

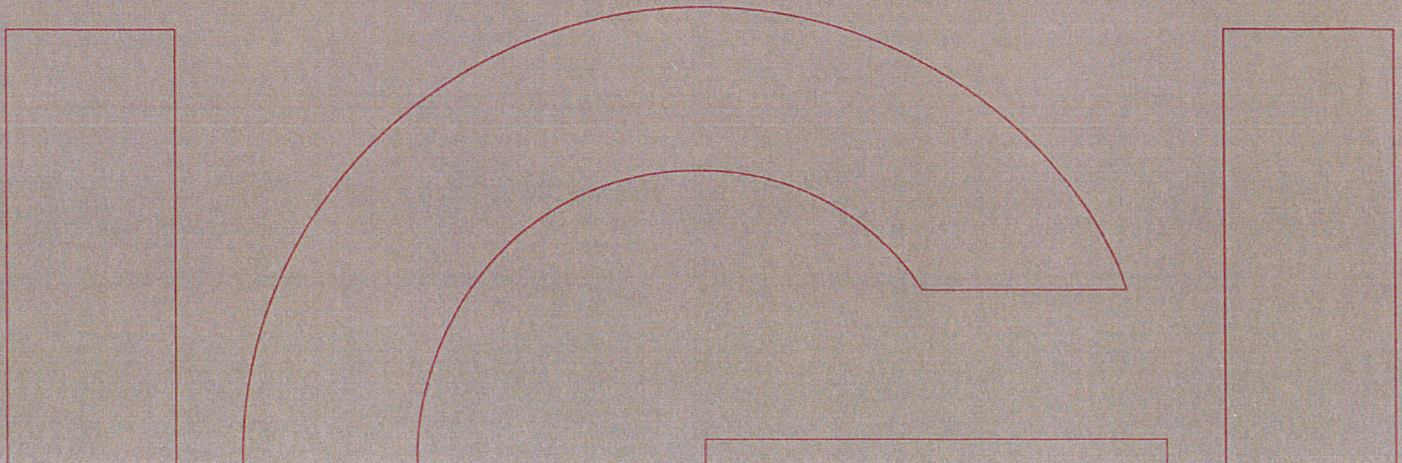


Rapport / Report

Sula kommune - flodbølger etter skred fra Åknes

Beregning av oppskylling ved Kvasnes, Vegsund og Solevågen

20100247-00-3-R
6. juli 2010



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

Prosjekt: Sula kommune - flodbølger etter skred fra Åknes
Dokumentnr.: 20100247-00-3-R
Dokumenttittel: Beregning av oppskylling ved Kvasnes, Vegsund og Solevågen
Dato: 6. juli 2010

Hovedkontor:
Pb. 3930 Ullevål Stadion
0806 Oslo

Avd Trondheim:
Pb. 1230 Pirsenteret
7462 Trondheim

T 22 02 30 00
F 22 23 04 48

Kontonr 5096 05 01281
Org. nr 958 254 318 MVA

ngi@ngi.no
www.ngi.no

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Sula kommune
Oppdragsgivers
kontaktperson: Leif Muri
Kontraktreferanse: Brev av 2010-03-08 og 2010-02-02.

For NGI

Prosjektleder: Sylfest Glimsdal
Utarbeidet av: Sylfest Glimsdal
Kontrollert av: Carl Bonnevie Harbitz

Sammendrag

På oppdrag fra Sula Kommune har NGI beregnet oppskylling av flodbølger ved Kvasnes, Vegsund og Solevågen basert på to fjellskred scenarioer fra Åknes.

Volum, utfallsområde og skreddynamikk for hvert av skredene er gitt gjennom Åknes-Tafjord prosjektet, se Åknes/Tafjord (2009) og NGI (2010). Det er her gjort beregninger for skred på 18 (dimensjonerende) og 54 mill. m³ (for evakuering).

Våre beregninger for disse tre lokasjonene er oppsummert i Tabell 0.1. Det er verdt å merke seg at beregningene er basert på middelvannstand og ikke flo sjø. Ut fra resultatene kan man slå fast at det er en begrenset oppskylling som følge av et fjellskred med volum 18 mill. m³ på disse tre lokasjonene, mens spesielt

BS EN ISO 9001
Sertifisert av BSI
Reg. No. FS 32989

Sammendrag (forts.)



Dokumentnr.: 20100247-00-3-R
Dato: 2010-07-06
Side: 4

lokasjonen ved Solevågen/Rabbeneset kan få en betydelig oppskylling (ca. 2 m) som følge av et fjellskred med volum 54 mill. m³. Det er verdt å merke seg at denne undersøkelsen kun dekker disse tre lokasjonene, og resultatene må ikke gjøres gjeldende for andre nærliggende områder da det kan være store lokale variasjoner. Vi vil også bemerke at begge scenarioene som er undersøkt kan gi betydelig oppskylling på vestsiden av bukten overfor Solevågen fergekai. Bølgene bruker ca. 20 minutter på å gå fra Åknes fram til de østre delene av Sula.

Tabell 0.1 Oppskyllingshøyder målt vertikalt i meter over middelvannstand.

Lokasjon	Scenario 2B (18 Mm ³)	Scenario 1C (54 Mm ³)
Kvasnes	<0.5	ca. 1
Vegsund	<0.5	<0.5
Solevågen/Rabbeneset - nord	<0.5	<1
Solevågen/Rabbeneset - sør	<1	ca. 2

Den største usikkerheten er knyttet til formen og volumet et eventuelt skred fra Åknes vil ha. Fra bølgene er dannet gir regnemodellene derimot et godt bilde av hendelsesforløpet.

Det er ikke lagt inn noen sikkerhetsmargin i de beregnede oppskyllingshøydene. Verdiene er heller ikke å betrakte som ekstremverdier utover det som kommer til uttrykk gjennom skredvolumene. Oppskyllingshøydene presentert i denne rapporten har ikke tatt hensyn til mulig sammenfall med høyvann (hyppig hendelse) eller springflo (sjelden hendelse).

Innhold



Dokumentnr.: 20100247-00-3-R
Dato: 2010-07-06
Side: 5

1	Innledning	6
1.1	Bakgrunn	6
1.2	Anvendte begreper og metoder	7
2	Kort beskrivelse av bunnforhold og topografi	7
3	Skredvolumer og dynamikk	9
4	Bølgeberegninger	10
4.1	Om beregningsområdet og regnemodellene	10
4.2	Bølgeforplantning	11
4.3	Oppskylling	12
5	Referanser	24

Vedlegg A: Om flodbølger generert av fjellskred

Vedlegg B: Om modellene

Vedlegg C: Konvergenstest

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

På oppdrag fra Sula Kommune har NGI beregnet oppskylling av flodbølger ved Kvasnes, Vegsund og Solevågen basert på to fjellskred scenarioer fra Åknes, se Figur 3 side 12.

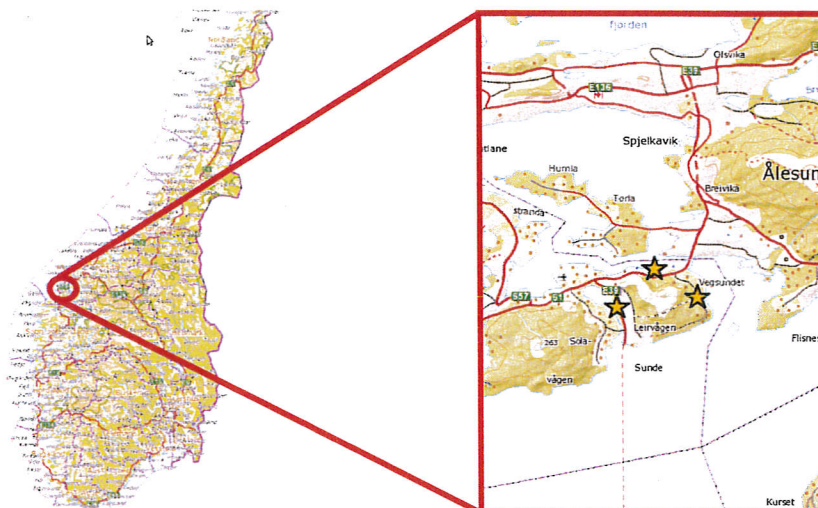
Volum, utfallsområde og skreddynamikk for hvert av skredene er gitt gjennom Åknes-Tafjord prosjektet, se Åknes/Tafjord (2009) og NGI (2010). Det er her gjort beregninger for skred på 18 mill. m³ (scenario 2B, se Åknes/Tafjord, 2009) og 54 mill. m³ (scenario 1C).

Befaring ved oppskyllingsområdene ble foretatt 28. april 2010. Med på befaringen var Leif Muri (Sula kommune) og Sylfest Glimsdal (NGI). Befaringen ble gjort fra land. Hensikten med befaringen var å få en oversikt over forhold som kan påvirke oppskyllingen hvert enkelt sted.

Fotografiene i denne rapporten er alle tatt under befaringen på flo sjø (ca. 75 cm over middelvannstand, MSL).

