

# Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv

## RISIKOVURDERING FOR DAM STRANDFOSSEN

DOK.NR. 20150624-05-R

REV.NR. 0 / 2018-04-29



Damanlegget



Tilløpskanalen

Foto: Norconsult

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

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

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

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



## Prosjekt

Prosjekttittel: **Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv**  
Dokumenttittel: **Risikovurdering for Dam Strandfossen**  
Dokumentnr.: 20150624-05-R  
Dato: 2018-04-24  
Rev.nr. / Rev.dato: 0 /

## Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Energi Norge / Eidsiva  
Kontaktperson: Eve Cathrin Walseth (Energi Norge)/Torstein Tjelde (Eidsiva)  
Kontraktreferanse: Oppdragsbekreftelse 30. Juni 2017

## for NGI

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

## Sammendrag

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

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

Denne rapporten presenterer risikovurderingene gjennomført for Dam Strandfossen. Formålet med risikovurderingsanalysene av Dam Strandfossen var å identifisere de mest kritiske bruddårsaker og bruddmekanismer og vurdere effekt av risikoreduserende tiltak. Følgende vurderinger ble foretatt:

- Risikovurdering av brudd i inntakskanalen.
- Vurdering av risikoreduserende tiltak og deres effekt:
  - Tiltak ved damområdet for å redusere bruddsannsynligheten.
  - Tiltak for overvåkning.
  - Alternative tiltak utenfor damområdet for å redusere bruddkonsekvenser.

Det ble gjort en analyse av potensielle bruddårsaker og bruddmekanismer for inntakskanalen. For hver prioriterte bruddårsak eller bruddmekanisme ble det beregnet en årlig bruddsannsynlighet. I tillegg ble det gjort vurderinger av fare- og konsekvensreduserende potensiale av enkelte tiltak. Risikovurderingene for Dam Strandfossen viser følgende:

- Det er en relativt høy bruddsannsynlighet for inntakskanalen sammenlignet med andre norske damanlegg. Den totale årlige bruddsannsynligheten ligger på ca.  $1,4 \cdot 10^{-3}$ /år. Den mest kritiske bruddmekanismen er brudd i flomverk som fører til erosjon og brudd i inntakskanalen. Risikoreduserende tiltak er påkrevd.
- Det blir hovedsakelig materielle tap ved et brudd i inntakskanalen, derfor er risiko med hensyn til tap av menneskeliv veldig nært tolerabel, selv uten tiltak. Materielle skader vil være relatert til vannskader og ikke strukturelle skader på bygninger. I tillegg vil brudd i inntakskanalen gi store økonomiske tap og tap av omdømme for Eidsiva.
- Ved en drøfting av risikoreduserende tiltak, er erosjonssikring og bygging av damtå for inntakskanalvollene det mest effektive tiltaket for å redusere bruddsannsynlighet i systemet. Tiltaket reduserer risikoen betydelig, med en resulterende bruddsannsynlighet trolig under  $10^{-5}$ /år.
- En sperredam sør for kraftverket reduserer ikke bruddsannsynlighet men eliminerer praktisk talt konsekvensene for Elverum sentrum.
- Kontinuerlig overvåkning av grunnvannsbrønnene langs kanalen kombinert med etablering av grenseverdier reduserer både bruddsannsynlighet og bruddkonsekvenser.

## Innhold

<b>1</b>	<b>Bakgrunn</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Om Dam Strandfossen</b>	<b>6</b>
2.1	Hoveddammen og damanlegget	6
2.2	Inntakskanalen	7
2.3	Flomverket	8
2.4	Nøkkeldata for Dam Strandfossen og inntakskanalen	8
2.5	Tidligere hendelser ved Dam Strandfossen	10
2.6	NVEs klassifisering	10
<b>3</b>	<b>Risikovurderinger for Dam Strandfossen</b>	<b>10</b>
3.1	Metodikk for analyser av dambrudd og brudd i inntakskanalen	10
3.2	Drøfting av tiltak	13
<b>4</b>	<b>Utløsnings- og bruddmekanismer</b>	<b>13</b>
4.1	Identifisering av bruddmekanismer	13
4.2	Oversikt over analysene	14
<b>5</b>	<b>Årlig bruddsannsynlighet</b>	<b>15</b>
5.1	Resultatene fra probabilistiske analyser	15
5.2	Diskusjon	17
<b>6</b>	<b>Konsekvensanalyse</b>	<b>18</b>
6.1	Eksponerte objekter	18
6.2	Intensitet av dambruddsbølgen	18
6.3	Konsekvenser i form av liv og helse	19
6.4	Konsekvenser i form av materielle tap	20
<b>7</b>	<b>Identifisering og evaluering av risikoreduserende tiltak</b>	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>Risikoanalyse</b>	<b>22</b>
<b>9</b>	<b>Konklusjoner</b>	<b>25</b>
	<b>Acknowledgment</b>	<b>26</b>
	<b>Referanser</b>	<b>26</b>

## Vedlegg

Vedlegg A	Dam Strandfossen
Vedlegg B	Beskrivelse av sannsynlighetene i hendelsestre-analysene
Vedlegg C	Hendelsestre-analyser for Dam Strandfossen

# 1 Bakgrunn

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

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

Prosjektet har som mål å gi anbefalinger om bruk av risikovurdering av dammer i Norge. Arbeidet er viktig for å skape en felles plattform i bransjen for risikoanalyser for dammer.

Som en del av vurderingen av dammer i Norge ble Dam Strandfossen valgt som eksempel. Risikoanalysene ble gjennomført delvis via en "workshop" hvor sakkyndige fra flere instanser bidro til vurderingene. Formålet med risikovurderingsanalysene av Dam Strandfossen var å identifisere de mest kritiske bruddårsaker og bruddmekanismer, vurdere risiko og vurdere effekt av risikoreduserende tiltak. Følgende vurderinger ble foretatt:

- Risikovurdering av brudd i inntakskanalen.
- Vurdering av risikoreduserende tiltak og deres effekt:
  - Tiltak ved damområdet for å redusere brudds sannsynligheten.
  - Tiltak for overvåkning.
  - Alternative tiltak utenfor damområdet for å redusere bruddkonsekvenser.

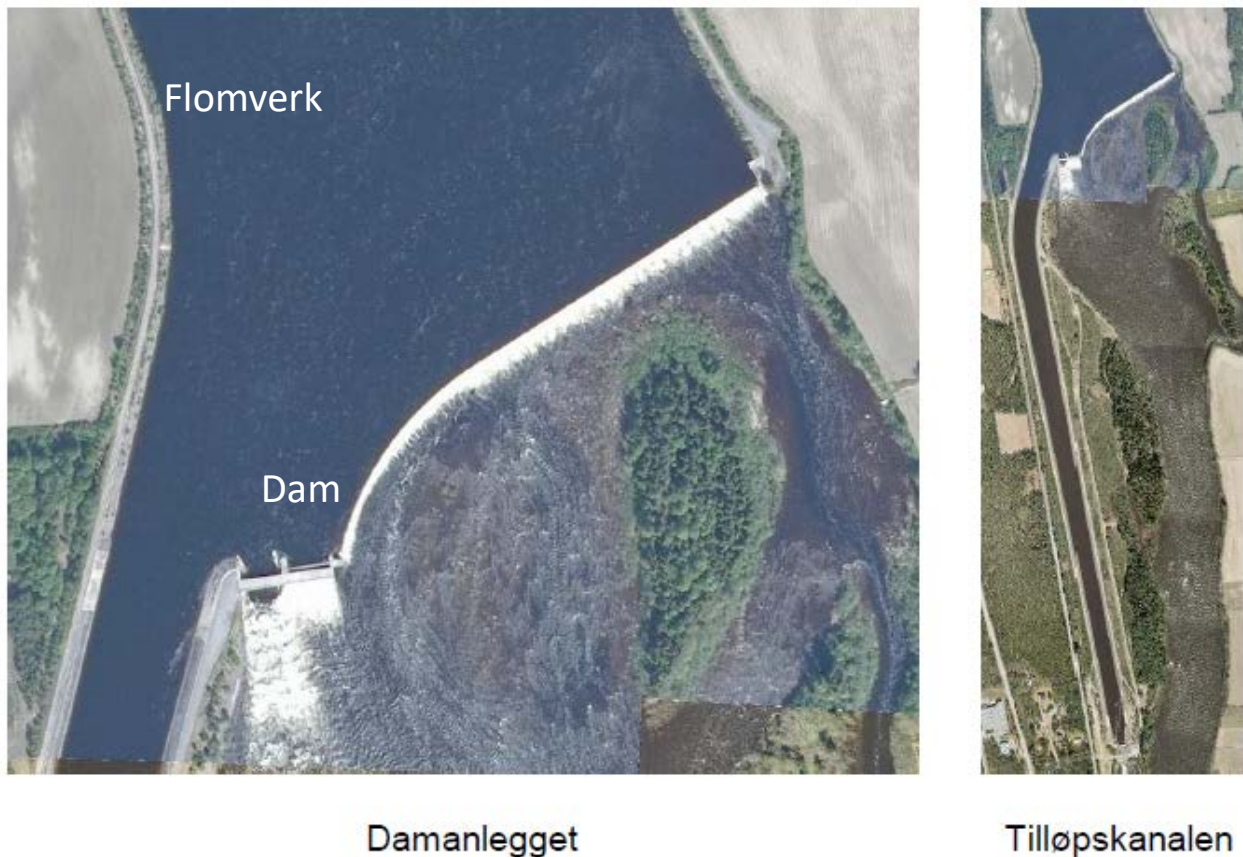
NGI og Eidsiva vurderte også om brudd i selve dammen skulle analyseres. Brudd i dammen ville få store økonomiske konsekvenser for Eidsiva. Men et dambrudd har ingen potensielle 3. parts konsekvenser og selve dammen er i konsekvensklasse 0. Det ble derfor valgt å ikke gjøre risikovurderinger for selve dammen, men heller å fokusere på vurderinger som omfatter brudd i inntakskanalen og tredjeparts konsekvenser.

## 2 Om Dam Strandfossen

### 2.1 Hoveddammen og damanlegget

Dam Strandfossen ligger i Glommavassdraget i Elverum kommune. Inntaksdam hever vannstanden i Glomma og danner inntaket for Strandfossen kraftverk. Inntaket befinner seg i enden av en 1,5 km lang inntakskanal (nivåkanal) på vestsiden av Glomma (Figur 1), ved Strandfossen, ca. 4 km nord for tettstedet Elverum. Samlet slukeevne i stasjonen er 240 m<sup>3</sup>/s. Nedenfor kraftverket føres vannet tilbake til elven via en avløpskanal. Det oppnås en fallhøyde på 13 m fra Bånerudfossen til Velta nedenfor Strandfossen.

Strandfossen kraftverk ble bygget fra november 1977 til juni 1980. Kraftverket ble satt i drift i desember 1979 og eies av Eidsiva Vannkraft AS. Damanlegget består av et overløp med lave klappeluker og to større klappeluker.



Figur 1. Foto over damanlegget og inntakskanalen for dam Strandfossen (Norconsult, 2016a).

## 2.2 Inntakskanalen

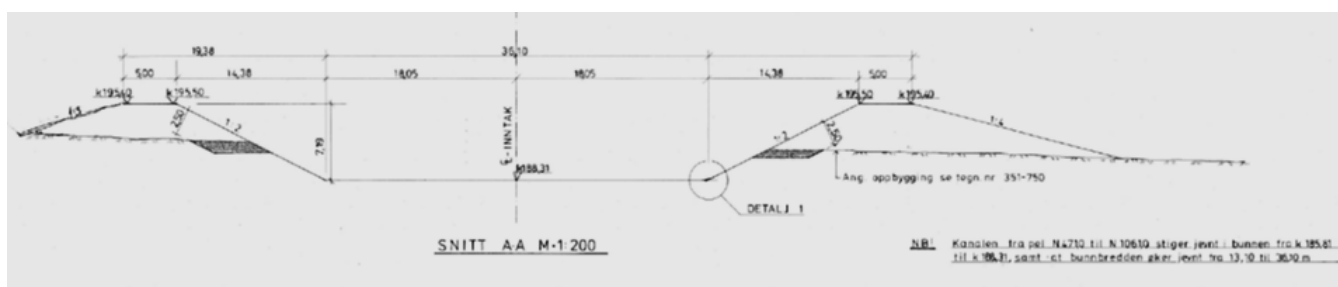
Inntakskanalen er ca. 1 500 m lang og har voller på begge sider (Figur 2 og 3). Inntakskanalen ligger i breelavsatte sand- og grusmasser. Det meste av kanalen ligger over nåværende grunnvannstand og utgravd masse er benyttet i vollene. Selve kanalen er kledd med en 20 cm tykk asfaltmembran som består av 10 cm bærelag av asfaltgrus og 10 cm tettlag av asfalt betong på vannsiden. Oppe ved inntaksdammen og nede ved inntaket til kraftstasjonene er kanalen kledd med betongplater.

Oppbygging av vollene tilfredsstillende ikke NVEs krav til utforming av fyllingsdammer (Norconsult, 2016b). Design av vollene er i stor grad basert på konsulentens vurdering alene. Konsulent var Norsk Vandbygningkontor (NVK). Langs inntakskanalen varierer konsekvensene betydelig med stedet hvor et eventuelt brudd inntreffer.

Selv kraftstasjonen er fundamentert på fjell. Vollene er stort sett bygget av stedlige utgravde masser, bestående av grus og silt. Kornfordeling fra prøvegrop i området er vist i Figur 4. Det er ingen form for steinsetting eller tåsikring.

## 2.3 Flomverket

Oppstrøms Strandfossen, i ca 2.5 km lengde er det etablert flomverk/flomvoller (Figur 1, 2, 3 og 5). Figur 5 viser skisser av oppbygningen av flomvollene. Vedlegg A gir flere tverrsnitt.



Figur 2. Tverrsnitt av inntakskanalen (Norsk Vandbygningskontor, Nov. 1978).



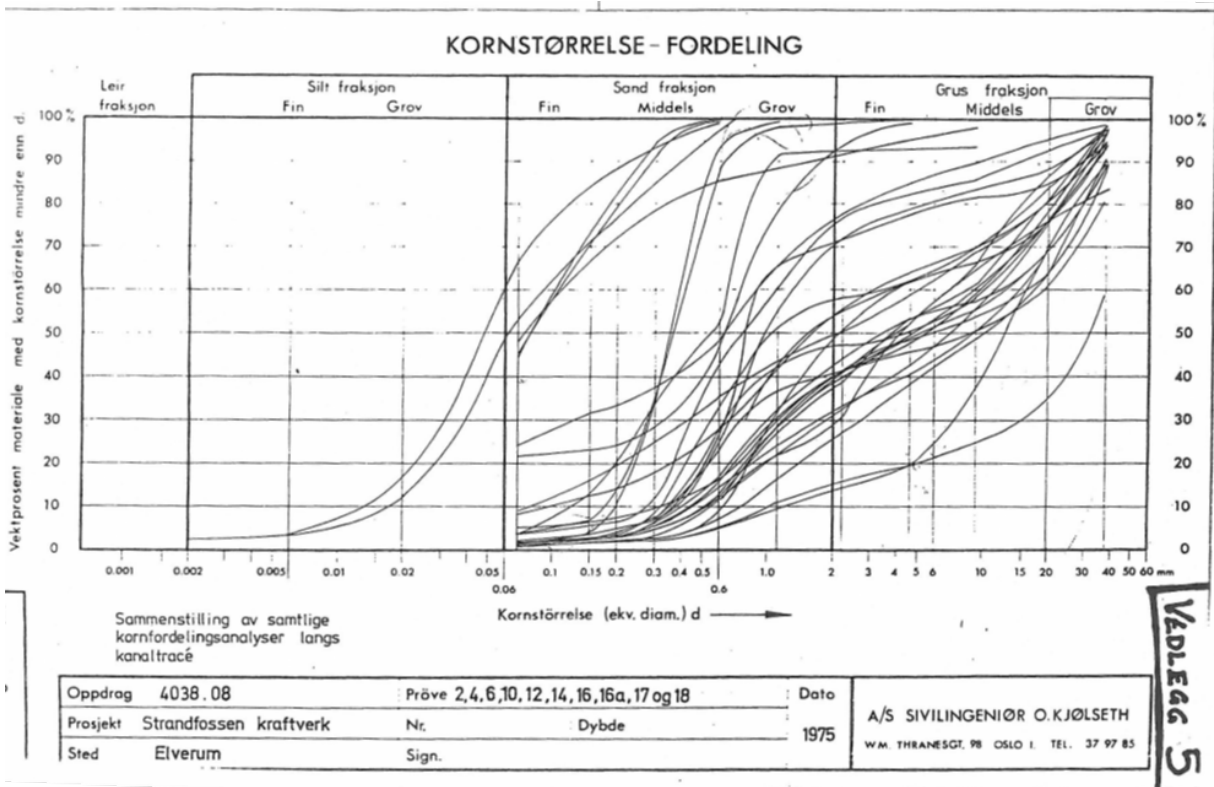
Figur 3. Bilde av inntakskanalen, sett medstrøms (Norconsult, 2016b)

## 2.4 Nøkkeldata for Dam Strandfossen og inntakskanalen

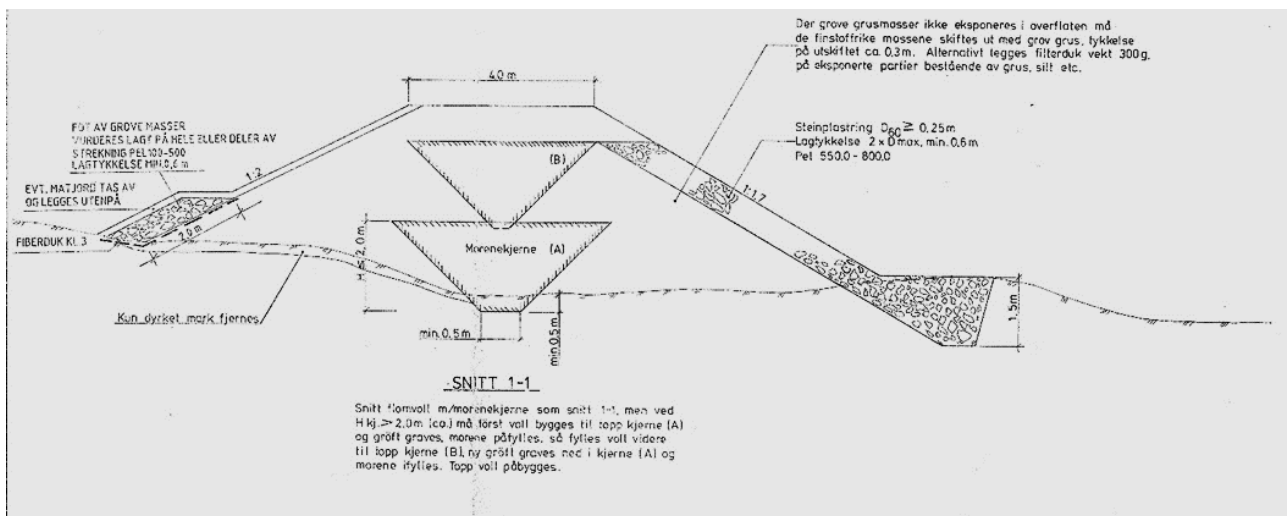
Nedbørsfelt	15400,4 km <sup>2</sup>
Damkrone	195,50 moh
Lengde damkrone	4200 m
Overløp	192,05 moh
Overløpslengde	330 m
Samlet lengde klappeluker	47 m



Konsekvensklasse, dam 0  
 Konsekvensklasse, inntakskanal 4  
 Konsulent Norsk vannbygningskontor (NVK)



Figur 4. Kornfordeling fra prøvegrøp i området (NVK Vandbygningskontoret, 2000).



