



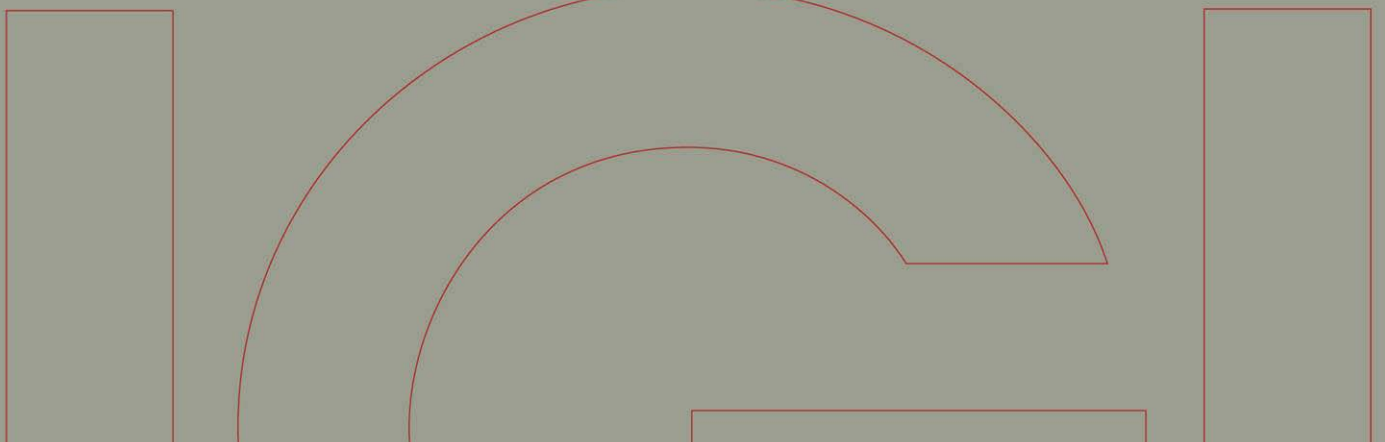
Rapport / Report

Flodbølge fra Åkneset - innvirkning på veier og fergekaier i Storfjorden, Møre

Generell orientering samt
beregning av oppskyllingshøyder
og bølgekrefter på Ørsneset
fergekai

20071856-1

15. februar 2008



Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentsiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere dette før bruk av 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 NGL.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this before using 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 NGL.



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

Prosjekt

Prosjekt: Flodbølge fra Åkneset - innvirkning på veier og fergekaier i Storfjorden, Møre
Rapportnummer: 20071856-1
Rapporttittel: Generell orientering samt beregning av oppskyllingshøyder og bølgekrefter på Ørsneset fergekai
Dato: 15. februar 2008

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Statens vegvesen Region midt
Oppdragsgivers kontaktperson: Terje Lindstad
Kontraktreferanse: Avtaleskjema datert 21.12-07

For NGI

Prosjektleder: Carl Bonnevie Harbitz
Rapport utarbeidet av: Carl Bonnevie Harbitz, Sylfest Glimsdal

Sammendrag

På oppdrag fra Statens Vegvesen Region midt har NGI gitt en generell orientering om flodbølgers innvirkning på veier, fergekaier, landområder med mer, samt anslått oppskyllingshøyder og bølgekrefter for flodbølger mot den planlagte fergekaia på Ørsneset.

Rapport nr.: 20071856-1
Dato: 2008-02-22
Rev.:
Rev. dato:
Side: 4

Beregningene for Ørsneset viser at oppskyllingshøyden ikke vil overstige 2 m. Partikkelhastigheten vi har beregnet omkring fergekaia vil være av størrelsesorden 1 m/s. Denne hastigheten vil øke ytterligere innover land i forbindelse med oppskyllingen. Hastigheter knyttet til tilbakestrømmingen av vannet kan også være større.

