken er først og fremst vassdragsteknisk ansvarlige (VTA). Avsnittene i hovedteksten om "Risikovurdering for dammer" og "Risikokommunikasjon og beredskap" har også dameierens ledelse som målgruppe.

Formålet med håndboken er å hjelpe fagpersoner i deres vurderinger av damsikkerhet og bidra til systematiske vurderinger. Håndboken er et supplement til eksisterende regelverk, veiledninger og retningslinjer.

Risikovurdering av norske dammer er ikke nytt, analyser har blitt gjennomført i Norge siden 80-årene. Norges vassdrags- og energiverk (NVE) (1997) utarbeidet en "Veiledning for risikoanalyse anvendt for vassdragsanlegg" i forbindelse med arbeidet med Damforskriften fra 2001 i samarbeid med representanter fra bransjen.

Innholdet i håndboken er basert på dagens (2020) praksis innen risikovurdering og damsikkerhet, slik det praktiseres internasjonalt. Håndboken gir definisjoner, forklarer risikovurderingsmetoder og beskriver hvordan risikovurdering kan anvendes for både fyllingsdammer og betongdammer. Risikoakseptkriterier og risikohåndtering er også kort beskrevet. Eksempler er gitt.

Håndboken er utarbeidet i prosjektet "Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv" (DSHP), under delprosjektet "Risikovurdering" som ledes av Torstein Tjelde, Hafslund Eco. DSHP-prosjektet har som mål å etablere og ta i bruk kunnskap med fokus på damsikkerhet i et samfunnsoptimalt perspektiv. Prosjektet er i regi av 30 energiproduksjonsselskaper. Dameierne deltar i både styringen og selve arbeidet, og NVE deltar i styremøtene som observatør. Prosjektet koordineres av Energi Norge. Håndboken er utarbeidet av NGI på oppdrag fra Energi Norge.

Håndboken er tilgjengelig elektronisk på Energi Norges websider. Håndboken finnes også som en NGI rapport, med tilleggsdokumentasjon av internkontrollen som er foretatt. Oppdateringer til den norske versjonen av håndboken vil eventuelt skje gjennom Energi Norge.

Håndbok - Risikovurdering for dammer i Norge
2020-12-31
ISBN 978-82-546-1007-7

Energi Norge prosjekt
Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv

Håndboken er utgitt av Energi Norge

Utarbeidet av Norges Geotekniske Institutt
NGI rapport 2018 0137-01-R
Forfatter: Suzanne Lacasse, NGI
QC: Kaare Høeg, NGI

Utdrag fra NS (Norsk Standard) risikomatrise samt definisjoner fra NS 5815:2006 er gjengitt med tillatelse fra Standard Online AS 12/2014. Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale.

INNHold

Formål med håndboken.....	9
Organisering av håndboken	9
Risikovurdering for dammer	10
Hva er risikovurdering?	10
Standardbaserte sikkerhetskrav og risikobetraktninger	11
Når bør det gjøres en risikovurdering for norske dammer?	12
Erfaring med risikovurdering av norske dammer.....	13
NVE's 1997 veileder om risikoanalyse anvendt for vassdragsanlegg.....	14
Fordeler og ulemper med bruk av risikovurdering	15
Avslutningsord.....	17
Risikovurderingsmetodikk.....	21
Risikovurdering og risikostyring	21
Risiko = Fare · Konsekvens.....	21
Risikobilde i et risikodiagram.....	22
Risikoevaluering og risikohåndtering	25
Analysemetodikk	26
Eksempler på risikovurdering for dammer.....	29
Eksempel 1: Hendelsestre-analyse for å vurdere dambrudds sannsynlighet	29
Eksempel 2: Feiltre-analyse av en dam komponent	36
Eksempel 3 Monte Carlo analyse av nedstrøms skråningsstabilitet.....	40
Kommentar til analysene.....	42
Risikokommunikasjon og beredskap	45
Risikokommunikasjon.....	45
Beredskap	46

Vedlegg

Del I Verktøy for risikovurdering

- A Analysemetodikk og eksempler
 - Oversikt over analysemetoder
 - Fareanalyse ("Hazard analysis")
 - Konsekvensanalyse ("*Consequence analysis*")
 - Risikoakseptkriterier
- B Bruddmekanismer og skademekanismer - fyllingsdammer
- C Bruddmekanismer og skademekanismer - betongdammer
- D Dambruddstatistikk

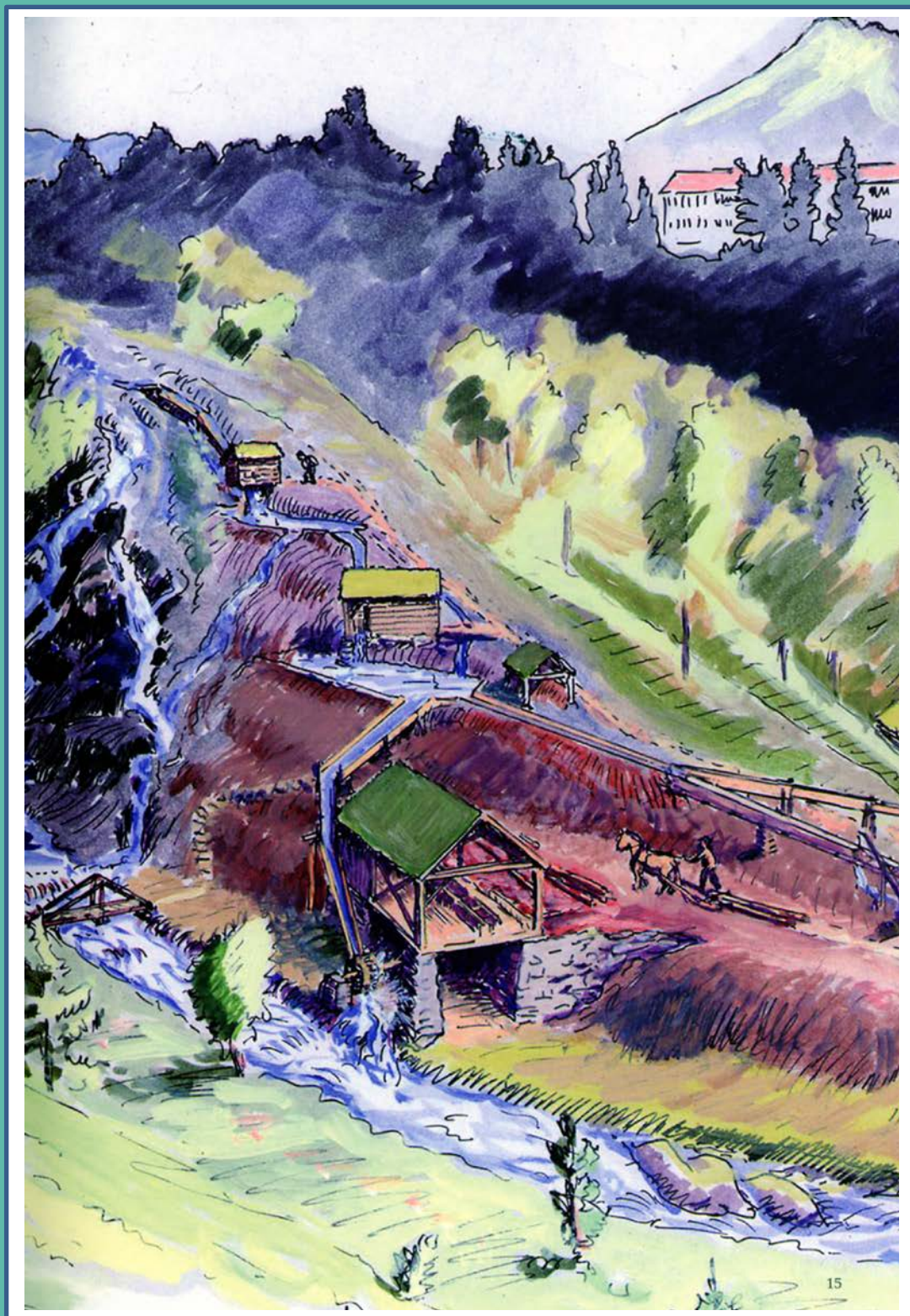
Del II Tilleggsinformasjon

- E Eksponenttall og nyttig statistikk
- F Risikobegreper
- G The "Observational Method"
- H Risikovurdering i andre land

Del III Referansemateriale

- I Definisjoner, akronymer og symboler
- J Risikostandarder i Norge (NS) og ISO
- K Liste over Energi Norge rapporter med risikoinnhold
- L ICOLD Bulletins med innhold om damsikkerhet
- M Siterte kilder

Risikovurdering for dammer



Bilde fra NVE brosjyre

Hovedtekst

Risikovurdering for dammer

Risikovurderingsmetodikk

Eksempler på risikovurdering av damsikkerhet

Risikokommunikasjon og beredskap

Vedlegg

Del I Verktøy for risikovurdering

A Analysemetodikk og eksempler

- Oversikt over analysemetoder
- Fareanalyse ("Hazard analysis")
- Konsekvensanalyse ("Consequence analysis")
- Risikoakseptkriterier

B Bruddmekanismer og skademekanismer - fyllingsdammer

C Bruddmekanismer og skademekanismer - betongdammer

D Dambruddstatistikk

Del II Tilleggsinformasjon

E Eksponenttall og nyttig statistikk

F Risikobegreper

G The "Observational Method"

H Risikovurdering i andre land

Del III Referansemateriale

I Definisjoner, akronymer og symboler

J Risikostandarder i Norge (NS) og ISO

K Liste over Energi Norge rapporter med risikoinnhold

L ICOLD Bulletins med innhold om damsikkerhet

M Siterte kilder

Formål med håndboken

Håndboken gir retningslinjer for gjennomføring av risikovurderinger for norske dammer. Håndboken beskriver risikovurdering og risikohåndtering som en metode for å vurdere damsikkerhet og behov for eventuelle sikkerhetstiltak.

Håndboken forklarer risikovurderingsmetodikk og gir både kvalitative og kvantitative eksempler. Mekanismer og andre faktorer som kan forårsake utilfredsstillende oppførsel av en dam og risikoakseptkriterier er beskrevet. Håndboken foreslår en metode for å vurdere sikkerheten og danne et risikobilde for en dam. Håndboken omhandler både fyllingsdammer og betongdammer.

Innholdet i håndboken er basert på dagens (2020) internasjonale praksis innen risikovurdering og damsikkerhet. Håndboken handler om sikkerhet mot dambrudd og berører ikke andre aspekter som informasjonssikkerhet¹.

Målgruppen for håndboken er vassdragsteknisk ansvarlige (VTA). Avsnittene i hovedtekst om "Risikovurdering for dammer" og "Risikokommunikasjon og beredskap" har også dameierens ledelse som målgruppe.

Organisering av håndboken

Håndboken har fire hovedavsnitt:

Risikovurdering for dammer, spesielt:

- Hva er risikovurdering?
- Standardbaserte sikkerhetskrav og risikobetraktninger
- Når bør det gjøres en risikovurdering for norske dammer?
- Erfaring med risikovurdering av norske dammer
- NVEs 1997 veileder om risikoanalyse anvendt for vassdragsanlegg
- Fordeler og ulemper med bruk av risikovurdering

Risikovurderingsmetodikk

Eksempler på risikovurdering av damsikkerhet (vedleggene har flere eksempler)

Risikokommunikasjon og beredskap

Tretten vedlegg, delt i tre seksjoner, inneholder mer detaljert informasjon:

- Del I Verktøy for risikovurdering.
- Del II Tilleggsinformasjon som er nyttig for risikovurderingene.
- Del III Referansemateriale

I håndboken er noe av teksten fremhevet i fargekodede tekstbokser, som følger:

Rød tekst

Viktig sikkerhetsaspekter

Blå tekst

Utfyllende informasjon

¹ For eksempel har Damsikkerhetsforskriften (2009, rettet 2013) krav om bruk av risikovurdering knyttet til behandling av informasjon om anlegget (§ 7-8 informasjonssikkerhet), og bruk av risikovurdering i forbindelse med sikringstiltak for tredje person (§ 7-6). Risikoanalyser er også et krav i Damsikkerhetsforskriften (§ 7-4) i forbindelse med beredskapsplanlegging. Risikovurdering for informasjonssikkerhet og beredskapsplanlegging er ikke en del av håndboken.

Risikovurdering for dammer

Hva er risikovurdering?

Risikovurdering har som mål å evaluere, kvalitativt eller kvantitativt, risiko forbundet med damanlegget. Som en del av analysen vurderes alle usikkerhetene og hvordan usikkerhetene kan påvirke oppførselen, funksjonaliteten og sikkerheten av damanlegget, og påfølgende konsekvenser. Risikovurderingen gjøres med en probabilistisk tilnærming. Målet med en 'probabilistisk' damsikkerhetsvurdering er å demonstrere at risikoen forbundet med et anlegg er akseptabel, og for eksempel sammenligne risikonivået for flere damanlegg.

Konkret gir risikovurdering en kvalitativ eller kvantitativ vurdering av faren (årlig sannsynlighet for at en uønsket hendelse skjer) og konsekvenser av hendelsen. Risikoen er uttrykt med 'årlig 'pålitelighetsindeks' og 'årlig bruddsannsynlighet'². I tillegg gir enkelte probabilistiske metoder "effekten av usikkerheten i risikovurderingene på beregnede bruddsannsynlighet og risiko.

Den konvensjonelle måten å vurdere sikkerheten av en dam er å bruke en 'deterministisk' analyse, for eksempel med å beregne en sikkerhetsfaktor. I håndboken brukes begrepene 'deterministisk' analyse og 'probabilistisk' analyse:

- En deterministisk analyse tar sikte på å demonstrere at et anlegg tåler identifiserte laster og parametere og evaluerer en "nominell" motstand. Tilnærmingen vurderer ikke hele spekteret av mulige resultater og kvantifiserer ikke sannsynligheten for at f.eks. sikkerhetsfaktoren kan bli indre enn 1,0. Deterministiske scenarier kan undervurdere den potensielle risikoen ved ikke å inkludere alle usikkerhetene.
- En probabilistisk analyse tar sikte på å gi et estimat av risikoen forbundet med et anlegg, hvor risikoen tar hensyn til usikkerhetene i analysen. Hvorav en deterministisk analyse vurderer virkningen av et enkelt sett med inngangsdata, tar en probabilistisk analyse utgangspunkt i å inkludere alle mulige scenarier, deres sannsynlighet og innvirkning. En probabilistisk analyse kan sammenlignes med mange tusen, til og med i noen tilfeller millioner, følsomhetsanalyser hvor valg av parameterne er gjort på et begrunnet grunnlag.

Håndboken anbefaler, i likhet med de fleste internasjonale publikasjoner, at risikovurderingen gjennomføres **i tillegg til** de konvensjonelle (deterministiske) analysene. De to vurderingene er komplementære.

Risikovurdering gir mulighet for å kombinere resultater fra ingeniørbaserte analyser, observasjoner, erfaring, ekspertvurderinger, ingeniørens faglige skjønn ("*engineering judgment*"), og annen informasjon og statistiske verdier i en beslutningsprosess med hovedhensikt å skaffe grunnlag for beslutningstaking og risikostyring.

En risikovurdering kan ta hensyn til uønskede og uventede hendelser og eventuelt dambrudd som skyldes vanlige og ekstreme hendelser gjennom dammens levetid. Risikovurdering fordrer en proaktiv tankegang og en identifisering av potensielle problemområder, og gir et begrunnet grunnlag for å iverksette tiltak for å redusere risiko og vurdere ressursbruk på tiltak. Dessuten er 'Risiko-bevisst beslutningsprosess'³ blitt krav i ISO (2394:2015). Dette kravet er også innarbeidet i ICOLDs Bulletins. Vedlegg I gir en liste over de ICOLD Bulletins som direkte behandler damsikkerhet).

Bruk av risikovurdering i andre bransjer:

Det er en økende bruk av risikovurderinger i bygg og anlegg prosjekter, og i energibransjen (petroleum-, vind-, kjernekraft), gruvedrift og miljøteknologiske vurderinger.

² På engelsk "*reliability index*" og "*annual failure probability*". De to verdiene er relatert (Vedlegg F).

³ "*Risk-Informed Decision-Making (RIDM)*". Akronymet finnes i Vedlegg I.

Det er også viktig å gradvis implementere risikovurdering for dammer. Det blir, i et samfunns perspektiv, et økende krav til risikovurdering av anlegg (infrastruktur) i fremtiden.

Det eksisterer flere metoder for å gjennomføre risikovurdering, fra enkle kvalitative risikomatriser til avanserte kvantitative metoder. Detaljeringsgrad på vurderingen velges ut fra formål med risikovurderingen, tilgjengelig informasjon, konsekvensene av uønskede hendelser eller brudd, og graden av usikkerheter.

I en risikovurdering for et damanlegg er det viktigste å kjenne godt til anlegget som analyseres og ha systematisert det som finnes av informasjon om anlegget, f.eks. geologien, tidligere grunn- og andre undersøkelser, og dammens oppførsel gjennom årene.

Risikovurdering for dammer i andre land:

Risikovurdering og risikohåndtering brukes mer og mer innen vannkraftbransjen i utlandet, f.eks. Australia, Canada, UK og USA (Vedlegg H). Det anbefales at man bruke risikovurderinger for dammer i Norge som i andre foregangsland.

RIDM har en lang historie i prosessnæringene, og er nylig brukt i energisektoren og for damanlegg.

Standardbaserte sikkerhetskrav og risikobetraktninger

Det er to tilnærminger for å vurdere damsikkerhet:

- (1) Standardbaserte sikkerhetskrav (SBA). SBA (også kalt en deterministisk analyse) er den konvensjonelle (deterministiske) tilnærmingen; og
- (2) Risikovurdering med risiko-bevisst beslutning (RIDM).

I SBA tilnærmingen vurderes sikkerheten ved å følge etablerte regler for laster og dimensjonering, strukturell kapasitet, sikkerhet, og ev. andre tiltak. Gjennom mange år har den tradisjonelle SBA utviklet seg fra anerkjent god praksis som er oppnådd fra grunnleggende teoretiske hensyn og erfaring. Den anerkjente gode praksis, kombinert med erfaring, har generelt tjent målet om damsikkerhet godt, og er fortsatt en nødvendig komponent av dam sikkerhetsstyring. SBA er derimot ikke godt egnet til å vurdere viktige sikkerhetsspørsmål som f.eks. indre erosjon, overløp funksjonalitet, beregningenes pålitelighet, påvirkning av menneskelige faktorer og operasjonelle problemer og usikkerheter.

I Norge er sikkerhetskravene for dammer standardbaserte. Damsikkerhetsforskriften (2009, rettet 2013) setter eksplisitte konstruksjonsmessige krav til dammer med dokumentasjon basert på deterministiske analyser, unntatt for analyse av dambruddbølgeberegninger. Damsikkerhetsforskriften derimot (merknad til § 7-6) nevner at "Sikringstiltakene som iverksettes [av hensyn til allmenheten] skal speile risikobildet", uten at det forklares hvordan risikobildet kan dannes.

Håndboken beskriver hvordan et risikobilde kan etableres ved risikovurderinger.

Internasjonalt tillates dokumentasjon av damsikkerheten ved påvisning av lav risiko med et minimumskrav på årlig 'pålitelighetsindeks' eller et maksimumskrav på 'årlig bruddsannsynlighet', i tillegg til i at dammen tilfredsstiller deterministiske sikkerhetskrav.

Det er usikkerhet i enhver tilstand og analyse for en dam. Hvis det er usikkerheter betyr det at bruddsannsynligheten er større enn null.

Risikovurdering tar implisitt hensyn til usikkerhetene i sikkerhetsanalysen og dammens tilstand. Usikkerhetene bør alltid tas hensyn til, også i de konvensjonelle (deterministiske) analysene. Usikkerhetene i en konvensjonell analyse dekkes oftest med en sikkerhetsfaktor, og noen ganger med sensitivitetsanalyser⁴. Sensitivitetsanalyser kan dekke

Komplementaritet av SBA og risikovurdering:

Standardbaserte sikkerhetskrav og risikovurderingsanalyser kompletterer hverandre. Ved vurdering av damsikkerhet bør de to tilnærmingene brukes sammen for å gi maksimum informasjon.

⁴ Sensitivitetsanalyse er et studium av analyseresultat som en funksjon av usikkerhetene i inngangsparameterne.

en variasjon i inngangsparametere i en matematisk modell, men det er vanskelig å anvende teknikken når formuleringen av et eventuelt bruddforløp ikke kan beskrives med ligninger (f.eks. indre erosjon, betongaldring, og så videre).

Risikovurdering bringer ny og komplementær innsikt til forskriftmessige analyser, dimensjoneringskrav og beslutninger om en dams sikkerhet. Risikovurdering har ikke som formål å erstatte konvensjonelle analyser, risikovurdering brukes sammen med konvensjonelle analyser. Risikovurdering gir mer informasjon om dammens sikkerhet og vil dermed hjelpe dameieren å ta robuste avgjørelser i en risiko-bevisst beslutningsprosess. Risikovurderinger er dermed et nyttig verktøy i vurdering av damsikkerhet i tillegg til Damsikkerhetsforskriften (2009, rettet 2013).

Sitat - Begrensninger med standardbaserte sikkerhetskrav:

"En forskrift med en sikkerhetsfaktor (SF) er attraktiv for de som sjekker dimensjoneringen kontra sikkerhetskrav, men erfaring med sakshistorie, som Dam Samarco i Brasil, avslører at overdreven bruk av forskrevne SF-verdier ikke er tilstrekkelig for å eliminere brudd. I noen tilfeller kan en SF på 1,3 være helt tilfredsstillende, selv for utfordrende konstruksjoner. Derimot er det tilfeller der en SF på 1,5 ikke er tilstrekkelig på grunn av usikkerheter, sprø-materialoppførsel, og så videre. Foreskrevet SF i regulering krever gjennomtenkte innspill fra erfarne designere og anerkjennelse av egenskapene til regional praksis."

Morgenstern (2018)

Når bør det gjøres en risikovurdering for norske dammer?

Det anbefales å prioritere en risikovurdering i følgende tilfeller:

- Dammer med betydelige konsekvenser hvis et brudd skulle skje.
- Dammer hvor usikkerhetene er store: To dammer med samme sikkerhetsfaktor fra en konvensjonell (deterministisk) analyse men ulike usikkerheter har svært forskjellig sikkerhetsmargin mot et eventuelt brudd og svært forskjellig bruddsannsynlighet (Vedlegg A og F).
- Dammer hvor det (1) observeres endring i oppførsel (plutselig eller en vedvarende situasjon), (2) forventes endring i ytre belastning (inkl. klimaendringer) eller (3) må tas viktige beslutninger.
- Dammer eller serier av dammer hvor det er 'fare' for "påfølgende" effekter⁵ og store skader på infrastrukturen og miljø, selv om det ikke er fare for tap av liv.
- Dammer hvor dameieren enten (1) må velge det mest effektive rehabiliteringstiltak sikkerhetsmessig, (2) hvor det er behov for kost-nytte analyser for å vurdere en optimal bruk av vedlikeholdsbudsjettet eller (3) hvor det er store kostnader forbundet med rehabilitering eller andre endringer i forhold til opprinnelig dimensjonering.
- Dammer i en større dam-portefølje for å sammenligne sikkerhetsmarginen for dammene og prioritere hvor rehabiliteringstiltakene først bør gjennomføres.

Risikoanalyse egner seg til:

- vurdere alle mulige scenarier som kan føre til uønskede hendelser eller brudd;
 - sammenligne sikkerheten av en dam med andre dammer eller/og andre konstruksjoner;
 - oppnå samme sikkerhetsnivå for dammer i samme konsekvensklasse;
 - rangere dammer i en portefølje;
 - øke innsikt i dammens oppførsel og risikomomenter;
- Risikoanalysene kan anvendes over hele dammens levetid og kan justeres ved endringer i laster eller i dammens tilstand.

⁵ "cascading effects"

- Dammer hvor det er risiko for tap av liv og ellers store samfunnsmessige konsekvenser, det vil si dammer i konsekvensklasse 2 til 4 ⁶ hvor det må demonstreres at dammen har en akseptabel risiko mot brudd.
- Som nevnt i Damsikkerhetsforskriften, for etablering av en beredskapsplan.

Risikovurdering kan også brukes til analyser av ulike komponenter, f.eks. vurdering av laster og lastkombinasjoner som kan gi verre lastsituasjon enn standard-lastene i Damsikkerhetsforskriften (§ 5-3), analyse av lukesvikt (og konsekvenser) ved flomberegninger (Damsikkerhetsforskriften § 5-7), vurdering av manøvreringssikkerhet, og så videre. Eksempler på enkelte 'komponent-analyser' er gitt i Vedlegg D.

Erfaring med risikovurdering av norske dammer

Energi Norge's prosjekt "Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv" (DSHP) gjennomførte risikovurderinger for fem norske dammer. Analysene bidro til økt kunnskap om sikkerhetsforhold for hver dam. For hvert tilfelle var det mulig å danne et risikobilde for dammen og sammenligne det med andre dammer i Norge og internasjonalt. Resultater fra risikovurderingen for fem norske dammer er oppsummert nedenfor.

Hva får man ut av en risikovurdering?

Risikovurderinger for dammer brukes oftest for å identifisere bruddårsaker og bruddmekanismer, evaluere risikoen (kvalitativt eller kvantitativt) og sammenligne risikonivået med internasjonale dambruddstatistikk i et risikodiagram.

Risikovurdering er meget anvendbar for å identifisere den eller de mest sårbare komponenter i en dam. Vurderingen brukes også for å illustrere effekt av ulike tiltak i en dimensjonerings- eller rehabiliteringsfase. Tilnærmingen danner et risikobilde for en dam med risikodiagrammer.

Risikobildet gir en økt forståelse av farer, konsekvenser og risiko knyttet til dambrudd som kan sammenlignes med risikobilde for andre dammer og andre konstruksjoner.

⁶ NVE (2014): Veileder til Damsikkerhetsforskriften

"Anleggenes plasseres i en av fem konsekvensklasser (KK) avhengig av konsekvensene av brudd, svikt eller feilfunksjon. Konsekvensklassene er basert på antall potensielt berørte boenheter, potensiell skade på infrastruktur og andre viktige samfunnsfunksjoner og potensiell skade på miljø og eiendom. Ved omregning til boenheter forutsettes at begrepet "boenhet" tilsvarer en bygning hvor det bor/oppholder seg 2,2 personer (gjennomsnittlig antall personer i en husholdning i Norge) i et helt døgn".

Konsekvensklasser (KK) med tilhørende kriterier

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 eiendom.
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 tilsvarende < 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

Utvalgte eksempler for fem norske dammer:

Risikovurderingen av Dam Dravladalen for Statkraft Energi AS førte til at en viktig, og til da nærmest oversett, bruddmekanisme ble identifisert og forårsaket rehabilitering. Analysene dokumenterte også effektiviteten av rehabiliteringstiltakene. Brudds sannsynligheten ble påvist lavere enn den internasjonalt rapporterte bruddfrekvensen for dammer.

Risikovurderingen for Dam Nyhellervatn for E-CO Energi viste at kontinuerlig overvåking av lekkasje reduserer betydelig sannsynligheten for at indre erosjon fører til brudd. Analysene viste at Dam Nyhellervatn er svært trygg. Vurderingen tillot å verifisere i hvilken grad dammen må oppgraderes, gitt at den ikke har visst noen tegn på uønskede hendelser på over 40 år og gitt at den mest kritiske perioden for en fyllingsdam er de første fem operative år.

Risikovurderingen for Nesjendammene for Sira Kvina kraftselskap viser en trygg dam, hvor indre erosjon er den kritiske bruddmekanismen. Den beregnede brudds sannsynligheten er lavere enn den internasjonalt rapporterte bruddfrekvensen som skyldes indre erosjon, både før og etter rehabilitering. Analysene viser også at det vil være gunstig å tillate "overtopping" på Sekundærdam 4 med langt lavere konsekvenser enn hoveddammen. Det vil si å ikke heve damtoppen like mye som for de andre dammene for å øke sikkerheten for hoveddammen.

Risikovurderingsanalysene for Dam Strandfossen for Eidsiva Vannkraft AS identifiserte de mest kritiske bruddårsakene og -mekanismene og vurderte effekt av risikoreduserende tiltak for brudd i inntakskanalen. Risikovurderingene viste en relativt høy brudds sannsynlighet for inntakskanalen sammenlignet med andre norske damanlegg. Risikoreduserende tiltak var dermed påkrevd og er blitt gjennomført.

For Dam Viddalsvatn for E-CO Energi ble risikoen forbundet med indre erosjon og fjellskred inn i magasinet vurdert. Årlige brudds sannsynlighet forårsaket av indre erosjon var lavere enn den rapporterte bruddfrekvensen for fyllingsdammer ellers i verden. Vurderingen så på forskjellige rehabiliteringstiltak og identifiserte de mest optimale. Analysene påviste at det mest omfattende rehabiliteringstiltak ikke var det mest risikoreduserende og dermed det mest kost-effektive tiltaket. Risikovurderingene er beskrevet i fem rapporter på Energi Norges websider.

NVE's 1997 veileder om risikoanalyse anvendt for vassdragsanlegg

NVE (1997) beskrev bruken av risikoanalyser⁷ (pr 1997) som følger:

- Ved prosjektering ved nybygging kan risikoanalyser benyttes for å dokumentere en alternativ løsning som ikke har bakgrunn i forskrifter/retningslinjer (dokumentasjon må i så fall vise at alternativet gir det sikkerhetsnivået som er forutsatt i kravene).
- Om dameier ser det hensiktsmessig kan risikoanalyse anvendes ved en revurdering. NVE vil vurdere å fravike krav til enkeltkomponenter dersom den totale sikkerheten ivaretas tilfredsstillende.
- Ved fornyelse av vassdragsanlegg (samlebegrep for utbedring, rehabilitering, ombygging og modernisering) blir eieren ofte stilt overfor valg mellom ulike løsningsforslag, rekkefølge for fornying av anleggsdeler eller anlegg. Risikoanalyse kan være en velegnet metode for å prioritere sikkerhetsmessig og kostnadseffektivt.
- For beredskapsplanlegging kan risikoanalyser brukes til å (1) systematisk gjennomgå alle elementer/funksjoner; (2) avdekke sterke og svake sider av teknisk, funksjonsmessig eller organisasjonsmessig art og (3) gi verdifulle og nødvendige bidrag til beredskapsarbeidet som ellers kan være vanskelige å avdekke.
- For risikoinformasjon til tredjeperson.

⁷ I 1997 brukte man "risikoanalyse" for både risikoanalyse og risikovurdering. I dagens terminologi gjøres risikovurdering ("risk assessment") med risikoanalyse som verktøy til å vurdere farer ("hazard" eller sannsynlighet for at en hendelse skjer) og konsekvenser.

NVEs 1997 veileder beskriver nytten av risikoanalyser for vassdragsanlegg. Veilederen opplyser at "risikoanalyser kan være et av elementene i dameierens system for sikkerhetsstyring". Risikoanalyse beskrives i NVE (1997) som:

"Risikoanalyse er en systematisk analyse for å besvare spørsmålene: (1) Hvilke uønskede hendelser kan inntreffe? (2) Hva er sannsynligheten for at de inntreffer? (3) Hva blir konsekvensene hvis de inntreffer?

Risikoanalyse kan gi råd om et vassdragsanlegg er sikkert nok og er kanskje særlig anvendelig når man står overfor vanskelige prioriteringsproblemer av typen: (1) Hvilke av mine vassdragsanlegg har størst behov for fornyelse? (2) Hvilke fysiske tiltak bør velges? (3) Hvilke beredskapsmessige tiltak bør velges?

En risikoanalyse gir et sett av scenarier med tilhørende sannsynligheter og konsekvenser. Fra dette settet kan ulike risikoparametere beregnes og brukes som beslutningsstøtte i det problemet man står overfor".

NVE tilføyer at:

- "Om risikoen viser seg til å være høy, kan risikoanalyser være et godt hjelpemiddel for å finne frem til effektive risikoreducerende tiltak".
- "Risikoanalyser bør oppdateres med jevne mellomrom, ved fysiske endringer på anleggene eller ved endrede forutsetninger på anlegget."

Fordeler og ulemper med bruk av risikovurdering

I likhet med de fleste internasjonale publikasjoner, anbefaler håndboken at risikovurderingen gjennomføres **i tillegg til** de konvensjonelle (deterministiske) analyser. Resultatene fra de to typer tilnærminger anses som komplementære. Det er ikke anbefalt at risikovurderinger skal alene brukes som den eneste måten å vurdere damsikkerhet.

Den standardbaserte deterministiske tilnærming er allerede godt etablert og gjennomføres som en del av risikovurderingen (f.eks. Lacasse & Høeg, 2019). Risikovurderingen bringer mer informasjon og gir derfor et mer helhetlig bilde enn deterministiske analyser alene. I så måte, er det ingen faglige ulemper med en ny tilnærming som adopterer og benytter seg av resultatene fra en tidligere tilnærming og gir mer informasjon om sikkerheten av et damanlegg. Det er allikevel mulig å liste fordeler og ulemper på et generelt grunnlag⁸.

Det trekkes ofte som en ulempe at i risikovurderinger inkluderes "ingeniørens faglige skjønn"⁹. Det er viktig å være klar over at det samme faglige skjønnnet også brukes for deterministiske analyser og vurderinger. Det er ikke mulig å gjøre komplette analyser av en dam uten "ingeniørens faglige skjønn". Vedlegg F gir utfyllende informasjon om bruken av ingeniørens faglige skjønn.

Fordeler

Fordelene med risikovurdering er, uavhengig av analysemetoden som er brukt:

- Risikovurdering er en systematisk gjennomgang av alle usikkerhetsmomenter, damanleggets komponenter og mulige bruddscenarier.
- Prosessen fremmer en debatt om usikkerhetene som gir økt innsikt og forståelse om hva som kan bidra til utilfredsstillende oppførsel av en dam. Økt innsikt i usikkerheter er en viktig

⁸ NVEs veiledning (NVE, 1997) beskrev ingen generelle ulemper med tilnærmingen. NVE gir fordeler og ulemper ved spesifikke analysemetoder: "grove" analyser (risikomatriser i håndboken), FMCA ("*failure modes, effects and criticality analysis*"), feiltre-analyse, pålitelighetsblokkdiagram (en form på feiltre-analyser, sjelden brukt i 2020), hendelsestre analyse og "sikker jobb analyse" (tilnærmet ROS analyser i håndboken).

⁹ "engineering judgment"

komponent for å oppnå robuste beslutninger. Selv en grovanalyse av risiko vil bli nyttig for å identifisere usikkerheter.

- Resultater fra risikovurdering danner risikobildet for en dam:
 - Risikovurdering gir et mer helhetlig bilde av sikkerheten enn konvensjonelle (deterministiske) analyser alene.
 - Risikobildet (oftest som et risikodiagram) kan sammenlignes med risikobildet for andre dammer i Norge og dammer internasjonalt.
 - Det eksisterer et stort internasjonalt erfaringsgrunnlag for dammer som er gått til brudd eller har hatt uønskede hendelser som kan brukes til sammenligning med egen dam.
- Risikovurderinger kan analysere dambrudd som et resultat av uvanlige kombinasjoner av vanlige hendelser og som et resultat av ekstreme hendelser.
- Risikovurderinger kan anvendes over hele dammens levetid og kan justeres ved endringer i laster eller i dammens tilstand. Risikobildet kan dermed bli dynamisk i tid.
- Risikovurderinger kan gjennomføres for både en hele dam, et system av flere dammer og/eller kun komponenter av dammen
- Mange av metodikkene er enkle. Flere (f.eks. hendelsestre-analyse, feiltre-analyse, Bowtie analyse, Vedlegg A) gir en god oversikt over mulige årsaksforhold og bruddmekanismer. Metodene gir en meget god forståelse for hvordan en dam eller et system kan feile.
- Kvalitative analyser gir vanligvis et godt grunnlag for å vurdere behov for videre analyser.
- En gang man kjenner godt til risikobegrepene og terminologien kan risikovurdering benyttes til kommunikasjon mellom ulike fagområder.

Ulemper

Ulemper er:

- En robust risikovurdering, med kvantitative vurderinger og dannelsen av et risikobilde, er mer ressurskrevende enn en deterministisk analyse alene. Med 2020 priser kan en kvantitativ analyse for en dam beløpe seg til NOK 300.000-400.000, avhengig av antall spørsmål som skal besvares og omfang av vurderingen. En kvalitativ analyse er mindre ressurskrevende.
- Noen av usikkerhetene og sannsynlighetsverdier for hendelser eller analyseparametere er vanskelig å evaluere i både kvantitative og kvalitative risikovurderinger. Ofte må det benyttes ekspertvurderinger og ingeniørens faglige skjønn. Det er viktig å bemerke derimot at de samme usikkerhetene finnes i konvensjonelle (deterministiske) analyser og at ekspertvurderinger og ingeniørens faglige skjønn også benyttes i disse analysene. Bruken av usikkerhetene er bare mer synlig i risikovurderingsprosessen, og dermed tolkes som en ulempe. Usikkerhetene fører til at resultater fra risikovurdering ikke er eksakte.
- Oppmerksomheten i risikovurderinger rettes ofte primært mot tekniske aspekter og feil. Menneskelige og organisatoriske faktorer kan bli oversett (se f.eks. dambruddstatistikk i Vedlegg D). Sannsynlighetene for menneskelige og organisatoriske feil er vanskelig å kvantifisere.
- Det er dessverre fortsatt mye forvirring blant journalister og i dagligtale om risikobegreper: Ordene 'fare' (sannsynlighet for at noe kan skje) og risiko blandes sammen i dagligtale og i nyhetene. I aviser bruker journalister og debattanter ordet 'risiko' selv om de snakker om kun 'fare'¹⁰.
- En ulempe som nevnes av enkelte i en risikovurdering er at det trengs meget god kunnskap til damanlegget som skal analyseres i en risikovurdering. Dette er ikke en ulempe, og det samme nivået av kunnskap kreves hvis man gjennomfører en konvensjonell (deterministisk) analyse.

¹⁰ I risikofaget er definisjonene av fare og risiko klare og ensbetydende (Vedlegg F og I).

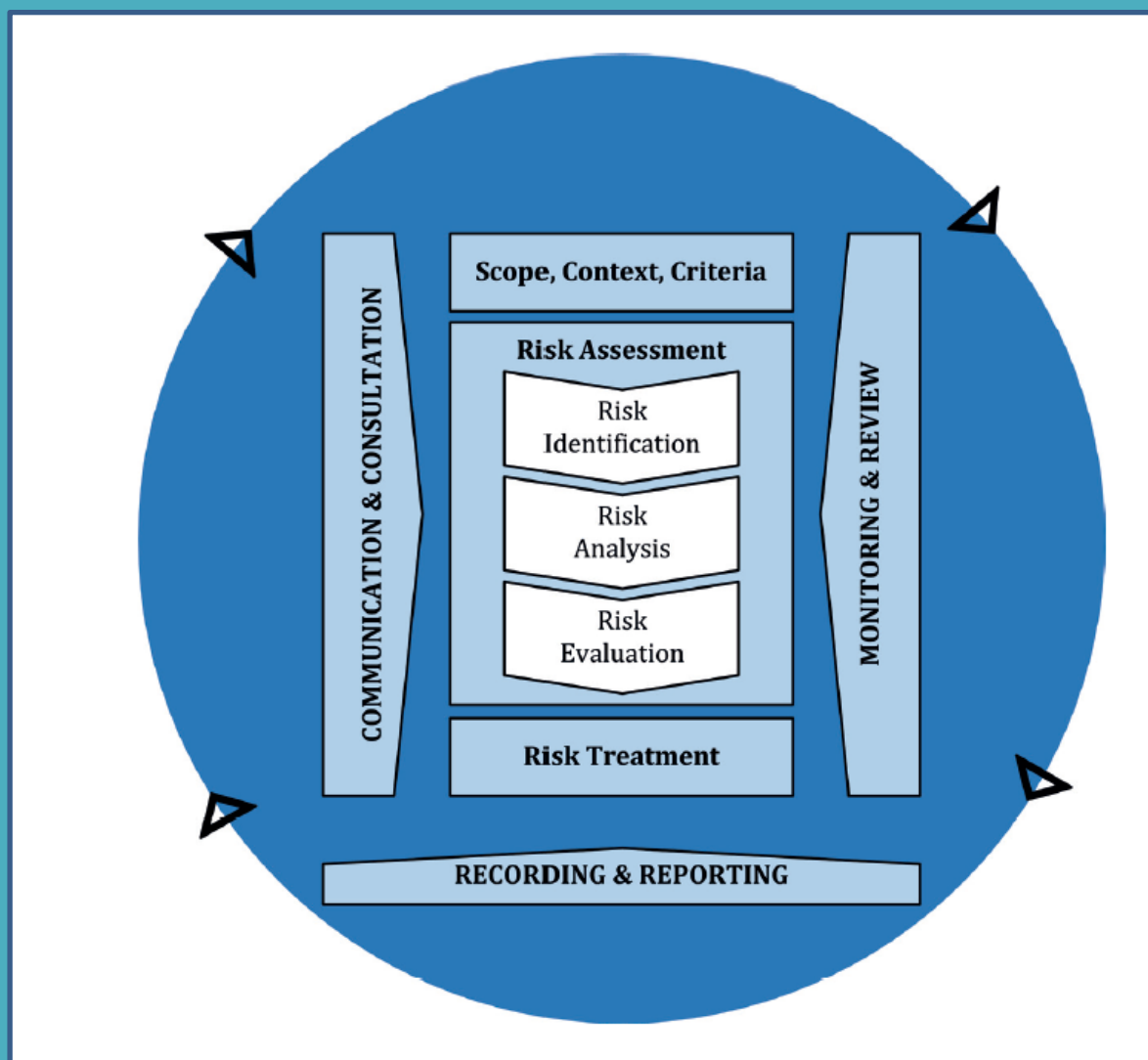
I tillegg, selv om ikke direkte en ulempe, er det viktig at risikovurderingene bør oppdateres over tid. Risikoen er ikke en statisk verdi som kan endre seg over tid, hvor både fare og konsekvenser endres med f.eks. endringer i konstruksjon, klima, demografi og miljø. Kunnskap om disse aspektene trengs for risikovurderingene. På like måte, bør også deterministiske analyser oppdateres over tid.

Avslutningsord

Uavhengig av metoden som brukes til å utvikle og implementere risikovurderingen er det viktig å unngå å bli selvtilfreds. Å ha gjennomført en risikovurdering betyr ikke at risikoen er riktig forvaltet. Som en vesentlig komponent for sikker og ansvarlig styring av damsikkerhet er det viktig at risikostyring implementeres effektivt, med integrering i et styringssystem og implementering gjennom drift, vedlikehold og overvåking, med tydelig ansvarsfordeling.

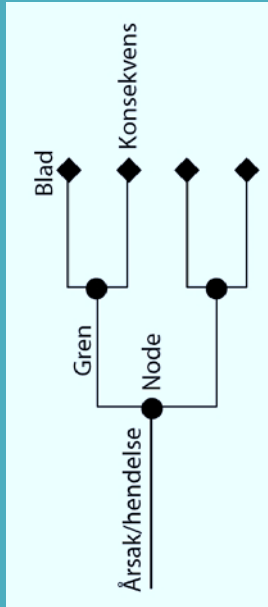
Risikoanalysen, vurderingen av risiko og risikostyring bør gjennomgås og oppdateres regelmessig gjennom en dams liv i tilfelle viktige endringer, f.eks. forlengelse av driftstid, uventede observasjoner, erfaringer under alvorlige hendelser, og prosess- og teknologiendringer.

Risikovurderingsmetodikk

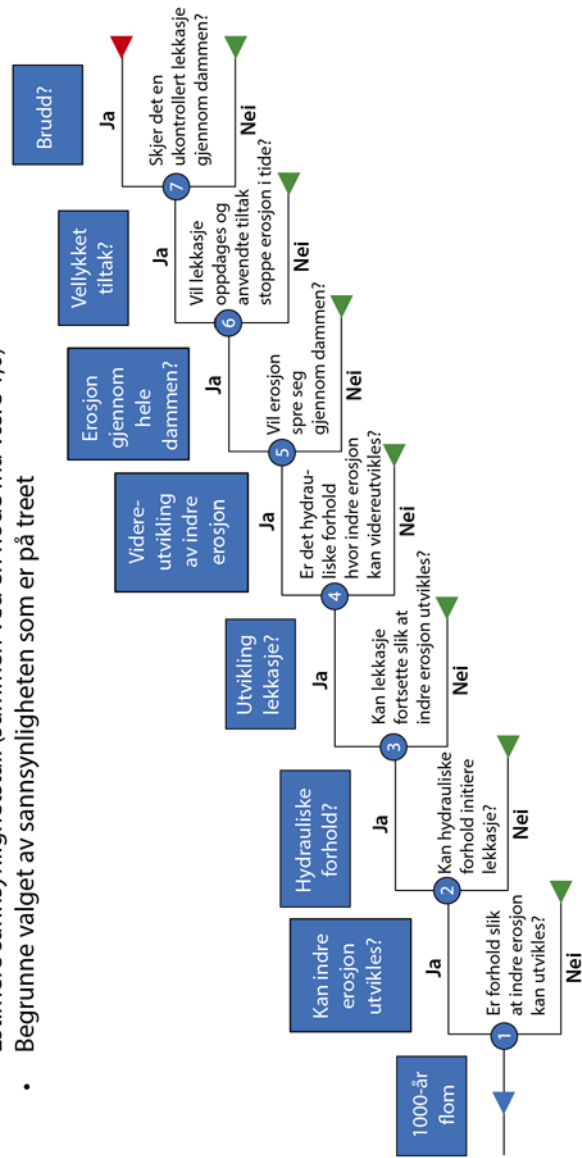


ISO's rammeverk for risikostyringsprosess (etter ISO-31000: 2018)

Hendelsestre-analyse



- Begynne med et generelt tre, justere det underveis
- Identifisere nodene, den første med en hendelse med kjent returperiode eller en årsak som kan føre til brudd/utfredsstillende oppførsel
- Identifisere neste trinn i utviklingen mot et bruddscenario, og så neste
 - Alle hendelsene skal være gjensidig utelukkende («mutually exclusive»)
- Estimere sannsynlighetstall (summen ved en node må være 1,0)
- Begrunne valget av sannsynligheten som er på treet



Risikovurderingsmetodikk

Risikovurdering og risikostyring

Risikostyring er en betegnelse for koordinerte aktiviteter for å vurdere, kontrollere og håndtere risikoen knyttet til trusler som samfunnet er omgitt av. Relevante standarder for risikovurdering og -håndtering er den internasjonale standarden ISO 31000:2018 "*Risk management - Principles and guidelines*", som er adoptert av den norske NS 5814:2018 "Krav til risikovurderinger".

Risikostyringsprosessen, f.eks. for en dam, har fire trinn:

1. Risikoidentifisering hvor potensielle trusler og farer identifiseres. Trinn 1 svarer på spørsmålet: 'Hva kan skje'?
2. Risikoanalyse hvor sannsynligheter, potensielle konsekvenser og usikkerheter vurderes (og evalueres i kvantitative analyser). Trinn 2 svarer på spørsmålet: 'Hvor sannsynlig er det at hendelsen skjer og, hvis det skjer, hva er konsekvensen(e)?'
3. Risikoevaluering hvor risikoen evalueres og sammenlignes med kriterier for akseptabel eller tolerabel risiko eller i forhold til andre risikoer. Trinn 3 svarer på spørsmålet: 'Er risikoen akseptabel?'
4. Risikohåndtering¹¹ hvor risikoreduserende tiltak vurderes og settes i gang. Trinn 4 svarer på spørsmålet: 'Hva kan gjøres for å redusere risikoen ned til et akseptabelt nivå?'

Begrepet

"risikovurdering"¹² brukes ofte som samlebegrep for Trinn 1 til 3. Risikostyring¹³ er en integrert prosess der risikovurdering og implementering av risikoreduserende tiltak foregår i kontinuerlig dialog og konsultasjon og under kontinuerlig inspeksjon og kontroll.

Risikovurdering spesifikk for dammer:

Risikoidentifisering: Omfang og detaljnivå eller kompleksitet av vurderingen velges. Potensielle skade- eller bruddmekanismer identifiseres, samt tilhørende konsekvensene hvis mekanismene skulle inntre. Konsekvensene kan være knyttet til liv og helse, miljø, eiendom, samfunnet og/eller økonomiske verdier.

Risikoanalyse: Risikonivået estimeres kvantitativt eller kvalitativt ved å vurdere faren (sannsynlighet for hendelser) og konsekvenser for alle vesentlige skade- eller bruddmekanismer. Resultatene presenteres i et risikodiagram.

Risikoevaluering: Betydningen av den beregnede sannsynligheten og risikoen vurderes i forhold til tidligere erfaring eller skade- og bruddstatistikk for lignende anlegg og dammer.

Risiko = Fare · Konsekvens

Risiko er produktet av fare og konsekvens, begge med tilhørende usikkerhet(er). Risiko beregnes (eller estimeres) i en risikoanalyse hvor det spesifiseres farer og tilhørende konsekvenser. Risikovurdering kan gjøres kvalitativt, semi-kvantitativt (rangering av risikoen) og kvantitativt (tallfesting av risikoen).

Risiko, $R = \text{Fare} \cdot \text{konsekvens}$:

$$R = F \cdot K$$

F Fare = sannsynlighet for en hendelse innen en definert tidsperiode

K Konsekvens (omkomne, økonomiske tap, miljøødeleggelse,)

Fare og risiko

Fare uttrykkes vanligvis som en sannsynlighet over en tidsperiode (hvor ofte en hendelse kan skje). Fare identifiseres med følgende spørsmål:

¹¹ "risk treatment" eller "risk mitigation"

¹² "risk assessment"

¹³ "risk management"

- Hvilke forhold kan lede til uønskede hendelser?
- Hvilke aspekter, f.eks. ved geologi, dimensjonering eller konstruksjon, kan anses som en svakhet?
- Hvilke undersøkelser (laboratorium, felt, numerisk) er tilgjengelige eller bør gjøres?
- Hvilke indikasjoner kan undersøkelsene, sammen med overvåkingsdata, gi om viktige egenskaper som kan ligge skjult i dammen eller fundamentet?
- Er tilgjengelig informasjon konsistent og kan den valideres?

I fareidentifiseringsprosessen beskrives potensielle brudd- og skademekanismer som kan resultere i et ukontrollert utslipp av oppdemmet vann. Vurderingen av potensiell bruddårsak og skade- og bruddmekanismer er blant de viktigste skrittene i gjennomføringen av en risikovurdering (Vedlegg B og C). Identifiseringen krever en detaljert gjennomgang og vurdering av dammens motstandsevne og vurdering av frekvenser av ytre påkjenninger (som flom og jordskjelv). Synspunkter og erfaringer fra personale med førstehåndsinformasjon om damanlegget er essensielle for analysen. Andre viktige faktorer er, f.eks., dammens alder (for en fyllingsdam er de første fem år etter første fylling de mest kritiske, som vist i dambruddstatistikk i Vedlegg D).

Målet med en analyse av brudd- og skademekanismer er å:

- identifisere spesifikke alle mulige brudd- og skademekanismer;
- beskrive alle potensielle brudd/skademekanismer, med initierende hendelse og progressiv utvikling av mekanismen til et eventuelt ukontrollert utslipp fra magasinet;
- gi en generell beskrivelse av omfanget av bruddet, inkludert faktorer som gjør bruddmekanismen og skadene mer eller mindre sannsynlige.

Faren knyttet til samsikkerhet i en risikovurdering uttrykkes ofte som en årlig dambruddsannsynlighet.

Sannsynligheter:

- **Fare:** sannsynlighet for at en hendelse skjer, f.eks. en 1000-års flom har en årlig sannsynlighet på 0,001 eller 10^{-3} .
- **Bruddsannsynlighet:** Sannsynlighet for at et brudd er forårsaket under et hendelsesforløp.
- **Total bruddsannsynlighet:** Summen av sannsynligheter for at et brudd kan bli forårsaket under hvert enkelt hendelsesforløp.

På samme måte kan faktorene som påvirker alvorlighetsgraden av konsekvensene identifiseres. Samfunnsmessig risiko uttrykkes ved produktet av årlig bruddsannsynlighet for en hendelse og konsekvenser av hendelsene.

Vanligvis defineres det to risikosoner i et kvantitativt risikodiagram: 'akseptabel risiko' og 'uakseptabel risiko'. Noen ganger kan det brukes en tredje sone mellom de to første, 'tolerabel risiko'. I et kvalitativt risikodiagram, brukes det kun 'lav', 'middels' og 'høy' risikosoner.

Akseptabel og uakseptabel risiko:

- Akseptabel risiko ("*Broadly acceptable risk*")
- Uakseptabel risiko ("*Unacceptable risk*")

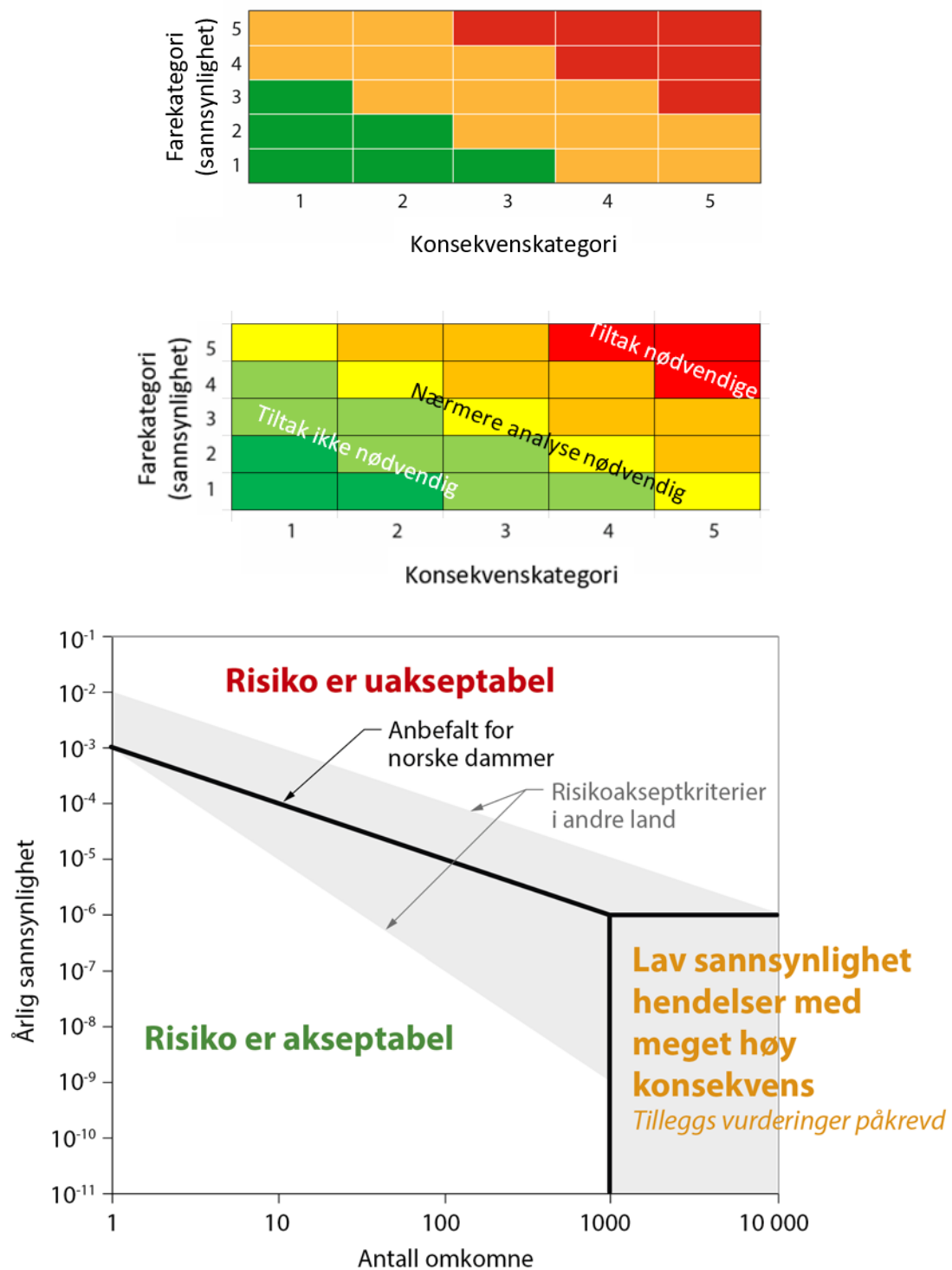
Inn i mellom, kan det defineres en 'tolerabel risiko'-sone ("*Tolerable risk*"): Uttrykket betyr at risikoen må styres på en tilfredsstillende måte med analyser, oppfølging og risikoreduseringstiltak så langt som praktisk mulig (på engelsk, ALARP-prinsippet, "*As Low As Reasonably Practicable*").

Risikobilde i et risikodiagram

Risiko uttrykkes oftest i et "risikodiagram" som viser årlig bruddsannsynlighet og konsekvenser. Kvalitativt uttrykkes risiko med risikomatriser som også er en form for risikodiagram. Figuren nedenfor viser to eksempler på risikomatriser og ett kvantitativt risikodiagram. Bruken av risikodiagram for å evaluere risiko startet i 1990-årene. Risikodiagrammer er mye anvendt internasjonalt.

Kvantitativt beskrives risiko med såkalte *F-N* kurver, der *F* er den kumulative frekvensen av hendelser uttrykt som en årlig sannsynlighet og *N* beskriver konsekvensene av hendelsene. Risikodiagrammet

fremstiller f.eks. dambruddfrekvensen som forårsaker, f.eks., minst N dødsfall. Begge aksene bruker logaritmisk skala. I det kvantitative diagrammet defineres soner med akseptabel og uakseptabel risiko.



Risikomatriser med lav (grønn), middels (oransje) og høy (rød) risikosoner og kvantitativt risikodiagram (F-N diagram) der grå sone omfatter anbefalt risikoakseptkriterier i andre land, og med anbefalt grense mellom akseptabel og uakseptabel risiko for norske dammer (NGI 2018 - DSHP prosjektet; Lacasse and Høeg 2019).

Risikobildet for en dam dannes ved å sammenligne beregnende verdier av fare (årlig sannsynlighet) og konsekvenser for dammen med akseptabel og uakseptabel risiko sonene i risikodiagrammet og/eller med verdiene for andre dammer. Risikodiagrammet er oftest basert på historiske data og brukes for å

illustrere og sammenligne risikoverdier som følge av ulike ulykkeshendelser. Horisontalskalaen kan angis i andre verdier som, f.eks., skadestnader, antall stengte veier, mengde av forurensning, etc. Risikoakseptkriterier opererer vanligvis ikke med et skarpt skille mellom akseptabel og uakseptabel risiko. Eksempler på retningslinjer for øvre grense av akseptabel risiko for dammer og andre anlegg finnes i Vedlegg A, avsnitt A4.