Figur 5. Snitt av flomvoll (Norsk Vandbygningskontor, Nov. 1978). Fot av grove masser (illustrert til venstre i figuren) ble vurdert lagt på, men dette har ikke blitt utført.

## 2.5 Tidligere hendelser ved Dam Strandfossen

I juni 1995 ble Østlandet og Glomma rammet av flom (Figur 6). Flommen var 25% over dimensjoneringsflom og det ble iverksatt evakuering av hele området. Under flommen ble det observert oscillerende vannstand eller vannstandssvingninger i inntakskanalen. Dette vil bli, i hendelsestre-analysene, referert til som "pumpemekanisme". Den oscillerende effekten var størst i avløpskanalen.

Høsten 1999 ble det oppdaget store hull i asfaltmembranen i inntakskanalen ved Strandfossen kraftstasjon. Stasjonen ble stengt, inntakskanalen tømt og det ble gjennomført omfattende reparasjoner. De 40 m nærmest kraftstasjonen (der hullene i asfalten oppsto) ble betongbelagt.

Analyse av hendelsesforløpet konkluderte med at situasjonen ble initiert av flommen i 1995. (NVK Vandbygningkontoret, 2000): Finstoff i overgangen mellom tilbakefylte masser og naturlig grunn ble utvasket. Dette førte antageligvis til innsynkninger, mindre sprekker og riss. Etter flommer har infiltrasjon mellom små sprekker ført til gradvis utvasking og indre erosjon av massene – og til slutt førte det til store hull og sprekker.

## 2.6 NVEs klassifisering

Ut fra potensielle konsekvenser hører inntakskanalen i konsekvensklasse 4. Inntakskanalen tilfredsstiller ikke NVEs krav til utforming av fyllingsdammer. Rehabilitering og utbedringer er påkrevd.

# 3 Risikovurderinger for Dam Strandfossen

## 3.1 Metodikk for analyser av dambrudd og brudd i inntakskanalen

Vurderingen av sannsynlighet for brudd for Dam Strandfossen ble gjort ved hjelp av hendelsestre-metoden. Sannsynlighetene er beskrevet både med et fast tall og et tallområde som indikerer usikkerheten i sannsynlighetsvurderingen (Vedlegg B). Hendelsestre-analysen gir et best estimat, en nedre grense og en øvre grense for sannsynlighet for brudd. Metoden er forklart i mer detalj i NGI (2016) "State-of-the-Art om risikoanalyser for dammer".

Hendelsestre-analysen følger en åtte-trinns prosedyre (Vick 2002; Høeg 1996):

1. Gjennomgang av dammens ytelse under ulike påkjenninger og tidligere hendelser.
2. Befaring og inspeksjon av dammen for å bli kjent med dammen og grunnforholdene.
3. Identifisering av de viktigste utløsningsårsaker og brudmekanismer.
4. Enighet om hvilke sannsynligheter ulike verbale beskrivelse av usikkerheter representerer.
5. Oppbygging av hendelsestrær (i tillegg ble Bayesisk nettverkanalyser foretatt).
6. Estimat av sannsynligheter for enkelthendelsene i hendelsestreet (eller nettverket).
7. Evaluering av resultater.
8. Iterasjon.



Figur 6. Strandfossen og området rundt ved flommen i 1995 (Elverum ligger 4 km sør og vil være i nedre delen av fotoen).

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

Et essensielt steg i vurderingen er trinn 3, "Failure mode screening" på engelsk eller identifisering av de viktigste utløsningsårsaker og bruddmekanismer. Dette er beskrevet i Kapittel 4. Analysen ser på alle plausible bruddmekanismer og utløsende faktorer.

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

### 3.1.1 Befaring og workshop

Analysene ble gjennomført på en 2-dagers workshop 16. – 17. oktober 2017. På workshopens første dag var det introduksjon av og befaring på damanlegget og oppstart av analyser i Elverum. Workshopens andre dag fant sted på NGI med fortsettelse av analysene og drøfting av tiltak. Deltagerne representerte myndighetene, bransjeforening, vassdragstekniske ansvarlige, dameiere og rådgivere. Deltagerlisten er vist i Tabell 1.

*Tabell 1 Workshop deltagere for risikoanalyse av Dam Strandfossen*

Navn	Bedrift
Torstein Tjelde	Eidsiva
Eve Cathrin Walseth	EN
Vegar Kjos Andersen	Eidsiva
Svend Erik Korsmo	Eidsiva
Jan Lindemark	Multiconsult
Knut Tjugen	Sweco
Anne Marit Ruud	Statkraft
Hanne Marthe Østvold	NVE
Kaare Høeg	NGI
Farrokh Nadim	NGI
Thi Minh Hue Le	NGI
Unni Eidsvig	NGI

På workshopen var alt av relevant bakgrunnsinformasjon om Dam Strandfossen tilgjengelig. I tillegg var workshop deltageres kunnskap om og erfaringer med fyllingsdammer svært verdifull. Dette inkluderte også erfaringer med drift og operasjon av Dam Strandfossen, erfaringer fra damanleggets oppførsel under flommen i 1995 og kunnskap om tidligere skader på damanlegget.

Arbeidet på workshopen omfattet trinn 3 - 8 i åtte-trinns prosedyren beskrevet i delkapittel 3.1.1. Alle trinnene ble gjennomført gjennom diskusjon. Under oppbygningen av hendelsestrærne, la deltagerne frem sine synspunkter på sannsynlighetene for hver av enkelthendelsene i hendelsestrærne. Sannsynlighetene vist i analysene i denne rapporten er "konsensus-verdier", etter at gruppen ble enig om sannsynlighet etter en diskusjon. De viktigste analysetilfellene og samtlige hendelsestrær ble gjennomgått på workshopen. NGI kompletterte analysene etter workshop'en.

### 3.1.2 Estimat av sannsynligheter for analysene av dambrudd

Sannsynlighetene for hver av hendelsene i hendelsestreet kan estimeres på ulike måter:

- Statistiske estimater, basert på observasjoner, test resultater, osv.
- Beregninger med modeller basert på fysiske prosesser.
- Ekspertvurderinger basert på erfaring.

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

Relasjoner mellom verbal beskrivelse av usikkerhet og sannsynligheter, som ble brukt på workshopen, er beskrevet i Vedlegg B. I dette vedlegget beskrives også tilsvarende relasjoner for bruk av områdetall for sannsynligheter, som benyttes for å estimere usikkerheten i vurderingene.

## 3.2 Drøfting av tiltak

En viktig del av arbeidet på workshopen var å identifisere og vurdere tiltak, både for reduksjon av bruddsannsynlighet og for reduksjon i bruddkonsekvenser. Tiltak som er foreslått for Dam Strandfossen ble drøftet, i tillegg til at det ble holdt en idedugnad omkring andre mulige tiltak.

# 4 Utløsnings- og bruddmekanismer

## 4.1 Identifisering av bruddmekanismer

Arbeidet med identifisering av bruddmekanismer startet med en gjennomgang av generelle bruddmekanismer og utløsningsfaktorer, både med hensyn til potensielle svakheter i og rundt dammen og inntakskanalen og eksterne utløsningsfaktorer. Videre ble det diskutert i hvilken grad og evt. på hvilken måte hver og en av disse var relevante for Dam Strandfossen.

### Potensielle svakheter i og rundt dammene:

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

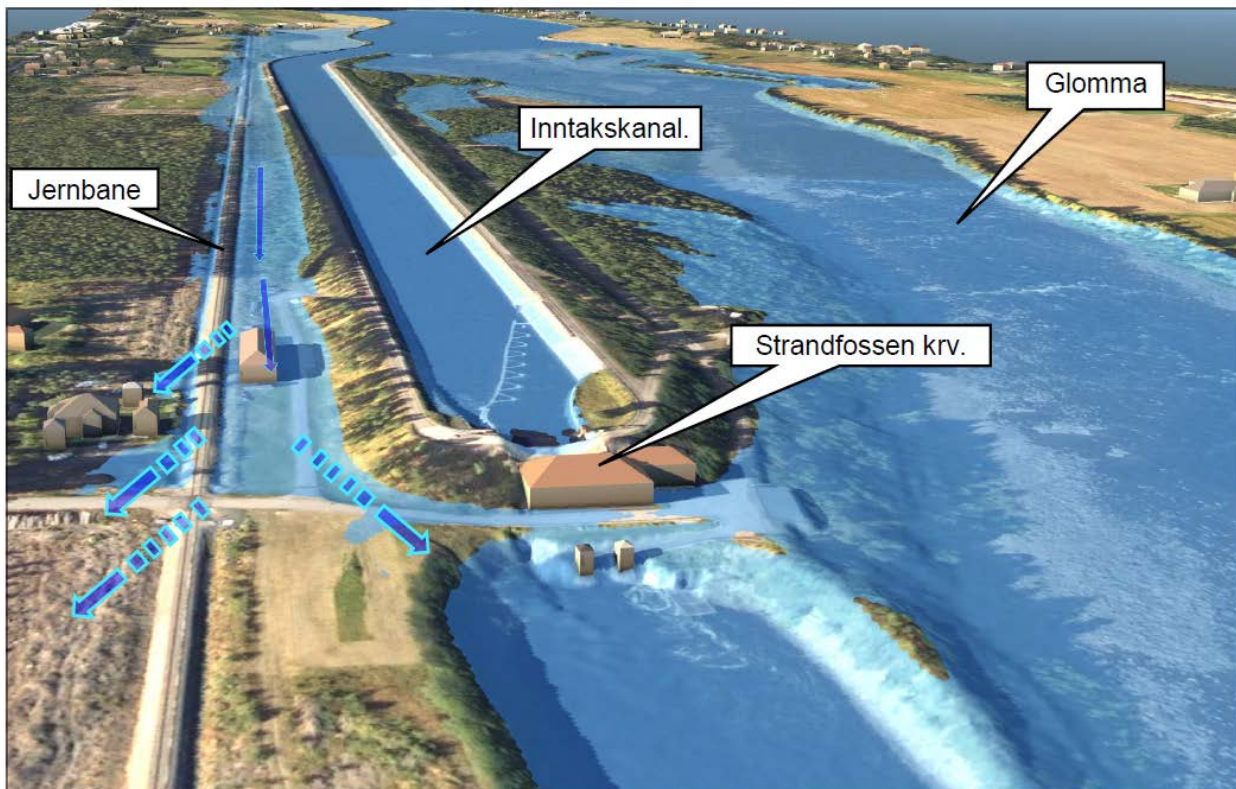
### Eksterne utløsningsfaktorer:

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

Det ble bestemt å ikke gjøre analyser for villedende handlinger. Terror eller sabotasje må ses på av myndighetene som har ansvar for samfunnsikkerhet. Meget usannsynlige hendelser som meteorittnedslag og flystyrt så man bort fra.

Konklusjonen fra diskusjonene om bruddmekanismer og bruddårsaker var som følger:

Potensielle svakheter som kan føre til brudd er kun relatert til skader på asfalt og betong. Indre erosjon er ikke noe problem så lenge asfalten og betongen er intakt. Imidlertid kan strømning og erosjon på utsiden av kanalvollene, som vist i Figur 7 skape problemer.



Figur 7. Strømning og erosjon på utsiden av inntakskanalen (Norconsult, 2017).

## 4.2 Oversikt over analysene

Bruddmekanismer omfatter både skade på inntakskanalen og strømning og erosjon på utsiden av inntakskanalvollene. Tabell 2 lister de bruddmekanismene og bruddårsakene som ble prioritert for hendelsestre-analysene, mens Tabell 3 lister mekanismene og årsakene som ikke ble vurdert videre i risikovurderingen.

For sistnevnte bruddmekanisme, blir analysen mer komplisert enn for en vanlig dam. Det er flere hendelser som kan gi en situasjon med strømning på utsiden av kanalvollene og disse krever vurdering av forhold oppstrøms dammen. Her er det gjort en analyse for scenarier som omfatter ulike deler av elvesystemet oppstrøms Strandfossen, hvor sannsynligheter for hovedscenariene er summert.

Tabell 2. Prioriterte bruddmekanisme for hendelsestre-analysene.

Initiering	Bruddmekanisme	Kommentar/oppfølging
Flom	Lekkasje gjennom skader i asfalt eller i betong, som gir rørdannelse gjennom vollen og videre fører til brudd i kanalvollen.	--
Flom	Overtopping av flomverket som fører til strømning og erosjon på utsiden av kanalvollene og videre til brudd i denne.	--
Flom	Brudd i flomverket som fører til strømning og erosjon på utsiden av kanalvollene og videre til brudd i denne.	--
Oppstrøms dambrudd	Samme bruddmekanismer som for flom, men med større vannmengder. (Dambrudd oppstrøms kan også være initiert av flom).	Inkluderes under flomanalysene
Flom i Grundsetbekken og tett kulvert	Vann langs utsiden av kanalvollene, erosjon og brudd.	--
Flom	Problemer med og feilmanøvrering av luker	Inkludert som en del av hendelsestrærne for flom

Tabell 3. Bruddmekanismer som ble nedprioritert i risikovurderingene.

Initiering	Bruddmekanisme	Kommentar
Jordskjelv	Setninger i kanalvollen	Ingen observerte setninger; ikke jordskjelvutsatt område (jf. jordskjelvkart). PGA ca. halvparten av Dravladalsdammen, hvor jordskjelvrelaterte brudds sannsynligheter ble svært lave.
Vindgenererte bølger i kanalen	Overtopping av kanalen	Svært lave bølger i kanalen.
Slukking av skogbrann	Erosjon av kanalvoll fra slukke vann på avveie	For små vannmengder.
Togavsporing nær vollen	Ødeleggelse av vollen forårsaket av sammenstøt med tog	For stor avstand mellom togskinnene og vollen til at dette er en aktuell problemstilling.

## 5 Årlig bruddsannsynlighet

### 5.1 Resultatene fra probabilistiske analyser

Tabell 4 lister de probabilistiske analysene som ble gjennomført for Dam Strandfossen. Detalj om og grafisk fremstilling av hendelsestre-analysene er gitt i Vedlegg C. Tabell 5 oppsummerer de beregnede årlige bruddsannsynlighetene for hver av analysene.

Tabell 4. Gjennomførte analyser for Dam Strandfossen.

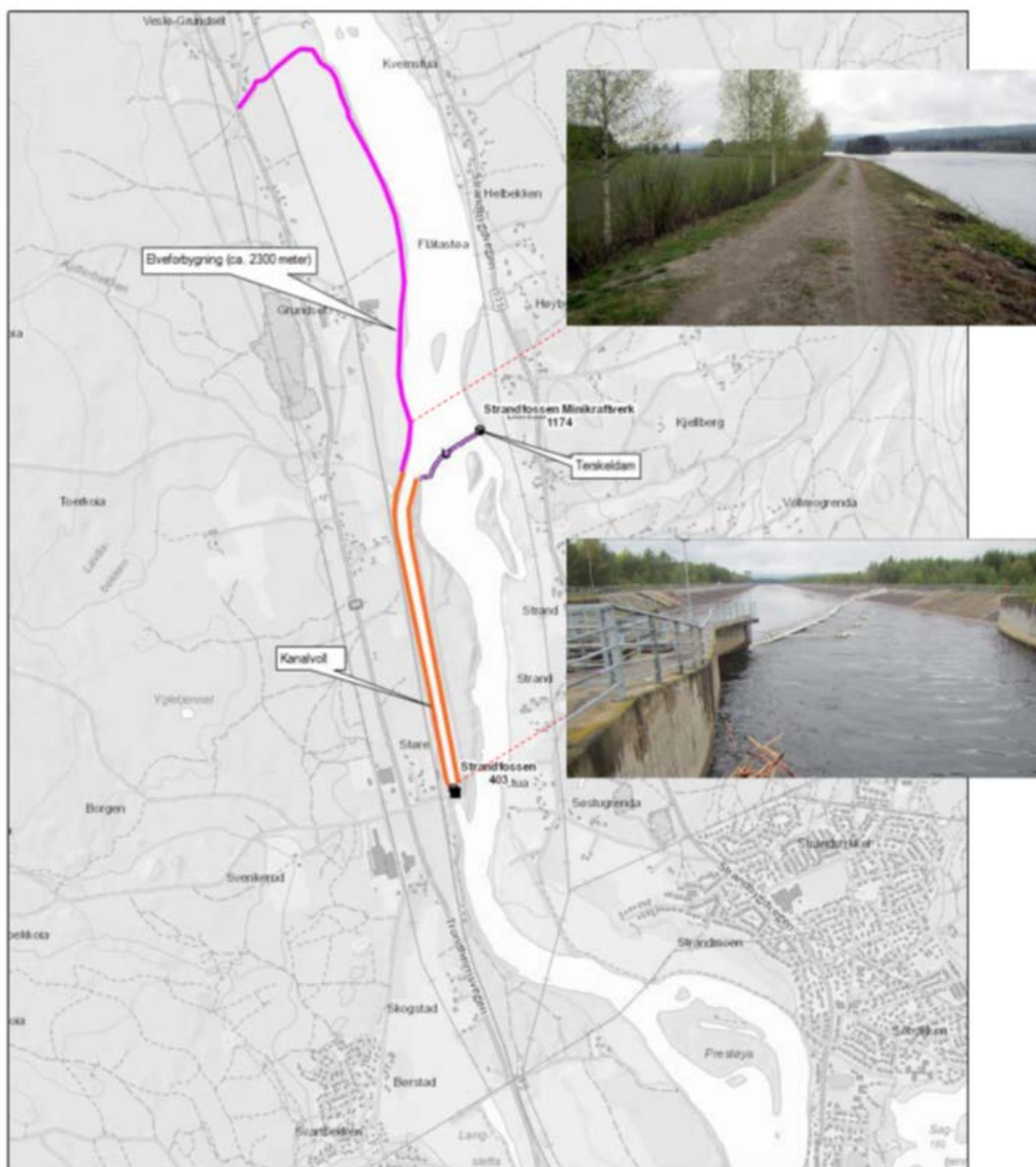
Utløsende årsak	Bruddmekanisme	Type analyse
Flom	Lekkasje gjennom asfalt eller betong som leder til brudd i inntakskanalen	Analysen ble i hovedsak gjennomført på workshopen. Noen av grenene ble ferdigstilt av NGI etter workshopen.
Flom	Overtopping av flomverk, lok. A, som gir erosjon av foten av inntakskanalen og videre brudd i inntakskanalen	Ble gjennomført på workshopen for $Q > Q_{1000}$ og delvis for $Q_{100} \leq Q \leq Q_{1000}$ . NGI ferdigstilte og satte sannsynligheter for øvrige grener.
Flom	Brudd i flomverk, lok. B, som gir erosjon av foten av inntakskanalen og videre brudd i inntakskanalen	Kun Steg1: "Brudd i B" ble gjennomført på workshopen. NGI fullførte analysen (etter samme mønster som treet overfor).
Flom	Som bruddmekanismene over, men med dambrudd oppstrøms Strandfossen (Løpet eller Storsjøen)	Analysen vil være tilsvarende som de som er gjort for flom, men med større vannmengder. For å kvantifisere bruddsannsynligheten forbundet med denne bruddmekanismen må bruddsannsynlighetene for Løpet og Storsjøen estimeres.
Flom i Grundset-bekken og tett kulvert	Strømning og erosjon på utsiden av kanalvollene, erosjon	Analysert av NGI etter workshopen.

