



KLIMA
2050

RAPPORT

Nr. 39 – 2022

VURDERING AV RESTRISIKO

Rammeverk og eksempler

Unni Eidsvig og Peter Gauer





KLIMA 2050

Klima 2050 Report No 39
Unni Eidsvig (NGI) og Peter Gauer (NGI)
Vurdering av restrisiko
Rammeverk og eksempler

Keywords: risikovurdering, sikringstiltak, restrisiko

ISBN: 978-82-536-1781-7 (pdf)

Illustration front cover and page 3: Krister Kristensen NGI
Publisher: SINTEF Community, Høgskoleringen 7 b, PO Box 4760 Sluppen, N-7465 Trondheim

www.klima2050.no



Forord

Denne rapporten omhandler vurdering av risiko etter at tiltak er iverksatt, såkalt restrisiko. Rapporten presenterer et rammeverk for vurdering av restrisiko, som identifiserer ulike kilder til restrisiko og gir anbefalinger om hvordan disse kan vurderes. Bruk av rammeverket er også demonstrert gjennom eksempler på konkrete vurderinger.

Klima 2050 – Reduksjon av samfunnsrisiko knyttet til klimaendringer på det bygde miljø er et senter for forskningsbasert innovasjon (SFI) finansiert av Norges forskningsråd og partnerne i konsortiet. SFI-statusen muliggjør langsiktig forskning i nært samarbeid med privat og offentlig sektor, samt med andre forskningspartnere som har som mål å styrke Norges innovasjons- og konkurransevne innen klimatilpasning. Sammensetningen av konsortiet er viktig for å kunne redusere samfunnsrisikoen forbundet med klimaendringer.

Senteret vil styrke bedriftenes innovasjonskapasitet gjennom fokus på langsiktig forskning. Det er også et klart mål å legge til rette for tett samarbeid mellom FoU-aktive bedrifter og fremtredende forskningsgrupper. Det blir lagt vekt på utvikling av fuktbestandige bygninger, overvannshåndtering, blågrønne løsninger, tiltak for forebygging av vannutløste skred, sosioøkonomiske insentiver og beslutningsprosesser. Både ekstremvær og gradvise endringer i klimaet blir omhandlet.

Vertsinstitusjonen for SFI Klima 2050 er SINTEF Community, og senteret ledes i samarbeid med NTNU. De andre forskningspartnerne er Handelshøyskolen BI, Norges Geotekniske Institutt (NGI) og Meteorologisk institutt (MET).

Industripartnerne representerer viktige deler av norsk byggenæring; rådgivere, entreprenører og produsenter av byggevarer og teknologi: Skanska Norge, Multiconsult AS, Mesterhus, Norgeshus AS, Leca Norge AS, Isola AS og Skjæveland Gruppen AS. Senteret inkluderer også viktige offentlige byggherrer og eiendomsutviklere: Statsbygg, Statens vegvesen, Jernbanedirektoratet og Avinor AS. Sentrale aktører er også Trondheim kommune, Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Finans Norge.

Vi ønsker å takke Ulrik Domås og Frode Sandersen som har deltatt i hendelsestre-analysene for vurdering av restrisiko bak en snøskredvoll. Takk til Carl Harbitz, som har gjennomgått og gitt innspill til denne rapporten.

Trondheim, desember 2022

Berit Time
Senterleder
SINTEF Community

Sammendrag

Sikringstiltak mot skred eller andre naturfarer kan redusere risikoen betraktelig, men vil aldri kunne gi total beskyttelse i enhver situasjon. Det vil alltid være en restrisiko. Den risiko-reducerende effekten av et sikringstiltak avhenger av type og dimensjonering av sikrings-tiltak, samt av hvordan det er vedlikeholdt. Vurdering av restrisiko er viktig både i nytte-kostnadsanalyser av tiltak og i arealplanleggingen. I nytte-kostnadsanalyser av tiltak vurderes risikoreduksjonen fra tiltaket opp mot kostnadene for tiltaket. Restrisikoen er sentral i disse beregningene og kan være avgjørende for om tiltaket er kostnadseffektivt eller ikke. Kvantifisering av restrisiko er også nyttig for å kunne dokumentere tilstrekkelig sikkerhet mot naturpåkjenninger i hht. Byggteknisk Forskrift (TEK 17). Beregningene fokuserer da på en vurdering av sannsynligheten for at en uønsket naturhendelse likevel rammer det området som er omfattet av sikringen. Hvis tilstrekkelig sikkerhet kan dokumenteres kan grensen for faresonene før sikring flyttes og tidligere fareområder frigjøres for utbygging.

Dette dokumentet beskriver et rammeverk for vurdering av restrisiko. Rammeverket identifiserer ulike kilder til restrisiko og gir anbefalinger om hvordan restrisiko kan vurderes og kvantifiseres. Rammeverket presenterer en arbeidsflyt for vurdering av restrisiko på en overordnet måte, som kan anvendes for ulike typer massebevegelser og sikringstiltak. Hovedmotivasjonen for etablering av rammeverket var restrisikovurderinger for bruk i nytte-kostnadsanalyser av tiltak, men rammeverket er også nyttig for vurdering av tiltak i arealplanleggingen.

Det ble gjort en litteraturgjennomgang av tidligere vurderinger av restrisiko og effekt av sikringstiltak. Rammeverket som foreslås her tar utgangspunkt i hvordan effekt av tiltak vurderes i Sveits. Der benyttes en arbeidsflyt for vurdering av effekten av sikringstiltak mot naturfarer, spesielt med tanke på arealplanleggingen, som kan anvendes for alle typer naturlig massebevegelse og alle typer sikringstiltak.

I det foreslåtte rammeverket for vurdering av restrisiko vurderes tiltakene mhp. lastsikkerhet, funksjonsdyktighet og holdbarhet. Vurdering av disse kildene til restrisiko er demonstrert gjennom konkrete anvendelser.

Lastsikkerhet: Ved dimensjonering av sikringstiltak tas det som regel utgangspunkt i en naturfare med gitt omfang eller gjentakperiode, f.eks. 1000-års skredet. Overskridelse av hendelsen som sikringstiltaket er dimensjonert for er en kilde til restrisiko, både på grunn av usikkerhet i dimensjoneringsgrunnlaget (f.eks. hvor stort blir 1000-års skredet) og fordi det kan forekomme mer ekstreme scenarier enn det tiltaket er dimensjonert for (f.eks. 10 000-års skredet).

Funksjonsdyktighet: Kilder til restrisiko som går på manglende funksjonsdyktighet omfatter valg av feil type sikringstiltak, mangelfull installasjon av sikringstiltaket, eller reduksjon av kapasiteten i sikringstiltaket på grunn av hendelser som kommer tett etter hverandre i tid.

Holdbarhet: Over tid kan det skje forringelser av tiltaket som følge av ytre hendelser eller indre prosesser. Det vil da være viktig med godt vedlikehold. Tiltak som stikkrenner, kulvert og innløpskontroll for bekk er avhengige av godt vedlikehold (som f.eks. fjerning av avlagrede masser etter flommer) for å fungere. Ved mangelfullt vedlikehold blir restrisiko forbundet med tiltaket høyere.

Restrisiko kan vurderes ved hjelp av ulike strategier som eksempelvis forenklede metoder, avansert simulering og hendelsestre-analyser. Valg av strategi må både tilpasses formålet med restrisikovurderingene og hovedkildene til restrisiko i hver spesifikk vurdering. Bruk av hendelsestre-analyser er en måte å integrere resultater fra ulike typer vurderinger på, for eksempel fra simuleringer og fra ekspertvurderinger. Hendelsestre-analyser kan også benyttes til sammenstilling av restrisikovurderinger for ulike kilder til restrisiko.

Videre arbeid vil omfatte å etablere flere eksempler på restrisikovurderinger som knytter sammen sannsynlighetsvurderinger fra ulike typer vurderinger; f.eks. kombinasjon av resultater fra simuleringer, statistikk, erfaringer og ekspertvurderinger. Spesielt aktuelt vil det være å benytte og tilpasse rammeverket til å vurdere naturbaserte løsninger, eller mer presist å kvantifisere restrisiko forbundet med naturbaserte løsninger for risikoreduksjon av naturfarer. Erfaringene fra eksemplene kan benyttes til å lage en veiledning for bruk av rammeverket for spesifikke typer naturbaserte løsninger.

Innhold

FORORD	5
SAMMENDRAG	6
1 INNLEDNING	9
1.1 DEFINISJONER AV RESTRISIKO	9
1.2 FORMÅL MED BEREGNING AV RESTRISIKO	10
2 BAKGRUNN – VURDERING AV EFFEKT AV SIKRINGSTILTAK I LITTERATUREN	11
2.1 GROVVURDERING AV TILTAK	12
2.1.1 <i>Eksempel: Grovvurdering av snøskredvoller</i>	12
2.2 VURDERING AV PÅLITELIGHET AV TILTAKET	12
2.2.1 <i>Eksempel: vurdering av pålitelighet av snøskredvoller</i>	13
2.3 VURDERING AV EFFEKT AV TILTAKET	13
2.4 ANBEFALINGER FOR IMPLEMENTERING I AREALPLANLEGGING	14
3 RISIKOVURDERINGSMETODIKK	15
3.1 HENDELSESTREANALYSE	15
3.2 FEILTREANALYSE	15
3.3 NUMERISK MODELLERING AV SKRED	16
4 RAMMEVERK FOR VURDERING AV RESTRISIKO	18
4.1 IDENTIFISERING AV RISIKO SCENARIER	18
4.2 VURDERING AV FAREBILDET ETTER SIKRING	19
4.2.1 <i>Eksempel 1: Vurdering av farebildet etter sikring vha. hendelsestrær</i>	21
4.2.2 <i>Eksempel 2: Vurdering av sannsynlighet for massebevegelse forbi snøskredvoll vha. simulering</i>	22
4.3 KONSEKVENSER AV MASSEBEVEGELSE FORBI SIKRINGEN	22
4.3.1 <i>Eksponerte objekter</i>	23
4.3.2 <i>Skadegrad av eksponerte objekter</i>	24
4.3.3 <i>Konsekvensvurdering ved hjelp av konsekvensklasser</i>	25
4.4 EKSEMPEL: VURDERING AV RESTRISIKO VED HJELP AV HENDELSESTRÆR	26
4.5 EKSEMPEL PÅ FORENKLEDE METODER FOR RESTRISIKOVURDERING	27
5 EKSEMPEL: VURDERING AV RESTRISIKO BAK SNØSKREDVOLL	29
5.1 BAKGRUNN	29
5.2 INPUT OG USIKKERHETER	29
5.3 IDENTIFISERING AV RISIKOSCENARIER	30
5.4 RESTRISIKO FORÅRSAKET AV SNØSKY	31
5.5 RESTRISIKO FORÅRSAKET AV FOR LITEN DESIGNET KAPASITET I SIKRINGSTILTAKET	34
6 KONKLUSJON OG DISKUSJON	37
LITTERATUR	38
A VEDLEGG – EXAMPLE OF ESTIMATION OF "REST RISK" OF A CATCHING DAM	3
A.1 DESIGN INPUT PARAMETER	3
A.2 OVERRUN LENGTH	5
A.3 EXAMPLE 1	7
A.4 EXAMPLE 2	8

1 Innledning

Hendelser som flom og skred er naturlige prosesser, og samfunnet må leve med at slike naturhendelser skjer. Håndtering av slike hendelser i samfunnet er lovfestet i to ulike lover, som stiller krav om gjennomføring av risiko- og sårbarhetsanalyser (ROS-analyser) og derunder vurdering av skredfare både for ny bebyggelse (Plan- og bygningsloven) og for eksisterende bebyggelse (Sivilbeskyttelsesloven).

Plan- og bygningsloven setter krav til vurdering av fare for naturskade ved all planlegging og byggeaktivitet i Norge, og gir samtidig kommunen mulighet til å styre ny utbygging til områder som er mindre sårbare for klimaendringer eller områder der man kan gjennomføre tiltak i forkant som gjør området mindre sårbart. Arealplanlegging er sentralt for å forebygge tap og skader som følge av flom og skred.

Sivilbeskyttelsesloven pålegger kommunene en nøkkelrolle når det kommer til samfunns-sikkerhet. Kommunen skal jobbe systematisk og helhetlig med samfunnssikkerhetsarbeidet på tvers av sektorer, med sikte på å redusere risiko for tap av liv eller skade på helse, miljø og materielle verdier. Forebygging av skredulykker inkluderer flere aktiviteter, blant annet fareidentifisering, aktsomhetskartlegging, farevurdering, ROS-analyser og iverksetting av tiltak.

Sikringstiltak mot skred kan omfatte (i) tiltak i utløsningsområdet, som skal hindre at skred blir utløst; (ii) tiltak i skredløpet, som skal lede skredet bort fra utsatt område og eventuelt redusere utløpslengden til skredet eller (iii) tiltak i utløpsområdet, som skal stoppe, bremse eller på annen måte hindre skred i å nå bebyggelse, veier eller lignende, f.eks. en skredvoll eller et steinspranggjerde. Om skredlastene ikke er for store så kan også bygninger dimensjoneres til å tåle krefter fra skred.

Slike sikringstiltak kan redusere risikoen betraktelig, men 100% beskyttelse mot naturfarer i enhver situasjon er aldri mulig. Det vil alltid være en restrisiko. Hvor stor den risiko-reducerende effekten av et sikringstiltak er, bestemmes i stor grad av type sikringstiltak, dimensjonering og vedlikehold, selv om også andre faktorer kan innvirke. Dette dokumentet beskriver et rammeverk for å kunne vurdere og kvantifisere restrisikoen forbundet med fysiske sikringstiltak.

1.1 Definisjoner av restrisiko

ISO gir en konseptuell definisjon av risiko som understreker den sterke koblingen mellom risiko og usikkerhet. Ifølge ISO 31000:2018 (Risk management – Guidelines) er risiko "effekten av usikkerhet på formål", der en effekt er et positivt eller negativt avvik fra det som forventes. De tradisjonelle definisjonene av risiko operasjonaliserer denne generelle definisjonen og forklarer hvordan man kan kvantifisere risiko som en kombinasjon av sannsynlighet for og konsekvens av en uønsket hendelse.

Det finnes en rekke ulike definisjoner på restrisiko i litteratur og blant virksomheter. Nedenfor er det gjengitt en del eksempler på dette:

- Når vi har gjort en vurdering av risiko og satt inn tiltak slik at risikoen blir så liten som mulig, er risikoen likevel ikke helt borte. Vi sier da at vi har en restrisiko (NDLA; 2022)
- Restrisiko er den gjenværende risikoen, forårsaket av tap og skade fra en naturfarehendelse, som gjenstår etter at beskyttelsestiltak er iverksatt¹(Schneiderbauer et al.; 2018)

¹ På originalspråket: *Das **Restrisiko** ist das verbleibende Risiko von Verlusten und Schäden aufgrund einer Naturgefahr, das nach Umsetzung von Schutzmaßnahmen bestehen bleibt*

- Restrisiko er den risiko som gjenstår når vi ikke kan gjennomføre eller er villig til å prioritere ytterligere risikoreducerende tiltak. En restrisiko vil alltid finnes. Dette skyldes blant annet økonomiske begrensninger for hvilke tiltak som lar seg gjennomføre, balanseringen av risikoreducerende tiltak mot andre hensyn, og usikkerhet i risikovurderinger. «Sorte svaner» bidrar også til at det alltid vil finnes risikoer vi ikke kan fjerne. Meld. St. 10 (2016–2017)

Selv om ordlyden i definisjonene over er litt ulik, knytter samtlige definisjoner restrisiko til den risikoen som er igjen etter tiltak. I denne rapporten vil vi definere restrisiko som: Risikoen som gjenstår etter iverksetting av tiltak.

