

Nr. 22/2022

Flodbølger etter skred fra Skutshorn ved Vangsmjøse, Vang kommune

.....

Norges Geotekniske Institutt



NVE Rapport nr. 22/2022
Flodbølger etter skred fra Skutshorn ved
Vangsmjøse, Vang kommune

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Forfatter: Norges Geotekniske Institutt (NGI)

Forsidefoto: Gustav Pless / NVE

ISBN: 978-82-410-2268-5

ISSN: 2535-8235

Saksnummer: 201833392-6

Sammendrag: NGI har på oppdrag fra NVE utarbeidet egne flodbølgekart for å vise hvilke områder rundt Vangsmjøse som kan bli rammet hvis det skulle gå et større fjellskred fra Skutshorn i Vang kommune.

Rapporten vil inngå som et grunnlag for å vurdere konsekvenser av et mulig fjellskred, samt inngå i beredskapsplaner og plan- og byggesaker i kommunen.

Emneord: Flodbølger, fjellskred, Skutshorn

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthuns gate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95
E-post: nve@nve.no
Internett: www.nve.no

desember 2022

Forord

Skutshorn er et stort ustabilt fjellparti som ligger 600 meter over innsjøen Vangsmjøse (466 moh). Deler av fjellpartiet på opp mot ti millioner kubikkmeter beveger seg med opptil tre centimeter i året. Et større fjellskred fra Skutshorn kan forårsake en flodbølge som kan ramme bebyggelse langs Vangsmjøse, herunder også kommunesenteret i Vang. Norges geologiske undersøkelse (NGU) har kartlagt fjellpartiet siden 2018. Fjellpartiet vil bli satt under kontinuerlig overvåking av NVE i løpet av 2023.

NVE har fått utarbeidet egne flodbølgekart for å vise hvilke områder rundt Vangsmjøse som kan bli rammet hvis det skulle gå et større fjellskred fra Skutshorn i Vang kommune.

Rapporten, som er utarbeidet av NGI, gir et godt grunnlag for å vurdere konsekvenser av et mulig fjellskred, og vil inngå i beredskapsplaner og benyttes i plan- og byggesaker i kommunen.

Oslo, 8. desember 2022

Brigt Samdal
direktør
Skred- og vassdragsavdelingen

Lars Harald Blikra
seksjonssjef
Skredseksjonen

Dokumentet sendes uten underskrift. Det er godkjent i henhold til interne rutiner.

RAPPORT

Flodbølger etter skred fra Skutshorn ved Vangsmjøse, Vang kommune

BEREGNING AV OPPSKYLLING

DOK.NR. 20200665-01-R
REV.NR. 2 / 2023-02-15

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: Flodbølger etter skred fra Skutshorn ved Vangsmjøse, Vang kommune
Dokumenttittel: Beregning av oppskylling
Dokumentnr.: 20200665-01-R
Dato: 2022-12-01
Rev.nr. / Rev.dato: 2 / 2023-02-15

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: NVE
Kontaktperson: Kjetil Indrevær
Kontraktreferanse: Signert avrop på rammeavtale 6.september, 2022

for NGI

Prosjektleder: Sylfest Glimsdal
Utarbeidet av: Sylfest Glimsdal
Kontrollert av: Carl B. Harbitz

Sammendrag

På oppdrag fra NVE har NGI laget farekart for oppskylling av flodbølger i Vangsmjøse, Vang kommune etter et potensielt skred fra Skutshorn. Skredvolum ($9.500.000 \text{ m}^3$) og sannsynligheter for at skredet løsner er beregnet av NGU. NGI har modellert oppskylling av flodbølgene for hele Vangsmjøse. Det er produsert faresoner for flodbølger med oppskyllingsgrenser for høyt skadepotensiale for ulike gjentakperioder og for lavt skadepotensiale med svært lange gjentakperioder, Tabell 1.

De største arealene som kan bli oversvømt består av de flatere områdene ved Grindaheim (fra bensinstasjonen i vest og forbi Vang barne- og ungdomsskole i øst), samt vest i Vangsmjøse ved Øye. Ved Grindaheim ligger bl.a. rådhuset og bygget med blant annet legekontor innenfor alle faresonene, mens Vang kirke ligger på en liten høyde utenfor alle faresonene. Ved Øye ligger de fleste av bygningene på sørsiden av Lunds fjorden/-Kvamsfjorden, inkludert Øye stavkirke, innenfor faresonene. På nordsiden ligger noe av bebyggelse og næringseiendom utenfor faresonene.

I Tabell 2 er oppskyllingshøydene rundt Grindaheim og Øye oppsummert. Det er generelt større oppskylling i området ved Øye enn Grindaheim. I tillegg til ulik form på terreng og vinkel på strandlinje i forhold til hvor bølgene kommer fra (terrenget inn mot Øye virker som "en trakt"), så er også retningen skredet vil bevege seg noe vinklet mot vest hvilket også forsterker bølgen i retning mot Øye. Vi kan videre legge merke til at det er store variasjoner i oppskyllingshøyden innenfor hvert område. For området ved Grindaheim er de lågeste verdiene for alle faresonene knyttet til området ved Bøaflata hvor bølgen beveger seg langt innover land samtidig som friksjonen mot terrenget reduserer bølgen på veien innover. De høyeste verdiene oppstår ulike steder. Ved Øye finner vi noen av de lågeste og høyeste oppskyllingshøydene i nærheten av hverandre på nordsiden av Lunds fjorden som Vangsmjøsa går over til omtrent ved Øye stavkirke. Som en konsekvens av formen på terrenget og egenskapene til innkomne flodbølger er det store variasjoner på oppskyllingshøydene i hele dette området.

E16 er mer eller mindre berørt av alle faresonene sammenhengende fra Vang barne- og ungdomsskole til området hvor gamlevegen mot Øye tar av fra E16. Terrengdataene (lastet ned fra <https://hoydedata.no/>) er ikke oppdatert med den nye parsellen ved Norsvinsfjorden. Det er derfor usikkert om faresonene vil gå over veien her eller ikke. Store deler av gamlevegen mellom Bjøndalen og Hemsing bru er også berørt.

I rapporten er det også beregnet vannvolum som kan gå over demningen i Norsvinsfjorden samt trykk mot demning som følge av flodbølgen. Nedstrøms effekter som følge av dette er ikke vurdert i denne rapporten.

Faresonene for hele Vangsmjøse er levert digitalt.

Tabell 1: Grensene for faresoner levert med denne rapporten.

Faresoner jfr. TEK 17
Oppskyllingsgrense høyt skadepotensiale, sannsynlighet > 1/1000 pr. år
Oppskyllingsgrense høyt skadepotensiale, sannsynlighet > 1/5000 pr. år
Andre grenser:
Oppskyllingsgrense lavt skadepotensiale, sannsynlighet 1/10000 (til hjelp for planlegging av evakuering)
Grense maksimal oppskylling lavt skadepotensiale (for planlegging av evakuering eller byggeforbud iht. 1. ledd TEK17)

Tabell 2: Høyder i meter langs faresonegrensene gitt som kotehøyde og gitt som oppskyllingshøyde i forhold til likevektsnivået til Vangsmjøse (465.7 m.o.h.). Verdiene er gitt for laveste og høyeste verdi for områdene ved Grindaheim og Øye.

	Grindaheim		Øye	
Faresone	Kotehøyde	Oppskylling	Kotehøyde	Oppskylling
1/1000; høyt skadepotensiale	468-477	2-11	469-491	3-25
1/5000; høyt skadepotensiale	469-482	3-16	470-498	4-32
1/10000; lavt skadepotensiale	472-487	6-21	473-503	7-37
Maksimal; lavt skadepotensiale	473-489	7-23	483-512	17-46

Innhold

1	Bakgrunn	7
2	Beskrivelse av området	8
3	Anvendte begreper	12
4	Skredscenario og data	12
5	Om faresonene	13
6	Parametre og sannsynligheter	13
7	Faresoner for oppskylling i Vangsmjøse	16
8	Faresoner for redusert vannstand i Vangsmjøse	21
9	Overtopping av demning øst i Vangsmjøse	23
9.1	Scenarioer for overtopping	23
9.2	Estimering av volumfluks	26
9.3	Krefter mot demning som følge av flodbølge med overtopping	28
10	Historiske hendelser	30
11	Usikkerheter	30
12	Referanser	31

Vedlegg

Vedlegg A	Rammeverk for probabilistisk metode
Vedlegg B	Om modelleringen
Vedlegg C	Om flodbølger generert av fjellskred
Vedlegg D	Foto fra befaring

Kontroll- og referanseside

1 Bakgrunn

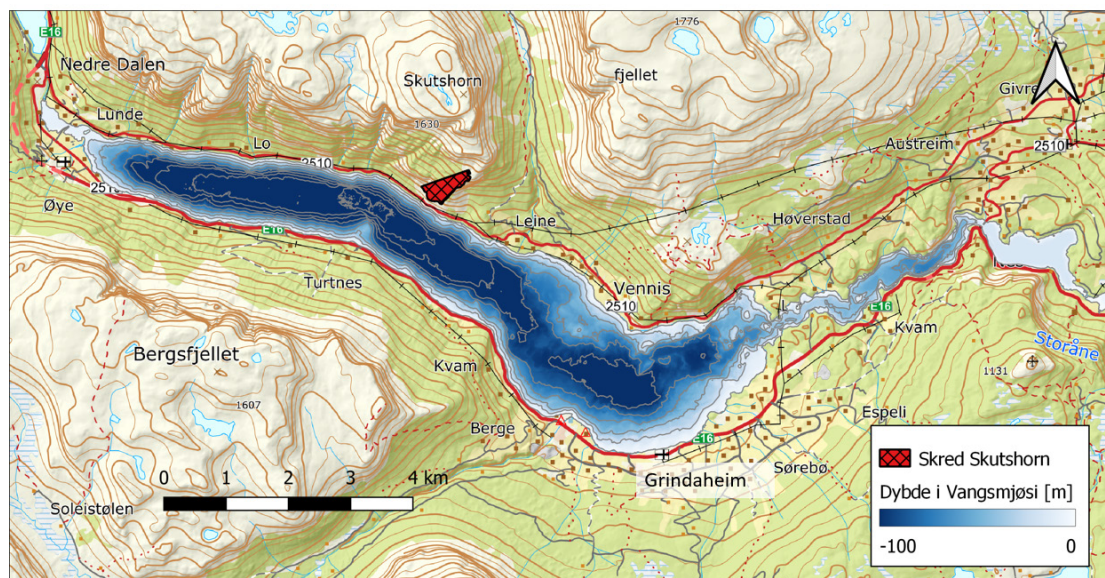
På oppdrag fra NVE har NGI laget farekart for oppskylling av flodbølger i Vangsmjøse, Vang kommune etter et potensielt skred fra Skutshorn, Figur 1 og Figur 2. Skredvolumet er av NGU beregnet til 9.500.000 m³. NGI har modellert oppskylling av flodbølgene for hele Vangsmjøse. Oppskyllingsområder ble befart av Sylfest Glimsdal, NGI 14. september, 2022.

Det er produsert farekart for flodbølger med oppskyllingsgrenser for høyt skadepotensiale for ulike gjentakperioder og for lavt skadepotensiale med svært lange gjentakperioder. Dette er gjort ved å bruke rammeverket for probabilistisk analyse av oppskylling av flodbølger etter mulige skred. Første utgave av rammeverket ble utviklet i forbindelse med analyse av flodbølger i Lyngen (NGI, 2018). Det er senere anvendt i Hyllestad (NGI, 2021a), Tussafoten (NGI, 2021b) og Stiksmoen (NGI, 2022). Den beregnede sannsynligheten for oppskylling er en kombinasjon av sannsynligheten for skredutløsning, sannsynligheten for de ulike skredscenarioer og en vurdering av usikkerhet i skredmodelleringen. De ulike grensene som er presentert er valgt med tanke på bruk i arealplanlegging etter Byggteknisk forskrift (TEK17) samt for hjelp ved etablering av eventuelle evakueringssoner.

I Vedlegg A er det probabilistiske rammeverket forklart, mens detaljer i modellering og valg av parameterverdier med tilhørende sannsynligheter er beskrevet i Vedlegg B. I Vedlegg C følger en generell beskrivelse av flodbølger generert av fjellskred.



Figur 1: Skutshorn med øvre grense av de ustabile massene inntegnet med heltrukken linje. Stiplet linje viser antatt utløpsområde over vann. Markering av skredet er basert på NGUs oppmåling. Bildet er tatt mot NØ.



Figur 2: Dybdeforhold i Vangsmjøse. Dyp større enn 100 m er farget mørkeblått. De dypeste områdene ligger nedenfor Skutshornet hvor vannet er 160 m dypt. Dybdekotene er inntegnet for hver 20 m. Grindaheim ligger ved det sørligste området av Vangsmjøse med bl.a. kommunesenter og skole. Øye og Øye stavkirke ligger nesten helt vest på sørsiden av vannet.

2 Beskrivelse av området

Vangsmjøse er regulert med HRV (høyeste regulerte vannstand iht. konsesjonen) på 465.7 m.o.h. Vannet er ca. 17 km langt og er orientert øst-vest, Figur 2. På nordsiden av vannet ligger fjellet Skutshorn, med de ustabile fjellmassene sørvendt ned mot Vangsmjøse. Vann dypt varierer fra 160 m nedenfor Skutshorn, til grunnere områder mot vest, mot Grindaheim og i den trangere delen av østre del av vannet. Her varierer dypet typisk fra noen 10-talls meter til noen få meter. Lengst øst ligger demningen som regulerer vannstanden i Vangsmjøse.

Store deler av områdene langs Vangsmjøse er relativt bratte og uten bebyggelse. Ved kommunesenteret Grindaheim er terrenget flatere med kritisk infrastruktur som ligger mellom 6 og 15 m over Vangsmjøse, Figur 3 og Figur 4. Området inkluderer bl.a. rådhus, legekantor, Vangsheimen (alders- og sjukeheim), butikker og kirke i tillegg til boliger og bondegårder. Lenger øst ligger Vang barne- og ungdomsskole. Denne ligger ca. 10-12 m over Vangsmjøse. Her er det noe brattere terreng ned mot vannet. Lenger vest fra kommunesenteret ligger bl.a. bilforretning, bensinstasjon og camping. Området her er veldig flatt og ligger typisk 1-2 m over Vangsmjøse, Figur 5 og Figur 6. Lengst vest i Vangsmjøse ligger Øye stavkirke (ca. 10 m over vannet) og Øye kirke, sammen med flere bolighus og gårder. Her er området slakt og flere gårder og bolighus ligger bare 1-10 m over Vangsmjøse, Figur 7.

Der bunnen er brattere inn mot land og skråningen også brattere videre innover land vil terrenget bidra til å redusere hvor høyt en flodbølge vil skylle opp, mens det stort sett er motsatt for slakere terreng. I tillegg så betyr formen på terrenget mye. Der bølgene beveger seg inn i et terreng som fanger bølgene (en bukt eller enden av fjorden eller vannet) vil vi kunne få forsterkning av bølgene, og særlig hvis det i tillegg blir gradvis grunnere og slakt videre innover land. Et eksempel på dette er området vestover fra Øye stavkirke. I de områdene der bølgene beveger seg mer langsmed strandlinjen vil oppskyllingen bli lågere. Grindaheim ligger slik sett noe gunstigere til med tanke på retningen bølgene vil ha. Hvis strandlinja her hadde ligget mer nord-sør ville bølgene gått rett mot strandlinja og vi ville fått kraftigere oppskylling. Se for øvrig generell informasjon om flodbølger i Vedlegg C.

Ytterligere bilder fra befaring kan sees i Vedlegg D.



Figur 3: Grindaheim sett fra Krokøddin (mot SSV). Fra venstre ligger blant annet to matbutikker (grå bygg på hver sin side av E16) og kirka. Taket til Vangsheimen (med orange vindskier) skimtes til høyre for kirka.



Figur 4: Grindaheim sett fra Krokaøddin mot SSV. Fra høyre ser vi rådhuset (grått) og et bygg med blant annet legekontor og bibliotek (rødt).



Figur 5: Bøaflata vest for Grindaheim sett Krokaøddin mot SSV. Campingplassen kan sees helt i høyre bildekant (se Figur 6).