Den største usikkerheten er knyttet til formen og volumet et eventuelt skred fra Åknes vil ha. Fra bølgene er dannet gir regnemodellene derimot et godt bilde av hendelsesforløpet. For sannsynligheter for de aktuelle scenarioene, se Åknes/Tafjord (2009) og Tabell 3.1.

Det er ikke lagt inn noen sikkerhetsmargin i de beregnede oppskyllingshøydene. Verdiene er heller ikke å betrakte som ekstremverdier utover det som kommer til uttrykk gjennom skredvolumene. Oppskyllingshøydene presentert i denne rapporten har ikke tatt hensyn til mulig sammenfall med høyvann (hyppig hendelse) eller springflo (sjelden hendelse). Høyeste astronomiske tidevann (HAT) er for Ålesund 119 cm over MSL (basert på beregninger for Ålesund, hentet fra Statens Kartverk <http://vannstand.statkart.no>).



Figur 1: Områdene for beregning av oppskylling (lokasjonene er merket med stjerne) som følge av et mulig skred fra Åknes. Lokasjonene fra venstre er: Slevågen, Vegsund og Kvasnes. (Kart er tatt fra www.gislink.no ©)

1.2 Anvendte begreper og metoder

Med overflatehevning menes bølgetoppens høyde over stille vannstand (likevektsnivå), mens bølgehøyde er definert som høydeforskjellen mellom bølgetopp og bølgedal. Disse begrepene benyttes for å beskrive bølger i åpent vann. I oppskyllingsssonene benyttes begrepene oversvømmelseshøyde (høyde over likevektsnivå) og strømningsdybde (høyden av vann målt fra bakkenivå). For vannbevegelse brukes partikkel hastighet for å beskrive hvor fort vannet beveger seg både i åpent vann og under oppskylling. Det er verdt å merke seg at partikkelhastighet ikke er det samme som hastigheten bølgene forplanter seg med. Se for øvrig Vedlegg A for en nærmere beskrivelse av flodbølger generert av fjellskred.

Modeller som beskriver bølgeforplantning og oppskylling deler beregningsområdet opp i mange små gitterceller. Modellene beregner så overflatehevningen og partikkelhastigheten i hver enkelt celle (se også om modellene i Vedlegg B og konvergenstest i Vedlegg C). Maksimalverdiene av størrelsene beregnes ved å ta ut høyeste oppnådde verdi i hver enkelt celle i løpet av beregningstiden.

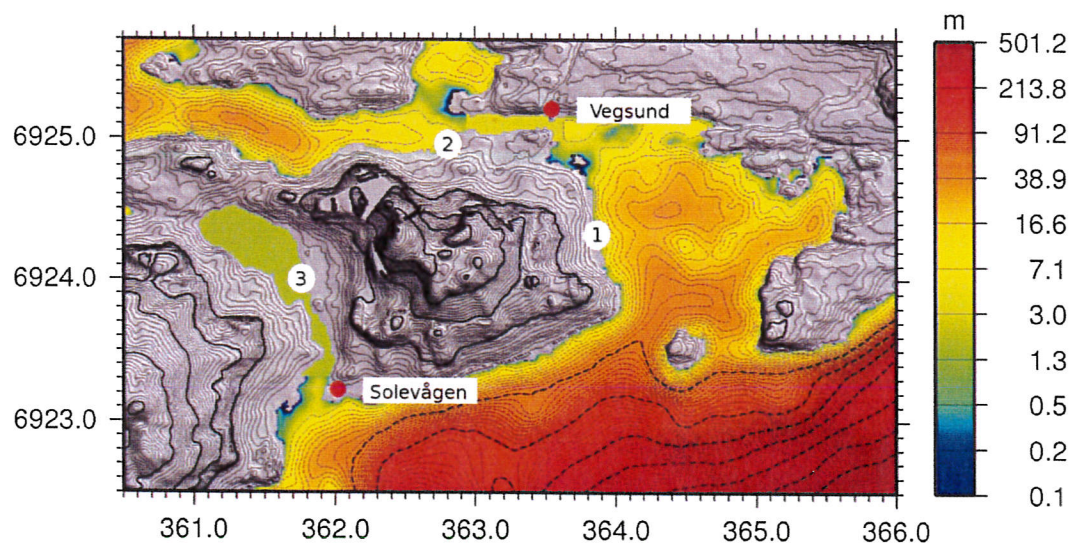
2 Kort beskrivelse av bunnforhold og topografi

De tre lokasjonene som skal undersøkes ligger helt øst i Sula kommune. Mellom Åknes og Sula varierer dypet i fjorden fra 300 til 700 m, med to fjordkryss. Det første er der Norddalsfjorden går inn mot Tafjord, mens det andre er der Sykkylvsfjorden tar av fra Storfjorden. I forbindelse med fjordkryss eller der hvor fjorden blir videre og/eller dypere vil bølgene reduseres i høyde, se Figur 3.

Fra Storfjorden inn mot lokasjon 1 ved Kvasnes avtar dypet raskt til 20-30 meter, se Figur 2. Bunnen utenfor lokasjonen er ca. 5-6 grader, mens terrenget ved strandsonen er vesentlig brattere på grunn av fyllingen der. Overfor fyllingen hvor det ønskes utbygget heller terrenget ca. 8-10 grader. Ved denne lokasjonen følger strandlinjen en tilnærmet rett linje, se Figur 5 og Figur 7

Bølgene som vil nå lokasjon 2 ved Vegsund Slip AS må passere videre gjennom sundet (kanal) ved Vegsund. Dybdeforholdene i dette sundet er ikke godt kartlagt, men i beregningene har vi brukt et konservativt anslag på 5 m (samme dyp på tvers av kanalen). Dette anslaget er basert på lokal kunnskap om kanalen og Olex-målinger i vestre del av sundet. Med konservativt anslag mener vi at vi har valgt et dyp som er noe større enn i virkeligheten, hvilket medfører at bølgene som blir beregnet inn mot Vegsund Slip AS ikke er underestimert. Bredden på kanalen varierer fra ca. 60 m på det smaleste ved brua til ca. 120 m mot Vegsund Slip AS.

Bølgene inn til lokasjon 3 ved Solevågen har også en noe kronglete vei fra Storfjorden. Utenfor Solevågen er fjordbunnen bratt og dypet avtar raskt til ca. 5 m. Videre innover mot lokasjon 3 er det meget grunt. Her er det heller ikke gjort noen nøyaktige oppmålinger, og et antatt konservativt dyp på 3 m er valgt i beregningene. Det smaleste punktet innover mot denne lokasjonen er ved brua hvor det er ca. 20 m bredt.



Figur 2: Batymetri og topografi ved lokasjonene ved Sula. Lokasjon 1 er ved Kvasnes, 2 er ved Vegsund Slip AS og 3 er ved Storvalen/Solevågen. Tykke linjer er trukket for hver 50. høydemeter, mens ekvidistansen mellom de tynnere linjene er 5 m. Stiplede linjer er i fjorden.

3 Skredvolumer og dynamikk

De viktigste parametrene for de to scenarioene fra Åknes som er tatt med i beregningene i denne rapporten er listet opp i

Tabell 3.1. Scenario 1C (54 mill. m³) representerer det tilfellet at hele fjellsiden løsner som en stor blokk, mens scenario 2B (18 mill. m³) brukes for å modellere en kollaps av vestre flanke. Førstnevnte skred danner grunnlaget for evakuering, mens det minste skredet brukes for dimensjonering.

Betydningen av parametrene for skredforløpet (form, volum, hastighet og utløpslengde) og for bølgedannelsen er grundig testet opp mot hverandre ved hjelp av regnemodeller. Testene viser at bølgehøyden er avhengig av tykkelsen på skredet (eller mer presist skredets frontareal), hastigheten i første fasen etter at skredet har gått i vannet og hvor langt skredet beveger seg under vann. Mindre betydning har skredets form, dvs. helning i fronten, og hvor langt selve skredet er.

Undersjøiske utløpsdistanser er basert på vurdering av dybdeprofilen utenfor skredområdet samt kjente (statistiske) sammenhenger mellom skredvolum og utløpsdistanse. For modellforsøkene i Trondheim (se SINTEF, 2008) ble treffhastigheten til skredet bestemt ut fra en vurdering av total fallhøyde, volum og friksjon. Utløpet under forsøkene stemte godt overens med statistikken for skredutløp i området. Hastighetsforløp og utløpsdistanse fra disse forsøkene er derfor brukt som inngangsparametre i regnemodellene. Dette er samme tilnærming som er brukt i NGI (2010).

Tabell 3.1: De viktigste parametrene for de to skred scenarioene som ligger til grunn for oppskyllingsberegningene, verdier tatt fra Åknes/Tafford (2009).