Vi anbefaler at horisontalkreftene på hver pilar beregnes ut fra formelen

$$F = 3\rho d u^2 (h+a) \left(\frac{l+a+s}{h+a} \right) \quad [N]$$

der

ρ	\approx	1000 kg/m ³ , vannets tetthet
d	=	pilarens diameter [m]
$u^2(h+a)$	=	transport av bevegelsesmengde [m ³ /s ²], jfr. Figur 4.5.
h	=	uforstyrret vanddyb [m] (dyp ved likevektsnivå før bølgen ankommer)
a	=	overflatehevning [m], anbefalt verdi 2 m
l	=	pilarens lengde fra bunnen til uforstyrret vanddyb [m]
s	=	eventuelt tillegg for flo sjø [m]

Retningen på horisontalkreftene vil variere mens flodbølgen skyller inn og ut igjen. De største horisontalkreftene kan oppstå under vannets tilbaketrekning. Kreftene langsmed pilarene kan mest sannsynlig ignoreres.

Resultatene er basert på dagens kunnskap om flodbølgene generert av et skred ved Åkneset med et volum på 35 millioner m³. For sannsynligheter for skred fra Åkneset henvises til Åknes/Tafjord-prosjektet.

Innhold



1	Innledning	6
2	Generell orientering	7
3	Kort beskrivelse av Storfjorden og Ørsneset fergekai	14
4	Bølgeberegninger	15
	4.1 Om regnemodellene	15
	4.2 Om beregningsområdet	16
	4.3 Resultater	17
5	Referanser	22

Rapport nr.: 20071856-1
Dato: 2008-02-15
Rev.: 0
Rev. dato:
Side: 5

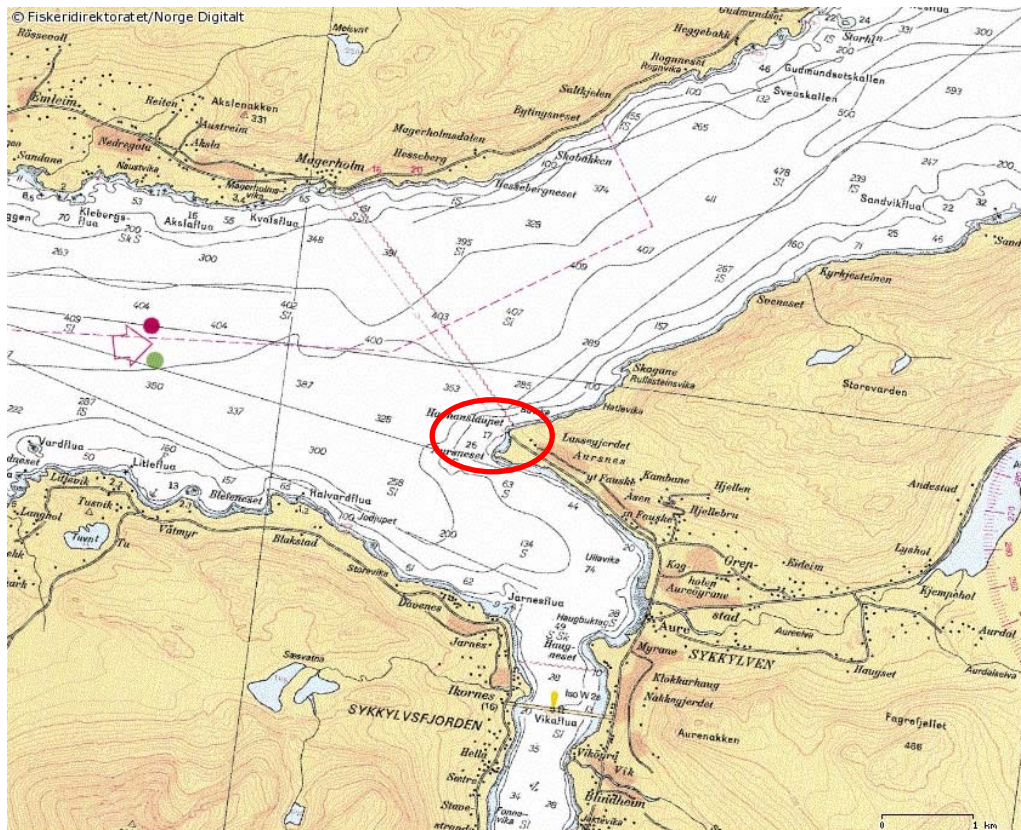
Vedlegg A	Om flodbølger generert av fjellskred
Vedlegg B	Notat fra Statens Vegvesen
Vedlegg C	Statens Vegvesen: Foreløpig situasjonsplan og oversiktstegning for ny Ørsneset fergekai

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

Som en del av Åknes/Tafjord-prosjektet har NGI (2005, 2008) beregnet flodbølgene som følge av mulige fjellskred ved Åkneset i Sunnlyvsfjorden, Stranda kommune. Det er blant annet funnet at flodbølgene generert av et skred ved Åkneset med et volum på 35 millioner m³ vil forplante seg utover i Storfjorden og inn mot Ørsneset fergekai, Figur 1.1.