Figur 6: Bensinstasjonen, bilforretning og campingplassen vest for Grindaheim sett fra Sparstadøddin mot SSV.



Figur 7: Området ved Øye stavkirke sett fra Steinde mot SSV. Gamle E16 går mellom den kvite Øye kirke og bondegården nærmere Vangsmjøse. Øye stavkirke er skjult i en liten skog til høyre for den største røde låven som ligger foran Øye kirke. Innløpet i tunnelen vestover for den nye E16 parsellen ligger skult i granskogen bak Øye kirke.

3 Anvendte begreper

Med **overflateheving** menes bølgetoppens høyde over stillevannstand (likevekts-nivå), mens **bølgehøyde** er definert som høydeforskjellen mellom bølgetopp og bølgedal. Disse begrepene benyttes for å beskrive bølger i åpent vann. I oppskyllingssone benyttes begrepet **oppskyllingslinje** for den linjen som kan trekkes på land for å vise hvor langt innover vannet vil nå under oppskylling (innerste linje for lavt skadepotensiale). Videre brukes her også **strømningsdybde** (høyde over terrenget i ethvert punkt) og **oppskyllingshøyde** (høyde over likevektsnivå langs oppskyllingslinje). **Vannivå** brukes om høyden av vannet i ethvert punkt mellom oppskyllingslinje og strandlinje, målt ut fra likevekts-nivå. For vannbevegelse brukes **partikkelhastighet** for å beskrive hvor fort vannet beveger seg både i åpent vann og under oppskylling. Det er verdt å merke seg at partikkelhastighet (strømhastigheten) ikke er det samme som hastigheten bølgene forplanter seg med. Maksimale verdier for ovennevnte størrelser beregnes ved å ta ut høyeste oppnådde verdi i hvert punkt i løpet av beregningstiden.

4 Skredscenario og data

I Tabell 3 vises data for volum og gjentakperiode for scenarioet ved Skutshorn (se også Vedlegg A). Sammen med formen på det ustabile volumet, danner dette grunnlaget for modelleringen. Denne informasjonen er gitt av NGU som også har skannet dypet av hele Vangsmjøse i høy oppløsning og gjort disse dataene tilgjengelige for NGI. Ved å koble dybde-dataene med høyoppløselige terrengdata lastet ned fra <https://hoydedata.no> har vi en komplett terrengmodell for både skred- og flodbølgeomellering. Den nye parsellen av E16 øst for Grindaheim er ennå ikke inkludert i terrengdataene. Oppskylling mot veien i Norsvinsfjorden er dermed noe mer usikker. I skredmodelleringen er det medtatt en såkalt bulkingfaktor på 1.3 (dvs. at volumet av skredet etter at det løsner inkludert volumet av luft mellom steiner og blokker er 1.3 ganger større enn volumet av skredet som fast fjell).

Tabell 3: Oppgitt gjentakperiode (medianverdi og usikkerhetsintervall).

	Skutshorn
Volum [m ³]	9.500.000
Oppgitt medianverdi for gjentakperiode [år]	365
Oppgitt usikkerhetsintervall for gjentakperiode [år]	54-1957
Oppgitt usikkerhetsintervall for gjentakperiode 5 og 95 percentil [år]	87-1155

5 Om faresonene

I Byggteknisk forskrift (TEK17) betraktes flodbølger som sekundærvirkning av skred (§7.3), og det opereres derfor med flodbølge faresoner med største nominelle årlige sannsynlighet 1/1000 og 1/5000. De ulike grensene som er produsert for flodbølger etter skred fra Skutshorn er beskrevet i Tabell 4.

Følgende faresoner som viser akkumulert resultat for oppskylling av flodbølger etter samtlige av våre scenarioer er beregnet:

- For arealplanlegging i oppskyllingsssonene: grensene 1/1000 og 1/5000 for oppskylling med høyt skadepotensiale som er knyttet til TEK 17 §7.3 og unntak etter §7.4.
- Som grunnlag for utarbeidelse av evakueringsplaner: grense for flodbølge oppskylling (lavt skadepotensiale) med sannsynlighet 1/10000 samt grense for maksimal flodbølge oppskylling (lavt skadepotensiale). Sistnevnte er den største oppskyllingen vi får for alle kombinasjoner av parametere og skredvolumer som inngår i analysen. Sannsynligheten for oppskylling opp til maksimal grense er meget liten, så denne linjen kan være til hjelp for å definere en sone for byggeforbud iht. 1. ledd i TEK 17.

Tabell 4: Grensene for faresoner levert med denne rapporten.

Faresoner jfr. TEK 17
Oppskyllingsgrense høyt skadepotensiale, sannsynlighet > 1/1000 pr. år
Oppskyllingsgrense høyt skadepotensiale, sannsynlighet > 1/5000 pr. år
Andre grenser:
Oppskyllingsgrense lavt skadepotensiale, sannsynlighet 1/10000 (til hjelp for planlegging av evakuering)
Grense maksimal oppskylling lavt skadepotensiale (for planlegging av evakuering eller byggeforbud iht. 1. ledd TEK17)

6 Parametre og sannsynligheter

Modellering ved hjelp av probabilistisk analyse av flodbølgeoppskylling involverer flere steg. De viktigste stegene er:

1. Bestemme skredscenarioer inkl. sannsynligheter (medianverdi og utfallsrom utført av NGU).
2. Beregne midlere sannsynligheter for aktuelt skredscenario, se Vedlegg A.
3. Bestemme hvilke skredparametere med tilhørende utvalg av parameterverdier som skal inngå, samt å tilordne sannsynligheter til hver av disse parameterverdiene. Her har vi ved hjelp av omfattende sensitivitetstester og erfaring fra

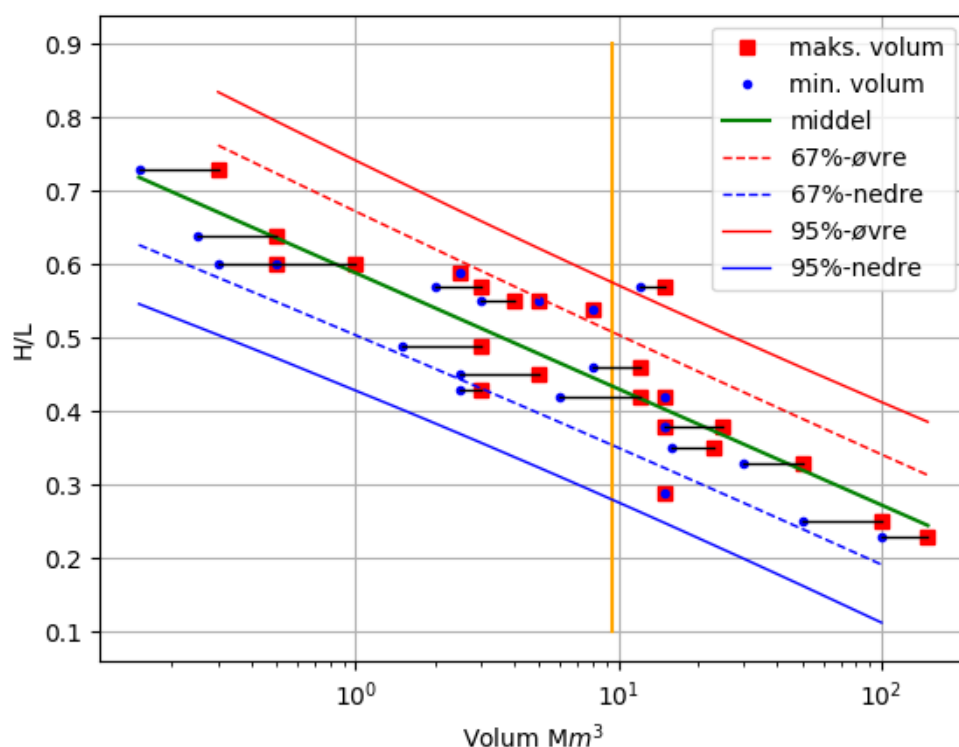
tidligere studier valgt ut de parameterne som har størst innvirkning på oppskyllingen. Se også Vedlegg B.

4. Gjennomføre flodbølgeberegninger med alle kombinasjoner av parametere. For Skutshorn er det ett volum og 11 beregningsområder rundt Vangsmjøse. Alle kombinasjoner av parametere som inngår gir totalt 1650 oppskyllingsberegninger.
5. Sammenstille og summere sannsynlighetene fra alle oppskyllingsberegningene for å knytte sannsynligheter til oppskyllingshøyder (TEK 17).
6. Kvalitetssikring i alle ledd.

Skredparameterne som inngår er:

- Skredets undersjøiske utløpsdistanse R , bestemmes ved analyse av skredutløpsstatistikk, se Figur 8.
- Skredets frontareal A , bestemmes ved hjelp av modellering, erfaring, tidligere arbeider samt pågående arbeid med kalibrering mot tidligere hendelser (bl.a. Årdalstangen, 1983) og mot avanserte modeller for generering av flodbølger etter fjellskred.
- Skredets treffhastighet U , bestemmes ved hjelp av modellering, erfaring, tidligere arbeider.
- Siden beregning av flodbølgegenereringen innebærer en viss grad av forenklinger, gjennomføres flodbølgeberegningene med to alternative modeller for bølgegenerering. De to alternative modellene er enten et avgrenset eller et uendelig langt skred. For et uendelig langt skred betyr dette at vi kun tar med bidrag fra fronten av skredet som i de fleste tilfeller gir høyere bølger. Frontarealet for det uendelig lange skredet er identisk med frontarealet for det avgrensede skredet (der også bakre ende av skredet innvirker på bølgegenereringen). Vi mener en riktig framstilling av et reelt skred ligger et sted mellom disse to alternative modellene.

Det er i størst mulig grad forsøkt å koble valg av parameterverdier og sannsynligheter til modellering og statistikk. I analysen har vi for det definerte volumet fra Skutshorn brukt 2 ulike skredformer (avgrenset og uendelig langt skred), 5 ulike utløpsdistanser, 5 ulike frontarealer, 3 ulike treffhastigheter, samt 11 oppskyllingsområder. Alle parametere og sannsynligheter er gitt i Tabell 5, bortsett fra sannsynlighet for avgrenset og uendelig langt skred. I de fleste tilfeller vil et uendelig langt skred gi høyere bølger enn et skred med avgrenset lengde. Vår ekspertvurdering er å gi en sannsynlighet på henholdsvis 0.3 (kort) og 0.7 (uendelig langt) som må sees på som et beste estimat (altså hverken under- eller overestimering). Beregningene ble kjørt på en ThinkStation P320 med 64GB RAM og 8 beregningskjerne. Alle de 1650 beregningene ble gjennomført i løpet av ca. 2 døgn. Det er gjort en rekke kryssjekker av resultatfiler for å kvalitetssikre modelleringen og de store datamengdene som danner grunnlaget for analysen, blant annet håndberegninger av sannsynligheter for et mindre utvalg av beregningene. Flere detaljer er utførlig beskrevet i Vedlegg A (probabilistisk metode) og i Vedlegg B (valg av parametere og sannsynligheter).



Figur 8: Statistikk på fallhøyde (H) og utløpslengde (L) for kjente store skred i Norge (NGU, 2002). Grønn, blå og røde skrå linjer er regresjonslinjer som viser tilhørende sannsynligheter på utløpslengder som er brukt i analysen (totalt fem utløp). Vertikal gul linje viser hvor skredet fra Skutshorn plasserer seg (9.5 Mm³).

Tabell 5: Parameterverdier og tilhørende sannsynligheter (P) brukt i beregningene. R er undersjøisk utløpsdistanse (5 verdier), A er skredets frontareal (5 verdier) og U er skredets treffhastighet (3 verdier).

Undersjøisk utløp			Frontareal			Treffhastighet		
Param	R[m]	P	Param	A[m²]	P	Param	U[m/s]	P
R1	1046	0,07	A1	29695	0,2	U1	67	0,2
R2	1012	0,24	A2	23765	0,45	U2	51	0,6
R3	794	0,38	A3	17030	0,2	U3	37	0,2
R4	620	0,24	A4	15327	0,1			
R5	445	0,07	A5	13624	0,05			

7 Faresoner for oppskylling i Vangsmjøse

Beregningene av oppskylling av flodbølger i Vangsmjøse gir fire faresoner som alle er beskrevet i Tabell 4. I Figur 9-Figur 14 vises de fire faresonene for utvalgte lokasjoner rundt Vangsmjøse. Hvor høyt linjene ligger i terrenget er oppgitt i Tabell 6.

De største arealene som kan bli oversvømt består av de flatere områdene ved Grindaheim (fra bensinstasjonen i vest og forbi Vang barne- og ungdomsskole i øst), samt vest i Vangsmjøse ved Øye. Ved Grindaheim ligger bl.a. rådhuset og bygget med blant annet legekontor helt eller delvis innenfor alle faresonene, mens Vang kirke ligger på en liten høyde utenfor alle faresonene. Ved Øye ligger de fleste av bygningene på sørsiden av Lunds fjorden/Kvamsfjorden, inkludert Øye stavkirke, innenfor faresonene. På nordsiden ligger noe av bebyggelse og næringseiendom utenfor faresonene.

Som vi ser av oppskyllingshøydene er det generelt større oppskylling i området ved Øye enn Grindaheim. I tillegg til ulik form på terreng og vinkel på strandlinje i forhold til hvor bølgene kommer fra (terrenget inn mot Øye virker som "en trakt", se også Kap. 2), så er også retningen skredet vil bevege seg noe vinklet mot vest hvilket forsterker bølgen i retning mot Øye. Vi kan videre legge merke til at det er store variasjoner i oppskyllingshøyden innenfor hvert område. For området ved Grindaheim er de lågeste verdiene for alle faresonene knyttet til området ved Bøaflata hvor bølgen beveger seg langt innover land samtidig som friksjonen mot terrenget reduserer bølgen på veien innover. De høyeste verdiene oppstår ulike steder. Ved Øye finner vi noen av de lågeste og høyeste oppskyllingshøydene i nærheten av hverandre på nordsiden av Lunds fjorden som Vangsmjøsa går over til omtrent ved Øye stavkirke, Figur 12. Som en konsekvens av formen på terrenget og egenskapene til innkomne flodbølger er det store variasjoner på oppskyllingshøydene i hele dette området.

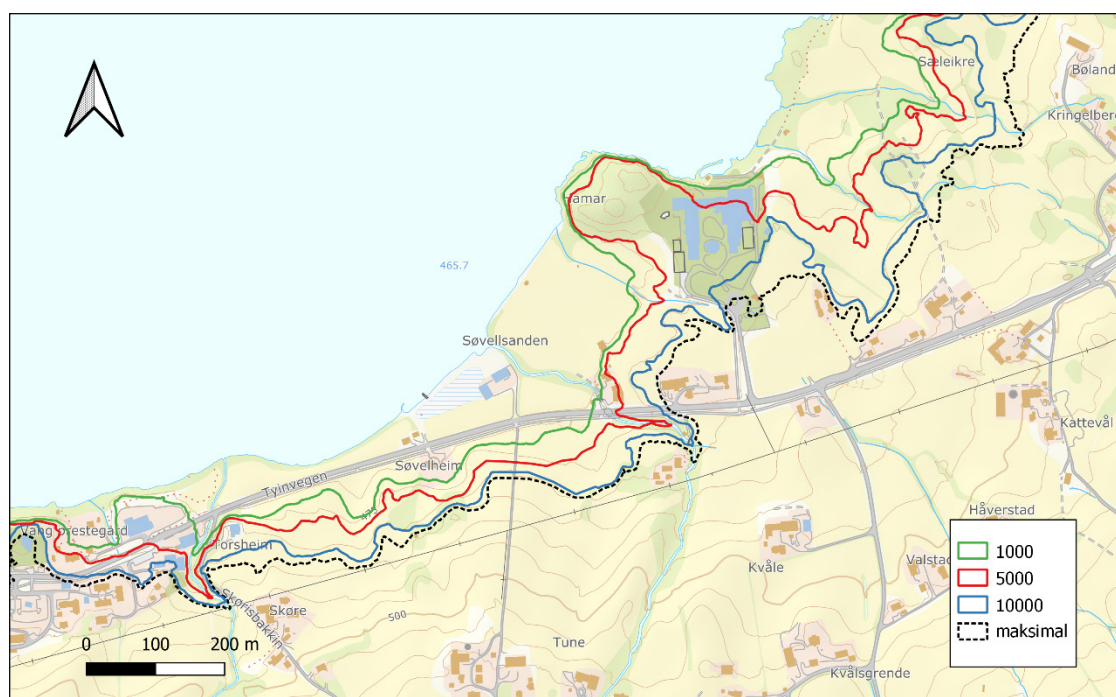
E16 er mer eller mindre berørt av alle faresonene sammenhengende fra Vang barne- og ungdomsskole til området hvor gamlevegen mot Øye tar av fra E16. Terrengdataene (lastet ned fra <https://hoydedata.no/>) er ikke oppdatert med den nye parsellen ved Norsvinsfjorden. Det er derfor usikkert om faresonene vil gå over veien her eller ikke. Store deler av gamlevegen mellom Bjøndalen og Hemsing bru er også berørt.