Tabell 5. Resultater av hendelsestre-analyser

Initierende hendelse	Bruddmekanisme	$P_f$ årlig (best estimat)
Flom	Lekkasje gjennom asfalt eller betong som leder til brudd i inntakskanalen	$1.4 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
Flom	Overtopping av flomverk, lok. A, som gir erosjon på utsiden av inntakskanalvollene og videre brudd i inntakskanalen	$6.8 \cdot 10^{-4}/\text{år}$
Flom	Brudd i flomverk, lokasjon B, som gir erosjon på utsiden av inntakskanalvollene og videre brudd i inntakskanalen	$7.0 \cdot 10^{-4}/\text{år}$
Flom i Grundsetbekken	Tett kulvert som gjør at vannet renner på utsiden av kanalvollene og eroderer disse.	$2.4 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
<b>Sammenlagt årlig bruddsannsynlighet</b>		$1.4 \cdot 10^{-3}/\text{år}$

I tillegg kan dominobrudd som følge av dambrudd oppstrøms Strandfossen (Løpet eller Storsjøen) analyseres, men da må først bruddsannsynligheten for Løpet og Storsjøen kvantifiseres (Figur 8), noe som er utenfor omfanget av denne analysen. Siden bruddsannsynligheter for dammer normalt er langt lavere enn sannsynligheten for de flomstørrelsene det er beregnet i analysene (hhv. 100-års og 1000-års returperiode), vil denne bruddmekanismen ha langt lavere sannsynlighet enn bruddmekanismene oppsummert i Tabell 5.



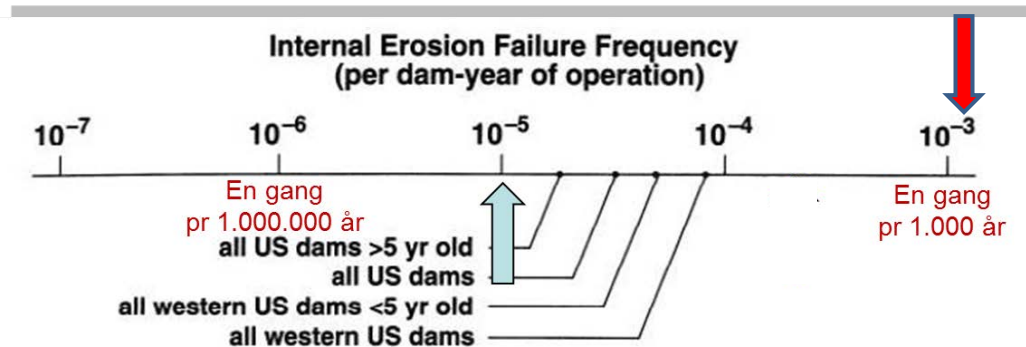


Figur 8. Oversiktskart, med angivelse av flomverket (Elveforbygning). Lokasjon A representerer punkter oppstrøms flomverket (naturtilstand), mens lokasjon B representerer flomverket (Norconsult, 2017).

## 5.2 Diskusjon

Dam Strandfossen kommer ut med relativt høye beregnede bruddsannsynligheter, med høyeste årlig bruddsannsynlighet på  $1.4 \cdot 10^{-3}$ . Brudd i inntakskanalen kan ha kostbare konsekvenser ved dambrudd (Kapittel 6). Sannsynlighetstallene som er beregnet er ikke absolutte verdier, men relative verdier, og mest nyttige for sammenligning. Den beregnede årlige sannsynligheten for Dam Strandfossen er høyere enn den internasjonalt rapporterte bruddfrekvensen for dammer,

basert på publiserte tall og ICOLDs bruddstatistikk. Figur 9 oppsummerer årlig brudd sannsynlighet for fyllingsdammer (for indre erosjon, som er den mest vanlige bruddmekanisme i fyllingsdammer).



Figur 9. Årlig bruddfrekvens for Dam Strandfossen sammenlignet med ICOLDs bruddstatistikk for fyllingsdammer. Rød pil viser den beregnede bruddsannsynlighet for Dam Strandfossen før tiltak, lyseblå pil viser den beregnede bruddsannsynlighet for Dam Strandfossen etter tiltak.

Den relativt høye årlige bruddsannsynligheten skyldes i hovedsak at vollene i inntakskanalen ikke er bygget som en dam. Det er ingen form for steinsetting eller tåsikring. Oppbygging av vollene er i stor grad basert på konsulentens vurdering alene og tilfredsstillende ikke NVEs krav til utforming av fyllingsdammer (Norconsult, 2016b).

Bruddsannsynligheten etter etablering av tiltak er ikke eksplisitt beregnet, men anser til å ligge på ca.  $1 \cdot 10^{-5}$ /år eller lavere (se Kapittel 7) for tiltak som omfatter erosjonssikring av kanalvollene og bygging av damtå.

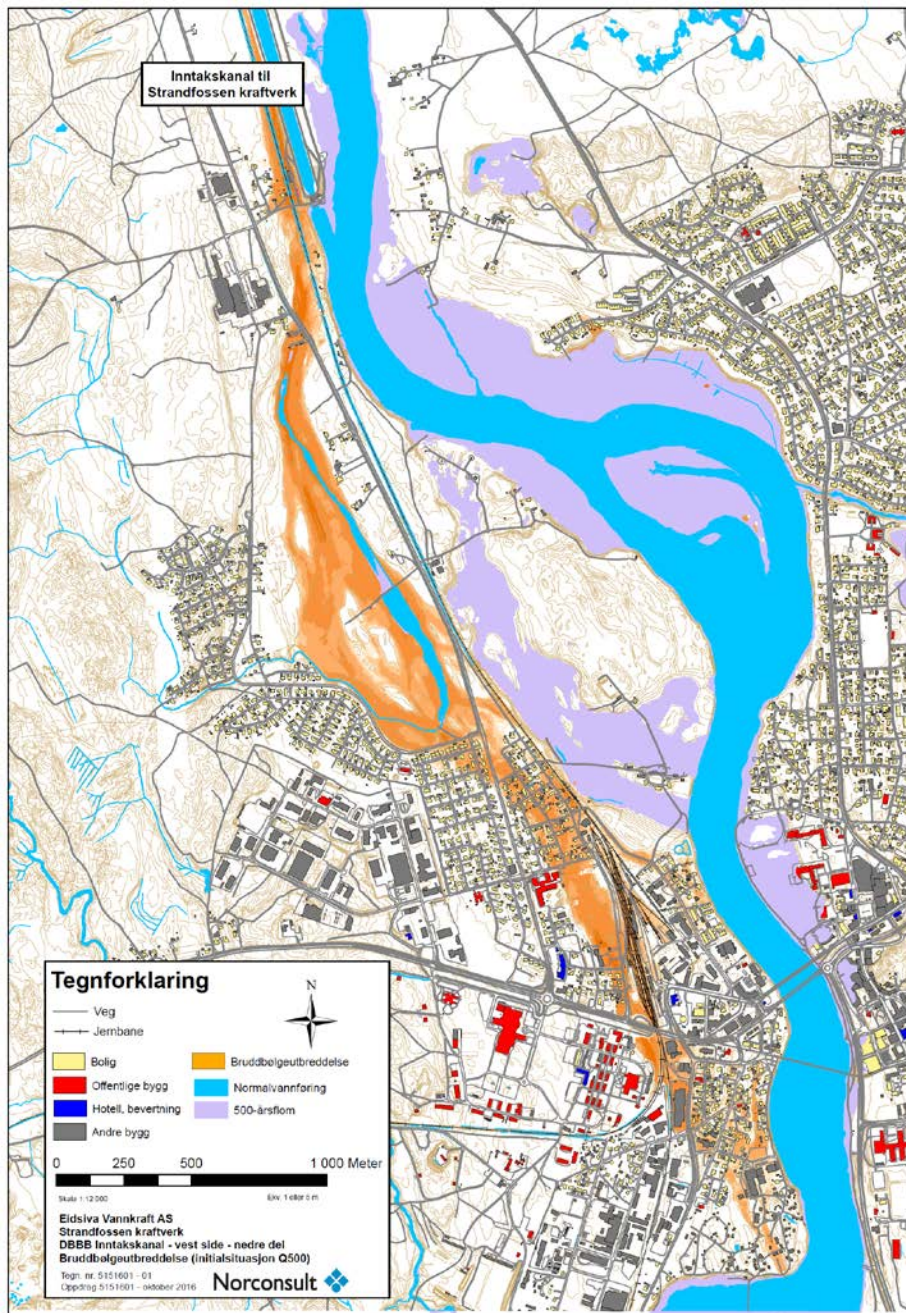
## 6 Konsekvensanalyse

### 6.1 Eksponerte objekter

Ved brudd på inntakskanalen kan inntil 225 boenheter bli berørt, avhengig av hvor i inntakskanalen et brudd oppstår og av initialsituasjon (middelflom eller 500-årsflom). Riksvei 3 og Rørosbanen kan bli berørt.

### 6.2 Intensitet av dambruddbølgen

En oversikt av det berørte området ved brudd på den nederste delen av inntakskanalen er vist i Figur 10. Av de berørte boenheter vil inntil 140 ha en vannstandstigning på over 0,25 m.



Figur 10. Oversvømt areal ved dambrudd i nedre del av inntakskanal til Strandfossen kraftverk (initialsituasjon 500-års flom), Norconsult (2017).

### 6.3 Konsekvenser i form av liv og helse

De største konsekvensene fås ved brudd i nedre del av inntakskanalen, da vil 140 boenheter i Elverum bli utsatt for vannstandsstigning over 0.25 m. Vannstandsstigning kombinert med strømningshastigheten er det som er kritisk med tanke på tap av liv. Dambruddbølgeberegningene (Vedlegg A) gir strømningshastighet på så mye som 6 m/s eller ca 22 km/t.

For å beregne konsekvensene uttrykt ved potensielt antall omkomne må antall eksponerte personer og intensitet av vannutslippet (hastighet og strømningsdybde), benyttes. For å beregne antall eksponerte personer benyttes antall boenheter, samt gjennomsnittlig antall personer per boenhet i Norge (2,2 personer per boenhet). Antall eksponerte personer er lik antall boenheter x 2,2 personer per boenhet, dvs. 308 personer. Antall omkomne vil derimot være betydelig mindre enn antall eksponerte.

For beregning av antall omkomne tas det utgangspunkt i kurvene i Figur 11. For å kunne anvende Figur 11 trenger man beregne gjennomstrømnings volum per sekund og per meter flombredde, Q/W i Figur 11. Tabell 6 gir verdiene av Q/W for vannstigning 0.1 til 1 m. Ved bruk av Figur 11 og Tabell 6, er beregnet antall omkomne et maksimum på 3, som vist i Tabell 7. Det er et stort område som må fylles med vann før vannutslippet går mot bebyggelsen og dette gir tid for varslings.

Tabell 6 Beregning av Q/W (parameter fra Figur 11) som funksjon av vannstandsstigning

Vannstandsstigning (m)	Gjennomstrømnings volum per sekund og per meter flombredde* (Q/W i Figur 11)
0.1	0.6 m <sup>2</sup> /s
0.25	1.5 m <sup>2</sup> /s
1	6 m <sup>2</sup> /s

\* Strømningshastigheten antas som 6 m/s (ca. 22 km/t), basert på dambruddbølgeberegningene (Vedlegg A)

Tabell 7 Beregnet antall tapte liv fra Figur 11 og Tabell 6

Maksimalt antall tapte liv: 1%	
Eksponeerte	Antall omkomne
308	<3

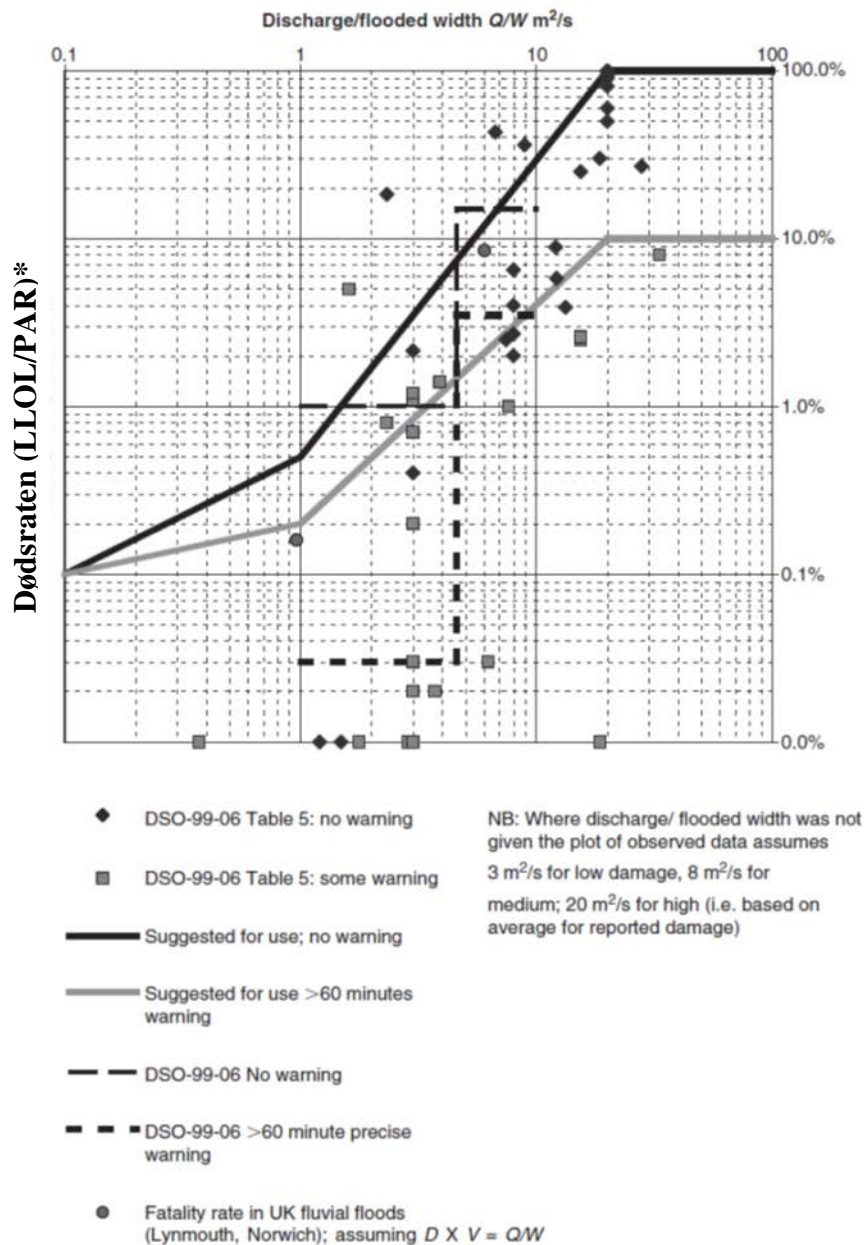
## 6.4 Konsekvenser i form av materielle tap

For beregning av skader forårsaket av dambruddbølgen må en kombinasjon av hastighet og dybden av strømmen inngå som inngangsparameter, Brown and Gosden (2004). Skader forårsaket av dambruddbølgen er foreslått å beregnes etter Tabell 8.

Ut fra Tabell 8 vil samtlige bygninger med D x V mindre enn 3m<sup>2</sup>/s ikke få strukturelle skader, men kun bli oversvømt. Samtlige eksponerte boliger vil havne i denne kategorien, D x V er beregnet til 1.5m<sup>2</sup>/s for flomdybde 25 cm i Tabell 6. De materielle kostnadene vil da være knyttet til utbedring av/forhindring av vannskader, vann i kjellere o.l.

Tabell 8. Bygningsødeleggelse fra bølgehastighet og -dybde (oversatt fra Brown and Gosden, 2004)

Skade på bygninger	V: gjennomsnittlig hastighet; D: punkt dybde
Ingen skade	Dambruddbølgen er helt innenfor strømningskanalen
Kun oversvømmelse	V < 2m/s eller D x V < 3m <sup>2</sup> /s
Strukturelle skader	V > 2m/s og 3m <sup>2</sup> /s < D x V < 7m <sup>2</sup> /s
Full ødeleggelse	V > 2m/s og D x V > 7m <sup>2</sup> /s



Figur 11. Sammenheng mellom omkomne og fluks av vannutslippet (Brown and Gosden, 2004) (\*LLOL=Sannsynlig antall omkomne etter brudd; PAR=Befolkning i fare, hvis dam brudd inntreer)

## 7 Identifisering og evaluering av risikoreduserende tiltak

Diskusjonen om tiltak for Dam Strandfossen gikk både på identifisering og vurdering av effekter av tiltak. For å kvantifisere effekten av de sannsynlighetsreduserende tiltakene kan det vurderes hvordan sannsynlighetene for enkelthendelsene i hendelsestreet påvirkes. Videre benyttes disse som input for å beregne hvordan brudds sannsynligheten påvirkes. De aktuelle

tiltakene har imidlertid også andre effekter enn påvirkning av sannsynlighet for enkelthendelser. Det ble derfor gjort en kvalitativ vurdering av tiltakene og deres effekter på bruddsannsynlighet, på bruddkonsekvenser og andre effekter. Resultatet av dette arbeidet er oppsummert i Tabell 9 (for forebyggende tiltak) og Tabell 10 (for akutte tiltak). Hvert tiltak har en risikoreduserende effekt, enten ved reduksjon på bruddsannsynlighet og/eller på bruddkonsekvensene.

Samtlige tiltak i Tabell 9 og Tabell 10 innebærer enten en reduksjon i bruddsannsynlighet eller en reduksjon i bruddkonsekvenser, derfor vil samtlige av tiltakene være risikoreduserende. Imidlertid kan noen av effektene som nevnt i kolonnen "Andre effekter" ha negative konsekvenser og disse må inkluderes ved gjennomføring av en kost-nytte analyse av tiltakene.

## 8 Risikoanalyse

Flere land stiller krav til eller har retningslinjer for sikkerhet for mennesker som potensielt kan bli berørt av et dambrudd, i form av eksplisitte og tallfestede risikoakseptkriterier. For risiko som uttrykker menneskelige tap, skilles det mellom 'individuell risiko' og 'samfunnsmessig risiko':

Med 'individuell risiko' menes sannsynligheten for at et individ mister livet som følge av faren i løpet av en referanseperiode (vanligvis ett år). Den individuelle risikoen innebærer altså en risikoøkning som kommer i tillegg til den underliggende sannsynligheten for å miste livet, dersom faren ikke eksisterte. Grensen for individuell risiko formuleres som en årlig sannsynlighet. I Norge finnes det ikke slike grenser, men  $10^{-3}/\text{år}$  er en mye brukt øvre grense for akseptabel individuell risiko i utlandet og i offshore industrien.

Risiko for flere dødsfall under én samme hendelse 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. I Norge finnes det ikke grenser for samfunnsmessig risiko, men  $10^{-4}/\text{år}$  er en mye brukt øvre grense for akseptabel risiko for 10 dødsfall i utlandet og i offshore industrien i Norge. Figur 12 angir sannsynligheten på  $10^{-5}/\text{år}$  å være øvre grense for tolerabel risiko for 100 dødsfall og  $10^{-6}/\text{år}$  for 1000 dødsfall.

Den totale risiko uten tiltak for Dam Strandfossen (dvs. inntakskanalen) er vist med den røde ellipsen (bruddsannsynlighet på ca.  $10^{-3}/\text{år}$  og antall omkomne på 3). Med bygging av sperredam, reduseres ikke bruddsannsynlighet, men antall omkomne reduseres til antagelig null omkomne (oransje sirkel). Ved erosjonssikring og bygging av damtå for inntakskanalvollene reduseres både årlig bruddsannsynlighet og antall omkomne (grønn ellipse, den er noe for stor i Figur 12, men tegningen er for illustrasjonsformål). Kontinuerlig overvåking av grunnvannsbrønnene langs kanalen kombinert med etablering av grenseverdier reduserer både bruddsannsynlighet og bruddkonsekvenser og vil også tilsvare den grønne ellipsen.