Rapport nr.: 20071856-1
Dato: 2008-02-15
Rev.: 0
Rev. dato:
Side: 6



Figur 1.1: Storfjorden og Ørsneset.

Som en følge av bølgeberegningene har Statens vegvesen Region midt gitt NGI et tredelt oppdrag:

1. Gi en generell orientering om flodbølgers innvirkning på veier, fergekaier, landområder med mer (se kapittel 2).
2. Legge fram resultatene fra del 1 på et orienteringsmøte på Vegvesenets distriktskontor i Ålesund (Olsvika) 28. januar 2008. Her deltok representanter fra Statens Vegvesen, Sykkylven kommune, Møre og Romsdal Fylkeskommune, samt Carl B. Harbitz og Sylfest Glimsdal fra NGI.
3. Utføre en detaljstudie av oppskyllingshøyder og bølgekrefter på den planlagte fergekaia på Ørsneset (se kapittel 4). Som en del av dette ble Ørsneset besiktiget av Carl B. Harbitz og Sylfest Glimsdal, NGI, 28. januar 2008.

Detaljvurderingen for Ørsneset er basert på dagens kunnskap om flodbølgene fra et skred ved Åkneset med et volum på 35 millioner m³. For sannsynligheter for skred fra Åkneset henvises til Åknes/Tafjord-prosjektet.

I teksten nedenfor betyr overflatehevning 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, mens oppskyllingshøyden er den maksimale vertikale høyden bølgen når opp på land over stille vannstanden. En generell beskrivelse av flodbølger generert av fjellskred er ellers gitt vedlegg A.

Rapport nr.: 20071856-1
Dato: 2008-02-15
Rev.: 0
Rev. dato:
Side: 7

2 Generell orientering

Statens vegvesen Region midt har i sitt notat datert 2007-11-13 fremlagt ni spørsmål om flodbølgers innvirkning på veier, fergekaier, landområder med mer (se vedlegg B). Spørsmålene er gjengitt i forkortet form i tittelen på hvert av avsnittene under. Deretter er det i hvert avsnitt forsøkt å gi orienterende svar med tanke på Storfjorden generelt. Forholdene omkring Ørsneset er behandlet spesielt i kapitlene 3 og 4.

2.1 Hvor langt fra land kan vi regne det for å være trygt for båter som ligger ute på fjorden?

Båtene vil stort sett ligge trygt så lenge bølgen ikke bryter og så lenge båten ikke dras med inn på så grunt vann at den støter i bunnen. Det finnes en rekke eksempler på at selv større båter kan fraktes langt inn over land, se

Figur 2.1. Noe forenklet kan vi anslå at bølgen bryter når overflatehevningen blir for stor i forhold til vanddyppet eller når bølgefronten blir for bratt/vertikal. Samtidig vil forflytningen tilsvare produktet av partikkelhastigheten (strømmen som flodbølgen setter opp) multiplisert med bølgeperioden. Siden både dyp, bølgeform, overflatehevning og partikkelhastighet varierer fra sted til sted vil det innebære altfor store usikkerheter å angi trygge områder med de foreløpige resultatene vi har i dag. Oppdaterte resultater vil kunne avdekke områder med bølger som er høye og krappe nok til å representere en fare for båtene også der de ikke nødvendigvis vil støte mot bunnen. Vi vet imidlertid at bølgehøyden øker og bølgelengden avtar inn mot grunnere vann, hvilket betyr at båtene er tryggere jo dypere vann de ligger på.