Overtopping av demning i østre ende av Vangsmjøse og nedstrøms effekter som følge av dette er ikke vurdert i denne rapporten. Basert på resultatene fra modelleringen ser vi oppskylling nær demningen på 1-3 m. For å kunne vurdere effekten nedstrøms må det gjøres spesifikke beregninger av flodbølgen inn mot dammen, samt en eventuell flomberegning videre nedstrøms.

I Figur 15 vises ankomsttider for flodbølgen etter at et skred fra Skutshorn har truffet Vangsmjøse. Flodbølgen vil bruke ca. 2.5 minutter til både Øye og Grindaheim, mens det vil gå ca. 9 minutter til den har nådd demningen lengst øst.

Tabell 6: Høyder i meter langs faresonegrensene gitt som kotehøyde og gitt som oppskyllingshøyde i forhold til likevektsnivået til Vangsmjøse (465.7 m.o.h.). Verdiene er gitt for laveste og høyeste verdi for områdene ved Grindaheim og Øye. Medianverdi er gitt i parentes.

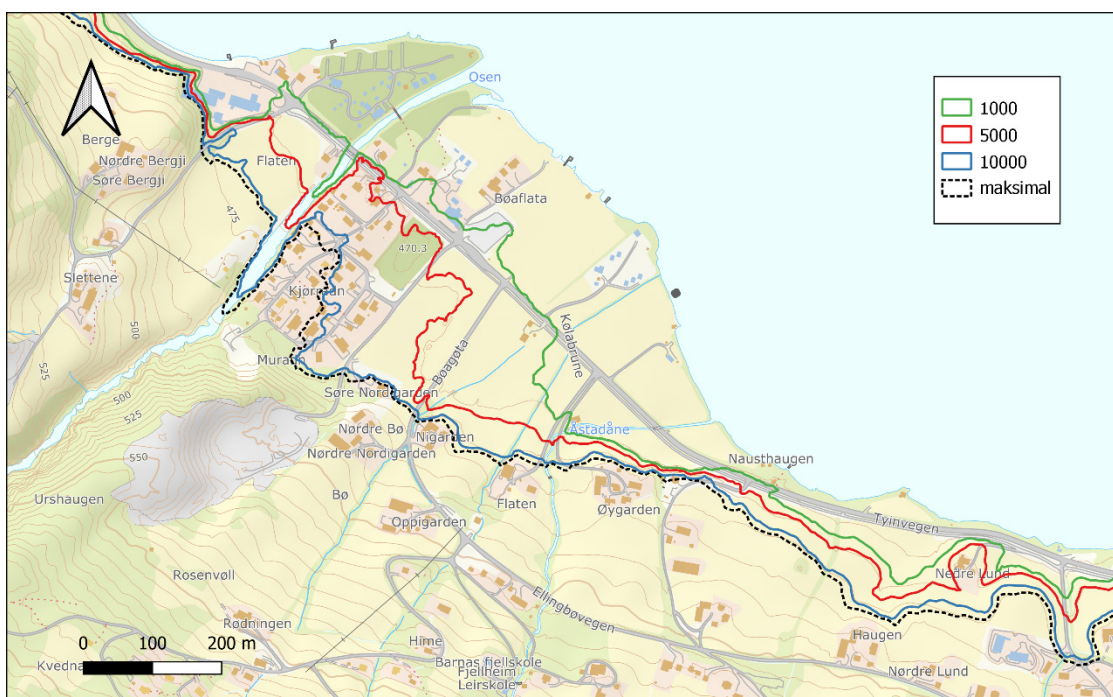
	Grindaheim		Øye	
Faresone	Kotehøyde	Oppskylling	Kotehøyde	Oppskylling
1/1000; høyt skadepotensiale	468-477 (471)	2-11 (5)	469-491 (476)	3-25 (10)
1/5000; høyt skadepotensiale	469-482 (473)	3-16 (7)	470-498 (482)	4-32 (16)
1/10000; lavt skadepotensiale	472-487 (478)	6-21 (12)	473-503 (486)	7-37 (20)
Maksimal; lavt skadepotensiale	473-489 (479)	7-23 (13)	483-512 (491)	17-46 (25)



Figur 9: Beregnede faresoner for området Grindaheim øst, med blant annet barne- og ungdomsskole innenfor neset litt til høyre i figur. 1000 (høyt skadepotensiale), 5000 (høyt skadepotensiale) og 10000 er gjentakperioder i år, mens den maksimale beregnede oppskyllingen er vist med stiplet svart linje.



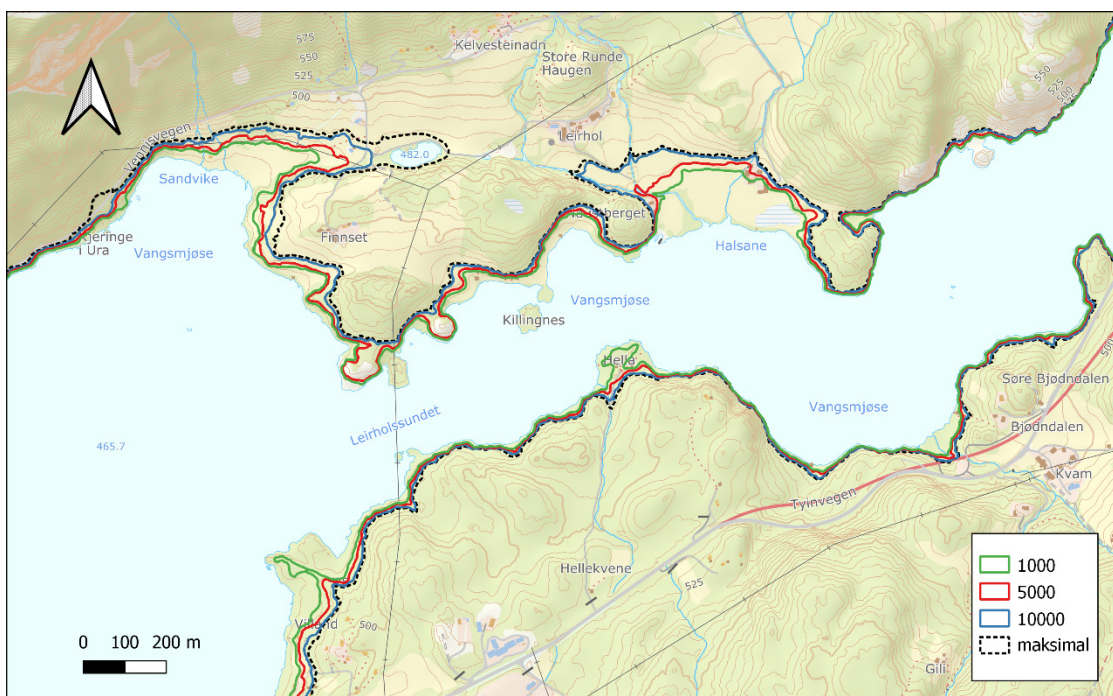
Figur 10: Beregnede faresoner for Grindheim.



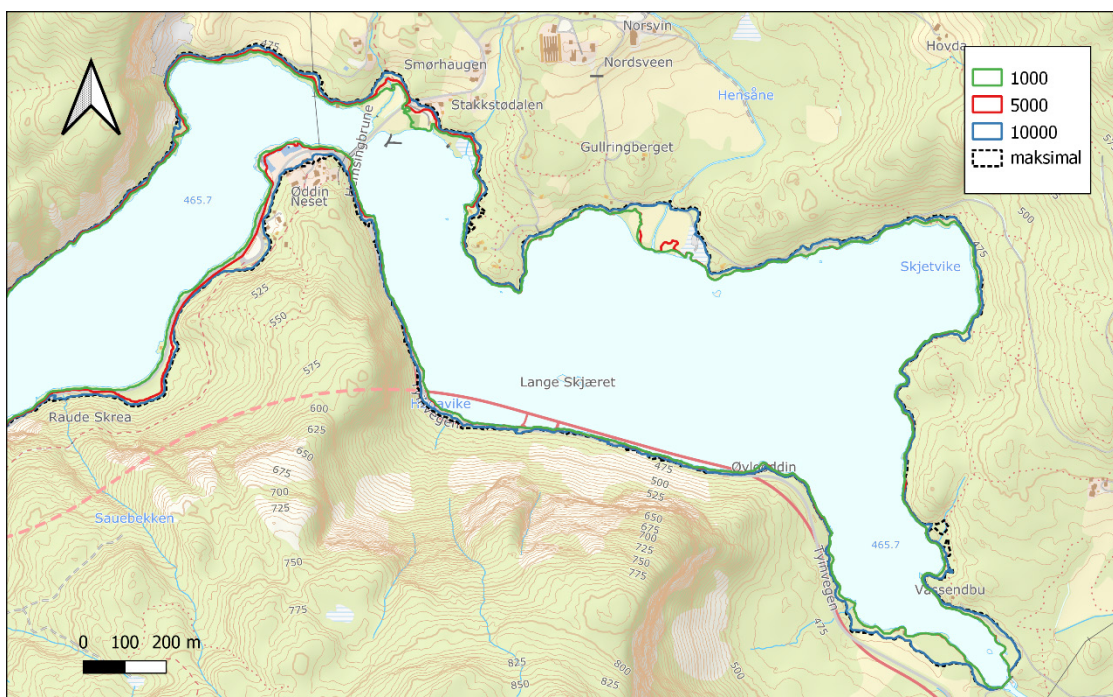
Figur 11: Beregnede faresoner for området vest for Grindaheim inkludert Bøafleta.



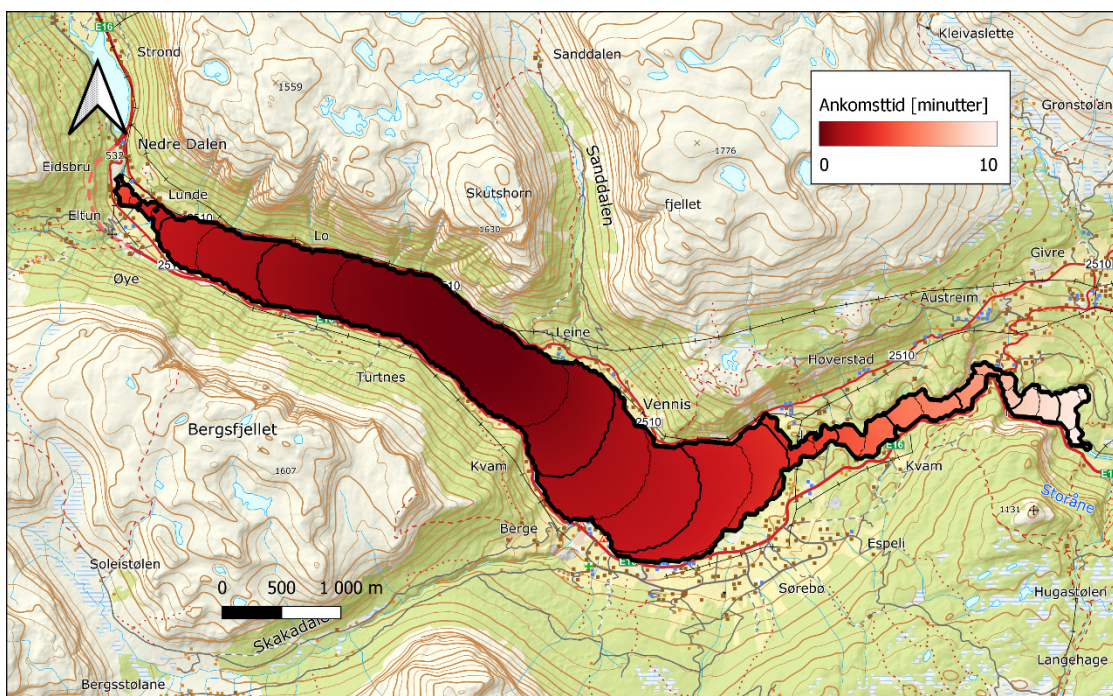
Figur 12: Beregnede faresoner for vestre del av Vangsmjøse/Lundsfjorden med blant annet Øye stavkirke.



Figur 13: Beregnede faresoner for områdene ved Leirholsundet.



Figur 14: Beregnede faresoner for området lengst øst, med Hemsing bru og demning helt til høyre.



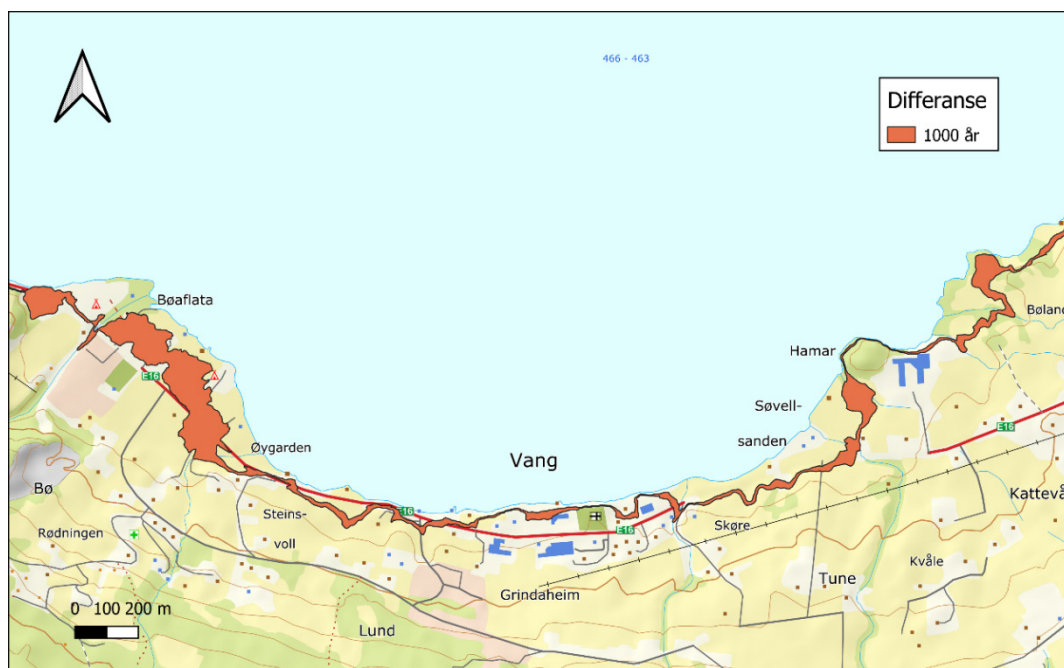
Figur 15: Ankomsttider for skred fra Skutshorn gitt i minutter. Konturlinjer er tegnet opp for hvert 0.5 og 1 minutt (hhv. tynn stiplet og tykk linje).

8 Faresoner for redusert vannstand i Vangsmjøse

Basert på beregninger av faresonene over har NGI i tillegg vurdert oppskylling av flodbølger for redusert vannstand i Vangsmjøse. Å redusere vannstanden forut for en ventet utløsning av skredet ved Skutshorn vurderes som et mulig tiltak for å begrense oppskyllingen. En nedtapping av Vangsmjøse på totalt 1.0 m vil ifølge NVE kunne ta 72 timer, mens en nedtapping på 2.0 m vil ta to uker. Det er som vurdert av NVE mange sider ved en slik nedtapping som må undersøkes for å få et totalt bilde av konsekvenser og effekter. Fordelen av de reduserte oppskyllingssoneene må vurderes opp mot negative bi-effekter en slik nedtapping vil kunne ha. NGI vil spesielt påpeke den mulige effekten en slik nedtapping kan ha på stabiliteten i skråninger rundt Vangsmjøse. Faresonene med redusert vannstand kan også være til hjelp i en akutsituasjon der det må igangsettes evakuering og vannstanden allerede er naturlig redusert i forhold til normal vannstand.