Tabell 9. Gjennomgang av forebyggende tiltak og effekter av disse på bruddsannsynlighet og konsekvenser,

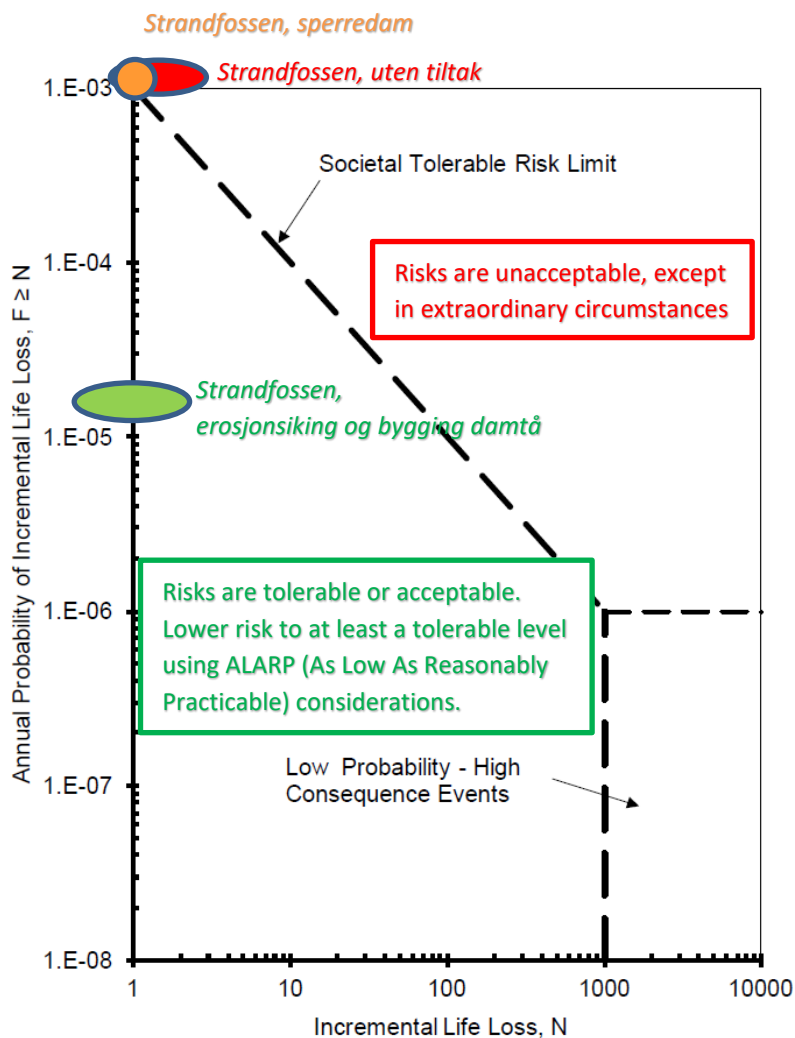
Forebyggendetiltak	Effekt på bruddsannsynlighet	Effekt på konsekvenser	Andre effekter eller kommentar
Kontinuerlig overvåkning av grunnvannsbrønnene langs kanalen (og ved Grundsetbekken) kombinert med etablering av grenseverdier.	Lekkasjer oppdages tidlig. Tidlig varsling gjør at tiltak kan iverksettes, hvilket reduserer bruddsannsynligheten	Forbedret mulighet for varsling av f.eks. jernbanen reduserer konsekvenser. Jernbanen er mest kritisk for tap av menneskeliv.	---
Sperredam sør for kraftverket.	Ingen	Eliminerer konsekvensene for Elverum sentrum.	Sperredammen kan derimot føre til reaksjoner i lokalbefolkningen og kan komme i konflikt med fremtidig ny vei til Trysil utenom Elverum sentrum, men dette avhenger av valg av tracé.
Erosjonssikring av kanalvollene: etablere nedgravd erosjonssikring langs kanalen, med grøft som gir stabilitet i overgangen mellom terreng og skråning og bygge damtå. Damtå vil antagelig tåle mer enn 15m <sup>3</sup> /s.	Reduserer bruddsannsynlighet i inntakskanalen (overtopping av eller brudd i flomverk); reduserer alle sannsynligheten; reduserer totale bruddsannsynlighet til < 10 <sup>-5</sup> /år	Reduserer konsekvenser	Erosjonssikringen vil gi økt motstand mot erosjon både langs kanalen (ved strømming langs kanalen) og på tvers av kanalen (ved sprekker i asfalt og betong og lekkasje under kanalvollen).
Etablere sperredam ved Grundsetbekken, 1- 1,5 m høy for struping vannmengde i elveløpet. Pumpene som pumper vann tilbake fra jordene stoppes.	Reduserer vannmengden og erosjonssannsynlighet; reduserer sannsynligheten for grunnbrudd og brudd i flomverket.	Reduserer ikke konsekvensene ved brudd i inntakskanal; sperredam kan føre til at gårder settes under vann og/eller at det kommer vann i kjellerne.	Hvis sperredam skulle ryke, kan vannmengdene plutselig blir større. Sperredammen må derfor konstrueres robust. (Dette er et tilleggstiltak, som fortsatt er på idé-stadiet. Nødvendig vannstands nivå må beregnes).
Ta prøver mht. aldringsprosessen i asfalten.	Reduserer sannsynlighet for lekkasje.	---	Tiltak kan iverksettes ved alderdomsslitasje.
Jevnlige inspeksjoner av kulvert som tar unna vannet fra Grundsetbekken.	Reduserer bruddsannsynligheten for tett kulvert og at vann fra Grundsetbekken renner	---	---

Forebyggendetiltak	Effekt på bruddsannsynlighet	Effekt på konsekvenser	Andre effekter eller kommentar
	langs og eroderer inntaks-kanalen. Reduserer bruddsannsynligheten for denne mekanismen.		
Undersøke setninger i flomverket (i fastpunkter) ved å kartlegge med GPS, drone.	Kan redusere bruddsannsynlighet gjennom iverksetting av tiltak.	---	---
Bruke melk/fargestoff for å oppdage lekkasjer ved dykkeroppdrag for asfaltinspeksjon. Spraye i overgangen betong asfalt.	Kan redusere sannsynlighet gjennom iverksetting av tiltak	---	---
Nødoverløp på innsiden av mini-kraftverket (som alternativ til "fuse plug"). Større flomavledning.	Reduserer vannstanden i kanalen. Øker stabilitet i flomvollen, nedre del.	---	Større flomavledning lages permanent.

Tabell 10. Gjennomgang av akutte tiltak og effekter av disse på bruddsannsynlighet og konsekvenser.

Akutte tiltak	Effekt på bruddsannsynlighet	Effekt på konsekvenser	Andre effekter
"Fuse plug", med sprengning hvis $Q > Q_{1000}$	Reduserer sannsynlighet for brudd i nedre del av flomvollen.	Oversvømmelse av jorde; fiskebekk vil bli ødelagt; små kostnader for gjenoppbygging i ettertid.	---
Sprengning av luker som ikke fungerer eller har kilt seg (lav sannsynlighet for at klappeluker kiler seg).	---	---	---





Figur 12. Anbefalte USA risikoakseptkriterier for samfunnsmessig risiko (modifisert fra USACE; 2014), og situasjonen for Dam Strandfossen (rød, oransje og grønn ellipser).

## 9 Konklusjoner

Risikovurderingene fører til de følgende observasjonene og konklusjonene:

- Det er relativt høy sannsynlighet for brudd i dam-systemet, sammenliknet med internasjonal statistikk og sannsynlighetene beregnet for andre norske dammer.
- Den mest kritisk bruddmekanisme er brudd i flomverk som fører til erosjon og brudd i inntakskanalen.
- Utfra potensielle konsekvenser er inntakskanalen plassert i konsekvensklasse 4. Inntakskanalen tilfredsstiller ikke NVEs krav til utforming av fyllingsdammer. Rehabilitering og utbedringer er påkrevd.
- Det blir hovedsakelig materielle tap ved dambrudd, derfor er risiko med hensyn til tap av menneskeliv veldig nært tolerabel, selv uten tiltak. Materielle skader vil være

relatert til vannskader (ikke strukturelle skader på bygninger). I tillegg vil brudd i inntakskanalen gi store økonomiske tap og tap av omdømme for Eidsiva.

- Ved en drøfting av risikoreduserende tiltak er erosjonssikring og bygging av damtå for inntakskanalvollene det mest effektive tiltaket for å redusere brudds sannsynlighet i dam-systemet. De foreslåtte tiltakene vil redusere risikoen betydelig, ned til en brudds sannsynlighet trolig under  $10^{-5}$ /år.

## Acknowledgment

NGI takker workshopdeltagerne for deres bidrag til analysene. NGI ønsker også å takke Eidsiva for tillatelse til å bruke Dam Strandfossen i analysen.

## Referanser

- Brown and Gosden (2004). Interim guide to quantitative risk assessment for UK reservoirs. Thomas Telford Publishing, London, ISBN 0 7277 3267 6.
- Høeg, K. (1996). Performance Evaluation, Safety Assessment and Risk Analysis for Dams. Hydro-power and Dams. 6(3): 8 pp.
- NGI (2016). Dam sikkerhet i et helhetlig perspektiv. "State-of-the-Art" om risikoanalyser for dammer. NGI rapport til Energi Norge. Rapportnr 2015 0624-01-R. 2016-06-01.
- NGI(1996) Brudd i flomverk langs Glomma. Geoteknisk analyse og vurdering. Rapportnr. 950058-2, 1. juli 1996.
- Norsk Vandbygningsskontor (1978). Tegninger.
- NVK Vandbygningsskontoret (2000). Strandfossen kraftverk. Skader og årsaker til skader høsten 1999, versjon 1, 2000-06-14.
- Norconsult (2016a). Flomberegning for midtre Glomma Strandfossen, Skjefstadfoss, Braskereidfoss, Kongsvinger. Oppdragsnr. 5155374, Dok.nr. 1, Rev. 0. 2016-12-14.
- Norconsult (2016b). Dambruddsbølgeberegninger inntakskanal Strandfossen kraftverk, Vest side. Oppdragsnr 5151601, Dokument nr. 01, Rev. 02, 12. oktober 2016.
- Norconsult (2017). Dambruddsberegning for flomvoll ovf. Strandfossen krv. Oppdragsnr. 5151601, Dokumentnr. 0, Ver 2. 2017-05-08.
- USACE (2014). Engineering and Design. Safety of dams – policy and procedures, Department of the Army. Engineering Report ER 1110-2-1156. US Army Corps of Engineers. Washington, DC. 31 March 2014.
- Vick, S. (2002). *Degrees of Belief. Subjective Probability and Engineering Judgment*. ASCE Press. 405 pp.

# Vedlegg A

## DAM STRANDFOSSEN

### Innhold

<b>A1 Innledning</b>	<b>2</b>
A1.1 Formål med risikoanalysene	2
<b>A2 Dam Strandfossen</b>	<b>2</b>
A2.1 Damanlegget	2
A2.2 Nøkkeldata for Dam Strandfossen og inntakskanalen	4
A2.3 Inntakskanalen	4
A2.4 Tidligere hendelser og skader	8
<b>A3 Beregninger og analyser</b>	<b>8</b>
A3.1 Flomberegninger	8
<b>A4 Konsekvensanalyser</b>	<b>9</b>
A4.1 Eksponerte objekter	9
A4.2 Dambruddsbølgeberegninger for elveforbygningen oppstrøms inntakskanalen	9
A4.3 Dambruddsbølge beregninger for inntakskanalen til Strandfossen kraftverk	11
<b>A5 Inspeksjoner og målinger på Dam Strandfossen</b>	<b>13</b>
<b>A6 Potensielle tiltak</b>	<b>16</b>
<b>A7 Kilder</b>	<b>16</b>

## A1 Innledning

Dokumentet oppsummerer generelle forhold rundt Dam Strandfossen. Dokumentet har til hensikt å fungere som en introduksjon og gi nyttig bakgrunnskunnskap til workshop'en 'Risikovurdering av Dam Strandfossen'.

### A1.1 Formål med risikoanalysene

Analysene sikter mot å vurdere risikoen forbundet med brudd i damanlegget ved Strandfossen og å identifisere de mest kritiske bruddårsaker og bruddmekanismer. Formålet er både å gjøre en risikovurdering og å vurdere risikoreducerende tiltak:

- Risikovurdering av brudd i inntakskanalen
- Risikovurdering av dammen
- Vurdering av risikoreducerende tiltak:
  - Vurdering av tiltak ved damområdet for å redusere brudds sannsynligheten.
  - Vurdering av tiltak for overvåkning.
  - Vurdering av alternative tiltak utenfor damområdet for å redusere bruddkonsekvenser.

## A2 Dam Strandfossen

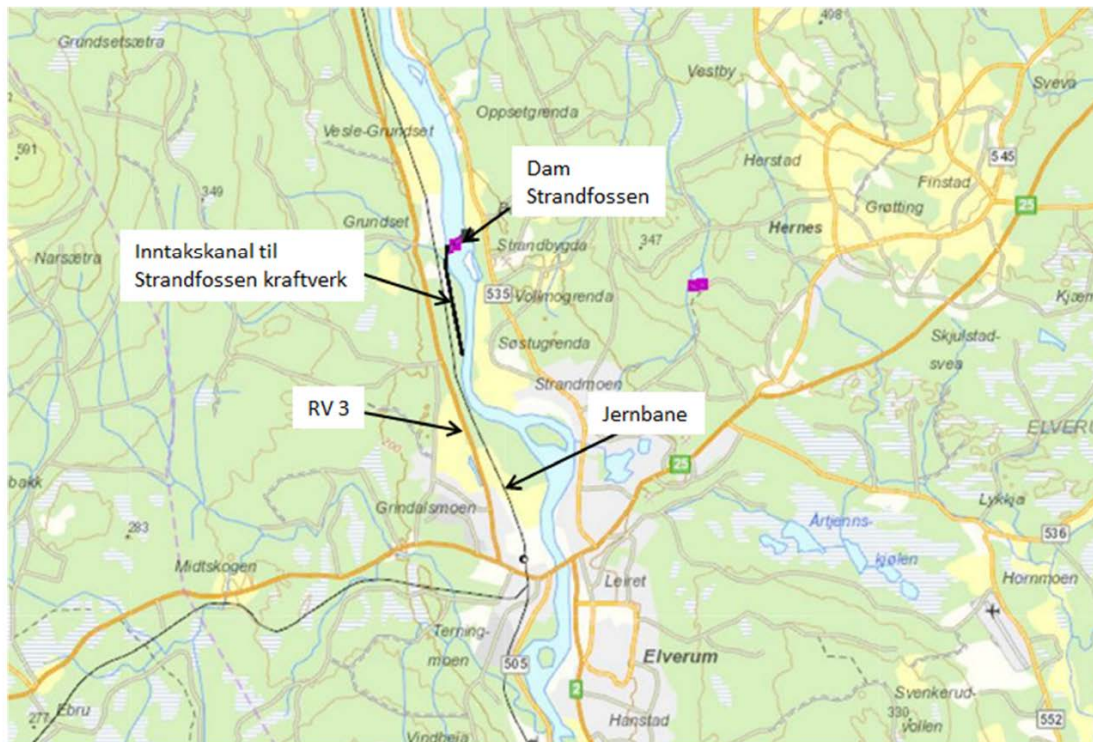
### A2.1 Damanlegget

Dam Strandfossen ligger i Glommavssdraget i Elverum kommune (Figur A1). Inntaksdam hever vannstanden i Glomma og danner inntaket for Strandfossen kraftverk. Inntaket befinner seg i enden av en 1,5 km lang inntakskanal (nivåkanal) på vestsiden av Glomma, ved Strandfossen, ca. 4 km nord for tettstedet Elverum. Samlet slukeevne i stasjonen er 240 m<sup>3</sup>/s. Nedenfor kraftverket føres vannet tilbake til elven via en avløpskanal.

Det oppnås en fallhøyde på 13 meter fra Bånerudfossen til Velta nedenfor Strandfossen (Figur A2). Strandfossen kraftverk ble bygget i perioden november 1977 til juni 1980. Kraftverket ble satt i drift sent i desember 1979 og eies av Eidsiva Vannkraft AS.

Damanlegget består av et overløp med lave klappeluker og to større klappeluker.

Inntakskanalen ligger i breelavsatte sand- og grusmasser. Det meste av kanalen ligger over nåværende grunnvannstand og utgravd masse er benyttet i vollene. Selve kanalen er kledd med en 20 cm tykk asfaltmembran som består av 10 cm bærelag av asfaltgrus og 10 cm tettlag av asfalt betong. Oppe ved inntaksdammen og nede ved inntaket til kraftstasjonene er kanalen kledd med betongplater. Selv kraftstasjonen er fundamentert på fjell.



Figur A1. Beliggenhet til Dam Strandfossen og inntakskanalen (Norconsult, 2016b).



Damanlegget

Tilløpskanalen

Figur A2. Foto over damanlegget og inntakskanalen for dam Strandfossen (Norconsult, 2016a).

## A2.2 Nøkkeldata for Dam Strandfossen og inntakskanalen

Nedbørsfelt	15400,4 km <sup>2</sup>
Damkrone	195,50 moh
Lengde damkrone	4200 m
Overløp	192,05 moh
Overløpslengde	330 m
Samlet lengde klappeluker	47 m
Konsekvensklasse, dam	0
Konsekvensklasse, inntakskanal	4
Konsulent	Norsk vannbygningskontor (NVK)

Langs inntakskanalen varierer konsekvensene betydelig med stedet hvor et eventuelt brudd inntreffer. Tabell A1 gir dimensjoner og byggeår for dammen og inntakskanalen.

Tabell A1. Dimensjoner og byggeår Dam Strandfossen

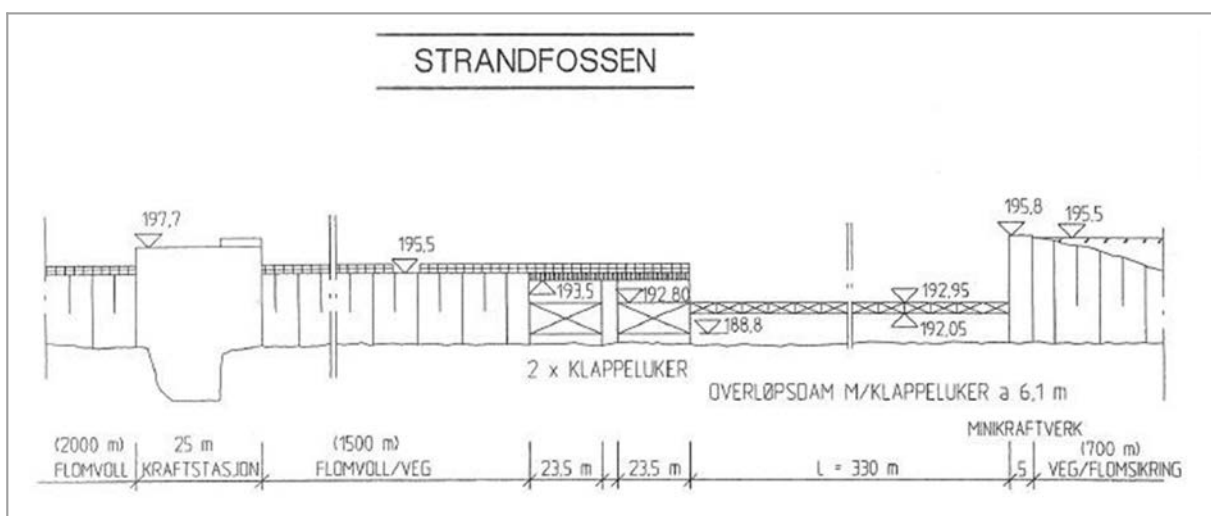
Dimensjon/byggeår	Dam Strandfossen	Inntakskanal
Høyde	5 m	Inntil 6 m
Lengde	370 m	2 m x 1450 m
Byggeår	1977-1980	1977-1980

Total overløpslengde med de små klappelukene nede er ca. 330 m på kote 192,05. De to store klappelukene har en samlet lengde (lysåpning) på 47 m med terskel på kote 188,80, men når lukene ligger nede er terskelen på kote 189,00. Damanlegget har også et minikraftverk for tapping av minstevannføring, som dekker en lengde av 5 m med tak på kote 195,80. Damkronen eksklusive overløp, klappeluker og minikraftverk er 4200 m lang på kote 195,50. Denne består vesentlig av flomvoller oppstrøms damanlegget og langs inntakskanalen til kraftverket. Det går ikke gangbru over overløpet med de lave klappelukene, men det går en 170 cm tykk gangbru med overkant på kote 195,50 rett nedstrøms for de to store klappelukene. Dammen er plassert i bruddkonsekvensklasse 0. Figur A3 gir en stilisert tegning av Dam Strandfossen

## A2.3 Inntakskanalen

Inntakskanalen er ca. 1 500 m lang og har voll på begge sider. Beliggenheten til inntakskanalen er vist i Figur A1. Vollene består av fyllmasser med 2 lag asfaltdekke med samlet tykkelse 20 cm som tetning på vannsiden.