Rapport nr.: 20071856-1
Dato: 2008-02-15
Rev.: 0
Rev. dato:
Side: 8

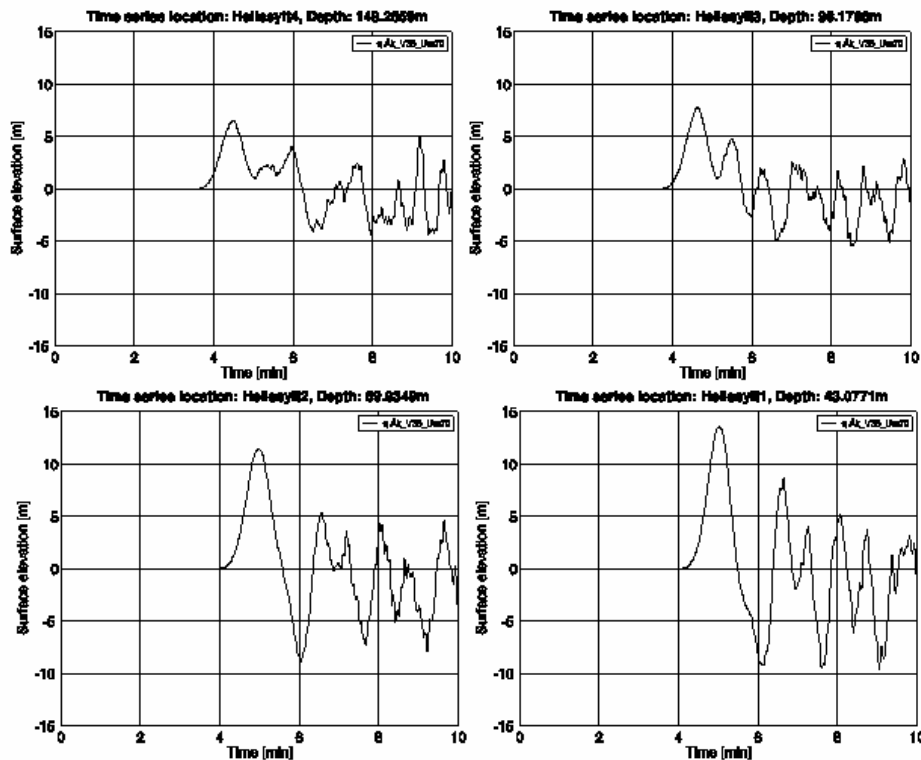
Figur 2.1: Båt som er fraktet opp på land under flodbølgen i Thailand i desember 2004.

2.2 Tolkning av figur i NGI-rapport med tanke på bølgeperiode

Figur 26-28 i nevnte NGI rapport 20031100-2 (datert 4 november 2005) er tolket riktig (Se Figur 2.2). Det tar om lag 30 sekunder fra vannet begynner å stige til første bølge har nådd sitt høyeste nivå. Deretter varierer det med formen på bølgen når den når sitt laveste nivå, men bølgeperioden er anslagsvis omkring 2 minutter. Dette gjelder som dere antar for størstedelen av Storfjorden.

2.3 Er dette også varigheten for oppskyllingshøyde og minimumsnivå?

Tiden fra normalnivå til maksimal oppskyllingshøyde er også 30 sekunder. Inne på land vil vannet bruke lenger tid på å trekke seg tilbake (spesielt om terrenget er slakt), dvs. det tar normalt mer enn 30 sekunder før vannet har rent tilbake. Ute i opprinnelig vått område (eller opp langs en bratt strand uten hindringer) vil minimumsnivå (dvs. maksimal tilbaketrekning) nås etter $\frac{3}{4}$ bølgeperiode for en harmonisk ("pent formet") bølge. Bølgene her er imidlertid noe irregulære, så tiden for tilbaketrekning og ned til minimumsnivå vil variere fra sted til sted avhengig av bølgeformen.



Rapport nr.: 20071856-1
 Dato: 2008-02-15
 Rev.: 0
 Rev. dato:
 Side: 9

Figur 2.2: Overflatehevingen som funksjon av tid i punkter utenfor Hellesylt for scenario 2b (Volum 35 millioner m³, maksimal skedhastighet 70 m/s). Dybdene i punktene er ca 150 m, 90 m, 70 m og 40 m (fra Figur 26 i NGI rapport 20031100-2, datert 4 november 2005).