Det er ikke gjort egne fulle beregninger for redusert vannstand, men basert på NGIs vurdering og noen enklere tester viser vi at det er en god tilnærming å bare redusere høyden på de allerede beregnede faresonene. Det vil følgelig være noe usikkerhet knyttet til disse linjene for redusert vannnivå på lokal skala, men de gir et overordnet bilde av effekten av en slik nedtapping. Det er fra NVEs side ønske om å vurdere effekten for en vannstand på 463.7 moh. som tilsvarer 2 m under høyeste regulerte vannstand (HRV = 465.7 moh.) som igjen er brukt i beregningene for de offisielle faresonene.

NGI leverer faresoner for redusert vannstand digitalt. I Figur 16 til Figur 18 vises eksempler ved Grindaheim for differanse mellom faresonene for HRV og HRV-2m for gjentakperiode på hhv. 1000 og 5000 år, samt den maksimale oppskyllingen.



Figur 16: Differanse mellom faresonene med gjentakperiode 1000 år basert på HRV og HRV - 2m.



Figur 17: Differanse mellom faresonene med gjentakperiode 5000 år basert på HRV og HRV - 2m.



Figur 18: Differanse mellom sone for maksimal oppskylling basert på HRV og HRV - 2m.

9 Overtopping av demning øst i Vangsmjøse

I dette kapitlet beskrives modellering av overtopping av demningen øst i Norsvinsfjorden som følge av et potensielt skred fra Skutshorn, Figur 21 og Figur 22. I tillegg til beregning av volumet av vann (volumfluks) som går over demningen (og som kan medføre en nedstrøms flom) er det også angitt bølgelaster (trykkbelastningen) mot demningen som følge av flodbølgen. Volumfluksen vil anvendes som inngangsverdier i en egen flomberegning nedstrøms demningen som skal gjennomføres av NVE. Beskrivelsene av konstruksjon av dam gir oss en høyde på damkrona på 1.5 m ("fribord") over HRV (dvs. damkrona ligger på 467.2 moh.), mens fyllingsdam mot sør har terrenghøyde +3.8 m over HRV, Figur 22. Flodbølgen er beregnet med et vannivå tilsvarende HRV (465.7 moh.).

9.1 Scenarier for overtopping

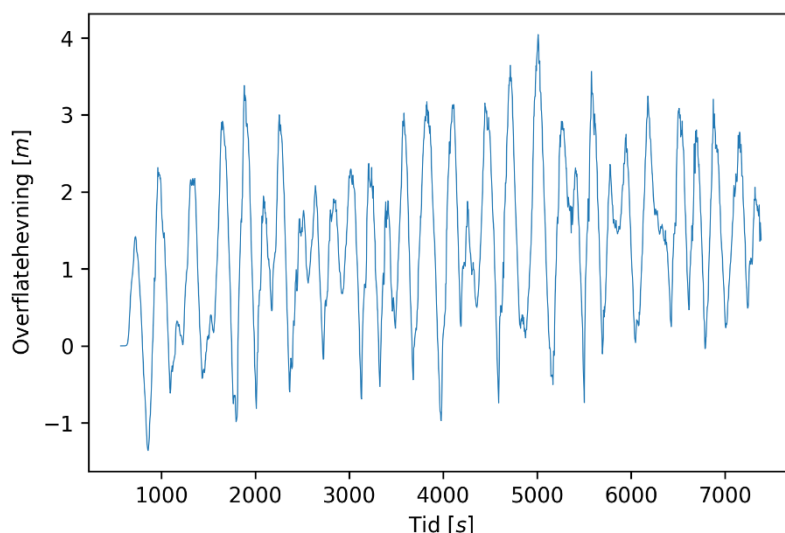
Beregningene av faresoner i oppskyllingssoner for ulike gjentakperioder i denne rapporten baserer seg på akkumulering av oppskylling av et stort antall ulike skred-scenarier med tilhørende sannsynligheter (probabilistisk modell). For å knytte overtoppingen til gjentakperiodene (1000, 5000 år og maks) må vi i stedet for å gjøre en probabilistisk analyse plukke ut de enkeltscenariene beregnet i hovedanalysen med en oppskyllingshøyde som er nærmest faresonene med de nevnte sannsynlighetene. Basert på visuell inspeksjon av ulike potensielle scenarier ender vi opp med scenarier vist i Tabell 7. Anvendt skredmodell er "uendelig langt" skred.

I Figur 19 og Figur 20 vises eksempler på tidsserier for 5000 års scenarioet for hhv. overflatehevning og partikkelhastighet som vannet har ca. 10 m nordvest for demningen. Beregningene viser betydelige bølger i hele beregningsperioden (ca. 2 timer). Bølger som skylles inn i Norsvinsfjorden ved Hemsing bru gir midlertidig økt vannstand i Norsvinsfjorden. Dette kan sees i tidsserien i Figur 19 der vannets likevektsnivå øker noe. Samtidig med økt vannstand så får vi også en effekt av stående bølger i denne delen av beregningsområdet som her gjør at bølgene forsterkes med tid (for stående bølger for flodbølger, se f.eks. Harbitz et al., 1993). Vi mener likevel at at bølgene i virkeligheten dempes raskere enn modelleringen (uten viskøse effekter) viser. Ut fra vår vurdering antar vi at bølger etter ca. 4500 sekunder vil være lågere og avta raskere enn det modelleringen viser.

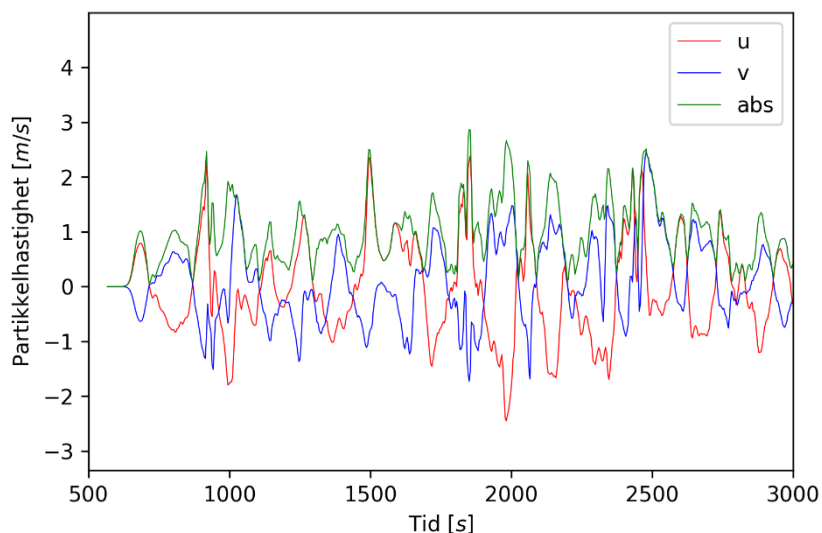
Tabell 7: Parameterverdier for skred fra Skutshorn brukt i analysen for overtopping av demning øst i Vangsmjøse/Norsvinsfjorden. Kodene i parentesene (A1, A2, R1, ... osv.) henviser til parameternavn i Tabell 5 for den probabilistiske analysen.

Gjentaksperiode [år]	A (frontareal) [m ²]	R (undersjøisk utløp) [m]	V (treffhastighet) [m/s]
1000	23756 (A2)	794 (R3)	51 (U2)
5000	29695 (A1)	794 (R3)	51 (U2)
Maks	29695 (A1)	1046 (R1)	67 (U1)

Vi antar videre at bygget på toppen av demningen (Figur 22) kan bli skyllet bort og derved ikke redusere mengden vann over demningen. Bygget er derfor ikke inkludert i modelleringen.



Figur 19: Eksempel på overflatehevning i meter ca. 10 m nordvest for dam for 5000 års scenarioet.



Figur 20: Eksempel på vannets partikkelhastighet i meter ca. 10 m vest for dam for 5000 års scenarioet. Figuren viser kun de første 3000 s av beregningene. "u" og "v" er hhv. hastighet i x (øst-vest) og y (nord-sør) retning, mens "abs" er absoluttverdien av hastigheten og er gjennomsnittlig rettet normalt mot eller fra demningen.



Figur 21: Lokasjon av demningen sørøst i Norsvinsfjorden



Figur 22: Foto av demningen. Toppen av konstruksjonen under bygget på demningen ligger på +1.5 m over HRV (som er høyden benyttet som terskel for beregning av overtopping). Fyllingsdammen nærmest har en terrenghøyde på + 3.8 m over HRV.

9.2 Estimering av volumfluks

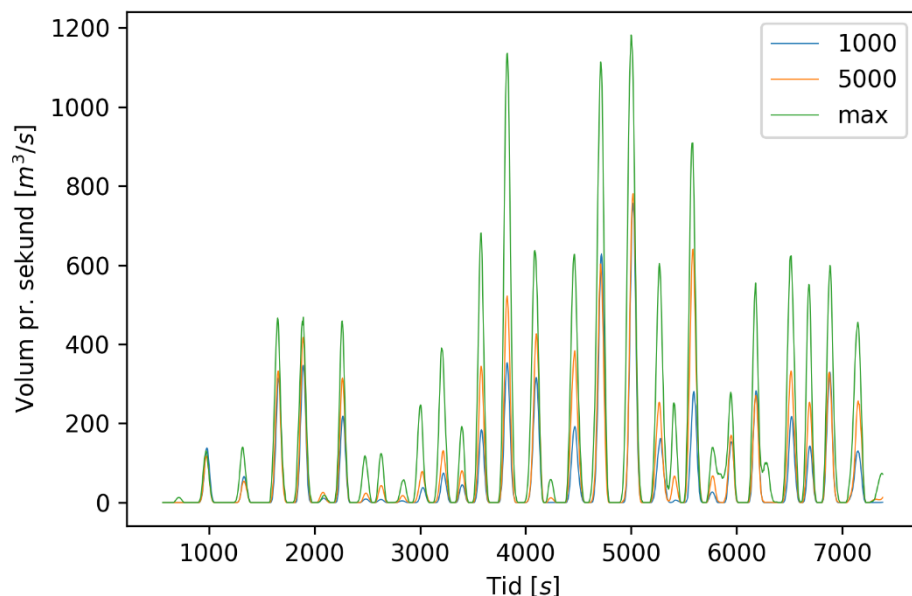
I Figur 23 ser vi beregnet volumfluks for de ulike gjentakperiodene, mens det i Tabell 8 er tilsvarende verdier for maksimal volumfluks, gjennomsnittlig volumfluks og totalt volum over demningen. Det kumulative volumet (oppsamlet volum over demningen som funksjon av tiden) er vist i Figur 24.

Figur og verdier i tabellen er beregnet for de første 6800 s etter at første bølge når demningen (etter ca. 400 s). Volumfluksen er beregnet ved å ta modellert vertikal vannhøyde over demningen multiplisert med bredden på demningen der vannet vil kunne skylle over og til slutt multiplisert med beregnet partikkelhastighet vannet har over damkrona. Bredden på området vannet strømmer over er satt til 50 m og inkluderer selve betongdelen av demningen og overløp lenger nordøst, samt ca. 5 m mot nordøst og sørvest for å inkludere hovedområdet av for overtoppingen. Både vertikal vannhøyde og partikkelhastighet er tidsavhengige parametere. Siden modellering av hastighet på damkrona er noe usikker er denne kvalitetssikret ved å sjekke mot analytiske relasjoner for bevaring av volum, basert på hastighet et stykke før demningen og tilhørende overflatehevning, samt terrenghøyder.

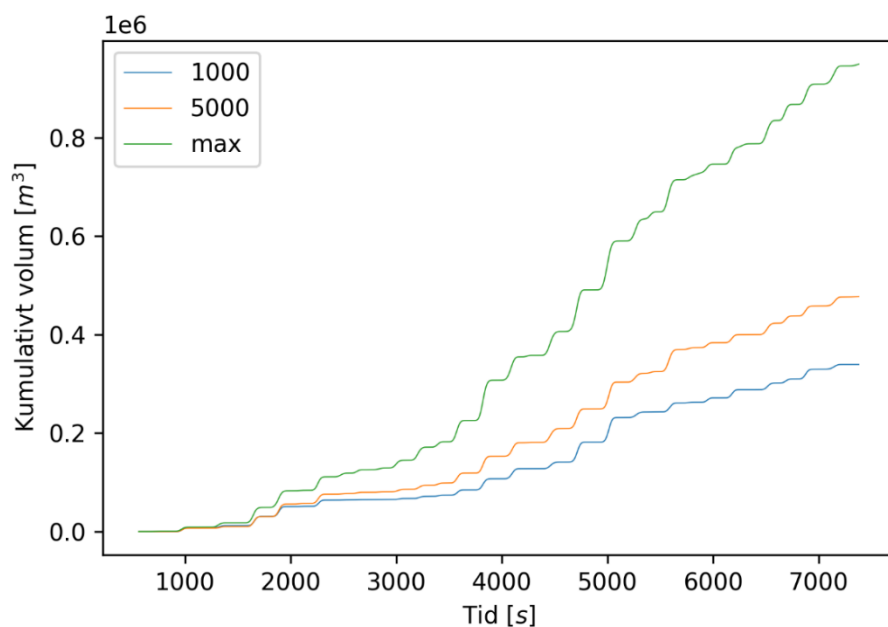
Til sammenligning vil f.eks. en 200-årsflom ut fra Vangsmjøse basert på beregninger av AFRY (2020) være noe over 200 m³/s. Det er verdt å merke seg at en flom nedstrøms demningen som følge av en flodbølge vil arte seg annerledes enn en vanlig flom (spesielt områdene nedstrøms nærmest demningen) siden man for den førstnevnte situasjon vil ha kraftige pulser av vannmengder som forplanter seg nedover elva.

Tabell 8: Estimering av verdier for overtopping beregnet for 6800 s etter at første bølge når demningen.

Scenario	Maks. volum fluks [m ³ /s]	Gjennomsnittlig volumfluks [m ³ /s]	Totalt volum [m ³]
1000	750	50	340000
5000	780	70	480000
Maks	1180	140	950000



Figur 23: Estimering av volumfluks [m^3/s] over demningen for ulike gjentakperiode (1000 og 5000 år), samt for maksimal oppskylling. Volumfluksen er i figuren vist som funksjon av tiden [s]. Resultatene er glattet noe for å ta bort ufysiske ekstreme enkeltverdier (glattingen påvirker i liten grad volumet som går over demningen).



Figur 24: Kumulativt volum over demningen (dvs. summert volum som funksjon av tiden). Verdien i høyre ende av kurvene tilsvarer totalt volum over demningen i Tabell 8.

9.3 Krefter mot demning som følge av flodbølge med overtopping

For å beregne krefter mot demningen som følge av flodbølge med overtopping, deles problemet opp i dynamiske og hydrostatiske trykkrefter mot demningen. Beregningene er basert på formler for beregning av strøm mot en fast plate (se f.eks. Gjevik, 2009) samt vannhastigheter og vannhøyder fra simuleringene av flodbølgen fra Skutshorn for beregning av faresoner (se kapittel 7).

For å beregne de dynamiske trykkreftene som bølgene setter opp mot demningen definerer vi to situasjoner som flodbølgene beregnes i:

1. Dagens situasjon med demning 1.5 m over HRV (465.7 moh.)
2. Hypotetisk situasjon hvor vi tenker oss at vi har en innsjø nedstrøms demningen med samme stille vannshøyde som Norsvinsfjorden og hvor demningen mellom dem er fjernet, dvs. at bølgen beveger seg sørøstover uhindret.