Scenarioer	Dimensjoner			Treffhastighet	Volum	Årlig sannsynlighet
	Høyde [m]	Bredde [m]	Lengde [m]	[m/s]	10 ⁶ m ³	
1C	120	450	1000	45	54	<1/1000
2B	80	450	500	45	18	1/1000

4 Bølgeberegninger

4.1 Om beregningsområdet og regnemodellene

For området mellom Åknes og Stordal er batymetri og topografi levert av NGU. Disse dataene er basert på flere høyoppløselige datasett med oppløsning på 3-6 m. Sammenstilling av disse datasettene er interpolert over på et uniformt grid med oppløsning på 5 m. I beregningene for forplantningen av flodbølgene er dataene videre interpolert over på et 50 m uniformt grid. Ved strandlinjen kan kunstige effekter oppstå på grunn av ulik vertikal datum på batymetri ("sjøkartnull") og topografi (NN1954) samt punkter som mangler data. Forskjellen mellom de to referansene er ca. 1.20 m i dette området, noe som i denne sammenheng har liten betydning for det totale resultatet.

Videre ut fra Stordal er batymetrien basert på de beste tilgjengelige datasettene fra Sjøkartverket, som i dette tilfellet har vesentlig grovere oppløsning enn i de godt kartlagte indre områdene av Storfjorden. For beregninger av flodbølge utbredelsen i dypt vann er likevel nøyaktigheten av disse dataene tilstrekkelig. Disse dataene er i likhet med dataene for de indre områdene interpolert inn på et 50 m uniformt grid av NGU mens sammenstilling av batymetri og topografi er gjort av NGI.

For de tre områdene for beregning av oppskylling ved Sula, er høyoppløselige topografiske data levert av Fylkesmannen i Møre og Romsdal. Disse dataene er interpolert over fra 1 m konturlinjer til et uniformt grid med oppløsning 5 m. Alle dataene (både innenfor og utenfor Stordal) er gitt i kartprojeksjon UTM 32.

Beregningene er gjort i to steg. Det første steget modellerer bølgeforplantningen fra Åknes fram til Sula, mens i andre steg blir oppskyllingen innover tørt land beregnet for hver enkel lokasjon. Det er to ulike modeller som brukes i disse to stegene.

GloBouss er modellen som beregner bølgeforplantningen fra Åknes og videre ut i Storfjorden og alle sidearmer. Modellen tar hensyn til både ikke-lineære og dispersive effekter. GloBouss er med godt resultat sammenlignet med analytiske løsninger og andre numeriske modeller, se Pedersen og Løvholt (2008) og NGI (2008). Den har også gitt veldig gode resultater i forbindelse med Åknes/Tafjord-prosjektet hvor den er sammenliknet med skalamodellen av Sunnlyvs- og Geirangerfjorden ved SINTEF i Trondheim, se SINTEF (2008) og NGI (2010). GloBouss er utviklet ved NGI, International Centre for Geohazards og Universitetet i Oslo. For mer detaljer om modellen, se Vedlegg B. I beregningene som ligger til grunn for denne rapporten har vi brukt modellen rent dispersivt. Numeriske tester viser at ikke-lineære effekter ikke er viktige før bølgene nærmer seg land (shoaling – noe som er ivaretatt av neste modell, se under).

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

bølgeforplantning (GloBouss) som reflekterer bølgene ved strandlinjen. MOST er kanskje den oppskyllingsmodell som er mest brukt internasjonalt i dag. Den er grundig verifisert ved hjelp av laboratorieforsøk og standardiserte tester (benchmark tests). Modellen er beskrevet av Titov og Gonzalez (1997). Denne modellen i kombinasjon med GloBouss er også testet mot skalamodellen ved SINTEF med godt samsvar, se NGI (2010).

Vedlegg B gir mer teknisk informasjon rundt beregningene og inngangsdataene til modellene.

4.2 Bølgeforplantning

Bølger etter skred i en fjord blir påvirket av både dybdeforhold og bredde på fjorden. Hastigheten slike bølger beveger seg med avhenger av hvor dyp fjorden er. Dess grunnere fjorden er dess langsommere beveger bølgene seg. Det betyr at når en bølge beveger seg inn mot grunnere vann, vil fronten av bølgen bevege seg langsommere enn halen. Bølgen vil dermed bli kortere og samtidig også høyere. Blir bølgen høy nok i forhold til vandypet vil bølgen til slutt kunne bryte. Tilsvarende vil bølger som beveger seg fra grunnere mot dypere vann bli strukket, og høyden reduseres. Energien til bølgene er likevel bevart.

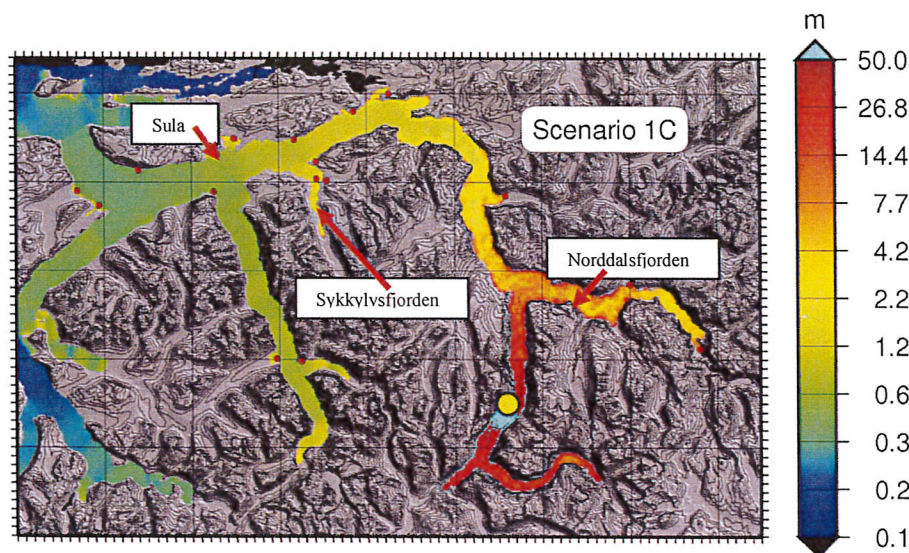
Når fjorden smalner inn vil også bølgene bli høyere, mens der fjorden vider seg ut vil bølgene reduseres. I en idealisert fjord med samme bredde og dyp hele veien, kan man noe forenklet si at bølgene vil bevege seg uten å endre form eller høyde. Reduksjonen i bølgehøyden vil derfor komme av at bølgene beveger seg ut i en dypere eller videre del av fjorden, og at de kommer til deler av fjordsystemet hvor bølgene brer seg ut i flere fjordarmer.

Bølger fra Åknes vil bre seg nord- og sørover i Sunnlyvsfjorden. De nordgående bølgene vil dempes noe når de kommer til fjordkrysset hvor Stordalsfjorden går inn mot Tafjord. På veien videre utover reduseres bølgene hvor fjorden blir videre og/eller dypere samt ved fjordkryssene. Fjorden ved Åknes er ca. 300 m dyp, mens bølgene beveger seg over de dypeste områdene av Storfjorden, ca. 700 m, på dens vei mot Sula.

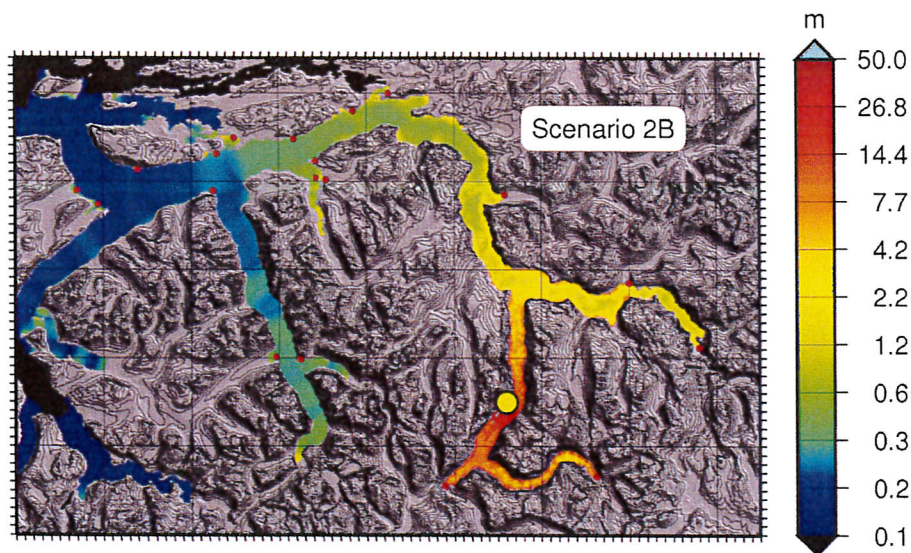
Maksimal overflatehevning for scenario 1C og 2B for hele Storfjorden er vist i Figur 3 og Figur 4. Utenfor skredområdet er overflatehevningen flere titalls meter høy for begge scenarioene. Flodbølgen i fjorden utenfor Sula er på ca. 0.8 m og 0.3 m for henholdsvis scenario 1C og 2B (målt fra likevekt). Bølgene vil bruke ca. 20 min fra Åknes til Sula.

Når det gjelder områdene ved Vegsund Slip AS vil det etter en stund komme inn bølger også fra vest. Disse har beveget seg ut Sulafjorden og rundt hele Sula, og har hatt en lang vei hvor de underveis har passert områder bølgene kan spre seg i flere retninger. Fra beregningene ser vi at bølgene inn mot Vegsund fra vest vil være ubetydelige.