2.4 Står havoverflaten horisontalt på oppskyllingsnivået?

Havoverflaten står generelt ikke horisontalt på oppskyllingsnivået. Svært lange bølger vil oppføre seg omtrent som tidevannet, og da kan man tenke seg et tilnærmet horisontalt vannspeil. Dette vil fortsatt gjelde også for noe kortere bølger (men fortsatt lange) dersom de kommer inn mot en bratt fjellside. Dersom stranden i motsatt fall er meget slak ser man at disse lange bølgene bryter omtrent i strandlinjen, før en "tunge" skyter oppover land (se eksempel Figur 2.3 og Figur 2.4). Fortsatt kan man tenke seg et ganske horisontalt vannspeil over en kort distanse utenfor punktet der bølgen bryter. Er det mindre slakt (hvilket egentlig vil si at bølgen er lengre i forhold til lengden på oppskyllingsplanet) så vil bølger av den lengden vi kan forvente fra Åkneset (lengden varierer fra sted til sted) trolig skylle opp på land slik vi ser det for vanlige vindbølger på en strand, slik at maksimal oppskylling nås på det innerste og øverste punktet, Figur 2.5. Det blir da i noe mindre grad et horisontalt vannspeil bak fronten. For kortere bølger som kommer bak den ledende bølgen vil vannspeilet i enda mindre grad være horisontalt.



Rapport nr.: 20071856-1
 Dato: 2008-02-15
 Rev.: 0
 Rev. dato:
 Side: 10

Figur 2.3: Eksempel på brytende bølgefront for flodbølgen inn mot Krabi, Thailand i desember 2004.

2.5 Bevegelse i vannmassene, utbredelseshastighet og vannstrøm

Bølgens utbredelseshastighet ("forplantningshastighet" eller "forflytningshastighet") avhenger av dypet, se

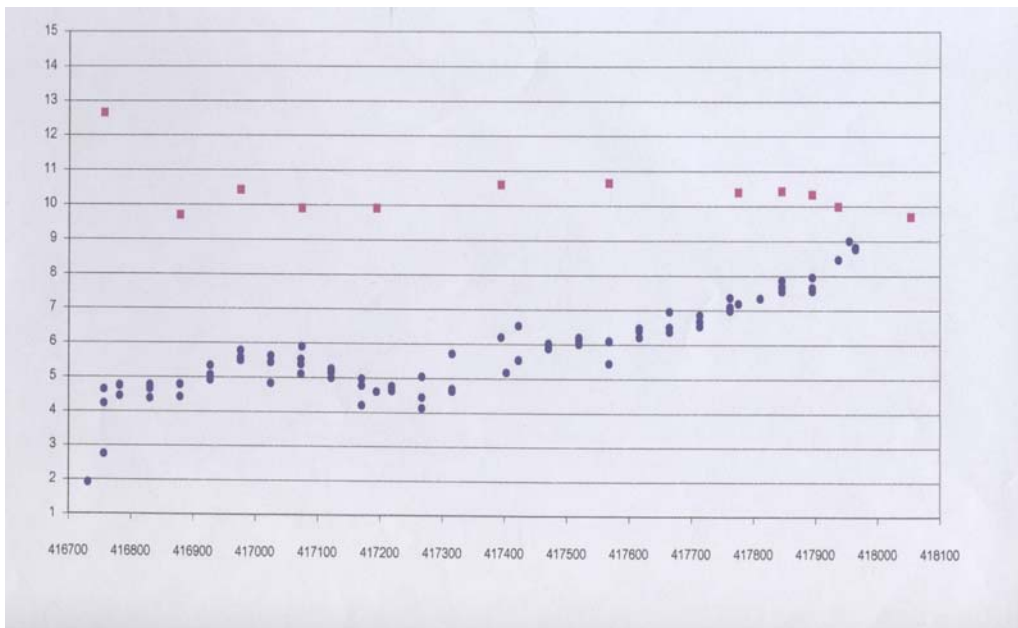
Figur 2.6. Så lenge vanddyper er vesentlig mindre enn bølgelengden og samtidig vesentlig større enn overflatehevningen, så er hastigheten gitt ved $c = \sqrt{gh}$, der g er tyngdens aksellerasjon (9.81 m/s^2) og h er uforstyrret vanddyper. Bølgen setter videre opp en tilnærmet horisontal partikkelhastighet u . Denne er tilnærmet den samme i hele vanddyper og gitt ved $u = a/h \cdot c = a\sqrt{g/h}$, der a er overflatehevningen. Innover på grunnere vann vil utbredelseshastigheten avta og partikkelhastigheten øke. Begge hastighetene vil da avhenge av dyp, bølgetype og bølgehøyde. Der landet går bratt ned i en dyp fjord vil bølgen forplante seg langs land med hastigheter som nevnt over, på samme måte som bølger som forplanter seg langsmed en kanal.