1.2 Formål med beregning av restrisiko

Behovet for å systematisere vurderingen og kvantifiseringen av restrisiko ble indentifisert gjennom arbeid med nytte-kostnadsanalyser av tiltak (Eidsvig; 2019). I nyttekostnadsanalyser vurderes risikoreduksjonen og ev. andre nytter som følge av tiltaket opp mot kostnader og ev. andre ulemper av tiltaket. Hensikten kan både være å vurdere om de samlede nyttene er større enn de samlede kostnadene eller å sammenlikne ulike alternativer for å vurdere hvilket som gir best nytte-kost forhold/er mest kostnadseffektivt. Restrisikoen er sentral i disse beregningene og kan være avgjørende for om tiltaket er kostnadseffektivt eller ikke.

Gjennom arbeidet med restrisiko ble også et annet formål med kvantifisering av restrisiko indentifisert, nemlig beregning av "rest-fare". Ved sikring av områder utsatt for naturfare kan det være ønskelig å dokumentere tilstrekkelig sikkerhet mot naturpåkjenninger og å flytte eksisterende faresoner. For norske forhold vil det typisk være ønskelig å sikre i henhold til de høyeste tillatte nominelle sannsynlighetene i Byggteknisk forskrift (TEK17). Det må kunne dokumenteres at sannsynligheten for massebevegelse forbi sikringen er lavere enn 1/100år, 1/1000år eller 1/500år for sikkerhetsklassene hhv. S1, S2 og S3 i TEK17. Ved å gjøre dette kan tidligere fareområder frigjøres for utbygging. Hvis et område sikres, for senere å bli bygget ut, kan imidlertid risikoen øke selv om faren reduseres, som følge av at tiltaket ble implementert.

Denne rapporten handler primært om beregning av restrisiko ved sikring av eksisterende bebyggelse og effekten av endret skredfarebilde. Effekter av endret arealbruk som følge av sikring (f.eks. ved utbygging i tidligere fareområder) eller andre typer endret eksponering som følge av sikring (f.eks. økte trafikkmengder ved sikring av vei) vil ikke bli inkludert her. Det anbefales imidlertid å gjøre beregningen av restrisiko i to steg: Beregning av fare etter sikring (sannsynlighet og intensitet i massebevegelse forbi sikringen) og beregning av konsekvenser av massebevegelser forbi sikringen. Konsekvensvurderingen kan ved behov tilpasses endring i eksponering.

2 Bakgrunn – vurdering av effekt av sikringstiltak i litteraturen

Det ble gjort en litteraturgjennomgang av tidligere vurderinger av restrisiko og effekt av sikringstiltak. Eidsvig (2019) identifiserte og vurderte eksisterende verktøy for nytte-kostnadsvurderinger av skredrisiko i Norge (herunder verktøy fra Statens vegvesen, Bane NOR og NVE), Sveits (EconoMe) og Østerrike. I verktøyene ble det benyttet ulike strategier for vurdering av restrisiko og effekt av sikringstiltak. Disse omfattet beregning av restrisiko gjennom simuleringer av intensiteten av skredhendelser før og etter sikringstiltak, forenklete metoder for vurdering av restrisiko, samt neglisjering av restrisiko. De forenklete vurderingene satte sannsynligheten for massebevegelse forbi sikringen lik sannsynligheten for overskridelse av designhendelsen. En annen forenklet vurdering var å angi en prosentvis risikoreduksjon som tiltaket representerer (basert på ekspertvurdering).

Det finnes flere eksempler på bruk av simuleringer ved hjelp av numeriske modeller for å vurdere restrisiko i litteraturen. Agliardi et al. (2009) og Corominas et al. (2005) beregnet restrisiko for ulike sikringsløsninger for steinsprang ved hjelp av numerisk modellering av steinsprang med ulike volum. Mikos et al. (2007) gjorde simuleringer for å beregne restrisiko etter sikring mot flomskred. NGI (2003) diskuterte og ga eksempler på endring av farekart for snøskred etter implementasjon av sikringstiltak. Safeland (2010) beregnet sannsynlighet for steinsprang etter sikring som en funksjon av sikringsnivået og forventet frekvens av steinsprang. De referansene som ble funnet mest relevante for vårt videre arbeid og den mest fullstendige vurderingen ble gitt i Romang et al. (2008) og Margreth et al. (2008). Disse beskriver hvordan effekt av tiltak vurderes i Sveits, spesielt med tanke på arealplanleggingen.

I Sveits er etablering av farekart for naturhendelser/massebevegelser som flom, flomskred, skred, steinsprang, fjellskred og snøskred påkrevd i arealplanleggingen. Faren deles inn i 5 nivåer, der det laveste nivået indikerer ingen eller neglisjerbar fare. Farenivået omfatter både sannsynligheten for naturhendelsen og intensiteten, som beskriver naturhendelsens ødeleggende potensial. En intensitetsparameter for flom kan for eksempel være flomdybde eller produktet av flomhastighet og flomdybde. Farenivåer i et område har direkte konsekvenser for arealplanleggingen og avgjør hvilke regler og restriksjoner som gjelder for utbygging. Kriteriene for dokumentasjon på tilstrekkelig sikkerhet i et område omfatter derfor både sannsynlighet og intensitet. Hvilket farenivå det må sikres mot avhenger også av hva/hvilke objekter som befinner seg i området som skal sikres. Objektene kategoriseres ut fra type eiendom, type infrastruktur og type natur. Disse kravene omfatter dermed de nødvendige faktorene for å beregne restrisiko etter sikring.

I den sveitsiske standarden, PLANAT 2008, er det utarbeidet arbeidsflyt for vurdering av effekten av sikringstiltak mot naturfarer. Arbeidsflyten ble utviklet på grunnlag av gjeldende retningslinjer og praksis og kan anvendes for alle typer massebevegelsesprosesser og alle typer sikringstiltak. Formålet er å veilede fagpersoner i sitt arbeid med vurdering av sikringstiltak og å sørge for en felles basis som vil bidra til at sikringstiltak vurderes på en enhetlig måte. Vurderingene skal videre danne grunnlag for å inkludere effekten av tiltakene i arealplaner. Det er foreslått å gjøre vurderingen i 4 trinn:

- 1) Grovvurdering av tiltakene
- 2) Vurdering av pålitelighet av tiltaket
- 3) Vurdering av effekt av tiltaket
- 4) Anbefalinger for implementering i arealplanlegging

Disse trinnene er kort gjennomgått i de videre delkapitlene (alt basert på Romang et al. (2008) og Margreth et al. (2008)).

2.1 Grovvurdering av tiltak

I grovvurderingen vurderes det om de grunnleggende krav til sikringstiltakene er innfridd slik at effekten av tiltaket kan inkluderes i farekartene og videre i arealplanleggingen (Tabell 1).

Tabell 1 Grunnleggende krav til sikringstiltak for å kunne inkluderes i arealplanleggingen – grovvurdering (Romang et al.; 2008).

Hva	Krav
Intensitet og sannsynlighet	Tiltaket må ha en dokumentert og kvantifiserbar effekt på naturhendelsen.
Usikkerheter	Tiltakets innvirkning på naturhendelsen må være større enn usikkerhetene i farevurderingen.
Scenarier	Minst 4 ulike scenarier av naturhendelsen må vurderes, med lav, middels og høy sannsynlighet, i tillegg til et ekstremscenarier med svært lav sannsynlighet
Systemavgrensning Overordnet system	Sikringstiltaket må både vurderes som et enkelt system og som en del av det overordnede systemet
Permanent tilgjengelig	Sikringstiltaket må være permanent og ha en levetid på minst 50 år. Midlertidige tiltak (som kunstig utløsning av snøskred eller mobile flomsikringstiltak) blir vanligvis ikke tatt med i betraktningen.
Overvåking og vedlikehold	Overvåking og vedlikehold utføres ved behov og feil, mangler må utbedres
Ferdigstillelse	Sikringstiltaket må være godkjent etter ferdigstillelse. Det må kontrolleres om tiltaket er implementert i henhold til planene og om farevurderingen fra planleggingsfasen fortsatt er gyldig.
Tid	Siden både tiltakene og naturhendelsene endres over tid, må tiltakene og faresituasjonen revurderes med jevne mellomrom.

2.1.1 Eksempel: Grovvurdering av snøskredvoller

I grovvurderingen vurderes det om tiltaket forventes å ha en relevant effekt og derfor om en videre undersøkelse er hensiktsmessig. For å kunne vurdere effekten av en snøskredvoll er viktige kriterier og informasjon: plassering og størrelse på vollen (høyde og lengde), geometri (helning av vollens støtside og bakside), oppfangningsvolum, topografien rundt skredvullen og farekilder som kan forringe kvaliteten av sikringen (f.eks. geoteknisk instabilitet, erosjon, vanntrykk, avskoging)

2.2 Vurdering av pålitelighet av tiltaket

Vurdering av pålitelighet av tiltaket utgjør det andre steget i vurdering av effekt av sikrings-tiltak i den sveitsiske standarden (Romang et al.; 2008). Følgende kriterier benyttes for vurderingene:

- **Lastsikkerhet:** Sikringstiltakets evne til å yte tilstrekkelig lastmotstand ved en naturhendelse. Lastmotstanden skal være større enn belastningen fra naturhendelsene det er dimensjonert for og det skal ikke oppstå noen feil eller instabiliteter i sikringstiltaket under disse belastningene. Eksempler på god lastsikkerhet:
 - Lastmotstanden er tydelig større enn belastningene fra naturhendelsene; dvs. det er bufferkapasitet/reservekapasitet i tiltaket.
 - Lastsikkerheten er kjent og tiltaket er typegodkjent.
- **Funksjonsdyktighet:** Funksjonsdyktighet er hvordan tiltaket fungerer i henhold til de angitte brukskravene. Det er av stor betydning for strukturelle sikringstiltak mot naturfarer, siden effekten av tiltaket avhenger av riktig anvendelse. Vurderingen av funksjonsdyktighet er nært knyttet til vurderingen av effekten av tiltaket som helhet.
 - Hvordan fungerer tiltaket i forhold til de spesifiserte brukskravene?
 - Manglende funksjonsdyktighet gir reduksjon i virkningen av tiltaket.
 - Effekt av tiltaket kan gå ned som følge av tidligere naturhendelser (f.eks. stein i steinsprangnett, akkumulasjon av skredsnø)

- **Holdbarhet:** Kravene til lastsikkerhet og funksjonsdyktighet av et tiltak bør være oppfylt i en lengre periode, uten uforutsette vedlikeholdskostnader.
 - Holdbarheten anses å være god hvis det har en levetid på 50 år eller mer med normalt vedlikehold.

Pålitelighet av tiltaket vurderes ut fra de tre ovennevnte kriteriene etter Tabell 2. Grad av pålitelighet bestemmes ved å lese tabellen kolonnevis.

Tabell 2 Kriterier for inndeling i pålitelighetsklasser som funksjon av lastsikkerhet, funksjonsdyktighet og holdbarhet.

	Høy pålitelighet		Middels pålitelighet		Lav pålitelighet	
	Ja	Nei	Ja	Nei	Ja	Nei
God lastsikkerhet?	Ja	Nei	Ja	Nei	Ja	Nei
God funksjonsdyktighet?	Ja	Nei	Ja	Nei	Ja/nei	Nei
God holdbarhet?	Ja	Nei	Ja	Nei	Ja/nei	Nei

2.2.1 Eksempel: vurdering av pålitelighet av snøskredvoller

Romang et al. (2008) beskrev scenarier for interaksjon mellom snøskred og skredvoll. I de følgende delkapitler er disse scenariene inkludert i vurderingene av lastsikkerhet, funksjonsdyktighet og holdbarhet av tiltaket.

2.2.1.1 Lastsikkerhet

Massive snøskredvoller har som hovedregel tilstrekkelig lastsikkerhet og fungerer godt, når de er riktig dimensjonert.

2.2.1.2 Funksjonsdyktighet

Virkningshøyden er den viktigste faktoren for om snøskredvoller virker tilfredsstillende. Ytre påvirkninger og prosesser kan påvirke virkningshøyden og dermed bidra til restrisiko. Slike prosesser omfatter:

- Masseavlagring fra andre prosesser (f.eks. flomskred)
- Masseavlagring fra tidligere snøskred
- Sterke setninger, erosjon
- Snø oppstuvning foran snøskredvullen

2.2.1.3 Holdbarhet av tiltaket

Snøskredvoller har som regel god holdbarhet, da det dreier seg om solide konstruksjoner. Men ytre påvirkninger som kan bidra til redusert holdbarhet av snøskredvullen og til restrisiko:

- Strukturen kan forringes av andre naturprosesser
- Hydrostatisk vanntrykk kan oppstå når avløpskanaler er tilstoppet eller drenering mangler (f.eks. snøsmelting).
- Endringer i terrengoverflaten, som jorderosjon på bunnen av snøskredvullen eller økt poretrykk, kan føre til en reduksjon i stabiliteten i strukturen.

2.2.1.4 Oppsummering av pålitelighetsvurderingen

Pålitelighetsvurderingen kan sammenfattes ved hjelp av kriteriene i Tabell 2. I denne vurderingen er påliteligheten høy for de vanligste scenariene. For scenarier der virkningshøyden er redusert (hvilket også innebærer redusert "funksjonsdyktighet") eller der holdbarheten av tiltaket er redusert, kan påliteligheten være middels høy.

2.3 Vurdering av effekt av tiltaket

I tredje trinn kvantifiseres effekten av tiltaket på bakgrunn av pålitelighetsvurderingene i trinn 2. Vurderingen avhenger av type prosess og type sikringstiltak. Sannsynligheten for

massebevegelse forbi tiltaket kan kun vurderes sammen med kunnskap om prosessene i de analyserte scenariene. Det er lagt opp til simulering av naturhendelsen ved hjelp av egnede beregningsverktøy, som beregner sannsynlighet og intensitet av massebevegelse når tiltak er iverksatt. Dette resulterer i intensiteter og sannsynligheter per scenario, som danner grunnlaget for farekartene. Ved høy pålitelighet i tiltaket kan det i beregningene antas full effekt av tiltaket. Ved lav pålitelighet av tiltaket er det stor sannsynlighet for svikt i tiltaket og effekten av tiltaket er liten.

2.4 Anbefalinger for implementering i arealplanlegging

Trinn 4 diskuterer implementering av effekten av sikringstiltakene i arealplanlegging fra et naturfareperspektiv. Implementering av sikringstiltak betyr at potensielle fareområder blir mindre eller tilordnes en lavere fareklasse. Tabell 3 drøfter faktorer som taler for og imot å oppdatere faresoner på bakgrunn av implementasjon av sikringstiltak. Nye sikringstiltak kan føre til justeringer i reguleringsplanen med en utvidelse av området der det tillates bygging.