Oppløsningsen i beregningene med GloBouss er 100 m. Se for øvrig Vedlegg C for test av riktig oppløsning i beregningene.



Figur 3: Maksimal overflatehevning gitt i meter for scenario 1C. Åknes er markert med et gult punkt.



Figur 4: Maksimal overflatehevning gitt i meter for scenario 2B.

4.3 Oppskylling

Det er flere faktorer som bestemmer oppskyllingen ved en lokasjon. De viktigste er:

- Lengde, høyde og retning på innkommende bølge
- Bølgetype/bølgeform
- Dybdeforholdene utenfor lokasjonen

- Terrenget (spesielt helningen og om det er en bukt eller et nes etc.) i oppskyllingsområdet

Størst amplifikasjon får vi der både terrenget i oppskyllingsområdet og sjøbunnen utenfor er slak. I ekstreme tilfeller kan oppskyllingen bli over fem ganger så høy som bølgen var før amplifikasjonen begynte på vei inn mot land. Lavest oppskylling får vi når bølgene beveger seg langs strandlinjen og spesielt der terrenget er bratt. Når en bølge beveger seg rett mot en vertikal vegg (loddrett fjellside) vil bølgen reflekteres og oppskyllingen vil typisk nå dobbelt så høyt som bølgen utenfor. Store lokale variasjoner ved oppskylling kan riktignok oppstå avhengig av terreng, dybdeforhold, bygninger, infrastruktur med mer. Dessuten vil vi få større oppskylling i en fjordbunn eller en bukt/vik der bølgen vil bevege seg rett mot stranda og samtidig fokuseres på grunn av terrengets form.

MOST modellen som er anvendt for beregning av oppskyllingen ved Kvasnes, Vegsund og Solevågen leser inn data fra bølgemodellen GloBouss. Resultatene som er presentert under er basert på beregninger gjort på tre forskjellige nivåer med økende oppløsning fra 40 m på det første nivået, via 20 m, ned til 5 m.

Ved Kvasnes er kanten av fyllingen mot fjorden blendet med store stein i en anslått høyde på ca. 3 m over middelvannstand (MSL), se Figur 5 - Figur 7. Beregningene presentert som maksimal overflateheving (i fjorden) og oversvømmelseshøyde (på land) i Figur 8 og Figur 9 viser maksimale verdier på 0.5 m og 1 m for henholdsvis scenario 2B og 1C. Ved denne lokasjonen reduseres oppskyllingen som følge av stor helning i strandsonen og som følge av at bølgene beveger seg langs strandlinjen. Til sammenlikning er oppskyllingshøyden for scenario 1C og 2B ved bukten sør for brua ved Vegsund ca. 2.5 m og ca. 1 m, se Figur 14 og Figur 15. Her bøyer bølgene inn i bukta samtidig som bølgene blir fokusert og dermed forsterket ytterligere.

Området ved Vegsund Slip AS er preget av fyllinger og kaianlegg, se Figur 10 - Figur 13. Utbyggingen som det søkes om her medfører mer utfylling av områdene vest for Vegsund Slip AS. Dette vil medføre at større deler av området vil få en brattere helning mot sjøen og dermed vil oppskyllingstallene for dette stedet presentert under være maksimale verdier. Beregningene våre med dagens utfylling gir en oppskyllingshøyde på 0.2 m og 0.4 m for henholdsvis scenario 2B og 1C, se Figur 14 og Figur 15. På sørsiden av sundet vil det etter en stund oppstå numerisk instabilitet som viser seg som forsterket oppskylling for scenario 1C. Dette er ufysikalsk og vi forventer her samme verdier som i området rundt, det vil si i overkant av 1 m, se Figur 14.

På grunn av de lave verdiene vi finner for områdene her mener vi at utfyllingene som ønskes iverksatt ikke vil kunne medføre høyere oppskylling. Her vil bølgene i likhet med Kvasnes ikke bli nevneverdig forsterket da de beveger seg langs land. Vi understreker igjen at på grunn av mangel på data i selve sundet, har vi valgt å estimere dypet i sundet med 5 m. Numeriske tester viser at dette gir et

konservativt resultat, selv om vi får noe refleksjon vest i kanalen. Resultatene er med andre ord ikke underestimert som følge av dette.

Innenfor Solevågen ved Rabbeneset (se Figur 20) planlegges to områder for oppsetting av nye bolighus i tilknytning til eksisterende boligområder, se Figur 16 - Figur 19, samt resultater fra beregningene i Figur 20 (1C) og Figur 21 (2B). Det sørligste området ligger inne i en liten bukt, mens det andre ligger nord for dette, på andre siden av Rabbeneset. For scenario 1C viser beregningene en oppskylling på 2.2 m (sør for Rabbeneset) og 0.9 m (nord for Rabbeneset), mens tallene for scenario 2B er henholdsvis 0.6 m og 0.5 m. Her har vi et tydelig eksempel på hva formen på terrenget har å si for hvor mye bølgene blir forsterket under oppskylling: Ved det sørlige området blir bølgene fanget av bukten (i alle fall så lenge bølgene er høye nok, oppskylling 2.2 m for scenario 1C), mens ved det nordlige området er oppskyllingen beregnet til 0.9 m. For området fra fergekaia ved Solevågen og innover mot Rabbeneset eksisterer ikke dybdemålinger. Dette området er grunt og farbart kun med små båter. Som tidligere nevnt har vi erstattet hele området med et konstant dyp på 3 m. Dette gir som i tilfellet ved Vegsund et resultat på den konservative siden, noe som er bekreftet gjennom flere numeriske tester. Resultatene for oppskyllingsberegningene er oppsummert i Tabell 4.1.

Det bør nevnes at oppskyllingsberegningene viser at i de ytre områdene på vestsiden av bukten ved Solevågen fergekai kan bølgen gi en oppskylling på over 3 m for det største scenarioet (1C), og opp mot 2 m for det minste (2B).

Valg av type tiltak mot skader fra flodbølger vil avhenge av størrelsen på den innkomne bølgen. Ved de tre lokasjonene som er undersøkt i denne rapporten vil oppskyllingen være håndterbar. Generelt vil det å gjøre strandlinjen bratt ved oppmuring av stein eller betong redusere skadene fra en eventuell flodbølge. Høyden på en slik mur i strandlinjen må være av samme størrelsesorden som de oppskyllingshøydene det skal tas hensyn til. Skal det bygges kaianlegg i et område hvor det er beregnet stor oppskylling, er det også mulig å designe dette på en slik måte at vannet strømmer gjennom (åpen kai) og at kreftene på kaien derved reduseres.

Generelt vil dimensjonering og design av bygninger basert på mer detaljerte og krevende beregninger av hastigheten til vannet være et mulig tiltak i en potensiell oppskyllingsone.

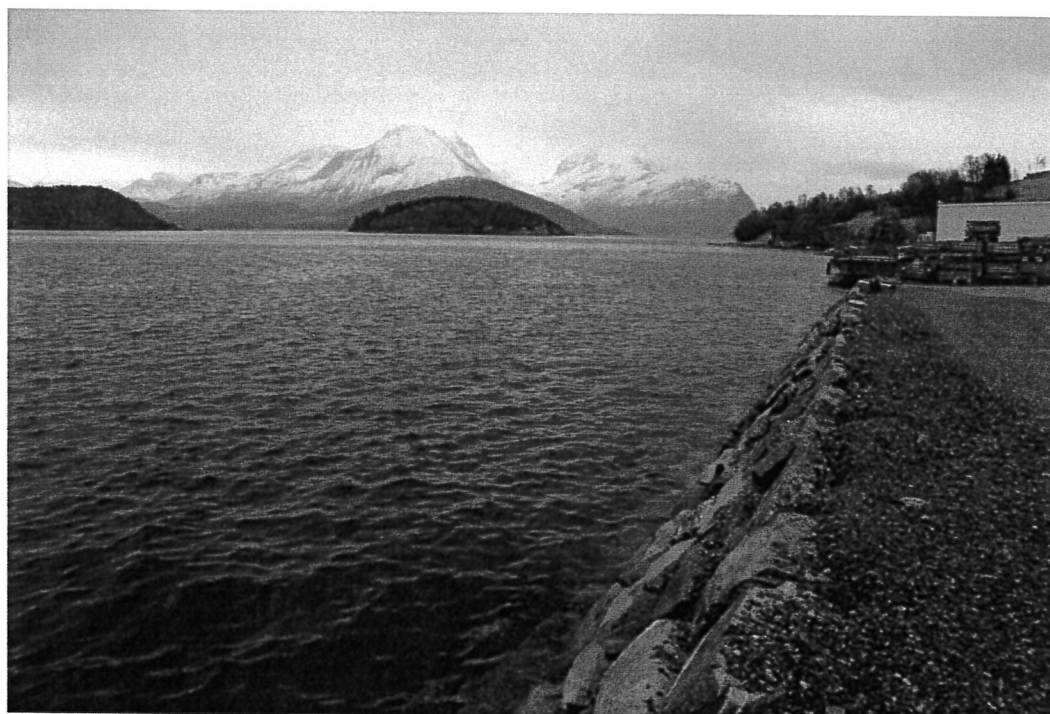
Videre vil bølger som beveger seg mot en strøm som følge av tidevann eller elveutløp (som for eksempel inn mot lokasjonen ved Solevågen) kunne bli krappere og høyere. Å beregne dette mer nøyaktig er også krevende. Vi finner det imidlertid ikke nødvendig å gå videre med de mer krevende beregningene ut fra de beskjedne oppskyllingshøydene det er snakk om for det dimensjonerende scenarioet (18 Mm^3).