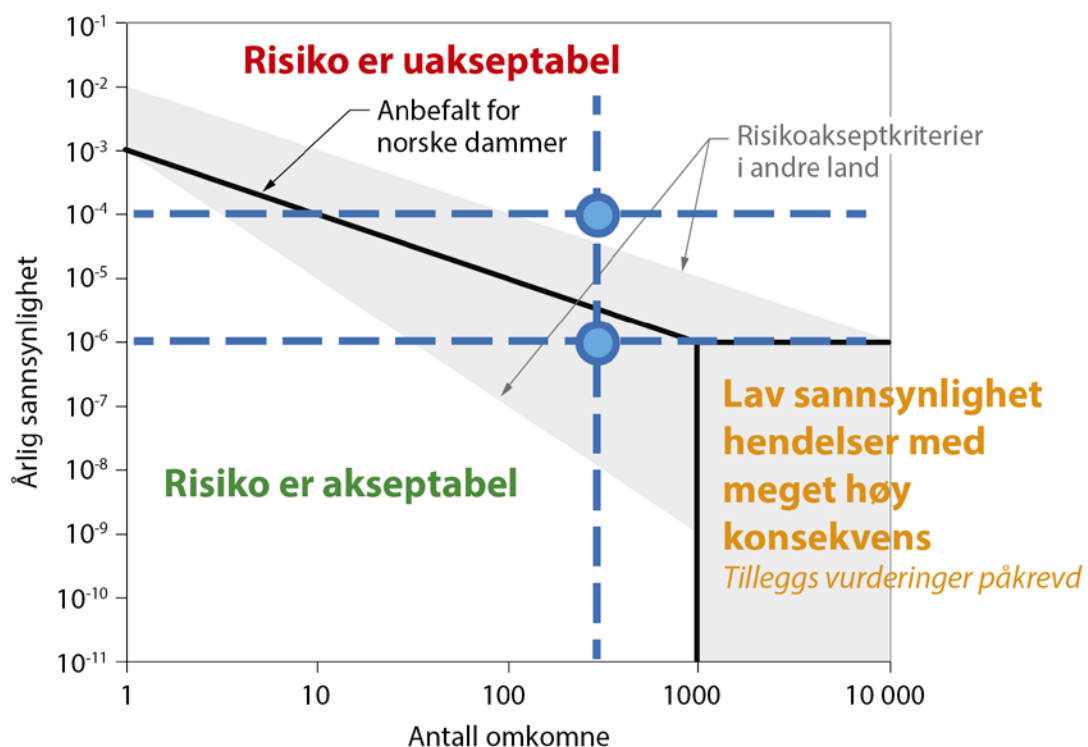
Selv om det er forskjeller er anbefalingene fra forskjellige land (grå sone i figuren ovenfor), er grensen for akseptabel risiko nokså sammenlignbare for ett og 10 dødsfall: For ett dødsfall er akseptable årlig dambrudds sannsynlighet mellom 0.01 og 0.001 (10^{-2} og 10^{-3}). For 10 dødsfall er årlig akseptabel risiko, i snitt, 0.0001 (10^{-4}). For 100 dødsfall er akseptabel risiko mellom 0.0001 og 0.000001 (10^{-4} og 10^{-7}) per år. NGI (2018) anbefalte at det opprettes veiledende retningslinjer for akseptabel og uakseptabel risiko for dammer i Norge som er lik den som benyttes for dammer i USA, Canada og Australia (Vedlegg A og J) og for anlagte skjæringer i Hong Kong.

Betydningen og nytten av risikodiagrammet:

Risikodiagrammet tillater å ta hensyn til både konsekvenser og sannsynlighet for at en dam kan gå til brudd, og usikkerhetene i både fare og konsekvenser.

Begrensningen med dagens regelverk hvor kun konsekvenser brukes for å klassifisere dammer og identifisere behov for rehabilitering (KK4 til KK0) er at den ikke danner et komplett risikobilde for en dam. For eksempel:

To forskjellige dammer klassifisert i KK4, og som har samme konsekvenser men forskjellige årlige brudds sannsynligheter, f.eks. på henholdsvis 10^{-4} og 10^{-6} (de to blå sirklene i figuren nedenfor), danner meget forskjellige risikobilder: Den ene faller i en ikke akseptabel risikosone, den andre faller i en akseptabel risikosone. Forskjellen i årlig brudds sannsynlighet skyldes forskjeller i usikkerheter i parameterne, forhold, analysemetode, etc. Eksemplet viser at, til tross for at de to dammene er i samme konsekvensklasse, er det stor forskjell i sannsynlighet for et brudd og behovet for rehabilitering.



Betydningen av risikodiagrammet

Fare uttrykt som en årlig sannsynlighet betyr at det er en sannsynlighet for at faren kan inntre i løpet av et år. Hvis faren har en årlig sannsynlighet på 10^{-4} ($=1 \cdot 10^{-4}$ pr år) betyr det at hendelsen kan skje 0,0001 gang pr år. For en dam med levetid på 100 år er sannsynligheten for at hendelsen kan skje over hele dammens levetid på 0,01.

Eksponentielle tall:

Vedlegg E forklarer betydningen av eksponentielle tall og meningen av sannsynlighet for, f.eks. daglige aktiviteter.

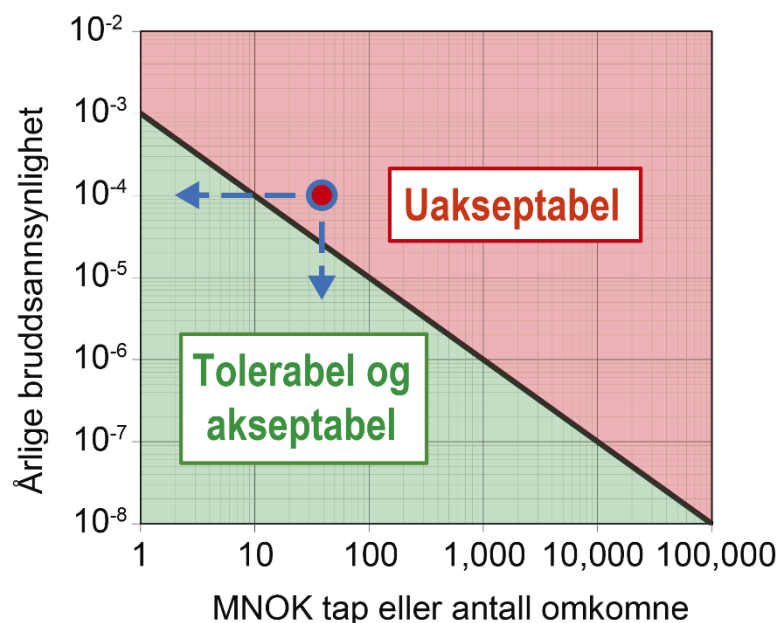
Risikoevaluering og risikohåndtering

Risikomatriser og risikodiagrammer gir risikobildet for en dam. Den kvantitative risikobeskrivelsen tallfester:

- Sannsynligheten for dambrudd eller annen negativ hendelse forbundet med dammen i form av en årlig sannsynlighet.
- Eksponert befolkning eller potensielt antall dødsfall eller økonomiske tap som følge av dambrudd (f.eks. nedstrømskader, rehabiliteringskostnader, tap av driftsinntekter, miljøskader).

Risikoen, som er et produkt av sannsynlighet og konsekvens, har benevnelse 'tapte liv pr år' eller 'KNOK eller MNOK pr år'.

Risikoreducerende tiltak kan derfra vurderes og avgjøres. Figuren nedenfor viser et eksempel der den beregnede risikoen sammenlignes med akseptabel risiko sone for dammer. Den beregnede risikoen er det røde punktet. Risikoen evalueres i forhold til grensen for akseptabel risiko, og risikoen kan håndteres ved å enten redusere konsekvensene, f.eks. ved varsling, eller redusere bruddsannsynligheten ved å forsterke dammen.



Analysemetodikk

Rammeverk for risikovurdering

Alle analysemetoder bruker en form av rammeverket på neste side, med aksent på én eller flere av de aspektene som er listet. I rammeverket tilsvarer kolonnen til venstre etappene i ISO (2019) for risikovurdering og risikostyring

Rammeverk for risikovurdering

Risiko- Vurdering	Initierende hendelse	Systemrespons	Utfall	Eksponering	Konsekvenser
Risiko- identifisering	Jordskjelv, Flom Indre erosjon Stabilitet/kapasitet	Overtopping Deformasjoner Ustabilitet	Brudd/ ikke brudd	Tid på dagen Sesong Varslingstid	Liv og helse Økonomi Materielle tap, Samfunns- konsekvenser
Risiko Estimering	Laster, L*	Respons R*, gitt L	Utfall U, gitt L og R	Eksponering, gitt L, R og U	Alvorlighetsgrad på tap
Risiko- redusering (håndtering)	Oppstrøms forhold Endringer Forbedringer	Strukturelle endringer Tilsyn Monitoring Operative restriksjoner	Strukturelle endringer	Varslings- systemer Utprøving Tidligere flom Beredskap	Flytting Areal planlegging
	Alternativer for risikoredusering				
Risiko evaluering					(hvis nei, ny iterasjon)

* Oftest en probabilistisk modell

Analyse av dambruddsannsynlighet

Det er ulike metoder for å vurdere dambruddsannsynlighet. Vedlegg A gir en liste over de mest kurante metodene. Metodene er delt i to kategorier: (1) kvalitative og semi-kvantitative metoder og (2) kvantitative metoder. Med tabellen i Vedlegg A kan man velge analysetypen som egner seg best til hver problemsstilling. Vanskelighetsgrad (subjektivt vurdert) er også gitt i tabellen. Ofte kombineres to eller flere analyser kombineres i en risikovurdering.

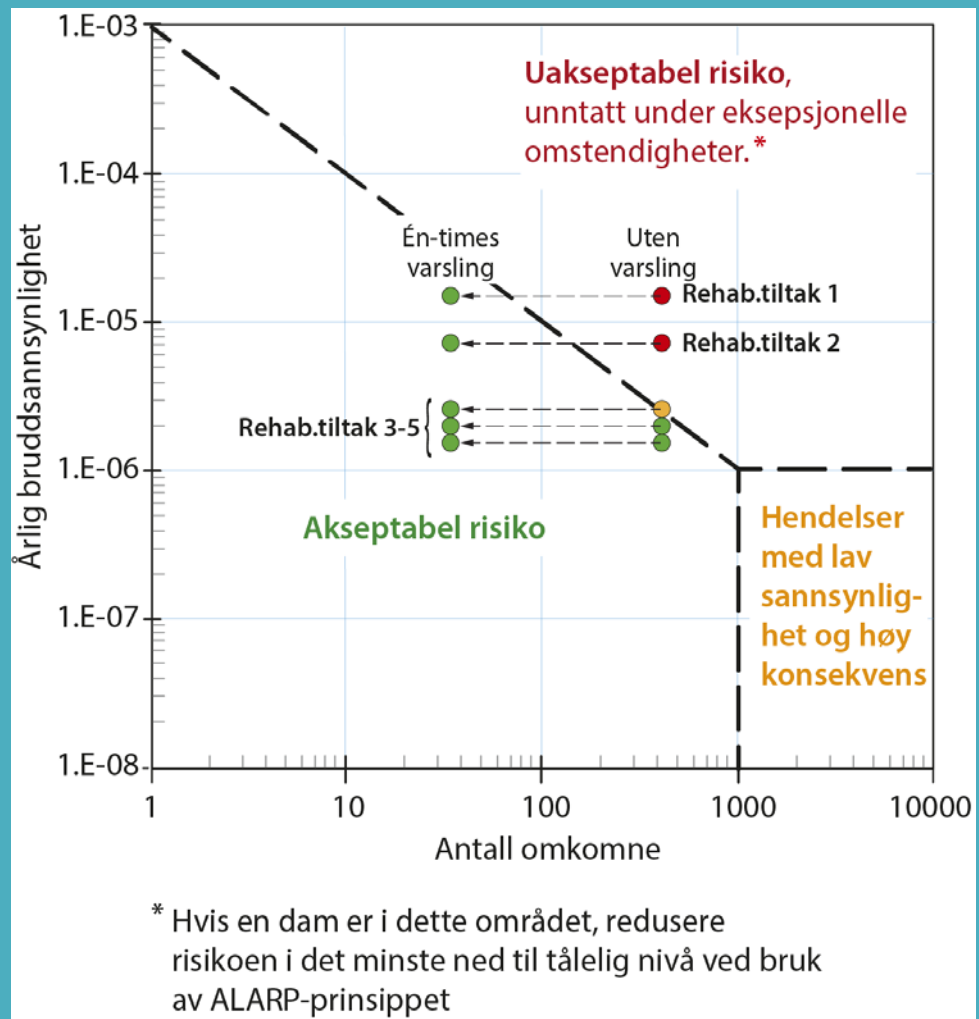
Vedlegg A gir også eksempler på analyse av konsekvenser.

Eksempler på risikovurdering av damsikkerhet



Dam Viddalsvatn i Låvisdalen i Aurland kommune, bygget 1970-197 (Foto JHafslund Eco)

Eksempel på risikobilde for en dam



Risikobilde med effekt av rehabiliteringstiltak og varsling

Eksempler på risikovurdering for dammer

Tre eksempler er gitt:

- 1) Vurdering av dambrudds sannsynlighet med hendelsestre-analyse;
- 2) Analyse av mulig feil i flomlukeregulering med feiltre-analyse;
- 3) Vurdering av skråningsstabilitet med Monte-Carlo analyse.

Analysemetodene beskrives kort før et kvantitativt eksempel illustrerer metoden.

Det er flere eksempler i Vedlegg A, samt en kort beskrivelse av metodene som er i bruk.

KVALITATIVE OG SEMI-KVANTITATIVE METODER

Risikomatriser

ROS-analyser

BowTie analyse

Risiko Register

"Maturity matrix" (modenhetsmatrise)

"Failure mode analysis", FMEA og varianter FMECA og PFMA

KVANTITATIVE METODER

BN, Bayesisk Nettverk ("Bayesian Network")

RSM, "Response Surface Method"

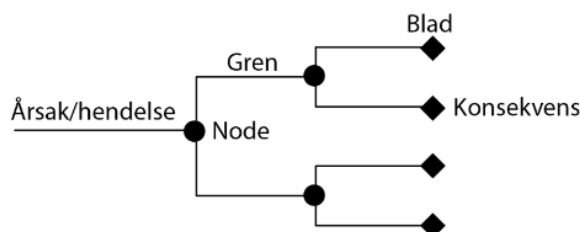
FORM, SORM, "First and Second Order Reliability Methods"

"Stress testing"

Eksempel 1: Hendelsestre-analyse for å vurdere dambrudds sannsynlighet

Beskrivelse av hendelsestre-analysen

Det overordnede målet med en hendelsestre-analyse, ofte betegnet ETA¹⁴, er å bestemme sannsynligheten for skade og brudd på en dam som et resultat av en innledende hendelse.



Hendelsestre-analysen utforsker utviklingen fra én innledende hendelse til f.eks dambrudd og konsekvensene av hendelsen. Den initierende og hver påfølgende hendelse skaper en rekke nye hendelser i et forløp mot et mulig dambrudd. Den totale sannsynligheten for forekomst langs en gren kan beregnes fra produktet av sannsynlighetene langs grenen. Hendelsestre-analyse deler opp et problem på en visuell måte:

- Analysen tar utgangspunkt i ytre hendelser som kan påvirke systemet og kartlegger alle mulige videre hendelsesforløp.
- Analysen jobber forover i hendelsesforløpet: "Hva kan skje hvis?"
- Analysen kan benyttes for både fare- og konsekvensanalyse.

ETA er et kraftig verktøy som hjelper å identifisere alle farer og konsekvenser av et system som

¹⁴ For eksempel har ETA ("Event tree analysis") funnet applikasjoner innen kjernekraft- og gruveindustri, romfartøy og kjemiske anlegg.

sannsynligvis vil oppstå etter en innledende hendelse. Tilnærmingen kan brukes når som helst i løpet av en initierende hendelse. Med denne 'fremover-logiske' prosessen er ETA et verktøy som kan bidra til å forhindre at negative utfall oppstår, ved å gi en vurdering av sannsynlighet for at det skjer.

Gjennomføring av analyse

ETA bruker en åtte-trinn prosedyre (Vick 2002; Høeg 1996):

- 1) Befaring og inspeksjon av dammen for å bli kjent med dammen og grunnforholdene.
- 2) Oversikt over overvåkingsresultater, hendelser, og andre observasjoner.
- 3) Iddugnad: Oversikt over alle mulige utløsningsårsaker og bruddmekanismer, og prioritering blant disse for videre analyse¹⁵.
- 4) Enighet om beskrivelse av usikkerheter og sannsynligheter.
- 5) Bygging av hendelsestrær.
- 6) Estimat av sannsynligheter påfølgende utvikling mot eventuelt brudd.
- 7) Evaluering av resultater.
- 8) Iterasjon.

Vurderingen er ofte gjort ved å bringe sammen en arbeidsgruppe ('workshop') med personer som kjenner godt til dammen og andre dam-eksperter. Trinn 3 er det viktigste trinnet i analysen. Under prioriteringen velges bort mekanismer og utløsende faktorer som ikke er mulige, f.eks. meteoritter som treffer dammen i en flomperiode eller under et jordskjelv.

Ekspertvurdering:

"The collective judgment of experts, structured within a process of debate, can yield as good an assessment of probabilities as mathematical analyses" (Vick, 2002).

Beskrivelse av usikkerheter og sannsynligheter

Hendelsestre-analysen kan gjennomføres med et sannsynlighetsestimat angitt ved et enkelt tall eller som et tallområde¹⁶ for å representere usikkerheten i vurderte sannsynligheter. Med et tall-område som estimat vil analysen gi et beste estimat og en nedre og en øvre grense for bruddsannsynlighet. Tallverdiene i de to tabellene nedenfor brukes oftest i Norge for å beskrive usikkerheten i hendelsene. Tabellene gir et beste estimat av sannsynlighetene (Høeg, 1996; Vick, 2002) og en verbal beskrivelse.¹⁷

Bygging av hendelsestrær

Figuren nedenfor illustrerer skjematisk en hendelsestre-analyse. Treet bygges gradvis med noder og grener. Den første noden er vanligvis or en hendelse med kjent returperiode eller en årsak som kan føre til brudd eller utilfredsstillende oppførsel. Neste trinn i utviklingen for dammen identifiseres, og så neste deretter. Hendelsene ved en node skal være gjensidig utelukkende ("*mutually exclusive*"). På hver av grenene settes inn en sannsynlighet. Summen av sannsynlighetene for en node må være 1,0. Valget av sannsynligheten skal begrunnes, for eksempel i en forklaringstabell. I figuren vurderes konsekvenser av en 1000-år flom. Analysen ser på geologien, topografien, og hydrauliske forhold, utvikling av eventuell lekkasje og indre erosjon, videreutvikling av lekkasje, effekt av rehabiliteringstiltak, og utvikling til et brudd. Det er flere måter å bygge et hendelsestre. Workshopdeltagerne, ofte med en tilrettelegger ("*fasilitator*"), velger hvilke hendelser og etapper som skal vurderes

¹⁵ "failure mode screening",

¹⁶ IPCC (2012) foreslo at et tall-område bør brukes for å beskrive sannsynligheter i stedet for enkelte estimater for å kunne beskrive en usikkerhet i vurderingen. Tall-områdene kan senere brukes til å etablere fordelingen av sannsynlighetene ved å bruke Monte Carlo analyser.

¹⁷ Hvert land har egne tabeller for å beskrive sannsynligheter. Workshopdeltagere bør enes om tallverdiene.

Estimat av sannsynligheter med enkelte tall for hendelsestre-analyse

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

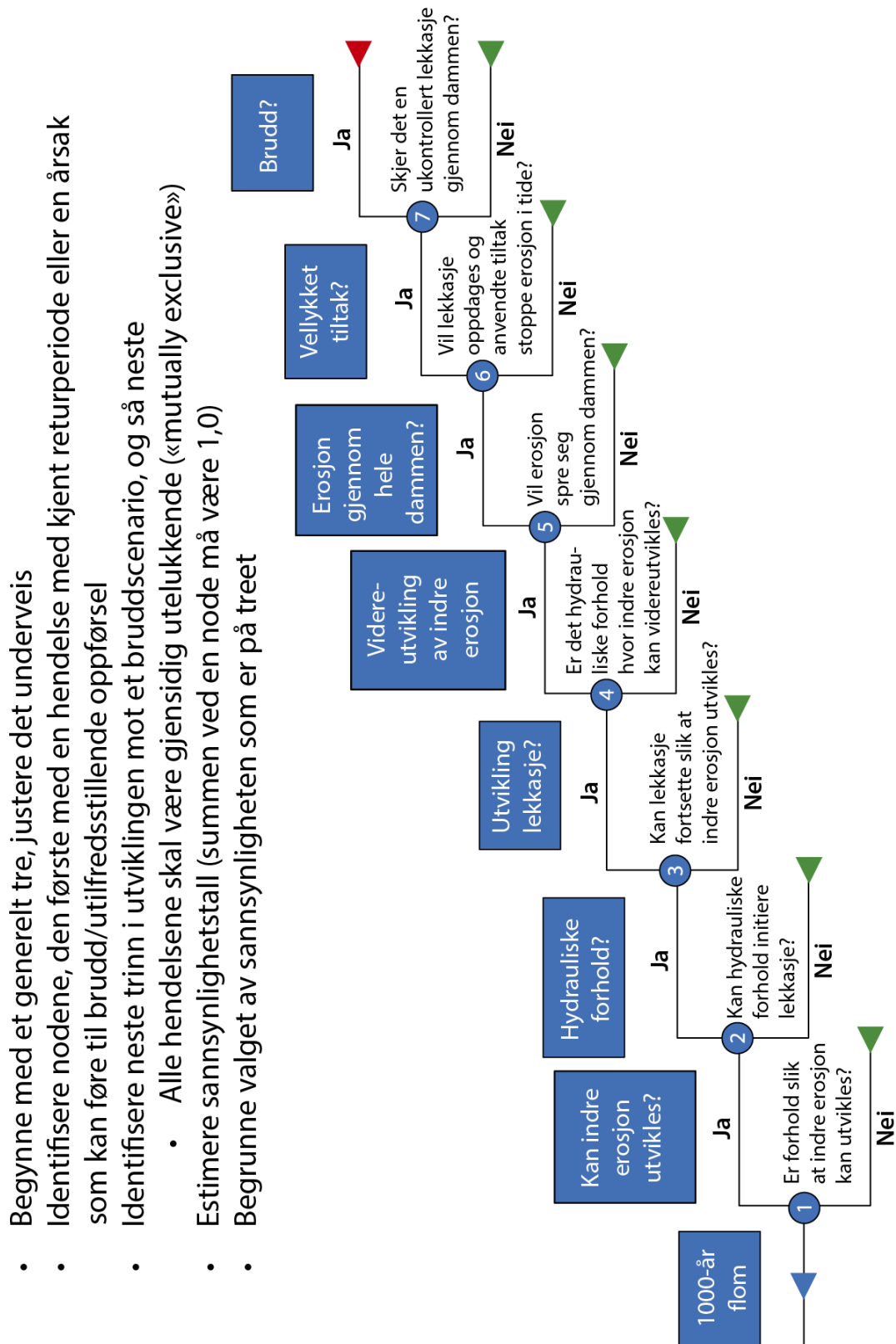
Estimat av sannsynligheter med område-tall for hendelsestre-analyse

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

Estimat av sannsynligheter for hver hendelse og hve mulig bruddmekanisme

For hver node estimeres sannsynligheten for hendelsene basert på følgende:

- Statistikk fra observasjoner, modellforsøk, laboratorie- eller *in situ* forsøk, dataanalyse, osv.
- Beregninger for fysiske prosesser, f.eks. skråningsstabilitet for en fyllingsdam eller velting for en platedam.
- Faglig skjønn.
- Tidligere erfaring med tilsvarende anlegg og ekspertenes erfaring, osv.



Skjematisk hendelsestre-analyse: metode og sekvens

Beregning av bruddsannsynlighet

Figuren på neste side gir et eksempel på et hendelsestre samt en forklaringstabell for en fyllingsdam. Hendelsestreet ser på sannsynligheter for lekkasje og erosjon gjennom kjerne og bergfundamentet. Hver hendelse har en estimert sannsynlighet.

- Tabellen over treet viser etappene i analysen.
- Sannsynlighetene ved hver node gis en begrunnelse i tabellen under treet.

Valgte sannsynlighetene skal begrunnes:

Sannsynlighetsestimater skal baseres seg på en påviselig resonnementskjede og ikke på spekulasjon. Konsensus oppnås gjennom diskusjon ved bruk av standard usikkerhetsbeskrivelser.

Bruddsannsynlighet for en gren i et hendelsestre er produktet av sannsynlighetene for samtlige uavhengige hendelser langs grenen. Hendelseskjeder som resulterer i dambrudd er markert med svart trekant i figuren, mens hendelseskjeder som ikke leder til dambrudd er markert med åpen sirkel med ordet STOP.

Dambruddsannsynligheten knyttet til en initial hendelse i et hendelsestre er summen av sannsynlighetene for alle grener som resulterer i dambrudd. I alle analyser er det den årlige sannsynligheten for brudd som er beregnet. Den totale bruddsannsynligheten er summen av sannsynlighetene for samtlige mekanismer og årsaker som fører til brudd i alle hendelsestrærne. Det er derfor viktig at sannsynlighetene er sammenlignbare slik at de kan summeres, f.eks. en sannsynlighet pr år eller pr 100 år.

Risikobilde for en dam

Eksemplet er hentet fra 2016-analysene i DSHP prosjektet for Dam Dravladalen, en 29-m høy steinfyllingsdam. Tabellen nedenfor gir en oversikt over analysene og bruddsannsynlighet for hver analyse. Analysene er gjennomført med beste estimat av sannsynlighetsverdier.

Oversikt over hendelsestre-analyser for Dam Dravladalen

Hendelse			Årlig sannsynlighet for brudd, P_f årlig
Indre erosjon forårsaket av lekkasje			$4.7 \cdot 10^{-6}$ / år
Flom	{	Vinterhalvåret Is og hardpakket snø blokkerer overløpet	$2.4 \cdot 10^{-7}$ / år
		Sommerhalvåret Bresmelting renner inn i magasinet	<i>For $Q > Q_{10.000}$: $5.4 \cdot 10^{-6}$ / år *</i> <i>For $Q \leq Q_{10.000}$: $3.7 \cdot 10^{-7}$ / år</i>
Jordskjelv			$9.0 \cdot 10^{-8}$ / år
Sabotasje/terror			$2 \cdot 10^{-7}$ / år

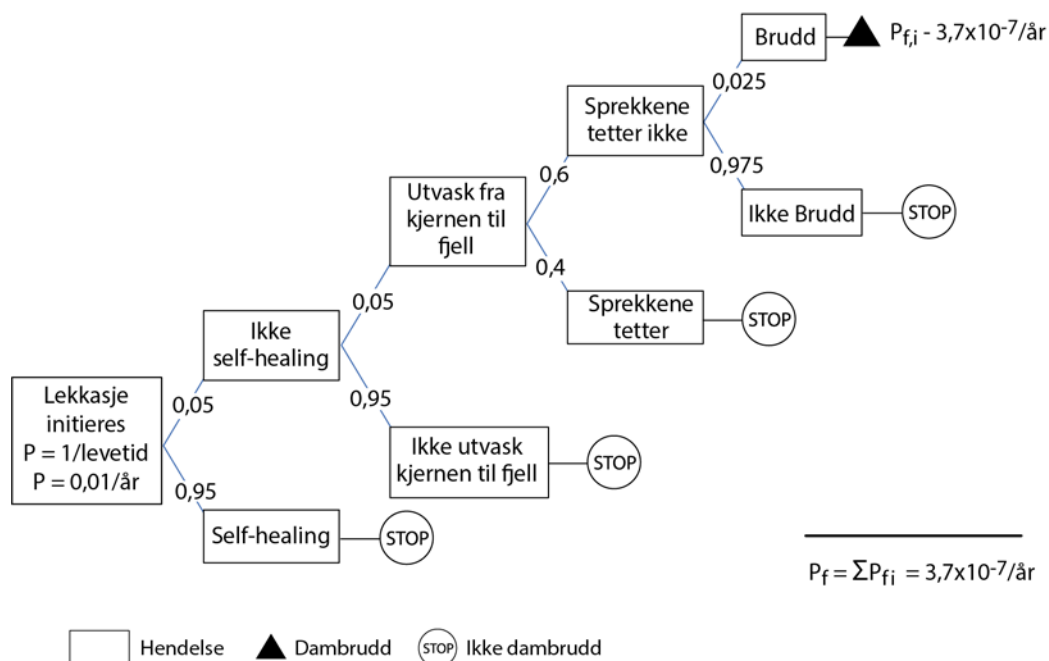
* Dominert av $Q > Q_{10.000}$ forgrening.

Hendelsene med høyeste sannsynlighet for brudd, 'flom på sommerhalvåret med bresmelting som renner inn i magasinet' og 'indre erosjon', har årlig bruddsannsynlighet på ca. $5 \cdot 10^{-6}$. Tabell nedenfor gir den totale årlige bruddsannsynlighet for Dam Dravladalen: Sammenlagt årlig sannsynlighet for brudd av geotekniske og naturlige årsaker er estimert til 10^{-5} eller én gang pr 100.000 år (svært lavt).

Sammenlagt årlig bruddsannsynlighet med beste estimat for sannsynligheter, geotekniske og naturlige årsaker

Hendelse			Årlig sanns. for brudd, P_f årlig
Indre erosjon forårsaket av lekkasje			$4.7 \cdot 10^{-6} / \text{år}$
Flom	{	Vinterhalvåret	$2.4 \cdot 10^{-7} / \text{år}$
		Is og hardpakket snø som blokkerer overløpet	
		Sommerhalvåret	$5.4 \cdot 10^{-6} / \text{år}$
		Bresmelting som renner inn i magasinet	
Jordskjelv			$9.0 \cdot 10^{-8} / \text{år}$
Sammenlagt bruddsannsynlighet, geotekniske og naturlige årsaker			$1.0 \cdot 10^{-5} / \text{år}$

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

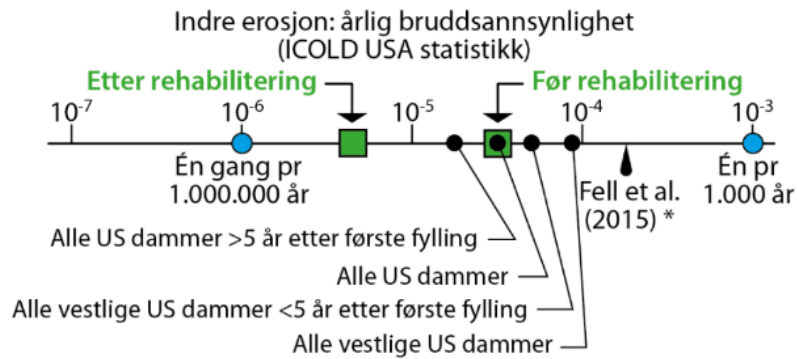


Hendelse	Forklaring	Sannsynlighet
A Lekkasje gjennom bergfundament	Lekkasje initieres i bergfundament som kan være farlig for erosjon i kjernen. Dette har ikke skjedd i de første 40 år; ikke trolig at det skal bli verre med tid; det være heller bedre. Levetid ansett som 100-150 år.	$P = 1\%$ over dammens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

*Eksempel på et hendelsestre med forklaringstabell for sannsynlighetsdiskusjonene
Analyse av lekkasje og erosjon gjennom kjerne og bergfundament for en fyllingsdam.*

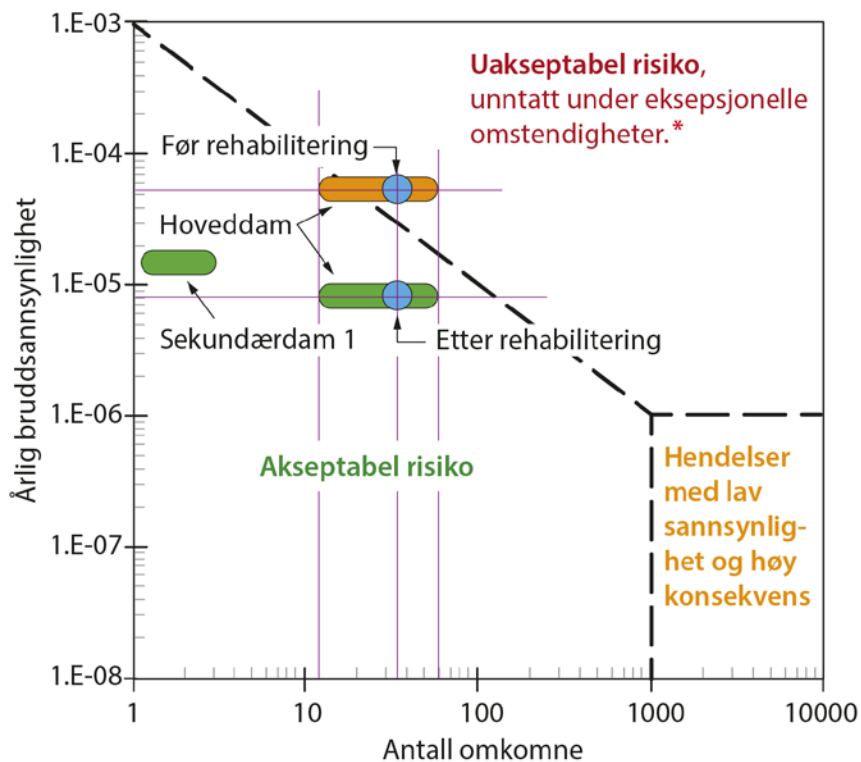
Risikobilde

Resultatene fra risikovurderingsanalyser kan sammenlignes med internasjonale statistiske verdier. I tillegg kan grafer med risikobilde i et risikodiagram illustrere effekter av f.eks. rehabilitering, varsling osv og kan sammenligne risiko for flere dammer, som vist nedenfor:



* Fells statistikk tall er fra en database med dammer fra hele verden

Sammenligning av bruddsannsynlighet før og etter rehabilitering med ICOLD og internasjonal statistikk for indre erosjon



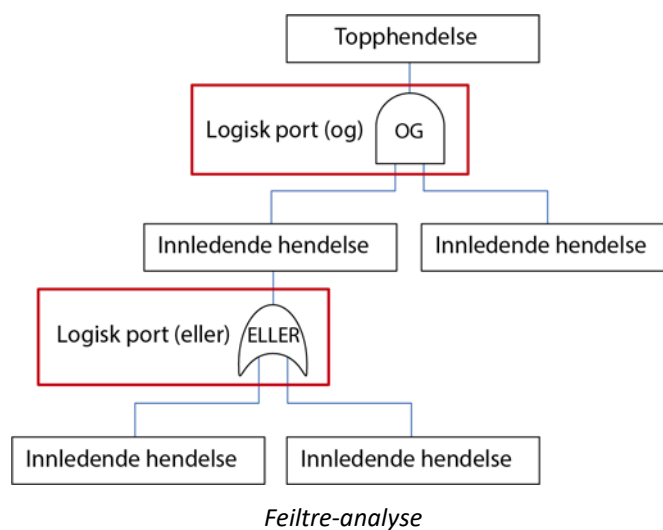
* Hvis en dam er i dette området, redusere risikoen i det minste ned til tålelig nivå ved bruk av ALARP-prinsippet

Risikobilde for to dammer før og etter rehabilitering (oransje og grønne ellipser). Blå sirkelen angir beste estimat.

Eksempel 2: Feiltre-analyse av en dam komponent

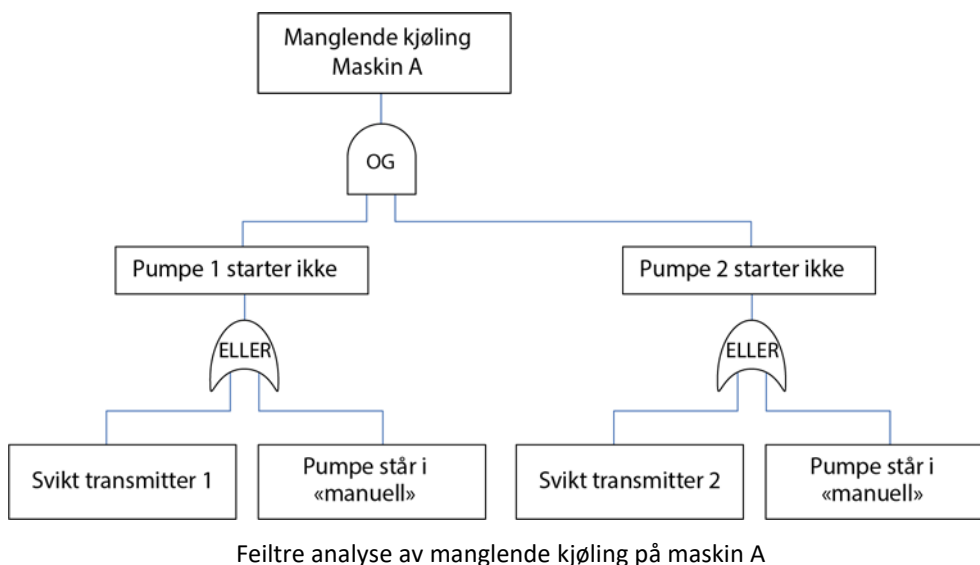
Beskrivelse av feiltre-analysen

Feiltre-analyse, eller FTA¹⁸, er en enkel og allsidig metode som benyttes til pålitelighetsanalyse i design eller driftsfasen, i en beslutningsanalyse og for feilsøking i et system. Feiltre-analyse kan finne årsak og sannsynlighet eller frekvens til en uønsket hendelse og analysere påliteligheten til ulike sikkerhetsbarrierer. Analysen kan være kvalitativ, semi-kvantitativ eller kvantitativ. Analysen illustrerer sammenhengen mellom en uønsket hendelse og årsakene til denne hendelsen. Analysen kan gi svar på (1) hvilke kombinasjoner av feil og hendelser kan føre til uønskede hendelser; (2) hvor ofte vil en uønsket hendelse inntreffe? (3) hvilke feil/hendelser har størst betydning for om uønskede hendelser vil inntreffe eller ikke. Et feiltre består av en topphendelse (uønsket hendelse) med innledende hendelser under seg. Disse bindes sammen av logiske porter som består av 'og'- porter og 'eller'-porter:



Gjennomføring av analyse

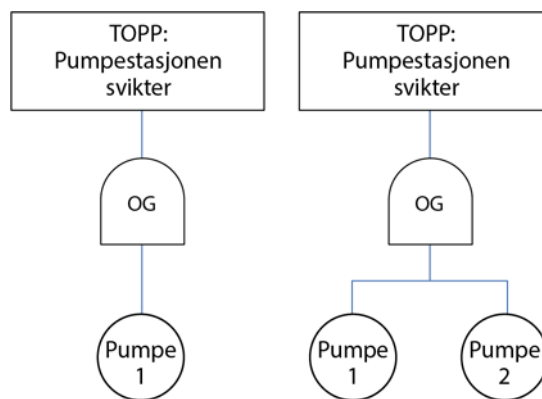
Første steg er å definere topphendelsen. Topphendelsen er den uønskede hendelsen for analysen. 'Manglende kjøling på Maskin A' kunne være et eksempel på en sådan topphendelse (figuren nedenfor).



¹⁸ "Fault Tree Analysis"

Neste steg er å tilføye inngangshendelser som er årsakene som muliggjør topphendelsen. For tilfellet med et system med to kjølepumper, hvor kun den ene behøver å være i drift for å oppnå tilstrekkelig kjøling, blir innledende hendelse 'Kjølepumpe 1 starter ikke' og 'Kjølepumpe 2 starter ikke'. Begge hendelser må skje samtidig og den logiske porten må da være en 'og'-port. 'Kjølepumpe 1 starter ikke' og 'Kjølepumpe 2 starter ikke' kan også ha innledende hendelser, f.eks. feil på en temperaturtransmitter eller at systemet står i manuell. Her blir den logiske porten en «eller» port fordi kun en av de to hendelser behøver å inntreffe før pumpene ikke kan starte. Sådan bygge treet inntil alle relevante innledende hendelser er med.

En feiltre-analyse skaper en visuell og relativt ukomplisert god oversikt over mekanismene som leder til topphendelsen og det sikres en strukturert framgangsmåte som hjelper til å motvirke at viktige ting overses. I de fleste tilfeller vil personell med erfaring fra drift av det valgte systemet bidra til en slik analyse. Fokus og tyngden i en feiltre-analyse er mest på systemer og utstyr. Feil utført eller manglende vedlikehold, operatørfeil osv. kan være eksempler på innledende hendelser som også kan være viktige å få med. En kvantitativ risikovurdering er illustrert nedenfor.

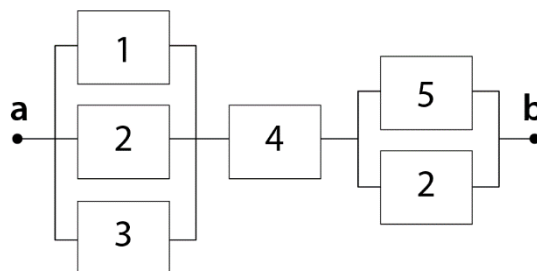


Feiltre for én og to pumper:

Venstre: Én pumpe med feilrate $Q = 0,005$ (5/1 000); tilgjengelighet er $(1 - 0,005) = 0,995$, nedetid 43,8 timer/år; Høyre: To pumper, hver med feilrate $Q = 0,005$; feilrate $= 0,005 \cdot 0,005 = 0,000025$; tilgjengelighet er $(1 - 0,000025) = 0,999975$, nedetid 0,22 t/år.

Beregning av sannsynligheter

Beregning av sannsynligheter gjøres etter følgende prinsipp: er hendelsene i parallell ganges sannsynlighetene; er hendelsene i serier summeres sannsynlighetene, som illustrert nedenfor (S og s er sannsynligheter).



$$S_1 = s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \quad S_2 = s_4 \quad S_3 = s_5 \cdot s_2$$

$$S_{total} = S_1 + S_2 + S_3$$

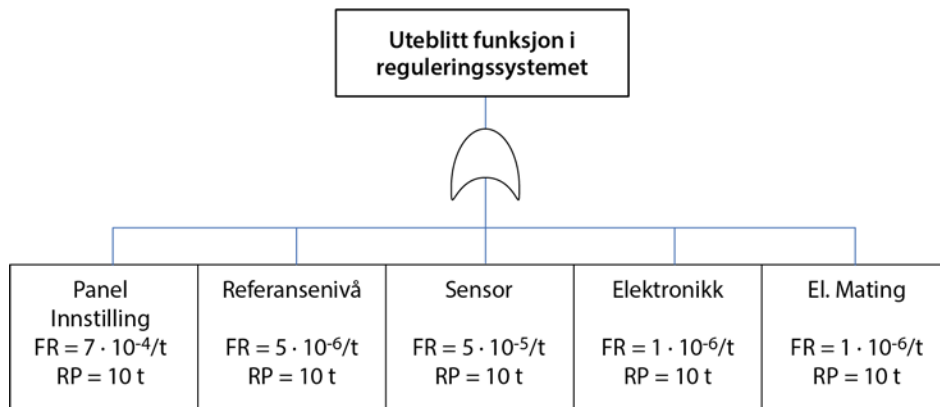
Prinsippet for beregning av sannsynligheter i en feiltre-analyse

Analyse av mulig feil i flomlukeregulering

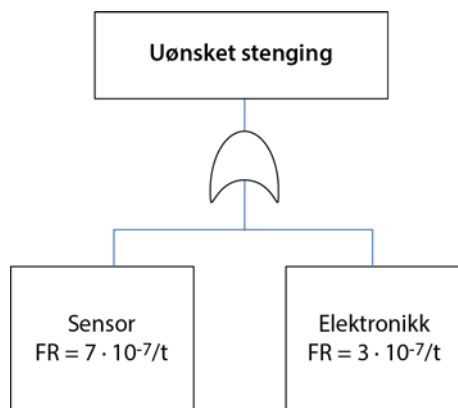
Systemet omfatter panelinnstilling, referansenivå, sensor, elektronikk og el-mating til systemet. El-mating er batteridrevet. Tre hovedtyper av feilmoduser kan opptre for flomlukesystemet:

- Uteblitt funksjon ved stigende flomnivå
- Uønsket stenging av luker
- Uønsket åpning av luker

For de tre tilstandene er topphendelsen økende vannføring. Det er den uteblitte funksjonen som er mest relevant i risikovurderingen. Feiltreet for uteblitt funksjon i reguleringssystemet er gitt i den første figuren. Data i figuren er feilrate og reparasjonstid (som er samlet tid for å både oppdage og rette opp feilen). Feilrate-tall er hentet fra tidligere erfaring og hendelsestre-analyser. Feil knyttet til panelinnstilling dekker situasjonen hvor anlegget står i manuell drift når det i stedet burde ha stått i automatisk drift. Feiltreet for uønsket stenging er vist i den andre figuren.



Feiltre for uteblitt funksjon i reguleringssystemet (FR=feilrate; RT=reparasjonstid; t=time)



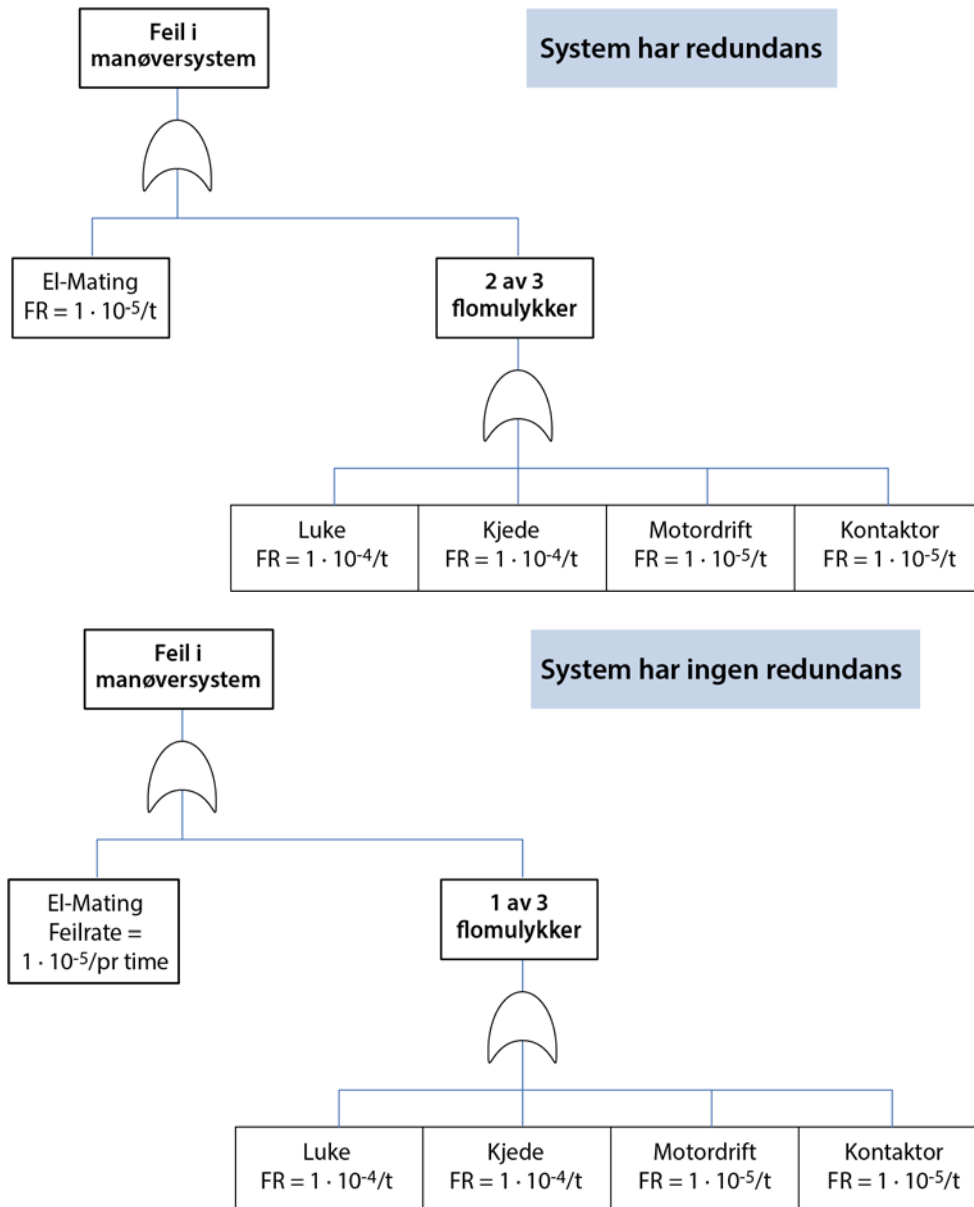
Feiltre for uønsket stenging av damluker (FR=feilrate; t time)
 $7 \cdot 10^{-7} / t = \text{ca. } 1/100 \text{ år (1\% /år for sensorsvikt; ca. halvparten for elektronikk svikt)}$

For feil i manøvrering av systemet for luker er et feiltre opprettet for to tilstander (tredje figur, angitte sannsynligheter er relative sannsynligheter):

- 1) systemet har redundans der det er mulig å oppnå ønsket systemfunksjon selv om én av de tre flomlukene ikke lar seg åpne: Topphendelsen vil skje kun hvis 2 av de 3 flomlukene ikke lar seg åpne. Feilsannsynligheten for en luke (uten el-mating) er gitt i figuren. Summen av de fire sannsynlighetene er $P_f = 3 \cdot 10^{-4}$. Hvis det er uavhengighet mellom feilårsakene for alle lukene er feilsannsynligheten for 2 av 3 luker tilnærmet $2P_f^2 (1 - P_f)$ eller $3 \cdot 10^{-7}$.

- 2) systemet har ingen redundans: Topphendelsen vil derfor inntre hvis kun 1 av 3 flomlukene ikke lar seg åpne. Ettersom topphendelsen inntreffer hvis 1 av flomlukene feiler, har det ingen betydning hvilken tilstand de andre lukene har. Feilsannsynligheten beregnes under forutsetningen av uavhengighet mellom de tre lukene. Feilsannsynligheten er dermed $9 \cdot 10^{-4}$ (eller ca. 10^{-3}).

Man kunne også ha sett på sannsynlighetene av tømmerluken og bunnluken separat, hvis det finnes forskjellige feilstatistikk for hver.



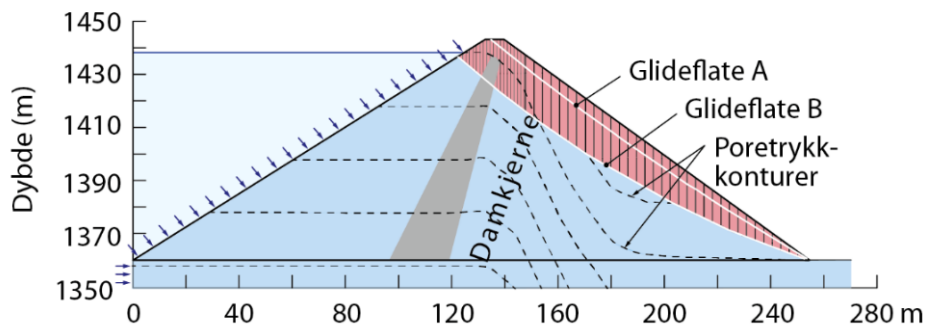
Feiltre for manøvreringssystem, redundant (øvre) og ikke redundant (nedre) system (FR=feilrate; t time)

Eksempel 3 Monte Carlo analyse av nedstrøms skråningsstabilitet

Monte Carlo er en kjent metode. Metoden er en bredt anvendt klasse med algoritmer som kan simulere ulike fysiske og matematiske systemer, som f. eks. destabiliserende og stabiliserende krefter i en skråning for å beregne sannsynligheten for utglidning.

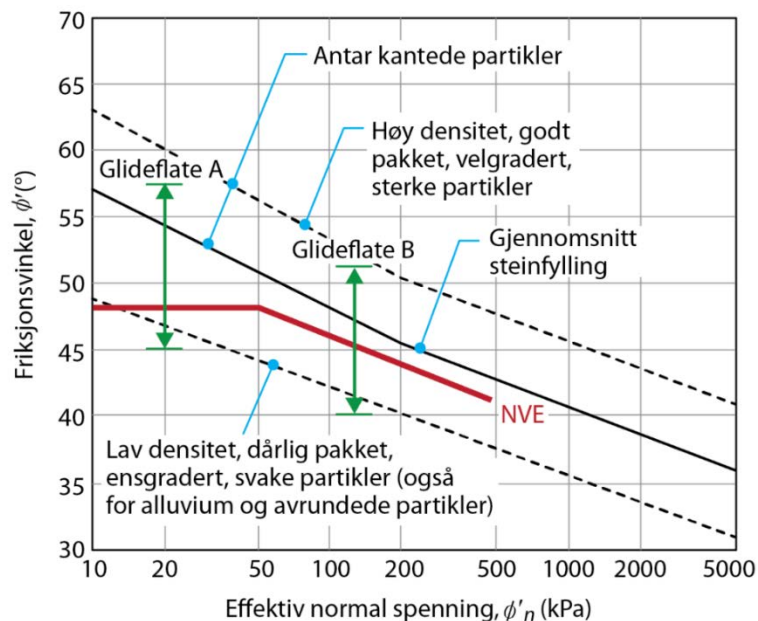
Eksempel av analyse av nedstrøms skråningsstabilitet

Resultatet av deterministiske analyser av skråningsstabilitet er vist nedenfor, med beregnet kritisk glideflate ("Glideflate A" og "Glideflate B"). Deterministisk sikkerhetsfaktor for Glideflate A ble beregnet til 1.42.



Skråning modellert i Monte Carlo analysen, Dam Nyhellervatn

Monte Carlo simuleringer ble utført for de to glideflater, hvor hver usikker parameter ble variert innenfor et rimelig område av minimum og maksimum verdier. Den viktigste usikre parameteren var friksjonsvinkel for steinfyllingen nedstrøms. Figuren nedenfor viser hvordan friksjonsvinkel i steinfylling kan variere avhengig av steinkvalitet, komprimering og effektivspenning.

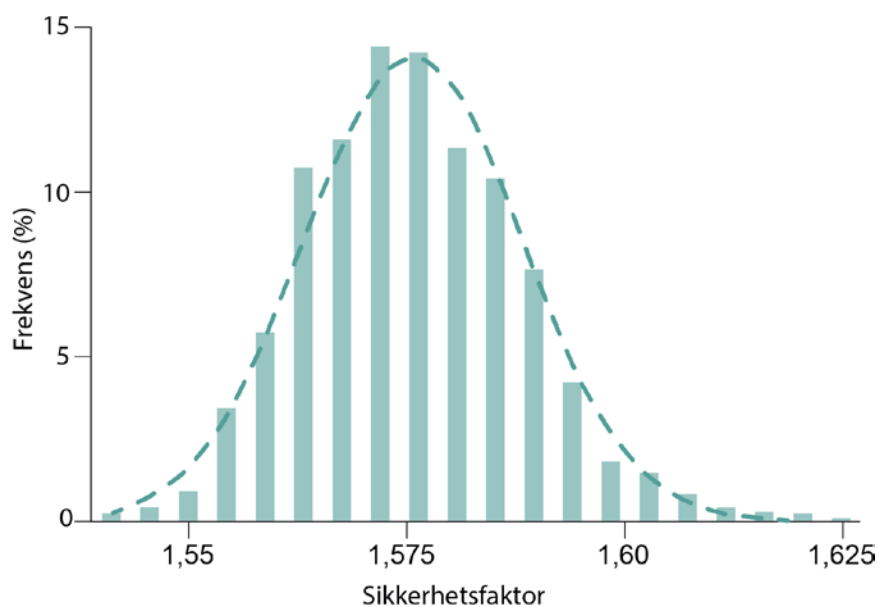


Friksjonsvinkel (sekantverdi) for steinfylling (NGI 2002/EBL 2002)

Resultater fra Monte Carlo analysene av nedstrøm skråningsstabilitet under stasjonær tilstand er vist i en tabell og figur nedenfor. Analysen viser at nedstrøm skråning har en meget lav bruddsannsynlighet. En sikkerhetsfaktor under 1.4 kan derfor representere en meget lav bruddsannsynlighet. Figuren viser resulterende sikkerhetsfaktor og dens usikkerhet for Glideflate A.

Resultat fra Monte Carlo analyse av nedstrøm skråningsstabilitet

Glideflate/	Sikkerhetsfaktor SF	Minimum SF	Maksimum SF	Bruddsannsynlighet
Grunnere glideflate A	1.58	1.44	2.05	$P_f < 10^{-10}$
Dypere glideflate B	1.32	1.21	1.71	$P_f = 7 \cdot 10^{-7}$



Probabilistiske fordelingsfunksjon for sikkerhetsfaktor for Glideflate A

Kommentarer til de tre eksempelanalyser

Det er viktig å erkjenne at analysene som hendelsestre-analyser gir et "øyeblikksbilde" av risikoen, og at risiko kan endre med tid ettersom, f.eks., hendelser skjer på og rundt dammen, rehabiliteringstiltak igangsettes og kompletteres, vannstanden påvirkes av klima, anleggsarbeid gjennomføres i nærheten av dammen eller berørte personer eller infrastruktur endres. Risikovurderinger kan oppdateres ved, f.eks., dammens hovedtilsyn eller ved et spesielt tilsyn. Annen gangs risikovurdering er naturligvis lettere enn den første, og vanligvis raskere, fordi det eksisterer allerede en tidligere analyse som man kan bygge på.

I hendelsestre- og feiltre-analyser kan det diskuteres at ekspertvurderinger kan bli partisk og at noen eksperter kan utøve unødig sterk innflytelse i arbeidsgruppen. Derfor er det viktig å ha en sterk og erfaren tilrettelegger som kan identifisere når skjevheter begynner å skje. Gruppediskusjon og konsensus er viktig, akkurat som alle tilgjengelige estimater bør innlemmes i usikkerhetene angitt ved nodene. En av de mer omstridte spørsmålene er hvordan man gjør subjektive estimater av hendelser som har lite eller intet statistisk grunnlag. Så langt som mulig bør man knytte de subjektive vurderingene til erfaringer under sammenlignbare omstendigheter. Dette tvinger arbeidsgruppen til å veie inn relevant presedens og tidligere erfaringer.

Ofte kombineres to eller flere metoder i en risikovurdering. For eksempel, kan bruddsannsynligheten for mellomhendelser i en hendelsestre-analyse kan beregnes med feiltre-analyse. I en hendelsestre-analyse kan f.eks. sannsynlighetene for utglidning i nedstrøms skråning fastsettes ved hjelp av probabilistiske analyser (FORM¹⁹-analyser, eksempel i Vedlegg A). FORM-analyser kan også benyttes ved beregning av dam-fundamentets bæreevne. Når man bruker et område-tall for å uttrykke en usikkerhet i sannsynlighetsestimater i en hendelsestre-analyse kan Monte-Carlo analyser anvendes. Hendelsestre-analyse supplert med Monte Carlo analyser anses som de mest anvendbare og omfattende metoder for dammer.

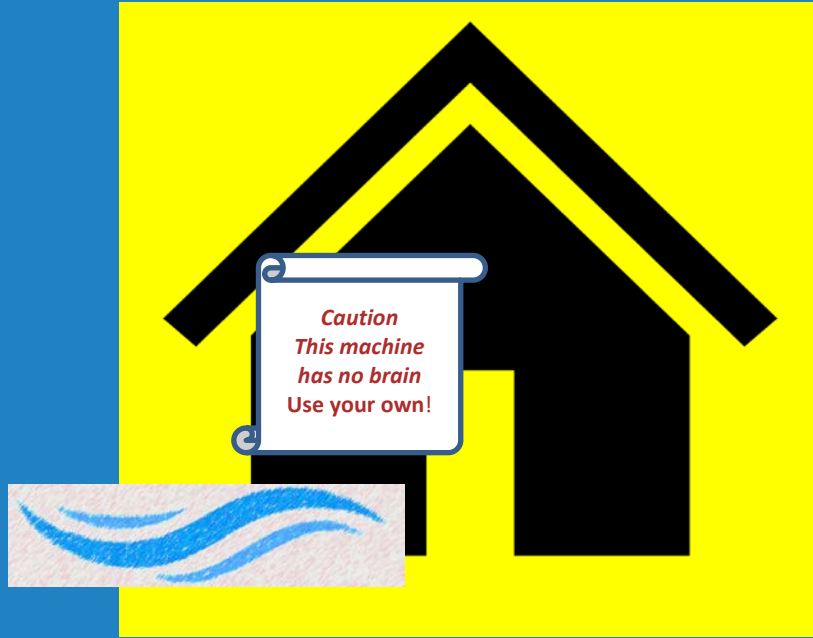
Ofte kan det være behov for kun enkle (f.eks. kvalitative eller semi-kvantitative metoder). Det anbefales at man starter med enkle analyser, for eksempel, kvalitative analyser eller grove (ikke fin-grenet) hendelsestre-analyser. Hvis resultatene viser tilfeller med middels eller høy risiko, og den estimerte risiko påvirker beslutningene som må tas, bør man vurdere å benytte mer avanserte analyser. Vedlegg A har en oversikt over alle metoder.