Tabell 3 Faktorer for evaluering av om farekart bør endres som følge av tiltak (Margreth og Romang, 2008).

Pluss-side:	Minus-side
<p>Tiltaket er preget av høy pålitelighet.</p> <p>Tiltaket kan enkelt erstattes, utvides eller styrkes.</p> <p>Det er buffersoner eller reserver: For eksempel at det er en sikkerhetssone bak tiltaket, der massebevegelsen bremses raskt, hvis en massebevegelse forbi tiltaket skulle inntreffe.</p> <p>Redundans av tiltaket: Tiltaket inngår i et system med flere tiltak, slik at svikt i et enkelttiltak ikke er kritisk.</p> <p>Erfaring med tiltaket. Når det gjelder snøskred, har man for eksempel mer erfaring med virkningene av støtteforbygninger enn med fangvoller.</p> <p>God kunnskap om massebevegelsen (f.eks. tilgang på mange registrerte og dokumenterte hendelser).</p>	<p>Ulike prosesser kan forekomme, som kan påvirke virkningen av tiltaket negativt (f.eks. snøskred som ødelegger steinsprangnett).</p> <p>Generelle endringer i området (f.eks. terrengforskyvninger eller utglidninger).</p> <p>Klimafølsomhet (f.eks. mobiliserbare masser i permafrost soner)</p> <p>Avhengighet av personell: tiltaket virker ikke automatisk eller kan være vanskelig å overvåke i en krisesituasjon (f.eks. vanskelig tilkomst).</p> <p>Usikkerheter i prosessforståelsen (f.eks. dyptgripende skred) og i forståelsen av effekten av tiltaket.</p> <p>Potensielle motsetninger i de grunnleggende krav i Tabell 1.</p>

3 Risikovurderingsmetodikk

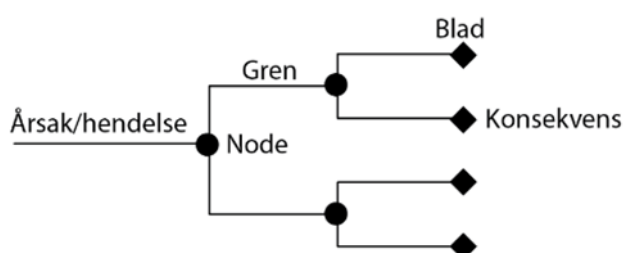
I dette kapittelet beskrives metodikk for risikovurdering, som senere vil bli benyttet i vurderinger av restrisiko.

Hendelsestre- og feiltreanalyser deler opp et problem på en visuell måte. Metodene har mye til felles og kan bl.a. illustrere om en uønsket hendelse er forårsaket av en enkelthendelse eller flere hendelser i kombinasjon.

3.1 Hendelsestreanalyse

- Tar utgangspunkt i ytre hendelser som kan påvirke systemet/analyseobjektet og kartlegger mulige videre hendelsesforløp for å bestemme mulige konsekvenser. For vurdering av restrisiko vurderes hendelser som kan føre til mangelfull funksjonalitet av sikringstiltaket.
- Analysen jobber forover i hendelsesforløpet: "Hva kan skje hvis"?
- Kan benyttes både i fare- og konsekvensanalyse. For vurdering av restrisiko kan hendelsestreanalyser benyttes for å vurdere sannsynlighet av massebevegelse forbi et sikringstiltak og konsekvensene av massebevegelsen.

Et hendelsestre har noder, grener og blad (Figur 1).



Figur 1 Oppbygning av hendelsestrær

I hendelsestrærne brukes følgende metodikk:

Sannsynlighetsverdier på en node: alle hendelsene skal være gjensidig utelukkende ("*mutually exclusive*"), men samtidig dekke alle mulige utfall ("*collectively exhaustive*"). Summen av sannsynlighetene på en node skal være 1.0.

Sannsynlighetsverdiene i trærne er estimert ut fra statistikk, fysiske og numeriske modeller samt ekspertvurderinger.

Sannsynligheten for en hendelseskjede er produktet av sannsynlighetene langs en gren. Når man bygger et hendelsestre er det viktig å ikke sette inn for mange steg i analysen.

Det kan bli uoversiktlig og en kunstig oppdeling av hendelser kan også føre til en underestimering av sannsynlighetene.

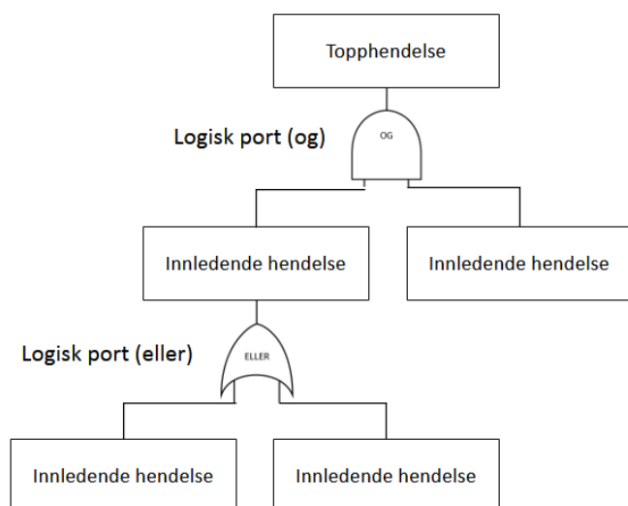
For utarbeidelse av hendelsestrær er det anbefalt å lage en forklaringstabell til hvert hendelsestre, som viser stegene i analysen. Teksten i tabellene bør begrunne valgene av sannsynlighetene i den tilhørende forgrening i hendelsestreet.

3.2 Feiltreanalyse

- Tar utgangspunkt i en uønsket hendelse, en såkalt topphendelse, og utreder alle mulige årsaker til denne, gjennom dekomponering av hendelser suksessivt ned til ønsket detaljnivå.
- Benytter ulike logiske operatører som «OG» og «ELLER»
- Analysen jobber bakover i hendelsesforløpet: Hva kan være årsaken til?
- Velegnet for farevurdering

Et feiltré består av en topphendelse (som er den uønskede hendelsen vi ønsker å analysere) øverst i figuren med innledende hendelser som kan resultere i topphendelsen under seg (Figur 2). Disse bindes sammen av logiske porter, som representerer at hendelsene må inntreffe samtidig (OG) eller at det er tilstrekkelig at en av hendelsene inntreffer (ELLER). Prosedyre for konstruksjon av feiltrær er som følger:

1. Topphendelsen defineres. For analyse av restrisiko vil topphendelsen være: Manglende ytelse i sikringstiltaket.
2. De umiddelbare årsaker som kan lede til topphendelsen identifiseres. Her vil slike årsaker/feilmoduser være: Manglende lastsikkerhet, manglende funksjonsdyktighet og aldring/forringelse/manglende holdbarhet av tiltaket.
3. De identifiserte årsakene og feilmodusene dekomponeres videre ned i mindre hendelser på lavere og lavere systemnivå. Hendelsene på laveste systemnivå kalles basishendelser.
4. Analysen kan gjøres kvantitativ, hvis følgende forutsetninger er innfridd:
 - a) Det er grunnlag for å estimere sannsynlighetene for basishendelsene,
 - b) For hver port, må alle årsakshendelsene både være nødvendig og tilstrekkelig for å medføre den resulterende hendelsen.



Figur 2 Oppbygning av feiltrær (hentet fra pålitelighet.no)

3.3 Numerisk modellering av skred

For detaljerte vurderinger kan det være nødvendig å beregne og teste ut skredscenarier ved hjelp av matematiske/fysiske modeller. Numerisk modellering kan benyttes for å forutsi hvordan et skred kan initieres og bre seg over store områder, samt for å kvantifisere intensiteten (f.eks. trykk eller hastighet), som igjen benyttes for å vurdere konsekvenser av skred. Ved å gjøre vurderinger med og uten sikringstiltak kan effekten av sikringstiltaket på intensiteten kvantifiseres. Det finnes en rekke verktøy til beregning av dynamikk og rekkevidde av skred. Sannsynligheten for ulike utfall kan vurderes ved å kvantifisere usikkerheten i modellresultatene som følge av usikkerheter i inngangsparametere og beregningsmetoder. Sannsynligheten for ulike rekkevidder av skred kan videre kobles med den årlige sannsynligheten for værhendelser som kan føre til utløsning av skred.

Avhengig av typer skred som er aktuelle, må vurdering av rekkevidden av skred med ulike sannsynligheter baseres på (NVE; 2011):

- Grunnforhold (stabilitet).
- Klimatiske forhold.

- Topografiske forhold.
- Opplysninger om tidligere skredhendelser (historiske opplysninger, geomorfologiske spor i terrenget, skade på vegetasjon eller andre objekter).
- Stratigrafiske undersøkelser.
- Feltbefaring.
- Beregningsverktøy (statistiske/topografiske og dynamiske modeller) for utløsning og utbredelse av skred.

4 Rammeverk for vurdering av restrisiko

Vurdering av restrisiko handler om å vurdere risikoen som gjenstår selv etter sikring. Risikovurdering består essensielt av å besvare følgende spørsmål:

- Hva kan gå galt? (Dette steget omfatter både identifikasjon av uønskede hendelser som kan skje, samt på hvilken måte disse hendelsene kan oppstå, som senere blir referert til som identifikasjon av risikoscenarier)
- Hva er sannsynligheten for at det går galt?
- Hva er konsekvensene hvis det går galt?

Anvendt på vurdering av restrisiko vil disse spørsmålene kunne omformuleres til følgende steg:

- Identifikasjon av risikoscenarier. Hva kan bidra til restrisiko? Hvilke risikoscenarier er aktuelle?
- Valg av scenarier for videre analyse og kvantifisering av restrisiko. Dette vil for hvert scenario omfatte:
 - Vurdering av farebildet etter at sikringstiltaket er iverksatt
 - Vurdering av konsekvenser: identifisering av fortsatt eksponerte objekter og vurdering av sårbarhet og alvorlighet av konsekvens
- Vurdering av samlet sannsynlighet for manglende funksjonalitet i sikringstiltaket og aggregering av scenariene til samlet risiko

4.1 Identifisering av risiko scenarier

Tabell 4 oppsummerer hovedkilder og underliggende årsaker til restrisiko, basert på den sveitsiske modellen beskrevet i kapittel 2. Dette er momenter som det tas utgangspunkt i når risikoscenarier skal identifiseres.

Tabell 4 Risikoscenarier for vurdering av restrisiko

Hovedkilde til restrisiko	Underliggende årsaker
Manglende lastsikkerhet	<ul style="list-style-type: none"> • Overskridelse av designhendelsen, dvs. forekomst av et større (og sjeldnere) skred enn det sikringstiltaket er dimensjonert for. • Feil i dimensjoneringen og usikkerhet i etablering av designhendelsen: underestimering av viktige inngangsparametere i simuleringer av massebevegelsen, og modellusikkerheter i beregningsverktøyene, f.eks. neglisjering av effekter som kan gi økt skredintensitet. Klimaendringer kan føre til at designhendelsen må oppjusteres
Manglende funksjonsdyktighet	<ul style="list-style-type: none"> • Mangelfull utførelse (NIFS; 2014): Mangelfull erosjonssikring av vannveier og voller, for kort planleggingsprosess* som resulterer i manglende forundersøkelser, mangel på plan for drift og vedlikehold, mangel på samhandling mellom myndigheter, mangler knyttet til utforming og plassering av tiltaket. • Påvirkning fra ytre faktorer (uten forringelse av tiltaket): ulike former for masseavlagring ved tiltaket, som "stjeler kapasitet"; f.eks. ved andre naturhendelser enn det tiltaket er dimensjonert for, som snødrift – eller tidligere forekomst av skred. Ved godt tilsyn og vedlikehold/rensk kan god effekt av tiltaket opprettholdes.
Aldring/forringelse/manglende holdbarhet av sikringstiltaket	<ul style="list-style-type: none"> • Forringelse av tiltaket over tid: Naturlige prosesser, slitasje og gradvis forringelse over tid • Manglende vedlikehold

*Risikomomentet "For kort planleggingsprosess - manglende forundersøkelser" kan bidra til restrisiko hvis det fører til at parameterne som anvendes i dimensjoneringen ikke passer til det påkrevde

sikringsnivået. Men ofte kan en for kort planleggingsprosess tvert imot føre til konservative valg av parametere for dimensjonering, for å inkludere de store usikkerhetene.

4.2 Vurdering av farebildet etter sikring

Anbefalt strategi for vurdering av et risikoscenario vil avhenge av kilden til restrisiko. Tabell 5 nedenfor lister opp hovedkilder til restrisiko og foreslåtte strategier for vurdering av restrisiko.

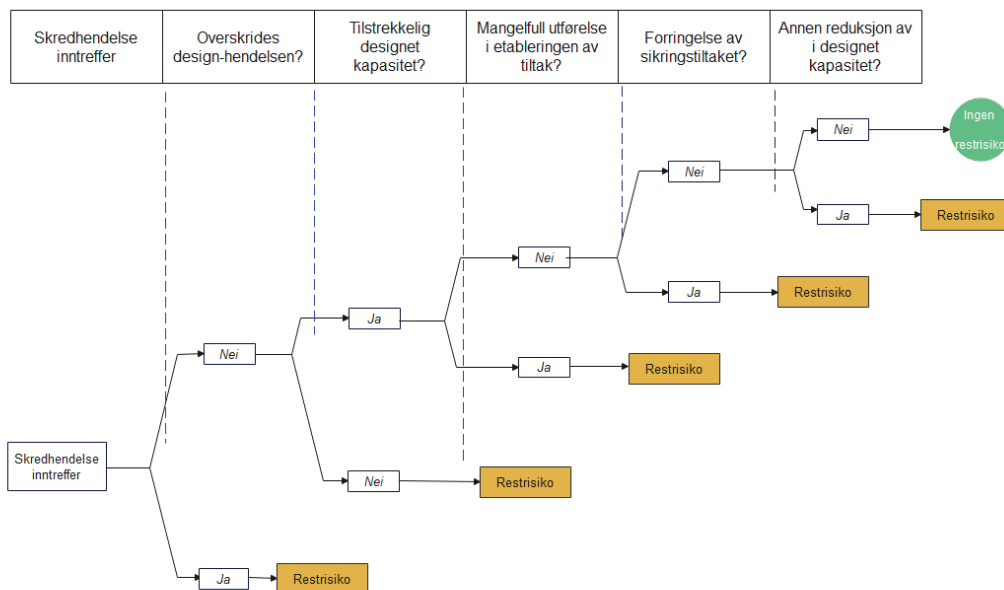
Tabell 5 Strategier for vurdering av restrisiko for ulike risikoscenarier

Hovedkilde til restrisiko	Strategier for vurdering av sannsynlighet for mangelfull ytelse i sikringstiltaket og restrisiko
Manglende lastsikkerhet	<p>Hendelsestre-analyser av kritiske hendelsesforløp, der sannsynlighet og konsekvens av hvert hendelsesforløp vurderes. Sannsynlighetsvurderingen kan også omfatte numerisk modellering, f.eks. modellering av massebevegelse forbi sikringstiltaket for en snøskredvoll.</p> <p>Forenklet vurdering 1: Ekspertvurdering der effekten av tiltaket formuleres som en prosentandel som risikoen reduseres med</p> <p>Forenklet vurdering 2: Effekt av sikringstiltaket:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 100% for hendelser \leq design hendelsen • 0% for hendelser $>$ design hendelsen
<p>Manglende funksjonsdyktighet</p> <p>Aldring/forringelse/manglende holdbarhet av sikringstiltaket</p>	<p>Identifisere kritiske hendelsesforløp og analysere og vurdere sannsynlighet og konsekvens av disse vha. hendelsestre-analyser (eller andre metoder for risikoanalyse)</p>