Det er verdt å merke seg at den største hastigheten på vannet normalt opptrer under tilbaketrekningen og at erfaringer fra steder hvor det har vært store

ødeleggelser som følge av oppskylling av flodbølger forteller oss at drivgods kan gjøre vel så mye skade som bølgene selv.

Tabell 4.1 Oppskyllingshøyder målt vertikalt i meter over middelvannstand.

Lokasjon	Scenario 2B (18 Mm ³)	Scenario 1C (54 Mm ³)
Kvasnes	<0.5	ca. 1
Vegsund	<0.5	<0.5
Solevågen/Rabbeneset - nord	<0.5	<1
Solevågen/Rabbeneset - sør	<1	ca. 2



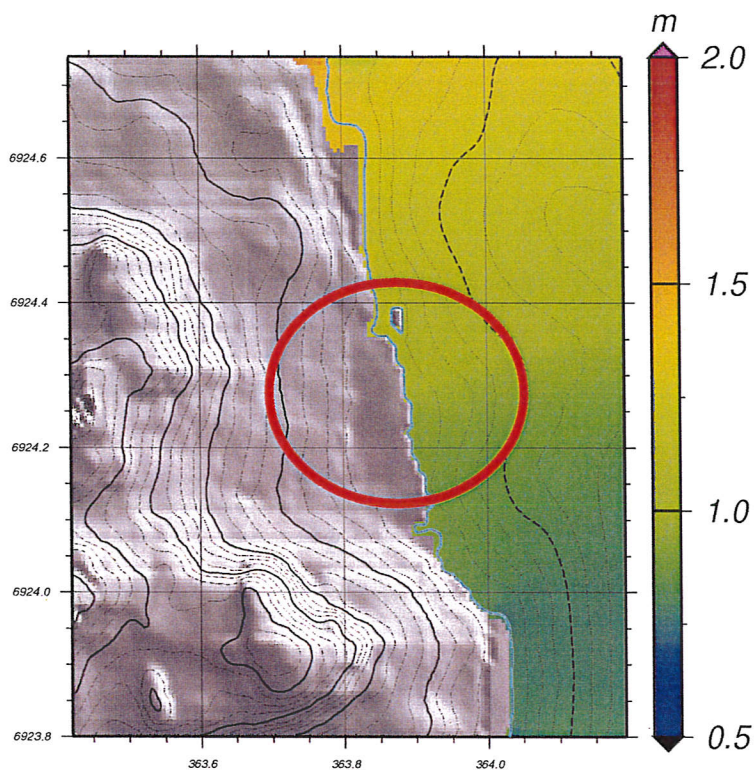
Figur 5: Ved Kvasnes sett mot sør. Foto: NGI.



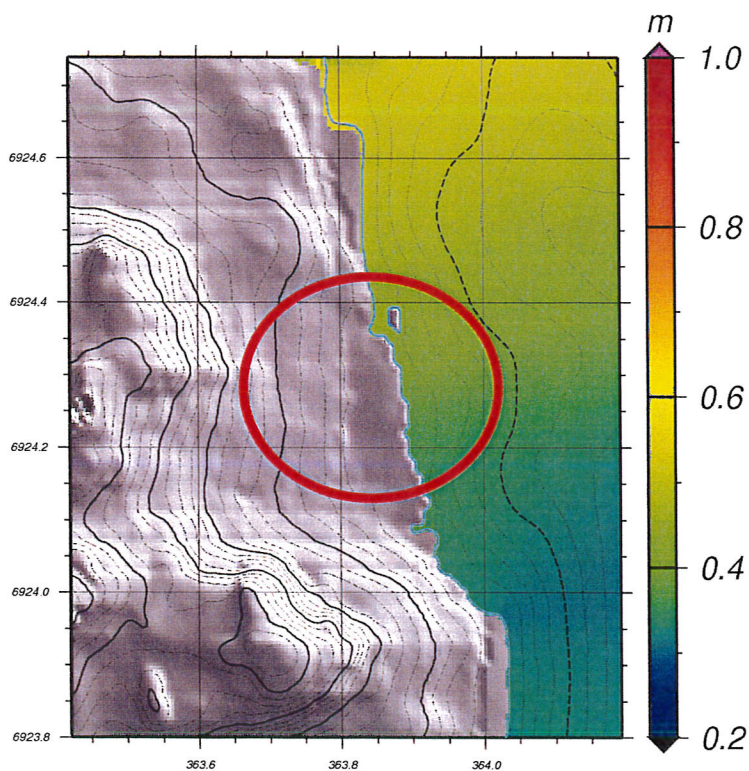
Figur 6: Ved Kvasnes sett mot sør. Området hvor det er tenkt oppsatt bygg (til høyre for bilen i midten av bildet) markert med rød pil. Foto: NGI.



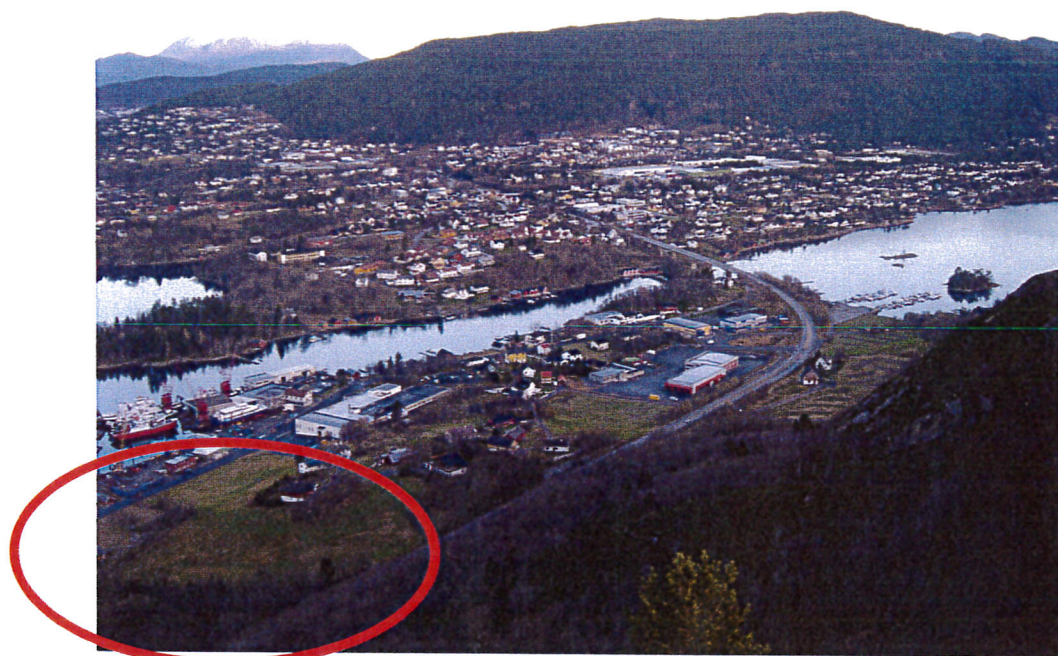
Figur 7: Ved Kvasnes sett mot Vegsund (mot nord). Foto: NGI.



Figur 8: Maksimal overflatehevning for scenario 1C (54 mill. m³) ved Kvasnes. Området som skal vurderes er markert med rød ring.



Figur 9: Maksimal overflatehevning for scenario 2B (18 mill. m³) ved Kvasnes. Området som skal vurderes er markert med rød ring.



Figur 10: Ved Vegsund Slip AS (mot nord). Vegsund Slip AS er innringet og Vegsund sentrum sees på motsatt side av selve sundet. Området ved Vegsund slip er markert med rød ring. Foto: Vegsund Slip AS.