2.6 Horisontale hastigheter i bølgen når den når land

Som nevnt i avsnitt 2.5 vil dette avhenge av dyp, bølgetype og bølgehøyde og dermed variere fra sted til sted. Som eksempel kan nevnes at hastighetene inn mot land for flodbølgen i det Indiske hav i 2004 er anslått ut fra videotolkninger til 2-5 m/s. Ulike formler for beregning av bølgehastigheter gir 3-6 m/s for oppskyllingshøyder 1.6-4.4 m. På Sumatra ble hastighetene anslått til 5-16 m/s for vannhøyder opp til 8 m over bakken (Reese m.fl. 2007).

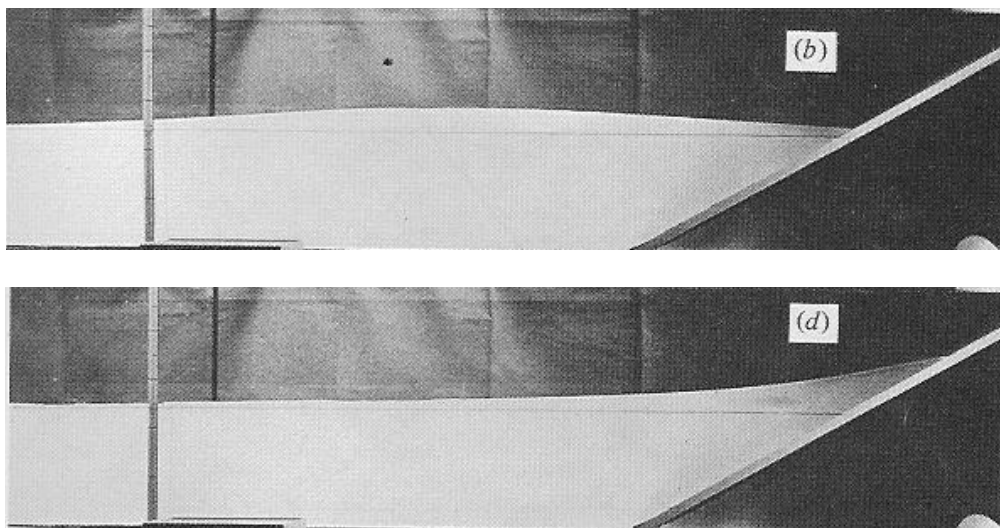
2.7 Skadepotensial

Det stemmer at strømhastigheten er avgjørende for skadepotensialet på konstruksjoner og anlegg. Mer presist er det funnet at u^2h er den beste "skadeindikatoren". Merk at for en innkommende bølge som begynner med en heving (som bølgen etter et fjellskred) er u^2h størst under vannets tilbaketreking og rettet ut fra land. Videre vil gjenstander som fraktes med vannet kunne påføre konstruksjoner en ekstra belastning.