¹⁹ FORM = First Order Reliability Method

Risikokommunikasjon og beredskap



*La Grande steinfyllingsdam bygget på leire
James Bay. Northern Québec, Canada*



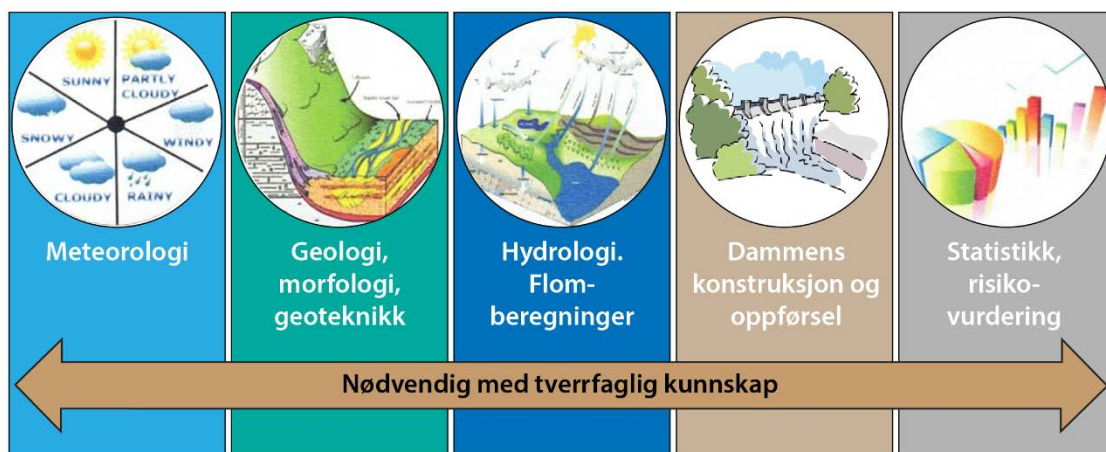
Eksempel på et mindre nyttig varsel

Risikokommunikasjon og beredskap

Risikokommunikasjon

Kommunikasjon under riskovurdering

Under selve risikovurderingen for et damanlegg kreves det multidisiplinær tilnærming, med f.eks. kunnskap fra fagene vist nedenfor. Det viktigste er kunnskap om selve damanlegget, geologien, dammens konstruksjons- og oppførsel gjennom årene. Derfor har dameieren og dammens personale en sentral rolle i risikovurderingen.



Eksempel på nødvendig informasjon for risikovurdering

Kommunikasjon med beslutningstakere, interessenter og befolkning

En kommunikasjonsstrategi bør planlegges nøye. God kommunikasjon med beslutningstakere og ikke-tekniske interessenter kan omfatte:

- Forstå de berørtes standpunkter og typen av informasjon de trenger. Levering av data alene vil ikke stimulere til handling eller forståelse.
- Vise til at mennesker håndterer usikkerhet hele tiden i det daglige (økonomi, teknologi, klimaendringer, fremtid) og usikkerhet er svært vanlig.
- Unngå sammensatt eller uoversiktlig språk og forklare betydningen av tall.

En nøkkel til god kommunikasjon er konseptet om "gradvis formidling av informasjon etter behov" (PDI)²⁰ (Klopprogge et al., 2007). Dette innebærer bruk av flere lag av informasjon, fra ikke-tekniske til mer spesialiserte konsepter, som gradvis tilbys i samsvar med brukerens behov. Tilnærmingen til å rapportere usikkerhet er forskjellig for "indre" (teknisk rapport til fagpersoner) og "ytre" (pressemeldinger og offentlige notater) lag. Konseptet er eksemplifisert i tabellen nedenfor.

²⁰ PDI = "**P**rogressive **D**isclosure of **I**nformation"

Veiledning for innhold, stil og detaljeringsgrad for risikoinformasjon fra dameier

Økende detaljeringsgrad ↓	Indre lag (f.eks. rapporter, tekniske notater)	Ytre lag (f.eks. pressemeldinger)
	Usikkerheter nevnt hver for seg og eksplisitt.	Usikkerheter integrert/implisitt i ordlyden som brukes, (f.eks. 'kan')
	Usikkerheter som en del av vitenskapelig tilnærming brukt i studien og i vurderingen.	Usikkerheter som vesentlig tillegg informasjon for vurderingsresultatene.
	Redegjør for de "nakne" usikkerhetene fra en vitenskapelig studie.	Usikkerheter oversatt til den politiske og samfunnsmessige konteksten.
	Balansert redegjørelse for alle usikkerheter i vurderingen.	Vektlegging av usikkerhetenes rolle i den politiske agendaen.
	Vektlegging av natur, omfang og kilder til usikkerhet.	Vektlegging av implikasjoner av usikkerhetene.
	Implikasjoner av usikkerheter på resultatene og videre arbeid.	Implikasjoner av usikkerhetene på resultatene og den politiske agendaen.
	Meget detaljert (teknisk språk)	Detaljer hvis det vurderes som 'policy'-relevant (ikke teknisk språk)

Beredskap²¹

Det er et bredt spekter av potensielle nødsituasjoner som kan oppstå i forbindelse med et damanlegg, og det er viktig for dameieren å være forberedt på å reagere effektivt hvis en nødsituasjon oppstår. Det er to komponenter til kommunikasjon om beredskap: nødrespons-planer og nødberedskaps-planer (på engelsk "*emergency preparedness plans and emergency response plans*"). Damsikkerhetsforskriften (2009, rettet 2013) nevner beredskapsplaner (eller "*readiness plans*" på engelsk) som antas å dekke begge begreper. De to beredskapsplanene bør utvikles for alle fasiliteter, under hensyntagen til risikoprofil, risikostyring og kritiske kontroller for anlegget. Eksempler på potensielle nødsituasjoner er strukturell svikt i et anlegg, stigende vannstand, plutselig lekkasje, etc. Andre nødsituasjoner som kan påvirke sikkerheten til en dam er f.eks. tap av el-kraft, jordskjelv og andre ekstreme forhold som skogbrann, jordskred, snøskred, og så videre.

Nødrespons-planer

En responsplan (nødvernplan) beskriver tiltak dameieren og andre berørte parter igangsetter for å forberede seg på en nødsituasjon, og for å reagere hvis en nødsituasjon oppstår. Elementer av en plan som vil bli implementert, bør utvikles i samarbeid med de berørte parter. En nødrespons-plan skal tilpasses hvis det er for få personer og mindre utstyr lokalt til å sikre at utstyr, drivstoff og personell kan transporteres til stedet. Responsplaner kan være nødvendig for kraftproduksjon på stedet og infrastruktur.

Nødberedskaps-planer

For nødsituasjoner som kan føre til nedstrøms innvirkning på sikkerheten, miljøet, og/eller infrastrukturen, utvikles et nødberedskapsplan for ekstern bruk med innspill fra lokalsamfunn, inkludert lokale myndigheter, kommunale myndigheter og nasjonale myndigheter. Informasjon i nødberedskapsplanen kan brukes av potensielt berørte lokalsamfunn, for å bistå i utviklingen av sine nødhjelpsplaner. Kopier av planene skal leveres til potensielt berørte deler av samfunnet med roller eller ansvar relatert til beredskap.

²¹ Damsikkerhetsforskriften krever at "Beredskapsplanen skal bygge på analyse av risiko og sårbarhet og på utførte dambruddbølgeberegninger". Som nevnt er bruken av risikovurdering i denne sammenheng ikke en del av formålet for håndboken, men analysemetodikken vil være det samme.

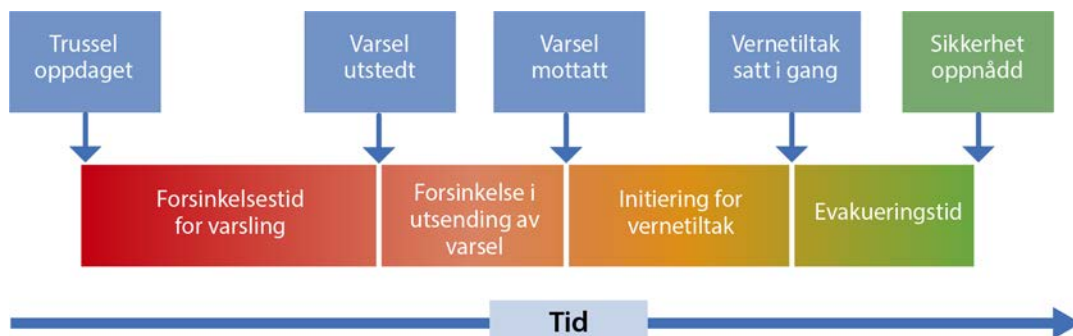
Nødrespons-plan:

- Potensielle nødsituasjoner som kan oppstå og forhold som vil utløse implementering av planen.
- Ressurser (mennesker, utstyr, materiell) som kreves for å reagere på en nødsituasjon, inkl. ressurser som må beholdes på stedet).
- Roller og ansvar for dameierens ansatte, entreprenører og konsulenter og eksternt berørte, og for den overordnede kommandostrukturen i tilfelle en nødsituasjon og eventuelle avtaler om gjensidig hjelp.
- Tilgang til nettstedet (primær/sekundær tilgang for forskjellige forhold).
- Kommunikasjonssystemer, utstyr og materialer.
- Prosedyrer for å aktivere planen (intern og eksternt varslings og kommunikasjonsplaner for beredskap; oppdatert kontaklinformasjon, både internt og eksternt).
- Krav og planer for opplæring av personell, internt og eksternt.
- Prosedyrer eller tiltak som skal iverksettes for å:
 - forhindre at en urolig eller uvanlig tilstand blir en nødsituasjon.
 - begrense skader på liv og helse, miljø og anlegget.
 - avbøte konsekvenser (evakueringsplaner og redningsplaner).
- Mekanismer for å varsle potensielt berørte parter om en forestående eller utviklende nødsituasjon (alarmer nedstrøms ved en nødsituasjon).
- Krav til overvåking.
- Prosedyrer og frekvenser for å (1) teste planen ved hjelp av praktiske øvelser og (2) oppdatere planen.

Nødberedskaps-plan:

- Beskrivelse av anlegget, potensielle nødsituasjoner og potensielle effekter av nødsituasjoner.
- Dameierens rolle og ansvar og den overordnede kommandostrukturen i tilfelle en nødsituasjon.
- Varslingsprosedyrer som skal følges dersom en nødsituasjon oppstår eller er overhengende, inkludert oppdatert kontaklinformasjon.
- Mekanismer for å varsle potensielt berørte parter om en forestående eller utviklende nødsituasjon (f.eks. alarmer nedstrøms).
- Prosedyrer og frekvenser for å teste og oppdatere planen

I en nødssituasjon er det essensielt å ta hensyn til mulige forsinkelser under igangsetting av tiltak, utsending av varslene og evakueringstid, Figuren nedenfor gir et eksempel.



Eksempel på tiden som behøves for å varsle om en trussel og for å evakuere (tegningen er en adaptering av veiledningen fra USACE og FERC, hvor mobilnett-kommunikasjon anvendes i varslings).

Vedlegg

Del I Verktøy for risikovurdering

Del II Tilleggsinformasjon

Del III Referansemateriale

Vedlegg

Del I Verktøy for risikovurdering

A Analysemetodikk og eksempler

- Oversikt over analysemetoder
- Fareanalyse ("Hazard analysis")
- Konsekvensanalyse ("Consequence analysis")
- Risikoakseptkriterier

B Bruddmekanismer og skademekanismer - fyllingsdammer

C Bruddmekanismer og skademekanismer - betongdammer

D Dambruddstatistikk

Del II Tilleggsinformasjon

E Eksponenttall og nyttig statistikk

F Risikobegreper

G The "Observational Method"

H Risikovurdering i andre land

Del III Referansemateriale

I Definisjoner, akronymer og symboler

J Risikostandarder i Norge (NS) og ISO

K Liste over Energi Norge rapporter med risikoinnhold

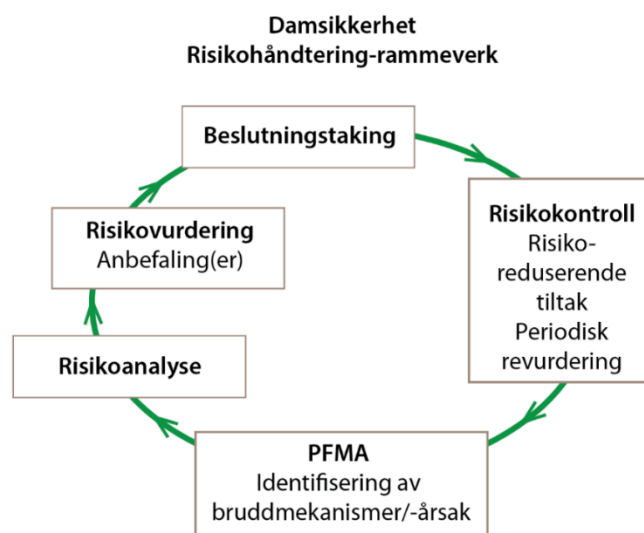
L ICOLD Bulletins med innhold om damsikkerhet

M Siterte kilder

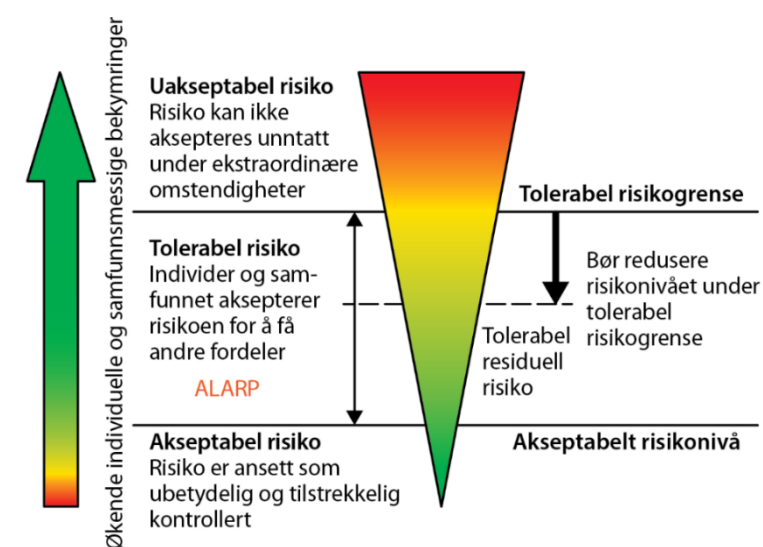
Vedlegg A Analysemetodikk og eksempler

Innhold

- A1 Oversikt over analysemetoder
- A2 Fareanalyse ("*hazard analysis*")
 - A2.1 Risikomatrise
 - A2.2 ROS-analyser
 - A2.3 *Bowtie* analyse ('tversoversløyfen'-analyse)
 - A2.4 Dam Safety Maturity Matrix (modenhetsmatrise) DSMM
 - A2.5 Failure mode Analysis", FMEA, FMECA og PFMA
 - A2.6 Hendelsestre-analyse
 - A2.7 Bayesisk nettverk (BN)
 - A2.8 "*Response surface method*" (RSM)
 - A2.9 FORM/SORM, First and Second Order Reliability Method
 - A2.10 *Stress testing*
- A3 Konsekvensanalyse ("*Consequence analysis*")
 - A3.1 Tap av liv
 - A3.2 Materielle tap
- A4 Risikoakseptkriterier
 - A4.1 Kriterier fra flere land
 - A4.2 Diskusjon av risikoakseptkriterier
 - A4.3 Utvidelse av Whitmans risikodiagram



FMEA- og PFMA-metoden integrert i et risikohåndtering rammeverk.



Eksempel på risikoakseptkriterier i UK

Vedlegg A Analysemetodikk og eksempler

A1 Oversikt over analysemetoder

Vedlegg A gir en kortfattet beskrivelse av de fleste metodene som er i bruk i dag, samt noen eksempler. Beskrivelsen for hver metode gir en oversikt over metoden, beskriver gjennomføring av analysene, input og output. Eksempler på bruk av enkelte metoder er også gitt.

Tabell A1 på neste side gir en oversikt over de fleste risikovurderingsmetoder, og en vurdering av vanskelighetsgrad for hver metode. Tabellen beskriver i tredje kolonne selve metoden og hva hver metode egner seg til. Vanskelighetsgrad er vurdert ut fra følgende skala:

- 1 Enkel
- 2 Enkelte beregninger eller makro-operert EXCEL-ark
- 3 Trenger funksjoner i EXCEL eller MATLAB
- 4 Egen programvare; vanligvis gjøres sammen med eller av en konsulent
- 5 Komplisert og gjøres unntaksvis; trenger konsulent

For flere av metodene (merket med * i Tabell A1) vurderes risiko best ved å først avholde en workshop for å vurdere årsak- og bruddmekanismer, farer og konsekvenser. Ofte vil det være en fordel å ja en tilrettelegger ("fasilitator") for å lede workshopen. For metoder med vanskelighetsgrad på 3 og høyere vil en konsulent trengs. Det er i dag gode programvarer for å utføre de mer avanserte analysene som Monte Carlo og FORM og SORM analyser. De fire nederste metoder i Tabell A1 utføres som regel av personale med utdanning innen risikoanalyse.

Tabell A2 gir en oversikt over innholdet (metodebeskrivelse og eksempler) i Vedlegg A. Tre av metodene med eksempler er gitt i håndbokens hovedtekst.

Tabell A2. Oversikt over metodebeskrivelse og eksempler i Vedlegg A

Risikovurderingsmetode	Avsnitt i Vedlegg A	
	Metodebeskrivelse	Eksempel
KVALITATIVE OG SEMI-KVANTITATIVE METODER		
Risikomatrise	Avsnitt A2.1	Avsnitt A2.1
ROS-analyse	Avsnitt A2.2	---
LCI (<i>Life Cycle</i>) analyse	---	---
<i>Bowtie</i> -analyse (og risikoregister)	Avsnitt A2.3	Avsnitt A2.3
Modenhetsmatrise (Dam Safety Maturity Matrix)	Avsnitt A2.4	---
<i>The Observational Method</i>	Vedlegg G	---
FMEA og varianter FMECA, PFMA	Avsnitt A2.5	Avsnitt A2.5
KVANTITATIVE METODER (ALLE METODER VURDERER USIKKERHETER I ANALYSEN)-		
Hendelsestre-analyse	I hovedtekst og Avsnitt A2.6	Eks. 1 i hovedtekst
Feiltre-analyse	I hovedtekst	Eks. 2 i hovedtekst
<i>Bayesian updating</i>	---	---
FOSM (First order second moment)	---	---
Monte Carlo simulering (MC)	I hovedtekst	Eks. 3 i hovedtekst
<i>Bayesian Network</i>	Avsnitt A2.7	Avsnitt A2.7 (med MC)
<i>Response Surface Method</i>	Avsnitt A2.8	---
FORM/SORM	Avsnitt A2.9	Avsnitt A2.9
<i>Stress testing</i>	Avsnitt A2.10	---

Tabell A1 Oversikt over risikovurderingsmetoder, vanskelighetsgrad og anvendelser

Metodikk (vanskelighetsgrad)	Kort beskrivelse og anvendelse
KVALITATIVE OG SEMI-KVANTITATIVE METODER	
Risikomatrise* (1)	Vurdere fare og konsekvens-kategorier Egnet for:
ROS-analyse* (1)	Preliminære vurderinger og fastsette behov for mer avanserte risikoanalyser
LCI (Life Cycle) analyse [◊] (1)	'Diagram' over farer og konsekvenser over hele livet av en dam Egnet for: Vise problemområder; oftest for kostnads- og miljøkonsekvensvurdering
Bowtie analyse* (2)	Vurdere fare og konsekvens kategorier Egnet for: Risikohåndtering verktøy: fastsette behov for mer avanserte analyser
Maturity matrix* (Modenhetsmatrise) (2)	'Sjekkliste' for å evaluere hvor godt utviklet damsikkerhet-prosessen er. Egnet for: Rangerer prosessutviklingen; gjentas jevnlig for å fastsette fremgang.
OM The Observational Method (1)	Vurdere verst tiltenkt tilfelle(r) og forberede risikoreducerende tiltak i forkant Egnet for: Alle problemstillinger, kombineres med overvåkning
FMEA, FMECA, PFMA * [◊] Potential failure mode analysis (3 typer) (2)	Følger hele livsløp av dammen og identifiserer behov for videre analyse Egnet for: Alle typer dammer og problemstillinger
KVANTITATIVE METODER (ALLE METODER VURDERER USIKKERHETER I ANALYSEN)-	
ETA, Hendelsestre-analyse* [◊] (2)	"What if" analyse: initiering → progresjon → hendelser eller brudd Kvantifiserte sannsynligheter og konsekvenser Egnet for:
FTA, Feiltre-analyse* [◊] (2)	Alle problemstillinger, gir bruddsannsynligheter; kan kombineres med MC
Bayesian updating [◊] (2-3)	Oppdatere sikkerhetsvurdering når mer informasjon blir tilgjengelig Egnet for: Instrumentert dam eller når noe uventet oppstår
FOSM First-Order Second-Moment [◊] (3)	Enkel regning når man har eksplisitte uttrykk for brudd (dvs en ligning) Egnet for: Stabilitetsanalyse; ikke alltid pålitelig
MC Monte Carlo simulering [◊] (3)	Simulering med iterative beregninger Egnet for: Alle problemstillinger; trenger mange iterasjoner for lave sannsynligheter
BN Bayesian Network* [◊] (3-4)	Er en variant av hendelsestre-analyse, god grafisk framstilling Egnet for: Alle problemstillinger, gir totale bruddsannsynligheter
RSM Response Surface Method (4)	Modellerer respons fra en komplisert beregning med en 3. grads ligning Egnet for: Modellering av komplisert system; ofte sammen med FORM/SORM
FORM/SORM [◊] 1 st Order Reliability Method 2 nd Order Reliability Method (4)	Taylor ekspansjon av en grensetilstand, ligner på avansert MC metode Egnet for: Når man problemstillingen kan uttrykkes med en ligning; noe bedre estimat med 2 nd Order, mer effektivt og pålitelig enn MC
Stress testing* (5)	Verktøy for global analyse av ekstreme tilfeller Egnet for: Komplisert analyse av et damsystem eller for hendelser med meget lav sannsynlighet og meget høy konsekvens

[◊] Et eksempel er gitt i hovedtekst eller i dette vedlegg.[◊] Metoden forklares ikke videre i håndboken.

A2 Fareanalyse ("hazard analysis")

A2.1 Risikomatrise

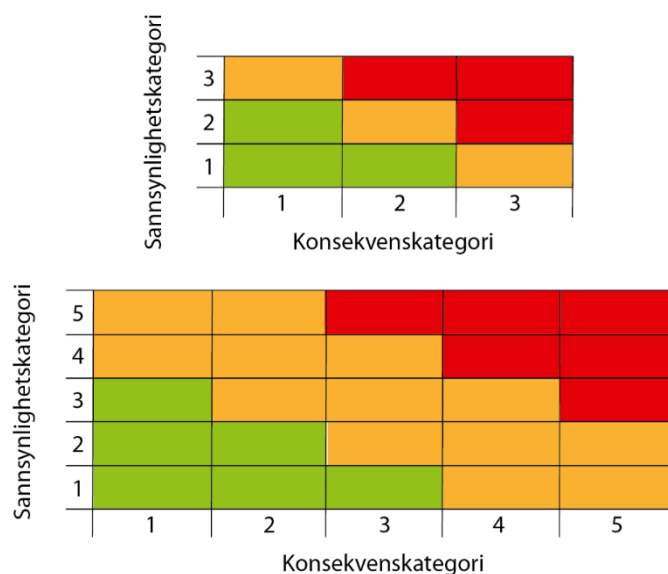
Om metoden

Risikomatriser gir et uttrykk for risiko ved å avgrense ulike soner, vanligvis fargekodede, som lav, middels og høy risiko. Risikomatriser kommer i flere størrelser og forskjellige risikoinndelinger. Figur A1 viser eksempler på 3 x 3 og 5 x 5 risikomatriser. Risikomatrissene har vanligvis tre risikosoner:

Høy/uakseptabel risiko (rødt): påkrevd med risikoreduserende tiltak.

Middels risiko (oransje): nødvendig å vurdere risikoreduserende tiltak.

Lav/Akseptabel risiko (grønt): ytterligere vurderinger ikke nødvendige.



Figur A1. Risikomatriser med lav (grønn), middels (oransje) og høy (rød) risikosoner.

I en 3 x 3 matrise er faren (sannsynligheten) delt i tre kategorier: 1-Lav, 2-Middels og 3-Høy. Konsekvensene er også delt i tre kategorier 1-Lav, 2-Middels og 3-Høy. I en 5 x 5 matrise, er faren (sannsynligheten) delt i fem kategorier og konsekvensene er også delt i fem kategorier.

Norsk Standard (NS 5815:2006) har utgitt en 5 x 5 risikomatrissen (Figur A2). Den ligger til grunn for risikovurderingene i vanlige infrastrukturprosjekter på land.

		Konsekvens				
		Ufarlig K1	Farlig K2	Kritisk K3	Meget kritisk K4	Kata- strofal K5
Sannsynlighet	Svært sannsynlig S5					
	Meget sannsynlig S4					
	Sannsynlig S3					
	Mindre sannsynlig S2					
	Lite sannsynlig S1					

Figur A2. Norsk Standard's 5 x 5 risikomatrise (Norsk Standard, 2006).

NS beskriver fem kategorier (sannsynligheter) for fare:

Farekategori (sannsynlighetskategori):

Kategoriene velges ut fra en diskusjon blant sakkyndige. Under gjennomføring plasseres hver hendelse i en sannsynlighetskategori. For å avhjelpe med kategorisering, kan farekategori beskrives i mer detalj, som f.eks.:

S1 = Sjeldnere enn en gang pr 10 år.

S2 = 1 gang hvert 5-10 år.

S3 = 1 gang hvert 1-5 år.

S4 = 1-10 ganger hvert år.

S5 = Mer enn 10 ganger i året.

Sannsynlighets- kategori	Sannsynligheten for uønskede hendelser (S)
1	Svært lite sannsynlig
2	Lite sannsynlig
3	Usikker (50% sannsynlighet)
4	Sannsynlig
5	Hendelsen inntreffer

Konsekvenskategori

Konsekvensen av en uønsket hendelse er vurdert som en funksjon av potensiell skade. I tillegg til liv og helse og materielle verdier, er konsekvenser også for fremdrift, miljø, eiendom, omgivelser, og tredjepart skader. Hver konsekvens plasseres i en kategori.

Konsekvenskategori	Alvorlighetsgrad (K)
1	K1 "Ufarlig"
2	K2 "Farlig"
3	K3 "Kritisk"
4	K4 "Meget kritisk"
5	K5 "Katastrofal"

For å avhjelpe med kategorisering, kan konsekvenser beskrives i mer detalj (f.eks. fra NS):

Risikovurdering ved befarings, arbeid med sikringstiltak og transport:

K1 = Ingen eller ubetydelige personskader.

K2 = Få og små personskader.

K3 = Få, men alvorlige personskader eller alvorlig sykdom.

K4 = Mulig dødsfall/flere alvorlige personskader/alvorlig sykdom/varige mén.

K5 = Dødsfall og mange alvorlige personskader.

Risikovurdering av mulige scenarioer:

K1 = Ubetydelige personskader; ubetydelige materielle skader; små miljøskader.

K2 = Få og små personskader; mindre materielle skader; registrerbar miljøskade.

K3 = Få, alvorlige personskader; betydelige materielle skader og miljøskader.

K4 = Mulige dødsfall/flere alvorlige personskader/alvorlig sykdom/fare for varige mén; alvorlige materielle skader; alvorlige og langvarige miljøskader.

K5 = Dødsfall og mange alvorlige personskader; store materielle ødeleggelser; svært alvorlige og langvarige miljøskader.

Risikoklasser

Risikoklassene defineres som følger:

RISIKO = FARE (SANNSYNLIGHET) x KONSEKVENNS (R= F x K)

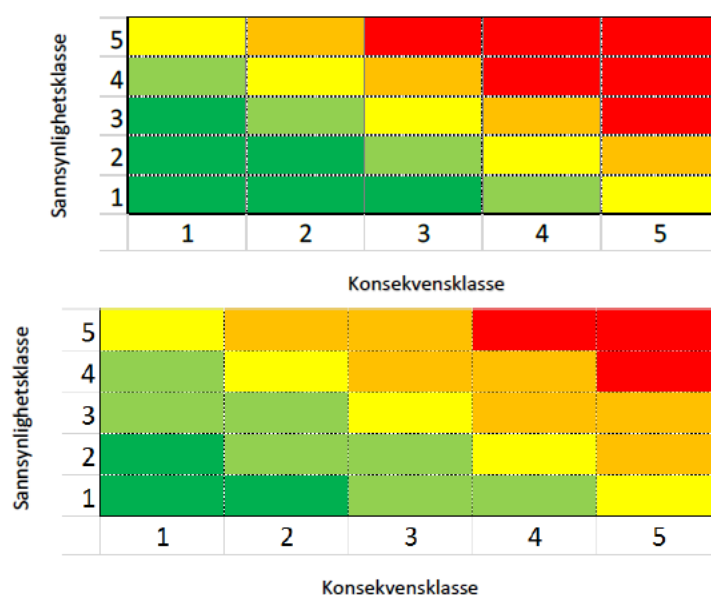
Lav/Akseptabel risiko (grønn): Avbøtende tiltak gjennomføres kun når nytte/ kostvurderingen tilsier det.

Middels/Tolerabelt område (oransje): Akseptabelt bare hvis videre risikoreduksjon er for dyr i forhold til oppnådd forbedring.

Høy/Uakseptabel risiko (rød). Avbøtende tiltak er nødvendig.

En 5 x 5 risikomatrix kan ha noe mer differensierte risikosoner (Figur A3). Hendelser som viser høy risiko bør pålegges obligatoriske risikoreduserende tiltak, og risikoreduserende tiltak bør vurderes i gule og oransje soner. Inndelingen i grønne, lysegrønne, gule, oransje og røde soner er valgt av

analysedeltagerne, f.eks., i en diskusjonsworkshop.



Figur A3. Eksempler på forskjellige risikomatriser og inndeling i risikosoner.

Gjennomføring av analysene

Sannsynlighets- og konsekvensklassene diskuteres oftest i et workshop-format. Deltagerne er sakkyndige med interesse i og kunnskap om problemstillingen. En liste lages av farer og konsekvenser som skal vurderes. Risiko vurderes ved å plassere hver hendelse i én kategori og hver påfølgende konsekvens i én kategori. Det er viktig å vurdere alle plausible scenarier som kan være årsak til fare eller konsekvenser. På workshopen enes deltagerne om definisjonen (forskjellen) i de 3 eller 5 sannsynlighetskategoriene og de 3 eller 5 konsekvenskategoriene. I tillegg enes deltagerne på workshopen om antall inndelinger i risikomatrisen og grensene mellom lav, middels og høy risiko.

Input og output

Vanligvis diskuteres estimer for sannsynlighets- og konsekvenskategoriene muntlig. Konsensuskategoriene for fare og konsekvens som ble oppnådd under workshopen føres inn i matrisen.

Resultat

Resultatet er selve risikomatrisen inndelt i risikosoner og liste over risikofaktorer hvor det trengs tiltak.

Verktøy for anvendelse i praksis

I dag er flere av risikomatriseanalysene ført i plenum ved bruk av et Excel regneark. Det er fort gjort å utarbeide Excel regnearket. Standard makroaktivert Excel regneark eksisterer allerede for risikovurderinger av skader på grunn av vibrasjoner (Langford et al. 2019), spuntstabilitet (Kalsnes et al. 2016), bygningsskader som følge av grunnarbeider (Piciullo et al. 2021; 2020; Langford et al. 2020) og analyser av tunnelsikkerhet.

A2.2 ROS-analyser

Om metoden

ROS-analyse står for **Risiko- Og Sårbarhetsanalyse**. Hensikten med analysen er å identifisere trusler for å kunne sette inn forebyggende tiltak og nødvendig beredskap. Metoden resulterer i en fargekodet risikomatrise. Analysen kartlegger sannsynlighet og konsekvens av uønskede hendelser og planlegger tiltak for å forhindre eller redusere potensielle konsekvenser av hver trussel. ROS-analysen er en kvalitativ risikovurdering som bygger på faglig skjønn og erfaring.

Gjennomføring av analysen

Analysen gjennomføres i fire steg. Tabell A2 gir tabell-eksempler som brukes for ROS-analyser:

Steg 1 Definere et område for analysen, f.eks., et system av dammer som skal analyseres; Involvere sakkyndige personer som er berørt for best mulig kartlegging.

Steg 2 Definere de uønskede hendelsene som kan inntreffe: Hver uønsket hendelse konkretiseres og formuleres så presist som mulig.

Steg 3 Gjennomføre en analyse av hver hendelse, vanligvis ved bruk av tabeller:

- Liste opp mulige årsaker til hendelsene; beskrive eksisterende og nye forebyggende tiltak og forventet effekt for hvert tiltak; estimere sannsynligheten for at hendelsen inntreffer ved å krysse av et av følgende alternativer i tabellen:
 - Svært stor: hendelsen inntreffer flere ganger hvert år
 - Stor: hendelsen inntreffer én gang pr 1-5 år
 - Moderat: hendelsen inntreffer én gang pr 6-10 år
 - Liten: hendelsen inntreffer én gang pr 11-49 år
 - Meget liten: hendelsen inntreffer sjeldnere enn én gang pr 50 år
- Liste opp konsekvensene av den uønskede hendelsen for ulike konsekvensområder, f.eks. liv og helse, materiell, produksjon, nærmiljø; beskrive eksisterende og nye skadebegrensende tiltak og forventet effekt av hvert tiltak; estimere konsekvensen av at hendelsen inntreffer ved å krysse av et av følgende alternativer i tabellen:
 - Ubetydelig
 - Lav
 - Moderat
 - Alvorlig
 - Svært alvorlig
- Gjennomføre risikoanalyse basert på estimatene av sannsynlighet og konsekvens: Krysse av en celle i risikomatrisen som beskriver begge; prioritere risikoreducerende tiltak (forebyggende og skadebegrensende tiltak).

Steg 4 Sortere hendelsene ut ifra risikonivå og prioritere tiltak på tvers av uønskede hendelser; diskutere med ledelsen hvordan tiltakene skal gjennomføres og følges opp.

Kommentar

Ved hjelp av idédugnad listes de uønskede hendelser som man tenker kan oppstå under en dams levetid. De viktigste hendelsene prioriteres deretter ved avkryssing etter antatt skadepotensiale. Listingene gir et oversiktlig bilde over hva som kan skje og legger til rette for prioritering. Det er viktig å spesifisere kategoriene for sannsynlighet og konsekvens så konkret som mulig. Kategoriene kan være egenutviklet eller som vist i Tabell A1. Det er også viktig å samle relevant dokumentasjon så godt som mulig. For ROS-analyser (som for Risikomatrise-metoden i del A2.1) er et makroaktivert Excel regneark velegnet for en rask og oversiktlig analyse i plenum.

Tabell A2. Eksempler på tabeller som kan brukes for ROS analyser

Risiko- og sårbarhetsanalyse for [område]

[illegible]

Risiko- og sårbarhetsanalyse for [område]

Risikoområde / Uønsket hendelse		[Fyll ut]				
Konsekvens		Skadereduserende tiltak og forventet effekt				
Mulige konsekvenser (ovenfor pasient, ansatt, miljø og/eller ressursbruk)						
[Fyll ut]		[Fyll ut]				
Konsekvensen er:		Ubetydelig	Lav	Moderat	Alvorlig	Svært alvorlig

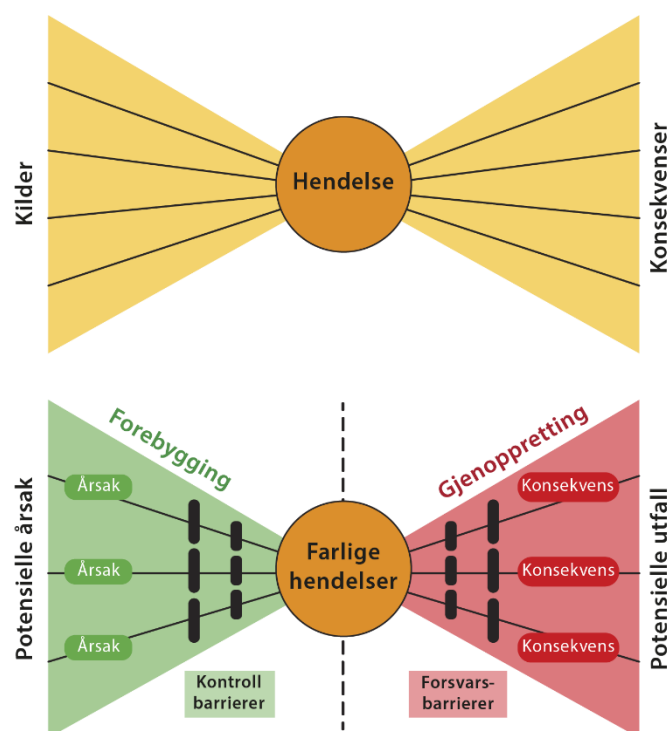
Risiko- og sårbarhetsanalyse for [område]

Risikoområde / Uønsket hendelse		[Fyll ut]			
Prioritering av risikoreducerende tiltak (forebyggende og skadereducerende tiltak)					
1. [Fyll ut]					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					
Risikomatrixe					
Svært stor sannsynlighet					
Stor sannsynlighet					
Moderat sannsynlighet					
Liten sannsynlighet					
Meget liten sannsynlighet					
	Ubetydelig konsekvens	Lav konsekvens	Moderat konsekvens	Alvorlig konsekvens	Svært alvorlig konsekvens

A2.3 Bowtie analyse (tversoversløyfe-analyse)

Om metoden

Bowtie-analyse er et enkelt visuelt verktøy som kan vurdere et helt system. Modellen brukes mest for risikostyring, spesielt for utvikling, implementering og gjennomgang av risikostyringsplaner, men innebærer også risikovurdering. Fordi tilnærmingen er visuell er Bowtie-analysen et godt kommunikasjonsverktøy. Den illustrerer (1) sammenhengen mellom potensielle faremomenter og brudd- eller feilmekanismer og hvordan de kan føre til uønskede hendelser; (2) konsekvensene av en hendelse skulle den inntreffe, og (3) risikokontrollene som kan utvikles for å redusere sannsynligheten for en hendelse eller konsekvensene (Fig. A4).



Figur A4. Illustrasjon av Bowtie-metoden

Bowtie-metoden er en visualisering av forholdet mellom en uønsket hendelse, årsaken(e), utilsiktede scenarier og forebyggende og avbøtende tiltak som er tilgjengelige for å begrense konsekvensene. I sentrum av Bowtie-diagrammet er risikohendelsen, f.eks. et dambrudd. Til venstre er det som kan føre til at hendelsen inntreffer, f.eks. et jordskjelv eller flom. På høyre side er de potensielle konsekvensene, f.eks. tap av liv, skade på eiendom, økonomiske tap. Bowtie-analysen kan vurdere flere hendelser fra årsak til konsekvens. Venstre og høyre sider er større enn sentrum fordi det er mange kilder som kan føre til en enkelt risikohendelse. Én hendelse kan føre til mange konsekvenser. Å velge en 'Hendelse' i sentrum av Bowtien gir et fokus for analyse. Bowtien uttrykker sannsynlighet og konsekvens via venstre og høyre side av arrangementet ved hjelp av "den sveitsiske ostemodellen" (se figuren på neste side).

Analysen kan demonstrere effektiviteten av eksisterende eller tiltenkte kontroller. Det er en allsidig, strukturert analyse når kvantifisering ikke er mulig, og har blitt brukt med hell. Det krever deltakelse fra et tverrfaglig team.

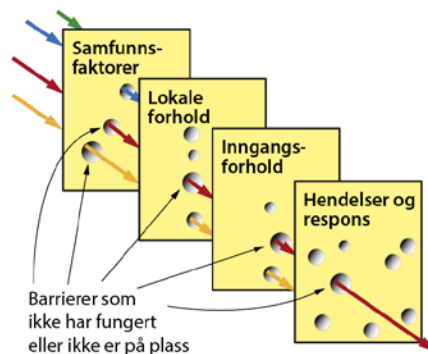
Gjennomføring av analysen

Bowtie-analysen innebærer kvalitativ risikoanalyse, risikovurdering og risikostyring. Metoden går gjennom følgende trinn:

- 1) Definere hendelsen i sentrum av bowtien ("Hva skjer når faren inntreffer")?
- 2) Identifisere truslene som forårsaker hendelsen (hva er årsaken, og hvordan går kontrollen tapt?)
- 3) Identifisere eksisterende beskyttelsesbarrierer for hver trussel:
 - for å forhindre forekomst av hendelsen;
 - kan kontrollene mislykkes, eller kan deres effektivitet bli kompromittert?
- 4) Identifisere for hver barriere opptrappingsfaktorer og faktorer som gjør at barrieren mislykkes:
 - hvordan forhindre at faren frigjøres?
 - hvordan kan kontroll opprettholdes?
- 5) Identifisere for hver barriere kontroller for opptrappingsfaktorene:
 - faktorer som forhindrer at barrieren og/eller gjenopprettingstiltaket blir ineffektivt;
 - hvordan sikre at kontrollene ikke mislykkes?
- 6) Identifisere konsekvensene (det kan være flere konsekvenser)

Sveitsiske ostemodellen:

Modellen illustrerer et systems forsvar mot svikt. Modellen har en serie barrierer, representert som skiver av sveitsisk ost. Hullene i skivene representerer svakheter i enkelte deler av systemet og varierer kontinuerlig i størrelse og posisjon over skivene. Systemet produserer svikt når et hull i hver barriere rettes inn, og tillater "en bane for ulykkesmulighet".



Figur A5 illustrerer Bowtie metoden. Metoden fører til etablering av forebyggende- og beredskaps-tiltak. Vanligvis lages det en egen liste over kontroller fordi mange kontroller er knyttet til mer enn én opptrappingsfaktor eller barriere.

Eksempel for en gruve avfall dam

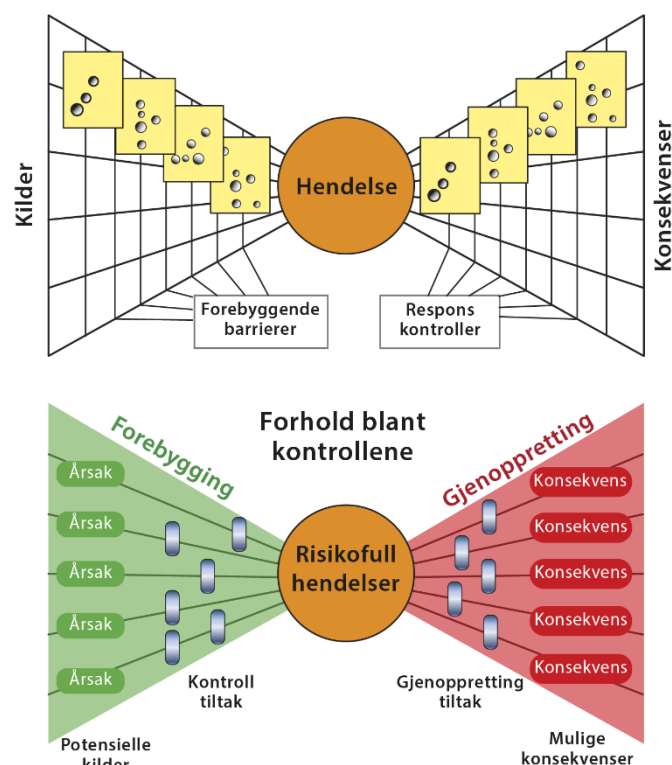
Figur A6 gir et eksempel på illustrerer en Bowtie-analyse for en dam av gruveavkast ("tailings dam": figuren er på engelsk for å bevare hovedelementene og intensjonen med analysen).

Risikoregister

Et risikoregister er et verktøy som kan brukes i utviklingen og implementeringen av en risikostyringsplan. Et risikoregister oppsummerer resultatene av en risikovurdering og elementer i en risikostyringsplan, ofte i regnearkformat, og beskriver vanligvis:

- Fare.
- Sannsynlighet for hver hendelse.
- Konsekvens (er) av hendelsen.
- Risikorangering.
- Risikoeier.
- Risikokontrolltiltak.
- Tilknyttede overvåkingsaktiviteter.
- Tilstands- og ytelseskriterier.
- Handlinger hvis tilstand er utenfor spesifiserte kriterieområder.
- Nåværende status.

Innenfor et risikoregister kan alle risikovurderingsmetoder anvendes for å estimere/evaluere risiko.



Figur A5. Bowtie-analyse, kontroll tiltak og forebyggende- og gjenopprettingstiltak

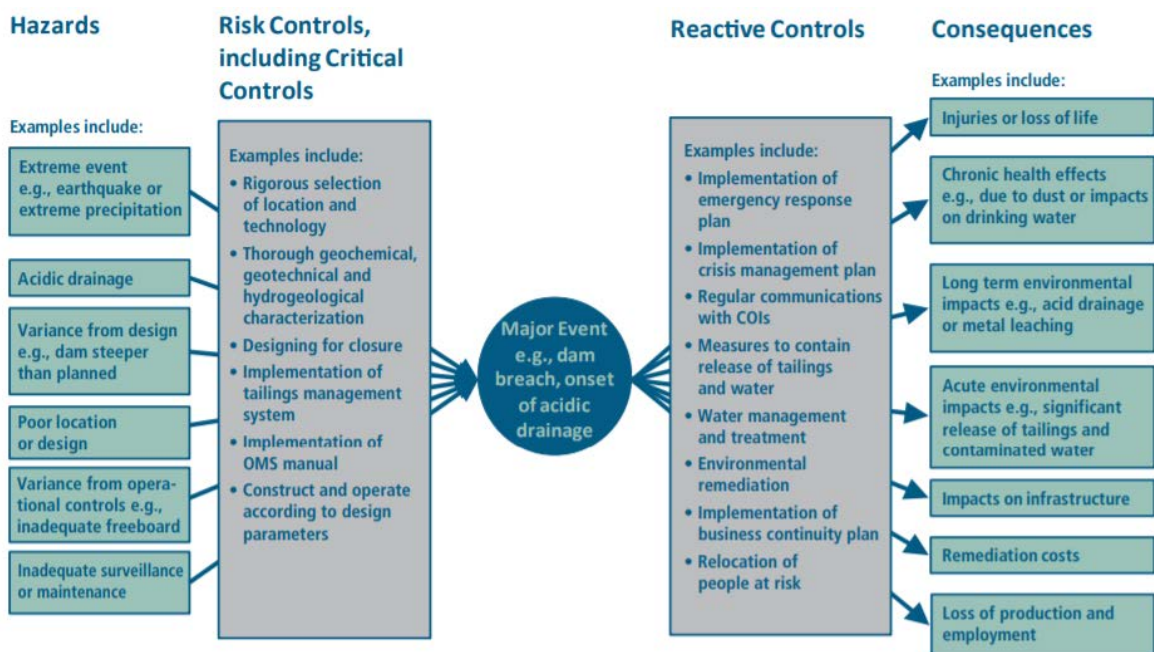


Figure A6. Eksempel på en Bowtie-analyse med farer og tilhørende kontroll for å redusere sannsynligheten for en uønsket hendelse og risikokontroll og potensielle konsekvenser hvis hendelsen inntreffer (MAC, 2019)

A2.4 Dam Safety Maturity Matrix (modenhetsmatrise) DSMM

Om metoden

En modenhetsmatrise er et verktøy for å evaluere hvor velutviklet og effektiv et dam risikostyringsystem er. Matrisene ble utviklet i CEATI²²s *Dam Safety Interest Group* (DSIG) for å vurdere effektiviteten av deres damsikkerhetsprogramme mot bransjepraksis, og for å hjelpe til å identifisere forbedringstiltak (Foster & Smith 2019).

Dameiere må administrere mange komplekse aktiviteter for å vedlikeholde og drive demningene sine trygt. Å identifisere og kontinuerlig forbedre nøkkelementene i et effektivt dam-sikkerhetsprogram og tilhørende praksis er utfordrende, men allikevel avgjørende. Bruk av Modenhetsmatriser ("*Dam Safety Maturity Matrices*", DSMM) er en måte å gjøre dette på. En modenhetsmatrise er vanligvis et enkelt papirbasert system med sjekklister. I en modenhetsmatrise rangeres utviklingen av risikostyring ved at analysen gjentas på et senere tidspunkt for å evaluere om det er fremgang. For eksempel ser en modenhetsmatrise på alle aspekter i driften av en dam (Fig. A7): personale, dokumentasjon, systemer og prosesser. Modenhetsmatrisen (Fig. A8) kvalifiserer tilstanden på en aktivitet eller prosess (fra 'Trenger utvikling', 'Middels', 'God praksis', 'Best praksis', til 'Ledende'. Ved å kjøre vurderinger periodevis, kan fremgang måles over tid. Samtidig brukes diskusjonene for å justere målene for hvert tema. Diskusjonene orienteres til slutt mot hovedprioritetene.

Modenhetsmatrise-metoden (*maturity matrix*) med "*Digital Asset Management*" (DAM)

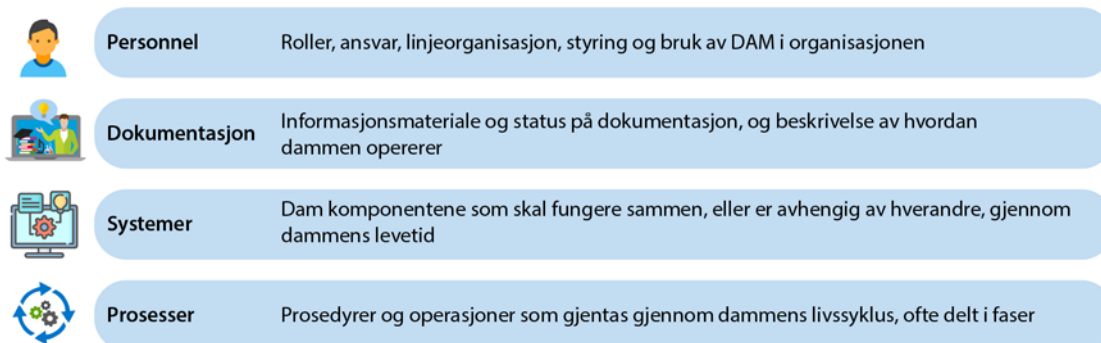


Figure A7. Modenhetsmatrise metode utviklet av CEATI med en typisk matrise

Matrise i: Monitoring - Monitoringsprogramme

Modenhets kategorier	Beskrivelse av modenhet				
	Trenger utvikling	Middels	God praksis	Best praksis	Ledende
Program utviklet for aktuelle bruddmekanismer					
Dokumentasjon, inklusivt inspeksjoner					
Kvalitetssikring utført					
Er målene oppfylt?					
Problemer oppdaget?					

Figure A8. Modenhetsmatrise metode utviklet av CEATI (Foster & Smith, 2019)

Gjennomføring

Modenhetsmatrise analyse kjøres vanligvis i en workshop format og rapporteres in en Excel matrise. Ofte sendes det et spørreskjema til alle interessenter i forkant av workshopen med spørsmål om dagens status og ønsket fremgang.

²² CEATI: Centre for Energy Advancement through Technological Innovation

Gjennomføringen er meget enkel. I workshopen er deltakernes svar fanget "live". Dermed er brukervennlighet (med f.eks Excel) helt kritisk, ettersom tilretteleggeren kanskje trenger å fange opp og revidere oppføringer raskt. Mål, prioritet og handlingsdetaljer føres inn i regnearket. For hvert emne rangeres den nåværende tilstand og hvor man ønsker å være (med eller uten prioritet, handling, en ansvarlig, og tidsskalaen for fullføring). Workshopen brukes til å diskutere og justere svarene. Det viktigste er å identifisere svakhetene (aspekter som er mindre modne) og enes om tiltak for å forbedre disse aspektene. Hele analysen består av flere matriser.

Tabell A3 viser en 'master-matrise' som oppsummerer momentene som ble vurdert med hver sin modenhetsmatrise, og Tabell A4 gir modenhetsmatrisen for monitoring. Et enda høyere detaljeringsnivå innen monitoring finnes i Figur A8.

Tabell A3. 'Master'-modenhetsmatrise hvor 12 matriser skal utarbeides, og med hypotetiske resultater

DSMM analyse Matrise hovedelementer	Modenhetsnivå				
	Trenger utvikling	Middels	God praksis	Best praksis	Ledende
1. Forståelse av damsystemet					
2. Monitoring					
3. Vannkontroll utstyr					
4. Magasin operasjon					
5. Personsikkerhet					
6. Nødrespons-plan					
7. Dam vedlikehold					
8. Sikkerhet og risikostyring					
9. Revisjon, anmeldelser					
10 Læring, kompetanse					
11. Informasjons sikkerhet					
12.Styresett					

Tabell A4. Modenhetsmatrise for monitoring hvor 12 matriser skal utarbeides

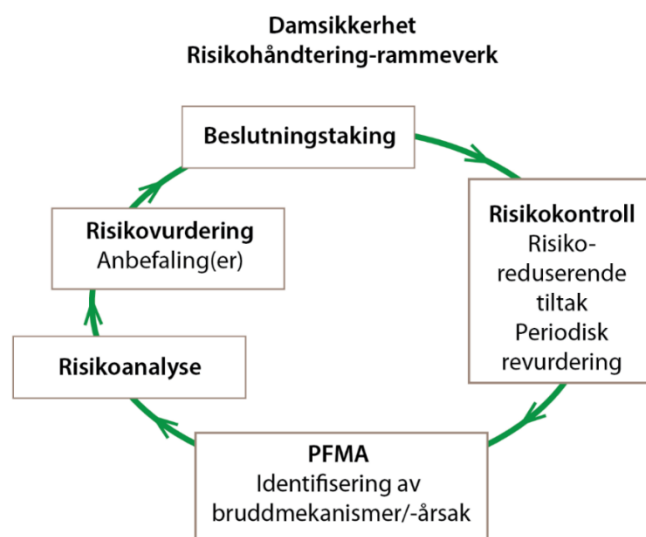
DSMM analyse Element2. Monitoring	Modenhetsnivå				
	Trenger utvikling	Middels	God praksis	Best praksis	Ledende
a. Monitoring programme					
b. Inspeksjoner					
c. Instrumentering					
d. Datastyring og lagring					
e. Rutiner for vurdering av observasjonene					
f. Rutiner for oppfølging av observasjonene					

A2.5 Failure mode Analysis", FMEA

Om metoden

"*Failure Modes and Effects Analysis*" (FMEA) er et strukturert, logisk rammeverk som muliggjør for operatører og spesialister å bruke tilgjengelig kunnskap og informasjon på en systematisk måte for å forstå kildene til risiko i en dam eller i et dam-system. Analysen 'kvalifiserer' (beskriver) effekten av et potensielt bruddforløp på en dam (eller dam-systemet). FMEA kan evaluere effekten av et brudd eller en svikt av hvert element i et system (og i under-systemene) langs flere mulige traséer inntil effekten på dammen eller dam-system-funksjonen er kjent. Deretter klassifiseres alvorlighetsgraden av hver svikt (ev. hvert brudd) og sannsynligheten estimeres. Rammeverket består av både risikoanalyse, risikovurdering og risikohåndtering. Metoden ligner på en kvalitativ hendelsestre-analyse (allerede beskrevet i hovedtekst). En kan også velge å kvantifisere i stedet for å kvalifisere sannsynlighetene, og man kan legge til en usikkerhetsfaktor i analysene. Figur A9 illustrerer FMEA metoden integrert i et risikohåndtering rammeverk, slik det er anbefalt av FERC (2016).

Det er to varianter til FMEA-metoden er: (1) "*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*" (FMECA), hvor 'kritikalitet' uttrykker viktigheten av komponentene på system-funksjon; og (2) "*Potential Failure Mode Analysis*" (PFMA) med fokus på identifiserte, målrettede områder med potensielt alvorlige og plausible mangler, slik at begrensede økonomiske ressurser kan brukes mer effektivt for å sikre damsikkerhet.



Figur A9. FMEA og PFMA metoden integrert i et risikohåndtering rammeverk.

Gjennomføring av FMEA analysen

Analysen består av følgende etapper:

- Beskrive dammen og dens funksjon og formulere en forståelse av demningen og prosessene.
- Lage et blokkdiagram (*block diagram*), med de viktigste komponentene og/eller prosessene og det logiske forholdet mellom dem; etablere en struktur for blokkdiagrammet.
- Bruke blokkdiagrammet for å liste opp elementer og deres funksjoner.
- Identifisere alle bruddårsakene og -mekanismene, på hvilken måte en komponent eller prosess ikke tilfredsstiller dimensjoneringsintensjonen (f.eks., brudd eller sviktmekanismer for et overløp: overtopping, oppløfting av sokkel, kavitasjon etc).
- Beskrive effekten av hver bruddmekanisme eller -årsak.

- Identifisere sannsynlige årsaker, eksisterende kontroller, påvisningsmetoder, etc.
- Legge inn en kvalitativ sannsynlighetsfaktor.
- Evaluerer risiko (sannsynligheten x konsekvens).
- Bestemme eller anbefale tiltak, tildele ansvar og frister.
- Følge opp og oppdatere, se på framdrift om tiltak som er utført og ikke utført.

Analysen kjøres i et workshop-format med idedugnad om hendelseskjeder som kan føre til brudd, evaluering av relevans i plenum og rask eliminering av mindre relevante hendelseskjeder. Figur A9 gir et eksempel på blokkdiagram og Tabell A5 oppsummerer trinnene i analysen.

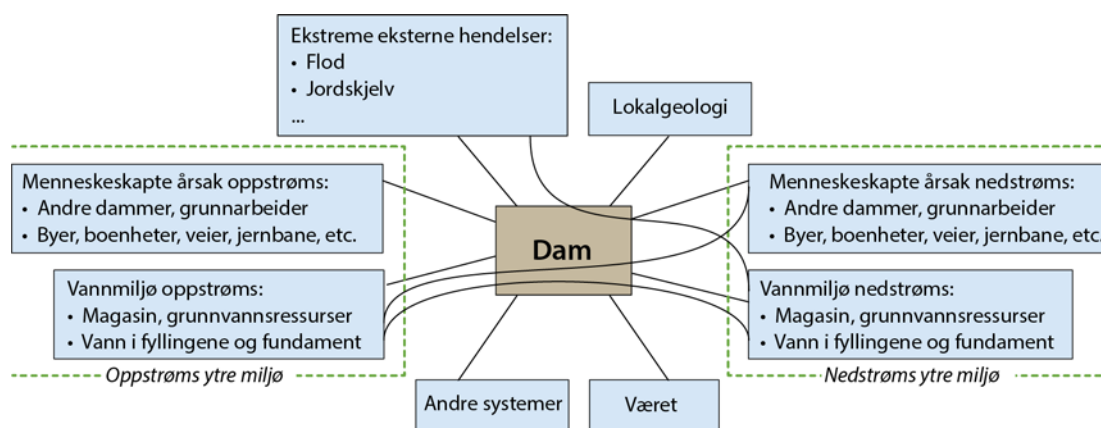


Figure A10. Eksempel på blokkdiagram for en dam i en PFMA analyse

Tabell A5. Etapper i PFMA-analyse

1. Identifisere bruddmekanismer og -årsak	
2. Vurdere bruddsannsynlighet	
3. Vurdere konsekvenser.	
4. Vurdere tillit til sannsynlighets- og konsekvensvurderinger.	
5. Kategoriser og prioriter feilrisiko.	
6. Plan for risikoreduserings- og/eller avbøtingstiltak.	
7. Utarbeide sammendragsrapport	

Potensielle bruddmekanismer og -årsaker

Identifisering og karakterisering av potensielle bruddårsaker og -mekanismer er nøkkelen til analysen. Analysen omfatter en rekke hendelser eller trusler som: (1) Naturfarer (f.eks. jordskjelv, ras, ekstreme værhendelser, flom); (2) Hendelser relatert til en konstruksjonsdel (f.eks. vannrør, luker, skråninger); (3) Driftshendelser (f.eks. svikt i en pumpe). For hver potensiell bruddmekanisme estimeres sannsynligheten for at hendelsen inntreffer sammen med den potensielle størrelsen på hendelsen (f.eks. maksimalt troverdig jordskjelv, sannsynlig største flom). Det kan være et stort antall potensielle bruddmekanismer. De viktigste risikoene bør prioriteres. En FMEA-analyse vurderer også potensialet for kjedereaksjoner eller kombinasjoner av mekanismer som kan ha større effekter enn hver bruddmekanisme sett på som uavhengig.

Effekter og konsekvenser

Når potensielle bruddmekanismer er kartlagt, identifiseres potensielle effekter på anlegget for å forstå de potensielle effektene som kan være forårsaket av en bruddmekanisme (f.eks. kollaps av en skråning, frigjøring av vann gjennom et overløp). For hver identifiserte effekt blir potensielle konsekvenser av den effekten også identifisert. Konsekvenser kan forekomme på en rekke områder, inkludert juridiske

implikasjoner så vel som:

- Tap av liv.
- Helse og sikkerhet for personell og publikum.
- Skader på miljø.
- Skader på privat eller offentlig eiendom.
- Skader på eller forsinkelser i driften av anlegget.
- Skader på infrastruktur på stedet eller utenfor stedet.
- Dameierens økonomi og rykte.