For en mest mulig fullstendig analyse foreslås et hendelsestre-basert rammeverk som beskriver og analyserer situasjonen etter sikring. Vurdering av farebildet etter sikring omfatter i teorien en samlet vurdering av alt som kan føre til manglende funksjonalitet av tiltaket. For en samlet vurdering av manglende funksjonalitet av sikringstiltaket, går man gjennom samtlige punkter i Tabell 4. Aktuelle steg og nøkkelspørsmål i en hendelsestre-analyse vil da være (Figur 3):

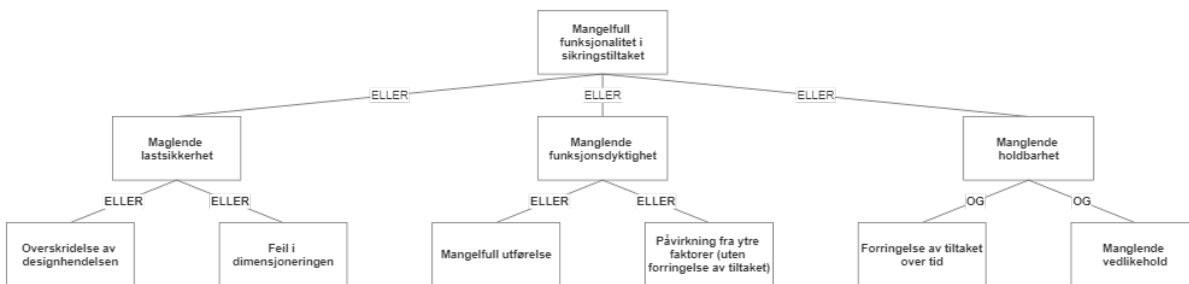
1. Skred inntreffer.
2. Overskrides designhendelsen?
3. Er det feil i dimensjonering av sikringstiltak (på ikke-konservativ side), dvs. er designet kapasitet i sikringstiltak mindre enn intensiteten i skredet?
4. Er implementasjon av sikringstiltak mangelfullt utført?
5. Har det skjedd en reduksjon i designet kapasitet av sikringstiltaket på en slik måte at det ikke har skjedd noen forringelse av sikringstiltaket? (f.eks. forekomst av tidligere skred)
6. Har det skjedd en reduksjon i designet kapasitet av sikringstiltaket, som omfatter forringelse av sikringstiltaket over tid?

Det benyttes ja/nei spørsmål, for at hendelsene som inngår i hendelsestreet skal dekke samtlige muligheter og være gjensidig utelukkende, hvilket er en forutsetning for å kunne benytte metodikken for kvantitative analyser. Spørsmålene er basert på de identifiserte kildene til restrisiko som beskrevet i kapittel 4.1.



Figur 3 Konseptuelt hendelsestre for vurdering av restrisiko

Hendelsestre-analyser egner seg spesielt godt når sannsynlighet og konsekvens skal vurderes samlet. Et hendelsestre som representerer samtlige risikoscenarier blir imidlertid ofte stort og uoversiktlig. Hendelsestre-analyser egner seg derfor best for å vurdere separate risikoscenarier, der de risikoscenariene som vurderes som de mest plausible vurderes i mer detalj. Om man kun ønsker å vurdere den samlede sannsynligheten for mangelfull funksjonalitet av sikringstiltaket vil det være mer hensiktsmessig å benytte feiltrær. Risikoscenariene kan fremstilles i et feiltré, der topphendelsen defineres som "Mangelfull funksjonalitet av sikringstiltaket" (Figur 4).



Figur 4 Feiltré for samtlige risikoscenarier som kan benyttes for å vurdere den samlede sannsynligheten for mangelfull funksjonalitet av sikringstiltaket

Hvis vi kjenner sannsynligheten av basishendelsene nederst i treet i Figur 4, kan sannsynligheten for topphendelsen (manglende funksjonalitet av sikringstiltaket) beregnes ved hjelp av regneregler for feiltrær. Om vi benytter symbolene som benyttet i Tabell 6, blir sannsynligheten for topphendelsen:

$$P_{ytelse} = P_{design} + P_{dim} + P_{utførelse} + P_{ytre} + P_{forningelse} \cdot P_{vedlikehold}$$

Tabell 6 Notasjon for basishendelsene i Figur 4

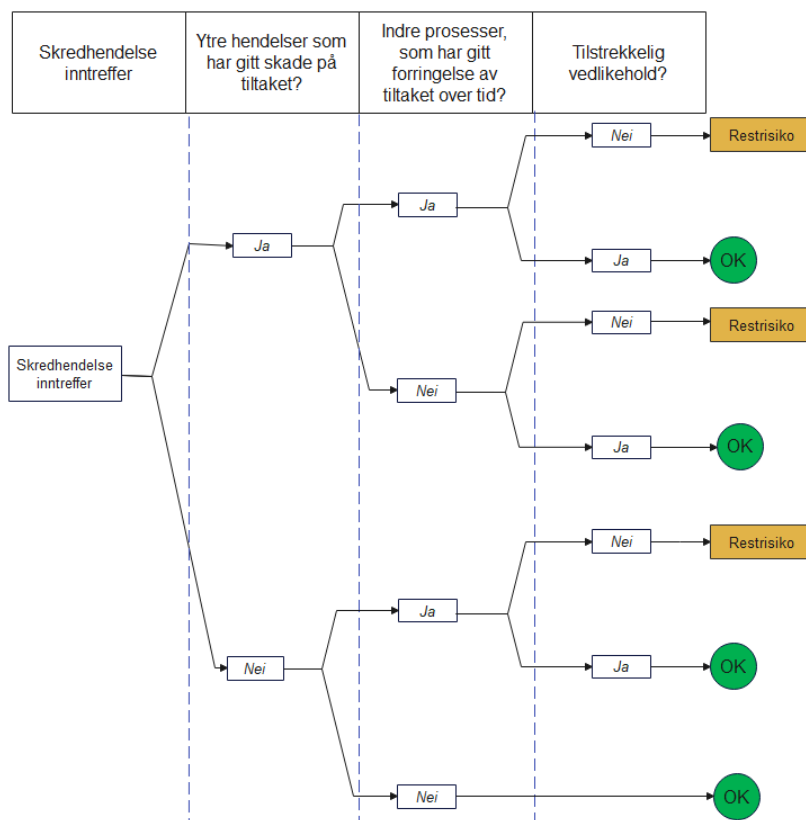
Hendelse	Sannsynlighet
Mangelfull funksjonalitet av sikringstiltaket	P_{ytelse}
Overskridelse av designhendelsen	P_{design}
Feil i dimensjoneringen	P_{dim}
Mangelfull utførelse	$P_{utførelse}$
Påvirkning fra ytre prosesser	P_{ytre}
Forningelse av tiltaket over tid	$P_{forningelse}$
Manglende vedlikehold	$P_{vedlikehold}$

Bortsett fra P_{design} vil det som regel være vanskelig å sette tall på disse sannsynlighetene direkte. De kan imidlertid finnes gjennom en mer detaljert analyse av hver av hovedkildene til restrisiko.

4.2.1 Eksempel 1: Vurdering av farebildet etter sikring vha. hendelsestrær

For vurdering av restrisiko forårsaket av "Manglende holdbarhet" (i tabellen over vist som en kombinasjon av 'Forningelse av tiltaket over tid' og 'Manglende vedlikehold' vil følgende steg og nøkkelspørsmål i analysen være aktuelle (Figur 5):

1. Inntreffer skredhendelsen? (Må her se på en spesifikk intensitet av skredet, som kan gi utfordringer innenfor det vurderte risikoscenariet)
2. Har tiltaket vært utsatt for ytre hendelser som har forårsaket skade: ja, nei
3. Har tiltaket vært utsatt for indre prosesser som har forårsaket forringelse over tid: ja, nei
4. Er det utført tilstrekkelig vedlikehold: Ja, nei.



Figur 5 Eksempel på hendelsestre for vurdering av massebevegelse forbi sikringstiltak grunnet forringelse av tiltaket

Samtlige av hendelseskjedene som involverer minst en av hendelsene "ytre hendelser som har gitt skade på tiltaket" eller "indre prosesser som har gitt forringelse av tiltaket over tid" kombinert med manglende vedlikehold, vil innebære en restrisiko.

4.2.2 Eksempel 2: Vurdering av sannsynlighet for massebevegelse forbi snøskredvoll vha. simulering

En snøskredvoll designes etter parametere representative for intensiteten i et snøskred, som hastighet og høyde av snøskredet. Vedlegg A viser hvordan disse kan tilegnes årlige sannsynligheter og dermed også hvilken gjentakperiode designhendelsen for snøskredvullen har. Modellen tar utgangspunkt i usikkerhet i inngangsparametere og benytter også observasjoner fra snøskredhendelser ved Ryggfonn. Resultatene fra modellen kan benyttes til å beregne sannsynligheten for massebevegelse til et gitt punkt bak vollen.

4.3 Konsekvenser av massebevegelse forbi sikringen

Hovedtyper av konsekvenser omfatter konsekvenser for:

- Liv og helse
- Materielle verdier og økonomi
- Miljø

Hvilke konsekvenstyper som er relevante vil avhenge av hvilken type objekter som er eksponert.

4.3.1 Eksponerte objekter

Hvilke objekter blir rammet om det skjer en massebevegelse forbi sikringen? Slike objekter omfatter infrastruktur, områder og objekter med skadepotensial, omtalt som sårbare områder og objekter. Hovedgrupper av og eksempler på sårbare objekter og områder er gitt i Tabell 7.

Tabell 7 Kategorisering av sårbare objekter og områder

Hovedgruppe av sårbart område/objekt	Eksempler
Personer	Innbyggere, pendlere, turister
Bygninger	Boliger, hytter, kontorlokaler, forretningsbygg, kulturlokaler og idrettshall.
Infrastruktur	Sykehus, skoler, barnehager, vann- og strømforsyning, nødetater, transportinfrastruktur (spesielt veier med få omkjøringsmuligheter eller mye trafikk), kommunikasjonsinfrastruktur
Objekter av stor økonomisk betydning eller hvor det er potensiale for stort skade omfang	Offentlige institusjoner, industriområder, kraftverk, arealer med høy verdikonsentrasjon, områder med fare for biologiske eller kjemiske farer/forurensning, samferdsel Elver/bekker som kan demmes opp / endre løp og skape utfordringer nedstrøms
Livsgrunnlag for mennesker	Vann (grunn- og drikkevann), luft, jord, skog, dyrket mark og husdyr
Kulturarv	Kulturminner og kulturobjekter av høy lokal betydning
Natur og miljø	Naturreservat, viktige naturområder dyreliv

Konsekvensene kan videre kategoriseres som direkte og indirekte og prissatte og ikke-prissatte (Tabell 8). Hvilke størrelser/parametere som benyttes for å beskrive konsekvensene vil videre avhenge av objekttypen (Tabell 9)

Tabell 8 Kategorisering av konsekvenser, utvidet fra Pfurtscheller og Kleewein, 2011:

	Prissatte	Ikke-prissatte
Direkte	Materielle skader på bygninger, kjøretøy, utstyr og infrastruktur. Kostnader forbundet med opprydning, rehabilitering og reparasjon	Dødsfall og personskader (NB: dette kan også kategoriseres som prissatt) Økologiske skader Skade på kulturminner
Indirekte	Tap av essensiell infrastruktur, f.eks. tap av mobilitet (trafikkavbrudd), vannforsyning, strømforsyning, etc. Økonomiske konsekvenser av manglende tilgang til infrastruktur, f.eks. knyttet til produksjonsavbrudd, omkjøring.	Depresjoner og psykiske problemer Økt sårbarhet; tap av tilgang til nødvendige tjenester (f.eks. ang. samfunnsikkerhet)

Tabell 9 Størrelser/parametere for å beskrive direkte og indirekte konsekvenser for ulike objekttyper, modifisert fra Bründl (2009)

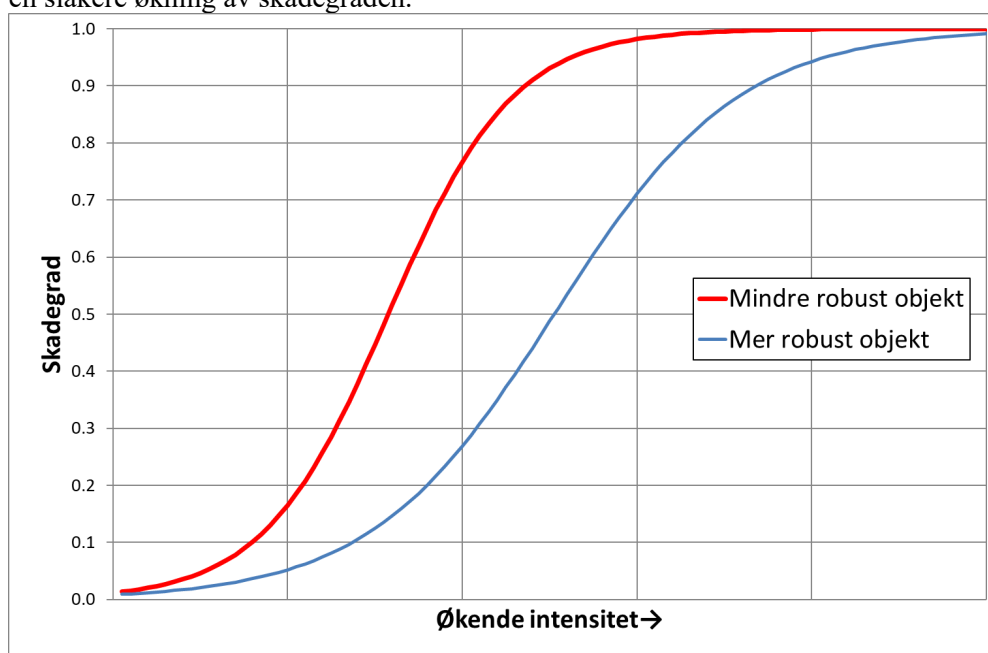
Objekttype	Direkte konsekvenser	Indirekte konsekvenser
Personer	Dødsfall og personskader	Psykiske problemer
Bygninger	Kostnader av materielle skader	Kostnader forbundet med evakuering
Infrastruktur	Kostnader av materielle skader	Tap av inntekter eller kostnader forbundet med manglende tilgang til infrastruktur
Objekter av stor økonomisk betydning eller hvor det er potensiale for stort skade omfang	Kostnader av materielle skader	Tap av inntekter
Livsgrunnlag for mennesker	Kostnader av materielle skader	Tap av inntekter
Kulturarv	Kostnader av materielle skader	Skade på kulturminner
Natur og miljø	Kostnader av materielle skader	Skade på natur og miljø