Ved å sammenligne beregninger av flodbølgen for situasjon 1) og 2) kan man gjøre estimater på trykkreftene demningen utsettes for. Strømningshastigheten bølgen ville hatt ved demningen ved situasjon 2) kaller vi U_1 (retning mot demningen) mens strømningshastigheten for reflektert bølge kaller vi U_2 (retning fra demningen dvs. med motsatt fortegn). Strømmen av bevegelsesmengde (momentumfluks) gjennom en kontrollflate (A_i) i samme retning som vannstrømmen er gitt som

$$I_i = M_i \cdot U_i$$

hvor

$$M_i = \rho \cdot |U_i| \cdot A_i$$

er masse som strømmer ut pr. tidsenhet (massefluks) [kg/s], U_i er hastigheten av vannet [m/s], A_i er tverrsnitt av vannstrømmen [m^2] og ρ er tettheten til vannet [kg/m^3]. De dynamiske trykkreftene som demningen påføres av vannstrømmen tilsvarer endring av bevegelsesmengde når vannet bremses opp og reflekteres av demningen

$$F_{dyn} = I_1 - I_2.$$

Fra beregninger av situasjon 2) finner vi typiske verdier på vannets hastighet (partikkelhastighet) U_1 under høyeste bølge vist i Tabell 9 i retning mot demningen. Strømningshastigheten U_2 for reflektert bølge kan man ikke hente direkte ut av beregningene, men vi antar at reflektert bølge har høyde tilsvarende bølgen som passerer demningen i situasjon 2) som er et konservativt anslag. Fra kjente relasjoner for lineært hydrostatisk sammenheng mellom strømningshastighet og overflatehevning for flodbølger finner vi at

$$U_2 = \eta' \cdot \sqrt{\frac{g}{h}}$$

hvor η' er høyde på innkommende bølge for situasjon 2) og som er en estimert høyde på reflektert bølge, g er tyngdens akselerasjon og h er vanddypet. Vannets tetthet settes til

$\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$. Videre så er arealet av demningen $A_1 = A_2 = A$. Vi får da det dynamiske bidraget til trykket (kraft per areal)

$$P_{dyn} = \frac{F_{dyn}}{A} \approx \rho \cdot (U_1^2 + U_2^2).$$

På grunn av at U_2 er rettet motsatt av U_1 dderes leddene for P_{dyn} . Det hydrostatiske bidraget til trykket målt ved dybde h ved demningen vil da være

$$P_{stat} = \rho g(\eta + h)$$

g er tyngdens akselerasjon $9,81 \text{ m/s}^2$, η er høyden på største bølge ved overtopping målt fra HRV og h er vanndypet relativt HRV der man ønsker å beregne trykket. Gamle kart i Innsjødatabasen (<https://atlas.nve.no/>) viser at vanndypet ved demningen er 4.5 m. Siden det atmosfæriske trykket (tilnærmet lik $100000 \text{ N/m}^2 = 100 \text{ kPa}$) virker på begge sider av demningen er dette utelatt i beregningene. Det totale trykket får en da ved å summere det dynamiske og det hydrostatiske bidraget

$$P_{total} = P_{dyn} + P_{stat}$$

Beregnet totalt trykk mot foten av demningen (dvs. $h=4.5 \text{ m}$) for de ulike scenarioene er vist i Tabell 9. For å beregne trykk mot demningen for andre høyder anvendes likningene over for det hydrostatiske trykket (P_{stat}) som så adderes til verdiene for det dynamiske trykket (P_{dyn}) i Tabell 9. Beregningene er basert på at alt vannet som treffer demningen under HRV+1.5 m blir reflektert, dvs. at det er kun vann over +1.5 m som går over demningen. I praksis forventer vi at en del av vannet som treffer demningen under HRV+1.5 m også vil presses over demningen. Det totale trykket som presenteres her vil derfor kunne forventes å være på den konservative siden.

Tabell 9: Typiske parametre og beregnet trykkbelastning målt ved foten av demningen. Overflatehevning på bølgen for hypotetisk situasjon (2) når demning er fjernet er η' og tilhørende strømningshastighet er U_2 , η er høyden på største bølge ved overtopping.

Scenario	U_1 [m/s]	U_2 [m/s]	η' [m]	η [m]	P_{stat} [kPa]	P_{dyn} [kPa]	P_{total} [kPa]
1000	6	2.2	1.5	3.8	83	42	125
5000	7	3.0	2.0	4.4	89	59	148
maks	8	3.7	2.5	5.0	95	79	174

Verdiene som er beregnet her kan brukes både mot betongdelen av demningen og tilnærmet mot fyllingsdam mot sørvest. Det dynamiske trykket er mellom 33 og 45% av det totale trykket mot demningen (det atmosfæriske trykket er som sagt ikke tatt med siden dette virker på begge sider av demningen).

Vi har også sjekket beregnede verdier av trykk mot demningen mot andre tilnærminger bl.a. Rouse (1961). Sammenligningen bekrefter at resultatene over er på den konservative siden.

I våre beregninger har vi sett bort fra eventuelle skjærkrefter på toppen av demningen.

10 Historiske hendelser

Skredhistoriker Astor Furseth har sett på skredhendelser ved Vangsmjøse (pers. komm. november 2022). Det er ikke funnet noen beskrivelser av større flodbølger. Det er riktignok en hendelse 16. juni 1860 der det er beskrevet at det oppstod en flodbølge. Skredet er lokalisert ved Vennis øst for Skutshorn og NNV for Grindaheim som må tolkes som et fjellskred (blandet med jord) mer enn et rent jordskred ut fra beskrivelsene. Dagen før startet et kraftig regnvær som resulterte i at store mengder med masser løsnet ovenfor gardene ved Vennis. Det rapporteres om store materielle skader fra skredet på både bygninger og utmark. To mennesker døde, mens flere andre evakuerte i tide da de hørte kraftige drønn fra fjellet. Det oppstod bølger som er anslått til 1-2 m "mot busetnad" og siden det var tåke da skredet løsnet var det bølgene som varslet blant annet områdene på sørsiden av Vangsmjøsa om at noe hadde skjedd. Det er usikkert om bølgene gjorde skade på bygninger. Det var også en hendelse i 1837 som kan ha resultert i en flodbølge, men det er ikke fastslått i beskrivelsene. Vang må ellers beskrives som en skredkommune med en lang rekke registrerte jord-, snø, stein- og fjellskred.

Blant større hendelser i Norge kan det nevnes skredene i Tafjord (1934) og Loen (1936), se Bjerrum og Jørstad (1968), Harbitz m.fl. (1993). Skredet i Tafjord er anslått til 3 mill. m³. Ser vi bort fra bølgene rett ved siden av skredet, skyllet bølgene opp mellom 5 og 37 m for strekningen mellom skredområdet og bygda Tafjord innerst i fjorden. I selve Tafjord var oppskyllingen mellom 5 og 16 m. I Loen 1936 dannet et skred på omtrent 1 mill. m³ bølger langs Lovatn på 1-9 m. I enden av vatnet ca. 7-8 km unna var oppskyllingen opp mot 15 m. Vi ser for både Tafjord og Loen at det er store variasjoner avhengig bl.a. av hvilken retning bølgene beveger seg i forhold til terrenget, og hvordan terrenget er utformet.

11 Usikkerheter

I en analyse som her er gjort for skred fra Skutshorn er det flere faktorer som påvirker nøyaktigheten i resultatene. De to viktigste er beregning av utløsnings-sannsynligheten og modelleringen av skred, bølger og oppskylling. Den førstnevnte påvirker faresonene direkte, mens usikkerheten i modelleringen er trukket inn i selve det probabilistiske rammeverket. På denne måten har vi mye bedre kontroll på usikkerheten enn i analyser som baserer seg på et fåtall scenarioer. I denne analysen er det brukt vekting av ulike parametere basert på ekspertvurderinger og grundig analyse av supplerende modellering (sensitivitetsanalyser m.m.). Vi har også sammenlignet resultatene med et pågående arbeid med kalibrering av metodikken, bl.a. ved å anvende den probabilistiske

metodikken på tidligere hendelser som f.eks. Årdalstangen (1983). I nevnte kalibrering inngår også kontroll av modellene som inngår i metodikken opp mot mer avanserte modeller for generering av flodbølgene. Sammenligningen og kalibreringen som er gjort understøtter valgene som er tatt for Skutshorn med tanke på parameterverdier og tilhørende sannsynligheter.

Beregningene i oppskyllingsssonene er gjort med en oppløsning på 5 m, med unntak av områdene ved selve Skutshorn (begge sider av Vangsmjøse) hvor oppløsningen er 20 m (nødvendig med grovere oppløsning pga. modellvalg her). Se for øvrig Vedlegg A for detaljert beskrivelse av modelleringen. Usikkerhet i plassering av faresonene vil gjenspeile oppløsningen som beregningene er gjort i (dvs. hhv. 5 m og 20 m).

Det er også gjort noen forenklinger for beregning av volum av overtopping av demningen i øst, samt trykkrefter mot denne. Resultatene forventes å være på den konservative siden.

12 Referanser

AFRY (2020) Flomberegning Begna, VA-rap. 04.

Bjerrum, I. og Jørstad, F. (1968). Stability of Natural Rock Slopes in Norway. Tech. Rep. 79. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute (NGI).

Gjevik (2009) Innføring i fluidmekanikk. Matematisk institutt, Universitetet i Oslo.

Harbitz, C., Pedersen, G. og Gjevik, B. (1993). Numerical Simulations of Large Water Waves Due to Landslides. Jour. of Hydr. Eng., Vol. 119, No. 12.

NGI (2021a). Flodbølger og skred, Lifjellet, Hyllestad kommune – oppskyllingsberegninger ved hjelp av probabilistiske metoder. NGI rapport 20200282-01-R.

NGI (2021b). Flodbølger etter skred fra Tussafoten, Eidfjord kommune – beregning av faresoner. NGI rapport 20210286-01-R.

NGI (2022). Flodbølger etter skred fra Stiksmoen, Aurland kommune – beregning av faresoner. NGI rapport 20210580-01-R.

NGU (2002). Hazard evaluation of rock avalanches; the Baraldsnes-Oterøya area. Geological Survey of Norway (NGU), report 2001.108, Trondheim, 33 pp.

Rouse, H. (1961). Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers. McGraw Hill Book Company, Inc., New York, U.S.A. (originalutgave 1938) og Dover Publications Inc., New York, U.S.A. (korrigert utgave, 1961).

Xie, P., Chu, V.H. (2019). The forces of tsunami waves on a vertical wall and on a structure of finite width. Coastal Engineering, 149.

Vedlegg A

PROBABILISTISK METODE

Innhold

A1	Probabilistisk rammeverk	2
A2	Beregning av gjentakperiode	5
A3	Referanser	7

A1 Probabilistisk rammeverk

Det probabilistiske rammeverket er en modell for utarbeidelse av farekart for oppskylling av flodbølger fra skred. Farekartene angir årlig sannsynlighet for oppskyllingen, som igjen er bestemt av sannsynligheten for ulike skredutfall gitt ved hjelp av rammeverket. Ulike skredutfall er knyttet til usikkerheten i skreddynamikken, for eksempel skredets hastighet i det skredet treffer vannet, usikkerheten i skredets form, skredets utløpsdistanse osv. Til hvert enkelt skredutfall med tilhørende sannsynlighet er det knyttet en numerisk beregning som angir hvilke områder som vil bli oversvømt. I denne rapporten angis usikkerhet gjennom sannsynligheter knyttet til skredets hastighet, skredets frontareal, og skredets utløpsdistanse. I tillegg benyttes skredets gjentakperiode til å tallfeste årlig sannsynlighet for oppskylling. NGU har for Skutshorn oppgitt en gjentakperiode på 365 år med øvre og nedre grense i utfallsrommet på henholdsvis 1957 og 54 år. Volumet er beregnet til å være 9.500.000 m³

Prinsippene for den probabilistiske metoden er beskrevet i Løvholt et al. (2020), inkludert anvendelse for liknende problematikk for Lyngen (NGI, 2018). Noen mindre utvidelser og forbedringer av denne metoden er beskrevet under.

Generelt avhenger flodbølgegenereringen av skredets dynamikk og volum (Løvholt et al., 2015, se også vedlegg C). For fjellskred som løsner over vann, er det imidlertid skredets hastighet og frontareal når det kommer i kontakt med vannet som er viktigst (Fritz et al., 2004). Skreddynamikken kan beregnes ved hjelp av numeriske modeller, men siden verken data fra tidligere hendelser eller fra modeller kan angi skreddynamikken nøyaktig, er det som oftest knyttet betydelig usikkerhet til denne. Således vil også treffhastighet, form og utløpsdistanse for fremtidige skredhendelser være usikre. I tilfeller der skredparametrene som styrer flodbølgefaren er påvirket av usikkerheter som ikke kan fastslås ved hjelp av data, er usikkerheten angitt som "epistemisk". Formelt er den epistemiske usikkerheten definert som usikkerhet knyttet til fravær av kunnskap og data. Denne usikkerheten vil reduseres dersom mer nøyaktig kunnskap frembringes. Motsatsen er den "aleatoriske" usikkerheten, som er usikkerheten som er tilstede i naturlige prosesser og som dermed ikke kan reduseres ved hjelp av mer data og bedre modeller. Det er ofte vanskelig å skille de to typene av usikkerhet fra hverandre (en omfattende diskusjon kan finnes i Grezio et al., 2017). I dette prosjektet, og for skredgenererte flodbølger generelt, kan de styrende parametre (skreddynamikk og sannsynlighet for at et skredvolum løsner) likevel antas å ha epistemiske usikkerheter siden vi har begrenset kunnskap om disse.

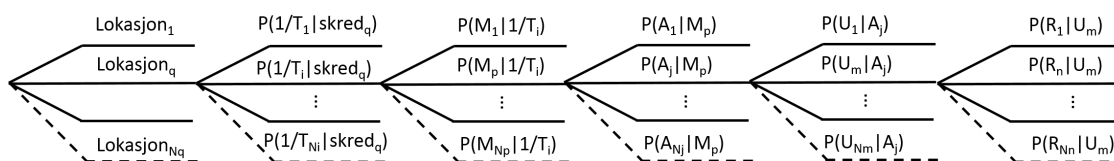
Fastsettelsen av parametre og tilhørende sannsynligheter er gjennomført ved å kombinere statistikk, ekspertvurderinger og numerisk modellering. Med unntak av bestemmelse av usikkerhet på skredvolumets gjentakperiode, er dette beskrevet i detalj i Vedlegg B.

Rammeverket som er brukt for å bestemme sannsynligheten for oppskylling er basert på et såkalt hendelsestre, oftere omtalt med den engelske fagtermen "event tree". Hendelsestreet som er benyttet her (Figur 1.1), består av forgreninger av ulike skred-

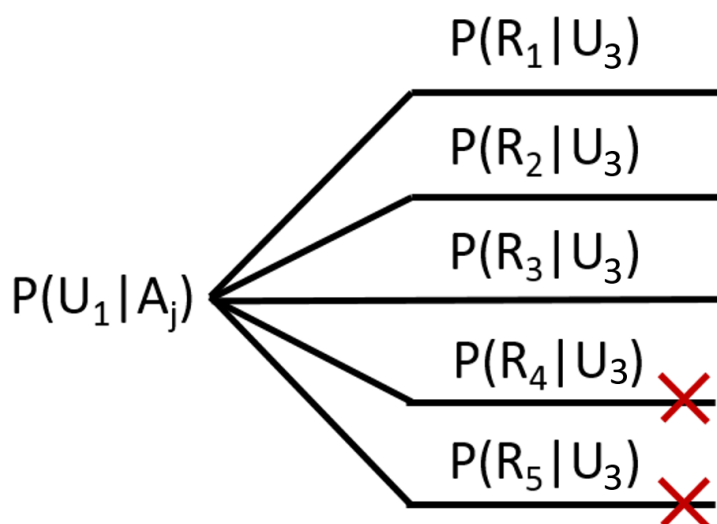
utfall, der hvert utfall er gitt en betinget sannsynlighet. Summen av sannsynligheten over alle utfall er 1. Ved å summere sannsynligheter over ulike utfall i hendelsestreet, benyttes hendelsestreet til å tallfeste årlig sannsynlighet for at oppskyllingen overskrider en høyde ved en gitt posisjon på land.