FMECA-analyse ("Failure Mode-Effects-Criticality Analysis")

FMECA-analysen utvider FMEA-analysen slik at hver identifisert bruddmekanisme og -årsak rangeres i forhold til viktighet og "kritikalitet". Kritikalitetsanalysen er vanligvis kvalitativ eller semi-kvantitativ, men kan kvantifiseres ved å bruke observerte bruddfrekvenser. I

risikoanalyser kan FMCEA metodikken benyttes for deler av systemet eller for enkelthendelser i en hendelseskjede. USACE (2012) utga retningslinjer for gjennomføring av risikoanalyser for dammer.

FMECA-analyse:

FMECA-analysen kartlegger hvilke måter et utstyr, en prosess eller lignende kan feile på, hvilken effekt det har lokalt og globalt samt kritikaliteten av feilen, ev. bruddet. Kritikalitet er definert som en kombinasjon av konsekvens og sannsynlighet).

PFMA-analyse ("Potential Failure Mode Analysis")

Med PFMA-varianten er identifisering og undersøkelse av potensielle bruddmekanismer gjort på en mer kostnadseffektiv måte enn med FMEA-analysen fordi kun de mest relevante/plausible hendelseskjeder er vurdert.

Vurdering

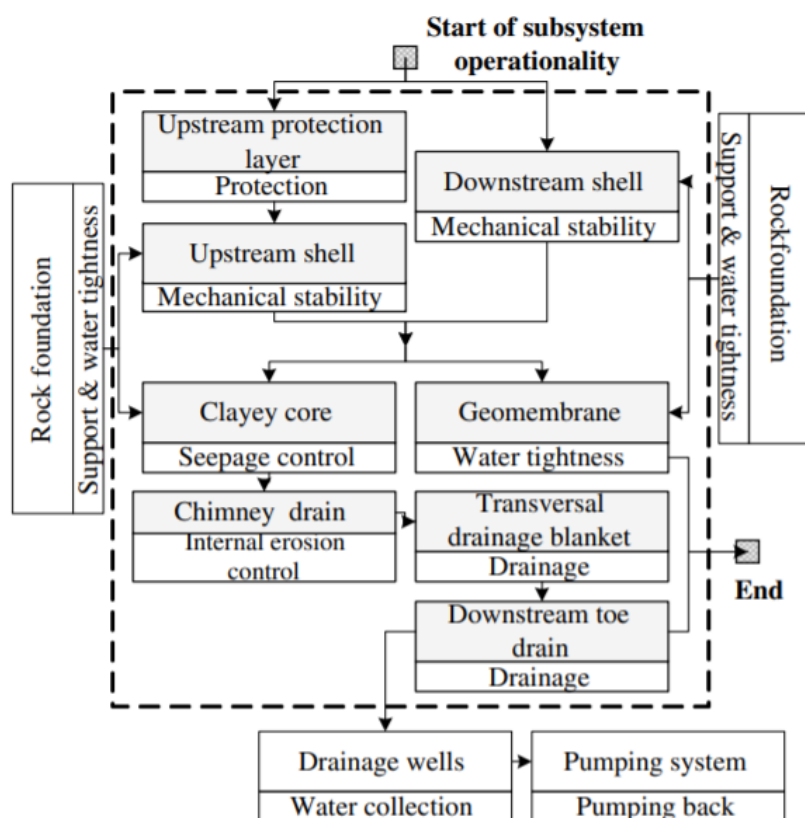
FMEA/FMECA-analyser er et verktøy som er tilpasset for mange forskjellige formål. De kan bidra til forbedret dimensjonering, noe som resulterer i høyere pålitelighet, bedre kvalitet, økt sikkerhet, og reduserte kostnader. Verktøyet kan også brukes til å etablere og optimalisere vedlikeholdsplaner for reparasjonssystemer og/eller bidra til kontrollplaner og andre kvalitetssikrings og risikostyringsprosedyrer. Den gir et kunnskapsgrunnlag om bruddmekanismer og -årsak og informasjon om korrigerende tiltak som kan brukes som en ressurs i fremtidig feilsøkingarbeid og som et treningsverktøy.

Både USA og UK standarder (Vedlegg H) anbefaler at FMEA suppleres med andre metoder, spesielt der flere bruddmekanismer og sekvensielle effekter må vurderes. FMEA viser seg å være "essensielt, men ikke tilstrekkelig". Metoden kan også resultere i veldig store regneark. Metoden er god for å supplere Feiltre-analyse metoden (presentert i hovedtekst). Det nyttigste med FMEA metoden er beskrivelse av dammen og dens funksjon, og blokkdiagrammet som viser viktige komponentene og deres innbyrdes forhold.

Eksempel

Figur A11 (i 2 deler) gir et eksempel på en FMEA-analyse av en dam (figuren er på engelsk for å bevare hovedelementene og intensjonen med analysen).

Comp. ID	Description	Functions and operability requirements
I.1.1	Reservoir slopes	Retention of pounded water and tailings
I.1.2	Reservoir bottom valley	Water-tightness at the reservoir basin
I.2	Remaining catchment basin	Catchment of the rainfall water
III.1.1	Upstream protection layer	Protection of the upstream shell from the waves' action
III.1.2	Upstream shell	To guarantee the mechanical stability of the dam
III.1.3	Downstream shell	To guarantee the mechanical stability of the dam
III.1.4	Clayey core	Positive control of the phreatic surface and seepage flow
III.1.5	Geomembrane	Watertightness of the zones above the core
III.1.6	Chimney drain	To prevent core internal erosion and drain seeping water
III.1.7	Drainage blanket	To drain and filter the water from the chimney drain and from the foundation
III.1.8	Downstream toe drain	To drain and filter the water from the drainage blanket
III.2.1	Rock foundation (below 244 m elevation)	To support the capacity of the embankment and provide some water-tightness at the core base
III.2.2	Rock foundation (above 244 m elevation)	To support capacity of the embankment and provide some water-tightness at the plinth base
VII.1	Spillway structure	To ensure a controlled discharge under exceptional inflow conditions
VIII.1	Drainage wells	To collect all the seepage water (through the embankment and foundation)
VIII.2	Pumping system	To pump the water collected in the wells back into the reservoir



Figur A11 forsetter på neste side

Comp.	ID	Failure mode	Root causes
Upstream protection layer	III.1.1.(1)	Erosion	Waving under wind action, chemical alterability, wetting – drying cycles and thermal variations (fracture and weathering) of rockfill material
Upstream shell	III.1.2.(1)	Instability	Seismic action, chemical alterability, insufficient interface resistance (soil/geomembrane)
Downstream shell	III.1.2.(2)	Excessive deformability	Chemical alterability, collapse, creep, inadequate compaction
	III.1.3.(1)	Instability	Seismic action, insufficient shear strength in the contact between materials applied in different phases
Clayey core	III.1.3.(2)	Excessive deformability	Third heightening loading, creep, inadequate compaction of third phase materials
	III.1.3.(3)	External erosion	Overtopping due to exceptional inflow conditions
	III.1.4.(1)	Excessive seepage (without cracking)	Chemical alterability, material dissolution, excessive hydraulic head and gradients
Geomembrane	III.1.4.(2)	Excessive seepage (with cracking)	Hydraulic fracturing
	III.1.5.(1)	Cracking	Stress cracking, chemical attack, perforation, incorrect installation (core and foundation connections, overlapping, sunlight exposure and punching)
Chimney drain	III.1.6.(1)	Internal and external instability	Inappropriate materials, incorrect construction, chemical alterability
Drainage blanket	III.1.6.(2)	Insufficient drainage	Insufficient thickness
	III.1.7.(1)	Internal and external instability	Inappropriate materials, incorrect construction, chemical alterability
Downstream toe drain	III.1.7.(2)	Insufficient drainage	Inappropriate grain-size distribution, insufficient dimensions given the water level increase
	III.1.8.(1)	Internal and external instability	Inappropriate materials, incorrect construction, chemical alterability
Rock foundation (below 244)	III.1.8.(2)	Insufficient drainage	Inappropriate grain-size distribution, insufficient dimensions given the water-level increase, external obstruction
	III.2.1.(1)	Excessive seepage	Rock discontinuities, schist chemical alterability, deficient clearing, grubbing and stripping
Rock foundation (above 244)	III.2.2.(1)	Excessive seepage	Rock discontinuities, schist chemical alterability, deficient clearing, grubbing and stripping, deficient connection to the concrete plinth

Figur A11. Eksempel på i FMEA-analyse (Santos et al., 2012):

Topp: Komponenter i analysen

Midten: Blokkdiagrammet

Bunn: Bruddmekanismer og -årsak

A2.6 Hendelsestre-analyse

Estimat av sannsynligheter i et hendelsestre

Det eksisterer flere tabeller for beskrivelser av sannsynlighetene. Så langt som mulig bør man knytte de subjektive vurderingene til erfaringer under sammenlignbare omstendigheter. Dette tvinger ekspertteamet til å veie inn relevant presedens. Forskjellige land har forskjellige tabeller og tallverdier. Tabellene i hovedteksten er blant dem som brukes oftest i risikovurderinger for en dam. Barneich et al. (1996) utviklet for kjernekraft-industrien en "*Subjective Probability Estimate Guide*" (Tabell A6). Retningslinjene gjenspeiler størrelsesorden av sannsynligheten og bør sammenlignes for å benytte konsistente sannsynlighetsverdier gjennom hendelsestre analysen.

Tabell A6. Retningslinjer for 'Subjektiv sannsynlighet estimat' utviklet for kjernefysikk industri (Barneich et al., 1996)

Beskrivelse	Størrelse på sannsynlighet
Forekomst er virtuelt sikker	1
Forekomst av tilstanden eller hendelsen observeres i den tilgjengelige databasen	0,1 (10^{-1})
Forekomsten av tilstanden eller hendelsen er ikke observert eller er observert i én enkelte situasjon i den tilgjengelige databasen. Flere potensielle bruddscenarier kan identifiseres	0,01 (10^{-2})
Forekomsten av tilstanden eller hendelsen observeres ikke i den tilgjengelige databasen. Det er vanskelig å tenke på noe sannsynlige bruddscenarier. Imidlertid kan et enkelt scenario identifiseres etter betraktelig innsats.	0,001 (10^{-3})
Tilstanden eller hendelsen har ikke blitt observert, og ingen sannsynlige scenarier kan identifiseres, selv etter betydelig innsats.	0,0001 (10^{-4})

Analyser som hendelsestre-analyser gir et "øyeblikksbilde" av risikoen. Risiko kan endre med tid ettersom, f.eks., hendelser skjer på og rundt dammen, rehabiliteringstiltak igangsettes og kompletteres, vannstanden påvirkes av klima, anleggsarbeid gjennomføres i nærheten av dammen eller berørte personer eller infrastruktur endres. Risikovurderinger kan oppdateres ved, f.eks., dammens hovedtilsyn eller ved et spesielt tilsyn. Annen gangs risikovurdering er naturligvis lettere enn den første, og vanligvis raskere, fordi det eksisterer allerede en tidligere analyse som man kan bygge på.

A2.7 Bayesisk nettverk (BN)

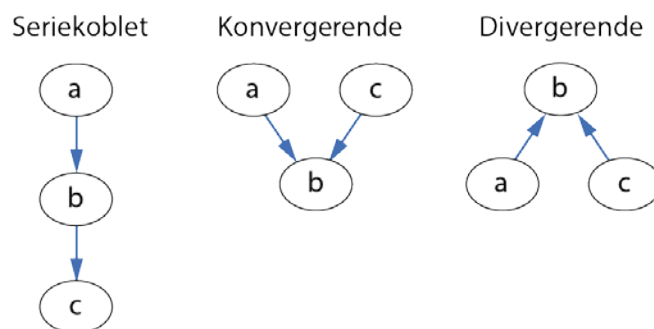
Om metoden

Et Bayesisk nettverk (BN, "Bayesian network") er et verktøy for å modellere usikre hendelsessekvenser. Bayesisk nettverk er utviklet i faget om kunstig intelligens "Artificial Intelligence" og er en utvidet og kraftigere form på hendelsetre-analyse²³.

Et Bayesisk nettverk lager en grafisk og numerisk probabilistisk modell som beskriver relasjoner blant hendelser. Nettverket kan uttrykkes som følger:

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

hvor B representerer nettverket, G er en graf med noder (Z) og buer (E): Z er en vektor med hver usikker parameter i analysen ($z_1, z_2, \dots, z_n$), E representerer de probabilistisk betinget relasjoner blant de usikre parametrene. Figur A12 illustrerer tre typer relasjoner mellom hendelsene: seriekoblet, konvergerende og divergerende. En nettverksrelasjon kan ikke være en lukket sirkel i fremstillingen.



Figur A12. De tre relasjoner mellom hendelser a, b og c i et Bayesisk nettverk

Gjennomføring av analysene

Valg av input-parametere for en Bayesisk nettverksanalyse gjennomføres best ved hjelp av en workshop, hvor sannsynlighetene og relasjonen blant hendelsene diskuteres. Samme metode som for hendelsetre-analyse (ETA) er brukt for å diskutere og fastsette sannsynligheter for hver hendelse. Selve beregningene og grafikken utarbeides med Matlab programpakken (Murphy, 2001).

Input og output

Sannsynlighetsverdier og usikkerheten i sannsynlighetsverdiene for hver hendelse må fastsettes, samt relasjoner mellom hendelsene. Analysen gir bruddsannsynlighet for hvert bruddscenario og den totale bruddsannsynligheten for alle scenariene samlet. I tillegg kan analysen gi spredningen (PDF) av bruddsannsynligheter for dammen, med et gjennomsnitt og minimum og maksimum verdi for bruddsannsynlighet.

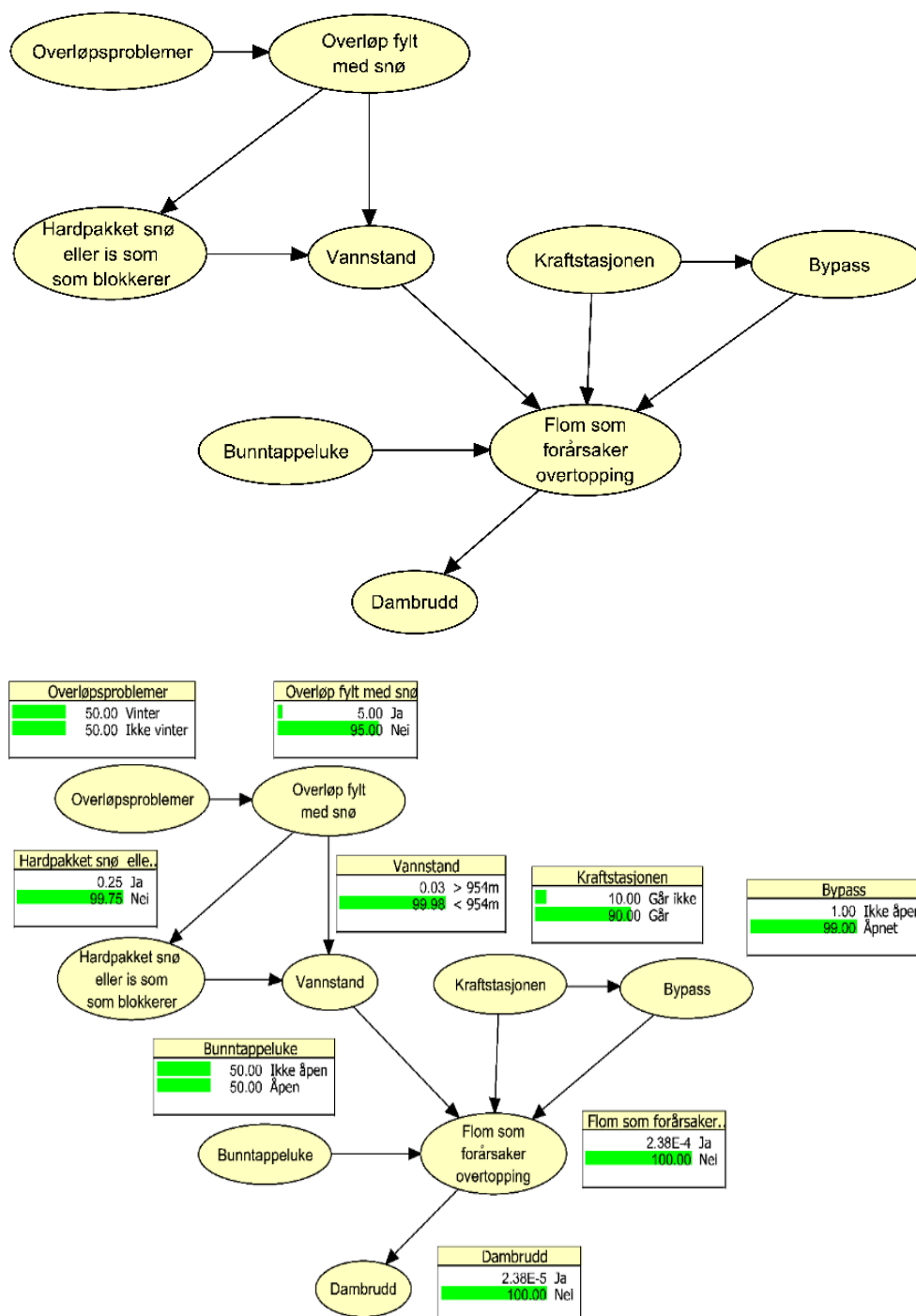
Eksempel

En Bayesisk nettverksanalyse for bruddscenarioet 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet' er gitt som eksempel. I dette tilfellet supplerte analysene resultatene fra hendelsetre-analysene. En Monte Carlo analyse ble også gjort, hvor verdiene av områdetall for sannsynlighetene ble brukt.

Figur A13 illustrerer nettverket med relasjonene blant hendelsene for tilfellet 'Is og hardpakket snø

²³ Metoden har blitt anvendt for dammer de siste 4-5 årene.

som blokkerer overløpet". Sannsynlighetene på figuren er gitt som prosenttall (i.e. 99=0.99). Et best estimat, nedre estimat og øvre estimat av sannsynlighetene ble brukt for hver hendelse i nettverket. Verdiene ble etablert gjennom en konsensus på samme måte som for hendelsestre-analyser. Kun resultatet for best estimat er vist i figuren.



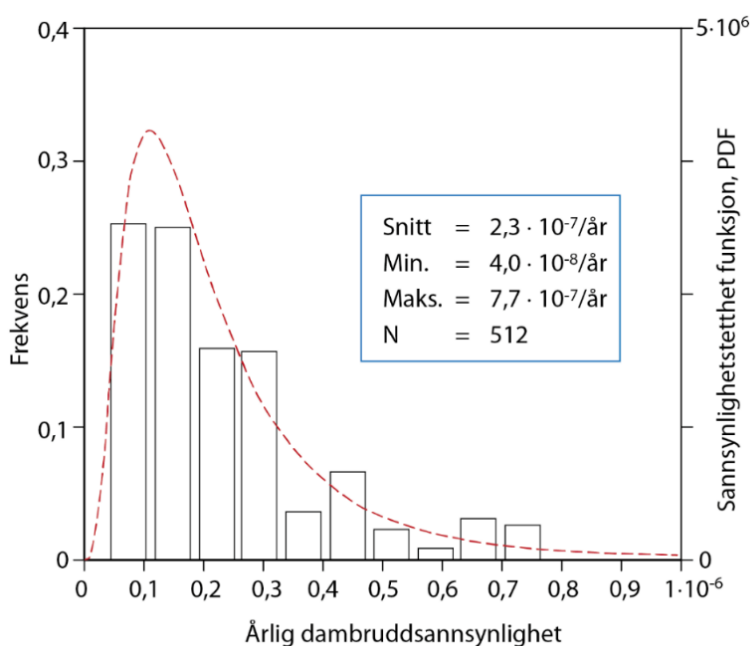
Figur A13. Bayesisk nettverksanalyse av brudd forårsaket av 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet': nettverksstruktur (øvre) og tallverdier (nedre) (sannsynligheter i %poeng; grønne stolper viser relativ størrelse)

Monte Carlo analyser ble også kjørt for å avgrense effekten av nedre og øvre estimer på den beregnede bruddsannsynlighet og kvantifisere gjennomsnittet. Monte Carlo simuleringene ble gjennomført med "Bayesisk Nettverk Toolbox" i MATLAB. Figur A14 viser fordelingen av bruddsannsynlighetene for analysen. Monte Carlo resultatene er gitt som et histogram av bruddsannsynlighet. En lognormal funksjon ble brukt som "best fit" av histogrammet. Minitabellen i Figur A14 oppsummerer statistisk bruddsannsynlighet P_f : maksimum P_f (Max), minimum P_f (Min), gjennomsnitt P_f og N (antall simuleringer). Med 512 Monte Carlo simuleringer har bruddsannsynlighet forårsaket av 'is og hardpakket snø som blokkerer overløpet' følgende verdier:

$$\text{Snitt } (P_{f \text{ årlig}}) = 2,3 \cdot 10^{-7}/\text{år}$$

$$\text{Minimum } (P_{f \text{ årlig}}) = 4,0 \cdot 10^{-8}/\text{år}$$

$$\text{Maksimum } (P_{f \text{ årlig}}) = 7,7 \cdot 10^{-7}/\text{år}$$



Figur A14. Probabilistisk fordeling av bruddsannsynlighet forårsaket av 'is hardpakket snø som blokkerer overløpet'

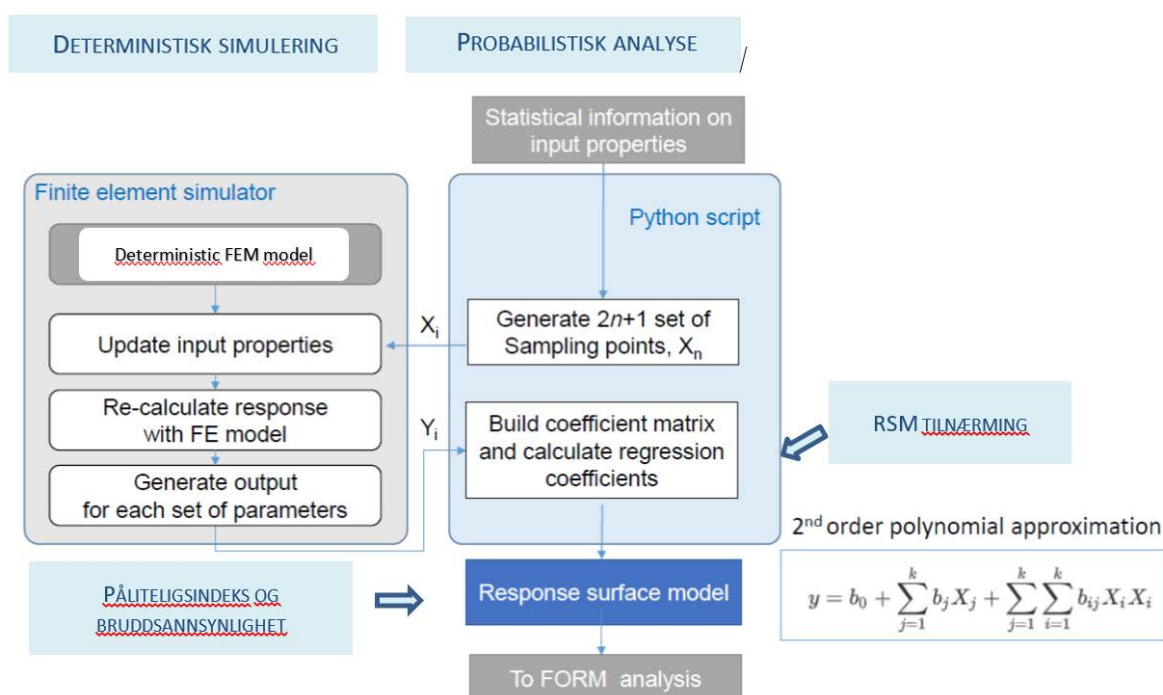
A2.8 "Response surface method" (RSM)

Om metoden

"Response surface" metoden kan modellere komplekse problemer som ellers beregnes med, f.eks., elementmetode (FEM). RSM brukes vanligvis i en to-trinns prosedyre: I første trinn gjentas deterministiske FEM-analyser flere ganger ved å variere hver usikker inngangsparameter; i andre trinn er resultatene fra de deterministiske analysene tilnærmet med et andreordens polynom som statistikk modellerer enten deformasjoner, vanntrykk, eller annen parameter av interesse.

Gjennomføring av analysen

Figur A15 illustrerer metoden. Sannsynlighetsestimatene oppnås ved å kombinere de deterministiske 2D eller 3D analyser med en "responsoverflate" ("response surface") og en pålitelighetsbasert beregning av bruddtilstand som FORM (se A2.9) og SORM²⁴. Når en god responsoverflate er funnet, gjennomføres følgende etapper for å beregne bruddsannsynlighet: (1) kvantifisere usikkerhet i inngangsparametere og analysemetoden; (2) uttrykke grensetilstandsfunksjonen (brudd); (3) gjøre FORM-analysen; og (4) beregne bruddsannsynlighet (P_f) og pålitelighetsindeks (β).



Figur A15. Responsoverflate (RSM) metode for analyse av bruddsannsynlighet

Hver inngangsparameter i analysen uttrykkes statistisk. For hvert scenario er FEM-analysene kjørt $(2n+1)$ ganger (hvor n er antall usikre variabler) for å etablere RSM-modellen (høyre på Fig. A15). Polynomet er deretter brukt i FORM-analyser for å beregne pålitelighetsindeks og bruddsannsynlighet. Polynomet erstatter en hel mengde FEM analyser og er mye enklere å analysere probabilistisk.

²⁴ Prosedyren kan standardiseres for å effektivisere analyseprosessen. En alternativ sannsynlighetsvurdering vil være å gjenta de deterministiske analysene ved å bruke Monte Carlo-simulering flere tusen eller 100-tusen ganger. Ved lave bruddsannsynligheter trenger man et stort antall simuleringer, og det kan være vanskelig å gjennomføre dette for kompliserte FEM beregninger.

A2.9 FORM/SORM, First and Second Order Reliability Method

Om metoden

First Order Reliability Method (FORM) og Second Order Reliability method (SORM) (Hasofer og Lind, 1974) beregner pålitelighetsindeks og bruddsannsynlighet, og gir i tillegg en rangering av betydningen av inngangsparametere på bruddsannsynligheten. Hasofer & Lind (1974) foreslo en invariant definisjon for pålitelighetsindeksen, som er direkte relatert til bruddsannsynlighet (Vedlegg F). Utgangspunktet for FORM er definisjonen av grensetilstand-funksjonen $G(X)$, der X er vektoren for de usikre parametere i analysen. Funksjonen defineres slik at $G(X) > 0$ betyr tilfredsstillende oppførsel og $G(X) \leq 0$ betyr brudd. Hvis sannsynlighetstetthetsfunksjon for alle tilfeldige variabler $F_X(X)$ er kjent, er bruddsannsynligheten P_f gitt av

$$P_f = \int_L F_X(X) dX$$

hvor L er domenet til X hvor $G(X) \leq 0$. Generelt kan integrasjonen ovenfor ikke løses analytisk. I FORM-tilnærmingen transformeres vektoren av tilfeldige variabler X til standardnormal området U , der U er en vektor av uavhengige Gaussiske variabler med null middel- og standardavvik på 1, og hvor $G(U)$ er en lineær funksjon. Bruddsannsynligheten P_f er da (der P betyr "sannsynligheten for at ..."):

$$P_f = P[G(U) < 0] \approx P\left[\sum_{i=1}^n \alpha_i U_i - \beta < 0\right] = \Phi(-\beta)$$

hvor α_i er retningskosinus for tilfeldig variabel U_i , β er avstanden mellom origo og hyperplanet $G(U) = 0$, n er antallet grunnleggende tilfeldige variabler X , og Φ er standard normalfordelingsfunksjon. Vektoren til retningskosinusene (*direction cosines*) til de tilfeldige variablene (α_i) kalles vektoren for følsomhetsfaktorer, og avstanden β fra opprinnelsen til "designpunktet" er pålitelighetsindeksen.

Figur A16 illustrerer hvordan FORM fungerer. Grensetilstandsfunksjonen $g(X_n)$ er nøkkel for definisjonen av de trygge og utrygge forholdene. Analysen har følgende trinn:

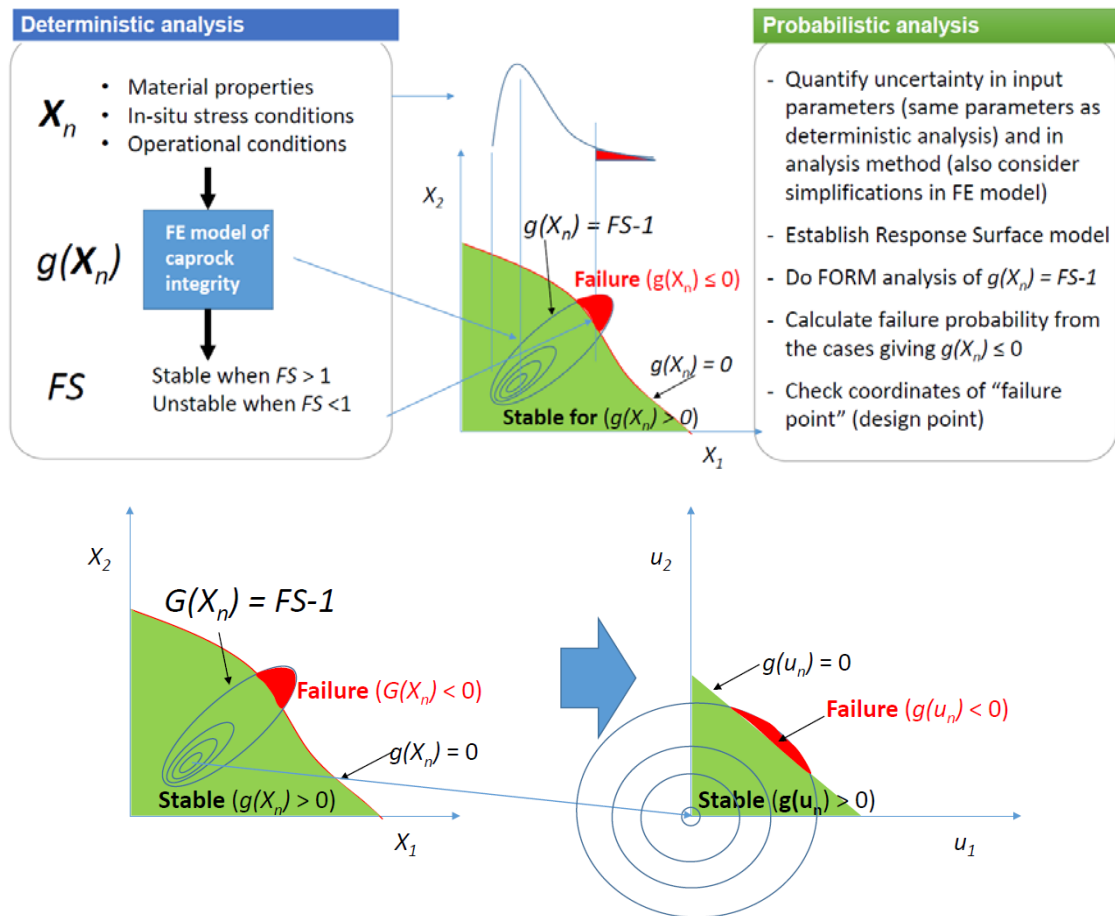
- Kvantifisere usikkerheten i parameterne og analysemetoden.
- Uttrykke funksjonen for grensetilstand.
- Kjøre FORM-analysen (tilsvarer millioner av Monte Carlo-simuleringer).
- Beregne bruddsannsynligheten (P_f), pålitelighetsindeksen (β) og følsomheten av P_f til hver usikker parameter.
- Kontroller "designpunktet" (der er brudd) for å sikre at koordinatene stemmer overens med den modellerte situasjonen.

Bruddsannsynligheten er antall tilfeller der brudd oppstår (ved bruk av de tilfeldige jordparametere) delt på totalt antall tilfeller som er vurdert. Anvendelser av FORM-tilnærmingen til problemer for konstruksjoner til havs er gitt i Lacasse og Nadim (2007). SORM har en annen ordre (ikke lineær) tilnærming av "designpunktet" og gir vanligvis svar som er nær svarene fra FORM.

Eksempel

Under en hendelsestre workshopen for en dam ble sikkerheten av en betong platedam mot glidning og velting under islast om vinteren vurdert (Fig. A17). Platedammen har 15 pilarer.

For en veldefinert problemstilling som glidning og velting av en betongpilar eksisterer det mer egnede verktøy enn f.eks. en hendelsestre-analyse. "First- og Second Order Reliability Analysis" (FORM og SORM-analyser) verktøy som egner seg til den type analyse. Softwaren COMREL ble benyttet.



Figur A16. Illustrasjon av FORM analyse



Figur A17. Betong platedam med 15 pilarer. Pilar 2 og 5, nr 2 og 5 fra venstre, er ansett som de mest kritiske

Pilar 2 og 5 ble valgt som de to mest kritiske pilarene. Islasten ble antatt som 500 kN, dvs 100 kN/m over en bredde på 5 m. I de probabilistiske beregningene for å vurdere bruddsannsynlighet er islasten antatt å være representativ for en 500-års islast som "base-case". I SORM-analyser av stabilitet ble hele den probabilistiske fordelingen av islasten, dvs alle returperioder, inkludert i analysen. Effekt av usikkerheten i returperioden i islasten på 100 kN/m ble også vurdert med en returperiode på 10 år for 100 kN/m islasten. Resultatene av deterministiske last-analyser ble anvendt i FORM og SORM-analysene som snittverdier, unntatt for friksjonsvinkelen mellom betong og fjell. Et snitt på 45° ble brukt som det best estimatet for friksjonsvinkel, med et standard avvik på 3°. Tabellen nedenfor oppsummerer de beregnede årlige bruddsannsynlighetene under islast fra SORM-analysene.

Årlig bruddsannsynlighet for Pilar 2 og 5 i platedammen for en islast på 100 kN/m med returperiode på 500 år.

Pilar	Årlig bruddsannsynlighet (SORM), P_f årlig	Årlig pålitelighetsindeks (SORM), β_f årlig
2	$1,0 \cdot 10^{-5}$	4.3
5	$1,3 \cdot 10^{-5}$	4.3

Den beregnede bruddsannsynligheten for hver av Pilar 2 og Pilar 5 er på 10^{-5} /år. Den ene og mest signifikante usikker parameteren er islasten (Fig. A18). På den ene siden oppfører den maksimale islasten seg som en kortvarig støtlast: Når islasten er på sitt høyeste, bryter isen sammen og lasten er straks mye mindre. På den annen siden, hvis returperioden for islasten på 100 kN/m er kortere enn 500 år, øker bruddsannsynligheten. For en 100 kN/m islast med en 10-års returperiode øker den beregnede bruddsannsynligheten til $3 \cdot 10^{-3}$ /år og $2 \cdot 10^{-4}$ /år for henholdsvis pilar 2 og 5. Usikkerheten i både størrelse og returperiode i islasten har dermed en meget stor påvirkning på den beregnede bruddsannsynlighet. Med en bruddsannsynlighet på $3 \cdot 10^{-3}$ /år må det vurderes tiltak.

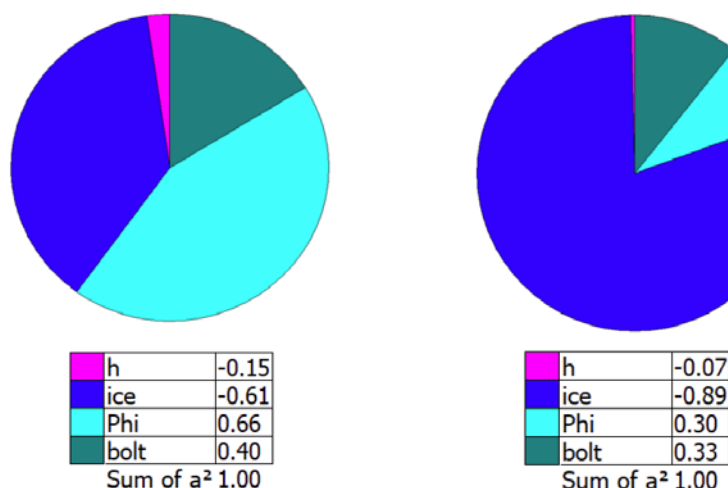


FigurA18. Sensitivitetsfaktorer for parameterne i SORM analyse, Pilar 2:
 Venstre: Base Case; høyre: 10-år returperiode

For en enda mer komplett probabilistisk analyse kan man foreta en systemanalyse (alle 15 pilarer, med programvaren SYSREL) og beregne bruddsannsynlighet for samtlige 15 pilarer. De beregnede årlige bruddsannsynligheter for Pilar 2 og Pilar 5 er på 10^{-5} /år. Sikkerhetsfaktor for den andre pilarene var mye høyere enn for Pilar 2 og 5. De andre pilarene vil ikke bidra mye til å øke bruddsannsynlighet. System bruddsannsynligheten øker til $2 \cdot 10^{-5}$ /år med en islast på 100 kN/m med returperiode på 500 år, og til $3,5 \cdot 10^{-3}$ /år med en islast på 100 kN/m med returperiode på 10 år.

A2.10 *Stress testing*

Om metoden (for ekstreme hendelser)

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

En systemanalyse i et slikt tilfelle kan gjennomføres med "stress testing"-metoden kombinert med flere av de probabilistiske metodene nevnt ovenfor. "Stress testing" er brukt i dag i kjernekraftindustrien og for å teste flysikkerhet og sårbarhet i bank-bransjen. Innen geoteknikk har "stress testing" nylig vært brukt i Hong Kong for å forutsi skredscenarier og sårbarheten av eksisterende beredskap under ekstrem nedbør. Metoden egner seg også for å vurdere et system av flere dammer som påvirker hverandre.

Stress testing er et av de nyeste fremtidige verktøyene innenfor risikovurdering.

Etter Tōhoku-jordskjelvet som forårsaket en tsunamibølge og Fukushima Dai-ichi ulykken på WENRA ("West European Nuclear Regulation Association") i 2011 og 2012 "stress testing" for alle kjernekraft installasjoner i Europa.

A3 Konsekvensanalyse ("Consequence analysis")

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 området, gjennom dambruddbølgeberegninger der intensiteten uttrykkes ved en kombinasjon av bølgehastighet og vanddybde.
- Hvilke objekter er eksponert nedstrøms, både i rom og tid. Varslingsmuligheter og beredskap kartlegges.
- Tap av liv og materielle ødeleggelser kan beregnes gjennom relasjoner for dødelighet og skader som funksjon av intensitet av dambruddbølgen.

NVE (2014) beregner konsekvenser i antall boligenheter som er eksponert med 2,2 personer i hver boligequivalent. NVE (2014) gir også en prosedyre for forenklete dambruddbølgeberegninger. Dambruddbølgens utbredelsesområde/rekkevidde skal være så langt nedstrøms at den ikke lenger innebærer noen fare for liv eller materielle ødeleggelser. Det finnes også metoder for å beregne konsekvenser i mer detalj.

Figur A19 gir en oversikt over mulige konsekvenser forårsaket av et dambrudd. Konsekvensene er delt i tre kategorier: liv og helse, økonomi (bare materielle verdier) og miljøkonsekvenser (Hartford og Baecher, 2004). Tap som ikke inngår i Figur A19 er de samfunnsøkonomiske tap som skyldes tap av liv og helse, erstatningskostnader for dameieren ved tap av liv og helse, samt dameiers tap av omdømme og tillit i samfunnet.

A3.1 Tap av liv

Både UK og USA har modeller for å beregne dødelighet²⁵.

USBoR publiserte Tabell A7 hvor dødelighetstall er gitt i forhold til tilgjengelig varslings tid og forståelsen av faren (BoR, 1999).

Det er viktig å være klar på hvilken definisjon som brukes for dødelighet. For eksempel definerer USBoR dødeligheten som andelen av den ikke-evakuerte befolkningen som mister livet.

Eksponering

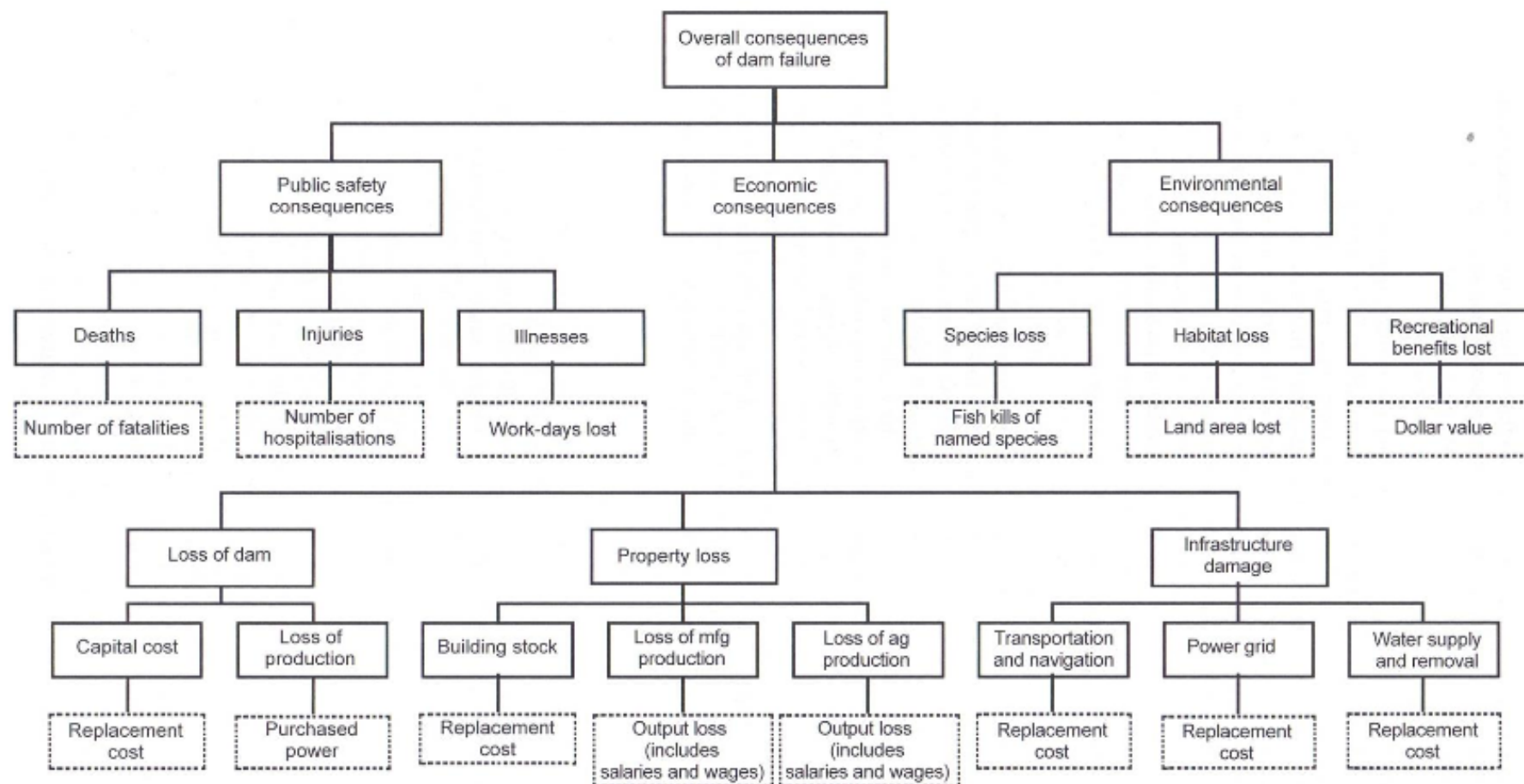
For romlig eksponering gjøres det en flommodellering/dambruddbølgeberegning som avhenger av bruddscenariet, bruddparametere og nedstrøms forhold.

For tidsmessig eksponering kan det være aktuelt å se på folkets oppholds mønster mot tid og sesong. Tidsmessig eksponering vil også avhenge av om dambruddet er varslet, varslings tid, kvalitet og tydelighet i varslings og påfølgende instruksjoner.

Faktorer som påvirker antall omkomne som følge av dambrudd:

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

²⁵ "Fatality rate" eller sannsynlig antall døde per antall personer i fare.



Figur A19. Oversikt over mulige konsekvenser fra et dambrudd (liv og helse, økonomiske og miljøkonsekvenser (Hartford og Baecher, 2004)

Tabell A7. Forventet dødelighet forårsaket av dambrudd (BoR, 1999)

Flomintensitet	Varslingstid (min)	Forståelse av faren	Dødelighet
Høy	0 (ingen)	---	0,75 (0,3-1,0)
	15-60	Uklar Presis	Bruk tallene ovenfor med estimert antall eksponerte personer etter utstedt varslings.
	>60	Uklar Presis	
Middels	0 (ingen)	---	0,15 (0,03-0,35)
	15-60	Uklar Presis	0,04 (0,01-0,08) 0,02 (0,005-0,04)
	>60	klar Presis	0,03 (0,005-0,06) 0,01 (0,002-0,02)
	0 (ingen)	---	0,01 (0-0,02)
Lav	15-60	Uklar Presis	0,007 (0-0,015) 0,002 (0-0,004)
	>60	Uklar Presis	0,0003 (0-0,0006) 0,0002 (0-0,0004)

Figuren A20 viser de britiske (Brown & Gosden, 2004) og amerikanske (USBoR, 1999) anbefalingene for å beregne dødeligheten i den eksponerte befolkningen som en funksjon av varslingsstid og intensiteten i dambruddbølgen. For å fastsette dødeligheten settes inn verdien av vannutslippets intensitet (horisontal akse) og det velges en av de røde, grønne eller sorte linjene.

A3.2 Materielle tap

For beregning av skader forårsaket av dambruddbølgen kombinerer man hastighet og dybden av strømmen. Skader forårsaket av dambruddbølge foreslås beregnet etter enten britiske (Brown og Gosden, 2004) eller amerikanske anbefalingene (USACE, 2012) i Tabell A8 og A9 nedenfor.

Tabell A8. Bygningsskade som funksjon av flomhastighet og dybde av dambruddbølgen (Brown og Gosden 2004)

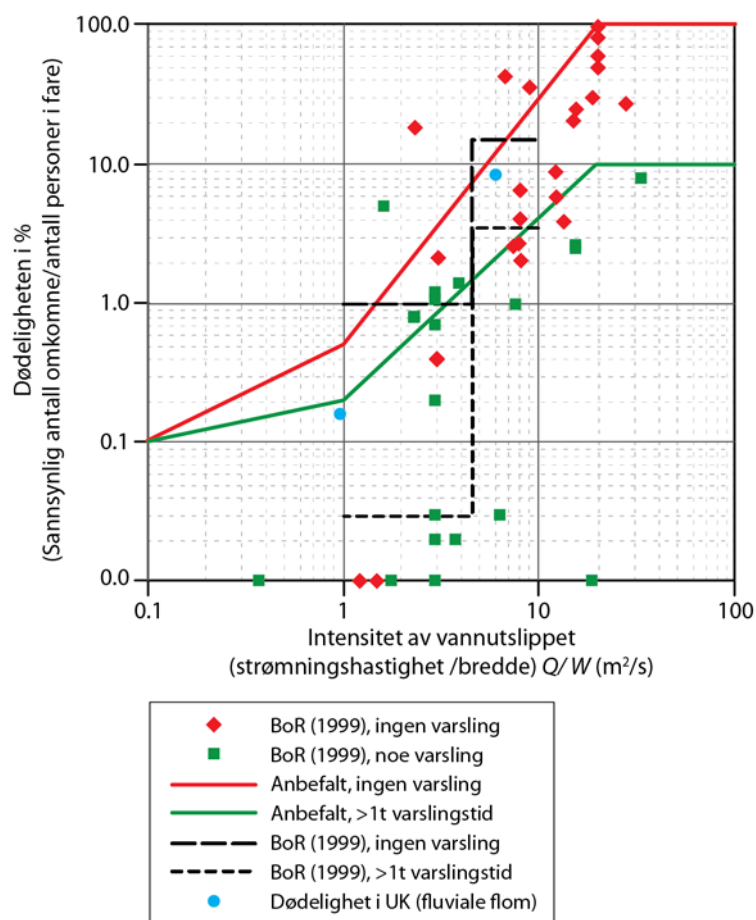
Alvorlighet av skade på bygninger	V = snitthastighet, D = punkt dybde
Ingen skade	Bølgen helt innenfor strømningskanalen
Kun oversvømmelse	$V < 2\text{ m/s}$ eller $D \times V < 3\text{ m}^2/\text{s}$
Strukturelle skader	$V > 2\text{ m/s}$ eller $3\text{ m}^2/\text{s} < D \times V < 7\text{ m}^2/\text{s}$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

Tabell A9. Kriterier for skade på bygninger etter USACE (2012)

Type bygning	Delvis skadet	Ødeleggelse
Trebygning		
Ikke forankret	$D \times V \geq 2\text{ m}^2/\text{s}$	$D \times V \geq 3\text{ m}^2/\text{s}$
Forankret	$D \times V \geq 3\text{ m}^2/\text{s}$	$D \times V \geq 7\text{ m}^2/\text{s}$
Murverk betong, murstein	$D \times V \geq 3\text{ m}^2/\text{s}$ og $V \geq 2\text{ m/s}$	$D \times V \geq 7\text{ m}^2/\text{s}$ og $V \geq 2\text{ m/s}$

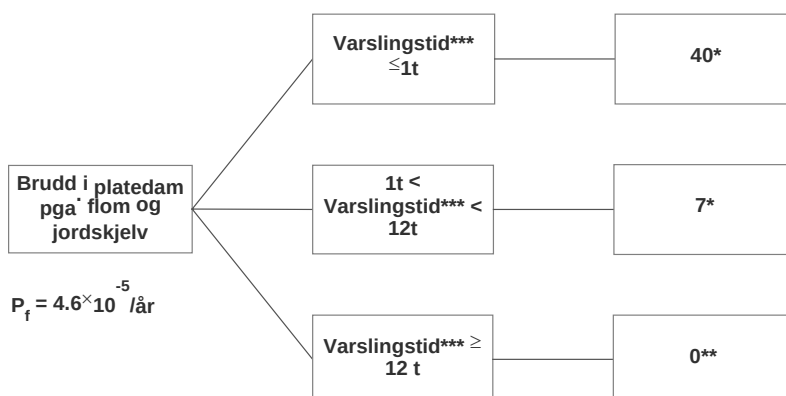
Eksempel

Figur A21 til A23 viser et eksempel av konsekvensanalyse av et dambrudd forårsaket av flom eller jordskjelv, henholdsvis for liv og helse, miljø og økonomi. For de tre tilfellene er den beregnede totale bruddsannsynligheten fra hendelsestre-analysen på $4,6 \cdot 10^{-5}/\text{år}$ brukt som inngangsbruddsannsynlighet i hendelsestreet for konsekvenser. Det er mulig å fortsette beregningen for å etablere risiko for tap av liv (antall omkomne pr år) og beregne samfunnsøkonomiske tap.

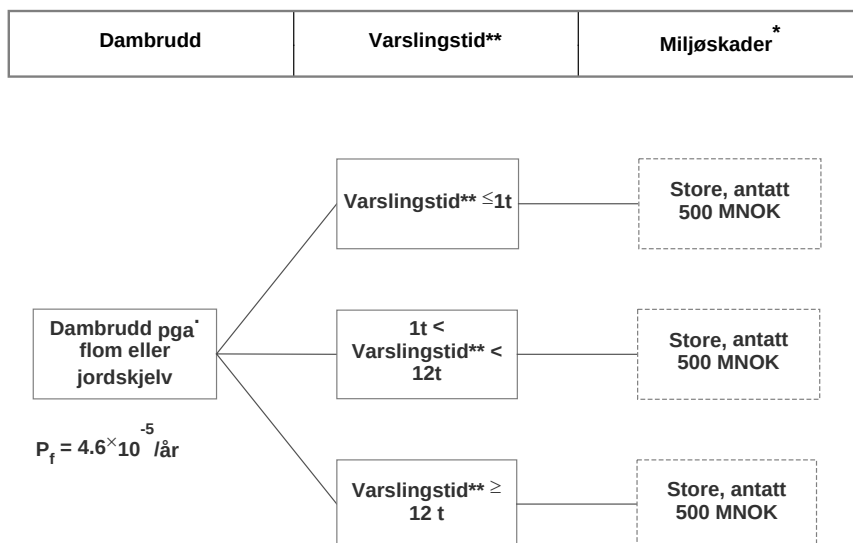


Figur A20. Beregning av dødelighet som en funksjon av vannutslippet med anbefalte verdier av Brown & Gosden (2004) sammenlignet med USBoR (1999, skrevet BoR) verdier

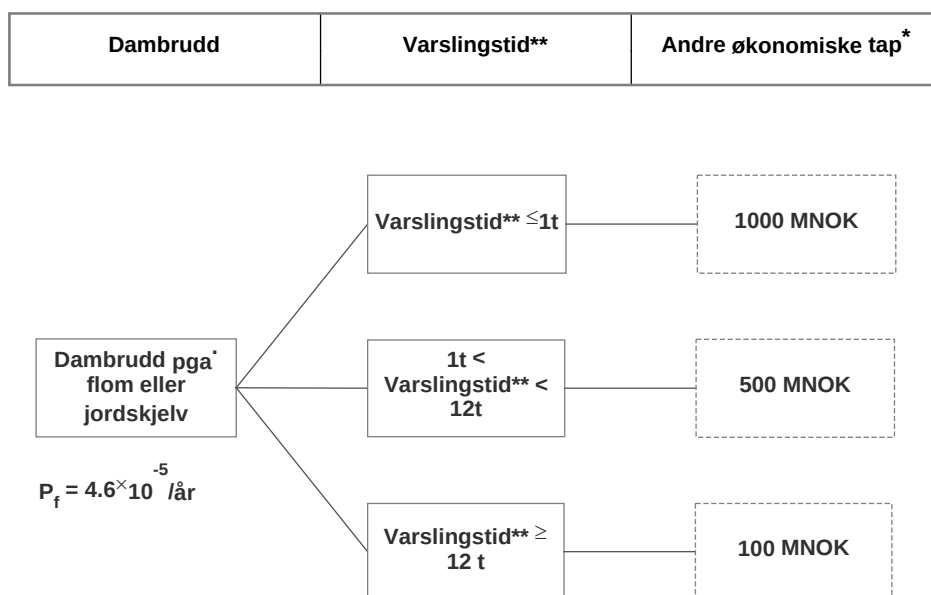
Dambrudd	Varslingstid***	Antall omkomne
----------	-----------------	----------------



Figur A21. Eksempel på analyse av konsekvens av dambrudd for liv og helse (det antas at beredskapen er på plass med varslingsrutiner at det brukes SMS-varsling til alle telefoner innenfor det eksponerte området)



Figur A22. Eksempel på analyse av konsekvens av dambrudd for miljø (det antas at beredskapen er på plass med varslingsrutiner). Tallene er kun eksempler.

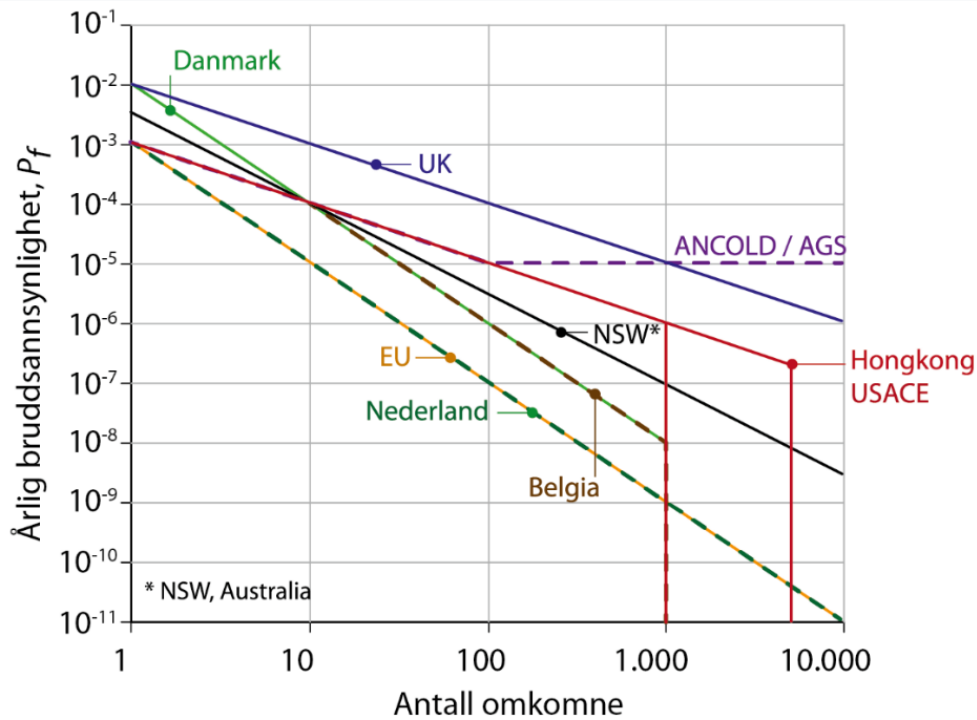


Figur A23. Eksempel på analyse av konsekvens av dambrudd for økonomiske tap (det antas at beredskapen er på plass med varslingsrutiner). Tallene er kun eksempler.

A4 Risikoakseptkriterier

A4.1 Kriterier fra flere land

Figur A24 to A30 viser risikoakseptkriterier fra forskjellige land. Disse anbefalingene er grunnlaget for anbefalt risikoaksept for norske dammer i hovedteksten. I Figur A24 er noen anbefalinger for damanlegg, andre for menneskeskapte skråninger, noen er mer generelle. Den mest brukte anbefalingen i dag er anbefalingen fra Hong Kong og USACE (den er også brukt for dammer i Canada, Vedlegg H).



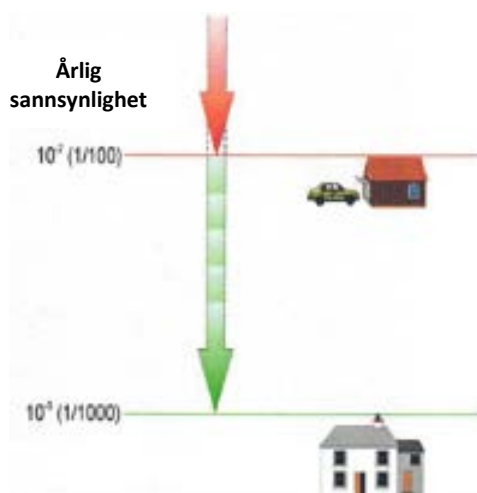
Figur A24. Risikoakseptkriterier fra flere land

I Norge brukes årlige hendelses-sannsynlighetsverdier knyttet til skred og snøskred på 10^{-2} for bygg som garasjer og 10^{-3} for bebodde boliger (PBL 2008, rettet 2010), som vist i Figur A25. For offshoreinstallasjoner anbefaler NORSOK (2012) at den totale påliteligheten skal ha en årlig bruddsannsynlighet mindre enn eller lik 10^{-4} (årlig pålitelighetsindeks $\beta \geq$ enn 3,7).

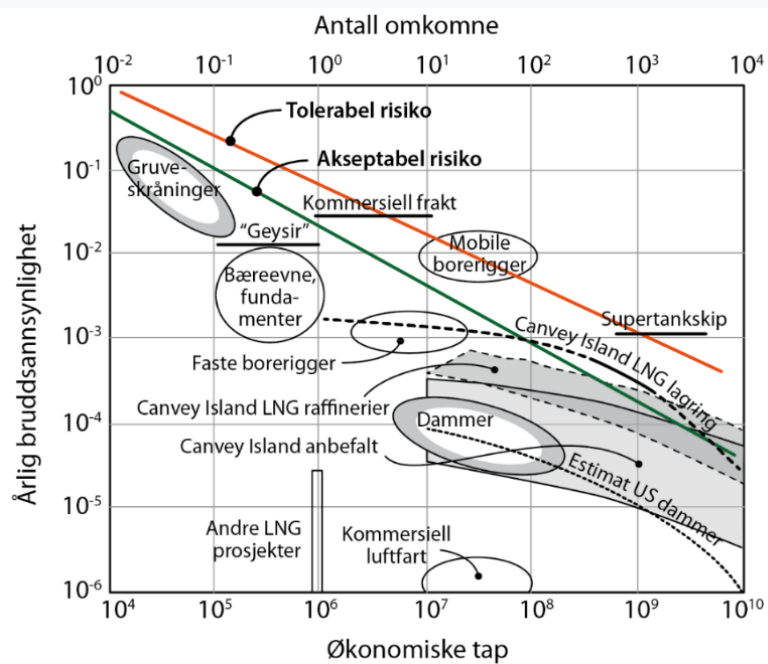
Det første praktiske risikodiagrammet (1984) er vist i Figur A26. Whitman's (1984) anbefaling var basert på erfaring for hvor ofte forskjellige typer konstruksjoner svikter. I Whitmans-diagram foreslås en bruddsannsynlighet på 10^{-3} pr år med tap på 100 MUSD (1984 dollar) som akseptabel.