4.3.2 Skadegrad av eksponerte objekter

Ulike eksponerte objekter vil ha ulike tålegrenser for om eller i hvilken grad de blir skadet av en naturhendelse. Skadegraden varierer med naturfaretype/prosess og kan kvantifiseres som et tall mellom 0 (uskadet) og 1 (totalskadet). For å kunne kvantifisere risikoen må man ideelt sett for hvert objekt og hver naturfaretype ha tilgang på informasjon om potensiell skadegrad. Denne kan formuleres med ulike detaljeringsgrad, f.eks.:

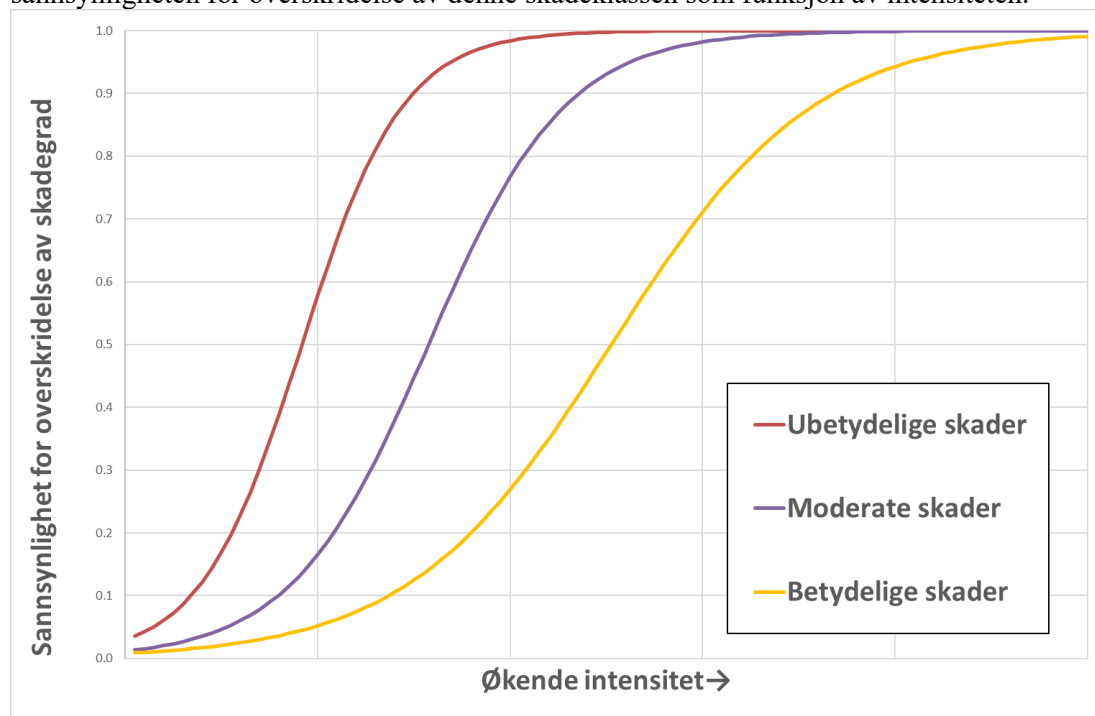
- Skadefunksjon som angir skadegrad for et objekt (f.eks. en bygning) som funksjon av intensitet for en gitt type naturfare
- Terskelverdi på intensitet for når skade inntreffer
- Gjennomsnittlige verdier for skadegrad for objekter utsatt for den aktuelle naturfaren.

Figur 6 viser skadegrad som en funksjon av intensiteten av fareprosessen. Formen på kurven vil avhenge av hvor robust objektet er. For mindre robuste objekter (rød kurve) øker skadegraden raskt med økende intensitet, mens for mere robuste objekter (blå kurve) ser vi en slakere økning av skadegraden.



Figur 6 Generalisert skadefunksjon som angir en skadegrad (0-1) for hver intensitetsverdi.

Skadefunksjonen kan også defineres probabilistisk for å inkludere usikkerhetene i skadegradsvurderingen (Figur 7). Her definerer man først ulike skadeklasser som angir alvorlighet av skaden. Hver skadeklasse er representert ved en kurve, som viser sannsynligheten for overskridelse av denne skadeklassen som funksjon av intensiteten.



Figur 7 Probabilistisk skadefunksjon ("fragility function") som angir sannsynligheter for overskridelse av ulike skadeklasser (her beskrevet som "Ubetydelige skader", "Moderate skader" og "Betydelige skader")

For vurdering av tap av menneskeliv benyttes ikke begrepet skadegrad, men heller letalitet. Letaliteten tallfester sannsynligheten for å omkomme – eller andelen av eksponerte personer som omkommer som følge av naturhendelsen. Letaliteten avhenger av hvor personene befinner seg (f.eks. utendørs, i bygning, i kjøretøy osv.). For personer i bygninger og kjøretøy vil letaliteten øke med økende skadegrad av bygningen eller kjøretøyet.

4.3.3 Konsekvensvurdering ved hjelp av konsekvensklasser

I hendelsestreakse analyser vil det ofte være hensiktsmessig å uttrykke konsekvensene ved hjelp av konsekvensklasser. Tabell 10 viser eksempel på slik inndeling i 5 alvorlighetsklasser for ulike konsekvenstyper fra NS 5815: 2006. Tabell 11 viser en enklere inndeling i 3 alvorlighetsklasser for konsekvens. Konsekvensklassene må tilpasses typen objekter man ønsker å vurdere og størrelsen på analyseområdet. Det må også vurderes hvor mange alvorlighetsklasser det er behov for.

Tabell 10 Inndeling i alvorlighetsklasser for konsekvens (NS 5815: 2006)

Alvorlighets-klasse	Verbal beskrivelse	Konsekvenstype		
		Liv og helse	Miljø	Økonomi
1	Ufarlig	Skader uten fravær	Små miljøskader	<50 000 kr
2	Farlig	Fravær < 10 dager	Miljøskader. Rest. Tid < 1 år	50-250 000 kr
3	Kritisk	Fravær > 10 dager	Betydelig. Rest tid 1-3 år	250 000 - 1 mill kr
4	Meget kritisk	Alvorlige skader	Alvorlig. Rest tid 3-10 år	1-5 mill kr
5	Katastrofal	Dødsfall	Rest tid > 10 år	> 5 mill kr

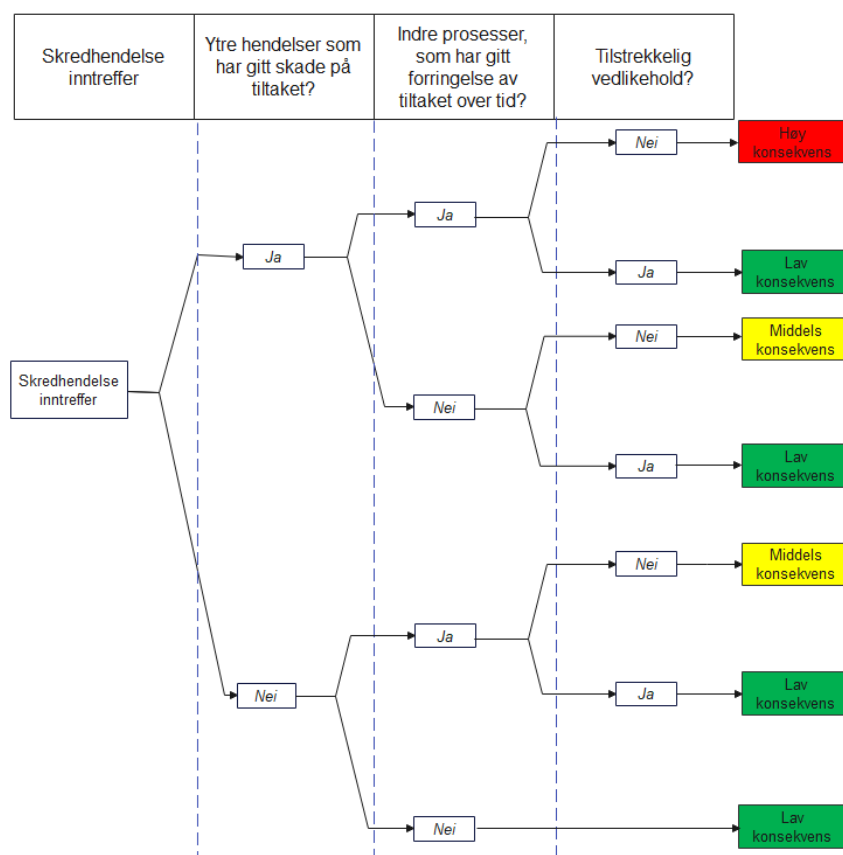
4.4 Eksempel: vurdering av restrisiko ved hjelp av hendelsestrær

Konsekvensene av massebevegelse forbi sikringstiltaket vil avhenge av intensiteten i massebevegelsen. Intensiteten kan variere mellom de ulike hendelseskjedene i et enkelt hendelsestre og mellom de ulike årsakene/kildene til restrisiko. I eksemplet nedenfor er vurderingen fra Figur 5 utvidet med konsekvensklasser for de ulike hendelseskjedene. Det er benyttet konsekvensklassene som er vist i Tabell 11.

Tabell 11 Konsekvensklasser benyttet i hendelsestreanalysen.

Alvorlighetsklasse for konsekvens	Beskrivelse av og fargekode for konsekvens
Lav	Ubetydelige skadevirkninger
Middels	Normalt ikke skade på bebyggelse, men kan skade/skremme personer som befinner seg utendørs
Høy	Skade på bebyggelse. Personskade

Mest alvorlig konsekvens oppstår hvis tiltaket både er skadet av en ytre hendelse og at det har vært indre prosesser som har gitt en forringelse av tiltaket over tid, samtidig som vedlikeholdet er mangelfullt (øverste gren). Nest mest alvorlige konsekvens vil være hvis tiltaket er forringet av enten en indre eller en ytre prosess kombinert med manglende vedlikehold. Laveste konsekvens vil være for hendelseskjeder der tiltaket ikke er forringet eller der tiltaket er godt vedlikeholdt.



Figur 8 Eksempel på hendelsestre for vurdering av restrisiko grunnet forringelse av tiltaket.

Hendelsestreanalysen kan videre raffineres ved f.eks. å gradere skaden forårsaket av ytre hendelser eller forringelsen over tid. Hendelsestreet i Figur 8 gjør en kvalitativ vurdering av restrisikoen. Analysen kan også gjøres kvantitativ ved å sette sannsynligheter for enkelthendelser i hendelsestreet. Sannsynligheten for hver hendelseskjede fås da ved å multiplisere sannsynlighetene langs grenen. Sannsynligheten for en alvorlighetsklasse av konsekvens fås ved å summere sannsynlighetene for hendelseskjeder gitt ved denne. Eksempler på slike kvantitative vurderinger er vist i Figur 10 og Figur 11.

4.5 Eksempel på forenklede metoder for restrisikovurdering

Som indikert i Tabell 5 kan også restrisiko vurderes på en forenklet måte. En av disse er å angi, ved hjelp av ekspertvurdering en prosentandel for hvor mye tiltaket reduserer risikoen. Tabell 12 viser eksempler på resultater fra vurderinger ved hjelp av BaneNORs nytte-kostnadsmetodikk for vurdering av sikring mot skred, der en slik måte å vurdere restrisiko på er benyttet. Risikoreduksjonen oppgis i prosent, som en inngangsparameter i nytte-kostnadsanalysene (se gul markering). I denne metodikken beregnes konsekvensene av skred på banen i form av rene kostnader for opprydning, materielle skader, personskader og forsinkelser. Restrisikoen får derfor benevnningen kNOK per år. Restrisikoen er en viktig parameter i nytte-kostnadsvurderingen av tiltak.

Tabell 12 Eksempler på resultater, hentet fra skredfarevurdering og vurdering av sikring langs jernbanelinje:

<p>Skredfarevurdering: Skredtype: Jordskred Skredvolum (m³): 1000 Årlig sannsynlighet: 1/30 Skredfarevurdering: Bratt skråning med flere tidligere utglidninger. Det vil kunne komme nye skred ved neste store nedbørsepisode. Det bør derfor fås kontroll på overvannet.</p>
<p>Foreslått sikringstiltak: Tiltaksbeskrivelse: Lede overvann kontrollert ned den bratte skråningen. Tiltak 1: Terrenggrøft, 125 m Tiltak 2: Nett, 1500m² Risikoreduksjon: 90%</p>
<p>Samlet konsekvens: 38820 kNOK</p>
<p>Beregning av risiko: Før tiltak: 1294 kNOK/år Risikoreduksjon: 1165 kNOK/år Etter tiltak: 129 kNOK/år</p>
<p>Bilder/kart:</p> <p>Utlesningsområde Tiltakslinje Skredutsatt strekning Tiltak</p> <p>Tiltaksområdet er skissert i gult</p>

5 Eksempel: Vurdering av restrisiko bak snøskredvoll

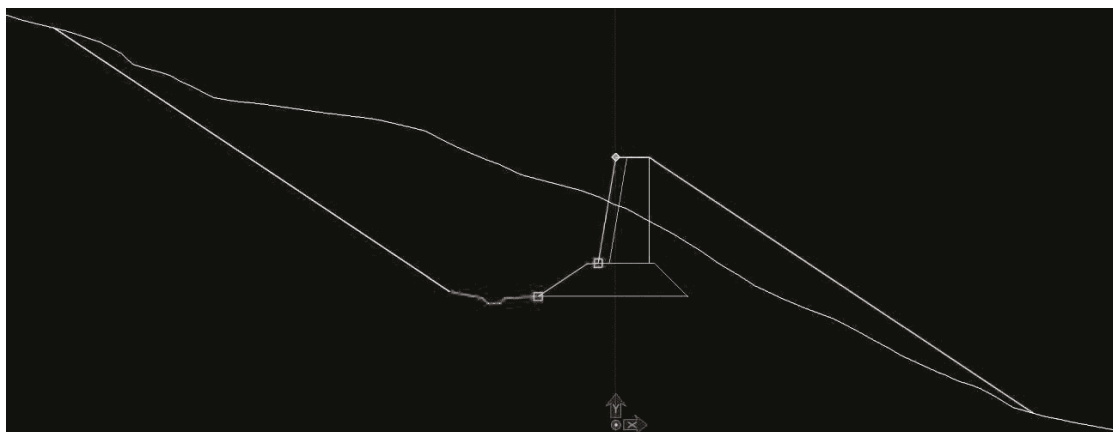
5.1 Bakgrunn

I dette kapitlet vises vurdering av restrisiko for en prosjektert snøskredvoll. Lokaliteten for vollen er her anonymisert.

Farekartlegginger som NGI har gjort viser at deler av et reguleringsområde ligger innenfor faresonen for årlig sannsynlighet 1/1000. På bakgrunn av dette ble det utarbeidet forslag til sikring av reguleringsområdet for å frigjøre mest mulig av det skredutsatte området. NGI har utført en forprosjektering av snøskredvoll for å redusere omfanget av faresoner. Det er tatt utgangspunkt i dette arbeidet for å gi eksempler på vurdering av restrisiko ved hjelp av hendelsestrær.

5.2 Input og usikkerheter

Viktigste input for å beregne vollhøyden er hastigheten til skredet og hvor store volum som skal fanges opp. Hastigheten på skredmassene er estimert til å ligge rundt 10-15 m/s. Vollene ble vurdert til å måtte være 10-14 m høye for å stanse skredmassene og er tenkt bygget opp av stedlige masser med en bratt støtside av steinkister eller gabioner (Figur 9).