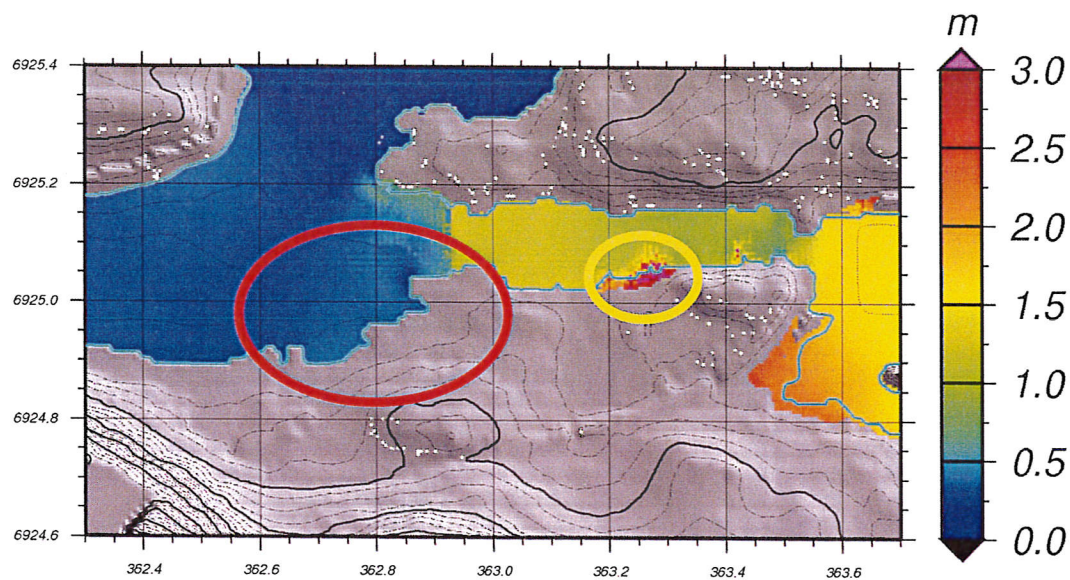
Figur 11: Ved Vegsund Slip AS (mot vest), området hvor tiltak ønskes iverksatt er innringet. Foto: Vegsund Slip AS.



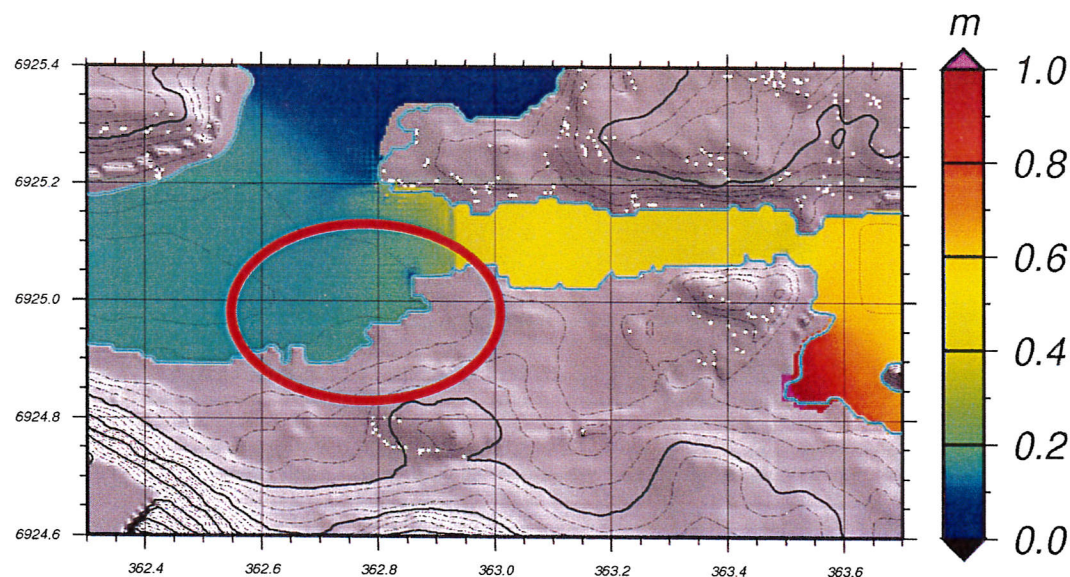
Figur 12: Ved Vegsund Slip AS (mot øst). Brua over sundet sees i venstre billedkant. Foto: Vegsund Slip AS.



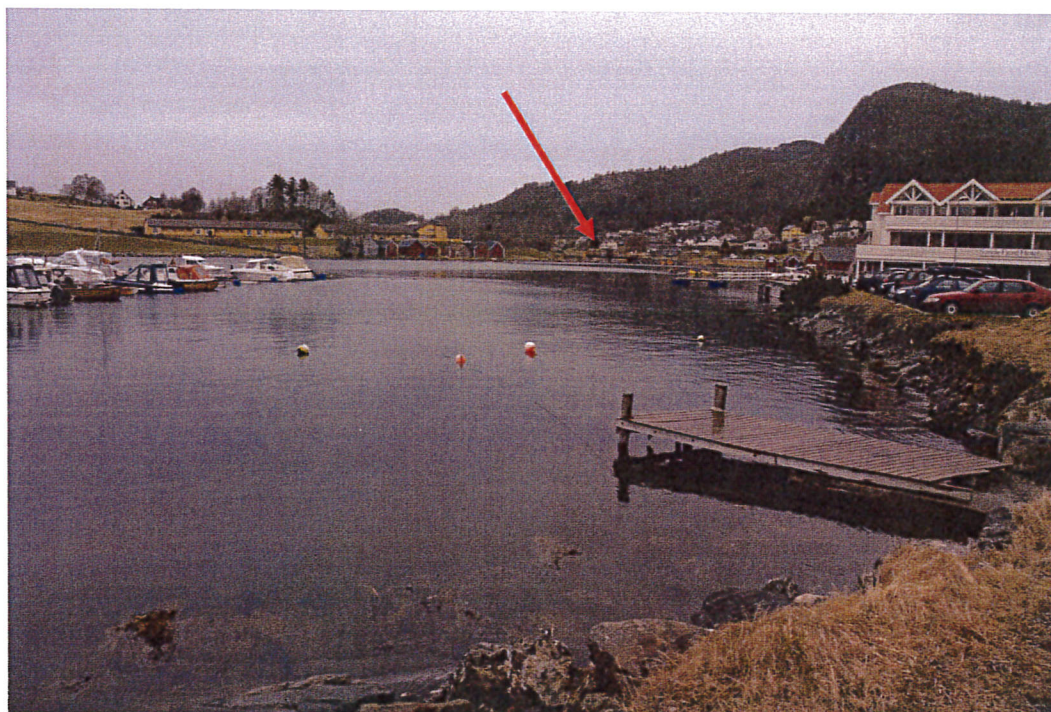
Figur 13: Ved Vegsund Slip AS (nord østlige kai, bildet tatt mot sør). Bildet er tatt på flo sjø. Foto: NGI.



Figur 14: Maksimal overflateheving for scenario 1C (54 mill. m³) ved Vegsund. Området hvor tiltak ønskes iverksatt er innringet med rød farge. Instabilitet i modellen er markert med gul sirkel. Overflatehevingen her vil være som ellers i sundet, det vil si i overkant av 1 m.



Figur 15: Maksimal overflateheving for scenario 2B (18 mill. m³) ved Vegsund. Området hvor tiltak ønskes iverksatt er innringet.



Figur 16: Fra fergekaien ved Solevågen mot nord. Brua (se pil) inn mot området hvor det vurderes bygget nye bolighus sees i bakgrunnen. Foto: NGI.



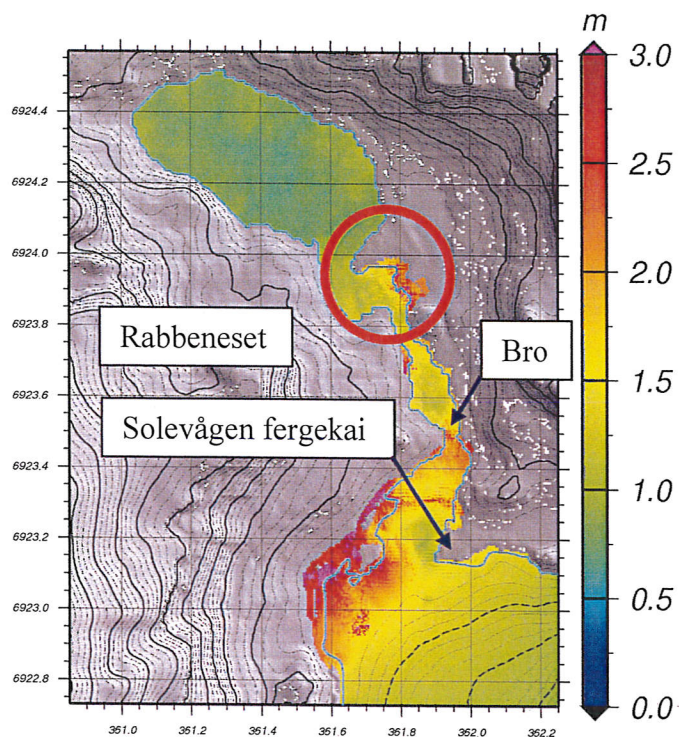
Figur 17: Brua ved Solevågen (mellom fergekai og området for beregning av oppskylling, se Figur 16). Foto: NGI.