Figur A27 viser en anbefaling fra USACE (1997) for infrastruktur i USA²⁶. Anbefalingene fra US Bureau of Reclamation (USBoR) er vist i Figur A28 og A29. UK foreslo tre soner med akseptabel, tolerabel og ikke akseptabel risiko (Figur A30), men uten kvantifisert sannsynligheter. 10^{-3} som marginalt akseptabel.

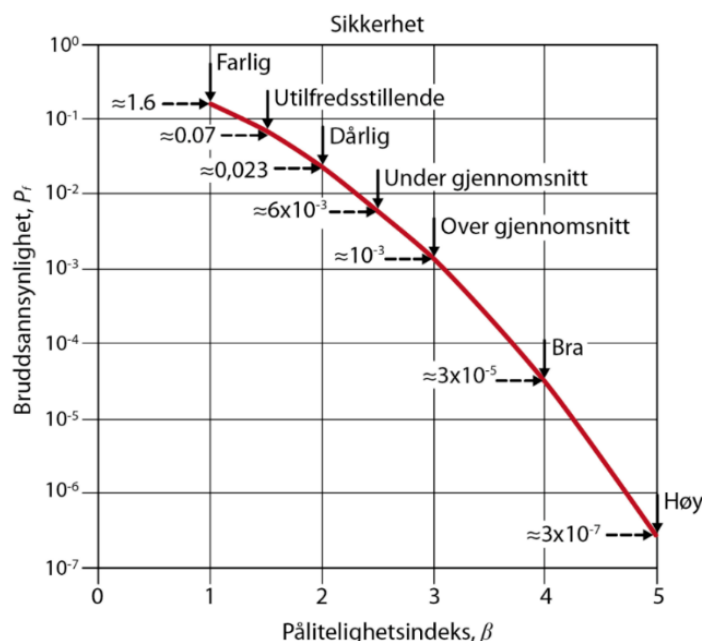
²⁶ USACE (1997) er en gammel referanse. På denne tiden var man ikke så opptatt om en referansetid og nødvendighet av å spesifisere en sannsynlighet pr år. Tallene var antagelig ment som en årlig sannsynlighet fordi senere i artikkelen skrives det at sannsynligheten vil være høyere over hele konstruksjonens levetid.



Figur A25. Grense hendessannsynligheter som brukes i Norge for skred

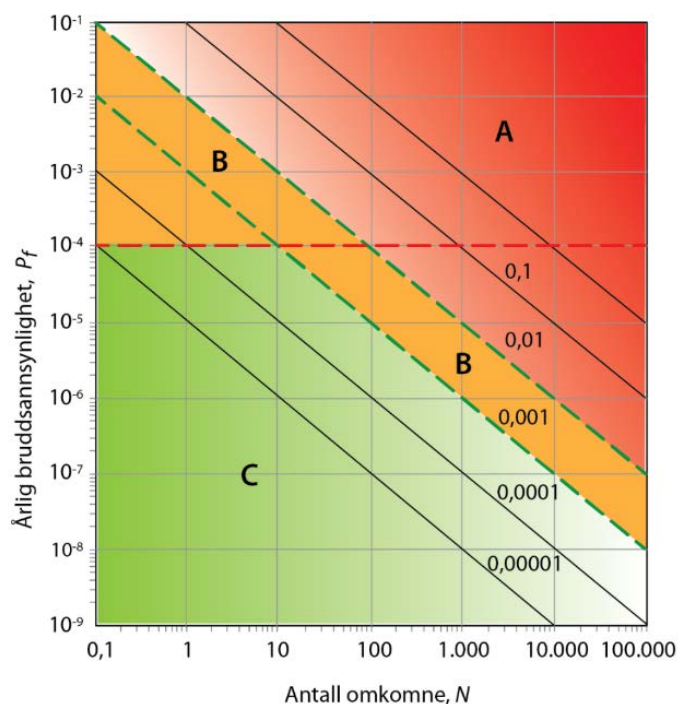


Figur A26. Akseptabel (grønn) og tolerabel (oransje) risiko for konstruksjoner (Whitman 1984; Baecher & Christian 2003) (økonomiske tap i 1984 USD)

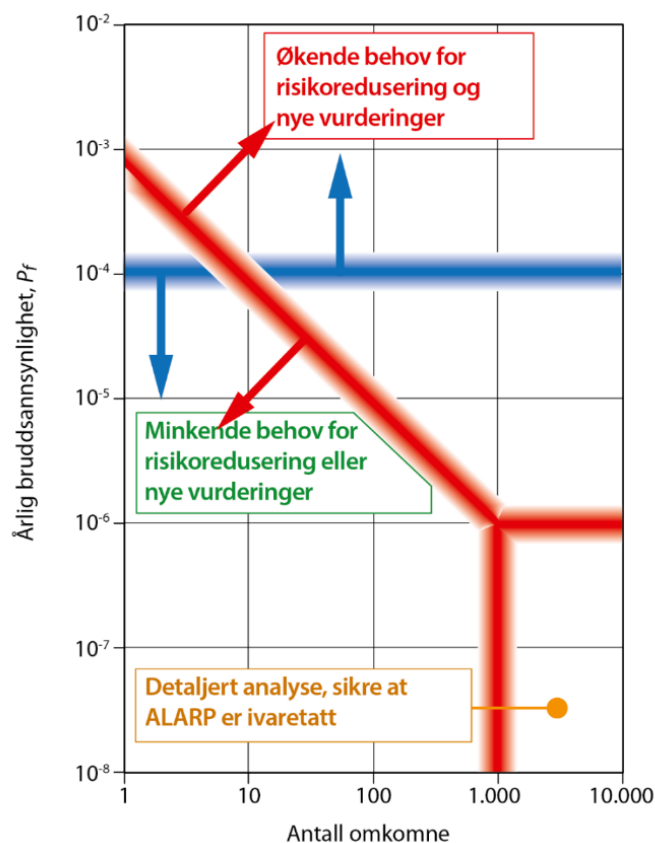


Figur A27 Pålitelighetsindeks og bruddsannsynlighet og vurdering av sikkerhet for infrastruktur på land (USACE, 1997)

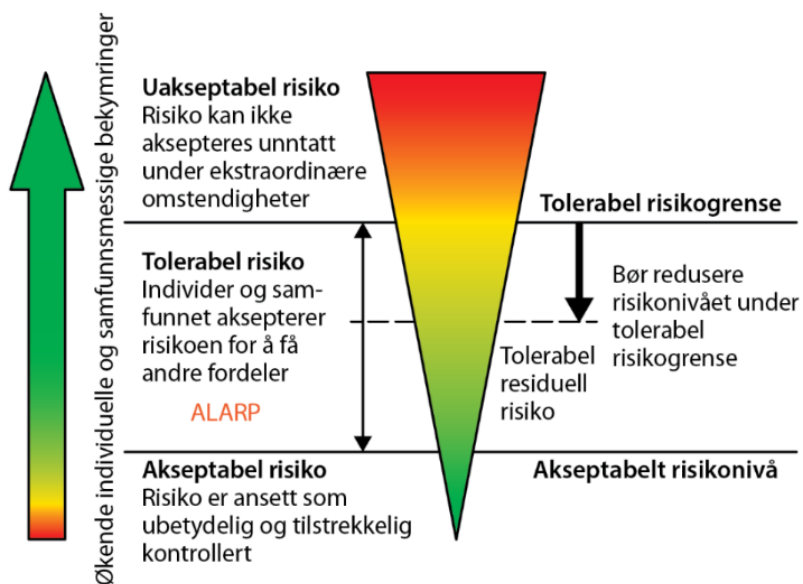
Kurven relaterer bruddsannsynlighet og pålitelighetsindeks for en normal fordelt sikkerhetsmargin (Vedlegg F)



Figur A28. USBoR (2003) akseptabel (grønn), tolerabel (oransje) og uakseptabel risiko (rød)



Figur A29. Risikodiagram og behov for risikoreduserende tiltak (US BoR 2011)



Figur A30. Akseptabel, tolerabel (ALARP) og uakseptable risiko (HSE, 2001)

A4.2 Diskusjon av risikoakseptkriterier

USACE (1997) foreslo målindeks som en funksjon av anleggets oppførsel (Fig. A27). Den grunnleggende pålitelighetskurven er forklart i Vedlegg F, risikobegreper). Veiledningen er for "geotekniske og infrastrukturprosjekter". USACE vurderte at en pålitelighetsindeks på minst 4 (eller $P_f \approx 3 \cdot 10^{-5}$) er nødvendig for å sikre god ytelse i et system, og at en pålitelighetsindeks på 3 ($P_f \approx 10^{-3}$) vil representere en ytelse 'over gjennomsnittet'.

Som vist i Figur A28 og A29 er ikke grensene mellom akseptabel og ikke akseptabel risiko et skarpt skille men et område som vurderes fra en dam til den andre sammen med usikkerhetene og tilgjengelig dokumentasjon.

UKs risikodiagram (Fig. A30) brukes oftest for å kommunisere om risiko og vurdere om risiko skal/må reduseres. HSE's²⁷ "*Tolerability of Risk*" rammeverk er basert på hvordan risiko styres i enhver individs liv. Individuell og samfunnsmessig risiko hører til én av tre kategorier, som vist på venstre side av Figuren.

"Broadly acceptable"/"Generelt akseptabelt": risiko som folk ofte lever med i det vanlige livet (f.eks. helserisiko forbundet med livsstil sykdommer, bruk av mobiltelefoner og så videre).

"Unacceptable"/"Uakseptabelt": risiko for enkeltpersoner og samfunn er ikke verdt å ta uavhengig av fordelene (f.eks. å bygge boligområder på giftige deponier)

"Range of tolerability" "Toleranseområde": enkeltpersoner og samfunn er villige til å leve med risikoen for å sikre visse fordeler, forutsatt at de er sikre på at risikoen blir ordentlig administrert, gjennomgått og redusert ytterligere hvis og når det er praktisk mulig (f.eks. kjøretøy og flyselskap), eller ALARP prinsippet (Vedlegg F, fra Engelsk "*As Low as Reasonably Practicable*"). Med få unntak, skal risiko som er uakseptabel reduseres ned til et "tolerabelt" nivå, uavhengig av kostnadene, eller til ALARP-området (Risiko i ALARP området omtales som "Tolerabel"). I ALARP 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.

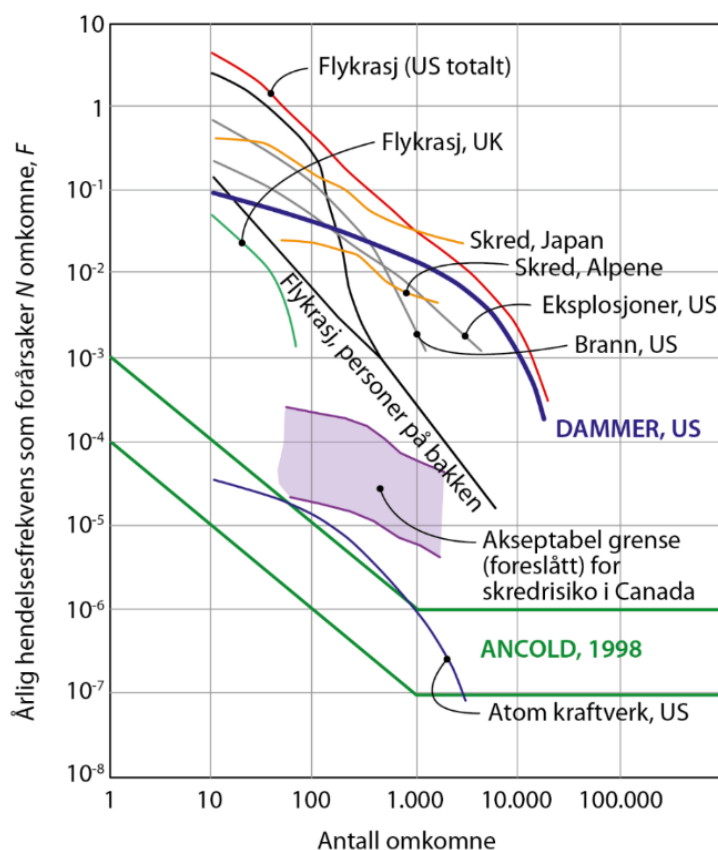
Risikodiagrammene kan sammenlignes med frekvensen av andre hendelser. Eksempler på hendelser er gitt i Figur A31.

A4.3 Utvidelse av Whitmans risikodiagram

ASCE (2020) publiserte en ny versjon av Whitmans risikodiagram. Denne er reproduisert i Figur A32. I oppdateringen er menneskes individuelle risikoer lagt til, f.eks. dødsfall grunnet hjertesykdom og kreft, risikoen forbundet med bilulykke for 1 til 10 omkomne og beregnet risiko for New Orleans-dikene under Katrina-orkanen i 2005²⁸. Økonomiske tap er fortsatt i 1984 US dollar.

²⁷ HSE: "*Health and Safety Executive*" (UK)

²⁸ Økonomiske tap er fortsatt i 1984 USD.



Figur A31. Risikokurver for flere ulykker (etter Whitman 1984).

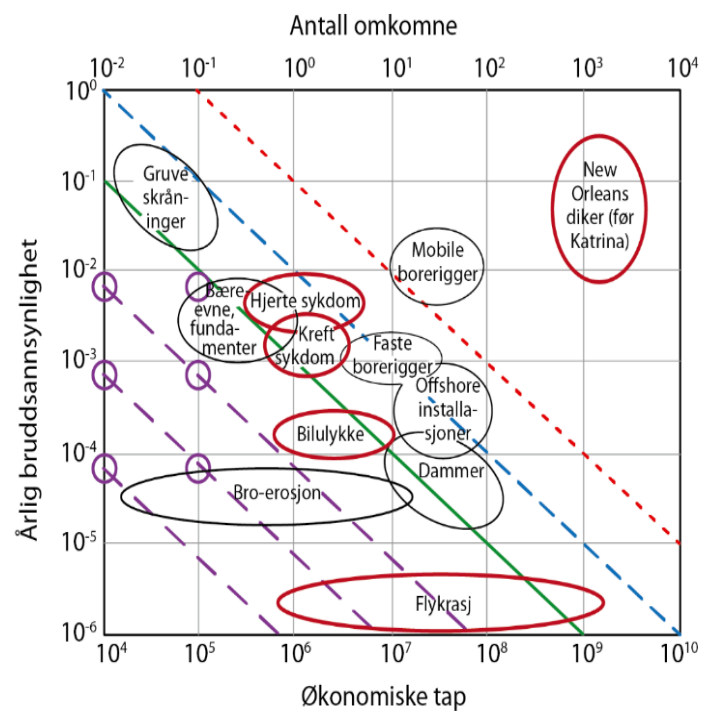
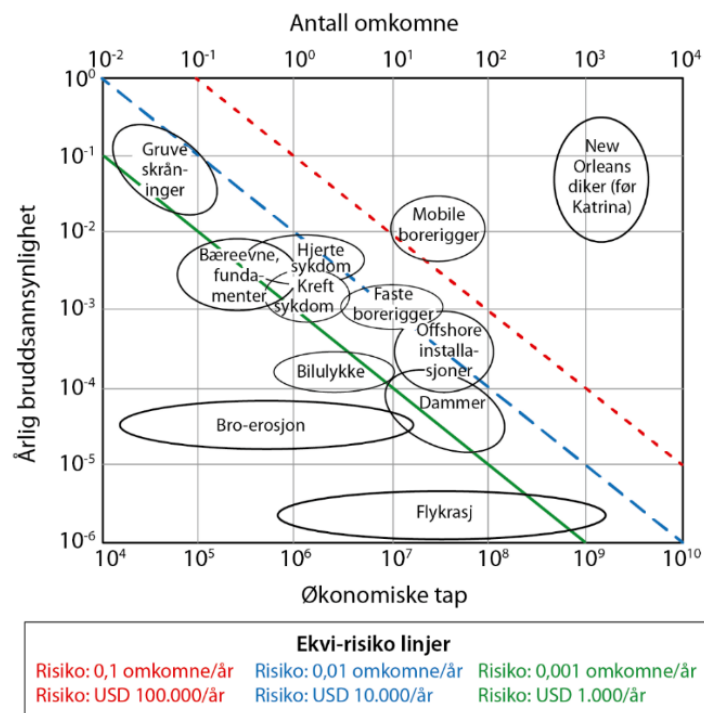
I figur A32 er den grønne linjen den samme som Hong Kongs kriterium i risikodiagrammet i Figur A24²⁹. Log-log-diagrammet viser "ekvi-risikolinjer", som er linjer hvor risikoen er den samme langs hele linjen. Risikolinjer uttrykkes som:

$$F \cdot N^{\alpha} = k$$

hvor F er bruddsannsynlighet, N er konsekvenser som økonomisk tap eller antall omkomne, k er skjæringspunktet på sannsynlighetsaksen og α helningen på linjen. For Hong Kong risikokriteriet i Figur A24 er $k = 0,001$, og $\alpha = -1$. F - N -kurver (på log-log-skala) med en skråning $\alpha = -1$ er kurver med samme risiko (ekvi-risikolinjer). Eksempler på tre like-risikolinjer er gitt i øvre diagram i Figur A32. En verdi på $\alpha > -1$ (brattere kurve med mindre konsekvenser) gjenspeiler samfunnsmessig risikoaversjon.

I nederste del av Figur A 32 vises flere ekvi-risikolinjer enn i øvre figuren. For tilfellet hvor det ikke er livstap (til venstre av 10^0 på antall omkomne skala i figuren, f.eks., sirklene i fiolett i figuren, vil det være andre konsekvenser som økonomiske tap, tap av tillit i samfunnet, etc. som vil nå veie inn for en beslutningstaking som oftest baserer seg på en kost-nytte vurdering (hvor kost er ikke nødvendigvis direkte kostnader). Ekvi-risiko linjer, som vist i nederste delen i Figur A32 (i fiolett) gir et perspektiv for akseptabelt risikonivå når det ikke er livs tap.

²⁹ I Figur A31 betyr 10^0 én omkom, og 10^{-1} og 10^{-2} betyr null omkomne, kun skade på helse.

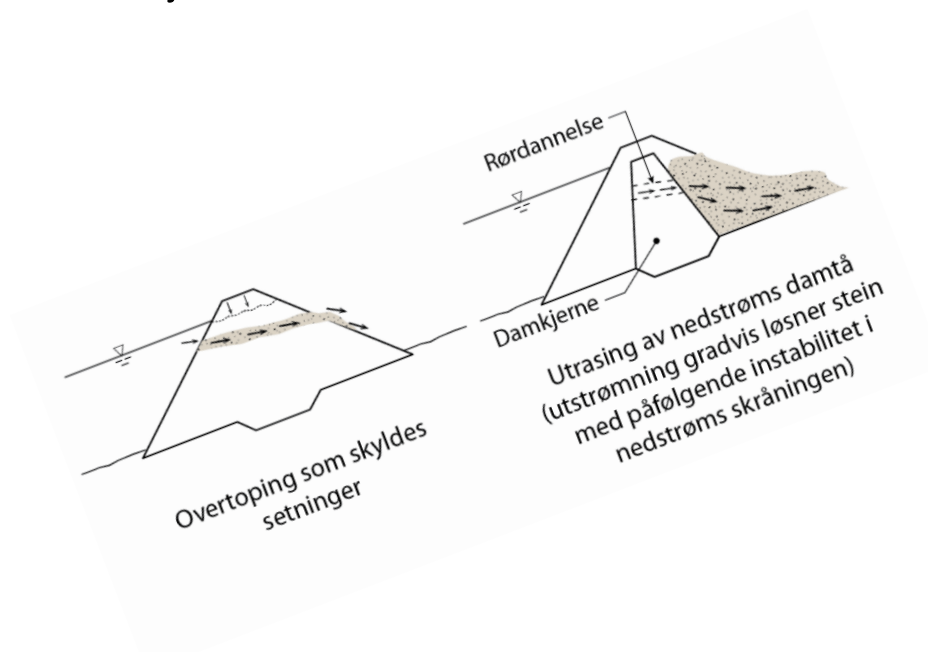


Figur A32. Whitman risikodiagram med individuell risiko og New Orleans diker, og ekvi-risikolinje (ASCE 2020: økonomiske tap i 1984 USD).

Vedlegg B Bruddmekanismer og skademekanismer - fyllingsdammer

Innhold

- B1 Brudd- og skademekanismer for fyllingsdammer
- B2 Sjekkliste for fyllingsdammer
- B3 Trusler mot fyllingsdammer
- B4 Overtopping
- B5 Indre erosjon



Brudd forårsaket av indre erosjon i dam kjernen med påfølgende løsriving av nedstrøms skråning.



Flom i Kvam i 2013 (Foto: Håkon Mosvold Larsen / NTB Scanpix)

Vedlegg B Bruddmekanismer og skademekanismer - fyllingsdammer

B1 Brudd- og skademekanismer for fyllingsdammer

Brudd- og skademekanismer skal gås gjennom for hver dam som analyseres. Det gis her generelle brudd- og skademekanisme-kategorier for fyllingsdammer. Analysen og prioriteringen av skade- og bruddhendelser i risikoanalysene³⁰ er den essensielle og sentrale etappen i risikovurderingen.

I en risikovurdering og en risikoanalyse lages det en oversikt over bruddmekanismer og bruddårsaker, både med hensyn til potensielle svakheter i og rundt dammen, og eksterne utløsningsfaktor. Et eventuelt brudd kan knyttes til fire hovedkategorier av hendelser: hydrauliske hendelser, seismiske hendelser, indre og ytre erosjon, og krig/terror/sabotasje ("tilsiktete aksjoner / villede handlinger").

For fyllingsdammer viser en ny statistikk [(ICOLD (2020, Bull. 99), Vedlegg D)] at over 95 % av bruddtilfellene tilskrives én av tre brudd- og skademekanismer: (i) Indre erosjon, (ii) Overtopping og (iii) Instabiliteter i skråningene eller fundamentet. I følge ICOLD statistikken er overtopping og indre erosjon de vanligste feilmekanismene. Det er en markant reduksjon av brudd for dammer bygd etter 1950. De fleste brudd skjer i de første fem (5) årene av dammen. Overtopping skjer hovedsakelig i kombinasjon med flomforhold, mens indre erosjon hovedsakelig under normale forhold.

De mest vanlige bruddmekanismer og -årsaker å vurdere i en risikovurdering for jord- eller steinfyllingsdammer er som følger:

Svakheter i og rundt dammen:

- Indre erosjon.
- Stabilitet av støttefyllinger, utglidning av opp- og nedstrøms skråning.
- Skred inn i magasinet utfra geologien som fører til en flod bølge.
- Svakheter / erosjon i jord- eller bergfundament.
- Blokkering av overløp.
- Noe operativt som kan føre til brudd.
- Betong skade eller aldring for betong dammer.

Eksterne utløsningsfaktorer:

- Flom, som ekstrem nedbør, snø- og bresmelting som forårsaker økt vannmengde i magasinet, is og/eller hardpakket snø eller "debris" som blokkerer overløp, og en kombinasjon av faktorer.

Indre erosjon: Belastning på dammen som kan opptre under vanlige og under ekstraordinære driftsforhold, f.eks. tåerosjon, rørdannelse i dammens fylling- eller kjernematerialer, "sinkhole", utvasking av finmaterialet i sprekker i fjellfundament.

Hydrauliske hendelser: Hendelser som er utløst av store mengder nedbør, snøsmelting og flom, eller f.eks. fjell/jord/snøskred i reservoaret, blokkering/erosjon av overløp, feil i reservoaroperasjon. bølge/islaster.

Seismiske hendelser: Hendelser utløst av jordskjelv eller andre rystelser som kan gi setninger, sprekker, skred inn i reservoaret, eller "liquefaction" eller store deformasjoner.

Krig/terror/sabotasje hendelser: Faren for "tilsiktete aksjoner/ villede handlinger" som terror eller sabotasje bør vurderes.

ICOLD (2005, Bull. 130) deler buddmekanismer i betong- og fyllingsdammer i syv hovedkategorier: hydraulisk (overtopping fra naturkrefter, flom som overstiger dam magasinet kapasitet), indre erosjon og/eller rørdannelse gjennom eller forbi dammen, massebevegelse og skråning instabilitet, strukturelt brudd i dammens materiale, bevegelse og/eller brudd i fundamentet, setninger og sprekke dannelse.

³⁰ "Failure mode screening"

- Klimaendringer
- Bølge- eller is-belastning som fører til ustabilitet på oppstrøms side
- Jordskjelv belastning
- Ekstreme hendelser som meteorittnedfall eller flystyrt (hvis aktuelt)

Vedlegg D oppsummerer statistikk om dambrudd og damhendelser.

B2 Sjekkliste for fyllingsdammer

Tabell B1 gir et eksempel på sjekkliste som brukes av US Army Corps of Engineers i sikkerhetsvurdering av fyllingsdammer.

Tabell B1. USACE sjekkliste for sikkerhetsvurdering av fyllingsdam (etter Bowles et al., 2003)

Fyllingsdammer: Årsak som initierer uønskede hendelser		
Flom	Jordskjelv	Normal operasjon
Indre erosjon	"Liquefaction" (flytning) - - dammen eller fundamentet	Indre erosjon
Skråningsstabilitet (oppstrøms og nedstrøms)	Stabilitet og store deformasjoner (vertikale og horisontale)	Skråningsstabilitet
Erosjon i dam tå og løsrivning av tåstein	Erosjon i damtå og løsrivning av tåstein	Erosjon i damtå og løsrivning av tåstein
Overflate erosjon		Overflate erosjon
Bølgeaksjon		Bølgeaksjon
Erosjon i fundament		Erosjon i fundament
Fundament stabilitet	Fundament stabilitet/deformasjoner	Fundament stabilitet/deformasjoner Anleggsarbeid rundt dammen
Støttefyllingsstabilitet	Støttefyllingsstabilitet	
Overtopping (fribord)	Overtopping pga "liquefaction" eller store setninger	

B3 Trusler mot fyllingsdammer

Derfra (2011) listet alle trusler mot damanlegg (Tabell B2), basert på en studie i UK og en litteraturstudie. Hver av disse kan føre til farer for en demning.

Tabell B2. Oversikt over trusler mot dammer (etter Derfra, 2011)

Jordskjelv	Menneskelig aktivitet
Ekstremt regnfall eller flom fra snø/isbre	Endring i en nærliggende infrastruktur
Is, frost, tele, islaster	Aldring i dammen eller materiale
Geologien	Gruve- eller anleggsaktivitet i området
Endring i grunnvann regime eller kvalitet	Feil dimensjonering
Brudd/endring inn i oppstrøms magasinet	Feil i dammens drift
Dyregraving	Sabotasje eller andre villede handlinger
Sterk sol, sterk vind	Flykrasj eller annen ulykke
Vann som introduseres på et område og øker lasten på dammen	Terror

B4 Overtopping

Overtopping av dammer kan være forårsaket av flom som følge av ekstrem nedbør, setninger som følge av f.eks. seismisitet eller skred i oppstrøms magasin med påfølgende bølger i magasinet. Overtopping kan videreutvikle seg til dambrudd. Nøkkelfaktorer for overtoppingsrisikoen er i følge

USBoR og 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.
- Formen på damkronen, spesielt høyden på laveste punkt.

Brown & Gosden (2004) gikk systematisk gjennom faktorer som må analyseres i en brudd- og skademekanisme-analyse. Faktorene oppgis for ulike initierende hendelser. De viktigste initierende hendelsene for overtopping av magasiner i UK er ekstrem nedbør og skred i oppstrøms magasin. 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 B3 og B4 for ekstrem nedbør og skred i oppstrøms magasin. Brown & 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.

Tabell B3. Bidrag til brudd- og skademekanismer initiert av ekstrem nedbør

Tilstand	Sannsynligheten for at en forringelsesmekanisme oppstår	Sannsynligheten for at demningen svikter gitt at en av forringelsesmekanismene inntreffer
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	
	Vegetasjon rundt magasinet	Skråningsstabiliteten i støttefylling/fundament Overtopping
	Geometri og detaljering av støttebygninger	
	Bratte skråninger i magasinet (forekomst av tidligere skred?)	
Annet	Magasinnivå før ekstremvær	
	Ved overløps- og utløpsluker: Varsling som gir mulighet for operasjon av lukene.	---
	Varighet av innstrømning	

B5 Indre erosjon

Hendelseskjeder som initieres av intern lekkasje eller indre erosjon kan ikke fullt ut analyseres kvantitativt ved hjelp av modeller (Bowles *et al.* (2013); Fell *et al.* (2015); USBoR & USACE (2012).

Tabell B4. Bidragsfaktorer til bruddmekanismer initiert av brudd i oppstrøms magasin

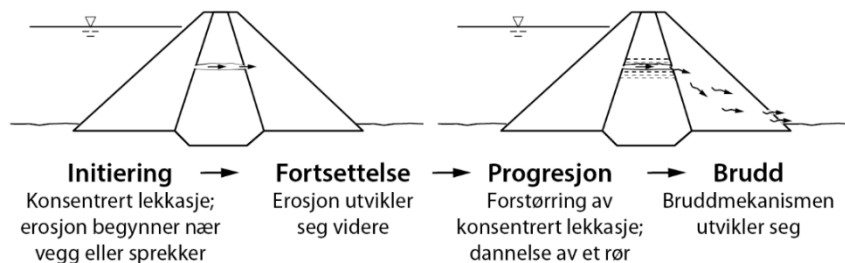
Tilstand	Sannsynligheten for at en forringelsesmekanisme oppstår	Sannsynligheten for at demningen svikter gitt at en av forringelsesmekanismene inntreffer
Dammen	Som Tabell B3	Som Tabell B3
Annet	Magasinnivå før brudd av oppstrøms dam	
	Ved overløps og utløpsluker: Varsling som gir mulighet for operasjon av lukene.	---

Tilstand av oppstrøms dam.
 Utviklingshastigheten av dambrudd i oppstrøms dam.
 Demping av strømming mellom magasinene, f.eks. skog.
 Vannvolumer i oppstrøms magasin.

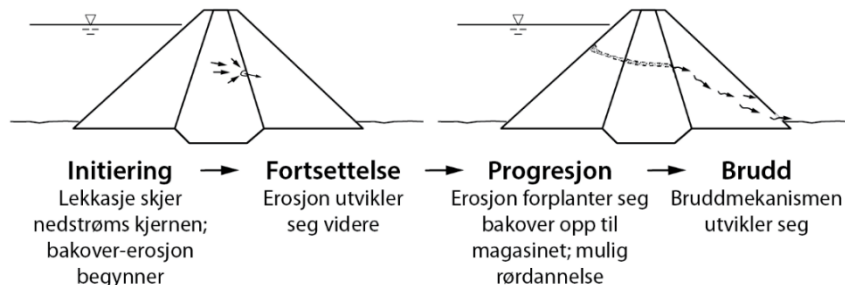
Bowles *et al* (2013) anbefalte å bruke historiske data for kvantifisering av slike initierende hendelser. Selv om tall er viktige, er følgende aspekter ved risikoanalysen enda viktigere:

- Utvikle en forståelse av dammens styrker, svakheter og sårbarheter i forhold til ulike indre erosjon og lekkasje skademekanismer, og
- Vise oppbygning av situasjonen eller hendelseskjeden for analysen som presenteres og anbefalte videre tiltak.

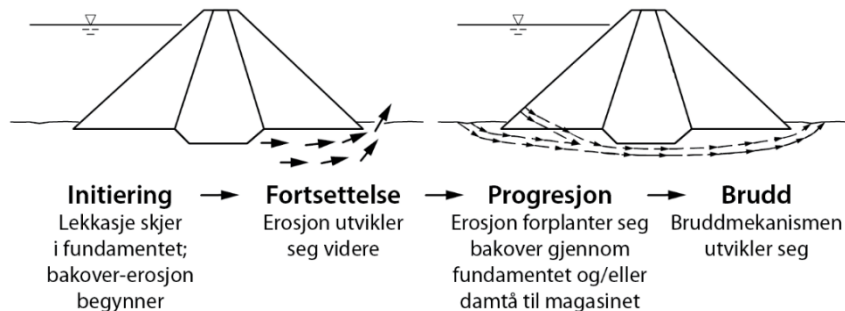
Den indre erosjonsprosessen kan deles inn i fire faser: 1) initiering av erosjon; 2) videreføring av erosjon; 3) progresjon av erosjon og 4) initiering av brudd. Eksempler på prosessen for erosjon i fyllingsdam er illustrert i Figur B1 og B2, og for erosjon i damfundamentet i Figur B3 og B4, gjengitt etter Fell *et al.* (2015). Initiering av brudd er vist i Figur B5 og B6.



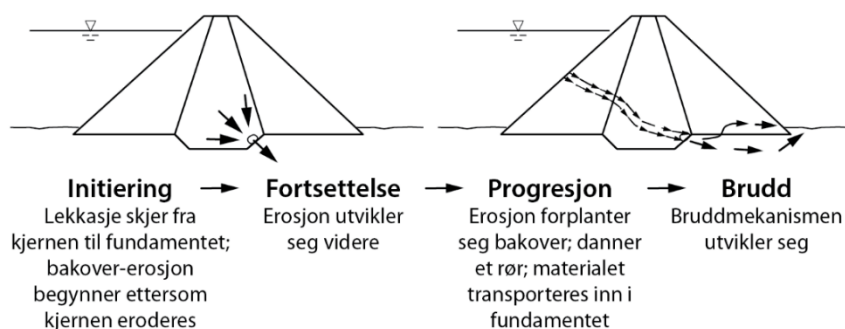
Figur B1. Indre erosjon i fyllingsdam initiert av konsentrert lekkasje.



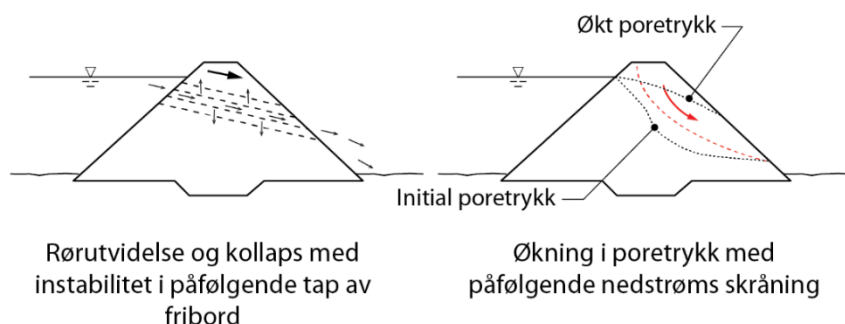
Figur B2. Indre erosjon i fyllingsdam initiert av bakoverrettet erosjon



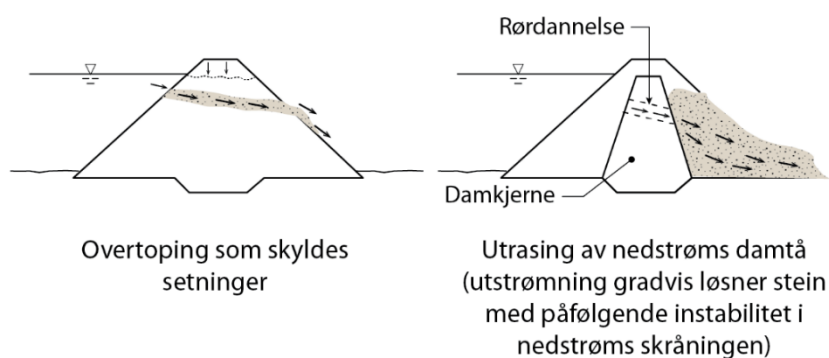
Figur B3. Indre erosjon i damfundamentet initiert av bakoverrettet erosjon



Figur B4. Indre erosjon i fra fylling inni damfundamentet.



Figur B5. Brudd forårsaket av utvidelse av "piping" med påfølgende nedstrøms skråning ustabilitet.

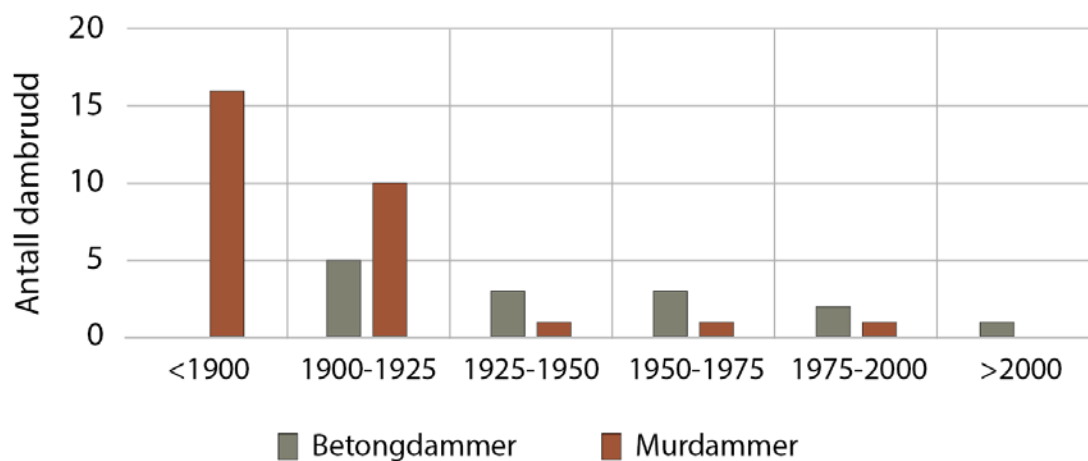


Figur B6. Brudd forårsaket av indre erosjon i dam kjernen med påfølgende løsriving av nedstrøms skråning.

Vedlegg C Bruddmekanismer og skademekanismer – betongdammer

Innhold

- C1 Brudd- og skademekanismer for betong- og lukedammer
- C2 Sjekkliste for betongdammer
- C3 Trusler mot betongdammer
- C4 Stabilitet
- C5 Bruddmekanismer



Antall dambrudd for betong- og murdammer (1900-2020) (ICOLD Bull. 99, 2020)



Platedam for Fitvannet i Norddal kommune i Møre og Romsdal (reguleringsdam for Tafjord 3 kraftverk)

Vedlegg C Bruddmekanismer og skademekanismer – betongdammer

C1 Brudd- og skademekanismer for betong- og lukedammer

ICOLD statistikk for betongdammer er vist i *Vedlegg D* (ICOLD 2020, Bull. 99)]. Generelt viser ICOLD-statistikken at svik i konstruksjonen (strukturell svik) er den dominerende bruddmekanismen, med en sterk reduksjon av brudd ved dammer bygget etter 1925. Strukturell svikt oppsto hovedsakelig ved gravitasjonsdammer. De fleste brudd skjedde i det første tiåret etter bygging. Overtopping har skjedd bare i kombinasjon med ekstreme flomforhold. Indre erosjon har skjedd hovedsakelig i kombinasjon med normale forhold mens strukturell svikt har skjedd hovedsakelig under både normale og flomforhold.

På samme måte som for fyllingsdammer skal alle potensielle "scenarier" identifiseres ved å gjennomgå de mulig bruddmekanismer og utløsningsfaktorer, både med hensyn til potensielle svakheter i og rundt dammen og eksterne utløsningsfaktor.

Potensielle svakheter i og rundt dammene:

- Glidning og velting
- Betongskade eller -aldring, alkali/sulfidreaksjon
- Skred inn i magasinet (som fører til flodbølge)
- Svakheter / erosjon i jord- eller bergfundament
- Kvalitet av overløp/kulvert
- Noe operativt som kan føre til brudd
- For en platedam: platekapasitet/integritet, betongkapasitet

Eksterne utløsningsfaktorer:

- Flom, som ekstrem nedbør, snø- og bresmelting som forårsaker økt vannmengde i magasinet, is og/eller hardpakket snø eller "debris" som blokkerer overløp, og en kombinasjon av faktorer.
- Klimaendringer
- Bølge- eller is-belastning
- Jordskjelvbelastning
- Ekstreme hendelser som meteorittnedfall eller flystyrt (hvis aktuelt)

Vedlegg D oppsummerer statistikk om dambrudd og damhendelser.

C2 Sjekkliste for betongdammer

Tabell C1 gir et eksempel på sjekkliste som brukes av US Army Corps of Engineers (USACE) i sikkerhetsvurdering av betongdammer under flomhendelser, jordskjelv og normal operasjon.

C2.1 Krefter på en lukedam eller platedam

Krefter på en luke- eller platedam omfatter krefter på lukene eller platene fra magasinet, vanntrykk under konstruksjonen ("*uplift forces*") og vekt av betong. Det er også mange andre krefter som kan virke på en luke dam og en platedam:

- vanntrykk på nedstrøms side av demningen;
- indre vanntrykk: i porer, sprekker, skjøter og fuger, eventuelt indre kammer;
- temperaturvariasjoner;
- kjemiske reaksjoner;

- kryp: deformasjon av betongen under konstant belastning over lang tid;
- siltsediment kan bygge seg opp over tid på oppstrøms side;
- isbelastning på oppstrøms side;
- bølbelastning på oppstrøms side;
- jordskjelvbelastning;
- setning av fundamentet eller anslutning;
- andre konstruksjoner på toppen av dammen.

Tabell D1. USACE sjekkliste for sikkerhetsvurdering av betongdam (etter Bowles et al., 2003)

Årsak som initierer uønskede hendelser		
Flom	Jordskjelv	Normal operasjon
Indre stabilitet	Indre stabilitet	Glidning i fundament
Ytre stabilitet	Ytre stabilitet	Piping in fundament
Piping i fundament	Piping i fundament	Velting av dammen
Stabilitet av anslutninger	Stabilitet av anslutninger	Spenninger i betong
Flomkapasitet	Flomkapasitet	Overtopping
Ekstrem flom	Overtopping	Reservoar kapasitet
Overtopping	Overløp og basseng system	Tilbehør
Overløp; bassengsystem	Strukturell stabilitet	Siltavsetning i magasinet
Luker/porter: stabilitet, kapasitet	Luker/porter: stabilitet, kapasitet	Anleggsarbeid rundt dammen
Strukturell stabilitet	Hydraulisk stabilitet	
Hydraulisk stabilitet	Overtopping av vegger	
Overtopping vegger	Mekaniske/el. systemer	
Mekaniske/el. systemer	Tilbehør	
Obstruksjon ("debris", skred)		
Siltavsetning i magasinet		
Stabilitet av inntak		
Stabilitet av tunnel		
Betongaldring		

C4 Stabilitet

Viktige bruddmekanismer å vurdere er stabilitet av betongkonstruksjonen, armering og fundament. I stabilitetsanalysene inngår:

- Lasttilfeller fra dimensjoneringskrav i Norge (dam-konstruksjon, vannmagasin (opp og ned), hydrostatisk trykk, indre hydrostatisk last (oppløftvanntrykk, "Uplift"), jordtrykk, egenvekt, eksterne påkjenninger (flom, jordskjelv, islast) og temperatur.
- Betongkvalitet: trykk og strekk-styrke av betong, effekt av aldring, temperatur og sprekker og riss i betongen, samt aggregat reaktivitet (f.eks. alkali-reaksjoner).
- Fundament: Fjellkvalitet, skjærstyrke i fjell, sprekker og glideplaner, svakhet i betong-fjell grensesnitt.
- Konstruksjonskvalitet: sammentrekning- og konstruksjonsfuger of "waterstops", overløp og dens konstruksjon, fundament faging og drainage, og "adit-system", bergbolter og bergankere.

Ved reevaluering av en betongdam, bør indikasjoner og observasjoner av uønsket oppførsel, endring i laster eller naturlige hendelser tas med i stabilitetsvurderingen.

C5 Bruddmekanismer

De samme trusler listet i Tabell B2 i Vedlegg B for fyllingsdammer er relevante for betongdammer. Følgende mekanismer skal vurderes:

- Velting på et horisontalt plan i selve dammen, ved basen eller under basen;
- Glidning på et horisontalt (og nær-horisontalt) plan;
- Glidning på en eksisterende glideflate i fundamentet
- Vanntrykk under fundament
- Spenninger som overstiger skjærstyrke i betong eller i fundament;
- Overbelastning ("overstressing") eller knekking
- Erosjon (indre og ekstern)

Det må også vurderes en kombinasjon av to eller flere av mekanismene overfor, for eksempel, velting og glidning, erosjon som leder til glidning over fundament og knekking som fører til overbelastning.

Bruddmekanismer kan skje i parallell eller i serie. I parallell, f.eks. når skjærstyrken i fundamentet varierer langs en glideflate eller ved skjør oppførsel av fundamentmaterialet. I serie, f.eks., hvis en armering er underdimensjonert kan overbelastningen (ev. bruddet) propagerer seg fra en luke til den andre, eller ved utvikling av et sprekke. Et annet eksempel, er sprekker som starter som et resultat av kraftig risting forårsaket at et jordskjelv under en periode med høy reservoarheving. Sprekkene starter ved endringen i skråningen på nedstrøms overflaten til en gravitasjonsdam. På grunn av sykklisk "rocking" av strukturen, sprekker demningen fullstendig i monolitter. Skyvingen starter under ristingen, og forårsaker kanskje nok forskyvning til å utvide skyveplanet og forskyve og skjære de dannede avløpene. Dette fører potensielt til en økning i løftet av det sprukne partiet og ustabilitet etter jordskjelvet. Demningen kan bryte ved plutselig glidning av flere monolitter ned under vannivået.

ICOLD statistikken viser at, for massive betongdammer, antall dambrudd er kraftig redusert for dammer som er bygget etter 1940. Problemer med fundament (glidning, lekkasje og indre erosjon) synes å være den dominerende årsaken til brudd ved betongdammer, mens overtopping synes å være den mest vanlige bruddårsaken ved murdammer. Viktige momenter å vurdere er:

- Beskaffenhet og tilstand av berget (Klassifisering av berget)
- Observasjoner av unormale forhold (lekkasje, erosjon, deformasjon)
- Statisk vanntrykk mot dammen og fundamentet

Indre erosjon

Brudd som følge av indre erosjon og glidning synes å være dominerende de første 5 årene etter bygging, som for fyllingsdammer. Fundament av løsmasser og sandstein kan være mest utsatt for indre erosjon. Det kan videre synes som brudd i sandstein bare forekommer i kombinasjon med skifrige bergarter.

Vurdering av fundamentet

Evaluerer av fundament er viktig siden fundamentet ofte er årsaken til dambrudd på betongdammer. Følgende forhold bør vurderes:

- Lokal og global stabilitet til fundamentet i forhold til potensiell utglidning og oppbygning av poretrykk.
- Bestandighet i forhold til forvitring og nedbrytning samt eventuell erosjon og skader i flomløpet
- Innfesting av fjellbolter i fjell

Ved glidning i fundamentet synes skifrige bergarter med svakhetssoner å være dominerende. Skifer med kalkstein synes også å ha en større sannsynlighet for brudd. Det har ikke forekommet brudd på dammer med fundament av basalt (magmatisk bergart).

Ved fundament for dammer er det spesielt viktig å vurdere fare for oppbygning av poretrykk og potensielle glidesjikt. Tydelig lagdeling med horisontale glidesjikt der sprekkesettet er orientert

parallelt med dam-aksen kan være kritisk, spesielt i kombinasjon med et høyt poretrykk. Samtidig kan dårlig fjell med mye oppsprekking medføre drenasje av fjellet, slik at det ikke er fare for oppbygning av poretrykk i fundamentet under dammen.

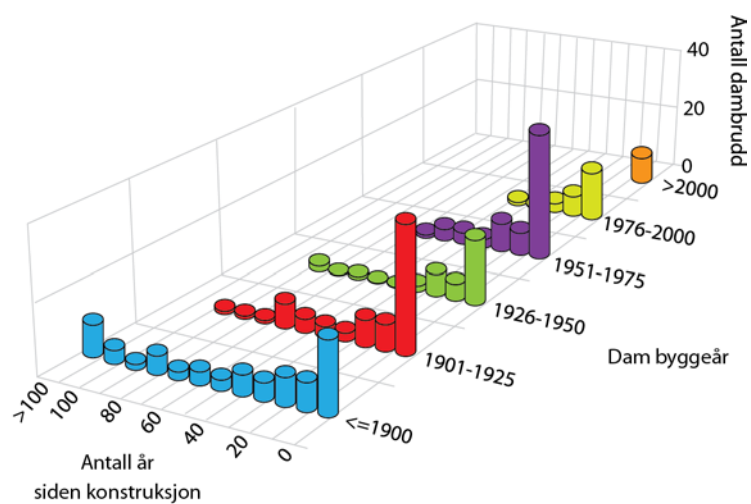
Feil eller mangler i forbindelse med prosjektering og bygging

Generelt synes det som de fleste dambrudd på betong- og murdammer skyldes feil eller mangler i forbindelse med prosjektering og bygging (Energi Norge, 2017). Flere av dammene er bygget med en bratt nedstrøms side på 0,6:1 eller brattere.

Vedlegg D Dambruddstatistikk

Innhold

- D1** Introduksjon
- D2** ICOLD dambrudd statistikk
 - D2.1 Statistikk for alle damtyper, fyllingsdammer og betong og murdammer
 - D2.2 Konklusjoner fra ICOLD statistikken
 - D2.3 Oversikt over ICOLD dambrudd statistikk
 - D2.4 Statistikk, alle damtyper
 - D2.5 Statistikk, fyllingsdammer
 - D2.6 Statistikk, betong- og murdammer
 - D2.7 Bruddårsak, bruddforhold og bruddmekanismer, alle damtyper
- D3** Statistikk fra litteratur
 - D3.1 Fyllingsdammer
 - D3.2 Alle damtyper
- D3** Observasjoner fra dammer i Norge



Antall dambrudd som en funksjon av byggeår og damalder, alle damtyper (ICOLD Bull. 99, 2020)

D1 Introduksjon

Vedlegg D oppsummerer statistikk tall om hendelser og dambrudd. De fleste er fra ICOLD, men det er også oppsummert en del andre resultater fra litteraturen. Det eksisterer ikke noen spesifikk statistikk for platedammer. For å kunne sammenligne tallene i de forskjellige figurene, er det viktig å sammenligne som en funksjon av dammens byggeår, dammens alder, damtype, og damhøyde.

D2 ICOLD dambrudd statistikk

D2.1 Statistikk for alle damtyper, fyllingsdammer og betong og murdammer

ICOLD Bulletin 99 (rev. 2020) presenterte de nyeste statistiske tall for dambrudd. Statistikken er basert på en database med 59.071 dammer, hvorav 322 gikk til brudd. Grafene ser på antall dambrudd, bruddårsak, byggeår (1900 til 2020), damtype og antall år i dammens levetid. Det er mange figurer og innholdet i hver figur er oppsummert i tabeller. Tabell D1 lister figurene med statistikk for alle damtyper. Tabell D2 lister figurene med statistikk for fyllingsdammer og Tabell D3 lister figurene med statistikk for betong- og murdammer. Tabell D4 gir en oversikt over statistikk om årsak til dambrudd for alle damtyper. De utvalgte ICOLD dambrudd statistikk er vist i figur D1 til D29.

D2.2 Konklusjoner fra ICOLD statistikken

D2.2.1 Fyllingsdammer

For fyllingsdammer viser ICOLDs statistikk følgende:

- To bruddmekanismer er de mest vanlige overtopping of indre erosjon.
- Det har skjedd mange færre dambrudd etter 1950.
- De fleste dambrudd skjer i de dammens første år.
- Det er nesten ingen brudd i fyllingsdammer som er eldre enn 30 år
- Overtopping skjer oftest under flomforhold; indre erosjon skjer oftest under normale forhold.
- For jordfyllingsdammer, er geotekniske aspekter (66%) og utilstrekkelig overløp kapasitet (28%) de mest vanlige årsak. For steinfyllingsdammer er også geotekniske aspekter (32%) og utilstrekkelig overløp kapasitet (64%) de mest vanlige årsak.

D2.2.2 Betong- og murdammer

For betong- og murdammer viser ICOLDs statistikk følgende:

- For 79% av dambruddene var dammene bygget før 1930.
- En fjerdedel av dammene gikk til brudd i forbindelse med første gangs oppfylling, mens totalt ca. 50 % av dammene gikk til brudd innen 10 år etter første fylling. Dambrudd har skjedd svært sjelden i en gammel betongdam.
- 42 % av dambruddene er knyttet til fundamentet, i form av erosjon eller som et skjærbrudd (glidning) i fundamentet. Overtopping skjer nesten alltid i forbindelse med ekstrem flom.

D2.2.3 Alle damtyper

- De fleste bruddene skjer for dammer med høyde mellom 15 og 75 m. Dambrudd skjer sjelden for høyere dammer, og har aldri skjedd for en dam høyere enn 100m.
- Siden 2000, 70% of dambruddene har skjedd under flomforhold.
- Utilstrekkelig dimensjonering ("*design*") eller konstruksjon er den mest vanlige organisatorisk årsak til dambrudd for betongdammer. For fyllingsdammer spiller utilstrekkelig operasjon under flom en rolle for 10% av dambruddene.