Figur 9 Typisk tverrprofil av voll med en bratt støtside.

Etablering av voller vil alltid være forbundet med en restrisiko for områdene nedstrøms vollen:

- Beregningsgrunnlaget for å vurdere nødvendig høyde på vollen for å stanse de faste skredmassene inneholder usikkerhet som betyr at man må ta hensyn til at mindre deler av skredmassene kan gå over vollen. Dette gjelder særlig store skred som kan føre til at vollen ikke klarer å fange hele volumet. Det vil også være en fare for at det går flere skred samme vinter, noe som vil redusere oppfangingsvolumet.
- Snøskya som følger de faste skredmassene i tørre snøskred og som kan bli flere titalls meter høy, kan gå over vollen. Trykkvirkningen fra snøskya nedstrøms vollen vil være avhengig av hvor stor hastighet skredet har når det treffer vollen. Snøskya vil miste fart etter at den har passert vollen når den ikke lenger får tilførsel av ny snø fra de faste skredmassene som stanses av vollen.
- Snøskya vil kunne være skadelig for personer som oppholder seg utendørs.

Vurdering av faresoner etter sikring er basert på faglige vurderinger av:

- utløsningsareal,
- tykkelse på snødekket som glir ut (bruddhøyde)

- beregningene av skredutløp
- vurdering av medrivning (entrainment)
- effekt av klimaendringer som f.eks. ...
- ekstrapolasjon av meteorologiske data
- bremseeffekt fra skog
- størrelse og effekt av snøsky og skredvind

Vurderingene omfatter også vurdering av usikkerhetene forbundet med samtlige av punktene ovenfor.

5.3 Identifisering av risikoscenarier

For identifisering av risikoscenarier tas det utgangspunkt i de overordnede scenariene i Tabell 4. Basert på de identifiserte usikkerhetene i kapittel 5.2, vil også "størrelse og effekt av snøsky og skredvind" inngå som en egen feilmodus. Oppsummert vil risikoscenariene omfatte:

- Manglende lastsikkerhet:
 - Snøsky over vollen som kan nå reguleringsområdet
 - For liten designet kapasitet i sikringstiltaket ift. skredet det er dimensjonert for
- Manglende funksjonsdyktighet:
 - Tidligere snøskred samme vinter som reduserer kapasiteten i sikringstiltaket
 - Feil i den praktiske implementeringen av tiltaket som gir redusert kapasitet
- Aldring/forringelse/manglende holdbarhet av sikringstiltaket: Ikke så relevant her siden tiltaket er nytt.

Hver av disse risikoscenariene analyseres separat. Det vil i de neste kapitlene bli gitt eksempler for følgende risikoscenarier:

1. Snøsky over vollen som kan nå reguleringsområdet. Forutsetninger for dannelse av snøsky som kan forårsake skade:
 - a. Kuldeperiode i hele fjellsiden og snø på bakken ned til sikringen (dette vil allerede være inkludert i antagelsen om 1000-års skredet)
 - b. Snøskredet treffer vollen med tilstrekkelig stor hastighet (1000-års skredet kan ha ulike hastigheter. Mest sannsynlig ligger hastigheten mellom 10 m/s og 15m/s)
 - c. For liten avstand mellom voll og reguleringsområde. (Snøskenen bremses raskt når de faste skredmassene stopper, men avstanden dette skjer over kan være gjenstand for diskusjon)
2. For liten designet kapasitet i vollen ift. 1000-års skredet. Forutsetninger for massebevegelse forbi sikringen:
 - a. Intet eller lite fribord
 - b. Underestimert av viktig parameter som bruddhøyde og utløsningsareal. Disse kan ha stor innvirkning på skredvolum og hastighet.
 - c. Usikkerheter i selve beregningsmodellen, inkludert effekt av medrivning. Modellen gir stort sett konservative resultater for små skred (som vurdert her), men kan underestimere hastighetene ved større skred (som f.eks. på Ryggfonn).

Oversikt over analysene og steg i analysene er angitt i Tabell 13.

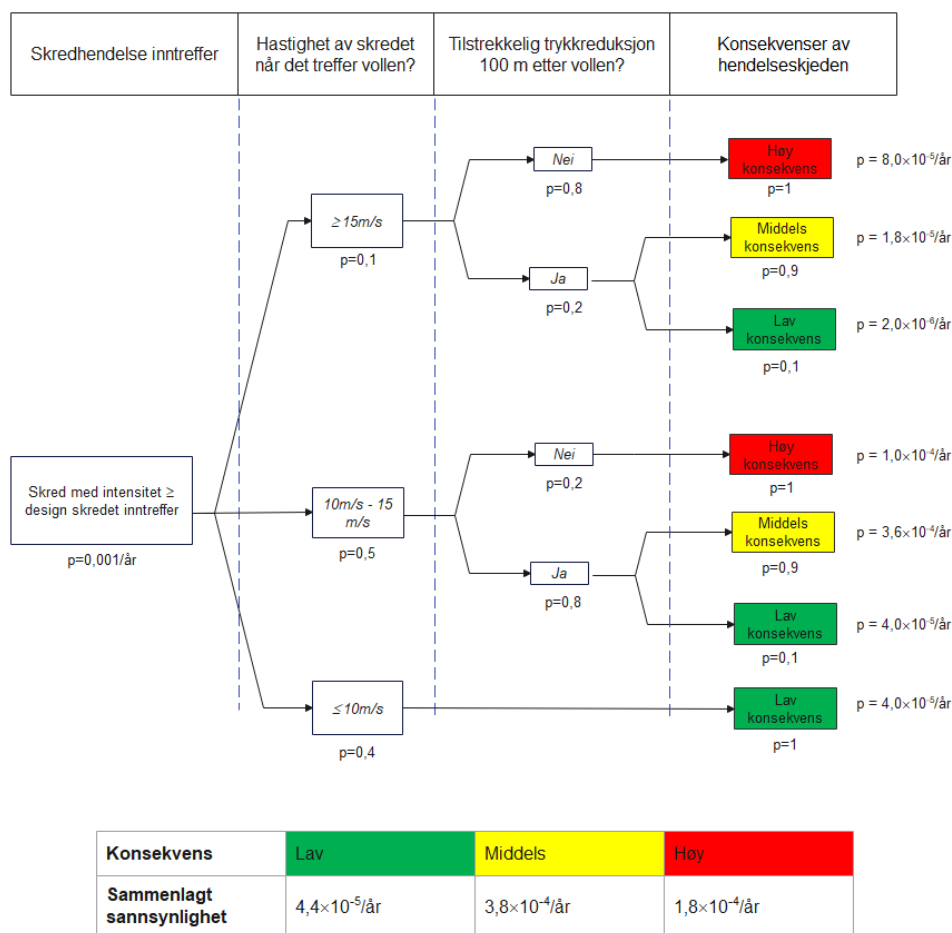
Tabell 13 Oversikt over analysene

Analyse nr.	Bidrag til restrisiko	Steg som vurderes i analysen
1	Snøsky over sikringstiltaket som kan føre til skader.	<p>Skred inntreffer</p> <p>Hva er hastigheten når snøskredet treffer vollen?</p> <p>Avstanden mellom voll og bebyggelse? Her benyttet vi 100 m som gitt avstand, men kunne gjort vurderinger for ulike avstander.</p> <p>Hva er trykkvirkningen i snøskya når den når reguleringsområdet?</p> <p>Kan snøskya skade bebyggelsen?</p> <p>Kan snøskya skade personer på uteområdene?</p>
2	For liten designet kapasitet i sikringstiltaket ift. skredet det er dimensjonert for.	<p>Skred inntreffer</p> <p>Hva er fribordet i skredvollen?</p> <p>Er viktige inngangsparametere som utløsningsareal og bruddhøyde underestimert?</p> <p>Kan beregningsmodellen gi resultater på ikke-konservativ side?</p> <p>Hva er konsekvens av den mangelfulle funksjonaliteten i sikringstiltaket.</p>

For analyse av disse risikoscenariene vurderes også konsekvenser av massebevegelse forbi sikringen, i henhold til konsekvensklassene definert i Tabell 11.

5.4 Restrisiko forårsaket av snøsky

Resultatene av hendelsestreanalyser for restrisiko forårsaket av snøsky er vist i Figur 10. Her ser vi kun på tilfellet med manglende lastsikkerhet uten å kombinere med andre mulige kilder til restrisiko. Da kan vi videre anta at skred med lavere sannsynlighet (og lavere intensitet) enn 1000-års skredet stanses av vollen. Vi benytter derfor kun en gren for skredintensitet og ser på tilfellet at et skred med intensitet større eller lik 1000-års skredet inntreffer.



Figur 10 Hendelsestre-analyse for konsekvens og sannsynlighet for snøsky over vollen

Gjennomgang av stegene i hendelsestre-analysen med sannsynligheter og begrunnelser for disse er gitt i Tabell 14 nedenfor. Nederst i Figur 10 er sannsynligheten for de ulike konsekvenstypene oppsummert for dette scenariet. Med tallene brukt i denne analysen blir altså sannsynligheten $1,8 \cdot 10^{-4}/\text{år}$ for skred som gir skade på bebyggelse og $3,8 \cdot 10^{-4}/\text{år}$ for skred som kan gi skade på personer utendørs.

Tabell 14 Forklaringstabell til hendelsestre-analyse av snøsky over vollen

Hendelse	Sannsynlighet av hendelse med begrunnelse for valg av sannsynlighet
Et skred med intensitet likt eller større enn designskredet inntreffer.	<p>$P(\text{skred} \geq \text{designskredet}) = 1/1000 \text{ år}$</p> <p>Per definisjon er gjentakperioden for designskredet 1000 år og følgelig blir sannsynligheten $1/1000 \text{ år}$</p> <p>De fleste skred går i mildvær, mens tørre snøskred er sjeldnere. I det analyserte scenariet antas det at det har vært en kuldeperiode og det er snø på bakken helt ned til sikringstiltaket, dvs. at de klimatiske forholdene ligger til rette for dannelse av snøsky.</p>

Hendelse	Sannsynlighet av hendelse med begrunnelse for valg av sannsynlighet
<p>Skredet (som beskrevet over) treffer vollen med en hastighet som er:</p> <p>Mindre enn 10m/s</p> <p>10-15 m/s</p> <p>Større enn 15 m/s</p>	<p>$P(\text{Større enn } 15 \text{ m/s}) = 0.1$</p> <p>$P(\text{Mellom } 10\text{m/s og } 15 \text{ m/s}) = 0.5$</p> <p>$P(\text{Mindre enn } 10\text{m/s}) = 0.4$</p> <p>Det er som regel lite snø, som fører til mye friksjon i snøskredet og lave hastigheter. Det er størst sannsynlighet for hastigheter lavere enn 15m/s, men usikkert om hastigheten er høyere eller lavere enn 10m/s.</p>
Tilstrekkelig trykkreduksjon (til under 3kPa) 100 m etter vollen?	<p>Her vil sannsynligheten avhenge av hastigheten som skredet treffer vollen med. Trykkvirkningen av snøskya vil avta raskt når de faste snømassene stoppes.</p> <p>For hastigheter større enn 15 m/s:</p> <p>$P(\text{tilstrekkelig trykkreduksjon } 100 \text{ m etter vollen}) = 0.2$</p> <p>$P(\text{ikke tilstrekkelig trykkreduksjon } 100 \text{ m etter vollen}) = 0.8$</p> <p>For hastigheter 10 – 15 m/s:</p> <p>$P(\text{tilstrekkelig trykkreduksjon } 100 \text{ m etter vollen}) = 0,8$</p> <p>$P(\text{ikke tilstrekkelig trykkreduksjon } 100 \text{ m etter vollen}) = 0,2$</p> <p>For hastigheter mindre enn 10 m/s: Ingen eller ubetydelig snøsky og dermed lav konsekvens.</p>
Konsekvenser av snøsky over vollen?	<p>Konsekvenser avhenger av kombinasjonen av hastighet og avstand. Forenklete konsekvensberegninger:</p> <p>Det er antatt materielle skader (med sannsynlighet 1) hvis det ikke er tilstrekkelig trykkreduksjon etter vollen.</p> <p>Hvis det er tilstrekkelig trykkreduksjon, kan konsekvensene bli middels eller lave:</p> <p>$P(\text{Middels konsekvens} \mid \text{tilstrekkelig trykkreduksjon})=0,9$</p> <p>$P(\text{Lav konsekvens} \mid \text{tilstrekkelig trykkreduksjon})=0,1$</p>
Sannsynlighetsberegning for de ulike alvorlighetsklassene av konsekvens.	<p>Sannsynlighet for en hendelseskjede beregnes som produktet av sannsynlighetene langs grenen som representerer hendelseskjeden. Sannsynligheter for en konsekvensklasse er summen av sannsynlighetene for de hendelseskjedene som leder til den konsekvensklassen.</p> <p>$P(\text{skade på bebyggelse}) = 1,8 \cdot 10^{-4}/\text{år}$</p> <p>$P(\text{skade på personer utendørs}) = 3,8 \cdot 10^{-4}/\text{år}$</p>

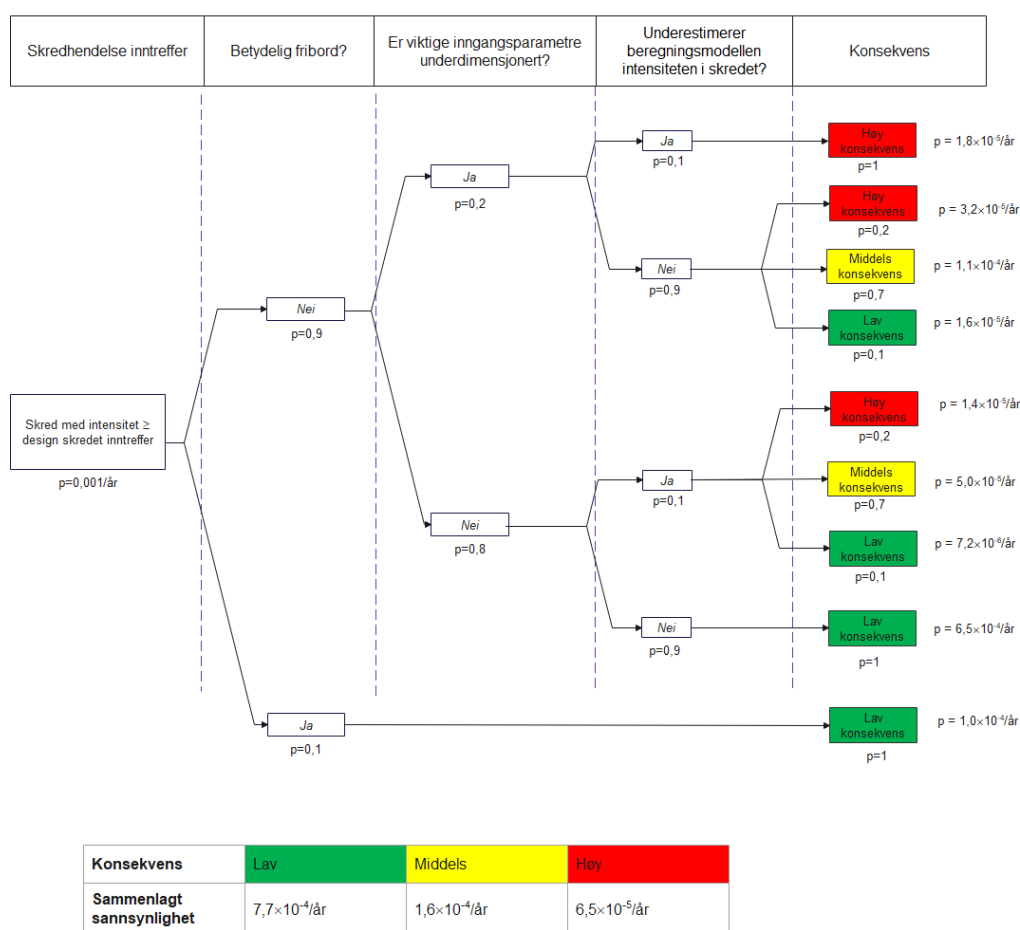
I hendelsestre-analysen i Figur 10 ble vurderingen delt opp i steg som betrakter enkelt-hendelser, der sannsynlighetene for disse ble satt på bakgrunn av erfaring og ekspert-vurderinger. I dette tilfellet finnes det imidlertid også empiriske/numeriske modeller som kan svare på spørsmål direkte om sannsynlighet for massebevegelser til et gitt punkt nedenfor

sikringen. Eksempel på slike empiriske/numeriske vurderinger er kort beskrevet i kapittel 4.2.2 og i Vedlegg A.