Toppen av vollen ligger på kote 195,5. På den vestre bredden ligger toppen av vollen mellom 3 og 6 meter over terrengnivå, med lavere høyder mot oppstrøms enden av kanalen. Kanalen er trapesoide-formet med sidehelning 1: 2 (V: H). Dimensjonene på kanalen varierer som vist i Tabell A2.



Figur A3. Stilisert damtegning Strandfossen (Norconsult, 2016a).



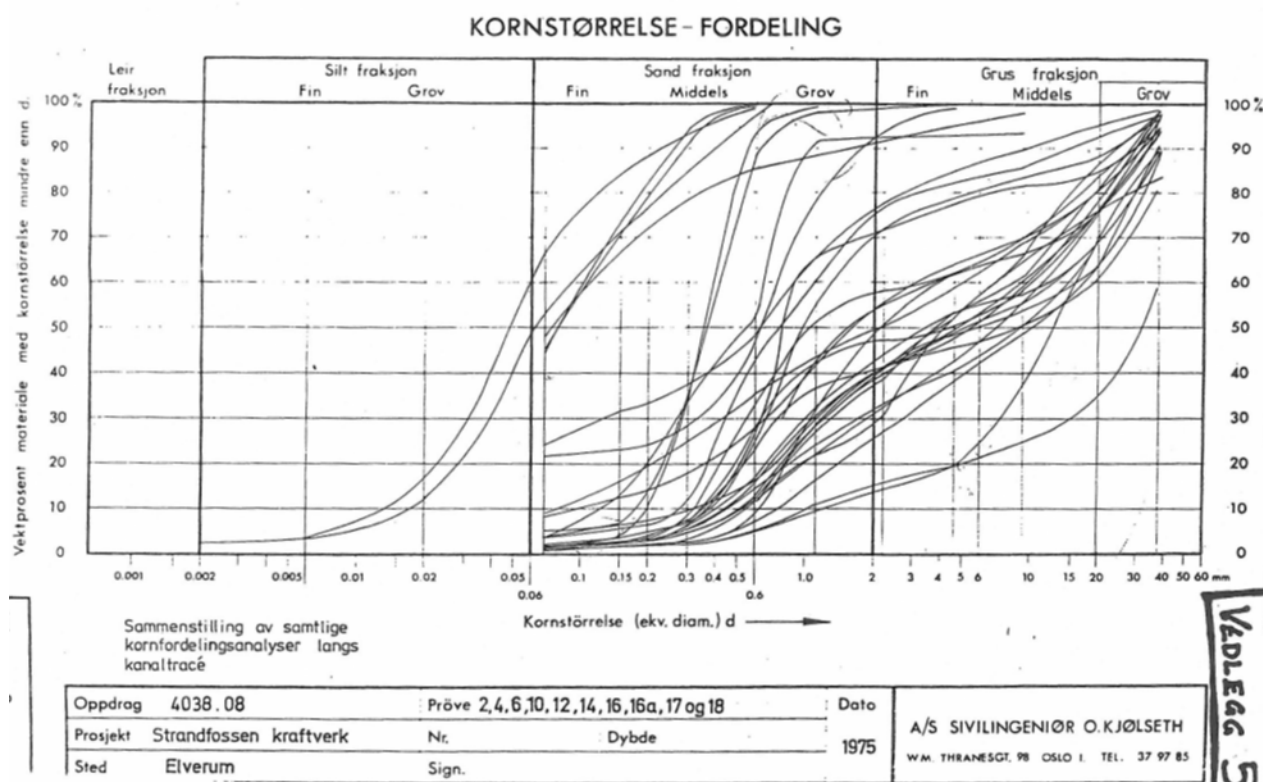
Figur A4. Inntakskanalen sett medstrøms (Norconsult, 2016b).

Kanalen (Figur A4) er bygget ved utgraving i løsmasser og opplegging av voll. Vollene er stort sett bygget av stedlige utgravde masser, bestående av grus og silt. Kornfordeling fra prøvegrep i området er vist i Figur A5. Det er ingen form for steinsetting eller tåsikring. Oppbygging av vollene tilfredsstiller ikke NVEs krav til utforming av fyllingsdammen (Norconsult, 2016b). Design av vollene er i stor grad basert på konsulentens vurdering alene. Konsulent var Norsk Vandbyggningskontor (NVK).

Tabell A2. Dimensjoner til inntakskanal (Norconsult, 2016b)

Strekning	Bunnkote og fall	Bunnbredde (m)	Kote bunnen av vollen (luftsiden, moh)	Voll høyde (m)
Pel 1518 - 1061 <sup>1</sup>	188,70 – 188,31 (0,00085)	44,10 – 36,10	192,5 – 192,5	3,0
Pel 1061 - 471 <sup>1</sup>	188,31 – 185,81 (0,00424)	36,10 – 13,10	192,5 – 191,8	3,0 – 3,7
Pel 471 – 81,5	185,81 – 185,81 ( - )	13,10 – 13,10	191,8 – 189,5	3,7 – 6,0

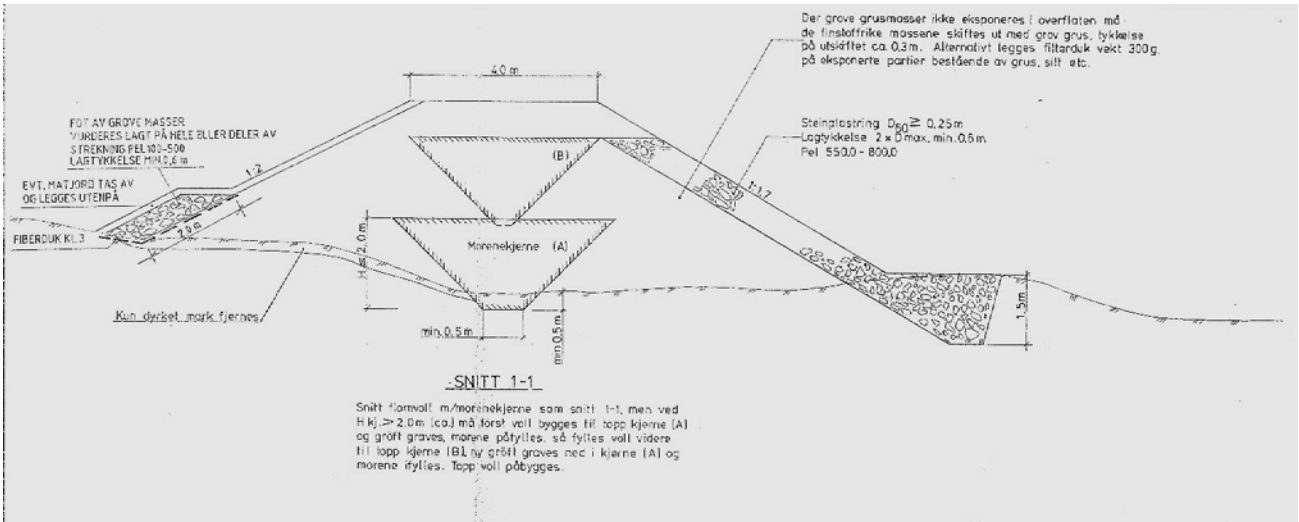
<sup>1</sup> Bunnen og bunnbredden varierer jevnt mellom angitte Pel.



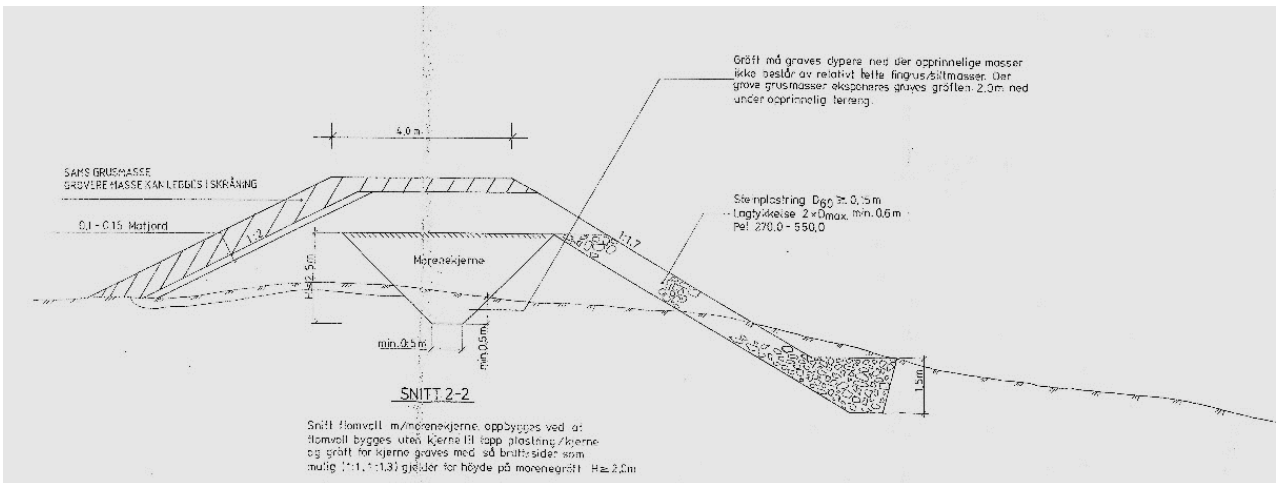
Figur A5. Kornfordeling fra prøvegrøp i området (NVK Vandbygningskontoret, 2000)

Oppstrøms Strandfossen, i ca 2.5 km lengde, er det etablert flomverk/flomvoller. Skisser av oppbygningen av flomvollene er vist for tre snitt i Figur A6 – A8.

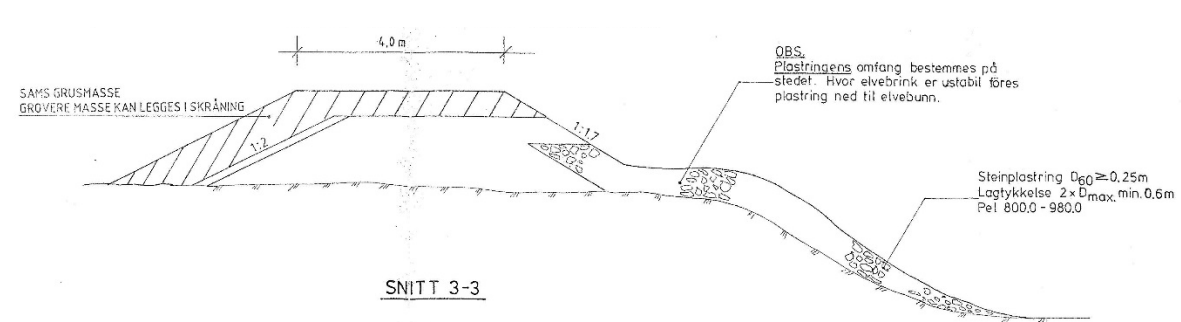




Figur A6. Skisse, snitt 1-1, av oppbygning av flomvoll (Norsk Vandbygningkontor, 1978). Fot av grove masser (illustrert til venstre i figuren) ble vurdert lagt på, men dette har ikke blitt utført.



Figur A7. Skisse, snitt 2-2, av oppbygning av flomvoll (Norsk Vandbygningkontor, 1978).



Figur A8. Skisse, snitt 3-3, av oppbygning av flomvoll (Norsk Vandbygningkontor, 1978).

## A2.4 Tidligere hendelser og skader

Høsten 1999 oppsto det store hull i asfaltmembranen i inntakskanalen ved Strandfossen kraftstasjon. Stasjonen ble stengt, inntakskanalen tømt og det ble gjennomført omfattende reparasjoner. Årsaken til skadene var de store påkjenningene kraftverket ble utsatt for i forbindelse med flommen i 1995. Finstoff i overgangen mellom tilbakefylte masser og naturlig grunn ble utvasket. Dette medførte at det sannsynligvis oppsto innsynkninger i bunnen av nordre del av tømmerløpet og asfaltkanten. Disse innsynkningene førte til mindre sprekker og riss (NKV Vandbygningkontoret, 2000). Etter flommen har infiltrasjonen gjennom disse små sprekke ført til en gradvis utvasking og indre erosjon av massene (i ettertid bl.a. observert som innsynkninger vest for tømmerløpet). Denne prosessen har pågått inntil strekkspenningene i 1999 ble så store at det ble dannet store hull og sprekker flere steder i kanalen og i inntaket.

## A3 Beregninger og analyser

### A3.1 Flomberegninger

De regionale flomformlene vanligvis skiller mellom vår- og høstflommer. Dette vurderes ikke som nødvendig i dette området, da forskjellen mellom årsflom og vårflom er ubetydelig. I gjennomsnitt er årsflommene og vårflommene ca. 45 % større enn høstflommene (Norconsult, 2016a). Dimensjonerende flom (1 000-års flom) for anlegget ble fastlagt av NVE, Hydrologisk avdeling, til 3 400 m<sup>3</sup>/s da anlegget ble dimensjonert og designet. Dette gir en vannstand i kanalen på kote 194. Etter flommen i 1995 ble 1 000-års flommen beregnet til 3 700 m<sup>3</sup>/s, basert på flomfrekvensanalyser på nesten 100 år med data fra målestasjonen ved Elverum (NVK Vandbygningkontoret, 2000). Flomstørrelsene ble beregnet ved bruk av Gumbel-fordelingen (Norconsult, 2016a). Tabell A3 og A4 viser resultatet fra analysene. Tabell A4 gir kulminasjonsverdier for ulike gjentaksintervall med og uten tilpassede kapasitetskurver og omløpsluker.

Tabell A3. Endelige verdier for 500- og 1 000-årsflom (Norconsult, 2016a).

Damsted	Q <sub>1000</sub> <sup>døgn</sup> (l/s/km <sup>2</sup> )	Q <sub>1000</sub> <sup>døgn</sup> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>1000</sub> <sup>maks</sup> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>500</sub> <sup>maks</sup> (m <sup>3</sup> /s)
Strandfossen	240	3696	3807	3540

Tabell A4 Kulminasjonsverdier for ulike gjentaksintervall for forskjellige kapasitetskurver og omløpsluker (Norconsult, 2016a).

Damsted	Gjentaks- intervall flom	HRV (m)	Tilløp=avløp (m <sup>3</sup> /s)	Kapasitetskurve fra beregninger	Kapasitetskurve tilpasset modellforsøk
Strandfossen	Q <sub>500</sub>	192,75	3540	194,38	194,23
(KKlasse 1)	1,5xQ <sub>500</sub>	---	5311	195,24	195,00

## A4 Konsekvensanalyser

Det er utført dambruddsbølgeberegninger for brudd i elveforbygningen oppstrøms inntakskanalen og for brudd på tre forskjellige steder langs inntakskanalen. Mest kritisk vil et dambrudd i nedre del av inntakskanalen være og områder helt inn i Elverum sentrum vil kunne oversvømmes. For denne situasjonen ligger antall berørte boenheter nær grensen mellom konsekvensklasse 3 og 4. Ved brudd på den midterste delen ligger konsekvensene innen klasse 3. Ved brudd på den øverste delen ligger konsekvensene innen klasse 2.

### A4.1 Eksponerte objekter

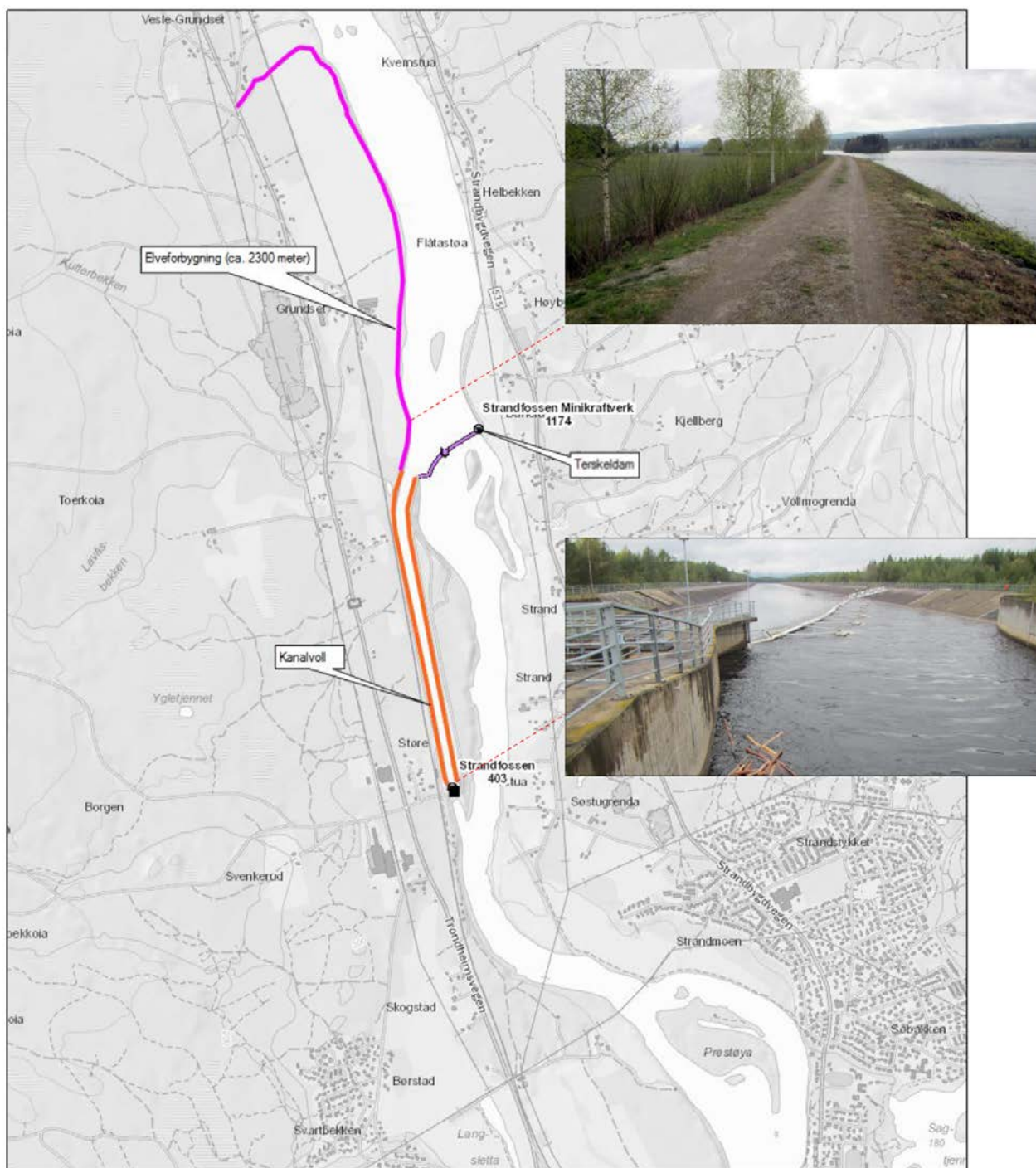
Ved brudd på inntakskanalen kan inntil 225 boenheter bli berørt, avhengig av hvor i inntakskanalen et brudd oppstår og av initialsituasjon (middelflom eller 500-årsflom). Av de berørte boenheter vil inntil 140 ha en vannstandstigning på over 0,25 m. Riksvei 3 og Rørosbanen kan bli berørt.