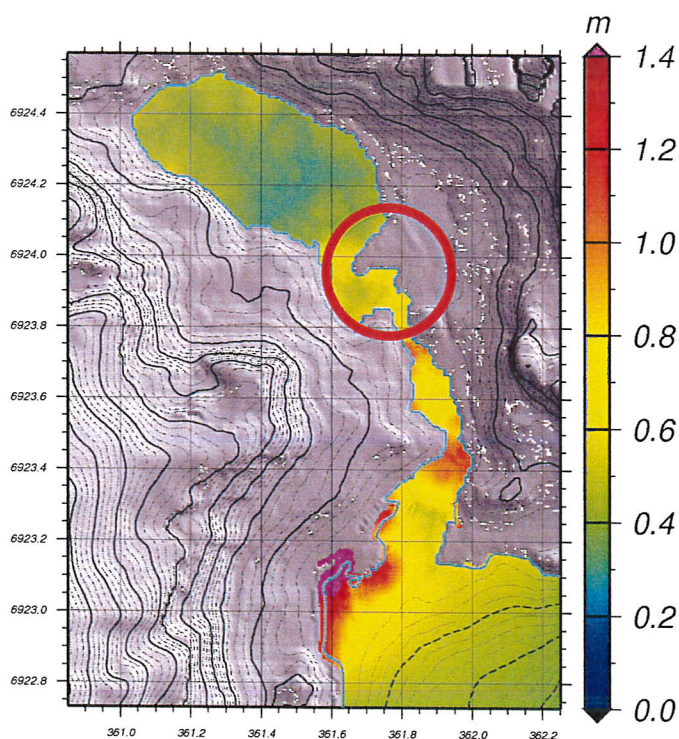
Figur 18: Fra brua ved Solevågen mot Storvalen (mot nord). Foto: NGI.



Figur 19: Fra området ved Rabbeneset mot brua (bildet tatt mot sør, fra sørsiden av Rabbeneset). Pilen viser retningen mot det sørlige området hvor det vurderes å bygge nye bolighus. Foto: NGI.



Figur 20: Maksimal overflateheving for scenario 1C (54 mill. m³) ved Solevågen. Området hvor tiltak ønskes iverksatt er innringet (Rabbeneset)



Figur 21: Maksimal overflateheving for scenario 2B (18 mill. m³) ved Solevågen. Området hvor tiltak ønskes iverksatt er innringet.

5 Referanser

- NGI (2008). Semi-annual report: Comparison of 1HD numerical simulations and laboratory experiments; coupling between 3D laboratory and numerical model; sensitivity analyses; the tsunami impact in the outer part of Storfjorden. NGI rapport 20051018-2.
- NGI (2010) 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.
- Pedersen, G. and Løvholt, F., (2008). Documentation of a global Boussinesq solver, Preprint Series in Applied Mathematics 1, Dept. of Mathematics, University of Oslo, Norway,
URL: http://www.math.uio.no/eprint/appl_math/2008/appl_2008.html
- SINTEF (2008). Notat – rasmodell, dated 2008-09-12.
- Titov, V.V., and F.I. Gonzalez (1997).
NOAA. Technical Memorandum ERL PMEL-112, 11 pp
URL: <http://www.pmel.noaa.gov/pubs/PDF/tito1927/tito1927.pdf>
- Åknes/Tafjord (2009). Åknes/Tafjord Beredskap IKS v/Lars Harald Blikra: Scenarios for tsunami modelling.



Dokumentnr.: 20100247-00-3-R
Dato: 2010-07-06
Side: 1
Vedlegg: A

Vedlegg A - Om flodbølger generert av fjellskred

Innhold

1 Om flodbølger generert av fjellskred

2

1 Om flodbølger generert av fjellskred

Skred som faller i fjorder eller innsjøer genererer tyngdebølger som normalt fortøner seg som en mellomting mellom dønninger og tidevann. Flodbølger generert av skred inngår i den type bølger som gjerne betegnes "tsunamis".

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

Bølgenes karakteristika avhenger av skredets volum, form og hastighet, så vel som av vanddyptet. I de tilfeller der karakteristisk overflatehevning er mye mindre enn vanddyptet vil enklere, lineære likninger for bølgeforplantningen være gyldige. Utgjør derimot den karakteristiske overflatehevningen mer enn ca. 10% av dypet vil ikke-lineære effekter være viktige.

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 (som for eksempel Åknes) viser at bølgene ikke nødvendigvis er lange og at bruk av hydrostatiske modeller kan føre til en overestimering av bølgene.

Bevegelsen i vannmassene som følge av en bølge som passerer avtar normalt med dypet. For lange bølger beveger vannet seg tilnærmet like mye i hele dypet fra overflaten til bunnen. Den såkalte "bunnbølgen" er således kun en myte. Begrepet har oppstått fordi bølgen ofte ikke observeres før den "dukker opp" inne ved land. Øyenvitner har derfor konkludert med 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.

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 kvadratroten av avstanden fra skredområdet. I en 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 en flodbølges utbredelse vil den i tillegg utsettes for refraksjon, refleksjon, interferens, fokusering, og amplifikasjon.

Amplifikasjonsfaktoren, dvs. forholdet mellom oppskyllingshøyden og overflatehevningen for innkommende bølge på dypt vann, er hovedsaklig bestemt av bølgelengden og helningen i strandsonen, eller mer presist forholdet mellom



Dokumentnr.: 20100247-00-3-R

Dato: 2010-07-06

Side: 3

Vedlegg: A

lengden på innkommende bølge og lengden på horisontalprojeksjonen av oppskyllingsskråningen under stille vannstand. Det er også stor forskjell på oppskylling langs en bratt fjordside der bølgene beveger seg langs land parallelt med strandlinja og i fjordbunnene 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 medføre store svingninger i innelukkede fjorder eller innsjøer. Dette kan arte seg som en serie av innkommende bølger der den første ikke nødvendigvis er størst. Bølgebevegelsen kan vare i timevis.



Dokumentnr.: 20100247-00-3-R
Dato: 2010-07-06
Side: 1
Vedlegg: B

Vedlegg B - Konvergenstest

Innhold

1	Bølgemodellen GloBouss	2
2	Oppskyllingsmodellen MOST	2
3	Referanser	3

1 Bølgemodellen GloBouss

GloBouss er en regnemodell nylig utviklet ved UiO/NGI for flodbølger som følge av skred eller jordskjelv. Modellen er dybdemidlet (benytter langbølgelikninger) og beskriver blant annet ikke-lineære og dispersive (ikke-hydrostatiske) effekter. Modellen beskriver ikke oppskyllingsfasen (se neste avsnitt).

Ikke lineære flodbølgeomodeller kan bli instabile når bølgedalene blir så dype at fjordbunnen blir tørrlagt. Et vanlig grep er å øke vanddyppet der dette skaper problemer, slik som nær skredområdet og langs land. I beregningene våre for Storfjorden er det brukt et såkalt terskeldyp på 20 m i den delen av beregningsområdet som er mer enn ca. 4 km fra skredområdet. Det vil si at dyp grunnere enn denne verdien er satt til 20 m. I tillegg er det utenfor Åknes satt en terskelverdi på 300 m med en lineært avtagende verdi til 20 m fire kilometer unna, men fortsatt er det kun dyp grunnere enn terskelverdien på det aktuelle stedet som er korrigert.

Til tross for bruk av terskeldyp som er beskrevet over, vil de ikke-lineære leddene i modellen kunne gi instabile løsninger når modellen kjøres over lengre tid (reell tid) som er nødvendig for å følge bølgene helt ut til Sula. Dette gjelder særlig de største scenarioene fra Åknes. Bølge modellen er derfor kjørt uten å ta hensyn til ikke-lineariteter (kun dispersive effekter). Numeriske tester viser igjen at dette har lite å si på det overordnede resultatet siden ikke-lineære effekter ikke er avgjørende for denne delen av beregningene. NGI (2008) viser også at i genereringsfasen er dispersjonen mye viktigere enn ikke-lineære effekter. For mer informasjon om modellen henviser vi til Løvholt og Pedersen (2008). Beregningene i åpent farvann (propageringsfasen) er gjort med en romlig oppløsning på 100 m. Se for øvrig konvergenstest i Vedlegg C.

2 Oppskyllingsmodellen MOST

MOST er modellen som er brukt for å beregne bølgenes bevegelse innover land. Inngangsdataene fra MOST er partikkelhastigheten og overflatehevningen fra simuleringene med GloBouss. I tillegg må data for sjødyb og landhøyde for beregningsområdet til MOST være gitt i forskjellige oppløsninger fra 5 m til 40 m siden MOST må løse oppskyllingen i tre gitternivåer. Hastighetene og overflatehevningen er lagret for hele simuleringer med GloBouss. MOST leser inn en initialbetingelse fra GloBouss, samt hastigheter og overflatehevning på randa av sitt beregningsområde gjennom en hel beregning.

De opprinnelige dybdataene og data for land er gitt i UTM 32. Siden MOST kun kan regne i geografiske koordinater, blir inngangsdataene projisert fra

UTM 32 til geografiske koordinater. Mer informasjon om modellen finnes i Titov og Gonzalez (1997).

Modelloppsettet (GloBouss og MOST) er grundig testet og sammenliknet med modellforsøkene ved Kyst- og Havne Laboratoriet (KHL) ved SINTEF. Resultatene er oppsummert i NGI (2010), mens laboratorieforsøkene med fjordmodellen ved KHL er beskrevet i SINTEF (2008).