En mulig utvidelse av hendelsestre-analysene ville være å vurdere nærmere faktorer som påvirker utløsning av og utløpslengder for snøskred. Skredsannsynligheten er et produkt av utløsningssannsynlighet og utløpsannsynlighet og ulike kombinasjoner som gir sannsynlighet 1/1000år kan vurderes.

5.5 Restrisiko forårsaket av for liten designet kapasitet i sikringstiltaket

Resultatene av hendelsestre-analysene for restrisiko forårsaket av for liten designet kapasitet i sikringstiltaket er vist i Figur 11. På samme måte som i kapittel 5.4 ser vi på dette risiko-scenariet isolert og ikke kombinert med andre kilder til restrisiko. Da kan vi videre anta at skred med lavere sannsynlighet (og lavere intensitet) enn 1000-års skredet stanses av vollen. Vi benytter derfor kun en gren for skredintensitet og ser på tilfellet at et skred med intensitet større eller lik 1000-års skredet inntreffer.



Figur 11 Vurdering av sannsynlighet for underkapasitet i skredvullen med tilhørende skadevirkninger

Gjennomgang av stegene i analysen med sannsynligheter og begrunnelser for disse er gitt i Tabell 15. Nederst i Figur 11 er sannsynligheten for de ulike konsekvenstypene oppsummert for dette scenariet. Med tallene brukt i denne analysen blir altså sannsynligheten $6,5 \cdot 10^{-5}$ /år for skred som gir skade på bebyggelse og $1,6 \cdot 10^{-4}$ /år for skred som kan gi skade på personer utendørs.

Tabell 15 Forklaringstabell til hendelsestre-analyse av for liten designet kapasitet i sikringstiltaket

Hendelse	Sannsynlighet av hendelse med begrunnelse for valg av sannsynlighet
Et skred med gjentakperiode 1000 år inntreffer.	<p>$P(\text{Skred} \geq \text{designskredet}) = 1/1000\text{år}$</p> <p>Per definisjon er gjentakperiode for designskredet 1000 år og den årlige sannsynligheten blir følgelig 1/1000. Men 1000-års skredet kan komme i mange varianter og forløpet behøver ikke å være likt som for snøsky-analysen.</p>
Intet eller lite fribord?	<p>$P(\text{ubetydelig fribord}) = 0.9$</p> <p>Økonomiske hensyn gjør at det ikke inkluderes fribord av betydning.</p>
Er viktige parametere underdimensjonert?	<p>$P(\text{betydelig underdimensjonering av viktige parametere}) = 0.2$</p> <p>Viktige parametere som er forbundet med store usikkerheter og som derfor kan tenkes å være underdimensjonert omfatter utløsningsarealet og bruddhøyden. Klimaendringer kan føre til endringer i disse parameterne.</p> <p>Vurdering av utløsningsarealet for et 1000-års scenario vil være subjektivt. Antatt størrelse av utløsningsarealet vil variere med om man tolker dette som det størst tenkelige utløsningsareal eller om man vurderer utløsningsareal som er praktisk mulig.</p> <p>Det er mindre usikkerhet rundt bruddhøyden.</p>
Underestimerer beregningsmodellen intensiteten i skredet?	<p>$P(\text{underestimering av intensitet i beregningsmodellen}) = 0.1$</p> <p>Beregningsmodellen gir stort sett konservative resultater for små skred (som vurdert her), men kan underestimere hastighetene ved større skred. Medrivning kan føre til at totalt volum kan være flere ganger så stort som utløsningsvolumet. Men på grunn av begrensede snømengder i utløpsområdet, er det usannsynlig med kraftig underestimering av medrivning.</p>
Konsekvenser av massebevegelse forbi vollen?	<p>Forenklede konsekvensberegninger:</p> <p>Øvre gren: Underestimering både av viktige inngangsparametere og i beregningsmodellen gir høyeste konsekvensklasse.</p> <p>Midtre grener: Underestimering enten i inngangsparametere eller i beregningsmodellen gir lav, middels eller høy konsekvensklasse, med følgende sannsynligheter:</p> <p>$P(\text{høy konsekvens})=0.2$</p> <p>$P(\text{middels konsekvens}) =0.7$</p> <p>$P(\text{lav konsekvens})=0.1$</p> <p>Sannsynlighetene vil naturligvis avhenge av grad av underdimensjonering. Det er her satt størst sannsynlighet for</p>

Hendelse	Sannsynlighet av hendelse med begrunnelse for valg av sannsynlighet
	<p>middels konsekvens, da det må være betydelig underkapasitet i sikringstiltaket for at det kan skade bebyggelse 100 m etter vollen.</p> <p>Nedre grener: Hvis det hverken er underestimert av inngangsparametere eller i modellen eller at det er et betydelig fribord i vollen gir dette laveste konsekvensklasse.</p>
<p>Sannsynlighetsberegning for de ulike alvorlighetsklassene av konsekvens.</p>	<p>$P(\text{skade på bebyggelse}) = 6,5 \cdot 10^{-5}/\text{år}$</p> <p>$P(\text{skade på personer utendørs}) = 1,6 \cdot 10^{-4}/\text{år}$</p>

6 Konklusjon og diskusjon

Rammeverket for vurdering av restrisiko presentert i denne rapporten identifiserer ulike kilder til restrisiko og gir anbefalinger om hvordan disse kan vurderes. Vurderingen må både tilpasses formålet med restrisikovurderingene og hovedkildene til restrisiko i hver enkelt vurdering. Hovedkilder til restrisiko er manglende lastsikkerhet, manglende funksjonsdyktighet og manglende holdbarhet. Restrisiko kan vurderes ved hjelp av ulike strategier som eksempelvis forenklete metoder, avansert simulering og hendelsestre-analyser. Bruk av hendelsestre-analyser er en måte å integrere resultater fra ulike typer vurderinger på, for eksempel fra simuleringer og fra ekspertvurderinger. Hendelsestre-analyser kan også benyttes til sammenstilling av restrisikovurderinger for ulike kilder til restrisiko.

Videre arbeid omfatter å eksemplifisere bruk av rammeverket for flere typer tiltak. For tradisjonelle tiltak bør eksempelstudiet defineres slik at det kan benyttes resultater fra både simuleringer og modellforsøk. En annen, svært aktuell anvendelse er å benytte og tilpasse rammeverket til naturbaserte løsninger, nærmere bestemt å kvantifisere restrisiko forbundet med naturbaserte løsninger for risikoreduksjon av naturfarer. Dette vil innebære etablering av flere eksempler som knytter sammen sannsynlighetsvurderinger fra ulike typer vurderinger; f.eks. kombinasjon av resultater fra simuleringer, statistikk, erfaringer og ekspertvurderinger. Erfaringene fra eksemplene kan benyttes til å lage veiledning for bruk av rammeverket mot spesifikke typer naturbaserte løsninger og spesifikke typer massebevegelser.

Litteratur

Agliardi, F. Crosta, G. B. og Frattini P. (2009): Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 1059–1073, 2009 www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/1059/2009/

Bründl, M. (Ed.) 2009: Risikokonzept für Naturgefahren - Leitfaden. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 420 S.

Corominas, J., Copons, R., Moya, J., Vilaplana, J. M., Altimir, J., Amigo, J. (2005): Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area, Landslides (2005) 2: 343–357 DOI: 10.1007/s10346-005-0022-z

Eidsvig, U. (2019): Håndtering av skredrisiko. Klima2050 rapport nr. 19, tilgjengelig på klima2050.no.

Margreth, S.; Burkard, A. & Buri, H. (2008): Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung TEIL B: LAWINEN Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, 2008

Margreth, S and Romang, H. (2008): Consideration of the effect of protection measures in hazard maps: The Swiss approach, Interpraevent 2008, Conference proceedings, Vol 2.

Mikos, M., Fazarinc, R., Majes, R. (2007): Delineation of risk area in Log pod Mangartom due to debris flows from the Stože landslide, Acta geographica Slovenica, 47-2, 171–198

NDLA (2022) Kurs i forretningsdrift (SR-SSR vg1), tilgjengelig på: <https://ndla.no/subject:1:792414c5-896f-470a-9558-6101d7266237/topic:1:90c93860-97a4-461d-8291-14bd39f2c7c3/topic:1:152fe69e-45cc-46be-aad3-3201155b194d/resource:1:89279>

NGI (2003): New concepts in avalanche hazard mapping, NGI rapport 20001018-2, 16. Juni 2003

NIFS (2014) Sikringstiltak mot skred og flom. Befaring i Troms og Finnmark høst 2012. NIFS rapport nr. 4/2014, Naturfareprosjektet: Delprosjekt 7 Skred og flomsikring, ISBN: 978-82-410-0953-2, 2014.01.07.

NVE (2011): Flaum- og skredfare i arealplanar, Retningslinjer nr. 2/2011, Revidert 22. mai 2014.

NS 5815: 2006 Standard: Risikovurdering av anleggsarbeid. Utgave: 1 (2006-06-01)

Pfurtscheller, C. og Klewein, K. (2011): Sicherheit gegen Naturgefahren um jeden Preis? Ökonomische Schadens- und Kostenbewertung von alpinen Risiken, GW-Unterricht Nr. 121/2011.

Romang, H.; Margreth, S. & Koschni, A. (2008) Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung Teil A: Grundlagen und generelles Vorgehen, Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, 2008

Safeland (2010) Overview of landslide hazard and risk assessment practices, Deliverable 2.1 to EU FP 7 project SafeLand, Grant Agreement No.: 226479, Work Package 2.1 - Harmonization and development of procedures for quantifying landslide hazard.

Schneiderbauer, S., Hartmann, S., Dalla Torre, C., Dinkelaker, N., Sankowsky, A., Hoffmann, C., Pedoth, L., Streifeneder, T. (2018): Umgang mit restrisiko und dem Überlastfall Im Zusammenhang mit Naturgefahren im Alpenraum, policy paper for EUSALP – EU strategy for the Alpine Region, utgitt av : Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (STMUV)

Technical Committee ISO/TC 262, Risk management. 2018. ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines. ISO (the International Organization for Standardization).

A Vedlegg – Example of estimation of "rest risk" of a catching dam

To assess the risk for elements behind the catching dam, the following key question need to be answered: What is the probability of an avalanche surpassing a catching dam and to reach a point of interest. To understand this question, one must consider the uncertainty involved in the choice of design parameters for this kind of mitigation measure. This appendix only focuses on this probability estimation, not on the consequences of the mass movement across the catching dam.

A.1 Design input Parameter

The flow condition of an avalanche is the most important factor that determines the interaction between an avalanche and a dam. The flow of dry snow avalanches is generally assumed to be over-critical in the track, in which case the Froude number, Fr , for a dry-snow avalanche in the track is:

$$Fr \equiv \frac{u}{\sqrt{gh_f \cos \phi_s}} > 1 \quad (1)$$

where:

- u is avalanche speed
- h_f moving height of the avalanche
- g is gravitational acceleration (9.8 m/s^2)
- ϕ_s is the slope angle of the terrain

To determine velocity and flow height, the use of avalanche models has become state-of-practice. However, runout observations provide limited constraints for the verification of the empirical parameters used in the common present-day numerical avalanche models. This is demonstrated in Figure A1, which shows three simulations with a simple mass-block model governed by the equation of motion

$$\frac{dU}{dt} = g(\sin \phi - a_0 \cos \phi) - a_2 U^2 \quad (2)$$

where U is the velocity, dU/dt the acceleration, g the gravitational acceleration, and ϕ is the slope angle of the track. The model parameters are the Coulomb friction parameter a_0 and the turbulent frictional parameter a_2 . Both parameters can be related to the parameters commonly used in the Voellmy model: $\mu = a_0$ and $\xi = g/(a_2 h_f)$, with h_f is the flow depth. Here, we use a simple mass-block model for illustration purposes as it is easy to follow and yet it is an admissible first-order approximation.

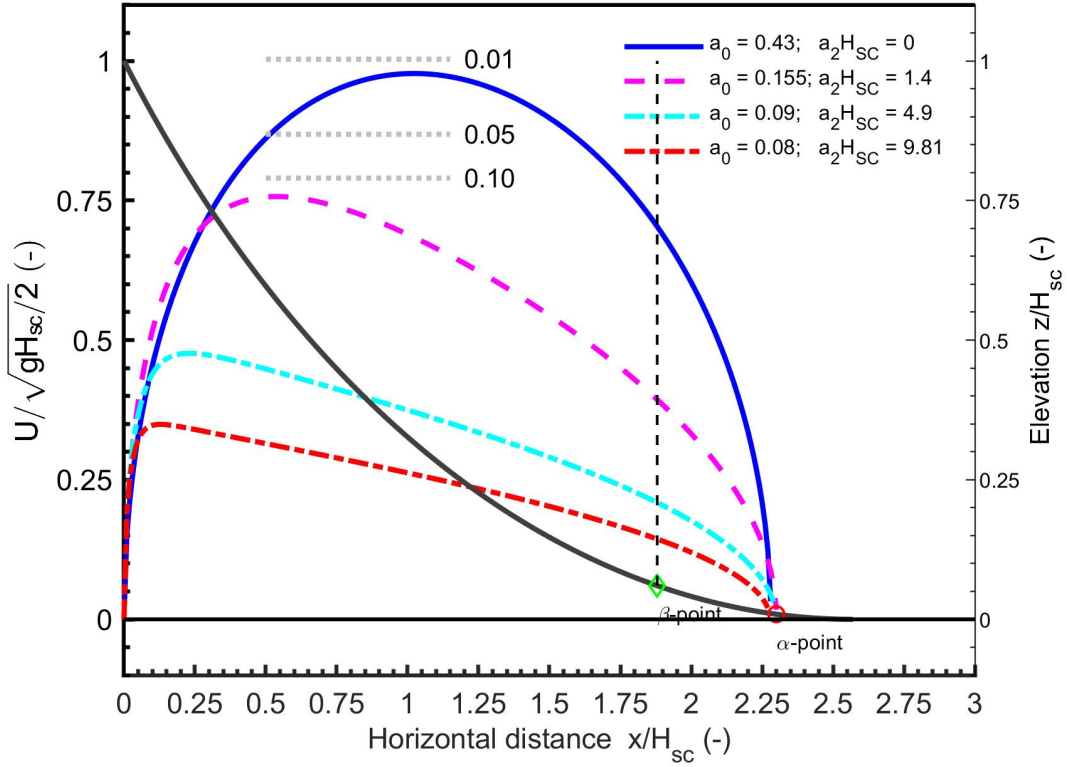


Figure A1 Velocity of a mass block moving with various parameter combinations of $\{a_0; a_2H_{SC}\}$ along a cycloidal track (black line; steepness in release area is $\phi_0 = 45^\circ$) and reaching the α_m -point. The velocity and length are scaled with the total drop height H_{SC} . The gray dotted lines mark the probability of exceedance of the scaled velocity based on observations.