### A4.2 Dambruddsbølgeberegninger for elveforbygningen oppstrøms inntakskanalen

Elveforbygningen ovenfor inntakskanalen har en lengde på ca. 2300 meter (Figur A9). Langs hele denne strekningen er vannstanden i Glomma under flom høyere enn terrengnivået på utsiden. Et brudd i elveforbygningen vil derfor gi vannstrømning ut i terrenget og nedover i terrenget parallelt med elva. Forsenkningen mellom jernbanen og den vestre flomvollen vil i hovedsak bli strømningsvei for dette vannet, men hvis utstrømningen fra bruddåpningen blir stor nok kan også jernbanelinja rammes.

Dambruddene ble simulert med  $Q_{1000}$  som initialsituasjon, og for to alternative bruddforløp med hhv. 80 meter og 180 meter bruddbredde og 5 timers bruddtid. Simuleringene viste at bruddvannføringene fra elveforbygningen blir svært små, nærmest ubetydelige, i forhold til flomvannføringen i Glomma. Årsaken er at høydeforskjellen mellom vannstanden i Glomma og terrenget bak flomvollen er liten (kun ca. 2 meter), og at flomsletta relativt raskt fylles opp slik at det oppstår en stasjonær strømmingssituasjon der avledningskapasiteten til terrenget blir begrensende for utstrømningen gjennom bruddåpningen.

Bruddvannføringene oversvømmer åkermarka innenfor elveforbygningen og ellers forsenkningen mellom jernbanen og den vestre flomvollen ned mot Strandfossen kraftverk. Nede ved kraftverket ledes vannet tilbake igjen til utløpskanalen av vegfyllinga som går inn mot kraftverket. Det skjer ingen strømning til områdene mot Elverum sentrum. Vannhastighetene ved vegfyllinga når opp i 3,5 m/s, slik at det kan oppstå noe erosjon i denne, men slik erosjon vil bare øke strømningskapasiteten inn igjen mot utløpskanalen, og ytterligere redusere sjansen for overtopping av jernbanelinja og strømning til Elverum sentrum.



Figur A7. Oversiktsbilde over Strandfossen med inntakskanal og elveforbygning (Norconsult, 2017).

## A4.3 Dambruddsbølge beregninger for inntakskanalen til Strandfossen kraftverk

Norconsult (2016b) utførte dambruddsbølgeberegninger for vestsiden til inntakskanal til Strandfossen kraftverk. Kanalen forutsettes å gå til brudd momentant, da oppbygging av vollen ikke tilfredsstillende NVEs krav til utforming av fyllingsdammer. Det regnes med brudd på den vestre vollen. Da vollen er lang og lav antas det at bruddbredde er 5 ganger høyde på vollen. Høyden varierer og det er brukt terrengdata (fra laserskanning) for å finne høyden langs hele vollen. Det er simulert brudd på tre forskjellige steder langs inntakskanalen. Det er også beregnet bruddforløp etter formlene for fyllingsdammer iht. retningslinjer for dambruddsbølge beregninger. Disse formlene gir en mindre bruddåpning.

Det er gjort dambruddsbølgeberegninger for to situasjoner: initial middelflom ( $Q_M$ ) og initial 500-års flom ( $Q_{500}$ ). Det finnes ikke verdier for 1 000-årsflom ved dam Strandfossen.

Tabell A5. Vannstand og vannføring ved dam Strandfossen, Norconsult (2016b).

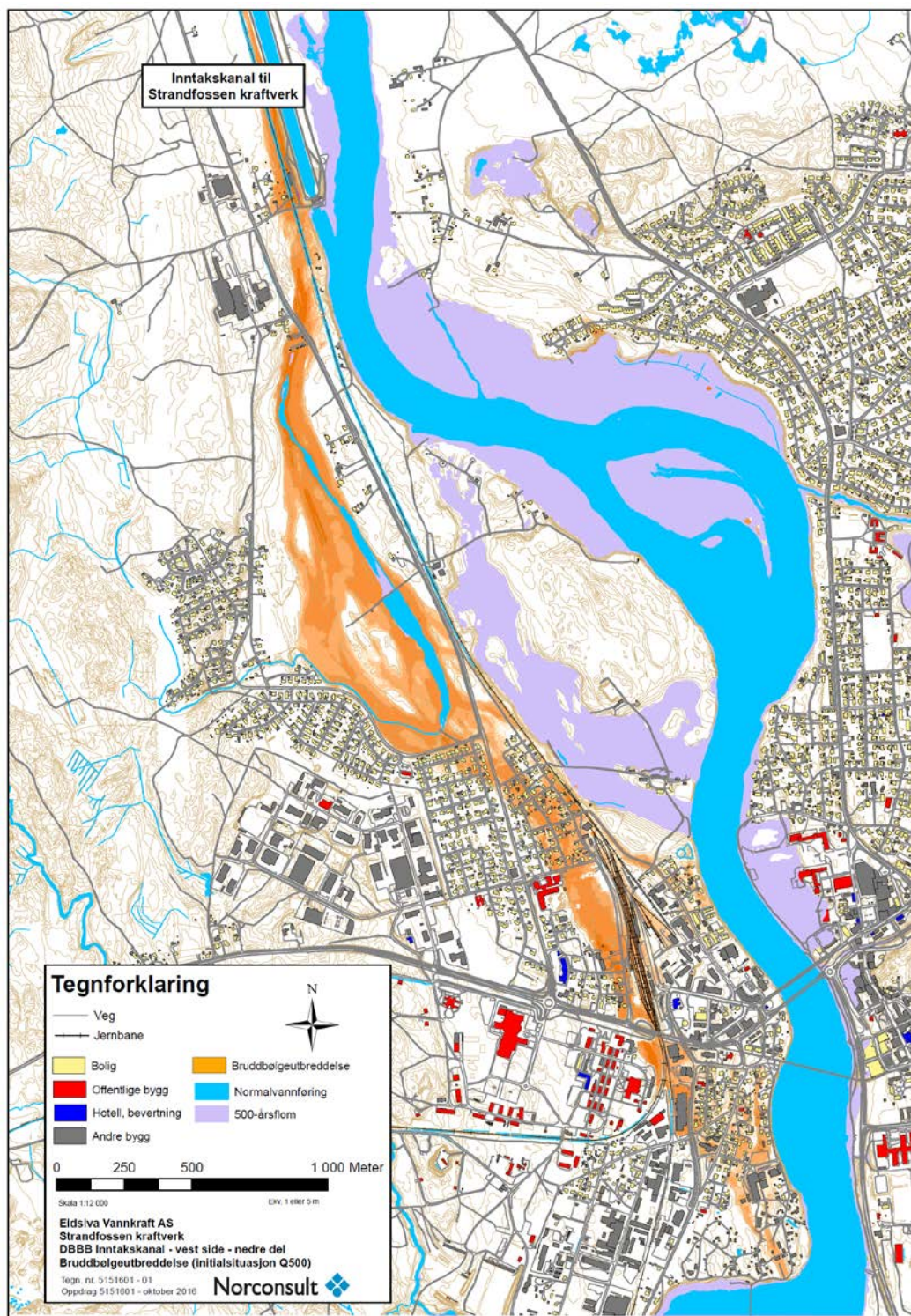
Flom	HRV (moh)	Vannføring (m <sup>3</sup> /s)	Vannstand (moh.)
$Q_{500}$	192,75	3436	194,17
$Q_M$	192,75	1420	193,10

Tabell A6. Bruddvannføring for ulike initialsituasjoner og bruddsteder (Norconsult, 2016b).

Sted	Initialsituasjon middelflom			Initialsituasjon 500-årsflom		
	Brudd-bredde (m)	Bruddvann-føring (m <sup>3</sup> /s)	Gjennomsnittshastighet (m/s)	Brudd-bredde (m)	Bruddvann-føring (m <sup>3</sup> /s)	Gjennomsnittshastighet (m/s)
Øverst	15,0	12	2	15,0	55	3,3
Midten	18,5	47	2,9	18,5	115	3,9
Nederst	29,5	329	4,8	29,5	491	5,5

### A4.3.1 Brudd ved den nederste delen av inntakskanalen

Bruddbølgen for begge initialsituasjonene vil ha en sammenlignbare omfang, men det vil være flere berørte bygg ved initialsituasjon 500-årsflom. En oversikt av det berørte området ved brudd på den nederste delen av inntakskanalen er vist i Figur A10.



Figur A8. Oversvømt areal ved dambrudd i nedre del av inntakskanal til Strandfossen kraftverk (initialsituasjon 500-årsflom) (Norconsult, 2017).

Analyse av følgeskader på grunn av bruddbølgen inkluderer identifisering av mulige forurensningskilder, verneverdige områder og områder utsatt for erosjon og ras. Vurderingene ble basert på tilgjengelig grunnlagsmateriale. I henhold til Miljødirektoratets naturbasekart finnes det ikke vernede områder på den berørte strekningen (Norconsult, 2016b). Når det gjelder kulturminner vil noen av byggene tilhørende Glomdalsmuseet og et funnsted vil bli berørt ved et brudd på den nederste delen av inntakskanalen.

Følgende steder med høye hastighetsverdier, der det kan inntreffe erosjon, er:

- Rett nedstrøms inntakskanalen ved veien til kraftstasjonen, inkludert jernbanen: opp til 5,5 m/s.
- RV-3 sør fra et fabrikkbygg: opp til 1,5 m/s.
- Kryss Mårvegen og RV-3: mellom 1,0 og 2,5 m/s.
- Skråning til jernbanen: opp til 5 m/s.
- Bolighus område ved Grindalsskansen: mellom 0,5 og 1,5 m/s.
- Bolighus område ved Vestad: mellom 0,5 og 2,0 m/s.
- Forsenkning gjennom Glomdalsmuseet: mellom 0,5 og 1,5 m/s.

#### A4.3.2 Brudd ved den midterste delen av inntakskanalen

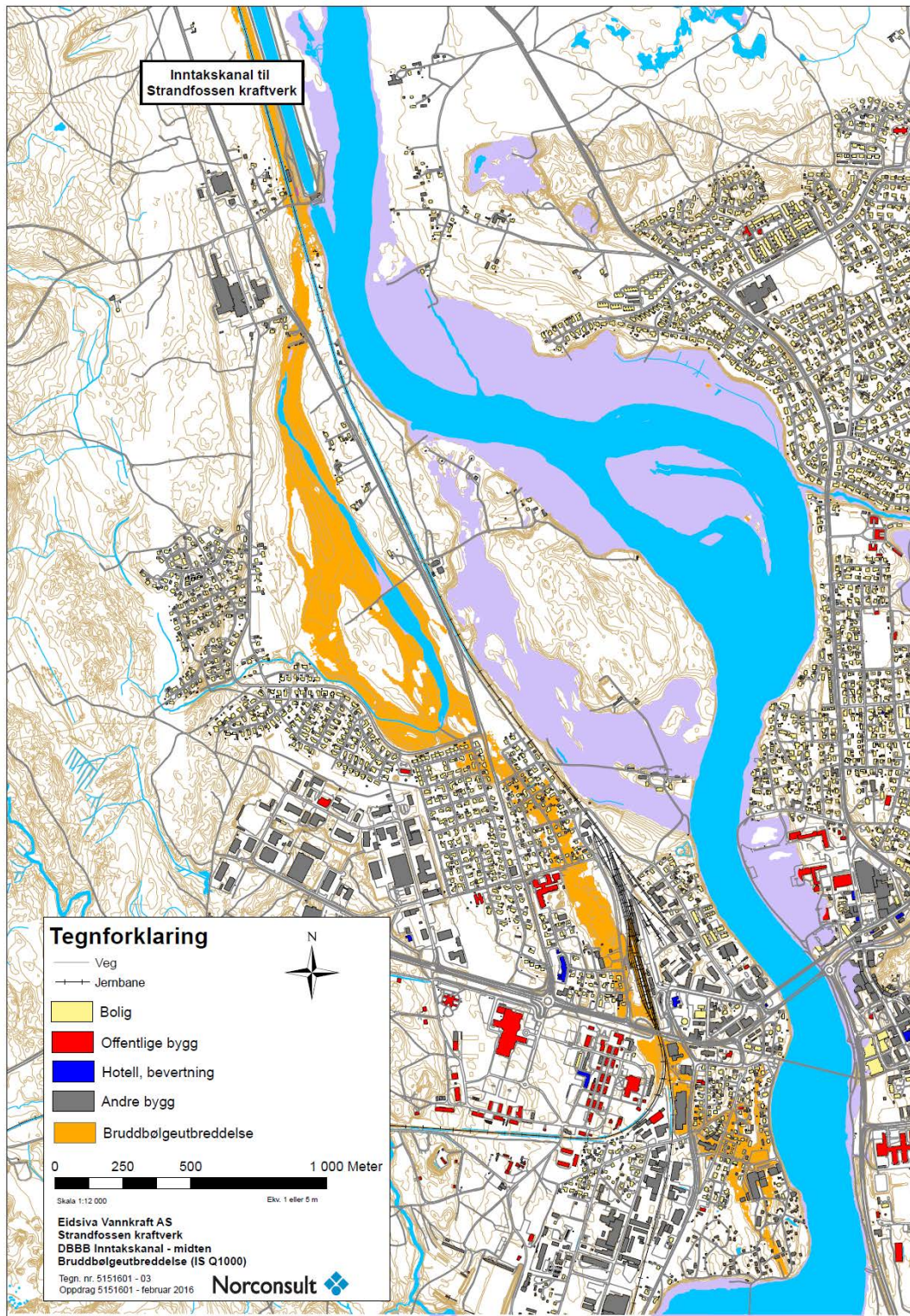
For brudd ved den midterste delen av inntakskanalen vil bruddbølge utbredelsen ha mindre omfang enn ved brudd på den nederste delen av kanalen. I tillegg vil bruddvannføring bevege seg saktere. Vannføring som renner sørover mot Langsletta og bebyggt område er beregnet til 4,4 m<sup>3</sup>/s (Figur A11).

#### A4.3.3 Brudd ved den øverste delen av inntakskanalen

Resultater fra beregningene for brudd ved den øverste delen av inntakskanalen viser at bruddvannet renner langs jernbanelinjen og mesteparten av vannet vil renne tilbake til Glomma ved kraftstasjonen. En liten del av vannet, beregnet til 0,8 m<sup>3</sup>/s, vil finne veien sørover. Deretter vil bruddbølgen bevege seg sørover ganske sakte: 8 timer etter brudd på øverste delen av inntakskanalen er antall berørte boenheter 3, hvorav 1 har en vannstandstigning på over 0,25 m. Riksvei 3 og Rørosbanen blir berørt (Figur A12).

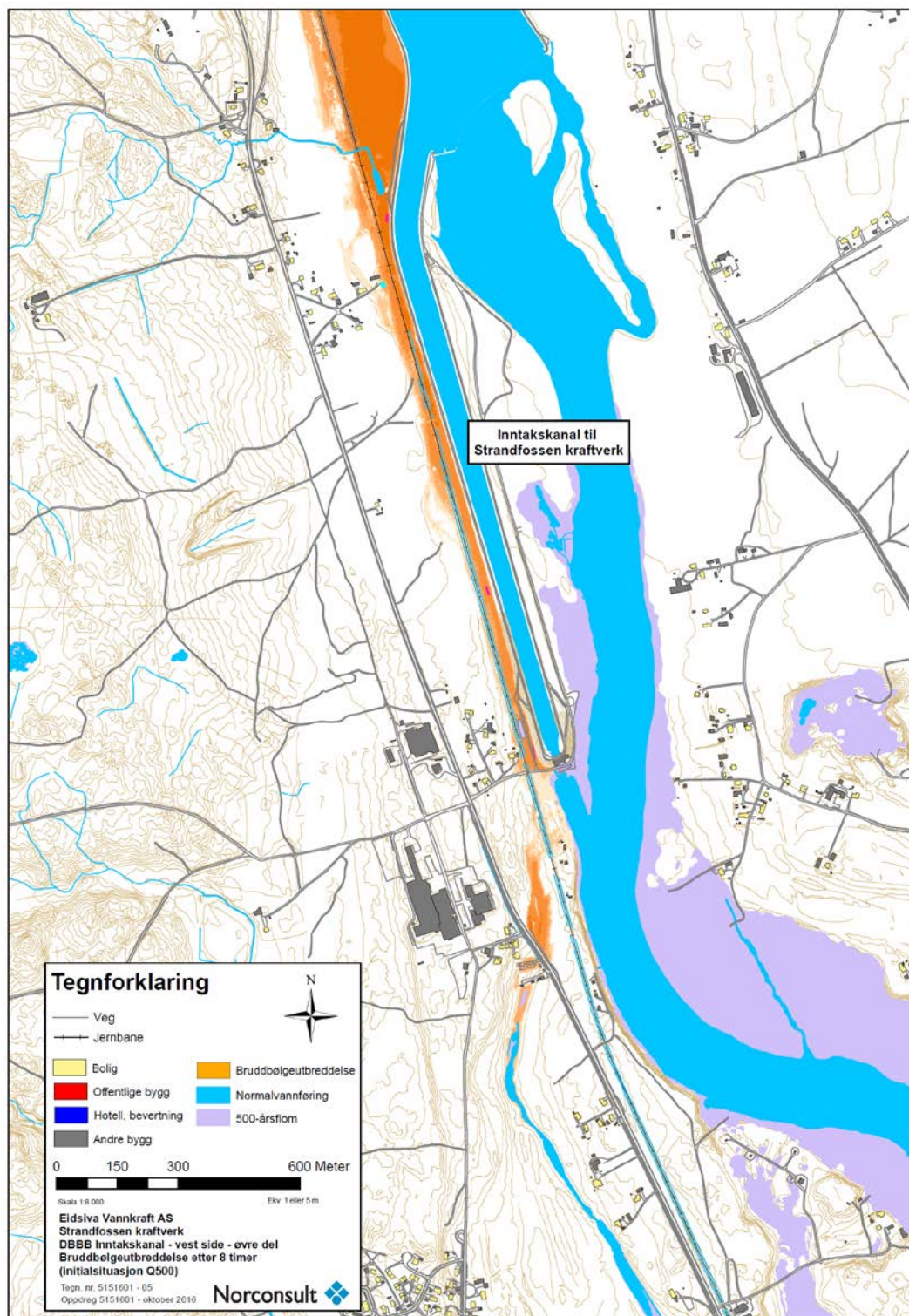
## A5 Inspeksjoner og målinger på Dam Strandfossen

Inntak, kanal og dam ble etter ferdigstillelse og igangkjøring jevnlig inspisert. Ved garantibefaring etter ett år ble hele anlegget grundig befart, uten at man fant noe særskilt å bemerke. NKV var engasjert som bygningsteknisk ansvarlig gjennom hele 80-tallet til å inspisere anlegget og foreta poretrykksmålinger langs kanal, voller og ved dam (NKV Vandbygningkontoret, 2000). Da disse målingene ble utført, ble samtidig vann, veg og damanlegg inspisert sammen med driftspersonalet iht. egen instruks.