D2.3 Oversikt over ICOLD's dambrudd statistikk

Tabell D1. ICOLD statistikk om antall dambrudd, alle damtyper (Figur D1-D5) og pr damtype (Figur D6–D8)

Fig. Statistikk

- D1 Antall dammer og % av totalt antall dambrudd (1900 - 2020), alle damtyper
- D2 Antall dammer og dambruddfrekvens pr damtype (1900 - 2020)
- D3 Antall brudd i dammens første 10 år, alle damtyper
- D4 Antall dambrudd som en funksjon av byggeår og damalder, alle damtyper (1900 – 2020)
- D5 Antall dambrudd versus damhøyde, alle damtyper (1900 – 2020)
- D6 Antall brudd i dammens levetid, pr damtype (1900 – 2020)
- D7 Antall dambrudd og bruddforhold pr damtype (1900 – 2020)
- D8 Antall dambrudd som funksjon av byggeperiode, pr damtype (1900-2020)

Statistikk, kun fyllingsdammer

Tabell D2. ICOLD Statistikk for fyllingsdammer (Figur D9– D14)

Fig. Statistikk

- D9 Årlig bruddsannsynlighet forårsaket av indre erosjon
- D10 Tekniske årsak til brudd i fyllingsdammer (1900-2020)
- D11 Andel i % og teknisk bruddårsak i fyllingsdammer (1900-2020)
- D12 Årsak til indre erosjon i fyllingsdammer
- D13 Damalder ved brudd i fyllingsdammer
- D14 Antall brudd, bruddårsak og damalder i fyllingsdammer (1900-2020)

Statistikk, kun betong og murdammer

Tabell D3. ICOLD Statistikk for betong- og murdammer (Figur D15– D21)

Fig. Statistikk

- D15 Antall dambrudd for betong- og murdammer (1900-2020)
- D16 Bruddmekanismer for betong- og murdammer (1900-2020)
- D17 Antall brudd og tekniske årsak til brudd i betong- og murdammer (1900-2020)
- D18 Antall dambrudd og bruddårsak i % av totalt antall dammer for betong- og murdammer (1900-2020)
- D19 Bruddårsak i betong- og murdammer versus damalder (1900-2020)
- D20 Damalder ved brudd i betong – og murdammer
- D21 Bruddmekanismer og bruddforhold for betong- og murdammer (1900-2020)

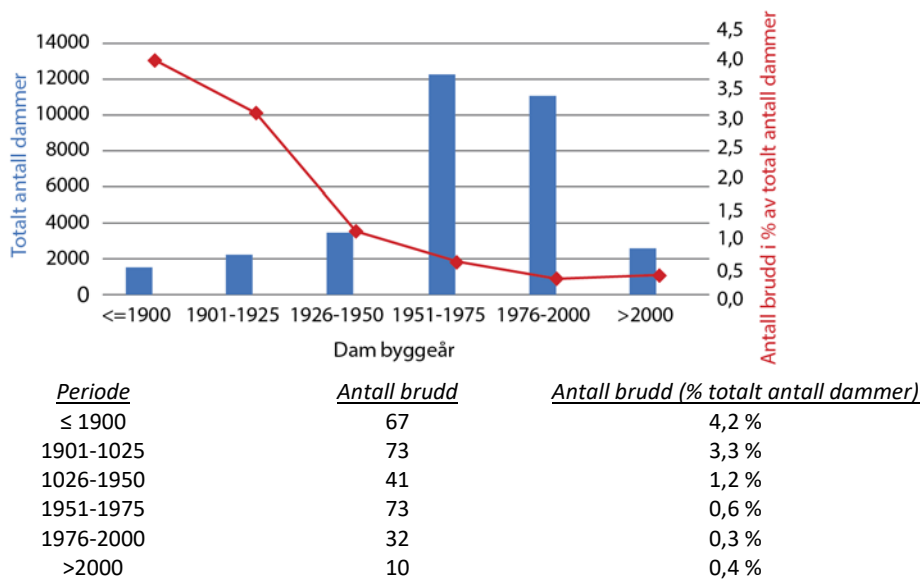
Statistikk om bruddårsak, bruddforhold og bruddmekanismer, alle damtyper

Tabell D4. Statistikk om bruddårsak, bruddforhold og bruddmekanismer, alle damtyper (Figur D22–D23)

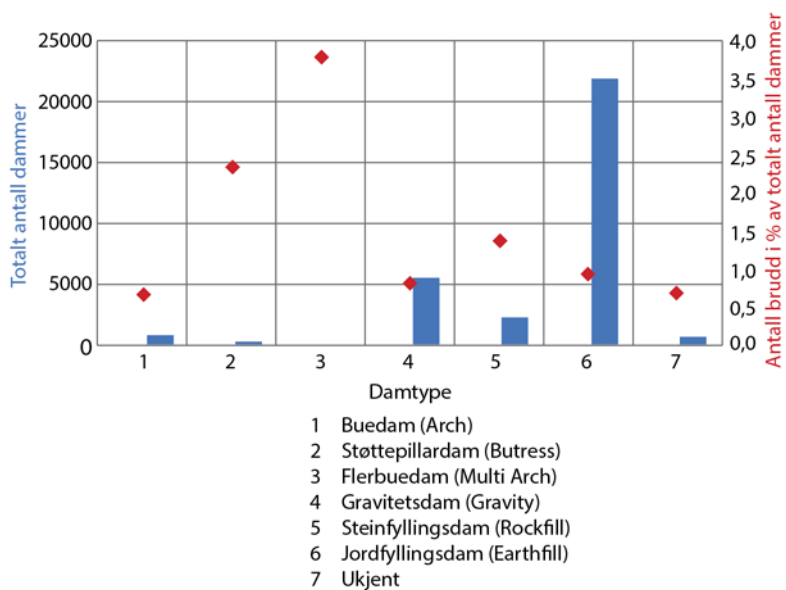
Fig. Statistikk

- D22 Bruddårsak pr damtype, alle damtyper (1900-2020)
- D23 Bruddårsak som en funksjon av byggeår, alle damtyper (1900-2020)
- D24 Bruddmekanisme pr damtype (1900-2020)
- D25 Bruddmekanisme pr damtype i de første 10 års av dammens levetid
- D26 Bruddforhold som en funksjon av dammens byggeår, alle damtyper (1900-2020)
- D27 Bruddforhold som en funksjon av dammens alder, alle damtyper
- D28 Bruddforhold som en funksjon av dammens alder, alle damtyper
- D29 Bruddforhold i % av totalt antall dambrudd, alle damtyper (1900-2020)

D2.4 Statistikk, alle damtyper

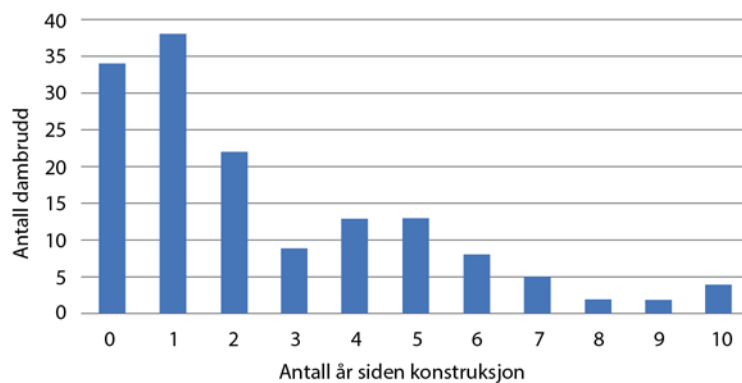


Figur D1. Antall dammer og % av totalt antall dambrudd (1990-2020) (ICOLD Bull. 99, 2020)

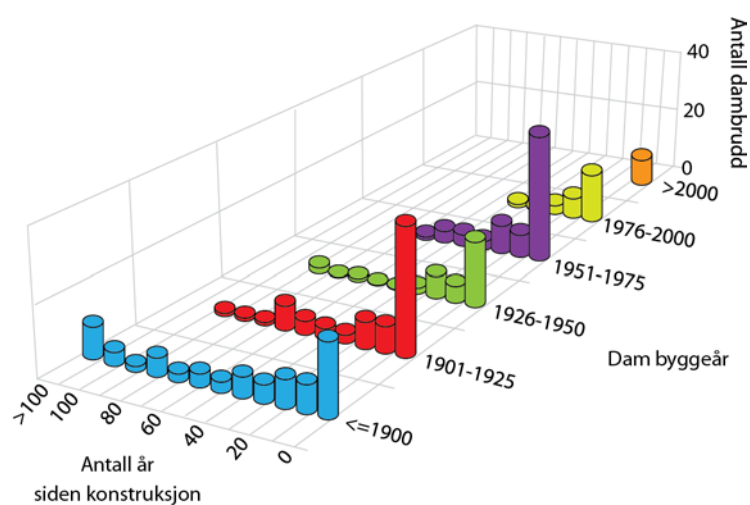


<u>Damtype</u>	<u>Antall brudd</u>	<u>Antall brudd (% totalt antall dammer)</u>
Buedam	6	0,7 %
Støttepilar-dam	8	2,3 %
Flerbuedam	4	3,8 %
Gravitasjonsdam	46	0,8 %
Steinfyllingsdam	33	1,4 %
Jordfyllingsdam	209	1,0 %
Ukjent	5	0,7 %

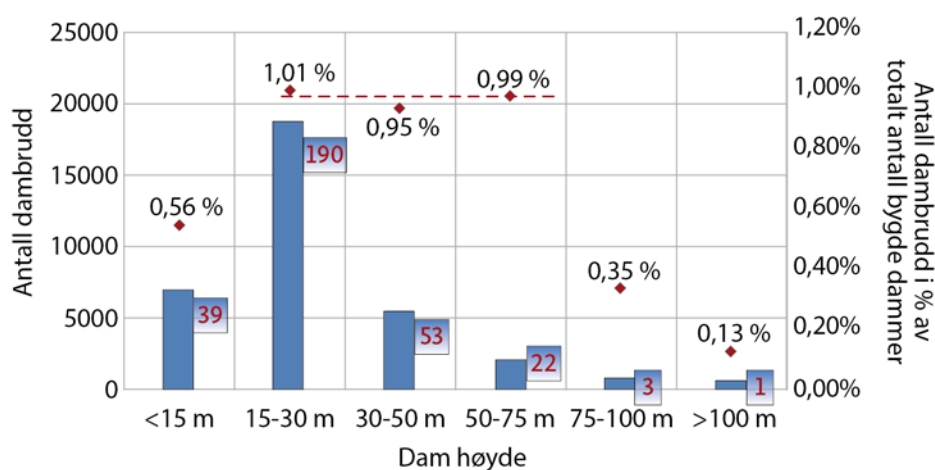
Figur D2. Antall dammer og dambruddfrekvens pr damtype [For hver damtype: Blå stolper: totalt antall dammer; røde datapunkter: antall brudd in % av totalt antall dammer (ICOLD Bull. 99, 2020)]



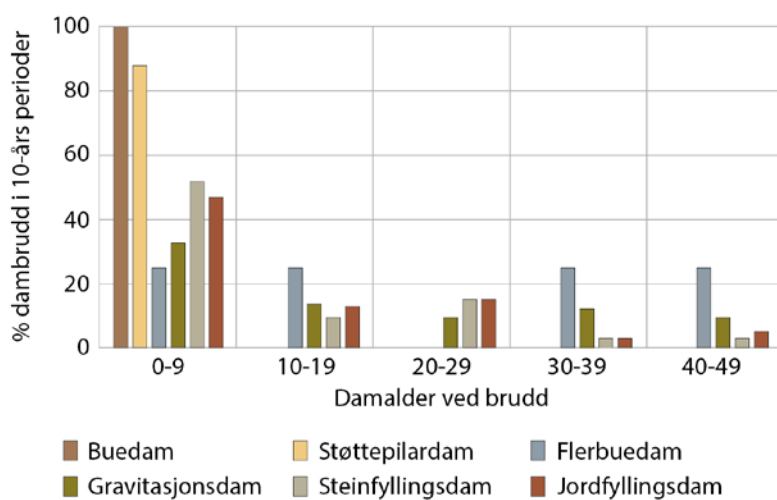
Figur D3. Antall brudd i dammens første 10 år, alle damtyper (ICOLD Bull. 99, 2020)



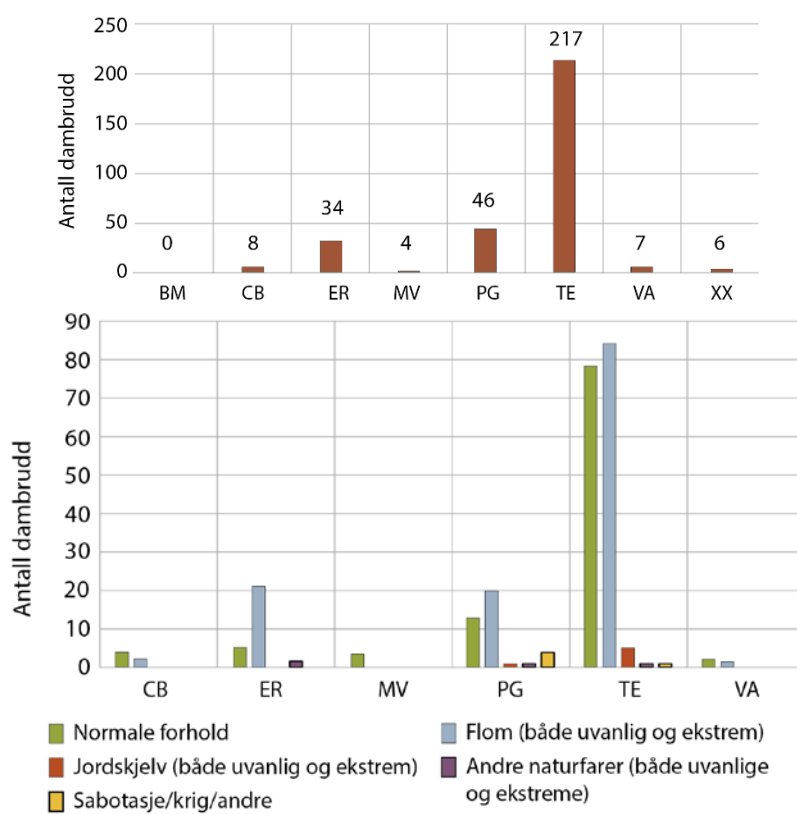
Figur D4. Antall dambrudd som en funksjon av byggeår og damalder, alle damtyper (ICOLD Bull. 99, 2020)



Figur D5. Antall dambrudd vs damhøyde, alle damtyper (ICOLD Bull. 99, 2020)

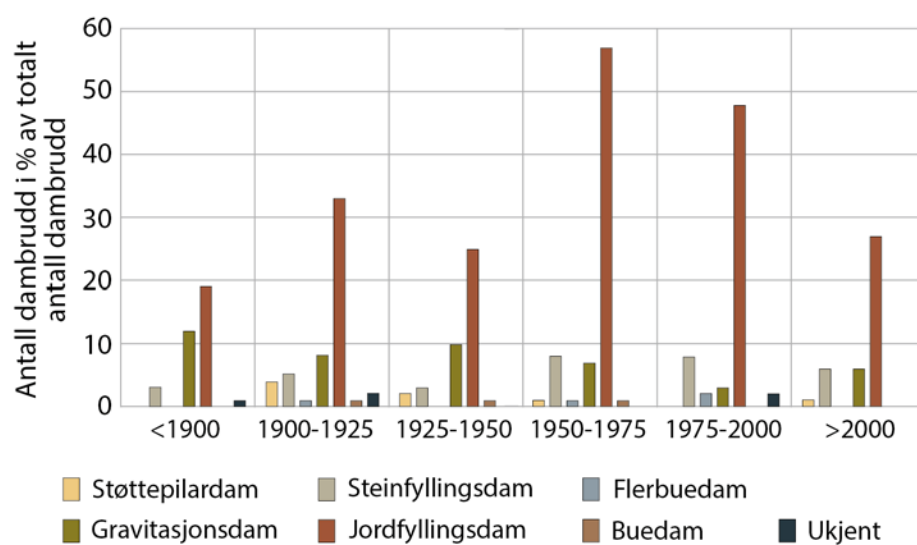


Figur D6. Antall brudd i dammens levetid, pr damtype (ICOLD Bull. 99, 2020)



Symb	Damtype	Antall dammer	Antall brudd	% brudd i totalt antall dammer
BM	"Barrier"-dam	224	0	0
CB	Støttepilardam	340	8	2,4 %
ER	Steinfyllingsdam	2378	34	1,4 %
MV	Flerbuedam	105	4	3,6 %
PG	Gravitasjons (betong)dam	5571	46	0,8 %
T	Jordfyllingsdam	21977	217	1,0 %
VA	Buedam	890	7	0,8 %
XX	Ukjent	715	6	0,8 %

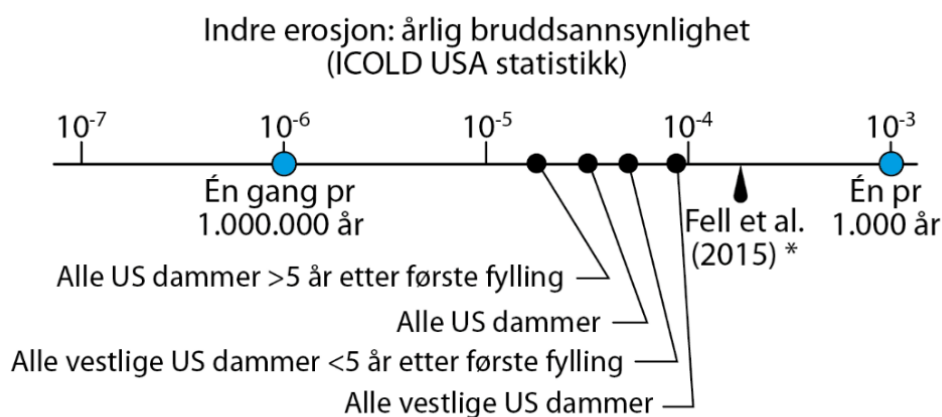
Figur D7. Antall dambrudd (øvre) og bruddforhold (nedre), pr damtype (1900-2020) (ICOLD Bull. 99, 2020)



Figur D8. Antall dambrudd som funksjon av byggeperiode. pr damtype (1900-2020) (ICOLD Bull. 99, 2020)

D2.5 Statistikk, fyllingsdammer

Figur D9 viser årlig bruddsannsynlighet som skyldes indre erosjon for fyllingsdammer, basert på observasjoner i USA. Figuren viser også statistikk fra Fell et al. (2015) basert på tall fra hele verden. Faktorer som øker eller reduserer sannsynligheten for indre erosjon og brudd i følge ICOLD er listet i tabellen under figuren.



Figur D9. Årlig bruddsannsynlighet forårsaket av indre erosjon (Von Thun, 1985; Vick, 2002).

Reduserer

Prosesserte filtere
 Overflate behandling av fundament
 Ugjennomtrengelig fundament
 Fundamentsfuging ("grouting")
 Formen på bergfundament
 Lang operasjon under maks basseng
 Sortert eller plastisk kjerne
 "Cutoff" i berg (tett vegg til tett lag)
 Lave gradienter
 Lite innsig
 Pålitelig overvåking

Øker

Ukontrollert innsig exit
 Ingen prosesserte filtere
 Åpne ubehandlede fundamentsfuger
 Irregulære lag i fundamentet
 Historie med lekkasje/innsig
 "Dispersive" lag i dam og fundament
 Finkornet eroderbar kjerne
 "strukturer" inn i fundamentet
 Høye gradienter
 Store lekkasje/innsig
 Ingen eller dårlig overvåking

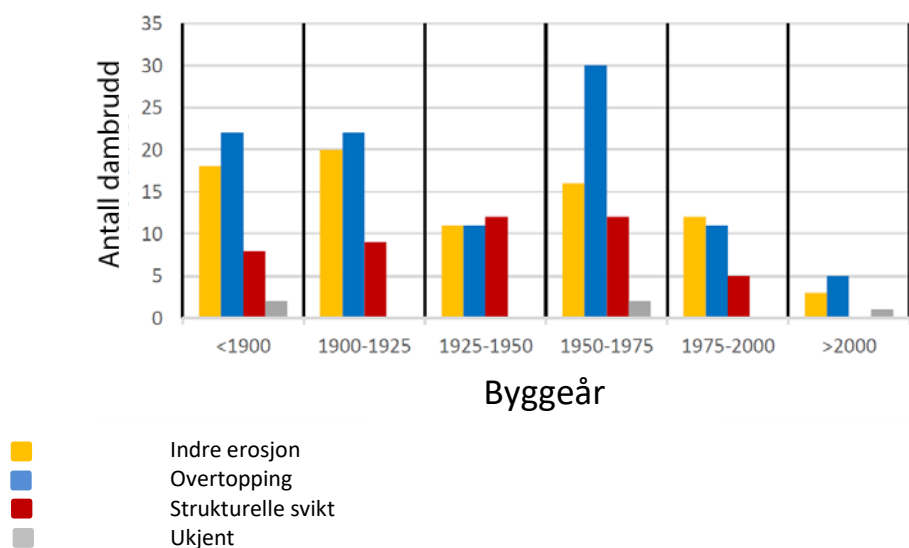
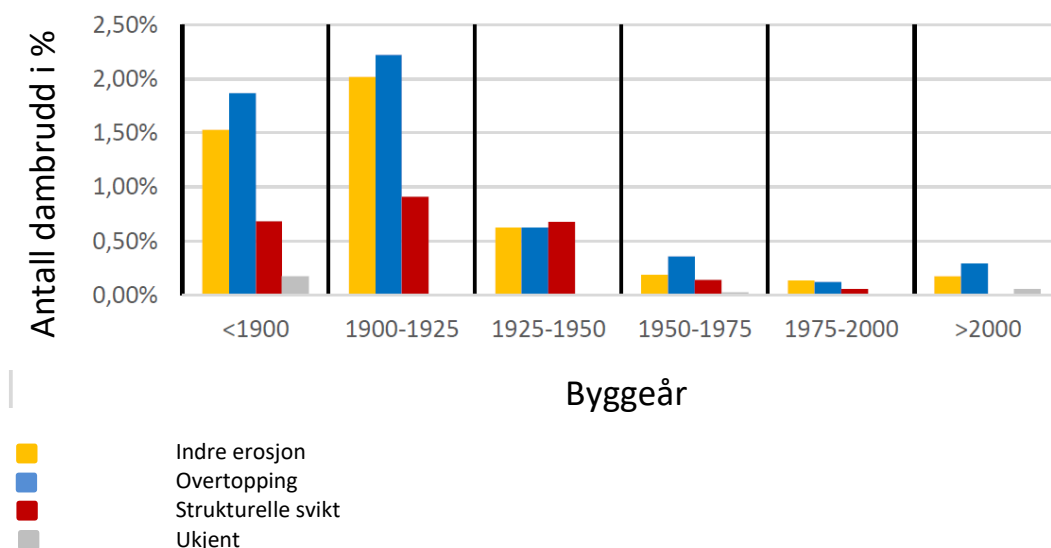
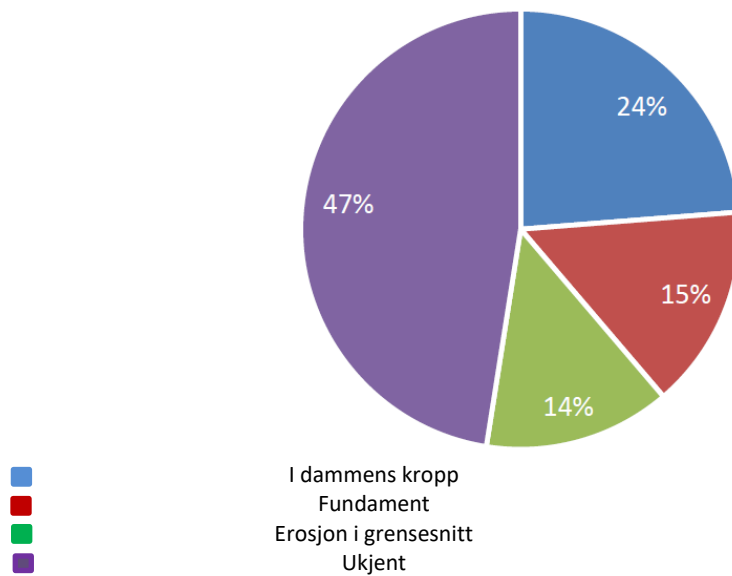


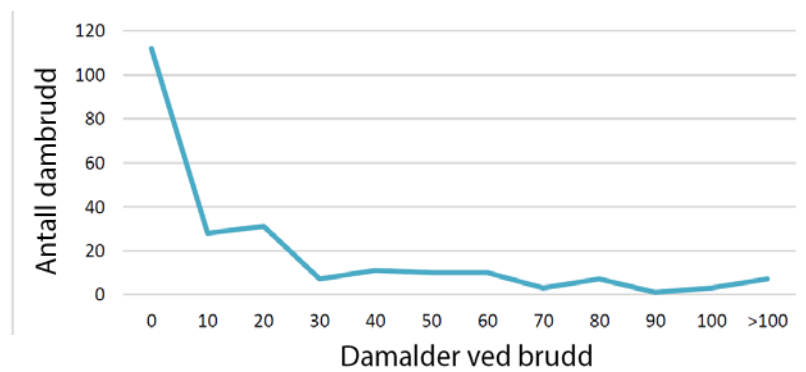
Figure D10. Tekniske årsak til brudd i fyllingsdammer (1900-2020) (ICOLD Bull. 99, 2020)



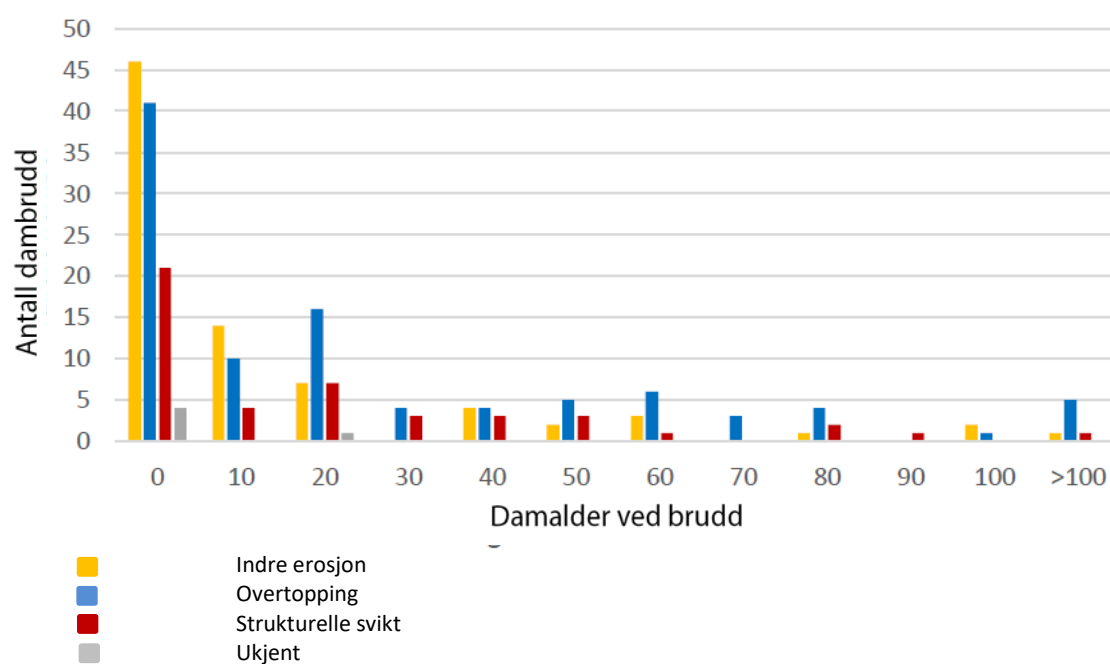
Figur D11. Andel i % og teknisk bruddårsak i fyllingsdammer (1900-2020) (ICOLD Bull. 99, 2020)



Figur D12. Årsak til indre erosjon i fyllingsdammer (ICOLD Bull. 99, 2020)

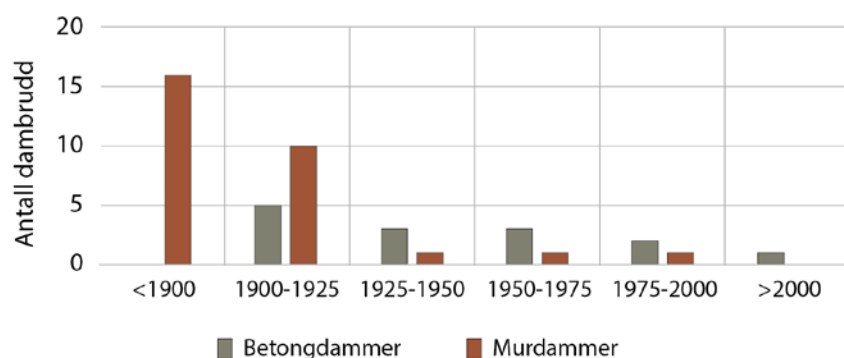


Figur D13. Damalder ved brudd i fyllingsdammer (ICOLD Bull. 99, 2020)

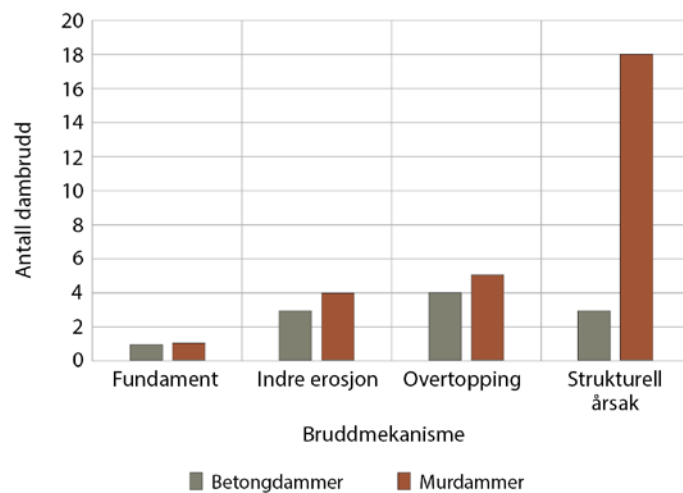


Figur D14. Antall brudd, bruddårsak og damalder i fyllingsdammer (1900-2020) (ICOLD Bull. 99, 2020)

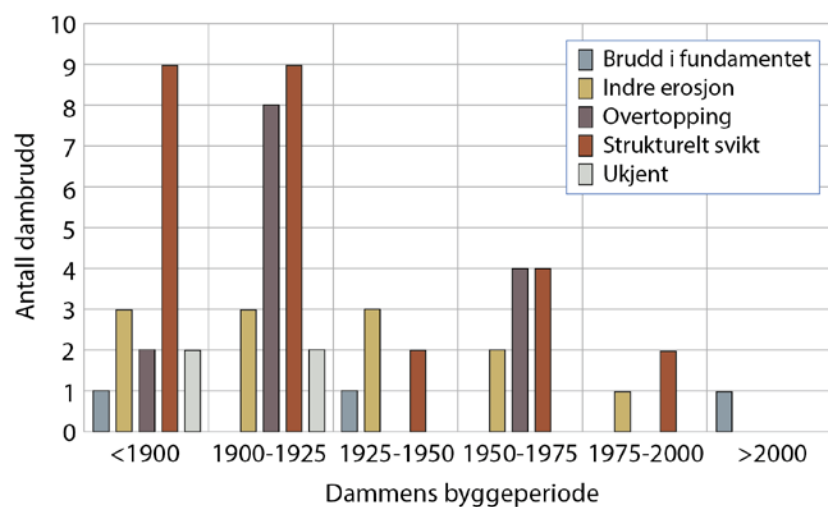
D2.6 Statistikk, betong- og murdammer



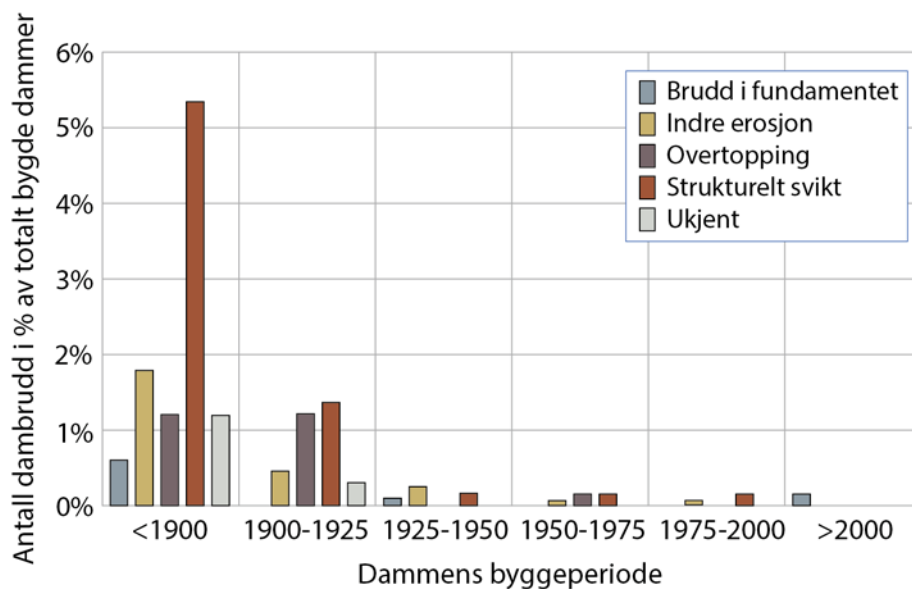
Figur D15. Antall dambrudd for betong- og murdammer (1900-2020) (ICOLD Bull. 99, 2020)



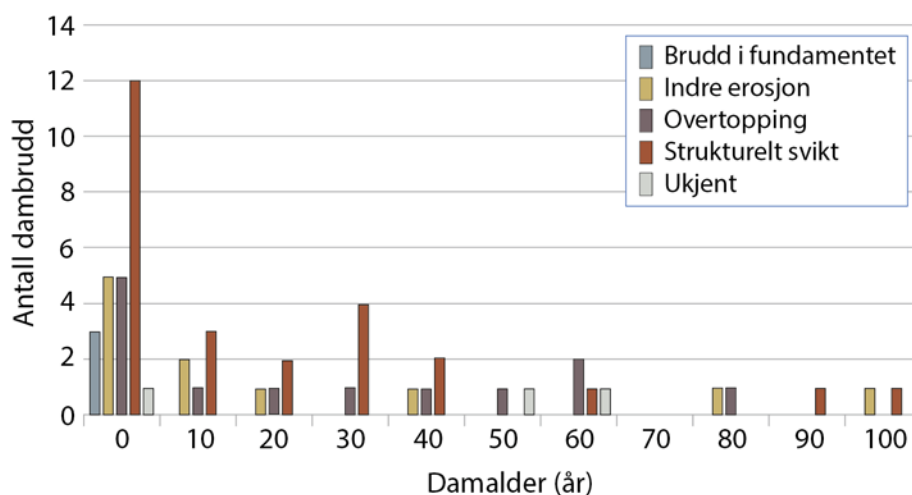
Figur D16. Bruddmekanismer for betong- og murdammer (1900-2020) (ICOLD Bull. 99, 2020)



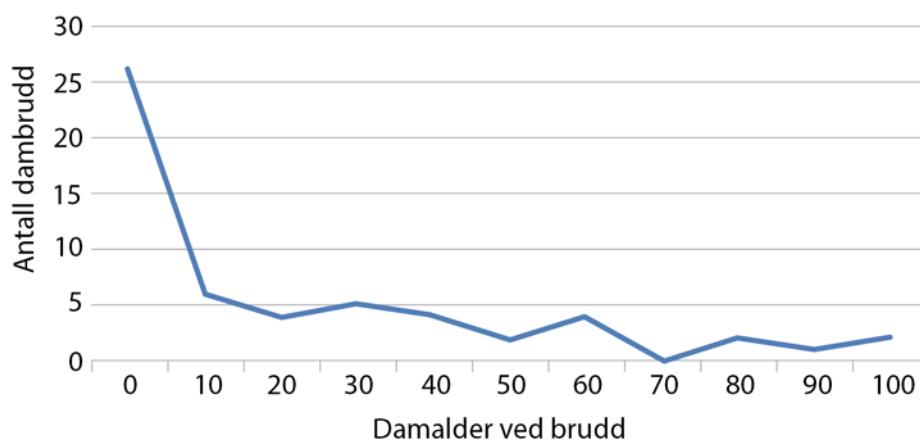
Figur D17. Antall brudd og tekniske årsak til brudd i betong- og murdammer, 1900-2020 (ICOLD Bull. 99, 2020)



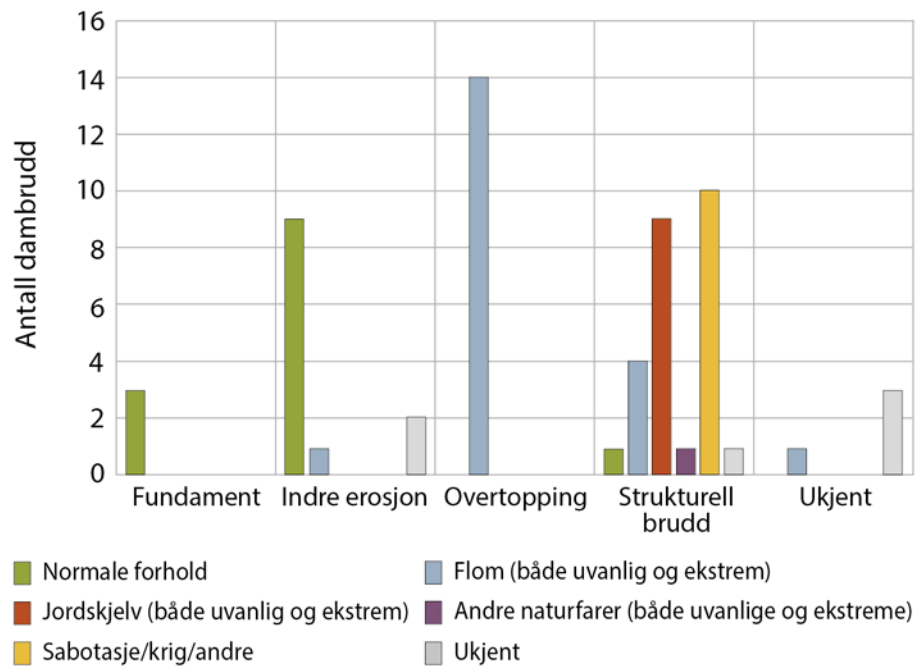
Figur D18. Antall dambrudd og bruddårsak i % av totalt antall dammer for betong- og murdammer (1900-2020) (ICOLD Bull. 99, 2020)



Figur D19. Bruddårsak i betong- og murdammer versus damalder (ICOLD Bull. 99, 2020)

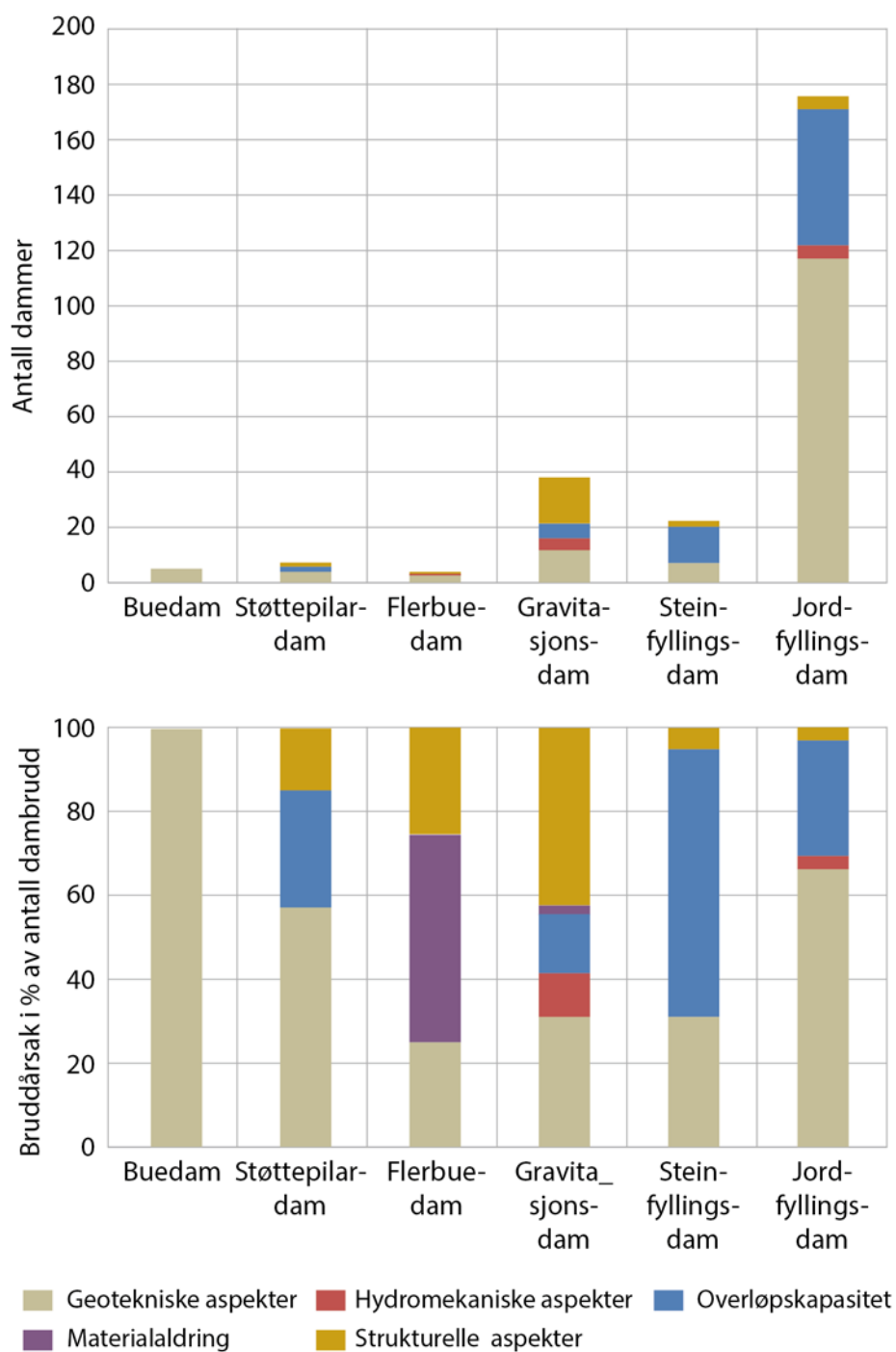


FigurD20. Damalder ved brudd i betong – og murdammer (ICOLD Bull. 99, 2020)

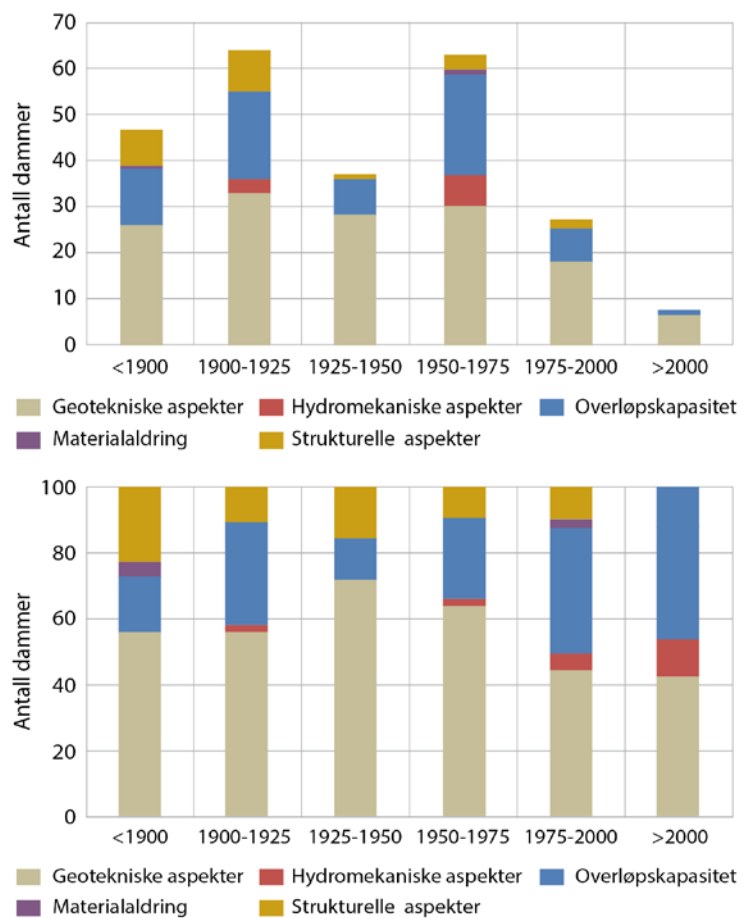


Figur D21. Bruddmekanismer og bruddårsak for betong – og murdammer (ICOLD Bull. 99, 2020)

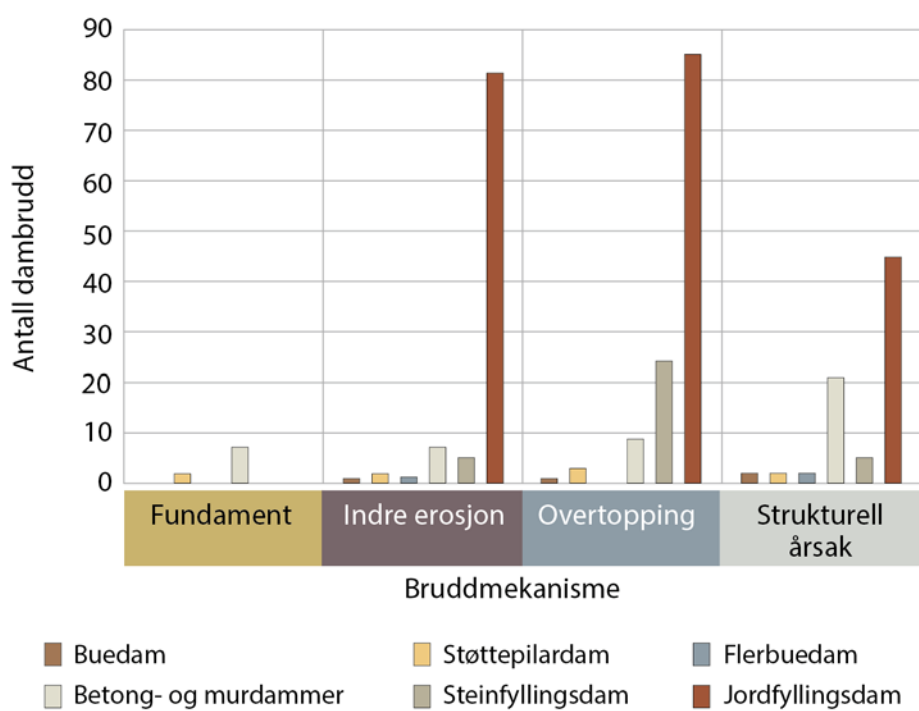
D2.7 Statistikk om bruddårsak, bruddforhold og bruddmekanismer, alle damtyper



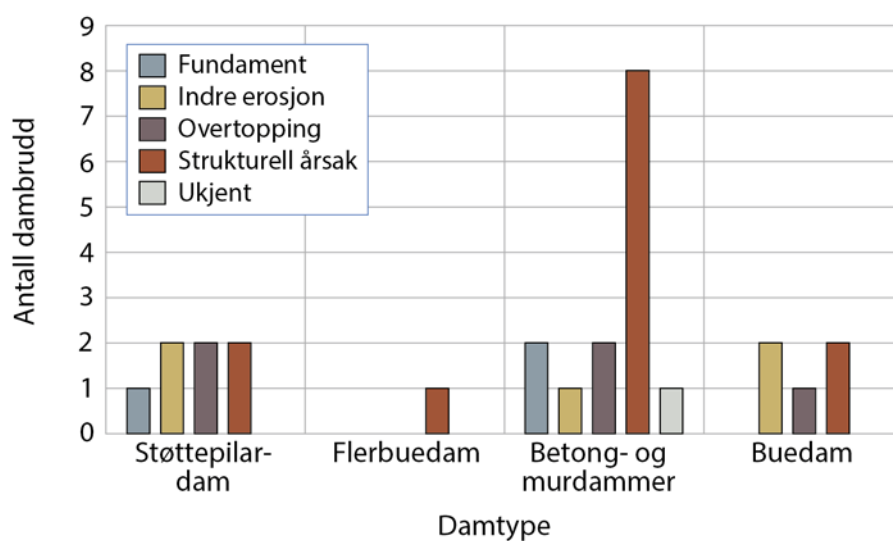
Figur D22. Bruddårsak pr damtype, alle damtyper, i antall (øvre) og i % (nedre) (ICOLD Bull. 99, 2020)



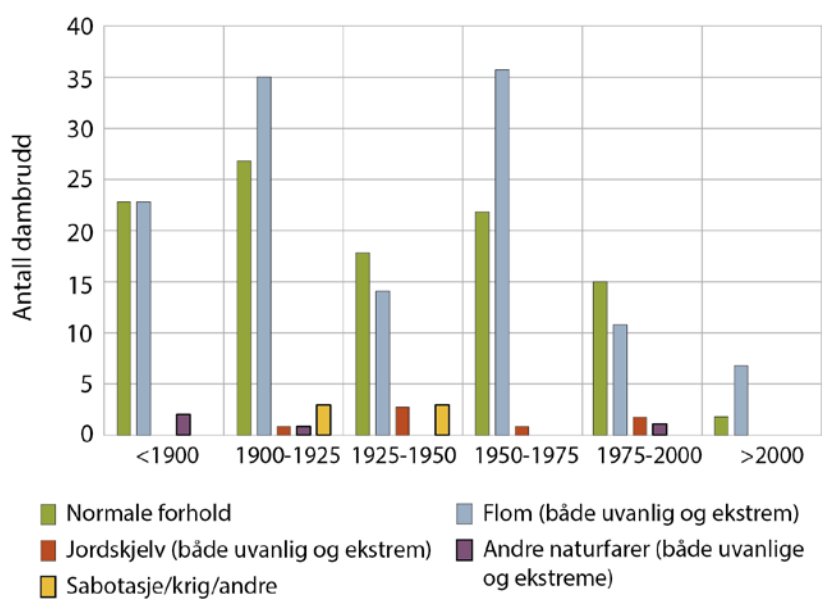
Figur D23. Bruddårsak vs byggeår, alle damtyper, i antall (øvre) og i % (nedre) (ICOLD Bull. 99, 2020)



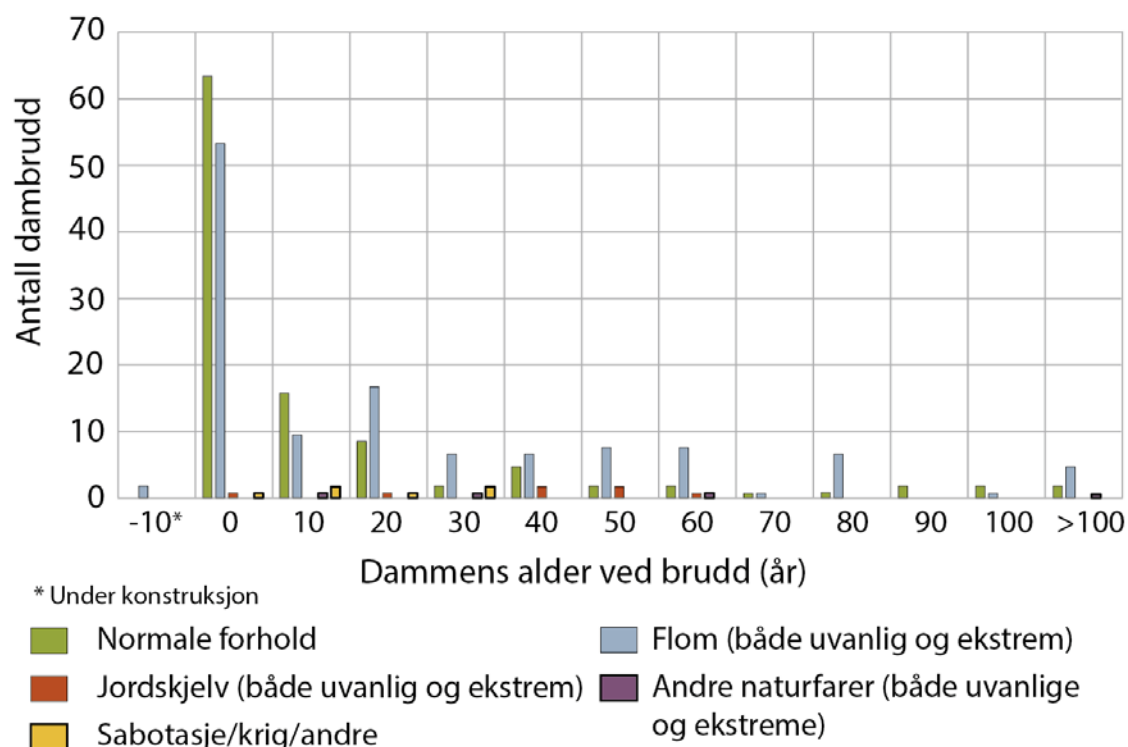
Figur D24. Bruddmekanisme pr damtype, 1900-2020 (ICOLD Bull. 99, 2020)



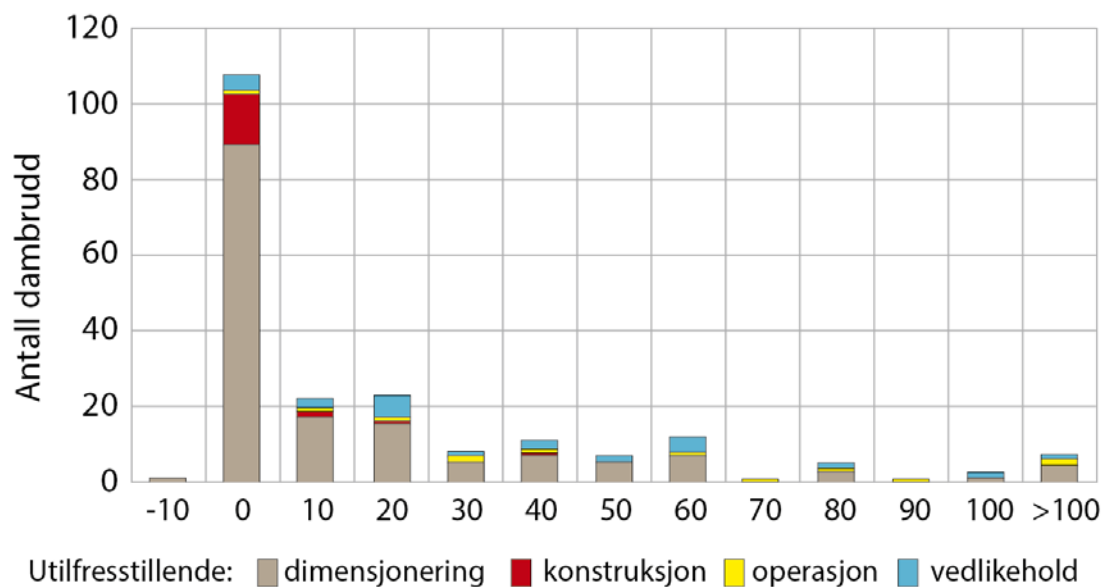
Figur D25. Bruddmekanisme pr damtype i de første 10 år av dammens levetid (ICOLD Bull. 99, 2020)



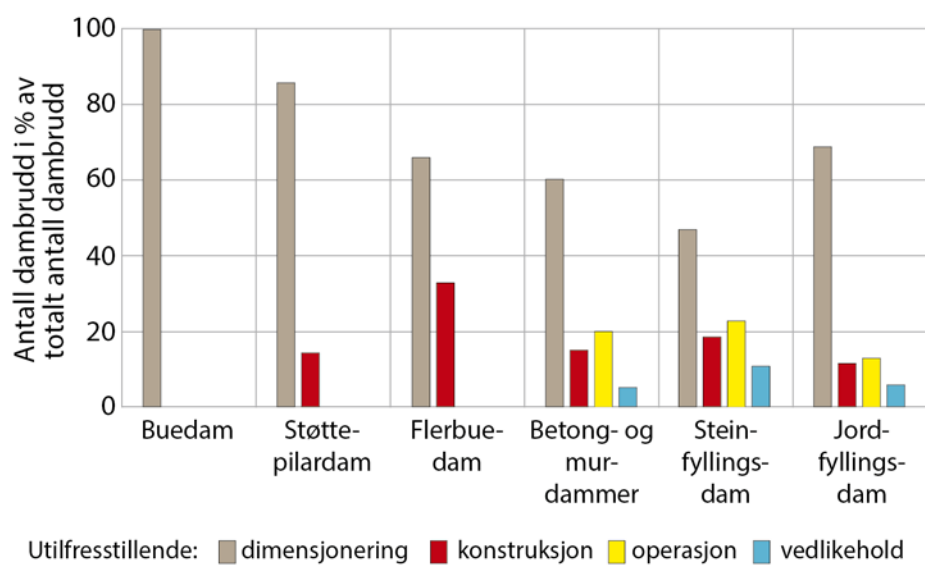
Figur D26. Bruddforhold som en funksjon av dammens byggeår, alle damtyper (ICOLD Bull. 99, 2020)



Figur D27. Bruddforhold som en funksjon av dammens alder, alle damtyper (ICOLD Bull. 99, 2020)



Figur D28. Bruddforhold som en funksjon av dammens alder, alle damtyper (ICOLD Bull. 99, 2020)



Figur D29. Bruddforhold i % av totalt antall dambrudd, alle damtyper (ICOLD Bull. 99, 2020)

D3 Statistikk fra litteratur

D3.1 Fyllingsdammer

Basert på observert hyppighet av dambrudd som skyldes indre erosjon og dammens levetid i USA har ICOLD publisert at dammene i USA har en årlig bruddsannsynlighet på grunn av indre erosjon mellom 3 og $9 \cdot 10^{-5}$ /år, så nærmere 10^{-4} /år (Fig. D9). Disse tall er bekreftet av Londe (1993), ICOLD (1995), Foster *et al.* (2000) og Høeg (2001). Peck (1980), basert på arbeid av Baecher *et al.* (1980 a og b) rapporterte at dambruddsannsynligheten for dammer både i USA og resten av verden var mellom 2 og $7 \cdot 10^{-4}$ /år. Foster *et al.* (2000) rapporterte at sannsynligheten for en ulykke på grunn av ustabilitet i nedstrøms skråningen var mellom 1 og $5 \cdot 10^{-4}$ /år og en bruddsannsynlighet ("breach") på $1,5 \cdot 10^{-5}$ /år.

Fell *et al.* (2015) rapporterte statistikk tall for fyllingsdammer fra 1800 til 1986, basert på Foster *et al.* (2000). Antall dammer i databasen er 11.192 "store" dammer³¹. Fell *et al.* (2015) beregnet en årlig bruddsannsynlighet i samme perioden (år 1800 til 1986): Bruddsannsynligheten etter først fylling av magasinet var på $2 \cdot 10^{-4}$ /år. Fells årlige bruddsannsynlighet (også vist i Fig. D9) ligger høyere enn ICOLD statistikken.

Et utvalg av flere av Fell *et al.*'s statistikk tall for fyllingsdammer er reproduisert i Tabell D5, med andel brudd og uønskede hendelser (i prosent) i snitt for forskjellige bruddmekanismer og til forskjellige tider i en dam levetid. For fyllingsdammer, ca. 67% av dambrudd som skyldes indre erosjon og "piping" og ca. 50% av indre erosjon og "piping" hendelser ("events") skjer enten ved første fylling av magasinet eller i løpet av de første fem operative år. Statistikken viser også at det er mye oftere brudd i mindre dammer (mindre enn 30 m høy) enn i høye dammer.

Tabell D5. Statistikk for brudd og uønskede hendelser for fyllingsdammer (Fell 2015).

Bruddmekanisme	Snitt årlig sannsynlighet		Antall hendelser/brudd og perioden i dammen levetid (i %)							
			Brudd				Hendelse/ulykke			
	Brudd	Hendelse	Constr	1 st fyll.	0-5 år	>5 år	Constr	1 st fyll.	0-5 år	>5 år
<u>Indre erosjon of piping</u>										
-Fylling	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	2%	48%	14%	36%	0%	26%	13%	61%
-Fundamnet	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	5%	20%	50%	25%	0%	30%	24%	46%
-Fylling til fundament	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	0%	50%	50%	0%	0%	20%	27%	53%
<u>Skråningsstabilitet</u>										
-Nedstrøms	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	18%	18%	0%	64%	15%	11%	25%	49%
-Oppstrøms	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	0%	0%	100%	0%	22%	2%	26%	50%

Hendelse er en uønsket hendelse som ikke fører til brudd eller kollaps (*event* på engelsk)

Constr er under bygging

1st fyll. er under første fylling av reservoaret

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

>5 år er etter de første 5 operative år.

³¹ I henhold til ICOLDs definisjon for "store dammer" (damhøyde ≥ 15 m).

D3.2 Alle damtyper

Bureau of Reclamation (USBoR, 1998) i USA gir de årlige bruddsannsynligheter i Tabell C4 pr damtype i vestlig USA. For kun USBoR dammer, angir samme kilde en årlig bruddsannsynlighet på $4,5 \cdot 10^{-3}$ for samtlige dammer, og $7,6 \cdot 10^{-3}$ for betongdammer.

Tabell D6. Årlig bruddsannsynlighet for vestlig USA dammer (BoR, 1998)

Damtype	Antall dammer	Antall dambrudd	Antall uhell*	Årlig bruddsannsynlighet
Jordfyllingsdam	7812	74	100	$6,5 \cdot 10^{-4}$
Steinfyllingsdam	200	17	14	$4,1 \cdot 10^{-3}$
Buedam	200	4	8	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Beton(gravitasjons)-dam	285	4	2	$4,5 \cdot 10^{-5}$
Alle damtyper	8497	99	124	$7,5 \cdot 10^{-4}$

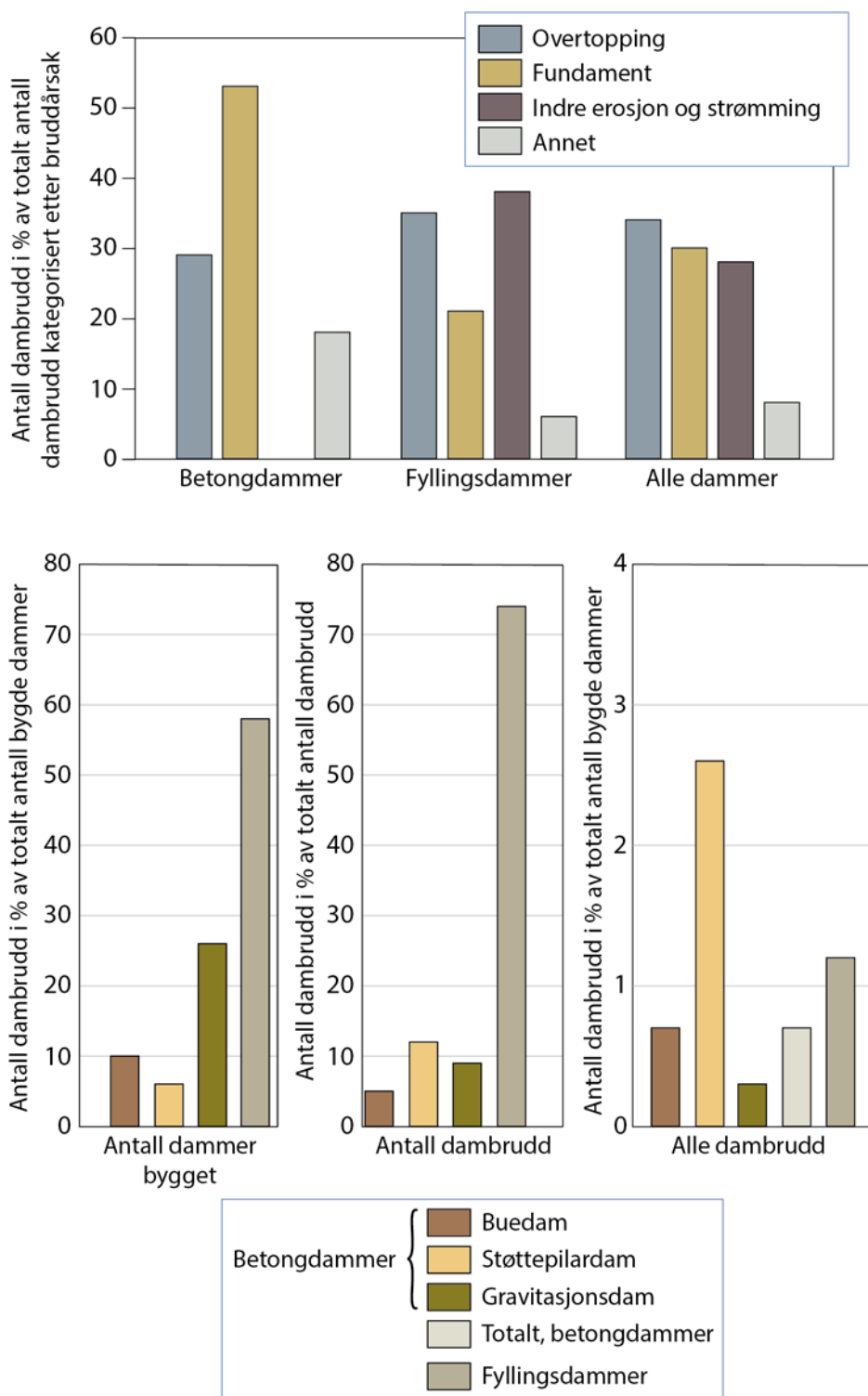
* Ikke spesifisert uhelltype

Douglas *et al.* (1999) presenterte statistikk tall i Tabell D7 for betongdammer på verdens basis. Fell *et al.* (2001) presenterte samme historiske tall frem til 1986.