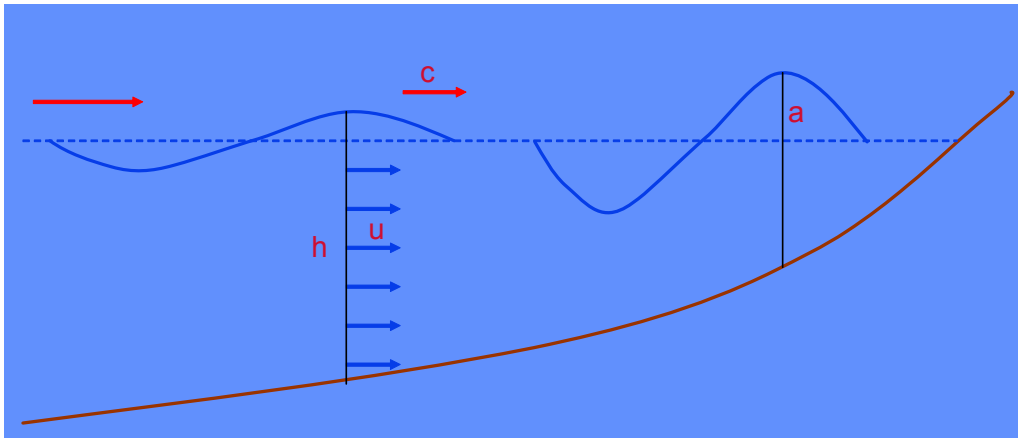


Rapport nr.: 20071856-1
 Dato: 2008-02-15
 Rev.: 0
 Rev. dato:
 Side: 11

Figur 2.4: Eksempel på oppskyllingsmønster for en relativt lang bølge inn mot en slak strand (fra flodbølgen i Bang Niang, Thailand, desember 2004, data fra Thai Dept. of Mineral Resources). Blå sirkler viser høyde over havet og røde firkanter viser observert vannhøyde innover fra strandlinjen (til venstre i figuren), alt målt i meter. Merk at bølgen her nådde sitt høyeste nivå omtrent langs strandlinjen, ikke lengst inn på land (til høyre i figuren).



Figur 2.5: Eksempel på en relativt sett kortere bølge som skyller opp på land, slik at maksimal oppskylling nås på det innerste og øverste punktet. Fra laboratorieforsøk utført av Pedersen og Gjevik (1983).



Rapport nr.: 20071856-1
 Dato: 2008-02-15
 Rev.: 0
 Rev. dato:
 Side: 12

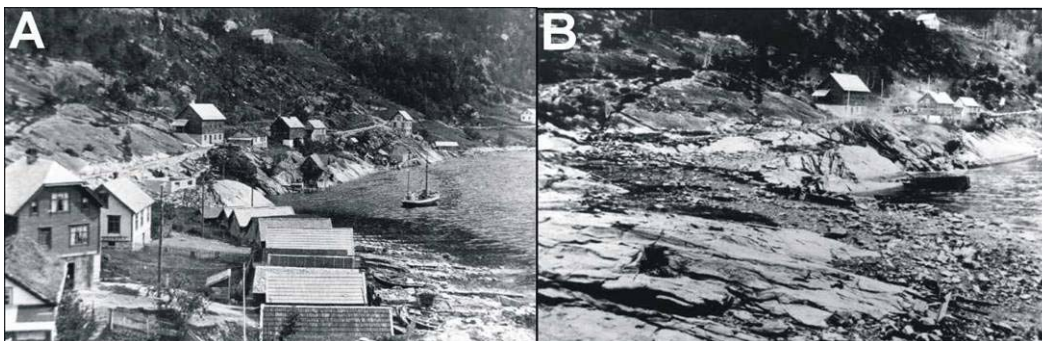
Figur 2.6: Utbredeshastighet c og partikkelhastighet u for en bølge som er mye lengre enn vanddypet h .

2.8 Hvor langt under normal vannstand kan vannet trekke seg under tilbaketrekning?

Vannet kan trekke seg ned til et nivå som tilsvarer bølgedalen i innkommende bølge.

2.9 Hva har vært vanlige skader på kaier, andre konstruksjoner og landareal ved lignende flodbølger?

Dette avhenger selvsagt av egenskapene til innkommende bølge og de lokale dybde- og terrengforhold, men også type og design av infrastruktur. Dette gjør at det er vanskelig å overføre erfaring knyttet til sårbarhet fra andre steder. Figur 2.7 - Figur 2.9 viser imidlertid noen eksempler på skader av naust, kaier og moloer.



Figur 2.7: Tettstedet Fjóra, Norddal, før (til venstre) og etter (til høyre) flodbølgen fra Taffordskredet i 1934.



Figur 2.8: Eksempler på ødelagte kaikonstruksjoner i Nam Khem, Thailand, etter flodbølgen i desember 2004.