In the example, all the simulations are forced to reach the expected α -point according to the α - β model (Lied and Bakkehøi, 1980), but depending on the choice of the empirical parameters they show very different velocity distributions along the track. Assuming a flow depth h_f of 2 m and a drop height $H_{SC} = 1000$ m, the corresponding Voellmy parameters $\{\mu, \xi\}$ are $\{0.43, \infty\}$, $\{0.155, 3500 \text{ m s}^{-2}\}$, $\{0.13, 2450 \text{ m s}^{-2}\}$, and $\{0.09, 1000 \text{ m s}^{-2}\}$. This choice of the parameters is inspired by values like $\mu = 0.155$ or $\xi \approx 1000 \text{ m s}^{-2}$, or $a_2H_{SC} = 2$ that can be found in the literature, e.g., (Buser and Frutiger, 1980; Bakkehøi et al., 1983). However, those authors only focused on runout observations.

The differences in the predicted velocities can be crucial for the delimitation of endangered areas or the design of mitigation measures. The latter case is considered in the following example.

Simple dimensioning criteria for avalanche catching dams relate the required height of the free board, H_{fb} to the avalanche velocity (see for example Chapter 8.4 in Rudolf-Miklau et al., 2014):

$$H_{fb} = \frac{U^2}{2g\lambda} + h_f, \quad (3)$$

where λ is an empirical constant with a value typically between 1 and 3, depending on the avalanche type (dry or wet), and h_f is the flow height. In the case of the example in Figure A1, the avalanches stopping at the α_m -point still have a velocity of approximately $0.72\sqrt{gH_{SC}/2}$, $0.4\sqrt{gH_{SC}/2}$, $0.33\sqrt{gH_{SC}/2}$, or $0.21\sqrt{gH_{SC}/2}$, respectively, at the β -point.

If one were to plan a catching dam at the β -point, one could directly relate the required freeboard to the drop height H_{SC} :

$$H_{fb} \approx f_v \frac{H_{SC}}{4\lambda} + h_f, \quad (4)$$

where the factor f_v for our examples is either 0.51, 0.16, 0.11, or 0.04. That is, the design dam height may differ by a factor up to 12, depending on the choice of the model parameters. Hence, uncertainty of to the design velocity has a major influence of the residual risk.

A.2 Overrun length

The design probability represents an aggregation of the probabilities of all avalanches in the path with runout length exceeding the position of the dam base and with velocity at the base of the dam lower than or equal to a design velocity. The probability that an avalanche exceeds the position of the dam base is

$$P_b(S > s_b) = f_{rel}(1 - F(s_b)) \quad (5)$$

The nominal design probability (level of safety) for a dam can then be defined by the simplified relation

$$p_{nom} \geq f_{rel}(1 - F(s_b))(1 - F(U_b)) \quad (6)$$

where

- p_{nom} is the desired overall level of safety [yr^{-1}]
- f_{rel} is the annual avalanche frequency in the path [Number per year]
- $(1 - F(s_b))$ is the probability that the runout exceeds the position s_b of the dam base [-]
- $(1 - F(U_b))$ is the probability that the velocity at the base of the dam exceeds the design velocity [-]
- $F(*)$ is the cumulative probability function.

That is, the design probability (predetermined level of safety) is expressed as the product of the annual avalanche frequency times the probability that the avalanche has runout distance longer than the base of the catching dam times the probability that the velocity at the base exceeds a certain design value. In this case, the design probability for the velocity needs to follow the relation

$$p_d = F(U_b) \leq 1 - \frac{p_{nom}}{f_{rel} \cdot (1 - F(s_b))} \quad (7)$$

or considering the probability for overrun given that the avalanche reached the dam is

$$p_{or} = 1 - F(U_{bcrit}) \quad (8)$$

where U_{bcrit} is the minimum velocity required to overtop the dam.

On the other hand, observation at a test dam and laboratory experiments (Faug et al., 2008) suggest that the potential overrun length can be estimated by a relationship

$$\frac{l_{ovr}}{H_{fb}} = b_1 \frac{u_b^2}{2gH_{fb}} + b_0 \quad (9)$$

where:

- l_{ovr} Is the overrun length
- H_{fb} the effective height of the free board
- b_0, b_1 are parameters which may depend on the actual dam setting.

Ideally, the design parameters (i.e. the velocity and flow height) correspond to the predefined level of safety. In this case,

$$u_{bDim}^2 = -2g \frac{b_0}{b_1} H_{fb} \quad (10)$$

holds true, where u_{bDim} is the design velocity at the foot of the dam. Then, for avalanche velocities at the foot of the dam with u_b , larger than the design velocity, the overrun length can be estimated by

$$l_{ovr} = b_1 \frac{u_b^2 - u_{bDim}^2}{2g} \quad (11)$$

For example, if one assumes that for a given case $u_{bDim} \approx 12.5 \text{ m s}^{-1}$ and $b_1 = 2.54$, an overrun length of, e.g., 25 m would require an avalanche velocity $u_b \approx 19 \text{ m s}^{-1}$.

Furthermore, if one for example assumes that the avalanche velocity squared at the base of the catching dam follows a half-normal distribution (Figure A2), the design velocity is given by $u_{bDim}^2 = \text{quantile}(u_b^2, p_d)$, where the design probability, p_d , is defined as

$$p_d = 1 - p_{or} \quad (12)$$

and p_{or} is linked to predefined level of safety at the dam (see above).

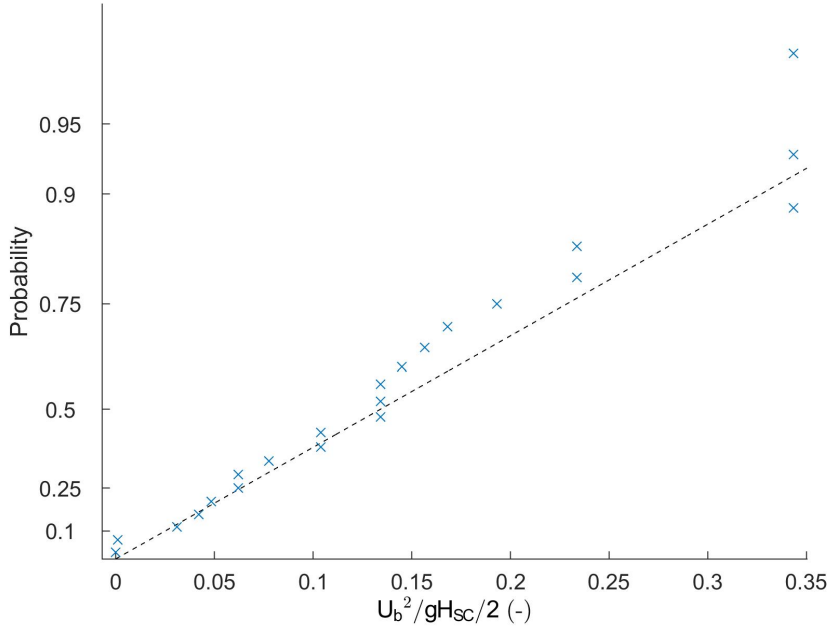


Figure A2 Example of the scaled velocity squared at the base of a dam. Data are based on observations at the Ryggfonn test-site.

Now, a normalized difference of the velocity squared / normalized overrun length can be defined as

$$R = \frac{u_b^2 - u_{bDim}^2}{u_{bDim}^2} = - \frac{l_{ovr}}{b_0 H_{fb}} \quad (13)$$

This follows in our case again a half-normal distribution (Figure A3).

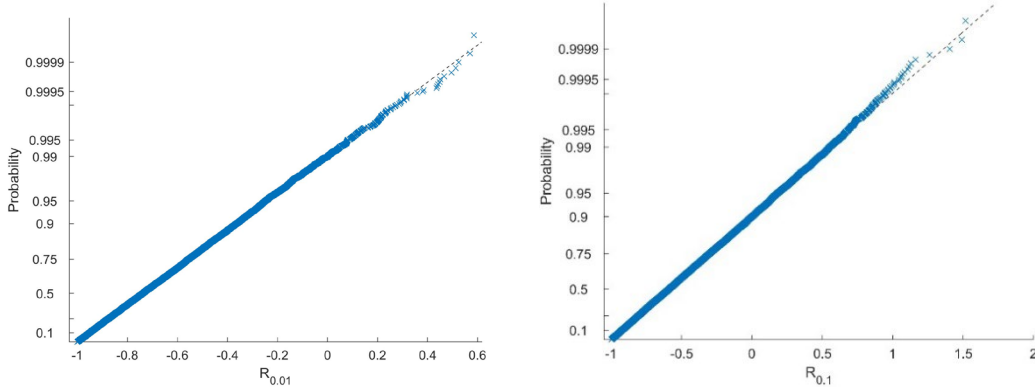


Figure A3 Normalized overrun length R for $p_{or} = 0.01$ (left) and $p_{or} = 0.1$ (right) following a shifted half-normal distribution.

Recalling that the cumulative distribution function for a half-normal distribution is given by

$$F(x) = \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (14)$$

and the quantile function is

$$Q(p) = \sigma\sqrt{2}\text{erf}^{-1}(p) \quad (15)$$

In the case of the shifted ($R_{nom}+1$), one obtains:

$$\sigma\sqrt{2} = \frac{1}{\text{erf}^{-1}(p_d)} \quad (16)$$

Using (15) (16), and (13), the exceedance probability of a given overrun length is

$$p_R = 1 - \text{erf}\left((R+1)\text{erf}^{-1}(p_d)\right) \quad (17)$$

Finally, for a given R, the residual hazard can be calculated by

$$p_{res} = p_R(1 - F(s_b))f_{rel} \quad (18)$$

A major parameter in equation (17) is the design probability, which has a strong influence on the residual risk. Furthermore, the uncertainties for runout probability, $(1-F(s_b))$, and for the avalanche frequency, f_{rel} , will contribute to the residual risk.

Little observational data are actually available to derive various probability functions. However, it might be expected that the various probabilities and distributions (i.e. f_{rel} , $F(s_b)$, $F(U_b)$) are project/location specific and need to be estimated in some way.

A.3 Example 1

Here, we give a brief example for calculating the residual hazard at a given location behind the dam, using Eqs. (7), (17), and (18). For this example, we use the probability distribution of the velocity shown in Figure A2.

To calculate the corresponding residual risk, one needs to determine the vulnerability in addition of the hazard. Typically, the vulnerability will be a function of the intensity and therewith correlated with the hazard function. Some example for vulnerability estimates can be found in (NGI 20061032-02) and references therein.

To obtain an approximation of the residual risk one may define a threshold velocity at the location of interest that should not be exceeded.

Table A1 presents some example calculation of the residual hazard for a predetermined overrun length and given level of safeties, where we ignore the uncertainties involved in the runout probability and avalanche frequency.

Table A1 Example of influence of design probability in a case for $l_{ovr} = 25$ m; $f_{rel} = 2$ per year; $p_{rd} = F(s_b) = 0.95$.

p_{nom}	p_d	p_R	"residual hazard" p_{res}
1/100	0.9	0.026	0.0026
1/300	0.97	0.006	0.0006
1/1000	0.99	0.0016	0.00016

A.4 Example 2

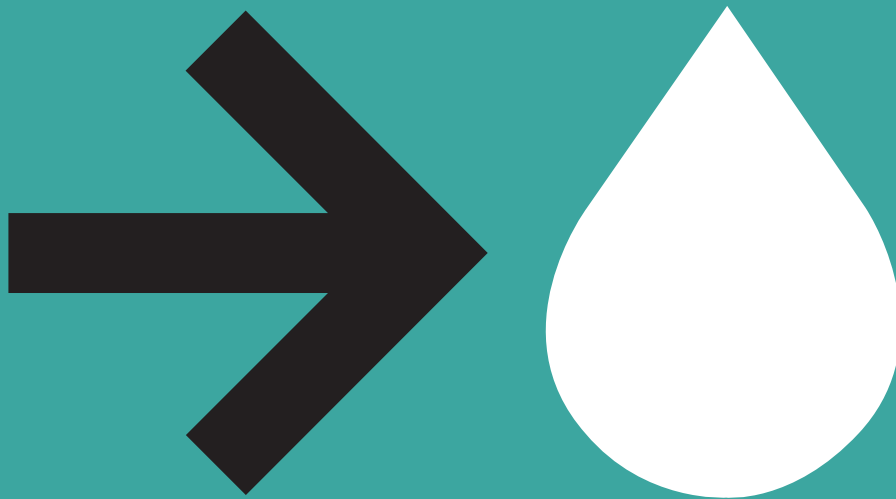
Of interest is also the overrun length for a faulty assumed probability of the design velocity. Eq (11) gives the overrun length, depending on the actual velocity and the design velocity. Table A2 provides some example calculation for a given target velocity and given avalanche frequency and runout probability.

Table A2 Overrun length vs design velocity with a given target design velocity as parameter ($f_{rel} = 2$ per year; $p_{rd} = 0.95$)

p_d	u_{bdim} ($m s^{-1}$)	l_{ovr} (m)
0.99	37	0
0.97	32	43
0.9	24	105

References

- Faug, T.; Gauer, P.; Lied, K. & Naaim, M. (2008) Overrun length of avalanches overtopping catching dams: Cross-comparison of small-scale laboratory experiments and observations from full-scale avalanches, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113, F03009(1-17)
- NGI 200671032-02, Gauer, P. Vulnerability and Risk Assessment for Geohazards. Case studies: Risk associated with avalanches Norwegian Geotechnical Institute, Norwegian Geotechnical Institute, 2007
- Rudolf-Miklau, F.; Sauermoser, S. & Mears, A. I. (Eds.) *The Technical Avalanche Protection Handbook*, Ernst & Sohn, 2014



CONSORTIUM

Private sector

SKANSKA

MESTERHUS

Multiconsult

Finans Norge

SKJÆVELAND
GRUPPEN

NORGESHUS

Leca

isola

Public sector



Statens vegvesen



Noregs
vassdrags- og
energidirektorat

AVINOR



Jernbane-
direktoratet



STATSBYGG



TRONDHEIM KOMMUNE

Research & education

SINTEF

BI

NTNU

Meteorologisk
institutt

NGI