Tabell D7. Årlig bruddsannsynlighet for betongdammer (Douglas *et al.*, 1999)

Periode	Årlig bruddsannsynlighet		
	Første 5 år	Etter 5 år	Totalt
1700-1929	$100 \cdot 10^{-5}/\text{år}$	$9 \cdot 10^{-5}/\text{år}$	$15 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
1939-1992	$14 \cdot 10^{-5}/\text{år}$	$1,4 \cdot 10^{-5}/\text{år}$	$3,5 \cdot 10^{-5}/\text{år}$

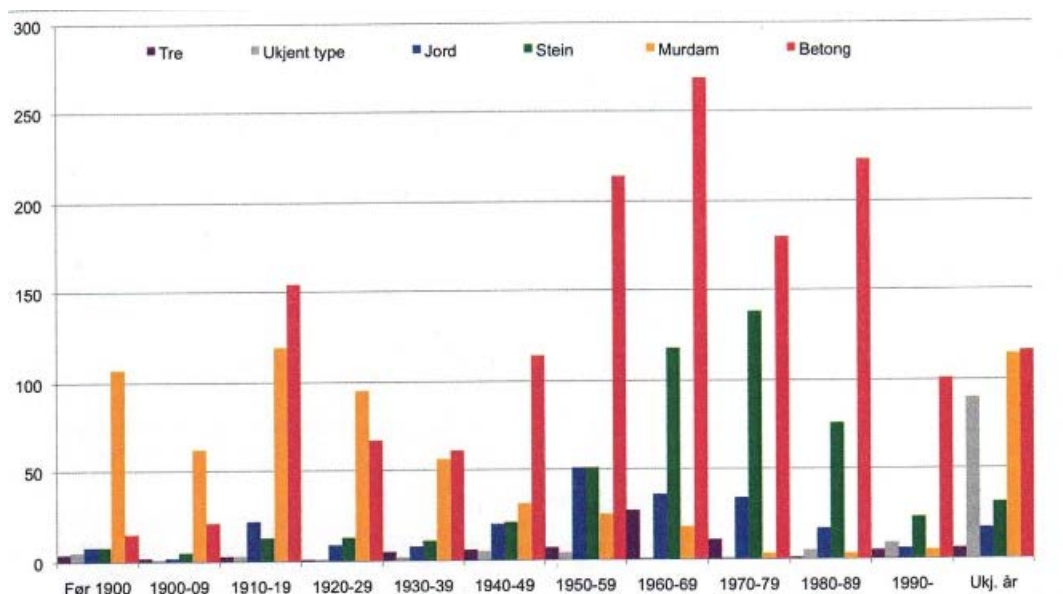
Fell *et al.* (2015) rapporterte statistikk tall for fyllings- og betongdammer i perioden 1800 til 1986, basert på Foster *et al.* (2000). Antall dammer i databasen er 11.192 "store" dammer. Figur D30 presenterer Fell *et al.*'s (2015) nyeste statistikk for alle typer dammer.



Figur D30. Dambrudd og bruddårsak for dammer over 15m høy (1900-1975) - Alle damtyper (NRC, 1983 og Fell et al., 2015)

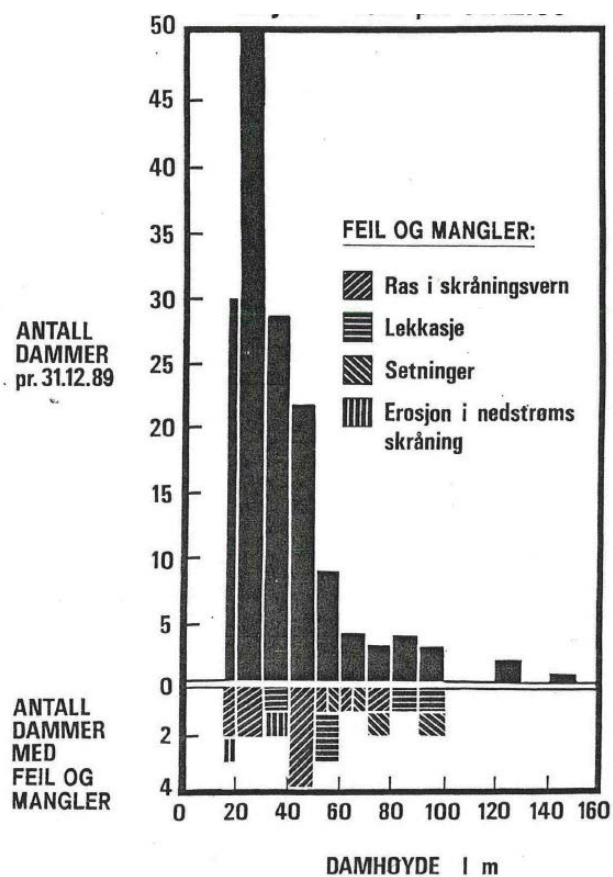
D3 Observasjoner fra dammer i Norge

Figur D31 gir NVE's oversikt over norske dammer, sorter etter damtype, og byggeår.

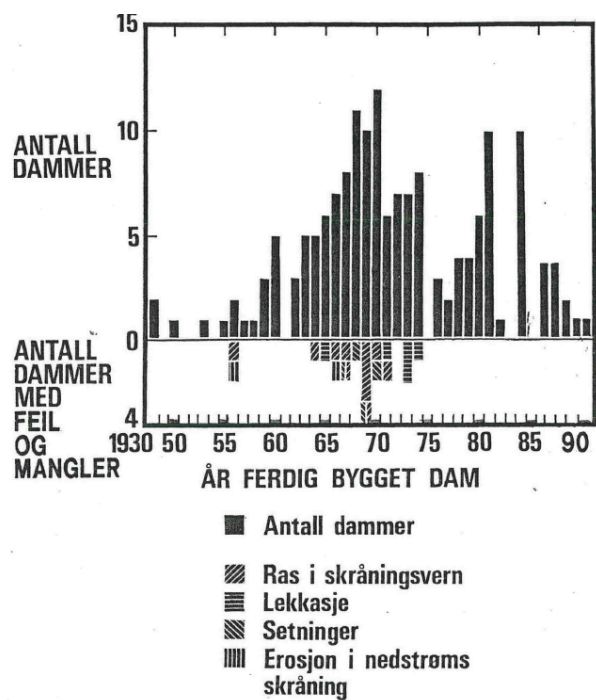


Figur D31. Antall norske dammer sorter etter damtype og byggeår, med basis i NVEs database SIV

Figur D32 og D33 oppsummerer observasjonene som er gjort på norske dammer pr 1989 (NGI, 1992). Statistikken er ikke oppdatert etter denne dato. Ingen norsk dam høyre enn 15m (ICOLDs "large dam" definisjon) er gått til brudd.



Figur D31. Skader på norske dammer for dammer 15 m høyde eller mer, pr 31-12 1989 (NGI, 1992)



Figur D32. Skader på norske dammer i forhold til år for ferdigstilling (NGI, 1992)

Vedlegg

Del I Verktøy for risikovurdering

Del II Tilleggsinformasjon

Del III Referansemateriale

Vedlegg

Del I Verktøy for risikovurdering

A Analysemetodikk og eksempler

- Oversikt over analysemetoder
- Fareanalyse ("Hazard analysis")
- Konsekvensanalyse ("Consequence analysis")
- Risikoakseptkriterier

B Bruddmekanismer og skademekanismer - fyllingsdammer

C Bruddmekanismer og skademekanismer - betongdammer

D Dambruddstatistikk

Del II Tilleggsinformasjon

E Eksponenttall og nyttig statistikk

F Risikobegreper

G The "Observational Method"

H Risikovurdering i andre land

Del III Referansemateriale

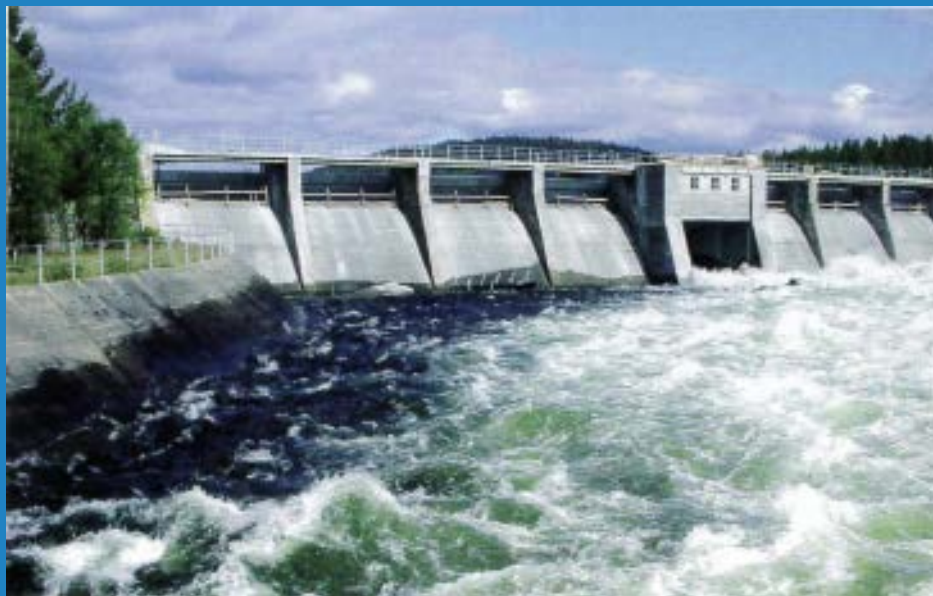
I Definisjoner, akronymer og symboler

J Risikostandarder i Norge (NS) og ISO

K Liste over Energi Norge rapporter med risikoinnhold

L ICOLD Bulletins med innhold om damsikkerhet

M Siterte kilder



Pålsbu platedam (foto: Statkraft Energi AS)



Storvassfyllingsdam (foto: Statkraft Energi AS):

Vedlegg E Eksponenttall og nyttig statistikk

Innhold

E1 Eksponenttall

E2 Annen nyttig statistikk

E2.1 Menneskelig dødelighet

E2.2 Hvor stammer brudd sannsynlighet på 10^{-4} /år fra?

E2.3 Statistikk tall for daglige aktiviteter



E1 Eksponenttall (Tabell E1)

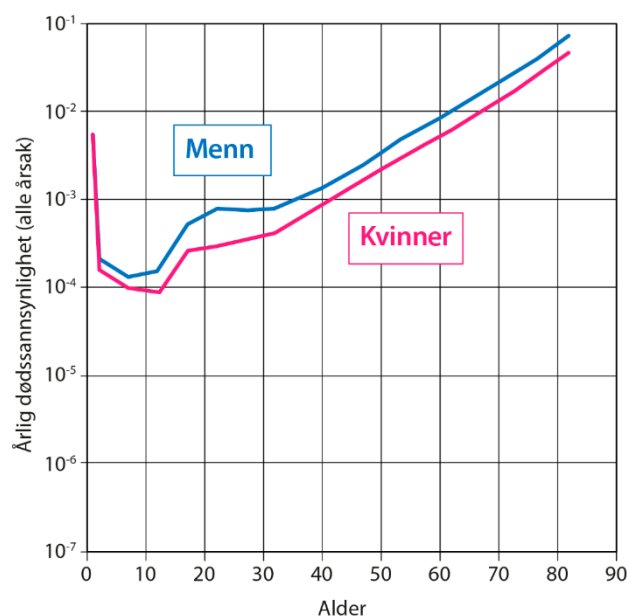
Tabell E1. Forklaring på eksponenttall

Sannsynlighet Eksponentielt uttrykk	Sannsynlighet Hvor ofte det kan skje over tid
$10^0/\text{år}$	10 ganger pr år
$10^0/\text{år}$	En gang pr år
$10^{-1}/\text{år}$	En gang pr 10 år
$10^{-2}/\text{år}$	En gang pr 100 år
$10^{-3}/\text{år}$	En gang pr 1.000 år
$10^{-4}/\text{år}$	En gang pr 10.000 år
$10^{-5}/\text{år}$	En gang pr 100.000 år
$10^{-6}/\text{år}$	En gang pr 1.000.000 år
$10^{-7}/\text{år}$	En gang pr 10.000.000 år
$10^{-8}/\text{år}$	En gang pr 100.000.000 år

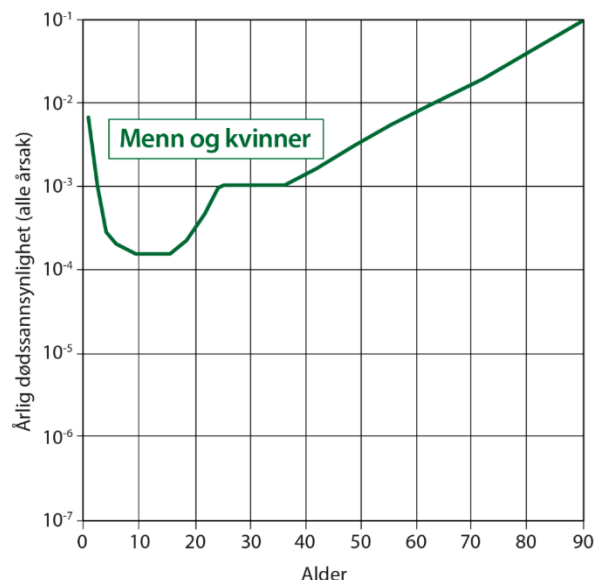
E2 Annen nyttig statistikk

E2.1 Menneskelig dødelighet

Figur E1 viser den årlige sannsynligheten for menneskelig dødelighet i Canada. Alle dødsårsaker er tatt med. Fra fødsel til ca. 2 år reduseres den årlige dødssannsynligheten raskt fra 10^{-2} til 10^{-4} . Mellom 5 og 10 opplever et menneske den sikreste periode i ens liv. Deretter øker den årlige dødssannsynligheten mer eller mindre jevnt med årene. Figur E1 forteller at hvis et menneske er 60 år gammel er det 1 % sjanse for han/hun vil dø i det neste året, hvis et menneske er 90 år gammel er det 10 % sjanse for at det mennesket vil dø i det neste året. USA bruker lignende tall, uten å differensiere mellom mann og kvinne (Fig. E2).



Figur E1. Dødssannsynlighet for menn og kvinner mellom 1 og 90 år, alle årsak (Statistics Canada, 2018)



Figur E2. Døds sannsynlighet for menn og kvinner mellom 1 og 90 år, alle årsak (CDC, 2005, USA)

E2.2 Hvor stammer brudd sannsynlighet på 10^{-4} /år fra?

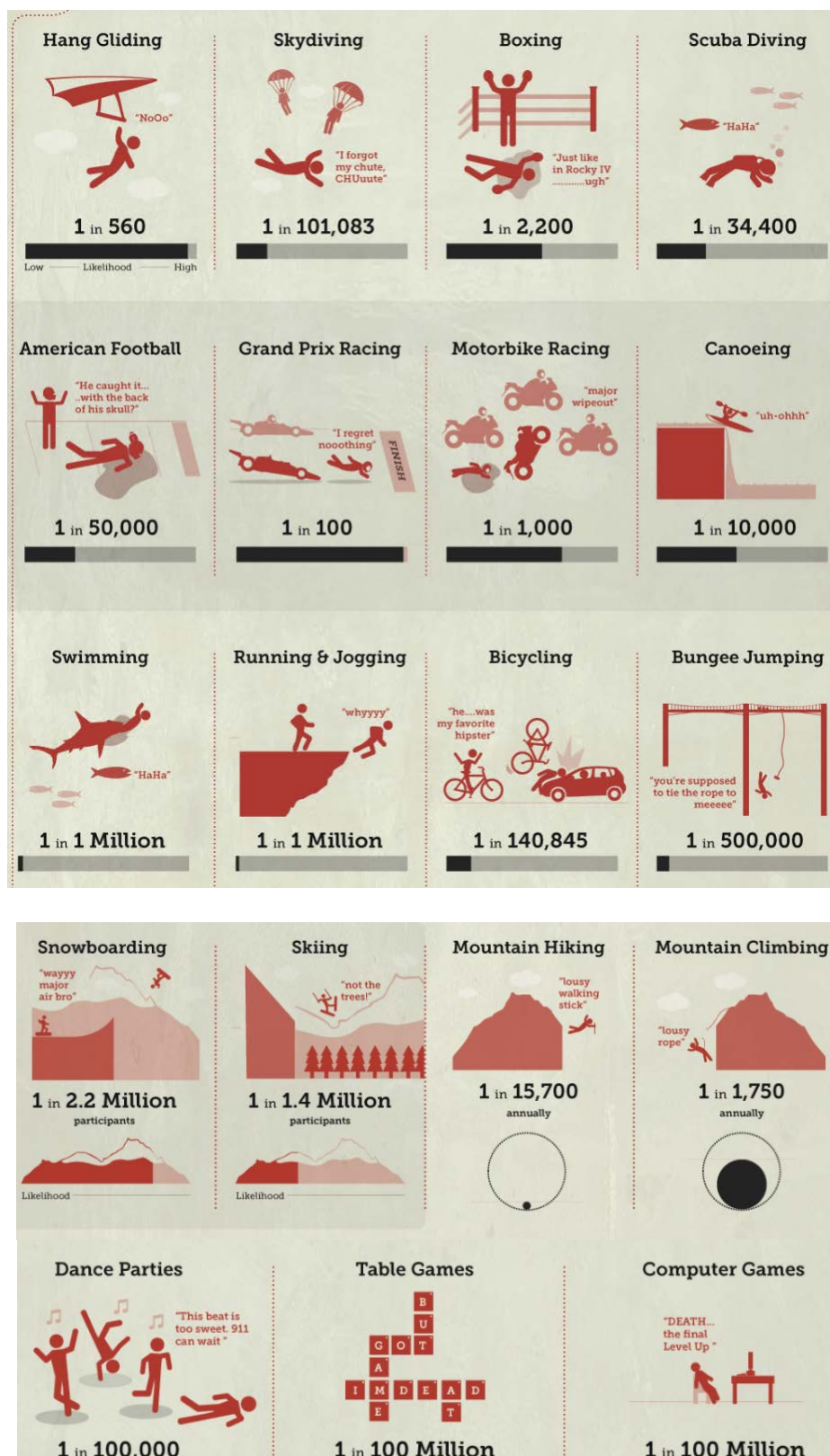
Sannsynlighet på 10^{-4} /år ($0,0001$ /år) brukes ofte som en øvre grense for tolerabel brudds sannsynlighet for større konstruksjoner. Verdien på 10^{-4} /år er den samme som den årlige døds sannsynligheten for et barn 5-13 år gammel, grunnet alle mulige årsaker.

E2.3 Statistikk tall for daglige aktiviteter

Tabell E2 lister døds sannsynlighet for flere dagligdagse aktiviteter. Figur E3 illustrerer lignende.

Tabell E2. Statistikk for vanlige aktiviteter (Insurance Information Institute USA - <https://www.iii.org/fact-statistic/facts-statistics-mortality-risk> (2018))

Årsak	$P_{død \text{ årlig}}$	Årsak	$P_{død \text{ årlig}}$
Forgiftning	$1,9 \cdot 10^{-4}$	Fall i trapper	$7,7 \cdot 10^{-6}$
Narkotika	$1,9 \cdot 10^{-4}$	Drukning	$2,3 \cdot 10^{-6}$
Bilulykker	$1,3 \cdot 10^{-4}$	Flyulykke	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Fotgjengere	$2,4 \cdot 10^{-5}$	Flom	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Motorsykelulykke	$1,4 \cdot 10^{-5}$	Lyn	$7,0 \cdot 10^{-8}$



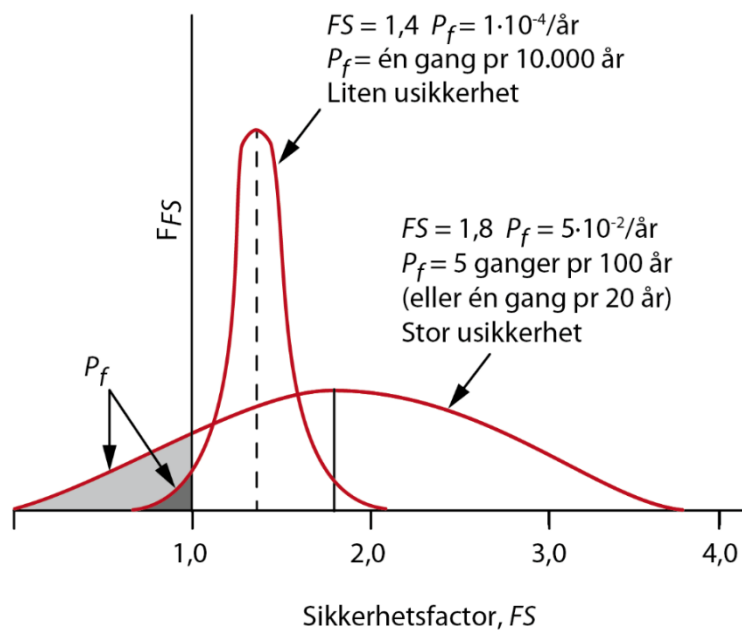
Figur E3. Døds sannsynlighet for diverse aktiviteter, t.o.m. fra "computer games".

I nederste del av figuren er sannsynlighet gitt som én i 100,000 "dance parties" og én i 100 million "games played". National Centre for Health Statistics (CDC, USA) <https://www.besthealthdegrees.com/health-risks/>

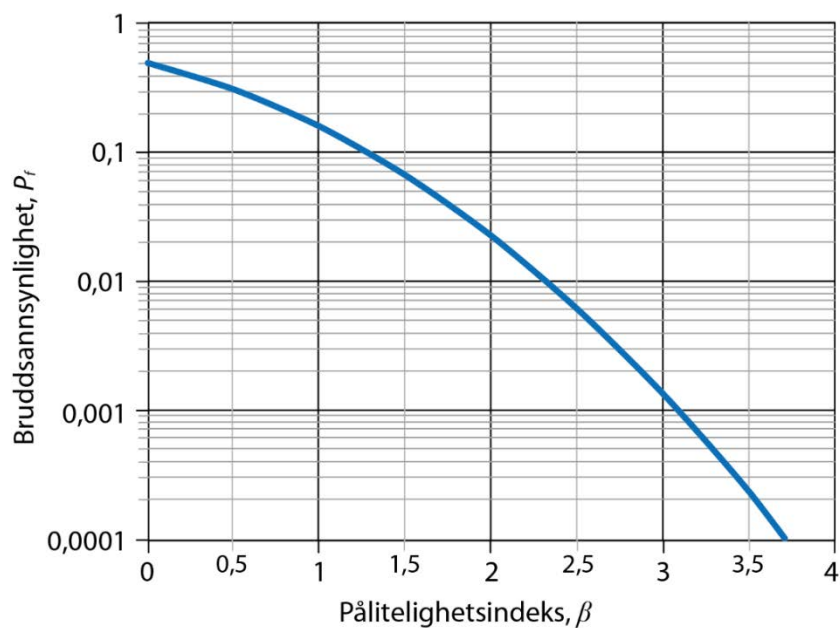
Vedlegg F Risikobegreper

Innhold

- F1 Usikkerheter
- F2 Sikkerhetsmargin
- F3 Bruddsannsynlighet og sikkerhetsfaktor
- F4 Effekt av usikkerheter på pålitelighetsindeks
- F5 Risikodiagram
- F6 Pålitelighetsindeks og bruddsannsynlighet
- F7 ALARP-prinsippet
- F8 Risikoinformerte beslutningsprosesser (RIDM)
- F9 Bruk av Ingeniørens faglige skjønn ("*Engineering judgment*")
- F10 Inkrementell risiko



Sikkerhetsfactor og bruddsannsynlighet for en skråning



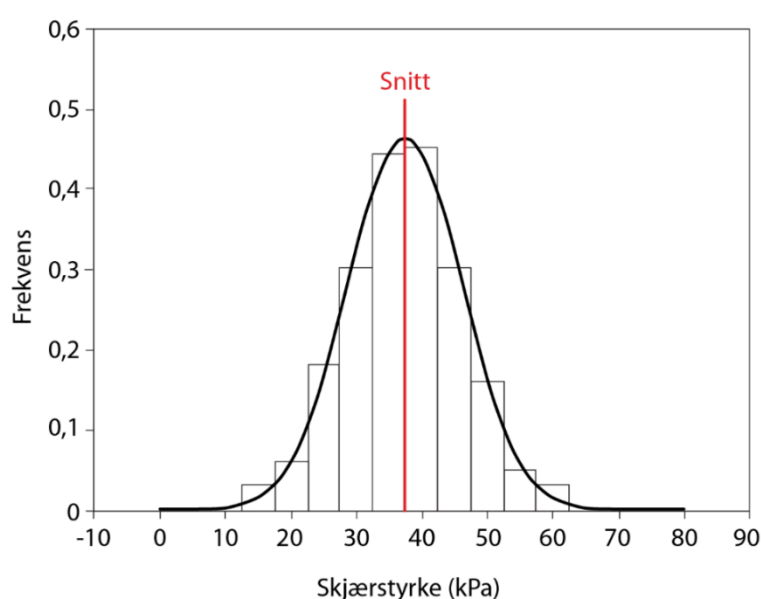
Pålitelighetsindeks og bruddsannsynlighet (normal fordeling)

Vedlegg F Risikobegrep

F1 Usikkerheter

En statistisk fordeling er et praktisk verktøy for å kvantifisere usikkerhet (Fig. F1), med et gjennomsnitt μ , et standardavvik (SD) og en variasjonskoeffisient, CoV . Variasjonskoeffisient er et uttrykk for størrelsen på standardavviket relativt til gjennomsnittet ($CoV = SD/\mu$). Figur F2 viser betydningen av ett standard avvik. For en normal fordeling dekker $\pm$ ett standardavvik ca. 68 % av alle data; innenfor ± 2 SD finnes det over 95 % av data og innenfor ± 3 SD er det nesten 100% av data.

Både belastning og motstand har usikkerheter (Fig. F3). Bruddsansynlighet er knyttet til den potensielle overlappingen av de to usikkerhetsfordelingene. For å kunne gjøre risikobaserte tilnærminger er det behov for å kvantifisere usikkerhetene.



Figur F1. Eksempel på usikkerhet i skjærstyrke

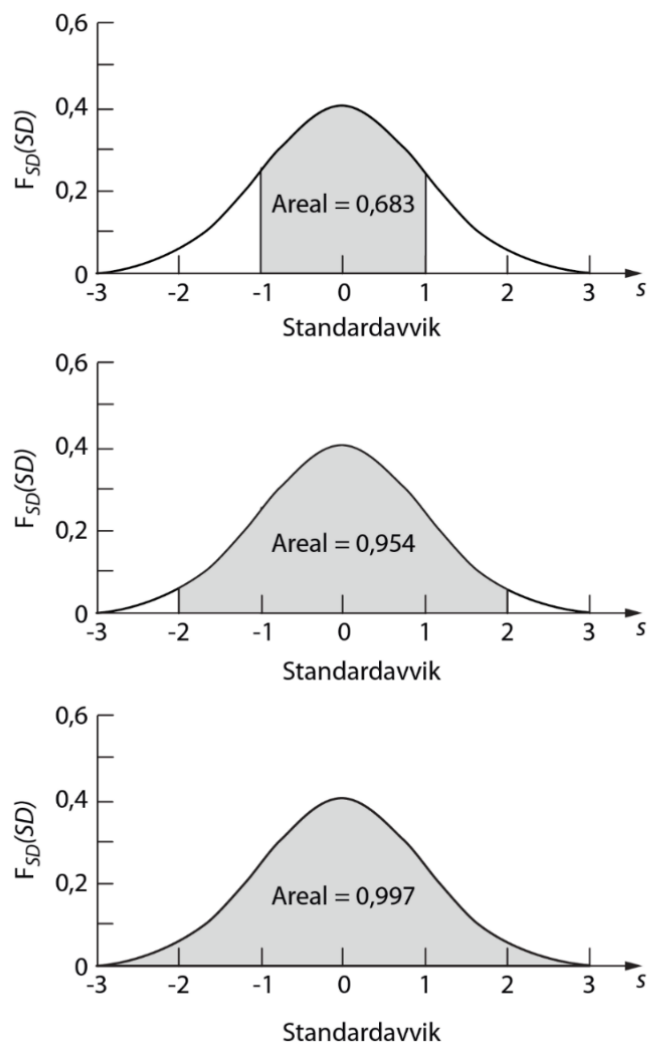
F2 Sikkerhetsmargin

Målet med en sikkerhetsvurdering er å demonstrere at risikoen forbundet med et anlegg er akseptabel. Den konvensjonelle måten er å bruke en «deterministisk» sikkerhetsfaktor, FS . En sikkerhetsfaktor på 1,5 blir for eksempel ofte brukt for å redegjøre for kombinasjonen av usikkerheter i bakken, i analyseparameterne og i beregningsmodellen.

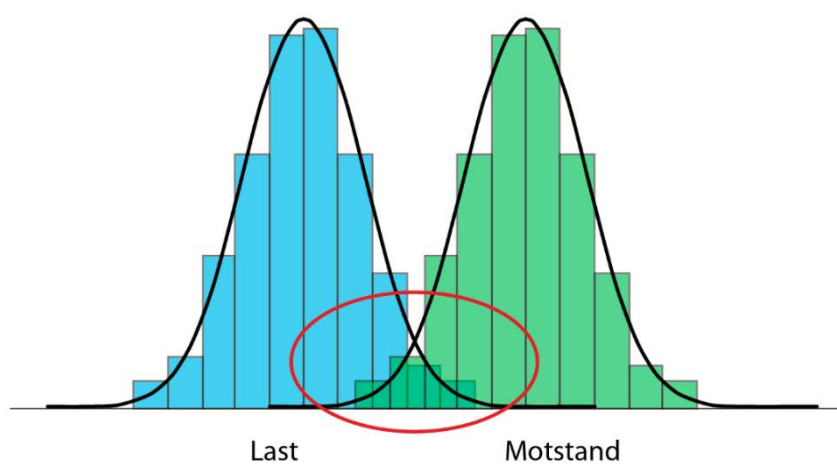
Det er, f.eks., en generell oppfatning at et design med en sikkerhetsfaktor større enn eller lik 1,5 må være «trygt». I virkeligheten er sikkerhetsmålet ikke så enkelt. En sikkerhetsfaktor på 1,5 representerer faktisk et spekter av bruddsansynligheter som avhenger av usikkerhetene i inngangsparameterne i analysen. I en sikkerhetsvurdering er ingeniøren ute etter å tallfeste sikkerhetsmarginen (M). Sikkerhetsmargin er definert som:

$$M = \text{Motstand} - \text{Belastning}$$

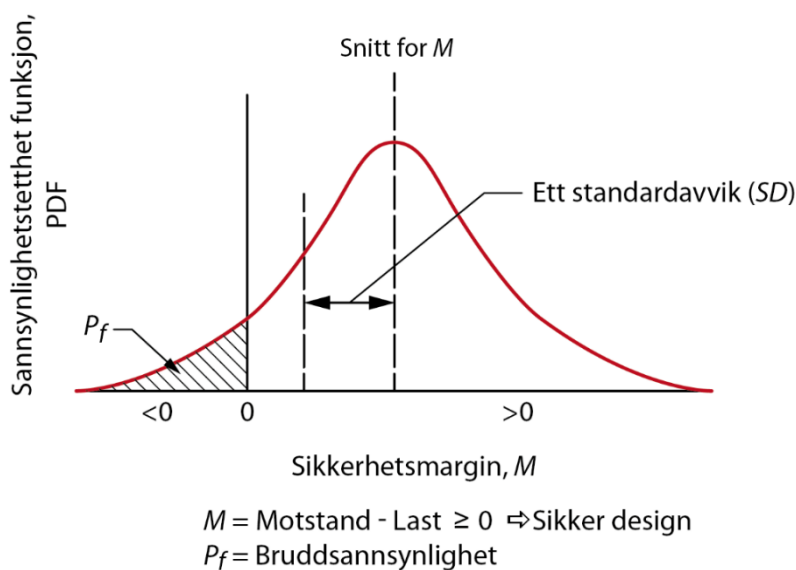
Når M er større enn null, er strukturen trygg; når M er mindre eller lik null, er situasjonen utrygg. Sikkerhetsmargin har en usikkerhet (Fig. E4), og en bruddsansynlighet, P_f , som kan representeres med sonen i sannsynlighetsfordelingen hvor M er mindre enn null i Figur E4.



Figur F2. Betydning av ett, to og tre standard avvik i en normal fordeling



Figur F3. Usikkerhet i last og motstand og verdiene som forårsaker brudd (overlapping i rød ellipse)

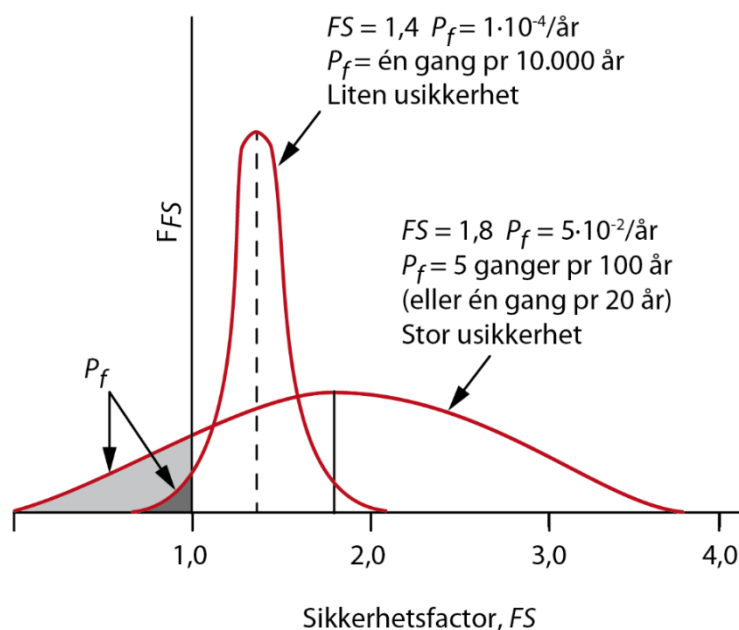


Figur F4. Sikkerhetsmargin og bruddsannsynlighet P_f (som er likt sonen under kurven hvor $M < 0$)

F3 Bruddsannsynlighet og sikkerhetsfaktor

Figur 5 illustrerer at en dimensjonering med en høy sikkerhetsfaktor kan ha en høyere årlig bruddsannsynlighet enn en annen dimensjonering med en lavere sikkerhetsfaktor. En høyere sikkerhetsfaktor innebærer ikke nødvendigvis en mindre risiko enn en lav sikkerhetsfaktor, fordi den påvirkes av usikkerhetene i analysen. Gjennom regulering eller tradisjon brukes den samme verdien av sikkerhetsfaktor på forhold som involverer vidt ulik grad av usikkerhet. Dette er ikke logisk.

Sikkerhetsfaktor er dermed ikke en tilstrekkelig indikator på sikkerhet fordi den ikke gjør rede for usikkerheten i analysen.



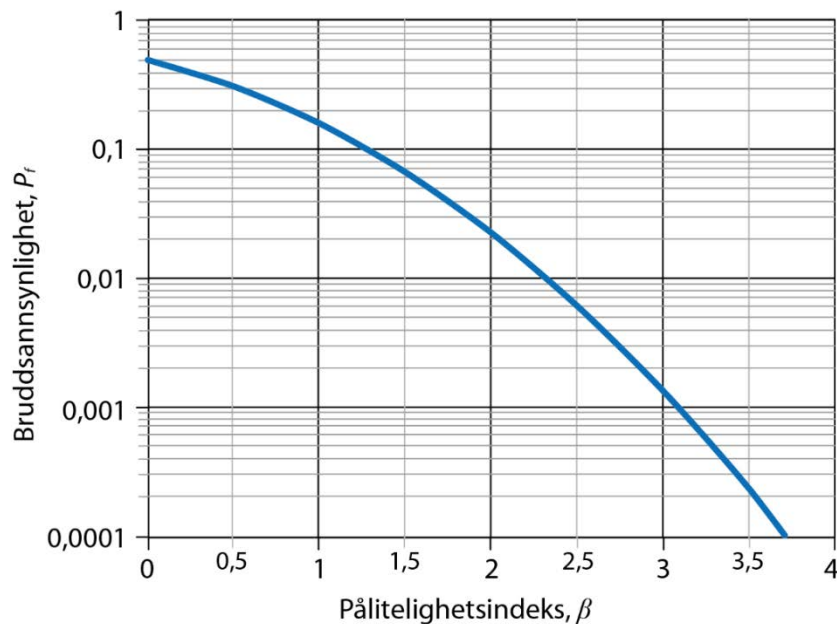
Figur F5. Sikkerhetsfaktor og bruddsannsynlighet for en skråning

F4 Pålitelighetsindeks og bruddsannsynlighet

Et alternativ til bruddsannsynlighet er å uttrykke sikkerhetsmålet i form av en årlig pålitelighetsindeks, β . "Pålitelighets"-indeksen er et mer positivt uttrykk enn "brudd"-sannsynlighet, og de to begrepene er direkte korrelert. Pålitelighetsindeks viser til antall standardavvik sikkerhetsmarginen finner seg fra den gjennomsnittlige sikkerhetsmarginen til brudd. Pålitelighetsindeks viser til avstanden til sonen hvor $M \leq 0$ i Figur F4. Pålitelighetsindeks er definert som:

$$\beta = \frac{FS_{snitt} - 1}{SD}$$

Figur F6 viser sammenhengen mellom bruddsannsynlighet og pålitelighetsindeks for en normalt fordelt sikkerhetsmargin. For eksempel tilsvarer en pålitelighetsindeks (β -verdi) på 3,7 en bruddsannsynlighet (P_f) på 10^{-4} og en β -verdi på 4,3 til en P_f på 10^{-5} .



Figur F6. Pålitelighetsindeks og bruddsannsynlighet (normal fordeling)

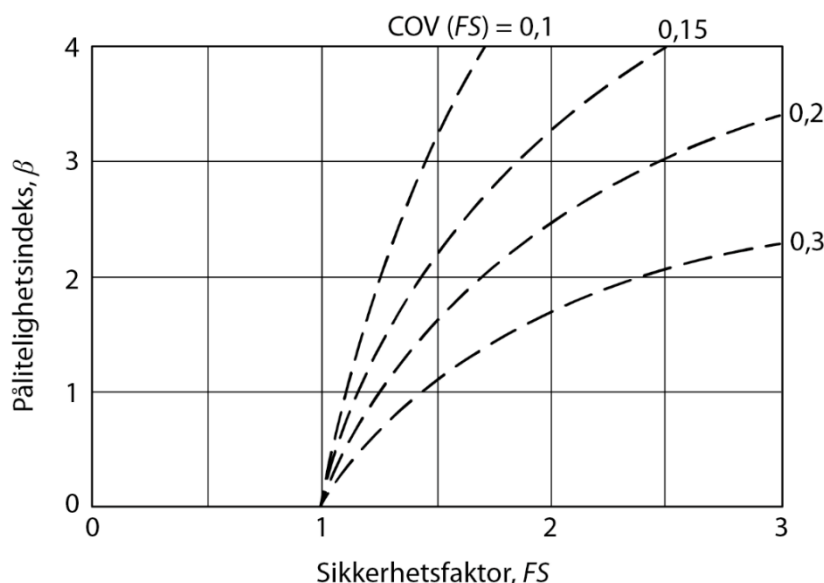
For en normal fordeling er verdiene for pålitelighetsindeks (β) og bruddsannsynligheter (P_f) som følger:

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

F5 Effekt av usikkerheter på pålitelighetsindeks

Figur F7 viser effekten av lave og høyere usikkerheter på sikkerhetsfaktor (FS) og pålitelighetsindeks. Usikkerheter i analyseparameterne og analysemodell uttrykt med et variasjons koeffisient, CoV, på 10, 15, 20 og 30 %. For en sikkerhetsfaktor på 1,5 for en skråning i Figur F7 reduseres pålitelighetsindeks-verdien³² fra 3,2 til 1,1 når CoV økes fra 10 til 30 %. Det vil si at bruddsannsynlighet økes fra 10^{-3} til ca. 10^{-1} på grunn av den høyere usikkerheten.

³² Antatt normal fordeling

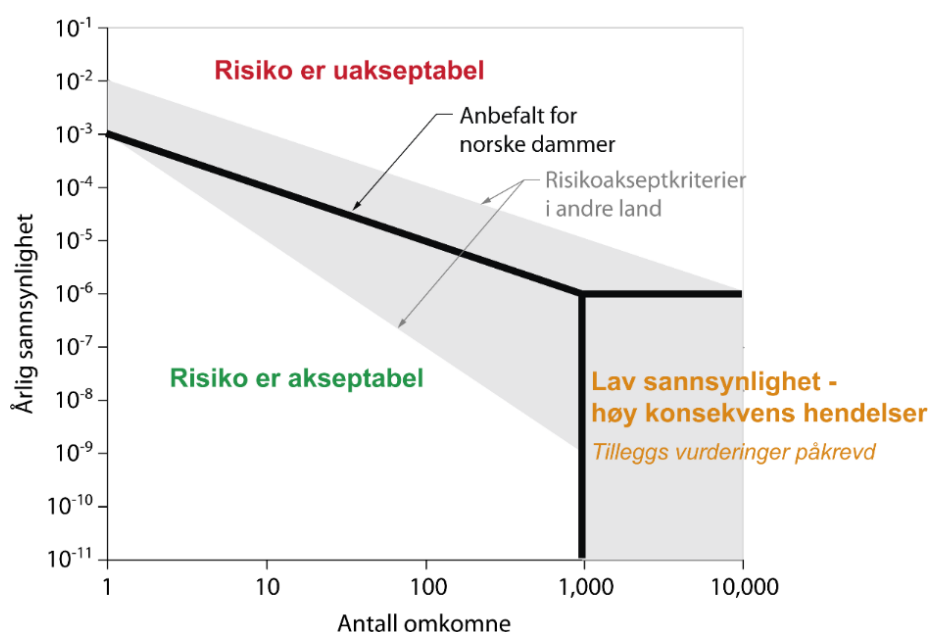


Figur F7 Sikkerhetsfaktor og bruddsannsynlighet for en skråning med økende usikkerhet

F6 Risikodiagram

Kvalitativ risiko uttrykkes ved risikomatriser (Vedlegg A). Kvantitativt, uttrykkes risiko oftest ved såkalte F - N kurver eller f - N kurver, der F er kumulativ frekvens av hendelser og f er frekvens av hendelser. N 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.

I en kvantitativ risikoanalyse, brukes ofte Figur F8 som veiledende ramme for akseptabel risiko. Figuren samler veiledninger for akseptabel risiko fra flere land (Vedlegg A, avsnitt D4). Ikke alle veiledninger gjelder ble utviklet for dammer, flere er av mer generell karakter. De fleste risikoakseptkriterier opererer ikke med et skarpt skille mellom akseptabel og uakseptabel risiko. Figur F8 oppgir nåværende NGI-anbefalt risikoaksept for norske dammer i SHP-prosjektet.



Figur F8 Anbefalt akseptabel og uakseptabel risiko for norske dammer (Lacasse & Høeg 2019).

F7 ALARP-prinsippet

I UK brukes tre risikoområder: akseptabel risiko, uakseptabel risiko, og et område inn i mellom som kalles tolerabel risiko. Som regel skal uakseptabel risiko i det minste reduseres ned til et "tolerabelt" nivå (ned inn i ALARP området - hvor risikoen er så lav som praktisk mulig³³).

Hvis risikoen ligger i et uakseptabelt område implementeres risikoreducerende tiltak for å redusere risikoen ned til et akseptabelt nivå. Eventuelt kan man bruke ALARP prinsippet: risikoen skal reduseres så langt som praktisk rimelig. Beslutningen om hva som er praktisk rimelig risikoreduksjon bør ta hensyn til følgende aspekter:

- Kostnader og kostnadseffektiviteten av ytterligere risikoreduksjon.
- Graden av sikkerhet og usikkerhet ved forskjellige aspekter av dammen og omgivelsene.
- En presedens av sammenlignbare beslutninger på andre dammer.
- Det er ikke praktisk mulig å utbedre identifiserte svakheter.
- Store usikkerheter og lav mulighet for suksess for planlagte tiltak.
- Tiden for å implementere utbedringen.
- Andre hensyn.

Akseptabel og uakseptabel risiko:

- Akseptabel risiko ("Broadly acceptable risk")
- Uakseptabel risiko ("Unacceptable risk")

Inn i mellom, kan det defineres en 'tolerabel risiko'-sone ("Tolerable risk"): Uttrykket betyr at risikoen må styres på en tilfredsstillende måte med analyser, oppfølging og risikoreduceringstiltak så langt som praktisk mulig (på engelsk, ALARP-prinsippet, "**As Low As Reasonably Practicable**").

ALARP analyser

Bør demonstrere risikonivå for alle plausible farer og dam respons. Demonstrasjonen bør forklare:

- Sikkerhetsnivået som er oppnåelig, dvs. hva som er praktisk mulig.
- Hvorfor de sikreste av de fysisk oppnåelige alternativene ikke ble valgt.
- Begrunnelse av valgte løsning til regulatoren og samfunnet (soliditeten, samfunnsmessig verdi og optimalt alternativ).

F8 Risikoinformert beslutningsprosessen (RIDM ³⁴)

Det er to tilnærminger til å vurdere damsikkerhet (se hovedtekst):

- 1) Standardbasert tilnærming (SBA) (konvensjonell tilnærming); og
- 2) "Risiko-bevisst beslutningsprosess" (RIDM).

RIDM estimerer risiko ved å se på sannsynligheter, mulige svakheter i dammen eller rundt dammen og konsekvenser. Risikovurderingene brukes sammen med SBA for å avgjøre videre fremgangsmåte. RIDM fremmer en økt forståelse av sikkerhetsaspekter for dammen, identifiserer sårbarhetsområder som ikke er identifisert ved konvensjonelle analyser og prioriterer rehabiliteringstiltak for å redusere risiko. Formålet med RIDM er alltid å minimisere risiko for tap av liv.

Mange viktige avgjørelser baseres på risiko-vurderinger, der risiko er definert som "sannsynligheten multiplisert med (alvorlighet av)

Risiko-bevisst beslutningstaking (RIDM):

Formålet med RIDM er alltid å minimisere risiko for tap av liv. RIDM-prosessen erkjenner at menneskelig dømmekraft har en relevant rolle i beslutninger, og at teknisk informasjon ikke kan være det unike grunnlaget for beslutningstaking. Dette er på grunn av uunngåelige hull i den tekniske informasjonen, og fordi beslutningstaking er en iboende subjektiv, verdibasert oppgave. I håndteringen av komplekse beslutningsproblemer som involverer konkurrerende mål, er den kumulative kunnskapen fra erfarent personell avgjørende for å integrere tekniske og ikke-tekniske elementer for å produsere pålitelige vurderinger og beslutninger.

³³ ALARP = "**As Low As Reasonably Practicable**".

³⁴ "**Risk-Informed Decision-Making**"

konsekvensene". Det å skulle ta en beslutning medfører nesten alltid å ta en risiko. Det er derfor helt avgjørende, i situasjoner preget av usikkerheter, å basere beslutningstakingen på risikovurderinger.

Hvordan tar man så fornuftige og gode beslutninger når man mangler kunnskap? I enkelte tilfeller kan man utsette avgjørelsen i påvente av mer kunnskap. Det er imidlertid ikke alt som kan utsettes (i en rekke miljøproblemsstillinger f.eks. er det viktig å handle raskt), og i tillegg er det, som nevnt ovenfor, ikke alle usikkerheter som er kvantifiserbare eller reduserbare.

F8.1 RIDM for damanlegg

Eksempler på noen av formålene RIDM bidrar til er:

- Systematisk identifisere og forstå potensielle bruddmekanismer.
- Identifisere, begrunne og prioritere utredninger og analyser for å redusere usikkerhet i risikovurderinger.
- Styrke formulering, begrunnelse og prioritering av risikoreduksjon tiltak for enkeltdammer og en inventar av damanlegg.
- Begrunne beslutninger om drift.
- Identifisere måter å forbedre damsikkerheten ved endringer i drift, overvåking og overvåking, sikkerhetsstyringssystemer, opplæring av ansatte, beredskapsplanlegging og forretningsavgjørelser relatert til damsikkerhet.
- Identifisere muligheter for å forbedre effektiviteten til advarsel og evakuering planer.
- Identifisere kostnadseffektive alternativer for raskere å oppnå redusert risiko.
- Rettferdiggjøre utgifter til forbedringer av damsikkerhet
- Identifisere og forstå de risikoer som eksisterer ved normal drift av prosjektet.
- Gi et rammeverk for kvantifisering av ingeniørvurderingsevne og kommunikasjon tekniske problemer med dameiere på en mer åpen og gjennomiktig måte.
- Lette evalueringen av sikkerhetsrisikoer for demningen for publikum på en måte som muliggjør sammenligning med annen infrastruktur og teknologiske farer.
- Gi et ikke-teknisk grunnlag for å kommunisere dambruddrisiko til publikum.
- Vurdere tilstrekkeligheten til forsikringsdekning.
- Styrke utøvelsen av eierens aktsomhetsplikt, aktsomhet og lovlig forsvarlighet med hensyn til damsikkerhets-hendelser eller dambrudd.

RIDM er en strukturert prosess:

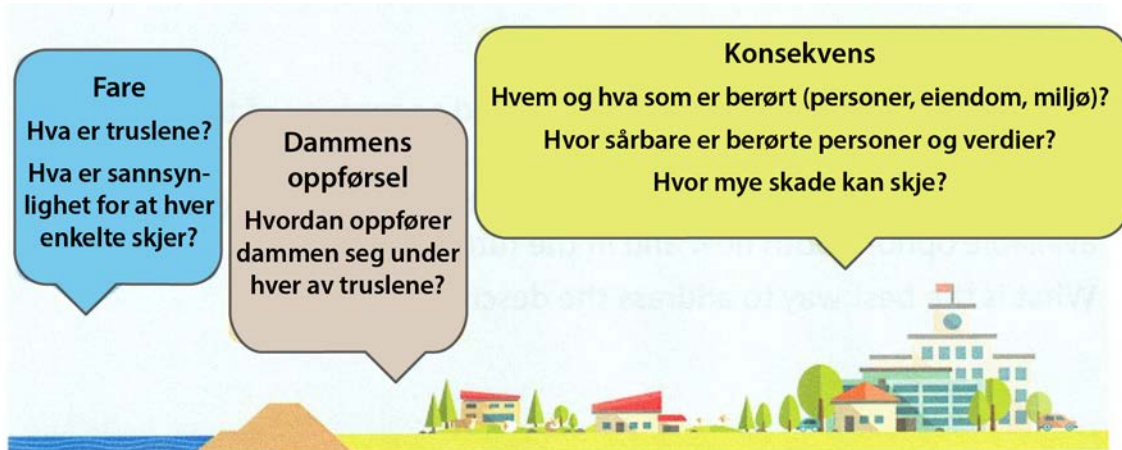
RIDM:

- tar sikte på å oppnå "prosjekt" suksess ved å informere om valg av beslutningsalternativer;
- sørger for at beslutninger mellom konkurrerende alternativer blir tatt med bevissthet om risikoen forbundet med hver og dermed bidra til å unngå overskridelse av kostnader, tidsforsinkelser og kansellering;
- takler noen av følgende problemer:
 - mulig "inkongruens" mellom forventninger og ressursene,
 - mulig misforståelse av risikoen som en beslutningstager aksepterer,
 - feilkommunikasjon om risikoene forbundet med konkurrerende alternativer.
- fremmer utvikling av et robust teknisk beslutningsgrunnlag ved å:
 - koble attributtene til de foreslåtte beslutningsalternativene til målene som definere "prosjekt" suksess;
 - vurdere alle viktige attributter i en integrert måte;
 - bidra til vurdering av et bredt spekter av beslutningsalternativer;
 - utføre kvantitativ vurdering av fordeler og ulemper ved hver beslutningsalternativ i forhold til de identifiserte målene;
 - ta hensyn til usikkerhetene knyttet til hvert foreslått beslutningsalternativ og kvantifisere deres innvirkning på oppnåelsen av de identifiserte målene.

Fordeler med RIDM er:

- En sterkt forbedret forståelse av sikkerheten til en dam.
- Forbedret forståelsen av dammens sikkerhet ved systematisk analyse av logikk om bruddmekanismer. Slik sett er det ikke bare de numeriske resultatene, som vanligvis har stor usikkerhet, men risikoanalyseprosessen som er den reelle fordelen av en risikovurdering.
- Begrunnet tilnærming for å håndtere områder som er vanskelige å kvantifisere.
- Grunnlag for demonstrasjon av due diligence.

Figur F9 illustrerer noen av spørsmålene som stiles under en RIDM prosess (kilde: USACE, foredrag 2019, Calgary).



Figur F9. RIDM-prosessen for en demning

F9 Bruk av ingeniørens faglige skjønn ("Engineering judgment")

Mennesker bruker dømmekraft i alle aspekter av livet. Ingeniører benytter seg av faglige skjønn for å komme videre i arbeidet: "Vi samler og evaluerer alle dataene, fullfører analysene, men det er noen hull i informasjonen og resultatene våre, så vi bruker vår tekniske vurdering til å utvikle våre anbefalinger." Ingeniørens faglige skjønn ("*Engineering judgment*") er viktig.

Hva er ingeniørens faglige skjønn? Faglig skjønn er utøvelsen av å tenke klart, logisk og rolig, veie de kjente fakta, antakelser, manglende informasjon og konsekvenser på vurderingene. Faglig skjønn gir muligheten til å komme til fornuftige konklusjoner i nærvær av ufullstendig og motstridende informasjon. Synonymer for faglig skjønn inkluderer god fornuft, persepsjon, visdom, dom, forståelse og resonnement.

Faglig skjønn brukes for å bygge bro mellom data, informasjon og kunnskap, og dømmekraft bruker resonnement og beregning for å utvikle konklusjoner. Dømmekraft inneholder iboende en underbevisst risikokalkulator som veier usikkerhet og vurderer potensielle konsekvenser av mulige utfall av beslutningene og anbefalingene. Dette er grunnleggende for kritisk tenking. Prosessen introduserer subjektive vurderinger av den relative viktigheten av ulike usikkerheter.

Geofagene krever mye faglig skjønn, fra grunnundersøkelser til tolkning av data, analyse, dimensjonering og instrumentert overvåking (og tolkning igjen). Ingeniørens faglige skjønn er basert på empirisme og teori. God dømmekraft kommer fra evaluert erfaring. Godt skjønn i geofagene kommer fra erfaring.

De viktigste aspektene ved god dømmekraft inkluderer:

- En evne til å se det riktige problemet
- En evne til å etablere riktige ytelseskriterier for dimensjoneringen
- En persepsjon av proporsjon (dvs. virker dette resultatet til å være riktig?)

I likhet med mange andre fag stoler fagene innenfor damanlegg på faglige skjønn. Dømmekraft og risiko er nært beslektet. God teknisk skjønn bygger på mange år med å se, lære, anvende, gjenlære når ting ikke går som planlagt, og viktigst av alt, å overføre denne ervervede ferdigheten til nye problemsstillinger. Ingeniørens faglige skjønn innebærer risiko. Det er derfor der er så viktig å gjenkjenne og, hvor mulig, kvantifisere usikkerhetene som ligger til grunn for vurderingene.

Faglige skjønn i et prosjekt:

- Bestemme størrelsen på forholdene, utvikle en følelse av proporsjoner.
- Være godt kjent med det teoretiske grunnlaget for modeller og deres begrensninger, og bruke enkle metoder for å sjekke resultater.
- Identifisere og forstå hullene i kunnskapen og dataene, og deres konsekvenser for vurderingene.
- Unngå impulsive avgjørelser og sove på viktige beslutninger, da subjektive vurderinger kan endres med mer refleksjon.
- Forbli åpen for avhør, gjennomgang, refleksjon, læring og feiling.
- Bruke uavhengige eksperter-til-fagfellellevurderingsromaner og komplekse design.
- Forsikre seg om avgjørelsene kan rettferdiggjøres.

F10 Inkrementell risiko

Det er viktig å påpeke at et eventuelt dambrudd under ekstreme hendelser påfører kun en inkrementell økning i risiko i forhold til bakgrunnsrisikoen mennesker og materielle verdier allerede er eksponert for under ekstraordinære hendelser som flom og jordskjelv. Inkrementell risiko er *"Incremental losses or damage, which dam failure might inflict [...] over and above losses which might have occurred for the same natural event or conditions, had the dam not been there or not failed"* (ICOLD Bull. 130. 2005).

Vedlegg G *The "Observational Method"*

(vedlegget er på engelsk)



Vedlegg G The "*Observational Method*"

Karl Terzaghi (1961) skrev:

"Soil engineering projects [...] require a vast amount of effort and labor securing only roughly approximate values for the physical constants that appear in the equations. The results of the computations are not more than working hypotheses, subject to confirmation or modification during construction. In the past, only two methods have been used for coping with the inevitable uncertainties: either adopt an excessively conservative factor of safety, or make assumptions in accordance with general, average experience. The first method is wasteful; the second is dangerous. A third method is provided that uses the experimental method. The elements of this method are 'learn-as-you-go.' Base the design on whatever information can be secured. Make a detailed inventory of all the possible differences between reality and the assumptions. Then compute, on the basis of the original assumptions, various quantities that can be measured in the field. On the basis of the results of such measurements, gradually close the gaps in knowledge, and if necessary modify the design during construction."

The Observational Method, described by Professor Ralph B. Peck in his Rankine Lecture in 1969, is a formalisation of Terzaghi's philosophy. The Observational Method consists of:

- Exploration sufficient to establish at least the general nature, pattern and properties of the deposits.
- Assessment of the most probable conditions and the most unfavourable conceivable deviations from these conditions. In this assessment geology often plays a major role.
- Establishment of the design based on a working hypothesis of behaviour anticipated under the most probable conditions.
- Selection of quantities to be observed as construction proceeds and calculation of their anticipated values on the basis of the working hypothesis.
- Calculation of values of the same quantities under the most unfavourable conditions compatible with the available data concerning the subsurface conditions.
- Selection in advance of a course of action or modification of design for every foreseeable significant deviation of the observations from those predicted based on working hypothesis.
- Measurement of quantities to be observed and evaluation of actual conditions.
- Modification of design to suit actual conditions.

The Observational Method (OM) is useful in design. In many cases, the results of the early design computations are not more than working hypotheses, subject to confirmation or modification during construction, with the help of the OM. The degree to which each step is followed depends on the nature and complexity of the project. Geotechnical engineers work in both a theoretical and practical dimension. Both have aleatoric and epistemic uncertainties³⁵, which can never be completely eliminated. Because of the uncertainties, there is a finite, even if small, probability that a failure may occur.

The OM has many advantages, but requires a robust set of procedures throughout a project: the method adopts the "most probable" design parameters, as opposed to conservative parameters; it assesses a range of probable behaviour; it sets out modifications in construction to be implemented if the parameters or the behaviour turn out to be less favourable than assumed in the design; it monitors the behaviour of the structure and soil, providing indication of whether mitigation measures are required or not; and it analyses the data and triggers the implementation of contingency plans. Costly overdesign can be avoided without compromising on safety or the environment. One key aspect is the selection in advance of a course of action for every foreseeable significant deviation of the observational findings from those predicted on the basis of the working hypothesis.

³⁵ *Aleatoric* uncertainty (also known as statistical uncertainty) is the natural randomness of a property or a load, e.g., soil strength and ocean wave height. The aleatoric uncertainty cannot be reduced.

Epistemic uncertainty (also known as systematic uncertainty) is the uncertainty due to lack of knowledge, e.g., measurement uncertainty and model uncertainty. The epistemic uncertainty can be reduced by, for example, increasing the number of tests, improving the measurement method and/or verifying the calculation procedure with model tests.

Vedlegg H Risikovurdering i andre land

Innhold

H1	Introduksjon
H2	Risikovurdering i Australia
H3	Risikovurdering i Canada
H4	Risikovurdering i Frankrike
H5	Risikovurdering i Sverige
H6	Risikovurdering i UK
H7	Risikovurdering i USA
H8	Risikovurdering i ICOLD Bulletin 154: <i>"Dam Safety Management: Operational phase of the dam life cycle"</i>



Vedlegg H Risikovurdering i andre land

H1 Introduksjon

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

Bruken av *F-N* kurver for å evaluere risiko startet i 1990-årene under påvirkning fra ANCOLD, BC Hydro og USBoR. Baecher *et al* (2015) oppsummerte utviklingen av kriteriene for akseptabel risiko, særlig i Nederland (for diker), UK, Hong Kong, USA, Canada og Australia.

I Australia er risikovurdering ikke alternativ til deterministiske analyser, men gjennomføres sammen med deterministiske analyser. I Canada aksepteres dokumentasjon av dammens sikkerhet basert på dokumentasjon av damsikkerheten gjennom risikoanalyser. I Sverige og USA benyttes risikoanalyser i risikoinformert beslutningstaking også i dokumentasjon av damsikkerheten. For prioritering av rehabilitering av dammer i en portefølje er risikobaserte metoder benyttet i stor grad, spesielt hvis samtlige dammer i damporteføljen har samme eier. Formålet med studiene og tiltak er å oppnå den største risikoreduksjonen for hele damporteføljen med tilgjengelige midler.

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. De fleste av disse er vist i Vedlegg A i avsnittet om risikoakseptkriterier. For risiko som uttrykker menneskelige tap, skilles det mellom '*individuell risiko*' og '*samfunnsmessig risiko*'³⁶. Tabell H1 oppsummerer retningslinjer for øvre grense av individuell risiko i Australia, USA og UK.

Tabell H1. Kriterier i tre land for individuellakseptable (ikke tolerabel) risiko knyttet til dammer³⁷.