3 Referanser

NGI (2010). 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.

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://www.math.uio.no/eprint/appl_math/2008/appl_2008.html

SINTEF (2008). Notat – rasmodell, dated 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



Dokumentnr.: 20100247-00-3-R
Dato: 2010-07-06
Side: 1
Vedlegg: C

Vedlegg C - Konvergenstest

Innhold

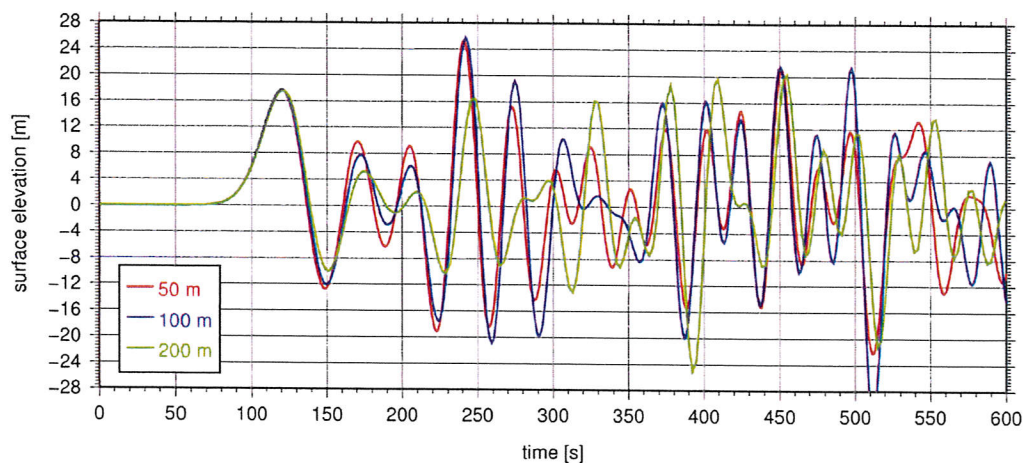
1 Konvergenstest for kontroll av nøyaktighet

2

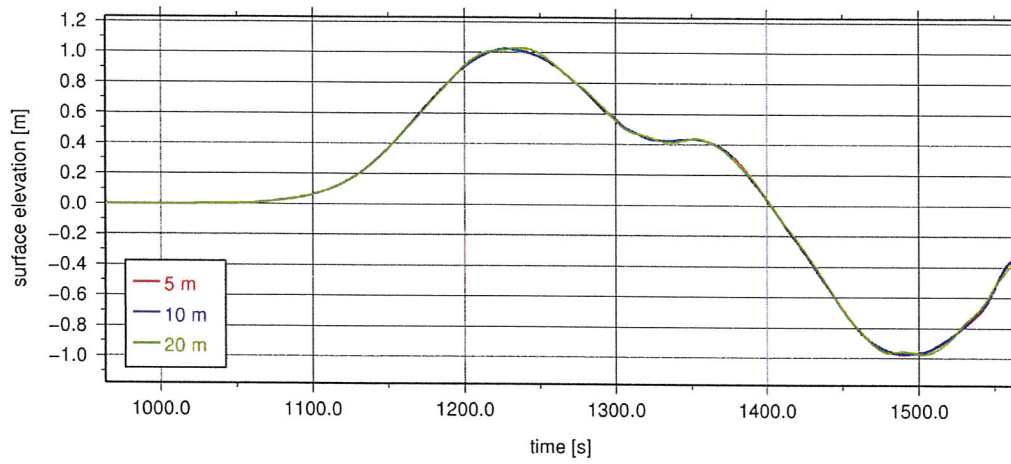
1 Konvergenstest for kontroll av nøyaktighet

Bølgelikningene løses numerisk ved at hele beregningsområdet deles opp i et finmasket nett eller celler, deretter beregnes bølgehøyde og strømhastighet i hver enkelt celle. Ved å sammenlikne beregninger med ulik maskevidde kan vi måle nøyaktigheten til beregningene og den såkalte konvergensen til metoden. Konvergens oppnås dersom beregningene går mot den samme løsningen for finere og finere nett. I Figur C1 har vi presentert tidsserier fra GloBouss (bølge modellen) i et punkt med 280 m dyp 5 km sør for Åknes (Sunnylvsfjorden) fra simuleringer med forskjellig maskevidde. Resultatene er vist for scenario 1C og avdekker en meget god konvergens for ledende bølge, mens det for de påfølgende bølgene er en divergens spesielt med tanke på 200 m løsningen. Mindre forskjeller er det mellom 50 m og 100 m. For ledende bølge er forskjellen mindre enn 1 %. I alle våre beregninger er det den ledende bølgen som gir den største oppskyllingen ved Sula til tross for at tidsserier som den under (Figur C1) kan vise høyere bølger etter den ledende. De(n) første bølgetoppen(e) er tilnærmet plane bølger, mens de påfølgende oppstår som følge av refleksjoner fra fjordsidene og består av et kaotisk mønster av bølger som beveger seg delvis på tvers av fjorden. Konvergensen for oppskyllingsmodellen, MOST, er vist for et punkt med ca.5 m dyp utenfor Kvasnes, Figur C2. Resultatene her viser en meget god konvergens. Det er verdt å merke seg at det er noe større utfordring med konvergens når bølgene beveger seg inn over land, men numeriske tester fra andre steder i fjorden viser at en maskevidde i oppskyllingsberegningene på mellom 5 og 10 m er tilstrekkelig der også. I beregningene er det anvendt en maskevidde på 100 m for GloBouss og 5 m (det fineste nettet, "A-nettet") for MOST.

Konklusjonen er at vi har brukt konvergente løsninger, både for bølge- og oppskyllingsberegningene.



Figur C1. Konvergenstest av GloBouss i et punkt ca. 5 km sør for Åknes for scenario 1C. Vanndypet her er ca. 280 m.



Figur C2. Konvergenstest av MOST modellen utenfor Kvasnes for scenario 1C. Vanddypet er ca. 5 m.

Kontroll- og referanseside/ Review and reference page



Dokumentinformasjon/Document information					
Dokumenttittel/Document title Beregning av oppskylling ved Kvasnes, Vegsund og Solevågen			Dokument nr./Document No. 20100247-00-3-R		
Dokumenttype/Type of document		Distribusjon/Distribution		Dato/Date	
<input checked="" type="checkbox"/> Rapport/Report <input type="checkbox"/> Teknisk notat/Technical Note		<input type="checkbox"/> Fri/Unlimited <input checked="" type="checkbox"/> Begrenset/Limited <input type="checkbox"/> Ingen/None		2010-07-06 Rev.nr./Rev.No. 0	
Oppdragsgiver/Client Sula kommune					
Emneord/Keywords Flodbølge, oppskylling, modellering, skred, Åknes					
Stedfesting/Geographical information					
Land, fylke/Country, County Møre og Romsdal			Havområde/Offshore area		
Kommune/Municipality Sula			Feltnavn/Field name		
Sted/Location Kvasnes, Vegsund, Solevågen			Sted/Location		
Kartblad/Map 1219-IV			Felt, blokknr./Field, Block No.		
UTM-koordinater/UTM-coordinates 6924000N, 362500E					
Dokumentkontroll/Document control					
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev./Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll/ Self review av/by:	Sidemanns- kontroll/ Colleague review av/by:	Uavhengig kontroll/ Independent review av/by:	Tverrfaglig kontroll/ Inter- disciplinary review av/by:
0	Originaldokument	SGL AS	ACH		
Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release		Dato/Date		Sign. Prosjektleder/Project Manager Anders S. Glimsdal (for S. GLIMSDAL)	

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen geofagene. Vi utvikler optimale løsninger for samfunnet, og tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg.

Vi arbeider i følgende markeder: olje, gass og energi, bygg, anlegg og samferdsel, naturskade og miljøteknologi. NGI er en privat stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskap i Houston, Texas, USA.

NGI ble utnevnt til "Senter for fremragende forskning" (SFF) i 2002 og leder "International Centre for Geohazards" (ICG).

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting in 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 oil, gas and energy, building and construction, transportation, natural hazards and environment sectors. NGI is a private foundation with office and laboratory in Oslo, branch office in Trondheim and daughter company in Houston, Texas, USA.

NGI was awarded Centre of Excellence status in 2002 and leads the International Centre for Geohazards (ICG).

www.ngi.no



Hovedkontor/Main office
PO Box 3930 Ullevål Stadion
NO-0806 Oslo
Norway

Besøksadresse/Street address:
Sognsveien 72, NO-0855 Oslo

Avd Trondheim/Trondheim office:
PO Box 1230 Pirsenteret
NO-7462 Trondheim
Norway

Besøksadresse/Street address:
Pirsenteret, Havnegata 9, NO-7010 Trondheim

T: (+47) 22 02 30 00
F: (+47) 22 23 04 48

ngi@ngi.no
www.ngi.no

Kontonr 5096 05 01281/IBAN NO26 5096 0501 281
Org. nr./Company No.: 958 254 318 MVA

BSI EN ISO 9001
Sertifisert av/Certified by BSI, Reg. No. FS 32989