For tallfesting av sannsynligheter i dette prosjektet for hver skredlokasjon q (se Figur 1.1) benyttes følgende struktur for hendelsestreet:

- Årlig sannsynlighet for en gjentakperiode (eller frekvens) ved gitt skredvolum q , $P(1/T_i|skred_q)$. Her er P sannsynlighet i intervallet $[0,1]$, $1/T_i$ er frekvens $[1/\text{år}]$ for utfall i . Ulike sannsynligheter $P(1/T_i|skred_q)$ gir sannsynligheten for ulike deler av usikkerhetsintervallet som er oppgitt for gjentakperioden (Tabell 1). Siden det i modelleringen kun inngår ett volum fra Skutshorn blir følgelig $q = \{1\}$. Beregning av $P(1/T_i|skred_q)$ er beskrevet mer detaljert under kapittel A2.
- Sannsynlighet for ulike alternative bølgegenereringsmodeller $P(M_p|1/T_i)$. To alternative modeller (utfall $p=\{1,2\}$) er brukt, dvs. én blokk med endelig lengde og én blokk med uendelig lengde.
- Sannsynlighet for skredets frontareal $P(A_j|M_p)$, der A_j er skredets frontareal for utfall j . 5 ulike utfall for skredets frontareal er tatt med i beregningene (utfall $j = \{1,2,3,4,5\}$).
- Sannsynlighet for skredets hastighet når det treffer vannskorpen $P(U_m|A_j)$, der U_m er skredets treffhastighet for utfall m . 3 ulike utfall for skredets treffhastighet er tatt med i beregningene (utfall $m=\{1,2,3\}$).
- Sannsynlighet for skredets undersjøiske utløpsdistanse (fra strandlinjen og ut i vannet) $P(R_n|U_m)$, der R_n er skredets horisontale utløpsdistanse for utfall n . 5 ulike utfall for skredets undersjøiske utløpsdistanse er tatt med i beregningene (utfall $n=\{1,2,3,4,5\}$). Sannsynligheten til utløpsdistansen avhenger av skredets treffhastighet, slik at for et gitt skred, settes de to lengste utløpsdistansene til 0 for den minste skredhastigheten, mens de to korteste utløpsdistansene settes til 0 for den største skredhastigheten. Behandlingen av de betingede sannsynlighetene er vist i Figur 1.2. I slike tilfeller normaliseres øvrige betingede sannsynligheter, slik at summen av alle sannsynligheter fortsatt er 1 for en gitt forgrening.



Figur 1.1: Skisse som viser ulike elementer i den probabilistiske beregningen som inngår i hendelsestreet. For et gitt skred med lokasjon q kombinerer hendelsestreet alle mulige utfall for: mulige sannsynligheter for en gjentakperiode for en gitt skredlokalitet ($P(1/T_i|skred_q)$), sannsynlighet for modellantagelse/skredform for en gitt sannsynlighet for gjentakperioden ($P(M_p|1/T_i)$), sannsynlighet for skredets areal i det det treffer vannet for en gitt modellantagelse ($P(A_j|M_p)$), sannsynlighet for skredets hastighet i det det treffer vannet for et gitt areal ($P(U_m|A_j)$), og sannsynligheten for skredets totale utløpsdistanse for en gitt skredhastighet ($P(R_n|U_m)$).



Figur 1.2: Skisse som viser betinget sannsynlighet mellom skredhastighet og utløpsdistanse. Eksemplet viser utfallet for den minste skredhastigheten (U_3). I dette tilfellet tas utfallene med de lengste utløpsdistanseene ut. I det motsatte tilfellet (med største skredhastighet U_1) vil de to korteste utløpsdistanseene tas ut. For U_2 tas alle utløpsdistanseene med.

Tabell 1: Oppgitt gjentakperiode (medianverdi og usikkerhetsintervall). Beregnet midlere gjentakperiode (vha. likning 2). Lognormal usikkerhet er satt til 0.66.

	Skutshorn
Volum [m^3]	9.500.000
Oppgitt medianverdi for gjentakperiode [år]	365
Oppgitt usikkerhetsintervall for gjentakperiode [år]	54-1957
Oppgitt usikkerhetsintervall for gjentakperiode 5 og 95 percentil [år]	87-1155
Beregnet midlere gjentakperiode [år]	286

Sannsynligheten for et gitt enkeltutfall langs én forgrening er gitt ved produktet av alle de betingede sannsynlighetene:

$$P_{skred_{q,i,p,j,m,n}} = P(1/T_i | skred_q) \cdot P(M_p | 1/T_i) \cdot P(A_j | M_p) \cdot P(U_m | A_j) \cdot P(R_n | U_m)$$

For en enkelt oppskyllingsberegning er sannsynligheten med ett gitt parametersett derfor $P_{skred_{q,i,p,j,m,n}}$. Denne sannsynligheten er gitt i størrelsen [1/år]. For å kunne omsette denne informasjonen til farekart, må sannsynligheten summeres for alle utfall som kan føre til oppskylling på en gitt lokasjon. Dette brukes for å beregne overskridelsessannsynligheten og årlig sannsynlighet. Sannsynlighet for oppskylling for en gitt lokasjon beregnes derfor på følgende måte:

- For hver beregning identifiseres våte og tørre punkter. Ett punkt gis oppskyllingssannsynligheten $P_o(x,y)$ for en enkeltberegning, der våte punkter gis sannsynligheten $P_o = P_{skred_{q,i,p,j,m,n}}$, mens tørre punkter gis sannsynligheten $P_o = 0$.
- For hvert punkt i beregningsområdet summeres sannsynlighetene over alle mulige utfall for å finne sannsynlighet for oppskylling i en gitt lokasjon, $P_{os}(x,y) = \sum_{q,i,p,j,m,n} P_o(x,y)$.
- Videre beregnes gjentakperiode $T(x,y)$ for at et punkt på land kan bli oversvømt som den inverse av sannsynligheten $T(x,y) = 1/P_{os}(x,y)$.
- Til slutt beregnes faresone skred (§7.3 i TEK17) til de ulike gjentakstidene 1000 år, 5000 år, og 10000 år samt grense for maks oppskylling for alle beregninger. I tillegg beregnes faresone flom (skiller mellom langsom og hurtig strøm av vann under oppskylling, §7.2 i TEK17) for gjentakstidene 1000 år og 5000 år. Som avtalt med NVE skal faresone flom ikke legges i rapport, men overleveres NVE ved behov.

A2 Beregning av gjentakperiode

Gjentaksperiode med tilhørende usikkerhetsområde er oppgitt fra NGU, verdiene er gitt i Tabell 1. I samråd med NVE, benyttes den oppgitte gjentakstiden som medianverdi til dette usikkerhetsområdet. For mer informasjon om klassifisering av fjellskred, se NGU (2012) og NVE (2016).

Gjentaksperioden er tydelig skjevfordelt, med medianverdi nærmest den oppgitte nedre grensen til usikkerhetsintervallet. Ettersom usikkerhetsområdet for gjentakstiden er skjevfordelt, ble den skjevfordelte lognormalfordelingen valgt som fordelingsfunksjon. Ut fra erfaring fra tidligere prosjekt (Lyngen, NGI 2018) er det benyttet en lognormal usikkerhetsverdi (σ) på 0.66. Det kan være bedre å benytte en funksjon mer spesielt tilpasset skjevfordelte fordelinger. En slik forbedret beregning av midlere gjentakstid har liten praktisk betydning, men vil bli vurdert implementert i framtidige prosjekter for NVE hvor det probabilistiske rammeverket skal anvendes.

Det bemerkes at i de innledende analysene da det probabilistiske rammeverket ble anvendt for første gang (Lyngen, NGI 2018) ble de oppgitte gjentakstidene tolket som middelerverdi (og ikke som medianverdi). Dette medførte imidlertid at medianverdien plasserte seg langt ut mot siden av usikkerhetsområdet, og videre ble grensene

til usikkerhetsområdet plassert skjevt i forhold til de oppgitte gjentakperiodene. Da de oppgitte gjentakperiodene ble tolket som medianverdier, ble imidlertid medianverdier, grenser, og middelverdier plassert mer fornuftig.

For å anslå midlere gjentakperiode (basert på NGUs oppgitte medianverdi og usikkerhetsintervall), er den inverse av gjentakperioden, $f = 1/T$ valgt som sannsynlighetstetthetsvariabel, der T er den usikre gjentakperioden. Midlere gjentakperiode $\bar{T}$ for en lognormalfordeling med medianverdi $F_{med}=1/T_{med}$ er gitt ved Likning 1:

$$\bar{F} = \frac{1}{\bar{T}} = e^{\ln\left(\frac{1}{T_{med}}\right) + \frac{1}{2}\sigma^2} = \frac{1}{T_{med}} e^{\frac{1}{2}\sigma^2} \quad \text{Likning 1}$$

Som formelen tilsier vil middelverdien avhenge både av medianverdien og usikkerheten σ til fordelingen. En stor usikkerhetsverdi vil øke middelverdien $\bar{F}$, og dermed redusere den midlere gjentakperioden $\bar{T}$. For å etablere midlere gjentakperiode, ble følgende prosedyre gjennomført:

- Kumulativ lognormalfordeling med variabel f og medianverdi $F_{med}=1/T_{med}$ benyttes som sannsynlighetsfordeling.
- Videre lages en diskret fordelingskurve som kan benyttes direkte i hendelses-treet:
 - Dette gjøres først ved å trunkere sannsynlighetsfordelingen slik at svært lang eller svært kort gjentakperiode utelukkes:
 - Sannsynlighetsfordelingen for den øvre oppgitte sannsynlighetsgrensen for T (som gir den minste frekvensen) trunkeres med trunkeringsverdi for høyeste verdien til T som settes til 4 ganger den største verdien av det oppgitte usikkerhetsintervallet.
 - På samme måte settes trunkeringsverdien til den nedre grensen for gjentakperiode. Trunkeringsverdien for T settes til 1/4 av den nedre grensen i det oppgitte usikkerhetsintervallet.
 - Til slutt deles sannsynlighetsfordelingen opp i 20 segmenter. Integrasjon av hvert slikt segment i den kumulative sannsynlighetsfordelingen gir sannsynligheten for en gjentakperiode $P(1/T_i | skred_q)$. Ved å regne ut tyngdepunktet til hvert segment bestemmes den karakteristiske frekvensen for hver del, $f_i=1/T_i$, som brukes for å estimere den midlere gjentakperioden som vist i Likning 2 under.

Videre antas det at gjentakperioden følger en Poisson prosess, som beskriver sannsynligheten for at en hendelse, eller et antall hendelser, finner sted innenfor et gitt tidsintervall. Den midlere gjentakperioden $\bar{T}$ finnes da ved å ta produktet av alle de diskrete komponentene i sannsynlighetsfordelingen ved hjelp av formelen:

$$\frac{1}{\bar{T}} = 1 - \prod_{i=1}^{20} e^{-P\left(\frac{1}{T_i}\right) \cdot \frac{1}{T_i}} \quad \text{Likning 2}$$

I praksis kan derfor leddet som representerer ulike sannsynligheter for ulike gjentakperioder ved gitte skredlokasjoner $P(1/T_i | \text{skred}_q)$ i hendelsestreet forenkles med en midling som vist i Likning 2. Denne prosedyren kan gi et noe annerledes estimat for beregnet midlere gjentakperiode $\bar{T}$ enn uttrykket fra analytisk integrasjon av lognormalfordelingen (Likning 1) når σ er stor, hovedsakelig på grunn av trunkeringen og siden en diskret sannsynlighetsfordeling er valgt.

A3 Referanser

- Fritz, H.M., Hager, W.H., and Minor H.E. (2004). Near field characteristics of landslide generated impulse waves, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean engineering 130 (6), 287-302.
- Grezio, A. et al. (2017). Probabilistic Tsunami Hazard Analysis: Multiple sources and global applications. Reviews of Geophysics, 55, 1158–1198.
<https://doi.org/10.1002/2017RG000579>
- Løvholt, F., Pedersen, G., Harbitz, C.B., Glimsdal, S., and Kim, J. (2015). On the characteristics of landslide tsunamis. Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140376. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0376>
- Løvholt, F., Glimsdal, S. and Harbitz, C.B. (2020). On the landslide tsunami uncertainty and hazard. Landslides, 17:2301–2315. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01429-z>
- NGI (2018). Flodbølger etter fjellskred i Lyngen – Oppskyllingsberegninger ved hjelp av probabilistiske metoder. NGI rapport 20170309-01-R.
- NGU (2012). Recommended hazard and risk classification system for large unstable rock slopes in Norway. NGU report no. 2012.029.
- NVE (2016). Fare- og risikoklassifisering av ustabile fjellparti. Faresoner, arealhåndtering og tiltak. NVE rapport 77-2016.

Vedlegg B

OM MODELLERINGEN

Innhold

B1	Bestemmelse av modellparametere og sannsynligheter	2
B1.1	Utløpslengde	3
B1.2	Skredform og frontareal	4
B1.3	Hastighetsforløp	6
B2	Om flodbølgeberegningene	7
B3	Modeller basert på Geoclaw	8
B4	Bølgemodellen GloBouss	9
B5	Oppskyllingsmodellen MOST	9
B6	Referanser	10

B1 Bestemmelse av modellparametere og sannsynligheter

I dette avsnittet beskrives metodikken som bestemmer hvilke parametere og hvilke verdier på disse parametere som brukes i beregningene samt tilhørende sannsynligheter, se Tabell 1.

Utvelgelsen av hvilke parametere som inngår er basert på sensitivitetsanalyse i dette prosjektet og på tidligere arbeider (se for eksempel NGI, 2017 og NGI, 2018). NGI (2014) dokumenterer viktige aspekter ved valg av parametere. Parametere som inngår i analysen er

1. Skredlengde (L) – to verdier; for begrenset eller for uendelig langt skred
2. Frontareal (A) – fem verdier
3. Treffhastighet (U) – tre verdier
4. Undersjøisk utløpsdistanse (R) – fem verdier

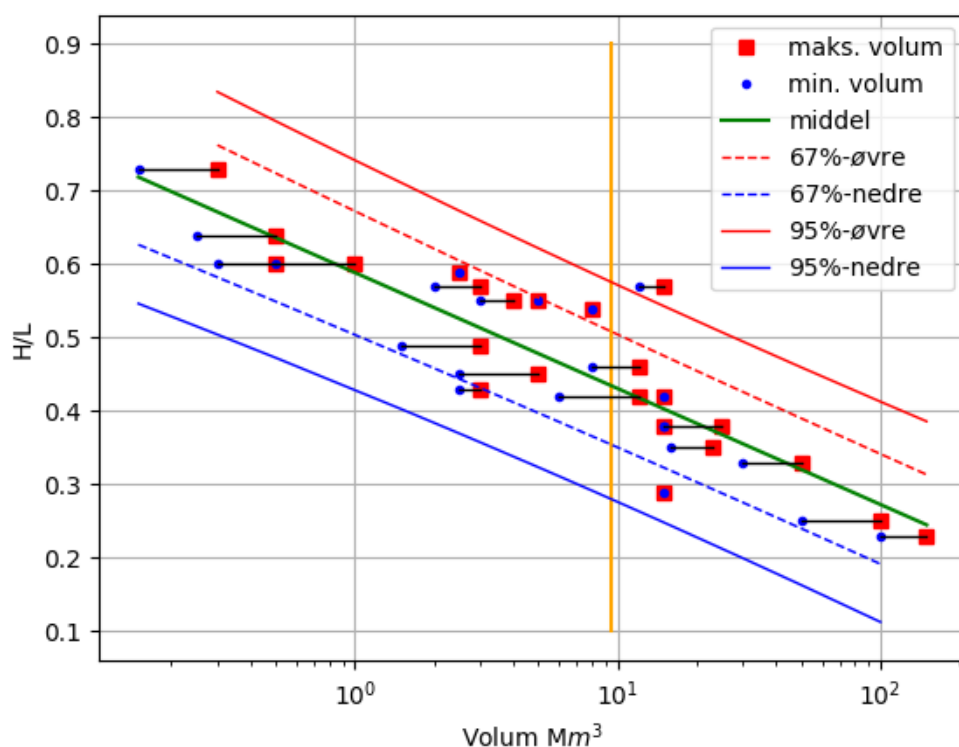
Vi bruker ulike tilnærminger for fastsetting av parameterverdier med tilhørende sannsynlighet. Dette er beskrevet i detalj under. Vi bruker også erfaringer og statistikk fra tidligere relevante NGI arbeider knyttet til skred og bølger. I disse arbeidene inngår også tilbakeberegninger av historiske hendelser som viser godt samsvar mellom modellering og observasjoner, samt pågående arbeid med å kalibrere og sammenligne de operative modellene med mer avanserte modeller for skredgenererte flodbølger. For beregning av skredutløp er statistikken for store skred i Norge benyttet (NGU, 2002). Alle parametere kombineres på alle mulige måter, bortsett fra at de to lengste utløpene (R1 og R2) ikke kombineres med den minste hastigheten (U3) og omvendt hvor de to korteste utløpene (R4 og R5) ikke kombineres med den største hastigheten (U1).