Figur A9. Bruddbølge utbredelse for brudd på midterste del av inntakskanalen, initialsituasjon 1000-års flom (Norconsult, 2017).





Figur A10. Dambruddsbølge utbredelse etter 8 timer ved brudd i øvre del av kanalen, initialsituasjon 500-års flom (Norconsult. 2017).

Under disse inspeksjonene var man spesielt oppmerksom på lekkasjer, fuger, innsynkninger og andre overflateskader. Inspeksjonene ble gjennomført 1 gang per år med hoved inspeksjon hvert 3. år. Rapportene fra inspeksjoner og vannstandsmålinger ble sent til NVE. Det ble i denne perioden ikke påvist eller rapportert om unormale forhold.

Kanalen overvåkes med 34 stk. grunnvannsbrønner. Grunnvannstanden langs kanalen overvåkes for å oppdage eventuelle lekkasjer fra kanalen. Konstruksjonsmessig er ikke kanalen dimensjonert for å tåle lekkasjer.

## A6 Potensielle tiltak

Beregninger viser at et dambrudd i nedre del av inntakskanalen vil kunne oversvømme områder helt inn i Elverum sentrum. Eidsiva Vannkraft utreder derfor tiltak for å forhindre at så skal kunne skje, bant annet å anlegge en avskjærende flomvoll sør for inntakskanalen som kan lede en eventuell dambruddsbølge tilbake igjen til Glommas hovedløp. En slik avskjæringsflomvoll må være høy nok til å tåle vannføringene fra et dambrudd i så vel inntakskanalen som i elveforbygningen oppstrøms. Bruddvannføringen fra inntakskanalen er fra før beregnet til 491 m<sup>3</sup>/s, mens bruddvannføringen fra forbygningen ikke har blitt beregnet tidligere. Vurdering av tiltak vil være et tema på workshopen.

## A7 Kilder

- Norsk Vandbygningskontor (1978). Tegninger.
- NVK Vandbygningskontoret (2000). Strandfossen kraftverk. Skader og årsaker til skader høsten 1999, versjon 1, 2000-06-14.
- Norconsult (2016a). Flomberegning for midtre Glomma Strandfossen, Skjefstadfoss, Braskereidfoss, Kongsvinger. Oppdragsnr. 5155374, Dokumentnr. 1. Rev. 0, 2016-12-14.
- Norconsult (2016b). Dambruddsbølgeberegninger inntakskanal Strandfossen kraftverk, Vest side. Oppdragsnr 5151601, Dokumentnr. 01, Rev. 02. 12. oktober 2016.
- Norconsult (2017). Dambruddsbølgeberegning for flomvoll ovf. Strandfossen krv. Oppdragsnr. 5151601, Dokumentnr. 0, Ver. 2. 2017-05-08

# Vedlegg B

## Beskrivelse av sannsynligheter i hendelsestre-analysene

### Innhold

C1 Estimat av sannsynligheter

2

## B1 Estimat av sannsynligheter

For analysene av Dam Strandfossen ble sannsynlighetene først estimert ved hjelp av Tabell B1. Denne tabellen gir en verbal beskrivelse (på engelsk, som er språket disse konseptene ble utviklet i, og med en tilnærmet oversettelse til norsk) og sannsynligheten som assosieres med hver av de verbale beskrivelsene. Tabell B1 gir verdiene for det beste estimatet av sannsynlighetene, og baserer seg på tidligere erfaringer, arbeid av Høeg (1996) og Vick (2002) og analyser gjort for tidligere dammer.

IPCC (2012) foreslo at sannsynligheter bør beskrives ved hjelp av et tallområde for å uttrykke usikkerheten tallene er forbundet med, istedenfor for å benytte enkeltverdier som i Tabell 1. Tallområdene foreslått av IPCC (2012) ble diskutert på workshop'en, og verdiene som deltagerne ble enige om, ble brukt videre i analysene.

Tabell B2 presenterer i samme format som Tabell B1 de omforente verdiene som ble brukt på workshop'en. Tallområdene i Tabell B2 kan brukes for å beregne nedre og øvre grense på sannsynlighetene med hendelsestre-metoden, og for å utføre Monte-Carlo simuleringene i forbindelse med Bayesianske nettverks-analysene.

Tabell B1. Estimat av sannsynligheter med enkeltverdier for hendelsestreanalyse

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

Tabell B2. Estimat av sannsynligheter med områdetall for hver kategori

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



# Vedlegg C

## HENDELSESTREANALYSER FOR DAM STRANDFOSEN

### Innhold

C1	Innledning	2
C2	Hendelsestrær og forklaringstabeller for hendelsestrærne	2
C3	Sannsynlighet for brudd fra hendelsestreanalyserne	12

## C1 Innledning

Hendelsestre-analyser av Dam Strandfossen ble utført 16. og 17. oktober 2017. Analysene ble komplementert av NGI etter workshopen. Vedlegget gir resultater fra analysene i grafisk form for de mest sentrale bruddmekanismene.

Alle probabilistiske analysene er for ekstraordinær flom. Resultatene er oppsummert i hovedrapporten. Tabellen nedenfor gir en oversikt over analysene. Hendelsestrærne finnes i Figur C1 til C5.

*Hendelsestre-analyser av Dam Strandfossen (lokasjon A og B er vist i Figur 6 i hovedrapporten).*

Hendelse	Figur nr
Flom som fører til skade på asfalt eller betong i inntakskanalen	C1 og C2
Overtopping av flomverk, lokasjon A (naturtilstand), med erosjon på utsiden av inntakskanalen	C3
Brudd i flomverk, lokasjon B, med erosjon på utsiden av inntakskanalen	C4
Flom i Grundsetbekken, tett kulvert og erosjon på utsiden av inntakskanalen	C5

Metoden som ble brukt for analysene er beskrevet i hovedrapporten (Seksjon 3.1). For analysene ble tallverdiene i Tabell B1, tallområdeverdiene i Tabell B2 og de verbale beskrivelsene i de samme tabellene brukt for å velge sannsynlighetene for hendelsen (Vedlegg B).

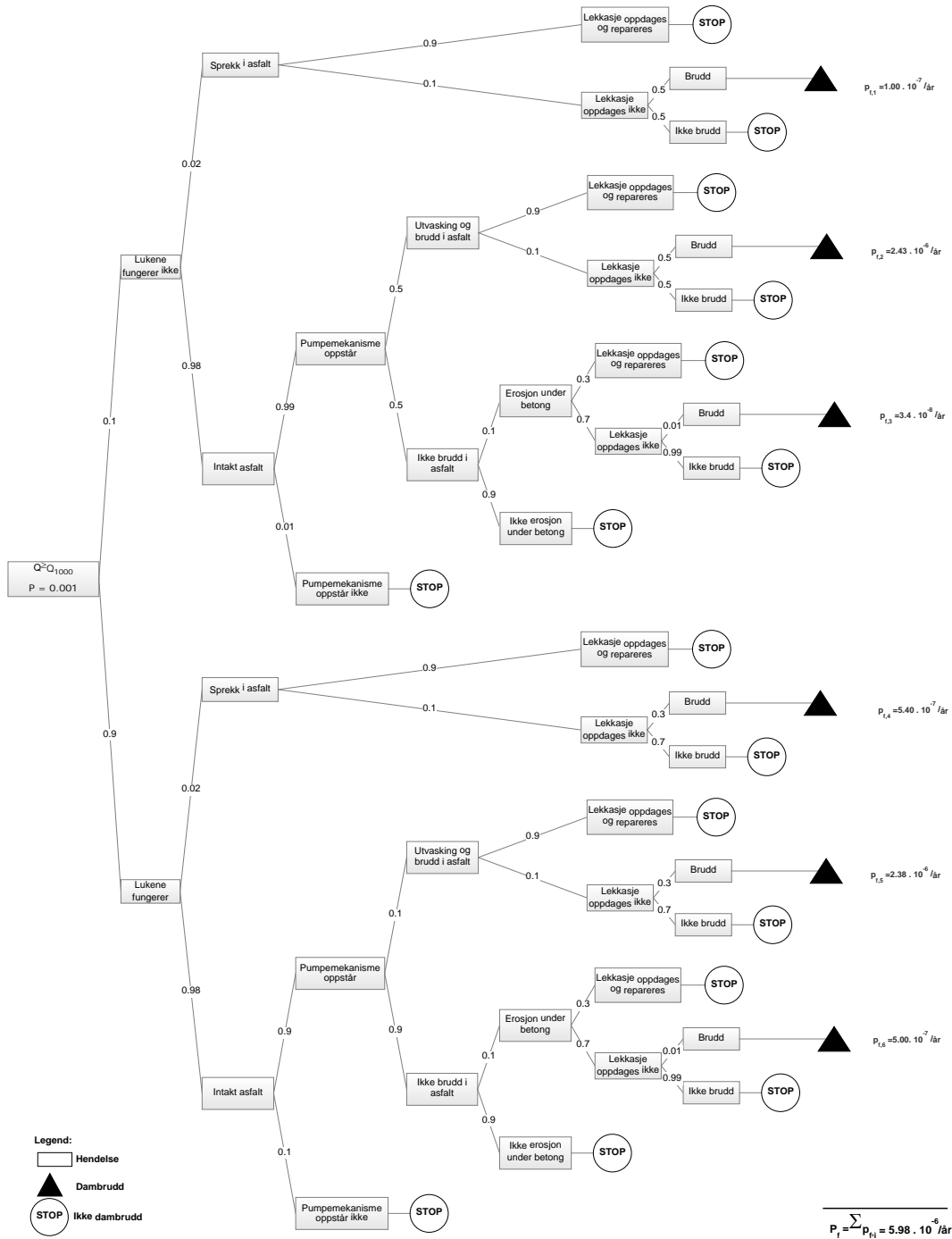
Hendelsestrærne i Figur C1 til C5 viser hver hendelse og sannsynlighetstallene for hvert tilfelle. Sannsynlighetene ble bestemt under workshopen. Hendelsestræren har følgende struktur:

- Titlene ovenfor trærne viser hovedhendelsene langs grenene i analysen. Hver hendelse er tildelt en bokstav som svarer til teksten i forklaringstabellen som følger hvert tre. Forklaringstabellene gir begrunnelsen for sannsynlighetene som er valgt i hendelsestreet.
- Sannsynlighet for brudd er produktet av sannsynlighetene for hver hendelse langs grenen.
- Hendelseskjeder som resulterer i dambrudd er markert med en svart trekant ▲.
- Hendelseskjeder som ikke resulterer i dambrudd ender med en åpen sirkel med ordet STOP.
- Den totale bruddsannsynligheten knyttet til hver utløsningsmekanisme eller bruddårsak er summen av sannsynlighetene for hver gren som resultater i dambrudd.
- Den totale sannsynlighetene for dambrudd er summen av sannsynligheter for alle bruddmekanismer og alle bruddårsak.
- I alle analyser er den årlige sannsynligheten for brudd beregnet.

## C2 Hendelsestrær og forklaringstabeller for hendelsestrærne

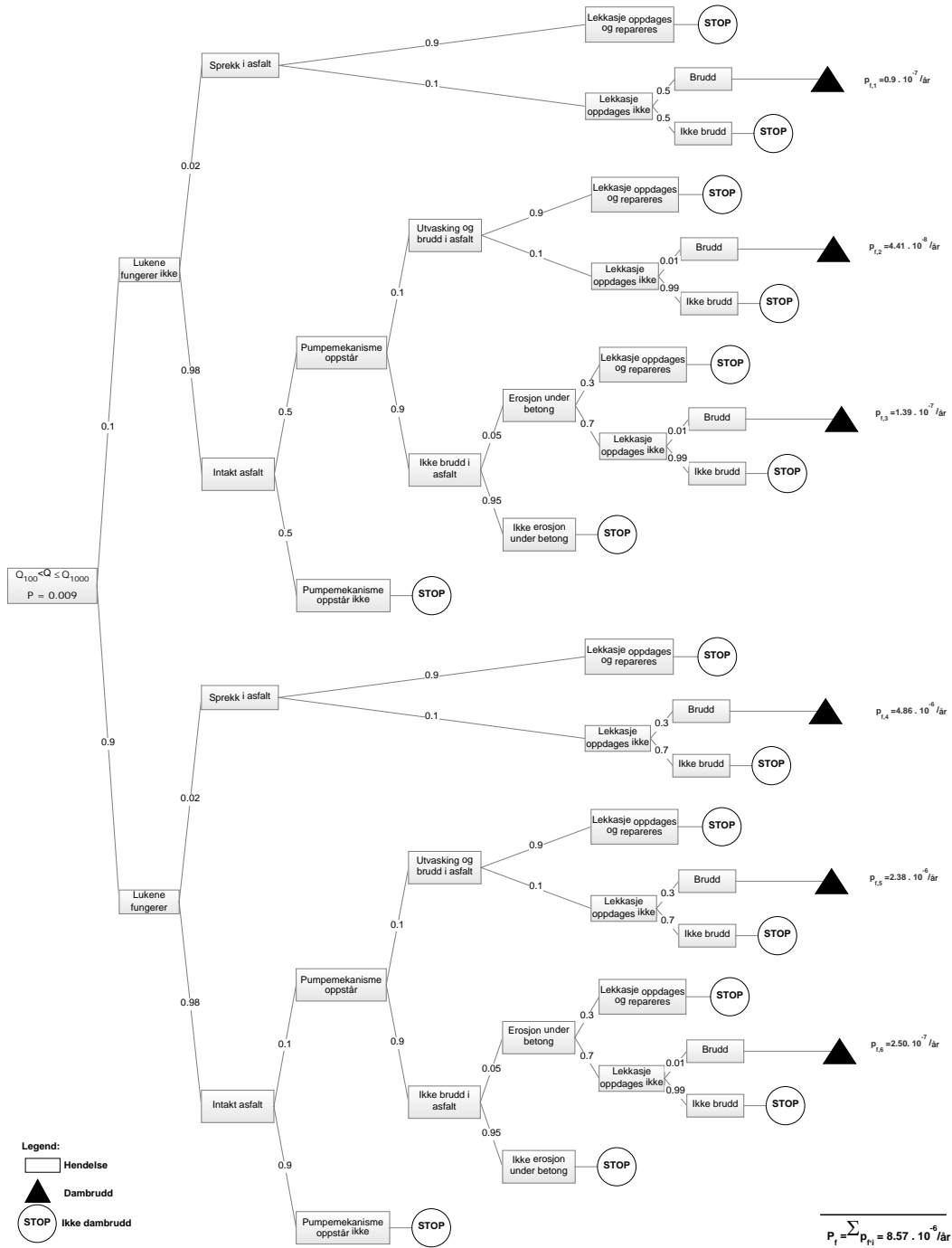


Størrelse av flommen	Lukene fungerer ?	Intakt asfalt?	Pumpe-mekanisme oppstår?	Ut-vasking og brudd i asfalt?	Erosjon under betong ?	Lekkasje oppdages og repareres ?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F	G	H



Figur C1. Hendelsestre for flom som fører til skade på asfalt eller betong i inntakskanalen: for  $Q > Q_{1000}$

Størrelse av flommen	Lukene fungerer ?	Intakt asfalt?	Pumpe-mekanisme oppstår?	Ut-vasking og brudd i asfalt?	Erosjon under betong ?	Lekkasje oppdages og repareres ?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F	G	H

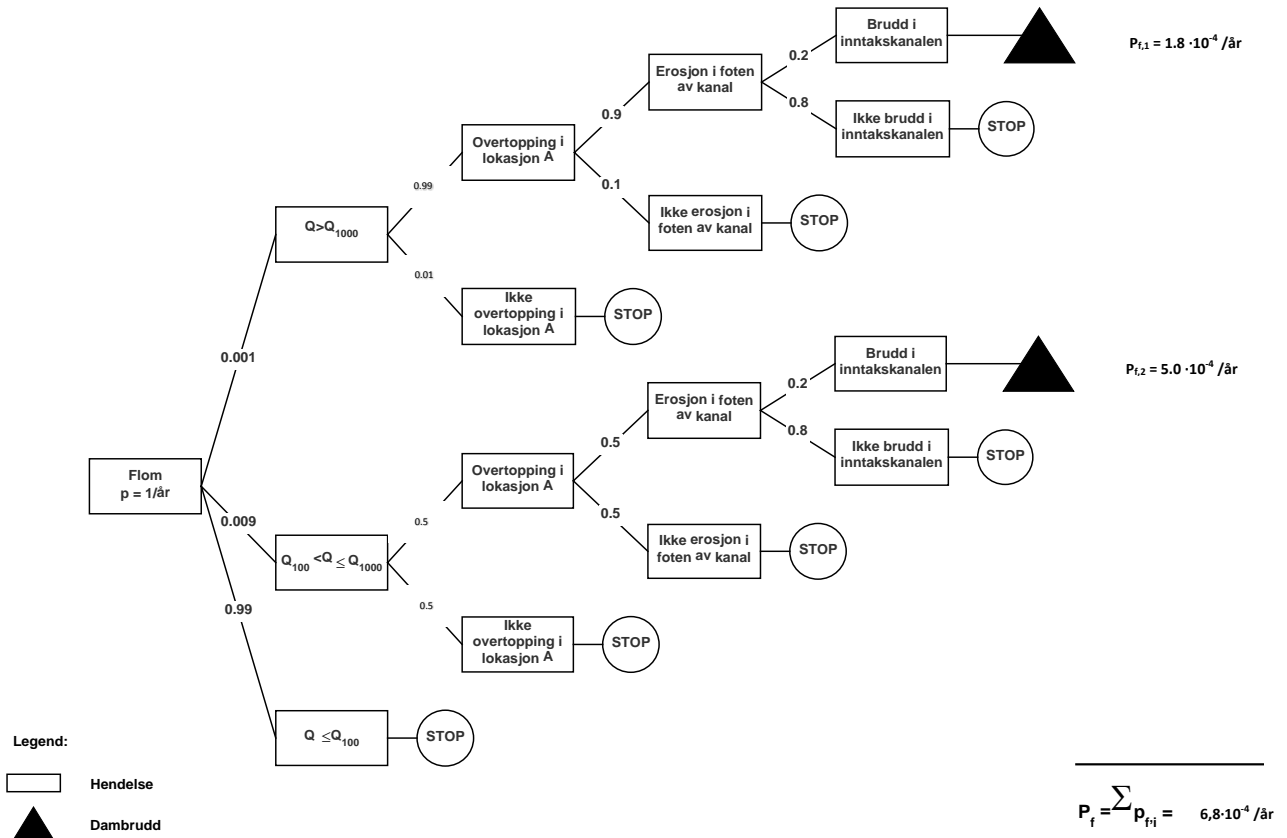


Figur C2. Hendelsestre for flom som fører til skade på asfalt eller betong i inntakskanalen. for  $Q_{100} < Q <= Q_{1000}$

Tabell C1-C2. Forklaringstabell for hendelsestreet Flom,  $Q > Q_{1000}$  og  $Q_{100} < Q < Q_{1000}$  (figur C1 og C2).