Land/-organisasjon	Øvre grense, individuell risiko	Referanse
Australia (ANCOLD)	10 ⁻⁴ /år (eksisterende dammer) 10 ⁻⁵ /år (nye dammer)	ANCOLD (2003)
Australia - New South Wales stat	10 ⁻⁴ /år (eksisterende dammer) 10 ⁻⁵ /år (nye dammer)	Eddleston (2015)
USA (U.S. Army Corps of Engineers)	10 ⁻⁴ /år	USACE (2014)
Canada	10 ⁻⁵ /år	(CDA 2007; 2013)
Storbritannia (UK)	10 ⁻⁴ /år	Eddleston (2015)

Hvor individuell risiko er kun en enkel sannsynlighet er samfunnsmessig risiko en årlig (vanligvis) sannsynlighetsfordeling over antall konsekvenser (for eksempel dødsfall eller økonomiske tap). Regulering knyttet til mat, narkotika og miljø baserer seg på individuell risiko. Bygg og anlegg, offshore

³⁶ 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. 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.

³⁷ Øvre grensen er for den mest eksponerte personen.

energiindustri, 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 sårbarhet.

Risikovurdering av dammer i Norge er ikke nytt, analyser har blitt gjennomført siden 90-årene. Norges vassdrags- og energiverk (NVE) (1997) utarbeidet en "Veiledning for risikoanalyse anvendt for vassdragsanlegg" i forbindelse med utarbeidelse av Damsikkerhetsforskriften fra 2001. Dokumentet ble utarbeidet i samarbeid med representanter fra bransjen. I følge NVE er denne håndboken et supplement til eksisterende regelverk, veiledninger og retningslinjer. Hovedteksten inneholder essensen i NVEs (1997) veiledning.

H2 Risikovurdering i 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 risiko-akseptkriterier) 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.

Utviklingen går i retning av økt bruk av målbaserte tilnærmingen. De nyeste endringer er:

- Brudd- og skademekanismanalyse ("*Failure Mode and Effects Analysis*", FMEA) 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 damsikkerhet styringen.

H3 Risikovurdering i 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*" (CDA 2007; 2013) med fem hovedtemaer:

- damsikkerhetsforvaltning,
- drift,
- vedlikehold og overvåking,
- beredskap,
- damsikkerhets gjennomgang, inkludert analyse og vurdering.

Ingen av Canadas provinser refererer eksplisitt til CDAs damsikkerhets retningslinjer i lovgivning eller regulering, men noen provinser har benyttet deler av disse i lovgivning og regulering. Reguleringene i Alberta og British Columbia krever ikke eksplisitte risikovurderinger, men ekskluderer det heller ikke (ICOLD 2005).

Myndighetene aksepterer dokumentasjon av damsikkerheten gjennom risikoanalyser. For eksempel har resultatene av risikoanalyser i ulike former 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 i Canada, 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 damsikkerhets gjennomgang.

Veiledere for risikovurdering ble første gang publisert i Canada i 1995. I siste revisjon (2013) støtter CDA bruken av en risikoinformert beslutningstraking. I anbefalingen skrives det at er sikkerhetsstyring er avhengig av risikostyring og bør gi svar på følgende tre spørsmål:

1. Hva kan gå galt?
2. Hva er sannsynligheten (sannsynligheten) for at det skjer?
3. Hvis det oppstår, hva er de mulige konsekvensene?

For å forstå hvordan konstruksjonene forventes å utføre og hvilket avviksnivå fra normaltilstanden som er tålelig, bør damsikkerhetsanalyser vurdere hele spekteret av gjeldende forhold. Med tanke på de store usikkerhetene knyttet til damteknikk, oppfordres det til en risikoinformert tilnærming til damsikkerhets vurderinger i tillegg til konvensjonelle metoder.

Veilederen sier: Det generelle rammeverket for damsikkerhet skal sikre at ingen enkeltpersoner eller lokalsamfunn blir urettmessig påvirket av hensyn til de bredere samfunnsinteressene. På den annen side har samfunnet ikke uendelige ressurser å bruke på å styre risiko. Ofte er ressurser som er brukt ineffektivt i ett område kan være mer fordelaktige hvis investert på et annet område. Effektiv anvendelse av en balansert tilnærming om egenkapitaleffektivitet krever erkennelse av at både økonomisk effektivitet og sosial rettferdighet er legitime mål som samfunnet ønsker å forfølge.

Risikovurdering for damsikkerhet bør vurdere risikobildet som er vist i Figur H1 som presenterer retningslinjer for livssikkerhetsrisiko som er i samsvar med verdier som brukes i andre farlige næringer og med prinsippet om at risikoer skal gjøres så lave som det er praktisk mulig (ALARP) (Vedlegg F).

Figur H1 er basert på forutsetningen om at det maksimale nivået av samfunnsrisiko for livssikkerhet skal være slik at den årlige sannsynligheten for tap av N eller flere liv skal være mindre enn for tap av liv som ikke eksplisitt var forutsett og identifisert på forhånd av fiaskoen; en høyere risiko anses som "uakseptabel". Den høye samfunnsaversjonen mot katastrofale havari bør gjenspeiles i å sette det maksimale resultatmålet i tilfeller der mer enn 100 liv ville bli satt i fare. Risikoer bør gjøres så lave som det er praktisk mulig, til de faller innenfor et "generelt akseptabelt" område som er satt 100 ganger lavere. En handling for å redusere risikoen er helt klart nødvendig hvis risikoen ikke er akseptabel. ALARP-prinsippet er basert på plikten til å redusere livsfare til det punktet at ytterligere risikoreduksjon er umulig eller krever handlinger som er grovt uforholdsmessige i tid, problemer og innsats for å redusere oppnådd risiko.

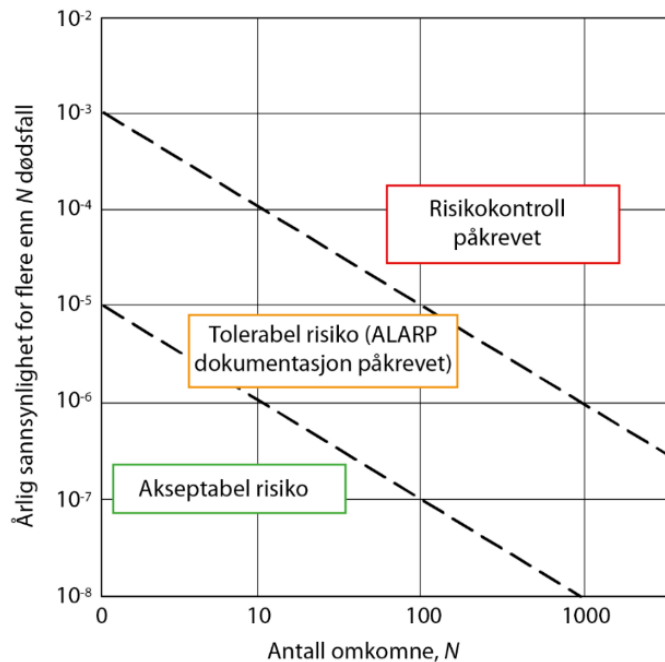
Maksimumsnivået for individuell risiko er vanligvis gitt som mindre enn 10^{-4} /år. For å beregne risikoen for individet, må sannsynlighetsmetoder være tilgjengelige for å kvantifisere hver faktor i følgende ligning for å beregne sannsynligheten for tap av liv (P_{LOL}) for det maksimalt utsatte individet:

$$P_{LOL} = P_{Event} \times P_{Failure/Event} \times P_{Fatality/Failure}$$

- P_{LOL} = Ubetinget sannsynlighet for dødelighet for maksimalt utsatt person fra en farlig hendelse
- P_{Event} = Ubetinget sannsynlighet for at det vil oppstå en farlig hendelse av spesifisert type og størrelsesområde
- $P_{Failure/Event}$ = Betinget sannsynlighet for at dammen faktisk vil gå til brudd, gitt hendelsen
- $P_{Fatality/Failure}$ = Betinget sannsynlighet for tap av liv, gitt dambruddet

Risikoen beregnet med den ovennevnte formel må aggregeres over alle hendelsene som oppstår i løpet av dammens levetid for å oppnå den totale risikoen for individet.

Den generelle risikoanalyse og vurderingsmetoden er et passende rammeverk for styring av damsikkerhet. Tilnærmingen har betydelige fordeler med å tilby veldefinerte og forsvarlige sikkerhetsmål. I CDA veiledningen forventes at dameieren demonstrerer at det resulterende risikonivået er forsvarlig og at sikkerhetsstyringen av dammen er i samsvar med prinsippene i retningslinjen.



Figur H1 Risikodiagram anbefalt i Canada (CDA 2007; 2013)

Myndighetene i British Columbia (BC) gir veiledning i gjennomføring av risikovurdering. Det er derimot ingen krav om risikovurdering i BC's damforskrift fra 2016. Derimot er BC Hydro en aktiv og avansert bruker av risikovurderinger siden 90-tallet. BC Hydro bruker risikovurderinger som støtte til beslutningstaking innen damsikkerhet og dam portefølje forvaltning. Metoder som anvendes av BC Hydro er:

- Fare og "failure modes" ("Hazards and Failure Mode") analyse;
- Feiltre analyser for å identifisere sårbarhet;
- Kvantitative metoder som hendelsetre-analyser;
- Semi kvantitative ROS-type analyser for dam-portefølje forvaltning.

I Ontario (Ontario Power Generation), brukes risikovurdering til:

- Dam portefølje forvaltning (kvantitativ analyse);
- Vurdering av enkelte sikkerhetsaspekter (kvantitativ analyse);
- Som beslutnings støtte for rehabilitering (kvantitativ analyse);
- Vurdering av sikkerhetstiltak for 3. part (kvalitativ analyse).
- I tillegg gjør myndighetene risikovurdering på et overordnet nivå.

H4 Risikovurdering i Frankrike

Frankrikes klassifisering av dammer har grunnlag i konsekvensvurderinger. Det er krav om risikovurdering hvert 10 eller 15 år for dammene i de to høyeste konsekvensklasser (dvs 640 dammer): over 450 risikovurderinger er blitt gjennomført siden 2007.

Formålet med risikovurderingen er som grunnlag til valg av tiltak, for eksempel, oppgradering av dammen eller utvikling av en beredskapsplan. Målet er at alle fagområdene (elektrisk, mekanisk, bygg, drift og ledelse) har en felles forståelse av dam sikkerhet.

I forkant av risikovurderingen kreves det omfattende inspeksjon, vurdering av dammens utforming og flomløp og en gjennomgang av dammens historikk (måledata, oppførsel, observasjoner og hendelser). Analysemetodikken ser på bruddmekanismer ("*failure modes*") og flere bruddscenarier. Oftest anvendes kvalitative og semi-kvalitative metoder, men kvantitative hendelsetre-analyser brukes mer og mer.

H5 Risikovurdering i Sverige

I Sverige er det ingen formelle krav om at en risikoanalyse av dammer skal gjennomføres. Risikoanalyser har blitt brukt i noen tilfeller i damsikkerhet arbeid. Imidlertid har utviklingen gått mot en risikoanalytisk tenkemåte. Risikomodenhetsmatrise-metodem er brukt for å vurdere damsikkerhets styringssystem. 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 lovendring (2014:114) av miljølovgivningen og i tre forskrifter. Reguleringen påvirker dammer der dambrudd kan føre til konsekvenser av betydning fra et sosialt synspunkt eller truer menneskeliv. Forskriften omfatter (Maria Bartsch, Svenska Kraftnät, personlig kommunikasjon 2018):

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

For ROS -analyser har Sverige følgende obligatoriske steg:

- Oversikt over ansvarsområder
- Oversikt over farer og risiko (ofte workshop format), inklusivt eksponering av risikelementer
- Analyse av scenarier

Som en del av vurdering av samhandling og beredskap har Sverige (Svenska Kraftnät) identifisert følgende faktorer som kritiske:

- Elektronisk kommunikasjon
- Teknisk infrastruktur
- Kritisk materiale
- Fremkommelighet
- Mannskap resurser
- Samvirke/samarbeid
- Kriseberedskap, og en organisasjon som har ansvar
- Informasjon utad

I 2011 gjorde Svenska Kraftnat en gjennomgang av regjeringens innsats for damsikkerhet. Rapporten inkluderte damsikkerhet og egenkontroll, tilsyn og tilsynstilsyn og beredskap for dambrudd. Svenska Kraftnät bemerket at damsikkerheten må utvikles og at dagens system for damsikkerhet ikke oppfyller kravene til sikkerhet i samfunnet som i dag bør tilfredsstilles. Svenska Kraftnät vurderte at tilsynet med damsikkerheten er for svak. Svenska Kraftnät ble instruert i et forskriftsbrev for 2011 om å videreutvikle tilsynsveiledningen for damsikkerhet. Svenska Kraftnät har startet arbeidet med styrket tilsynstilsyn for damanlegger med særlig store konsekvenser i tilfelle dambrudd, i samarbeid med de berørte dameierne.

Svenska Kraftnät mente at tilgangen til damsikkerhet kompetanse i landet begrenser utviklingen av sikkerhet og oppbygging av beredskapen for dambrudd. Svenska Kraftnät investerer i samarbeid med industri og andre, på forskning, utvikling og høyere utdanning, og bemerker at det er viktig å fortsette å investere i dagens omfang.

Sverige er så langt skånet for dambrudd med eksepsjonelle konsekvenser, men selv om sannsynligheten for dambrudd er veldig liten, vurderer Svenska Kraftnät (2015) at et dambrudd kan oppstå. I tillegg til arbeid med å forebygge dambrudd, er det nødvendig med et avansert beredskap for å takle konsekvensene av et dambrudd. Svenska Kraftnät er ansvarlig for utvikling av koordinert beredskap, og arbeidet pågår siden 2008. Svenska Kraftnät vurderer at den koordinerte beredskapen for dambrudd fremdeles er svak.

Swedenergy (2019) utga en "policy" for damsikkerhet vurdering i §4. Vurdering av damsikkerhet: Damsikkerhetsvurderingen er utført for å gi et samlet bilde av sikkerheten til anlegget, med tilhørende risiko og hvordan den blir adressert. Med en omfattende og systematisk vurdering av denne typen er det mulig å:

- Bestemme om damanlegget har tilfredsstillende sikkerhet.
- Bestemme nødvendige tekniske og organisatoriske tiltak.
- Få data for ekstern og intern rapportering.

Dammesikkerhetsvurderingen tar hensyn til risikoanalysekravene til damsikkerhet i lovgivningen, inkludert:

- Konsekvensvurdering og helhetsvurdering.
- Analyse av risiko knyttet til farlig aktivitet.
- Undersøkelse og analyse av helse- og miljørisiko.
- Risiko- og sårbarhetsanalyse i sammenheng med beredskap for strømforsyning.
- Sikkerhetsbeskyttelsesanalyse med hensyn til antagonistiske trusler.

Metodikken for damsikkerhetsvurderingen er basert på risikostyringsstandarden [ISO 31000: 2018], ICOLD bulletins on management systems for dams in operation [Bull. 154] og risikovurdering [Bull. 130], og publikasjonen om driftssikkerhet for dammer og reservoarer.

H6 Risikovurdering i UK

"The Health and Safety Executive" (HSE) i UK har et velkjent rammeverk for å evaluere risiko, det såkalte "Tolerability of Risk"-diagrammet (Fig. A29 i Vedlegg A). I Storbritannia har risikovurderinger vært utført for store dammer med kvantitative risikovurderingsmetoder med både forenklede analyser og med detaljerte kvantitative analyser. British Standard (BS EN 31010 (BSI 2010)) stipulerer følgende:

"Risikovurdering er den delen av risikostyring, som gir en strukturert prosess som identifiserer hvordan mål kan påvirkes, og analyserer risikoen når det gjelder konsekvenser og sannsynligheten deres før det avgjøres om ytterligere behandling (risikoreduksjon) er nødvendig."

I UK klassifiseres dammer med grunnlag i konsekvensvurderinger. Det er ingen krav til risikovurdering. Når risikovurdering brukes er det anbefalt at PFMA (*Potential Failure Mode Analysis*) anvendes. Risikovurderingene bør brukes i forkant av inspeksjonene for å sikre at fokus settes på de mest kritiske aspekter av dammen under inspeksjonen. Dameierne kan velge å kontrollere dammen med enten standard laster differensiert etter konsekvensklasser eller probabilistisk baserte laster.

H7 Risikovurdering i USA

Lover og regulering av damsikkerhet varierer fra stat til stat. "Federal Emergency Management Agency" (FEMA) forvalter det nasjonale damsikkerhetsprogrammet, som koordinerer alle føderale

damsikkerhetsprogrammer og bistår stater i å forbedre sine reguleringer og programmer i forhold til damsikkerhet. FEMA (2015) presenterte "*Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management*" med retningslinjer for risikohåndtering av dammer. Retningslinjene gir de generelle prinsippene for risikostyring og risikoinformerte beslutninger. Retningslinjer for damsikkerhet ble utgitt i felleskap av "*U.S. Bureau of Reclamation*" (USBoR) og "*US Army Corps of Engineers*" (USACE). Flere av de anbefalte risikodiagrammer er allerede vist i Vedlegg A.

Etter bruddet i Teton Dam i 1976 ble *US Bureau of Reclamation* bedt om å utvikle risikoanalysemetodikk for dammer (risiko er nevnt i lov om damsikkerhet). USACE anerkjente behovet for å implementere risikoanalyse etter bruddene i dikene i New Orleans under orkanen Katrina. Spesielt ble det fremhevet:

- Behovet for å forbedre og balansere risikoreduserende tiltak med begrenset budsjett (f.eks. oppgradere noen dammer for å passere PMF kontra å bruke tilgjengelig budsjett til å redusere risikoen ved mange dammer).
- Behov for mer åpenhet og begrunnelse for beslutninger om dam og diker.

USBoR og USACE konkluderte at prosedyrer for risikoanalyse, selv om de er kvantitative, ikke gir presise numeriske resultater. Risikovurderingen vil være rådgivende, ikke foreskrivende, slik at stedsspesifikke hensyn, god logikk og alle relevante eksterne faktorer kan brukes i beslutningsprosesser, snarere enn å stole på en 'kokebok' med numerisk kriterietilnærming. Tallene, selv om de er viktige, er mindre viktige enn å forstå og tydelig dokumentere hva som er den største risikoen.

H8 Risikovurdering i ICOLD Bulletin 154:

"Dam Safety Management: Operational phase of the dam life cycle"

I seksjon §B.2.1 Sikkerhetsbeslutning - vurdering av risiko (generelt begrep) (*safety decision making – explicit consideration of risk (general concept)*) skriver ICOLD: :

"At the foundation of risk-based frameworks is the principle that ultimately all decisions about safety are risk management decisions. As zero-risk decisions are not practicable and most of the time simply not affordable some trade-offs between the costs of reducing risk and the benefits from risk reduction are unavoidable. [...].

A Responsible Entity who elects to demonstrate dam safety with the help of this framework [explicit consideration of risk] has to conduct the safety assessment in such a way as to ensure that all measures necessary to avert the risk must be taken until the cost of these measures is disproportionate to the risk, which would be averted. As a result, the risk must be reduced to a level, which is ALARP (as low as reasonably practicable) [...]"

Vedlegg

Del I Verktøy for risikovurdering

Del II Tilleggsinformasjon

Del III Referansemateriale

Vedlegg

Del I Verktøy for risikovurdering

A Analysemetodikk og eksempler

- Oversikt over analysemetoder
- Fareanalyse ("Hazard analysis")
- Konsekvensanalyse ("Consequence analysis")
- Risikoakseptkriterier

B Bruddmekanismer og skademekanismer - fyllingsdammer

C Bruddmekanismer og skademekanismer - betongdammer

D Dambruddstatistikk

Del II Tilleggsinformasjon

E Eksponenttall og nyttig statistikk

F Risikobegreper

G The "Observational Method"

H Risikovurdering i andre land

Del III Referansemateriale

I Definisjoner, akronymer og symboler

J Risikostandarder i Norge (NS) og ISO

K Liste over Energi Norge rapporter med risikoinnhold

L ICOLD Bulletins med innhold om damsikkerhet

M Siterte kilder

Vedlegg I Definisjoner, akronymer og symboler

I1 Definisjoner

ALARP prinsippet

Risikoen skal reduseres så langt som praktisk mulig (ALARP: *As Low As Reasonably Practicable*). 'Omvendt bevisbyrde'.

Beredskap

Omfatter alle tekniske, operasjonelle og organisatoriske tiltak som hindrer at en inntrådt fare / trussel utvikler seg til en ulykkessituasjon / tapssituasjon eller som hindrer eller reduserer virkningene av inntrådte ulykkessituasjoner / tapssituasjoner.

Beslutningskriterier

Kriterier som har innvirkning på beslutninger som må tas, for eksempel akseptkriterier for risiko, økonomiske kriterier, tilgjengelig tid og hva som er politisk akseptabelt.

Dambrudd

Plutselig, rask og ukontrollert frigjøring av vann.

Fare

Handling eller forhold som kan føre til en uønsket hendelse. Handlingen eller forholdet kan være både tilsiktet eller utilsiktet. Faren uttrykkes fare som en sannsynlighet.

Frekvens

Forventet antall hendelser i et gitt tidsrom.

Individuell risiko

Dette uttrykket er assosiert med det mest utsatte individet som er plassert i et fast forhold til en fare. Individuell risiko er summen av risikoene fra alle potensielle bruddmekanismer assosiert med farene som påvirker personen. Likheter med årlig bruddsannsynlighet er åpenbar når livstapet til den personen er praktisk talt sikker (fordi sannsynligheten for brudd multiplisert med et menneskes livstap er lik bruddsannsynligheten).

Konsekvens

Følge av en uønsket hendelse. Konsekvenser kan uttrykkes kvalitativt som skadegrad eller kvantitativt som antall ulykker eller skader på anlegg, utstyr eller ressurser.

Konsekvensanalyse

Systematisk fremgangsmåte for å beskrive og/eller beregne konsekvenser for anlegg, utstyr eller ressurser som følge av initierende hendelser.

Potensiell bruddmekanismer

En måte som dambrudd kan oppstå (dvs. full hendelsesrekkefølge fra igangsetting til brudd) for en gitt lastetilstand. En betingelse for en potensiell bruddmekanisme er at det resulterer i en ukontrollert frigjøring av reservoaret.

Troverdig (plausibel) potensiell bruddmekanisme

Troverdig: En potensiell bruddmekanisme som anses å påvirke den totale risikoen.

Ikke troverdig: En potensiell bruddmekanisme er en bruddmekanisme som har svært lave sannsynlighet for å skje og hvor det kan gjøres en sterk sak for det. Ikke-troverdige potensielle bruddmekanismer blir ofte vurdert til å ha en sannsynlighet som ligger godt under en tolerabel risikogrense og er størrelsesordener mindre enn for de mest dominerende potensielle bruddmekanismene.

Pålitelighetsindeks

Indeks for å verifisere sikkerhetsmarginen. Pålitelighetsindeks kan beregnes fra bruddsannsynlighet og omvendt.

Risiko

Kombinasjon av mulige fremtidige konsekvenser / utfall og tilhørende usikkerhet. Sannsynligheter benyttes til å angi usikkerhet. Dersom dette gjøres, kan det sies at risiko er en funksjon av sannsynlighet og konsekvens.

Risikoakseptkriterium

Kriterium som legges til grunn for beslutning om akseptabel risiko; det uttrykker hva som er vurdert til å være et akseptabelt (tolererbart) risikonivå, og angir en øvre grense for risiko.

Risikoanalyse

En risikoanalyse er en analyse av risiko. Analysen innbefatter identifikasjon av uønskede hendelser, årsaksanalyse, konsekvensanalysen og kartlegging av risiko. En analyse kan være kvalitativ eller kvantitativ. En kvantitativ risikoanalyse gir et numerisk estimat av risikoen for negativ konsekvens, ved å multiplisere sannsynligheten for brudd (eller uønsket hendelse) ganger størrelsen på negativ konsekvens gitt dambrudd.

Risikobilde

Samlet presentasjon av risikoresultater.

Risikoevaluering

Prosess for å sammenligne beskrevet eller beregnet risiko med gitte risikoakseptkriterier.

Risiko-bevisst (*risk informed*)

Begrepet innebærer at beslutninger blir tatt med tanke på risikovurderinger og mange andre medvirkende faktorer som kan inkludere tillit til risikovurderingen, risikosikkerhet, deterministiske analyser og den generelle sikkerhetssaken for dam, i tillegg til andre lokale eller regionale hensyn.

Risikoreduserende tiltak

Tiltak med sikte på å redusere sannsynlighet for og/eller konsekvens av uønskede hendelser.

Risikostyring

Alle tiltak og aktiviteter som gjøres for å styre risiko: Handlinger som er iverksatt for å kommunisere risikoen og enten akseptere, unngå, overføre eller kontrollere risikoen til et akseptabelt nivå med tanke på tilhørende kostnader og fordeler ved eventuelle tiltak.

Risikostyringspolicy

Føringer for gjennomføring av risikostyring og spesifiserer risikostyringsprosessen.

Risikovurdering

Proessen med å vurdere det kvantitative eller kvalitative estimatet av risiko, sammen med alle relaterte sosiale, miljømessige, kostnadmessige, tidsmessige og andre faktorer for å bestemme et anbefalt handlingsforløp for å redusere eller akseptere risikoen. En risikovurdering inkluderer ofte ett eller flere estimater av risiko, en risikobeskrivelse, risikostyringsalternativer, økonomiske og andre evalueringer og estimater av endringer i risiko som kan henføres til styringsalternativene.

Samfunnsrisiko

Sannsynligheten for negative konsekvenser fra farer som påvirker samfunnet som helhet og som skaper en sosial bekymring og potensiell politisk respons fordi flere omkomne forekommer i en hendelse.

Sannsynlighet

Grad av tro på at en hendelse vil inntreffe.

Sårbarhet

Et uttrykk for et systems evne til å fungere når det utsettes for en uønsket hendelse, samt de problemer systemet får med å gjenoppta sin virksomhet etter at hendelsen har inntruffet.

Tolerabel risiko

Risiko innen et område som samfunnet kan leve med for å sikre fordelene som dammen gir. Det er en risiko som ikke skal anses som ubetydelig eller ignorert, men som må holdes under evaluering og reduseres ytterligere hvis mulig.

Usikkerhet

Mangel på kunnskap om hva som er eller vil bli verdien av en ukjent observerbar størrelse. Usikkerhet er et resultat av ufullkommen kunnskap om den nåværende eller fremtidige tilstanden til et system, hendelse, situasjon eller befolkning som vurderes.

Uønsket (initierende) hendelse

Hendelse eller tilstand som kan medføre konsekvenser for f.eks. mennesker, anlegg, utstyr eller ressurser.

12 Akronymer

ALARP	Så langt som praktisk mulig (" <i>As Low As Reasonably Practicable</i> ").
ASCE	American Society of Civil Engineers
BoR	Bureau of Reclamation (US)
FERC	Federal Energy Regulatory Commission, USA
ICOLD	"International Commission On Large dams"
USACE	US Army Corps of Engineers

13 Symboler

CoV	Variasjons koeffisient
f	Frekvens
F	Fare
F	Sannsynlighet
FS	Sikkerhetsfaktor
k	Skjæringspunktet på bruddsannsynlighet-aksen i risikodiagrammet
K	Konsekvens
$LLOL$	Sannsynlig antall omkomne (" <i>Likely Loss of Life</i> ")
M	Sikkerhetsmargin
N	Konsekvens, antall omkomne
PDF	"Probability density function"
P_f	Bruddsannsynlighet
$P_{LOL} =$	Ubetinget sannsynlighet for dødelighet for maksimalt utsatt person fra en farlig hendelse
$P_{Event} =$	Ubetinget sannsynlighet for at det vil oppstå en farlig hendelse av spesifisert type og størrelsesområde
$P_{Failure/Event} =$	Betinget sannsynlighet for at dammen faktisk vil svikte, gitt hendelsen
$P_{Fatality / Failure} =$	Betinget sannsynlighet for tap av liv, gitt dambrudd
R	Risiko
RIDM	Risikoinformert beslutningstaking
s	sannsynlighet
S	Sum av sannsynligheter
SD	Standard avvik
α	Exponent (helning på en linje in risikodiagrammet)
β	Pålitelighetsindeks
μ	Gjennomsnitt

Vedlegg J Risikostandard i Norge (NS) og ISO

Innhold

- J1 Norske standarder for risikoanalyse, risikovurdering, risikohåndtering og risikostyring
- J2 Liste over Standard Norges dokumenter om risiko
- J3 Innhold i tre av standardene
- J4 Damsikkerhetsforskriften

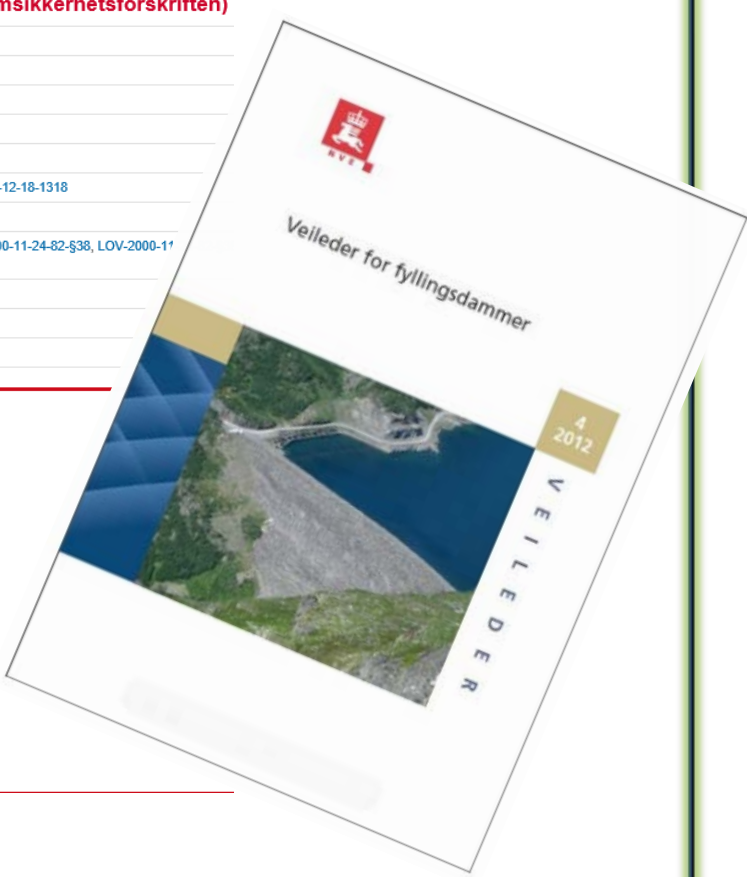
Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften)

Dato	FOR-2009-12-18-1600
Departement	Olje- og energidepartementet
Publisert	I 2009 hefte 14 (Merknader)
Ikrafttredelse	01.01.2010
Sist endret	FOR-2010-01-29-63
Endrer	FOR-2000-12-15-1271, FOR-2000-12-18-1317, FOR-2000-12-18-1318
Gjelder for	Norge
Hjemmel	LOV-2000-11-24-82-§2, LOV-2000-11-24-82-§36, LOV-2000-11-24-82-§38, LOV-2000-11-24-82-§58, LOV-2000-11-24-82-§65
Kunngjort	21.12.2009 kl. 14.35
Retttet	01.11.2013 (EØS-henvisningsfeltet)
Korttittel	Damsikkerhetsforskriften

Kapitelloversikt:

- Kapittel 1. Formål og virkeområde (§§ 1-1 - 1-4)
- Kapittel 2. Organisatoriske krav (§§ 2-1 - 2-10)
- Kapittel 3. Faglige kvalifikasjoner (§§ 3-1 - 3-9)
- Kapittel 4. Klassifisering (§§ 4-1 - 4-3)
- Kapittel 5. Tekniske planer og krav (§§ 5-1 - 5-16)
- Kapittel 6. Bygging og idriftsettelse (§§ 6-1 - 6-2)
- Kapittel 7. Drift (§§ 7-1 - 7-11)
- Kapittel 8. Fellesbestemmelser (§§ 8-1 - 8-3)
- Kapittel 9. Gjennomføring av forskriften (§§ 9-1 - 9-4)
- Kapittel 10. Ikrafttredelse (§§ 10-1 - 10-2)

[Merknader til de enkelte bestemmelser](#)



Vedlegg J Risikostandard i NS og ISO

J1 Norske standarder for risikoanalyse, risikovurdering, risikohåndtering og risikostyring

Standard Norge har utgitt dokumenter om risikoanalyse, risikovurdering, risikohåndtering og risikostyring. 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."

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. Felles for alle rammeverk for risikohåndtering er at de hver inneholder tre etapper: risikoidentifisering, risikoanalyse og risikoevaluering.

J2 Liste over Standard Norges dokumenter om risiko

Tabell J1 gir en oversikt over dokumentene som er tilgjengelige hos Standard Norge:

Tabell J1. S 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
SN-ISO Guide 73	Risikostyring - Terminologi (under revisjon)
NS-ISO 31000	Risikostyring - Prinsipper og retningslinjer (under revisjon)
SN-ISO/TR 31004	Risikostyring - Veiledning til implementering av NS-ISO 31000
NS-ISO/IEC 31010	Risikostyring - Metoder for risikovurdering
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	Feiltre-analyse (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

J3 Innhold i tre av standardene

Tre standarder (vist i fet i tabellen ovenfor) 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."

J4 Damsikkerhetsforskriften

Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (NVE 2009, rettet 2013), 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 uønskede hendelser og konsekvensene. Jo større konsekvenser, eller 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 i Tabell J1.

NVE (2014) har utarbeidet en veileder til forskriften. NVE har også veileder for fyllingsdammer (2012) og for revurdering av vassdragsanlegg (2018). Veilederen til dam forskriften (2014) 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 L1. Konsekvensklasser (KK) med tilhørende kriterier (NVE 2014).

<u>KK</u>	<u>Antall boenheter</u>	<u>Infrastruktur, samfunnsfunksjoner</u>	<u>Miljø og eiendom</u>
4	> 150		
3	21-150	Skade på sterkt trafikkert veg eller jernbane, eller annen infrastruktur, med spesielt stor	Stor skade på spesielt viktige miljøverdier eller på fremmed eiendom.
2	1 – 20	Skader på middels trafikkert veg eller jernbane eller annen infrastruktur med stor	Stor skade på viktige miljøverdier eller på fremmed eiendom.
1	Midlertidig oppholdssted tilsvarende < 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

Vedlegg K Liste over Energi Norge rapporter med risikoinnhold



Vedlegg K Liste over Energi Norge-rapporter med risikoinnhold

Risikovurdering for damanlegg i Norge er ikke noe nytt (det startet midt på 80-tallet)! Norge var da et foregangsland på dette området (bl.a. NNCOLD). Det er flere rapporter fra Energi Norges arbeid om temaet fra 1980-, 1990- og tidlige 2000-årene som forteller om risiko, risikovurdering, usikkerheter etc. Mange av disse synes dessverre å være glemt.

RAPPORTER I PROSJEKTET DAMSIKKERHET (1987-1992)

Nr	Tittel	Dato
--	Risikoanalyse av dammer. Forprosjekt	Des 1987
1	Aldring og sikkerhet av betong dammer	Mai 1991
2	Beredskapsplanlegging for unormale situasjoner	Des 1991
3	Sikkerhet av fyllingsdammer mot lekkasjebrudd	Jan 1992
4	Tilstopping av flomløp	Feb 1992
5	Overtopping av tetningskjerne i fyllingsdammer	Mai 1992
6 Del 1	Funksjonssikkerhet ved flomluker	Mai 1992
6 Del 2	Funksjonssikkerhet ved flomluker	Mai 1992
7	Alkalireaksjoner i betongdammer	Nov 1992
--	Hovedrapport	Des 1992
--	Sammendragsrapport	Des 1992
--	Summary Report	Des 1992

RAPPORTER I PROSJEKTET "RISK ANALYSIS FOR THREE ROCKFILL DAMS IN NORWAY" (1995-1997)

Nr	Tittel	Dato
--	Risikoanalyse – Dravladalsvatn	Apr 1996
--	Risikoanalyse for Svartevatn	Dec 1996
--	Risikoanalyse for Viddalsvatn	
--	Risikoanalyse - Dravladalsvatn, Svartevatn og Viddalsvatn. Oppsummeringsrapport	Mar 1997
--	Target Safety Level for Large Dams in Norway	Dec 1996
--	Sikkerhet av norske fyllingsdammer mot brudd forårsaket av indre erosjon og derav følgende øket lekkasje gjennom og under dammen	Dec 1992
--	Stabilitet av fyllingsdammer ved overtopping av kjernen	Feb 1992

RAPPORTER I PROSJEKTET STABILITET OG BRUDDFORLØP AV DAMMER (*listen er ikke komplett*) (2000-2007)

DP1: Skjærstyrke av steinfyllinger og stabilitet av damskråninger

DP2: Stabilitet av nedstrøms støttefylling og damtå i fyllingsdammer med stor vanngjennomstrømning

DP3: Bruddforløp i fyllingsdammer

Nr	Tittel	Dato
123	Stability and Breaching of Embankment Dams - Shear Strength of Rockfill and Stability of Dam Slopes (DP1)	2003
186	Stability and breaching of embankment dams. Stability of downstream shell and dam toe during rapid through flow (DP2)	2005
231	Stability and Breaching of Embankment Dams – Breaching of embankment dams (DP3)	2007

RAPPORTER I PROSJEKT "IMPACT" INVESTIGATION OF EXTREME FLOOD PROCESSES AND UNCERTAINTY (EU prosjekt hvor Energi Norge var deltaker; listen er ikke komplett)

Nr	Tittel	Dato
	Large Scale Field Test of the Downstream Shell and Dam Toe, Bleikvassli 2001.	2001

IMPACT EU-prosjektet hadde følgende arbeidspakker:

- WP2 Breach Formation
- WP3 Flood Propagation
- WP4 Sediment Movement
- WP5 Uncertainty
- WP6 Geophysics

Referanse: Morris, M. & Hassan, M. (2005). IMPACT: Investigation of extreme flood processes and uncertainty – A European Research Project. HRRP 346.

RAPPORTER I PROSJEKTET DAMSIKKERHET I ET SAMFUNNSPERSPEKTIV (2016-)

Nr	Tittel	Dato
	«State-of-the-art» om risikovurderinger for dammer sett i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv	Juli 2016
	Risikovurdering for Dam Dravladalen	Nov 2016
	Anvendelse av risikovurdering i norsk damsikkerhetsarbeid	Aug 2018
	Risikovurdering for Dam Nyhellervatn	Apr 2018
	Risikovurdering for Dam Strandfossen	Apr 2018
	Risikovurdering for Nesjendammene	Apr 2018
	Risikovurdering for Dam Viddalvatn	Aug 2018
	Damhistorikk instrumentering og damsikkerhet	2017
	Bruk av damhistorikk med eksempler fra BKK	2018
	Case study Probabilistic analyse Dam Hensfossen	2018
	Forutsetninger av eksisterende betong- og murdammer - Hoved rapport	2017
	DHSP-metoden for detaljert konsekvensutredning av dammer	2020

Vedlegg L ICOLD Bulletins med innhold om damsikkerhet



Vedlegg L ICOLD Bulletins med innhold om damsikkerhet

Tabell L1 gir en oversikt over de ICOLD Bulletins som handler om damsikkerhet, statistikk for dambrudd og hendelser, fyllings- og betongdammer, indre erosjon, snø- og islaster, stabilitet og deformasjon, og rehabilitering.

Tabell L1. ICOLD Bulletin som diskuterer damsikkerhet

ICOLD Bull. Nr/år	Tittel (på engelsk)	Damsikkerhet	Damskader, damhendelser	Damrehabilitering oppgradering	Fyllingsdammer	Lekkasje, indre erosjon	Stabilitet, deformasjon	Betongdammer	Snølaster og islaster	Innhold i Bulletin
15 1960	<i>Frost resistance of concrete – Results obtained in different laboratories</i>							X		Betongsmotstand under frysing/tining sykler
29 1982	<i>Report from the committee on risks to third parties from large dams</i>	X								Dambrudd, risiko-elementer og risikoredusering
30 1987	<i>Finite elements methods in analysis and design of dams</i>	X			X			X		Metode, utfordringer og hypoteser
41 1982	<i>Automated observation for the safety control of dams</i>	X								Automatisert overvåking
48 1986	<i>River control during dam construction</i>	X		X						Damsikkerhet under bygging
49 1986	<i>Operation of hydraulic structures of dams</i>	X								Operasjon og inspeksjon
51 1985	<i>Filling materials for watertight cut off walls</i>				X	X				Metoder og materialer for "cut-offs"
53 1986	<i>Static analysis of embankment dams</i>	X			X		X			Jord- og steinfyllings-dam, ingen fundament analyse
55 1986	<i>Geotextiles as filters and transitions in fill dams</i>				X	X				Geotekstiler som filter i en fyllingsdam
56 1986	<i>Quality control for fill dams</i>	X			X					Kvalitetssikring under konstruksjon
59 1987	<i>Dam safety – Guidelines</i>	X	X							Veiledning for damsikkerhet
94 1994	<i>Computer software for dams – Validation</i>	X			X			X		Apekter fra numerisk analyse av dammer
99 2000	<i>Dam Failures - Statistical Analysis (1995, updated 2020)</i>		X							Damstatistikk (Vedlegg B)
105 1996	<i>Dams and structures in cold climate - Design guidelines and case studies</i>								X	Laster som kan skade en dam og forebyggingstiltak
111 1998	<i>Dam break flood analysis - Review & recommendations</i>	X								Konsekvenser av flodbølge nedstrøms
118 2000	<i>Automated dam monitoring systems - Guidelines and case histories</i>			X						Veiledning om automatisert overvåking
122 2001	<i>Computational procedures for dam engineering - Reliability and applicability</i>	X			X			X		Oversikt over modeller for å vurdere damsikkerhet

ICOLD Bull. Nr/år	Tittel (på engelsk)	Damsikkerhet	Damskader, damhendelser	Damrehabilitering oppgradering	Fyllingsdammer	Lekkasje, indre erosjon	Stabilitet, deformasjon	Betongdammer	Snølast og islast	Innhold i Bulletin
124 2000	<i>Reservoir landslides: Investigation and management - Guidelines and case histories</i>	X								Veiledning og historiske tilfeller av skred i damreservoar
125 2003	<i>Dams and floods - Guidelines and case histories</i>		X							Veiledning og historiske tilfeller av flom og forbygningstiltak
130 2005	<i>Risk assessment in dam safety management - A reconnaissance of benefits, methods and current applications</i>	X								Introduksjon og terminologi – risikovurdering for dammer
131 2006	<i>Role of dams in flood mitigation - A review</i>		X							Risiko knyttet til flom
133 2007	<i>Embankment dams on permafrost - A review of the Russian experience</i>				X				X	Erfaring med dammer over permafrost i Russland
138 2009	<i>Surveillance: Basic elements in "dam safety" process</i>	X								Prinsipper i damsikkerhetsvurdering
142 2012	<i>Bulletin on safe passage of extreme floods</i>	X	X							Direkte og indirekte konsekvenser av
154 2017	<i>Dam safety management: Operational phase of the dam life cycle</i>	X								Veiledning for håndtering av samsikkerhet
155 2013	<i>Guidelines for use of numerical models in dam engineering</i>	X								Veiledning for numerisk modellering av nye og eldre dammer
156 2014	<i>Integrated flood risk management</i>	X								Vurdering av flomrisiko
157 2016	<i>Small dams: Design, surveillance and rehabilitation</i>	X								Veiledning for små dammer
158 2018	<i>Dam surveillance guide</i>			X						Veiledning/organisering av instrumentert overvåking
164 2017	<i>Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations</i>				X	X				Instrumentert overvåking av indre erosjon, og observerte hendelser
167 (2020)	<i>Regulation of dam safety: An overview of current practice</i>	X								Damsikkerhet: oversikt over praksis i verden
170 2018	<i>Flood evaluation and dam safety</i>	X								Flomberegninger for å vurdere damsikkerhet
175 (2020)	<i>Dam safety management: Pre-operational phases of the dam life cycle</i>	X								Damsikkerhet: håndtering gjennom dammens hele liv
180 2017	<i>Dam surveillance - Lessons learnt from case histories</i>		X							Overvåking av dammer: erfaringer og historiske hendelser
185 2019	<i>Challenges and needs for dams in the 21st century</i>	X			X	X		X	X	Ferskvann, energi og klimaendring

Vedlegg M Siterte kilder

- ANCOLD (2003) Guidelines on Risk Assessment, October, (Prev. Version August 1998; 1994).
- ASCE (2020). American Society of Civil Engineers. Failure Has Consequences. Editorial by J.L. Briaud, Geostrata. Jan/Feb 2020, pp 18.20.
- 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. B. & Christian J. T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. Chichester, West Sussex, UK. Hoboken, NJ, Wiley. 618 pp.
- Baecher, G., M.-E. Paté & R. deNeufville (1980a). Dam Failure in Benefit/Cost Analysis. ASCE Jour. Geot. Eng. Div., Vol. 106, No. GT1, pp. 101-116.
- Baecher, G., M.-E. Paté & R. deNeufville (1980b). Risk of Dam Failure in Benefit-Cost Analysis. Water Resources Research, **16** (3). pp. 449-456.
- Baecher, Gregory & Abedinisohi, Farshad & Patev, Robert. (2015). Societal Risk Criteria for Loss of Life: concepts, history, and mathematics. 10.13140/RG.2.2.12932.78725.
- Barneich, J., D. Majors, Y. Moriwaki, R. Kulkarni & R. Davidson (1996) Application of Reliability Analysis in the Environmental Impact Report (EIR) and Design of a Major Dam Project. Uncertainty '96, ASCE.
- BC Hydro (1993). Guidelines for Consequence – Based Dam Safety Evaluations and Improvements. H2528 Interim. Vancouver: BC Hydro.
- Bowles. D.S. Anderson, L.R. Glover, T.F. & Chauhan, S.S. (2003) . Dam safety decision-making: Combining engineering assessments with risk information. Proc.2003 US Society on Dams Annual Lecture, Charleston, SC.
- Box, G. E. P. & Wilson, K.B. (1951) On the Experimental Attainment of Optimum Conditions (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society*. Series B **13**(1):1–45.
- Brown A.G. & Gosden, J.D. (2004): Interim Guide to quantitative risk assessment for UK reservoirs. Thomas Telford Publ. London, 161 pp.
- BSI (British Standards Institution), 2010. BS EN 31010: 2010. Risk management. Risk assessment techniques. London: BSI.
- CDA (1995; 2007; 2013). Dam Safety Guidelines. Canadian Dam Association (1st ed. 1995; updated 1997, updated 2013).
- CDC (2015). Health, United States (2005). Centers for Disease Control and Prevention (CDC). National Center for Health Statistics Health, US. Hyattsville, Maryland. Library of Congress Catalog Number 76–641496
- Damsikkerhetsforskriften (2009, rettet 2013). Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (Damsikkerhetsforskriften). Lovdata. https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-12-18-1600/*.
- DERFRA (2011). Models of dam failure and monitoring and measuring techniques. Environment Agency. Project SC080048 (Forf.: Almog, E., Kelham, P. & King, R.). 162s. ISBN: 978-1-84911-230-7. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/290819/scho0811buaw-e-e.pdf
- Douglas, K.J., Spannagle, M. & Fell, R. (1999). Analysis of Concrete and Masonry Dam Incidents. Intern. J. Hydropower & Dams, Issue 4 (108–115).
- Eddleston, M. (2015) A review of international approaches to risk assessments in dam engineering,

Hydropower & Dams Issue Four, 2015.

- Energi Norge (2017). Evaluering av eksisterende betong og murdammer. Rapport 2 – Hovedrapport med underlag. Dr. tech Olav Olsen. Doc nr 12372-OO-R-01, Versjon 2.1, 122 s. (T Konow og M. Engseth).
- Fell, R., Foster, M., Davidson, R., Cyganiewicz, J., Sills, G. & 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, Civil and Env. Eng., Sydney, Australia 2051. ISBN: 85841 314 9 (2 vol). www.engineering.unsw.edu.au/civeng/uniciv-reports.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. & Foster, M. (2015). Geotechnical Engineering of Dams. 2nd edition. CRC Press, Taylor and Francis Group. 1348 p.
- Fell R. & 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. & 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.
- FERC (2016). Risk-Informed Decision Making (RIDM) Risk Guidelines for dam safety. Federal Energy Regulatory Commission.- Interim Guidance. Version 4.1
- Foster, M., Fell, R. & Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*. **37** (5) 1000-1024.
- Foster, D. & Smith, L. (2019). Maturity Matrix to Evaluate a Dam Safety Programme and Improve Practices. NZCOLD-ANCOLD Proc. Resilient Dams and Levees for Resilient Communication.
- Hartford, D.N.D. & Baecher, G.B. (2004). *Risk and uncertainty in dam safety*. Thomas Telford, 391s.
- HSE (2001). *Reducing risk, protecting people (R2P2)*, (Health and safety executive) HSE's decision-making process. HMSO, Norwich, UK.
- Höeg, K. (2001). Embankment-dam engineering, safety evaluation and upgrading. Proc. *ICSMGE*, Istanbul, 2001
- ICOLD (2005). Risk assessment in dam safety management - A reconnaissance of benefits, methods and current applications. Bulletin No. 130. International Commission on Large Dams. Paris. France.
- ICOLD. 2017. Dam Safety Management: Operational phase of the dam life cycle. Bulletin No. 154. International Commission on Large Dams. Paris. France.
- ICOLD (2020). Dam failures - statistical analysis. Bulletin No. 99. International Commission on Large Dams. Paris. France.
- 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
- ISO 2394:2015 (International Standard Organization). ISO Standard: General principles on reliability for structures. ISO/TC 98/SC 2. 111 pp.
- ISO 31000:2018 standarden "Risk management - Principles and guidelines"
- Kalsnes, B., Vangelsten, B.V., & Eidsvig, U. (2016). Risk analyses in excavation and foundation work. Proc. 17th Nordic Geotechnical Meeting (NGM), Reykjavik, Island. pp.487 - 493).
- Kjærnsli, B. Valstad, T. & 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.

- Lacasse, S. & Høeg, K. (2019). Reliability and risk approach for design and safety evaluation of dams. Keynote Lecture. (Eds J.P. Tournier, T. Bennett, J. Bibeau) Sustainable and Safe Dams Around the World: Proc. ICOLD 2019 Symposium (ICOLD 2019). Ottawa, Canada. CRC Press.
- Lacasse, S. & Nadim, F. (2007). Probabilistic geotechnical analyses for offshore facilities. *Georisk*. **1**, (1): (21–42).
- Langford, J., Lande, E.J., Sandene, T., Kahlstrøm, M., Nadim, F., Norén-Cosgriff, K., Piciullo, L., Ritter, S., Hauser, C., Lysdahl, A.O.K., Attari, Y., & Formreide, A. (2020). BegrensSkade II – REMEDY – Risk Reduction of Groundwork Damage: An Overview, 17th NGM Conf. Helsinki (in print).
- Langford, J., Norén-Cosgriff, K., Lacasse, S., Sørgerd, T. & Brekke, A. (2019). Risk assessment of vibrations caused by groundworks. Proc. 17th ECSMGE "Geotechnical Engineering foundation of the future". Reykjavik, Island. ISBN 978-9935-9436-1-3.
- Londe, P. (1993). Safety evaluation using reliability analysis. Proc. Workshop on Dam Safety Evaluation, Grindelwald, Switzerland, Vol. 4, pp. 171-188.
- MAC (2019). A Guide to the management of Tailings Facilities. Version 3.1. The Mining Association of Canada. www.mining.ca.
- 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.
- Morgenstern, N.R. (2018). Geotechnical Risk, Regulation, and Public Policy (6th Victor de Mello Lecture). *Soils and Rocks*. **41**(2):107-129. DOI: 10.28927/SR.412107.
- Murphy, K. P. 2001. The Bayes Net Toolbox for Matlab. *Computing Science and Statistics*. **33**(2): 1024-1034.
- NGI (1992). Sikkerhet av norske fyllingsdammer mor brudd forårsaket av indre erosjon og derav følgende øket lekkasje gjennom og under dammen. NGI rapport til prosjekt Damsikkerhet. Nr. 894084-1 8B. Kjærnsli). 22. januar 1992
- 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.
- NORSOK (2012). Integrity of Offshore Structures. NORSOK Standard N-001, Edition 8, September 2012.
- NRC (1996). National Research Council. Understanding Risk: Informing Decisions in a Democratic Society. Washington DC: National Academy Press.
- NS 5814:2018, Krav til risikovurderinger (ISO 31000) tidligere NS 5815:2006.
- 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 (1997). Veiledning for risikoanalyse anvendt for vassdragsanlegg. Utgave 1. 01.03.1997. 9s.
- NVE (2009, rettet 2013). Forskrift om sikkerhet ved vassdraganlegg (damsikkerhetsforskriften). Lovdata. 72s.
- NVE (2009). Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg. Damsikkerhetsforskriften. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-12-18-1600>.
- NVE (2012). Veileder for fyllingsdammer. NVE Veileder nr. 4/2012. 49s.
- NVE (2014). Veileder til damsikkerhetsforskriften. Klassifisering av vassgradanlegg. NVE veileder nr. 3/2014. 36s.
- NVE (2018). Revurdering av vassdraganlegg. Veileder for damsikkerhetsforskriften. NVE Veileder nr. 1/2018. 19s.
- Olje- og energidepartement (2009). Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (kort tittel: damsikkerhetsforskriften). Sist endret 2013.
- PBL (2008, rettet 2010). Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven)
- Peck, R.B. (1969). Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics.

- Géotechnique*. 19(1): 171–187.
- Peck, R.B. (1980). Where has all the judgment gone? The Fifth Laurits Bjerrum Memorial Lecture, Oslo, Norway. *Canadian Geotechnical Journal*. **40** (x)
- Piciullo, L., Bekele, Y., Depina, I., Nadim, F. & Langford, J. (2020). A management tool to reduce the risk of damage caused by geotechnical groundworks., 17th NGM Conf. Helsinki (in print).
- Piciullo, L., Ritter, S., Lysdahl, A.O.K., Langford, J. & Nadim, F. (2021a). Assessment of building damage due to excavation-induced displacements: The GIBV method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. **108**. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103673>.
- RAC (2002). RAC Engineers and Economists. Huntington District Demonstration Portfolio Risk Assessment. Rpt to USACE. Dec. 2002.
- Santos, R.N.C dos, Caldeira, L.M.M.S & Serra, J.P.B. (2012). FMEA of a tailings dam. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 6(2): 89-104. DOI: 10.1080-/17499518.2011.615751
- Svenska kraftnät. 2015. "Dam Safety in Sweden". Sweden's contribution on dam legislation to the ICOLD European Club Sweden's contribution on dam legislation to the ICOLD European Club.
- Swedenergy AB. 2019. "RIDAS 2019 Swedenergy's Dam Safety Guidelines (Rev. May 2020)". Stockholm: Energiföretagen Sverige – Swedenergy AB.
- USACE (1997), Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering, Dept of the Army, US Army Corps of Engineers. CECW-EG Technical Letter No. 1110-2-547. 30 Sept. 1997. 14 pp.
- 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.
- USACE(2012). Best Practices in Dam Safety and Levee Safety Risk Analysis. Bureau of Reclamation & U.S. Army Corps of Engineers. Denver, CO.
- 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.
- USBoR (2019). Best Practices in Dam Safety and Levee Safety Risk Analysis. United States Bureau of Reclamation. Dam Safety Office. Security, Safety and Law Enforcement Office. Sist oppdatert: 11/6-2020. <https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/methodology.html>.
- USBoR (2012). Best Practices in Dam Safety and Levee Safety Risk Analysis. Bureau of Reclamation & US Army Corps of Engineers. Denver, CO.
- USBoR (2003). Guidelines for Achieving Public Protection in Dam Safety Decision Making, June. USA
- USBoR (1999). A Procedure for estimating Loss of Life Caused by Dam Failure. (US Bureau of Reclamation). DSO-99-06. By W.J. Graham. 43 pp.
- Vick, S. (2002). *Degrees of Belief. Subjective Probability and Engineering Judgment*. ASCE Press. 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.
- Vroman, N., G. Sills, J. Cyganiewicz, R. Fell, M. Foster & R. Davidson (2007) A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping, NZSOLD / ANCOLD 2007 Annual Conference, Queenstown New Zealand.
- Whitman, R.V. (1984). Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *ASCE JGE* **110** (2): 143–188.
- Zhang, L., Peng, M., Chang, A., Xu, Y. (2016). *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*. Wiley. 476 pp.

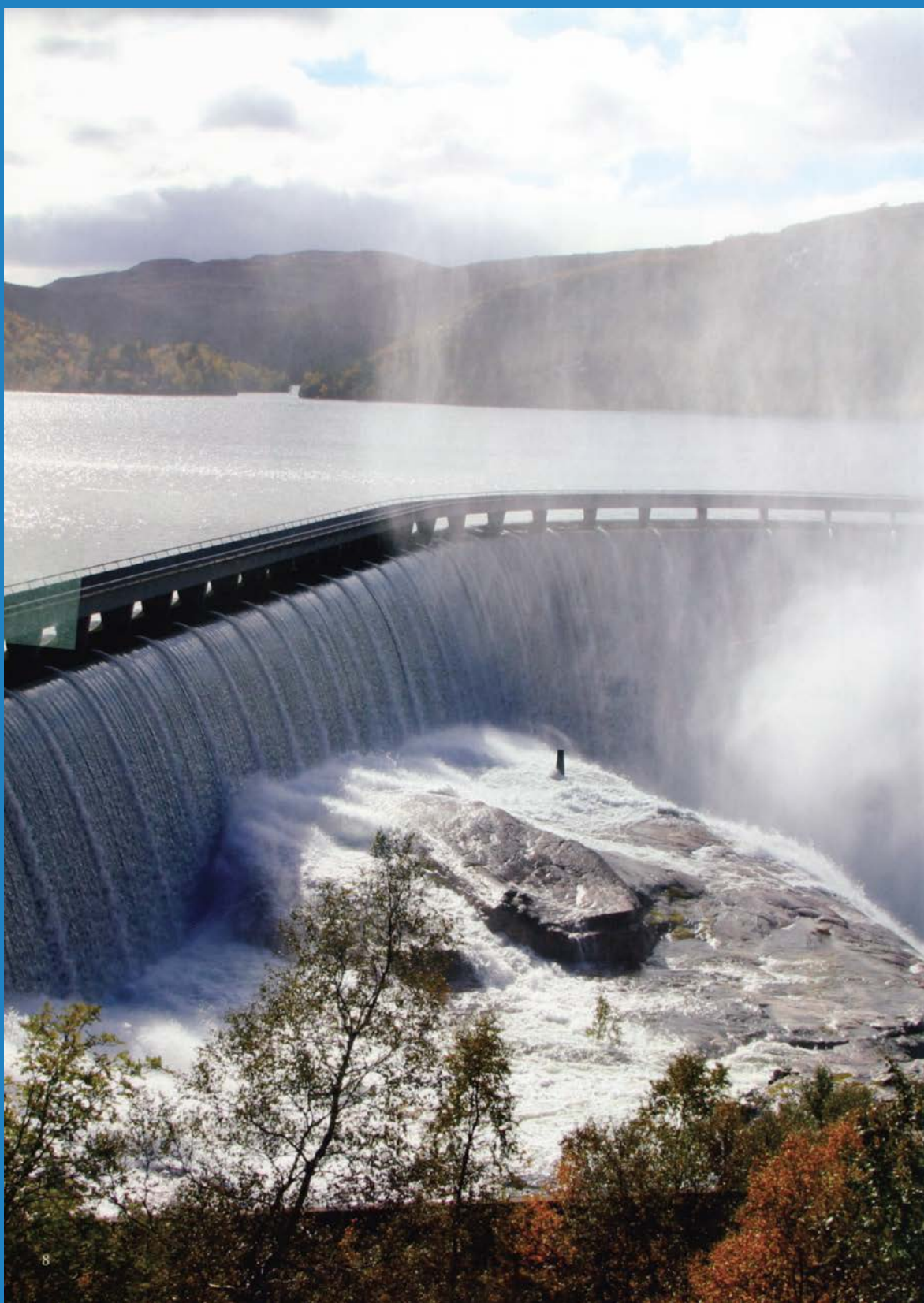


Foto: Statkraft Energi AS



2020

ISBN 978-82-546-1007-7