Tabell 1: Parameterverdier og tilhørende sannsynligheter (P) brukt i beregningene for Skutshorn. R er undersjøisk utløpsdistanse (5 verdier), A er skredets frontareal (5 verdier) og U er skredets treffhastighet (3 verdier).

Undersjøisk utløp			Frontareal			Treffhastighet		
Param	R[m]	P	Param	A[m ²]	P	Param	U[m/s]	P
R1	1046	0,07	A1	29695	0,2	U1	67	0,2
R2	1012	0,24	A2	23765	0,45	U2	51	0,6
R3	794	0,38	A3	17030	0,2	U3	37	0,2
R4	620	0,24	A4	15327	0,1			
R5	445	0,07	A5	13624	0,05			

B1.1 Utløpslengde

Siden vi ikke har lokal statistikk på utløp og volum fra tidligere skred i området ved Skutshorn tilgjengelig, så bestemmes utløpslengde ved bruk av statistikken på kjente store skred i Norge, se Figur 1 (NGU, 2002 og Romstad et al., 2009). Sistnevnte statistikk er den som ble anvendt i Lyngen (NGI, 2018), Tussafoten (NGI, 2021b), og Stiksmoen (NGI, 2022), mens det i Hyllestad (NGI, 2021a) eksisterte 25 kjente dokumenterte skred lokalt som dannet grunnlaget for utløpsvurderingen. Av de kjente store skred i Norge så er det 10 som har truffet en innsjø eller en fjord, mens 6 har stoppet pga. topografi. Statistikken gir volum samt forholdet H/L mellom fallhøyde (H) og totalt utløp (L) målt fra øvre del av skredet før utløsning til front av skredmassene etter at skredet har kommet til ro. Figur 1 viser fordelingen av disse dataene samt resultatet fra en regresjonsanalyse av disse. Middelerdien fra statistikken er vist som en grønn linje, mens øvre og nedre 95 percentil (+/- 2 standardavvik) er vist som henholdsvis rød og blå linje. 67 percentilene (+/- 1 standardavvik) er vist med tilsvarende farge, men stiplet. I beregningene bruker vi fem ulike H/L verdier for hvert aktuelt volum i studien, henholdsvis øvre og nedre 95 og 67 percentiler samt middelerdi. I Tabell 1 har vi omregnet de ulike H/L verdiene for de aktuelle volumene til undersjøisk utløp, fem realiseringer R1-R5 for hvert skred, der R1 er det lengste og R5 det korteste utløpet. Sannsynlighetene for utløpene finner vi ved å integrere mellom intervallene på en normalfordelings kurve. Vi får følgende sannsynligheter: R1 – 0.07, R2 – 0.24, R3 – 0.38, R4 – 0.24, og R5 – 0.07. R1 er redusert noe i forhold til hva vi får av statistikken fordi skredet vil stoppe tidligere som følge av topografien i Vangsmjøsi.



Figur 1: Statistikk på forholdet mellom fallhøyde (H) og utløpslengde (L) for store skred i Norge (NGU, 2002). Grønn, blå og røde skrå linjer er regresjonslinjer som viser tilhørende sannsynligheter på utløpslengder som er brukt i analysen (totalt fem utløp). Vertikal linje viser hvor volumet fra Skutshorn (9.5 mill. m³) plasserer seg.

B1.2 Skredform og frontareal

For den probabilistiske analysen bruker vi fem ulike verdier på frontarealet, se A1-A5 i Tabell 1. Det er også lagt til en bulkingfaktor på 1.3, dvs. at det initielle volumet fra Skutshorn økes fra 9.5 til 12.4 mill. m³ (dette tar hensyn til at volumet øker når skredmassene brytes opp fra fast fjell til mindre blokker/partikler). For best mulig parametrisering av de ulike skredutfallene bruker vi et blokkformet skred (avrundet). For å bestemme form og frontareal på blokken bruker vi beregninger av skredet med vår egenutviklede dynamiske skredmodell VoellmyClaw (Kim, 2014). Det er to parametere i modellen, friksjonsvinkel (viktigst med tanke på utløpslengde) og et mål på hastighetsavhengig motstand som følge av turbulens, viskøst drag og sentrifugalkrefter (ξ – viktigst for bestemmelse av hastighet). Vi har i beregningene med VoellmyClaw kombinert friksjonsvinkler i intervallet [5:40] med ξ i intervallet [500:4000]. Frontarealene defineres ved hjelp av statistikk på maksimalt samtidig tverrsnitt av skredet ved strandlinja for alle realiseringer med utløp som gir en H/L verdi mellom 0.28 og 0.58 (tilsvarer utløpene til R1 og R5, se Figur 1). Fra beregningene måler vi frontarealet som det maksimale samtidige arealet av tverrsnittet ved strandlinja.

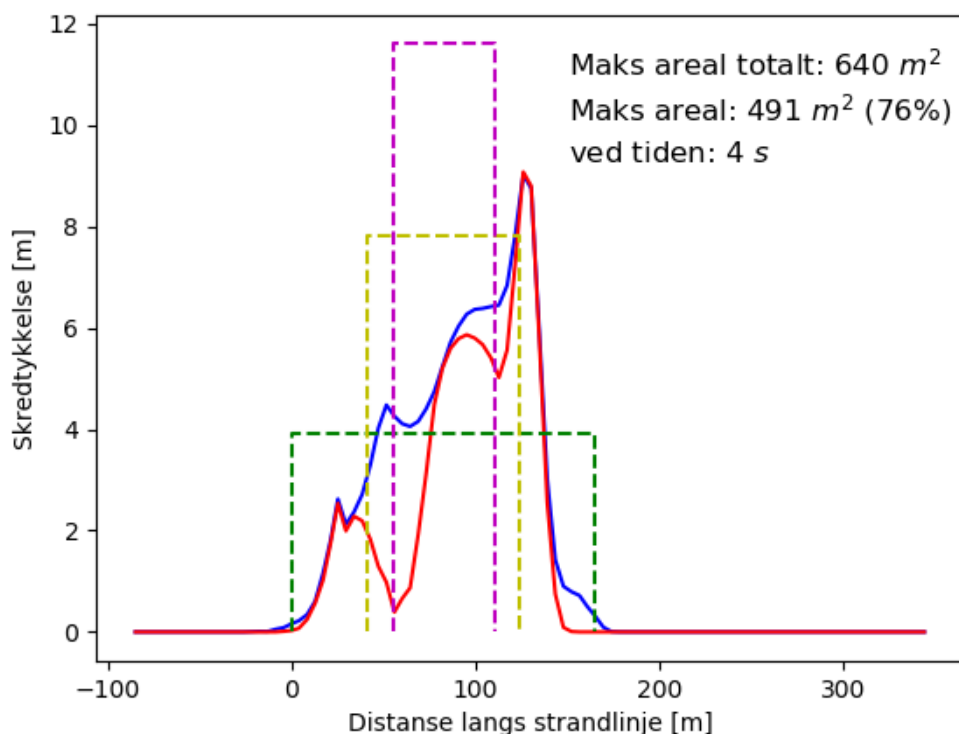
- ↗ A1 er 1.5 ganger større enn det største av alle areal
- ↗ A2 er 1.2 ganger større enn det største av alle areal
- ↗ A3 tilsvarer 50 percentilen
- ↗ A4 er definert som $0.9 \cdot A3$
- ↗ A5 er definert som $0.8 \cdot A3$

Sannsynlighetene er derfor en kombinasjon av statistikken på skredene fra VoellmyClaw, tidligere etterberegninger samt ekspertvurdering. Vi ender da opp med sannsynlighetene $A1 = 0.2$, $A2 = 0.45$, $A3 = 0.2$, $A4 = 0.1$ og $A5 = 0.05$. I forhold til valg av parametre og sannsynligheter for frontarealene så har vi nå for Skutshorn noe større vektning av større frontareal (også gjennom bulkingfaktoren) enn tidligere arbeider som Tussafoten (NGI, 2021b), Hyllestad (NGI, 2021a) og Stiksmoen (NGI, 2022), samt at vi trekker de minste frontarealene noe oppover. Disse er riktignok gitt en lav sannsynlighet og vil ha minimal innvirkning på beregning av faresonene. Tester viser også at for Skutshorn så er resultatet lite påvirket av hastighetene, da de genererte bølgene er omtrent like høye uavhengig av treffhastighetene over.

Nye valg av parametre og sannsynligheter for frontarealet med større vekt på de største frontarealene er basert på våre erfaringer med tidligere etterberegninger av f.eks. Katlenova 1998 (NGI, 2021a), Tafjord 1934, og Tjelle 1756 (NGI, 2011) samt senere tids økt kunnskap om genereringen gjennom ulike kalibreringer (pågående forskningsarbeid) og gjennom sammenligning med mer avanserte modeller (OpenFoam).

Et eksempel på tverrsnitt fra en realisering av et skred beregnet med VoellmyClaw for skred fra Katlenova ved Hyllestad (NGI, 2021a), er vist i Figur 2. For å omforme verdiene til frontarealene A1-A5 som form på det boksformede skredet som brukes i selve analysen, trekker vi også ut bredden av skredet fra VoellmyClaw på strandlinja. For å gjenskape formen på tverrsnittet fra VoellmyClaw best mulig valgte vi bredden på det boksformede for skredet for Katlenova til å være halvparten av total bredde mens høyde er definert slik at frontarealet tilsvarer arealet under den røde linja, vist som gul linje. På denne måten vil det boksformede skredet representere et reelt skred best mulig. Skredet som brukes i analysen er noe mer avrundet enn det som vises i Figur 2. Mens man for modellering av skred fra Katlenova reduserte bredden på det boksformede skredet til å være en halvpart av total bredde av skredutløpet, finner vi for Skutshorn at vi må redusere bredden av det boksformede skredet til 1/3 av den totale bredden (slik at høyden tredobles, a la rosa linje i Figur 2) for å gjenskape best mulig det som skjer i senter av skredbanen.

Grunnen til at vi ikke bruker VoellmyClaw direkte i beregningene er at vi med en blokk har bedre kontroll på formen på skredet (lettere å parametrisere og sammenlikne) og at vi i en analyse som inkluderer et stort antall kjøring vil bruke for lang tid på beregningene. Vi vil heller ikke kunne få et bredt nok sett av ulike former på skredet ved å bruke VoellmyClaw direkte.



Figur 2: Eksempel på tidligere beregninger med VoellmyClaw, her for et skred fra Katlenova ved Hyllestad (NGI, 2021a). Figuren viser skredtykkelse (form på hele tverrsnittet) langs strandlinja etter 4 s (rød linje, areal 491 m²) og maksimal skredtykkelse langs strandlinja i ethvert punkt gjennom hele skredforløpet (blå linje, areal 640 m²). Det er kun areal under rød linje som brukes i modelleringen. Grønn, gul og lilla linje viser eksempler på forskjellige forhold mellom høyde og bredde for et boksformet skred.

B1.3 Hastighetsforløp

I analysen bruker vi tre ulike treffhastigheter U1, U2 og U3. Disse er bestemt fra samme sett av kjøringer med VoellmyClaw som for bestemmelse av frontareal (se avsnitt B1.2). Hastigheten vi måler fra VoellmyClaw beregningene er tatt ut fra høyeste hastighet skredene har langs strandlinja. Den målte hastigheten er derfor ikke nødvendigvis knyttet til fronten av skredet.

Vi ender opp med:

- U1 = 67 m/s (90 percentil), sannsynlighet 0.2
- U2 = 51 m/s (50 percentil), sannsynlighet 0.6
- U3 = 37 m/s (10 percentil), sannsynlighet 0.2

Disse verdiene for U1 stemmer også godt med vår erfaring og tidligere modelleringer av store fjellskred i Norge sett i lys av fallhøyde, skredbane og skredvolum. I selve modelleringen av faresoner anvender vi disse hastighetene som starthastighet for skredets bevegelse i vannet. Skredforløpet er styrt med en gradvis avtagende hastighet

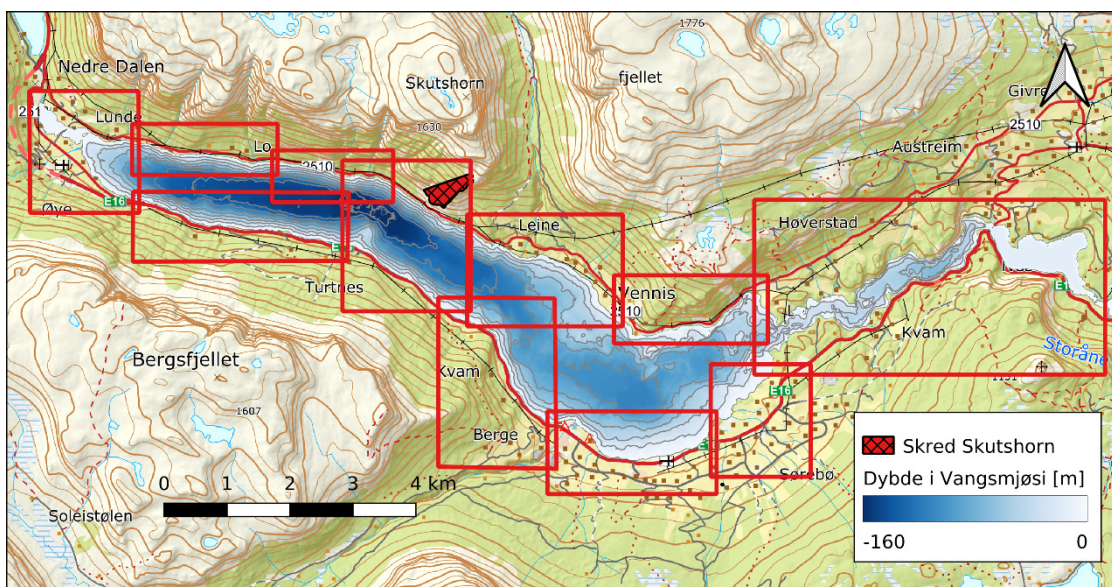
til skredet har nådd sin gitte utløpslengde og skredet stopper. De beregnede hastighetene over kan synes å være noe høye ut fra fallhøyden fra det ustabile området og ned til fjorden (mindre enn 100 m vertikalt fra fronten av skredet). Disse verdiene er likevel fornuftige når vi forventer at skredet kan akselerere noe i den første tiden etter at det treffer vannet.

B2 Om flodbølgeberegningene

Beregningene for hver enkelt realisering av skredene er basert på parametriseringen gitt i Tabell 1. Oppskyllingen langs Vangsmjøsis strender bestemmes ved å modellere flodbølgen i et sett av mindre delområder. Vi bruker totalt 11 slike områder, se Figur 3. For alle beregningsområder bortsett fra området som omhyller utløpssonen til skredet hvor vi anvender modellen BoussClaw, bruker vi kombinasjonen av GloBouss (generering og propagering) og MOST (oppskylling). BoussClaw beregner både generering og oppskylling samtidig, men er for krevende å kjøre for større områder. Modellene er beskrevet nedenunder. Skredet fra Skutshorn har 150 forskjellige realiseringer, og videre blir det beregnet oppskylling inkludert farelinje for høyt skadepotensiale i 11 beregningsområder. Totalt blir det 1650 oppskyllingsberegninger.