Hendelse	Sannsynlighet på grenene
<b>A</b> Flomstørrelse?	Dissens om returperioden for 1995 flommen. Hadde den 200 års eller 1000 års returperiode? Grenen $Q > Q_{1000}$ representerer flommer som er verre enn 1995- flommen. P[0.0001; 0.0009; 0.999]
<b>B</b> Fungerer lukene?	Det er 3 ulike lukekonstellasjoner. (Smålukene samlet teller som en luke). Lukene kan kjøres uten strøm. Driftsrutinen er at lukene åpnes ved vannmengder over 800m <sup>3</sup> . De vil derfor være åpne ved store flommer og det er god tid til feilsøking om lukene ikke virker. P[0.1; 0.9] og P[0.1; 0.9]
<b>C</b> Er asfalt intakt før flommen?	Er det oppstått skader på asfalt eller betong før flommen? Det er en liten sannsynlighet for skader fra drivgods, for det er stille vann i kanalen når kraftverket står. Kan skader forårsakes av is? Det blir ikke særlig tykk is i kanalen. Inspeksjoner av asfalten viser ingen negative erfaringer på 20 år. P[0.02; 0.98] (sprekk/svakhet, intakt)
<b>D</b> Oppstår pumpemekanisme?	Begrepet pumpemekanisme refererer til oscillerende vannstand som oppsto ved flommen i 1995. Ved en flom av samme størrelse (eller større enn 1995-flommen) er det sannsynlig at en slik pumpemekanisme vil oppstå igjen. Den skyldes trolig egensvingninger i kanalen. Siden geometrien er den samme vil heller ikke egensvingningene ha forandret seg. P[0.9; 0.1]
<b>E</b> Fører mekanismen til utvasking og brudd i asfalt?	Nederste del av kanalen, dvs. den delen av kanalen der skadene oppsto sist, er erstattet med betong. Det er derfor usannsynlig at pumpemekanismen vil føre til brudd i asfalten. P[0.1; 0.9]
<b>F</b> Erosjon under betong	Kan pumpemekanismen gi skade på betongen? Mye grovt korn og dobbelarmring i betongen. Ingen sprøbrudd. Det var ingen brudd eller sprekker i betong ved flommen i 1995. Lite sannsynlig at det skjer erosjon under betongen som gir sprekker. P[0.1; 0.9]
<b>G</b> Oppdages og repareres lekkasjen?	<i>Asfalt</i> : Sannsynlig at det vil oppdages: Har tid på å oppdage det (Sist tok det 4 år fra første sprekker til store hull og lekkasjer). Det er grunnvannsbrønner hver 100m og neste år skal det etableres sanntidsovervåking. 40 m unna; vil ikke oppdages med øre (som var måten lekkasjen ble oppdaget på sist). P [0.9(oppdages); 0.1(oppdages ikke)]. <i>Betong</i> : Hvis sprekker dannes er de mest sannsynlig små spresser, kun riss. De vil derfor være vanskelig å oppdage. Imidlertid er betongdelen av kanalen nede ved kraftstasjon, hvor det ofte er personell som øker sannsynligheten for oppdagelse. P[0.3 (oppdages); 0.7(ikke oppdages)]
<b>H</b> Dambrudd	<i>Asfalt</i> : Kun brudd hvis lekkasjen skjer under foten, må stor lekkasje til, og utviklingen til brudd tar tid. Usikkerhet rundt dette. Hvis lukene ikke fungerer: P[0.5; 0.5] (muligens er det altfor pessimistisk. Hvis lukene fungerer: P[0.3; 0.7]. <i>Betong</i> : På grunn av sprekkenes størrelse er det kun små vannmengder, mens det behøves store vannmengder og mye utvasking for å skape brudd, som er svært usannsynlig. P[0.01; 0.99]

Flom	Flommens returperiode	Overtopping i lokasjon A?	Erosjon i foten av kanalen?	Brudd i inntakskanalen	Dambrudd
A	B	C	D	E	F

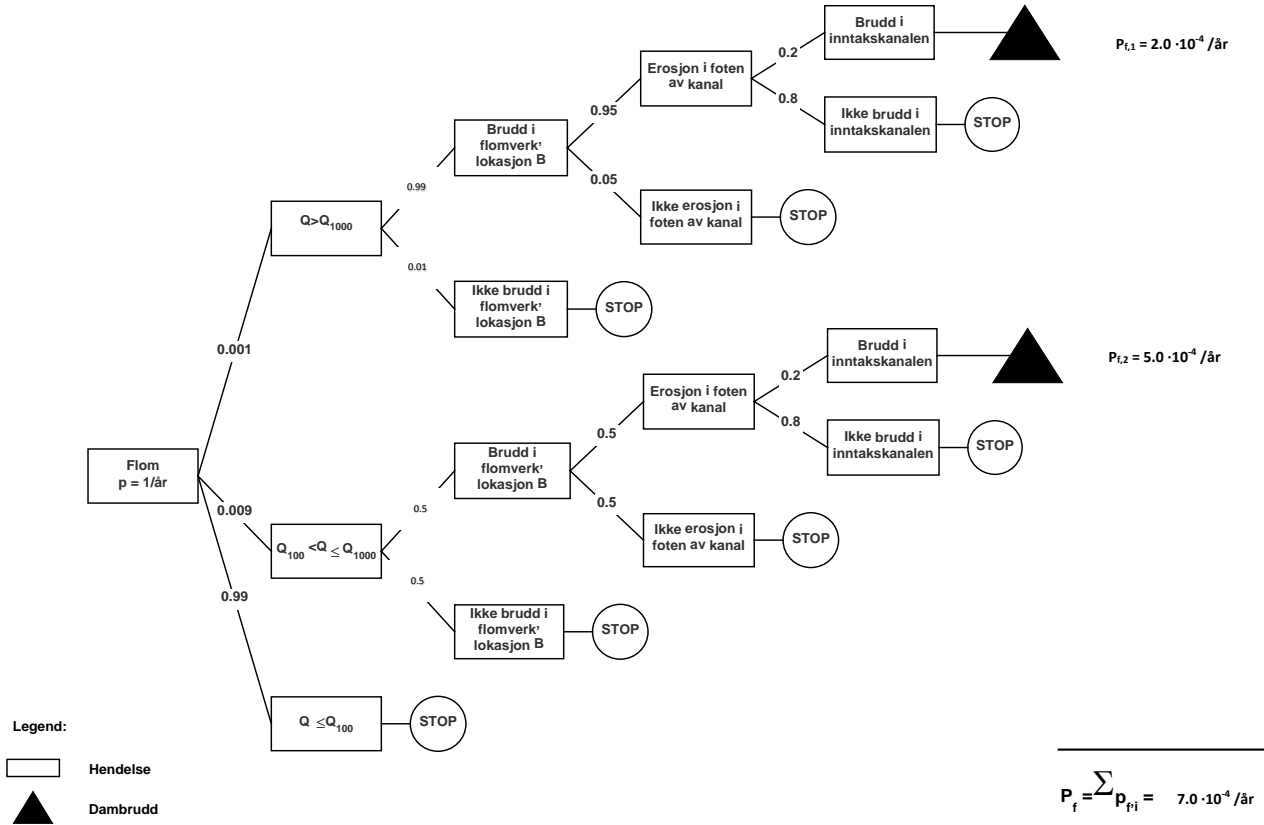


Figur C3. Hendelsestre for overtopping i lokasjon A (naturstilstand) og erosjon på utsiden av inntakskanalen

Tabell C1. Forklaringstabell for hendelsestreet Flom og overtopping i lokasjon A og erosjon på utsiden av inntakskanalen

Hendelse	Sannsynlighet på grenene
<b>A</b> Flom	Se tabell C2
<b>B</b> Flommens returperiode	100-års og 1000-års flom $Q > Q_{1000}$ : $P = 0,001/\text{år}$ $Q_{100} < Q < Q_{1000}$ : $P = 0,009/\text{år}$ $Q < Q_{100}$ : $P = 0,99/\text{år}$
<b>C</b> Overtopping i lokasjon A	Lokasjon A representerer naturtilstand. Overtopping kan skje. 8 cm margin i 1995. 1995 flommen hadde vannmengde mellom 100-års og 1000- års flommen. Flomverket er nå hevet 40-50cm, men ikke høyere i elva, der lokasjon A er. Scenariet: $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , $v = 3 \text{ m/s}$ : $Q > Q_{1000}$ : $P[0.99;0.01]$ fordi flomverket vil helst sikkert ryke $Q_{100} < Q < Q_{1000}$ : $P[0.5;0.5]$ fordi det er usikkert, men en relativ stor (50%) sannsynlighet for at flomverket vil ryke
<b>D</b> Erosjon i foten av kanalen	Fare for erosjon i fot av kanal? Sannsynlig at det blir erosjon i fot av kanal, for scenariet som er angitt, dvs. $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , $v=3 \text{ m/s}$ , $Q > Q_{1000}$ : $P[0.9; 0.1]$ $Q_{100} < Q < Q_{1000}$ : $P[0.5; 0.5]$
<b>Brudd i inntakskanalen</b>	Inntakskanalvollen er ikke bygget som en dam: $P[0.2; 0.8]$ Her kan sannsynligheten reduseres med tiltak, som å lage damtå på inntakskanalvollen.

Flom	Flommens returperiode	Brudd i flomverk, lokasjon B?	Erosjon i foten av kanalen?	Brudd i inntakskanalen?	Dambrudd
A	B	C	D	E	F

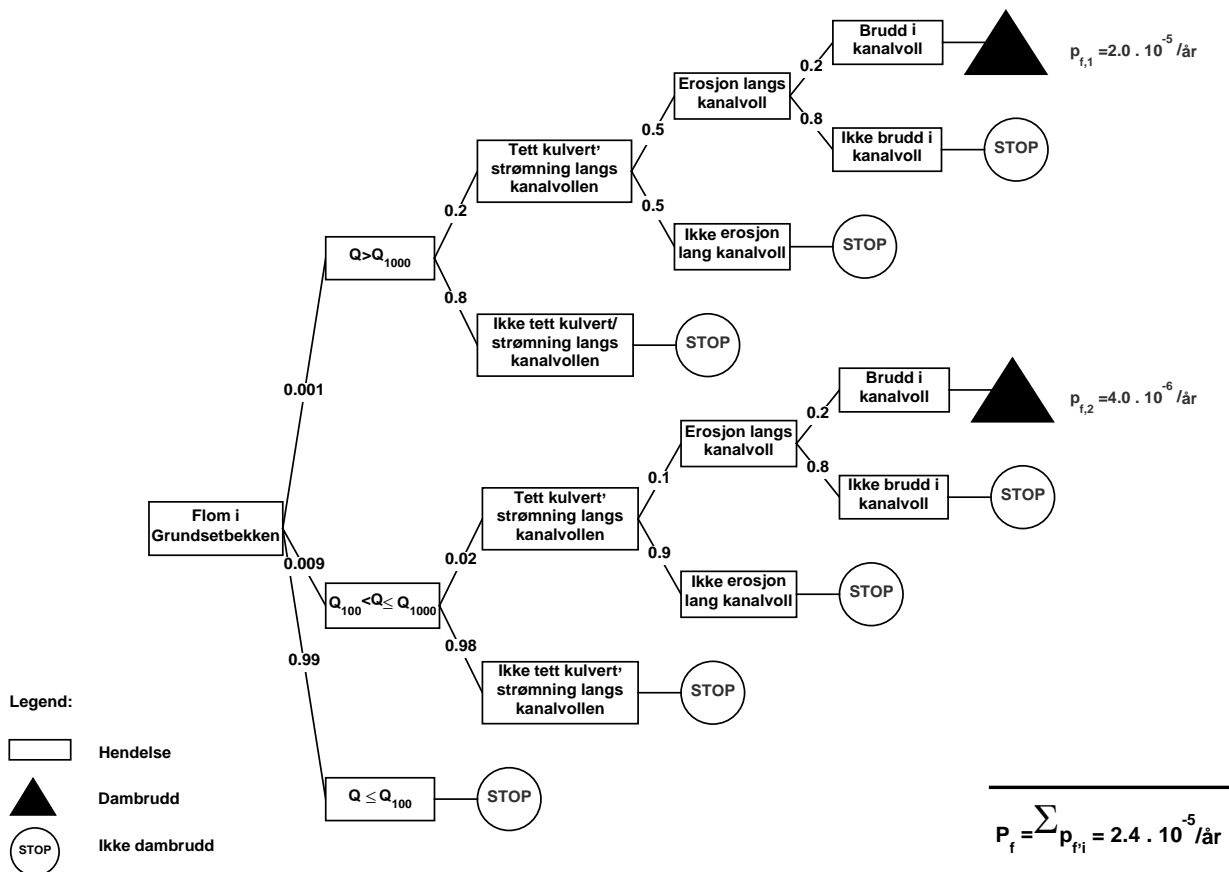


Figur C4. Hendelsestre for brudd i flomverk, Lokasjon B, med erosjon på utsiden av inntakskanalen.

Tabell C2. Forklaringstabell for hendelsestre Flom, overtopping i lokasjon B og erosjon på utsiden av inntakskanalen

Hendelse	Sannsynlighet på grenene
<b>A</b> Flom	Se tabell C2
<b>B</b> Flommens returperiode	100-års og 1000-års flom: $Q > Q_{1000}$ : $P = 0.001/\text{år}$ $Q_{100} < Q < Q_{1000}$ : $P = 0.009/\text{år}$ $Q < Q_{100}$ : $P = 0.99/\text{år}$
<b>C</b> Brudd i flomverket?	Lokasjon B representerer flomverk/flomvoller opprettet, 2.5km oppstrøms Dam Strandfossen. Flomverket er hevet 40-50cm siden flommen i 1995. Derfor er ikke overtopping av flomverk kritisk men brudd i flomverk. Scenariet: $15\text{m}^3/\text{s}$ , $v = 3\text{m/s}$ : $Q > Q_{1000}$ : $P[0.99;0.01]$ fordi flomverket vil helst sikkert ryke $Q_{100} < Q < Q_{1000}$ : $P[0.5;0.5]$ fordi det er usikkert, men en relativ stor (50%) sannsynlighet for at flomverket vil ryke
<b>D</b> Erosjon i foten av kanalen	Fare for erosjon i fot av kanal? Sannsynlig at det blir erosjon i fot av kanal, for scenariet som er angitt, dvs. $15\text{m}^3/\text{s}$ , $v=3\text{m/s}$ : $Q > Q_{1000}$ : $P[0.95; 0.05]$ $Q_{100} < Q < Q_{1000}$ : $P[0.5; 0.5]$
<b>E</b> Brudd i inntakskanalen	Inntakskanalvollen er ikke bygget som en dam: $P[0.2; 0.8]$ Her kan sannsynligheten reduseres med tiltak, som å lage damtå på inntakskanalvollen.

Flom i Grundsetbekken	Flommens returperiode	Tett kulvert som gir strømning langs kanalen?	Erosjon i foten av kanalen?	Brudd i inntaks-kanalen?	Dambrudd?
A	B	C	D	E	F



Figur C5. Hendelsestre for flom i Grundsetbekken, tett kulvert og erosjon på utsiden av inntaks-kanalvollene



Tabell C3. Forklaringstabell for hendelsestre Flom i Grundsetbekken, tett kulvert og erosjon på utsiden av inntakskanalvollene.

Hendelse	Sannsynlighet på grenene
<b>A</b> Flom i Grundsetbekken	Se tabell C2.
<b>B</b> Flommens returperiode	100-års og 1000-års flom: $Q > Q_{1000}$ : $P = 0.001/\text{år}$ $Q_{100} < Q < Q_{1000}$ : $P = 0.009/\text{år}$ $Q < Q_{100}$ : $P = 0.99/\text{år}$ Hvilken vannføring har Grundsetbekken under flom? Dette påvirker de videre sannsynlighetene.
<b>C</b> Tett kulvert som gir strømning langs kanalen	Kulvert har stor kapasitet (tverrsnitt flere $m^3$ ). Jevnlig inspeksjon av kulvert; dykker gjennom. Bekken går ikke rett i kulverten, magasin foran kulverten. Sannsynligheten for tetting av kulvert vil avta når det innføres kontinuerlig overvåkning av området. Sannsynligheten her representerer derfor "rask tetting av kulvert". Vil avhenge av flomstørrelse. Konservativt: $Q > Q_{1000}$ : $P[0.2; 0.8]$ $Q < Q_{1000}$ : $P[0.02; 0.98]$
<b>D</b> Erosjon i foten av kanalen	Fare for erosjon i fot av kanal? Sannsynlig at det blir erosjon i fot av kanal, for scenariet som er angitt, dvs. $15m^3/s$ , $v=3m/s$ . Mindre vannmengder og lavere sannsynligheter enn ved brudd i flomverk? Øvre grenser: $Q > Q_{1000}$ : $P[0.9; 0.1]$ $Q_{100} < Q < Q_{1000}$ : $P[0.5; 0.5]$
<b>E</b> Brudd i inntakskanalen	Inntakskanalvollen er ikke bygget som en dam. $P[0.2; 0.8]$ $P[0.2; 0.8]$ Her kan sannsynligheten reduseres med tiltak, som å lage damtå på inntakskanalvollen.

## Sannsynlighet for brudd fra hendelsestreanalyser

De årlige bruddsannsynlighetene for hvert hendelsestre i Figur C1 til C5 er oppsummert i Tabell C6. Analysene er gjennomført med beste estimat av sannsynlighetsverdier (Tabell B2 i Vedlegg B).

Tabell C4 Resultater av hendelsestre-analyser.

Årsak	Bruddmekanisme	P <sub>f</sub> årlig (best estimat)
Flom	Hendelsestrær C1 og C2 Lekkasje gjennom asfalt eller betong som leder til brudd i inntakskanalen.	$1.4 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
Flom	Hendelsestre C3 Overtopping av flomverk, lokasjon A, som gir erosjon på utsiden av inntakskanalvollene og videre brudd i inntakskanalen	$6.8 \cdot 10^{-4}/\text{år}$
Flom	Hendelsestre C4 Brudd i flomverk, lokasjon B, som gir erosjon på utsiden av inntakskanalvollene og videre brudd i inntakskanalen	$7.0 \cdot 10^{-4}/\text{år}$
Flom i Grundsetbekken	Hendelsestre C5 Tett kulvert som gjør at vannet renner på utsiden av kanalvollene og eroderer disse.	$2.4 \cdot 10^{-5}/\text{år}$
<b>Sammenlagt bruddsannsynlighet</b>		<b><math>1.4 \cdot 10^{-3}/\text{år}</math></b>

<b>Dokumentinformasjon/Document information</b>		
<b>Dokumenttittel/Document title</b> Risikovurdering for Dam Strandfossen		<b>Dokumentnr./Document no.</b> 20150624-05R
<b>Dokumenttype/Type of document</b> Rapport / Report	<b>Oppdragsgiver/Client</b> Energi Norge / Eidsiva	<b>Dato/Date</b> 2018-04-24
<b>Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document according to contract</b> NGI		<b>Rev.nr.&amp;dato/Rev.no.&amp;date</b> 0 /
<b>Distribusjon/Distribution</b> BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
<b>Emneord/Keywords</b> Risikovurdering, flom, rehabiliteringstiltak, fare, konsekvens		

<b>Stedfesting/Geographical information</b>	
<b>Land, fylke/Country</b>	<b>Havområde/Offshore area</b>
<b>Kommune/Municipality</b>	<b>Feltnavn/Field name</b>
<b>Sted/Location</b>	<b>Sted/Location</b>
<b>Kartblad/Map</b>	<b>Felt, blokknr./Field, Block No.</b>
<b>UTM-koordinater/UTM-coordinates</b> Sone: Øst: Nord:	<b>Koordinater/Coordinates</b> Projeksjon, datum: Øst: Nord:

<b>Dokumentkontroll/Document control</b> Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
<b>Rev/ Rev.</b>	<b>Revisjonsgrunnlag/Reason for revision</b>	<b>Egenkontroll av/ Self review by:</b>	<b>Sidemanns- kontroll av/ Colleague review by:</b>	<b>Uavhengig kontroll av/ Independent review by:</b>	<b>Tverrfaglig kontroll av/ Inter- disciplinary review by:</b>
0	Originaldokument	2018-01-20 Unni Eidsvig	2018-03-23 Kaare Høeg	2018-04-24 Suzanne Lacasse Torstein Tjelde	

<b>Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release</b>	<b>Dato/Date</b> 24. mai 2018	<b>Prosjektleder/Project Manager</b> Suzanne Lacasse
--	----------------------------------	---

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

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

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

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

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

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

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

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