Oppsettet for de 1650 kjøringene er laget slik at det er mulig å kontrollere at simuleringene er gjort med riktige parameterverdier. I tillegg har vi lagt inn en serie med kontrollrutiner:

- 1) At alle kombinasjoner av de ulike parameterne for hvert skred faktisk er kjørt
- 2) Ved alle numeriske beregninger er det en viss sjanse for at løsningen blir helt eller delvis instabil. Blir den delvis instabil kan kjøringen gå gjennom og produsere resultatfiler, men med verdier i deler av beregningsområdet som ikke er fysikalske. Vi har laget en rutine som gjør at vi visuelt kan inspisere enkeltkjøringer som har stor variasjon på oppskyllingshøyde langs oppskyllingslinjen (kan være tegn på instabilitet). Hvis dette inntreffer tas denne simuleringen ut av analysen. For analysen for Skutshorn var det ingen beregninger som ble luket ut på grunn av instabilitet.
- 3) Å sjekke at alle kjøringene har produsert resultatfiler (at de ikke har stoppet opp på grunn av instabilitet eller andre årsaker).
- 4) Stikkprøver på log-filer for å sjekke at riktige parametere er kjørt. Organiseringen av beregningene gjør at det vil være nok med noen få kontroller for å være sikker på at alle kjøringene er gjort med riktige parametere.



Figur 3: Totalt 11 delområder for beregning av oppskylling og farelinje for høyt skadepotensiale etter flodbølgen (røde bokser).

B3 Modeller basert på Geoclaw

NGI har over en tid utviklet nye beregningsmodeller for skredgenererte flodbølger. Disse er basert på Open Source modeller fra Geoclaw (<http://www.geoclaw.org>). I oppsettet inngår blant annet to modeller som er anvendt i denne rapporten, en skredmodell basert på Coulumb-Voellmy friksjon ("VoellmyClaw") samt en modell for flodbølger ("BoussClaw") basert på Boussinesq-likningene.

For den probabilistiske analysen av oppskyllingen som er gjort for skred fra Skutshorn, har vi som beskrevet brukt VoellmyClaw modellen for å beregne parametere knyttet til skredenes frontareal og treffhastighet med tilhørende sannsynligheter.

BoussClaw-versjonen av Geoclaw inkluderer effekten av dispersjon (ikke-hydrostatisk effekt) i tillegg til ikke-lineære effekter (se vedlegg C) som allerede er implementert i Geoclaw. Videre har den originale tsunami-modellen til Geoclaw/BoussClaw det store fortrinnet framfor oppsettet med modeller brukt i tidligere prosjekt med probabilistisk analyse at skredmodellene har en sømløs kobling til flodbølgeberegningene, og at oppskylling for både høyt og lavt skadepotensiale beregnes automatisk i hele beregningsområdet, også i og nær skredområdet. Derfor brukes gjerne BoussClaw i området rundt skredet. Utfordringen med BoussClaw er at det kreves mer data-kraft for større beregningsområder med fin oppløsning. Modellen er derfor kun brukt for beregninger i området som inkluderer skredutløpet (se rød boks som inkluderer skredet fra Skutshorn i Figur 3), og da nødvendigvis også med noe lavere oppløsning uten at dette går ut over den totale usikkerheten. For flere detaljer rundt modellene VoellmyClaw og BoussClaw, se Kim (2014).

B4 Bølgemodellen GloBouss

GloBouss er en regnemodell for flodbølger som følge av skred eller jordskjelv, utviklet av Universitetet i Oslo og NGI. Modellen er dybdemidlet (benytter Boussinesq langbølgelikninger) og beskriver blant annet ikke-lineære og dispersive (ikke-hydrostatiske) effekter. Modellen beskriver ikke oppskyllingsfasen (se neste avsnitt).

GloBouss er med godt resultat sammenlignet med analytiske løsninger og andre numeriske modeller, se Pedersen og Løvholt (2008). Den har også gitt gode resultater i forbindelse med Åknes/Tafjord-prosjektet der den er sammenliknet med skalamodellen av Sunnøylvs- og Geirangerfjorden ved SINTEF Kyst- og havneteknikk i Trondheim (NGI, 2011; SINTEF, 2008), se også neste avsnitt. For mer informasjon om modellen henviser vi til Pedersen og Løvholt (2008).

B5 Oppskyllingsmodellen MOST

Oppskyllingsmodellen MOST tar hensyn til ikke-lineære effekter og håndterer bølgebrytning. Den tillater også at vann beveger seg inn på områder som i utgangspunktet ikke var våte. Det er ikke tilfellet med modellen for bølge-forplantning (GloBouss) som reflekterer bølgene ved strandlinjen. MOST modellen er grundig verifisert ved hjelp av laboratorieforsøk og standardiserte tester (benchmark tests). MOST leser data (partikkelhastighet og overflatehevning) fra GloBouss og beregner oppskylling med høyt/lavt farepotensiale i angitte områder. Data for vanddyp og terreng innenfor beregningsområdet til MOST angis i forskjellige oppløsninger fra 10 m til 40 m siden MOST beregner oppskyllingen vha. tre gitter med stadig finere oppløsning. Modellen er beskrevet av Titov og Gonzalez (1997).

Modelloppsettet (GloBouss og MOST) er beskrevet av Løvholt med flere (2010) og er i tillegg til testene av GloBouss alene (beskrevet over) også grundig testet og sammenliknet med laboratorieforskene ved SINTEF Kyst- og havneteknikk i forbindelse med beregningene av flodbølger dannet av mulige fjellskred fra Åkerneset. Resultatene er oppsummert av NGI (2011), mens laboratorieforskene er beskrevet av SINTEF (2008), Lindstrøm m. fl. (2014) og NGI (2014).

B6 Referanser

- Kim, J (2014). Finite volume methods for tsunamis generated by submarine landslides. PhD Thesis. Univ Washington
- Lindstrøm, E.K., Pedersen, G.K., Jensen, A., and Glimsdal, S. (2014). Experiments on slide generated waves in a 1:500 scale fjord model. Coastal Engineering vol 92 p. 12–23.
- Løvholt F., Pedersen G., og Glimsdal S. (2010). Coupling of dispersive tsunami propagation and shallow water coastal response, Open Oceanography Journal, Caribbean Waves Special Issue, Vol 4, 71-82, doi: 10.2174/1874252101004020071, available online from <http://www.bentham.org/open/tooceaj/openaccess2.htm>
- NGI (2011). Numerical simulations of tsunamis from potential and historical rock slides in Storfjorden; Hazard zoning and comparison with 3D laboratory experiments. NGI rapport 20051018-00-1-R. Revisjon 01, 21. Februar 2011.
- NGI (2014). Evaluation of the flow characteristics of the potential Åkerneset rockslide, western Norway — contributions to the design of laboratory experiments on wave generation. Norwegian Geotechnical Institute Report 20061333-01-R.
- NGI (2017). Midsund kommune - oppskylling av flodbølger etter skred fra Opstadhornet. NGI rapport 20170280-01-R
- NGI (2018). Flodbølger etter fjellskred i Lyngen. Oppskyllingsberegninger ved hjelp av probabilistiske metoder. NGI rapport 20170309-01-R.
- NGI (2021a). Flodbølger og skred, Lifjellet, Hyllestad kommune – oppskyllingsberegninger ved hjelp av probabilistiske metoder. NGI rapport 20200282-01-R.
- NGI (2021b). Flodbølger etter skred fra Tussafoten, Eidfjord kommune – beregning av faresoner. NGI rapport 20210286-01-R.
- NGI (2022). Flodbølger etter skred fra Stiksmoen, Aurland kommune – beregning av faresoner. NGI rapport 20210580-01-R.
- NGU (2002). Hazard evaluation of rock avalanches; the Baraldsnes-Oterøya area. Geological Survey of Norway (NGU), report 2001.108, Trondheim, 33 pp.
- Pedersen, G. og Løvholt, F. (2008). Documentation of a global Boussinesq solver, Preprint Series in Applied Mathematics 1, Dept. of Mathematics, University of Oslo, Norway, URL: <http://urn.nb.no/URN:NBN:no-27775>
- SINTEF (2008). Notat – rasmodell, datert 2008-09-12.
- Titov, V.V. og Gonzalez, F.I. (1997). Implementation and testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) model. NOAA. Technical Memorandum ERL PMEL-112, 11 pp.

Vedlegg C

OM FLODBØLGER GENERERT AV
FJELLSKRED

Innhold

C1	Om flodbølger generert av fjellskred	2
C2	Referanser	3

C1 Om flodbølger generert av fjellskred

Flodbølger generert av skred som faller ned i fjorder eller innsjøer inngår i den type bølger som gjerne betegnes "tsunamis". Slike bølger befinner seg mellom dønninger og tidevann i spekteret av tyngdebølger.

Generering og utbredelse av flodbølger etter skred er et komplisert fenomen som kan deles i fire faser: 1) skredbevegelse; 2) energioverføring fra skred- til vannbevegelse; 3) bølgeutbredelse i åpent vann; 4) bølgeoppskylling i strandsonen.

Bølgenes karakteristika avhenger av skredets volum, form og hastighet, så vel som av vanddyptet. Bølgene klassifiseres som lange bølger dersom størsteparten av den energi som overføres fra skred- til vannbevegelse fordeles på bølgelengder mye større enn karakteristisk vanddypt. Ut fra dette følger at de vertikale variasjoner i horisontalhastigheten er små, og at trykket er tilnærmet hydrostatisk. Vår erfaring med større fjellskred med høy treffhastighet viser at bølgene under genereringen ikke nødvendigvis er lange og at bruk av hydrostatiske modeller kan føre til en overestimering av bølgene.

Under utbredelsen bort fra skredområdet vil bølgens form endres avhengig av dempning og bunntopografi. I åpent farvann avtar bølgehøyden som følge av radiell dempning når energien spres over et stadig større område. Bølgehøyden er således omvendt proporsjonal med kvadratrotten av avstanden fra skredområdet. I en smalere fjord vil den radielle dempningen være mye mindre framtreddende. Bølgene kan følge fjorden som i en kanal og bevege seg over lengre avstander uten å reduseres vesentlig. Under utbredelsen vil flodbølgen i tillegg utsettes for refraksjon, refleksjon, og interferens samt amplifikasjon som følge av fokusering eller avtagende dyp.

For lange bølger beveger vannet seg tilnærmet like mye i hele dypet fra overflaten til bunnen. Den såkalte "bunnbølgen" er kun en myte. Begrepet har oppstått fordi bølgen ofte ikke observeres før den "dukker opp" (amplifiseres) inne ved land. Øyenvitner har derfor formidlet at bølgen følger bunnen. At bølgen synes best inne ved land skyldes imidlertid bare at den blir krappere, dvs. både kortere og høyere, på grunnere vann inn mot land.

Så lenge bølgene er lange og karakteristisk overflateheving samtidig er mye mindre enn vanddyptet vil enklere, lineære likninger for bølgeforplantningen være gyldige. Utgjør derimot den karakteristiske overflatehevingen mer enn ca. 10 % av dypet vil ikke-lineære effekter gjøre seg gjeldende.

Amplifikasjonsfaktoren, dvs. forholdet mellom oppskyllingshøyden og overflatehevingen for innkommende bølge på dypt vann, er hovedsakelig bestemt av bølgelengden og helningen i strandsonen, eller mer presist forholdet mellom lengden på innkommende bølge og lengden på horisontalprojeksjonen av oppskyllingsskråningen. Det er også stor forskjell på oppskylling langs en bratt fjordside der bølgene beveger seg mer eller mindre parallelt med strandlinja og oppskylling innerst i fjordarmene der bølgene beveger seg rett mot land og blir forsterket av både den svakt hellende

skråningen av bunnen (grunnere vann) og fokuseringen på grunn av topografien (innsnevringen).

Fjellskred kan sette opp svingninger i (delvis) lukkede fjorder eller innsjøer. Dette kan oppleves som en serie av innkommende bølger der den første ikke nødvendigvis er størst. Bølgebevegelsen kan vare i timevis. For nærmere beskrivelser av flodbølger generert av skred anbefales artikler av Harbitz (2014) og Løvholt m.fl. (2015).

C2 Referanser

Harbitz, C. (2014). Flodbølger forårsaket av skred. I: Høeg, K., Karlsrud, K., Lied, K. (eds.). Skred, skredfare og sikringstiltak – praktiske erfaringer og teoretiske prinsipper. Universitetsforlaget. ISBN 978-82-15-02391-5.

Løvholt, F., Pedersen, G., Harbitz, C.B., Glimsdal, S. Kim, J. (2015). On the characteristics of landslide tsunamis. Phil. Trans. R. Soc. A 373, 20140376, doi:10.1098/rsta.2014.0376. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0376>.

Vedlegg D

FOTO FRA BEFARING

Innhold

D1 Foto fra befaring

2

D1 Foto fra befaring

Her presenteres foto fra befaringen som ikke er vist i hovedrapport.



Figur 1: Fra Sandvike langs Vennisvegen, retning mot Grindaheim (mot SV), med fjellet Grindadn i bakgrunnen.



Figur 2: Fra Vennis (mot NV). Skutshorn er nærmeste fjell, og Øye sees til venstre lengst inn i enden av Vangsmjøse.



Figur 3: Fra Vennis mot sørside av Vangsmjøse (mot SV).



Figur 4: Fra Vennis mot Øye og sørsiden av Vangsmjøse (mot VNV).



Figur 5: Fra Vennisvegen ved Steinde mot E16 (mot SØ).



Figur 6: Fra Vennisvegen ved Steinde mot E16 (mot S).



Figur 7: Fra området nedenfor Skjøre langs Vennisvegen retning mot kirkene ved Øye (mot SV). Øye kirke er kvit, mens Øye stavkirke ligger skjult bak løvskog mot høyre bildekant.



Figur 8: Som Figur 7, men her mot VSV.



Figur 9: Rådhuset i Grindaheim med Skutshorn i bakgrunnen (mot NV).

Dokumentinformasjon/ <i>Document information</i>		
Dokumenttittel/<i>Document title</i> Beregning av oppskylling		Dokumentnr./<i>Document no.</i> 20200665-01-R
Dokumenttype/<i>Type of document</i> Rapport / Report	Oppdragsgiver/<i>Client</i> NVE	Dato/<i>Date</i> 2022-12-01
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/<i>Proprietary rights to the document according to contract</i> Oppdragsgiver / Client		Rev.nr.&dato/<i>Rev.no.&date</i> 2 / 2023-02-15
Distribusjon/<i>Distribution</i> BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
Emneord/<i>Keywords</i> Flodbølge, tsunami, oppskylling, fjellskred, faresone, demning, dam, overtopping		

Stedfesting/ <i>Geographical information</i>	
Land, fylke/<i>Country</i> Norge, Innlandet	Havområde/<i>Offshore area</i>
Kommune/<i>Municipality</i> Vang	Feltnavn/<i>Field name</i>
Sted/<i>Location</i> Grindaheim	Sted/<i>Location</i>
Kartblad/<i>Map</i>	Felt, blokknr./<i>Field, Block No.</i>
UTM-koordinater/<i>UTM-coordinates</i> Sone: 33N Øst: 151300 Nord: 6798500	Koordinater/<i>Coordinates</i> Projeksjon, datum: Øst: Nord:

Dokumentkontroll/ <i>Document control</i>					
Kvalitetssikring i henhold til/ <i>Quality assurance according to NS-EN ISO9001</i>					
Rev/ Rev.	Revisjonsgrunnlag/ <i>Reason for revision</i>	Egenkontroll av/ Self review by:	Sidemanns- kontroll av/ Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Inter- disciplinary review by:
0	Originaldokument	2022-12-01 Sylfest Glimsdal	2022-11-30 Carl B. Harbitz		
1	Endret faresoner fra lavt til høyt skadepotensial	2022-12-02 Sylfest Glimsdal	2022-12-02 Carl B. Harbitz		
2	Senket vannivå, og overtopping dam i sørøst	2023-02-15 Sylfest Glimsdal	2023-02-15 Carl B. Harbitz		

Dokument godkjent for utsendelse/ <i>Document approved for release</i>	Dato/<i>Date</i> 15. februar 2023	Prosjektleder/<i>Project Manager</i> Sylfest Glimsdal
---	---	---

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: GeoMiljø – Offshore energi – Naturfare – GeoData og teknologi

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

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: Geotechnics and Environment – Offshore energy – Natural Hazards – GeoData and Technology.

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



NVE

Norges vassdrags- og energidirektorat

.....

MIDDELTHUNS GATE 29
POSTBOKS 5091 MAJORSTUEN
0301 OSLO
TELEFON: (+47) 22 95 95 95

www.nve.no