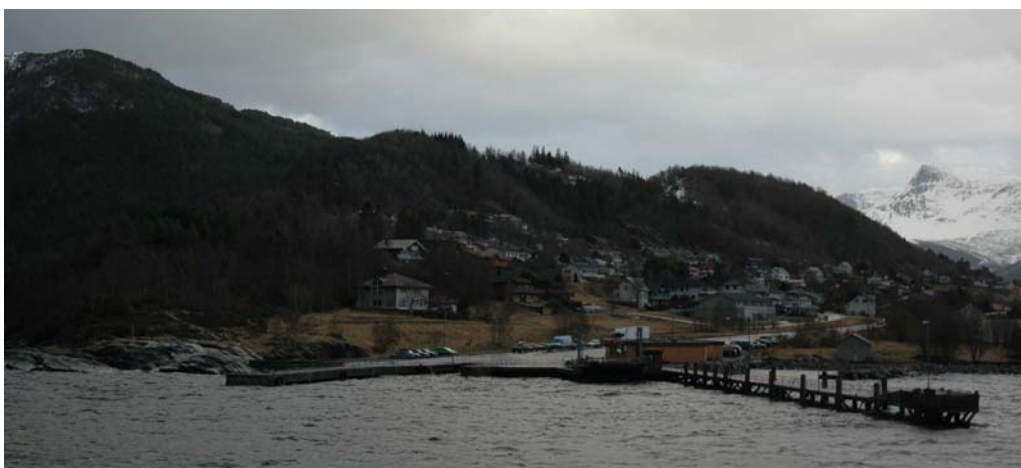
Rapport nr.: 20071856-1
Dato: 2008-02-15
Rev.: 0
Rev. dato:
Side: 14

Figur 2.9: Eksempel på ødelagt naust ved Leirpoll (til venstre, oppskyllingshøyde 3 m) og ødelagt molo/havnebasseng ved Indre Hatlem (til høyre, oppskyllingshøyde 4 m) etter fjellskredet fra Katlenova ned i Sjørefjorden i Hyllestad i 1998.

3 Kort beskrivelse av Storfjorden og Ørsneset fergekai

Ørsneset ligger i den ytre delen av Storfjorden på Møre. Bredden på fjorden er her drøyt 3 km, og dypet midtfjords er over 400 m. Avstanden langs fjorden fra Åkneset til Ørsneset er omtrent 40 km. En flodbølge vil bruke ca. 15 minutter på denne distansen.

Statens Vegvesen Region midt planlegger ny fergekai på Ørsneset, se vedlegg C for foreløpig situasjonsplan og oversiktstegning. Kaia vil bæres av vertikale og skråstilte sirkulære pilarer og strekke seg ut til om lag 25 m dyp. Undersiden av kaidekket vil bli liggende ca. 1.8 m over middelvannstand (dvs. NN 1954, kote 0 for landkart, 1.24 m over sjøkartnull). Fotografier fra området der den nye fergekaien skal anlegges er vist i Figur 3.1 - Figur 3.3.



Figur 3.1: Ørsneset fergekai sett fra VNV. Den nye kaia skal ligge til venstre der det i dag er en brygge (gammel fergekai), mens dagens kai ligger til høyre.



Rapport nr.: 20071856-1
Dato: 2008-02-15
Rev.: 0
Rev. dato:
Side: 15

Figur 3.2: Brygge og lokalisering av ny fergekai sett fra V.



Figur 3.3: Lokalisering av ny fergekai sett innover langs brygga som vil bli fjernet.

4 Bølgeberegninger

4.1 Om regnemodellene

Beregningen av oppskyllingshøyde og partikkelhastighet (strømhastighet) ved Ørsneset fergekai for bølger fra et mulig skred fra Åkneset er gjort i to steg.

Første steg inkluderer en beregning av bølgene ut fra Åkneset og fram til området i nærheten av Ørsneset med en "enkel" beregningsmodell i to horisontale dimensjoner. Denne modellen er først basert på en antagelse om at karakteristisk

overflatehevning er mye mindre enn karakteristisk vanddyb (dvs. at bølgene er lineære). Dette er gyldig bortsett fra i genereringsområdet og i oppskyllingssonen, der det må gjøres særskilte vurderinger. Det er videre antatt at karakteristisk bølgelengde er mye større enn karakteristisk vanddyb (dvs. at bølgene er ikke-dispersive). Overflatehevningen og de dybdemidlede strømhastighetene kan da beskrives ved de lineære hydrostatisk (ikke-dispersive) likningene for bevaring av masse og bevegelsesmengde for lange bølger på grunt vann. Modellen og skredscenariet er identisk med det som til nå er anvendt ved beregning av de foreløpig gjeldende resultater for bølger generert av et mulig skred fra Åkneset, se NGI (2005, 2008).

Rapport nr.: 20071856-1
Dato: 2008-02-15
Rev.: 0
Rev. dato:
Side: 16

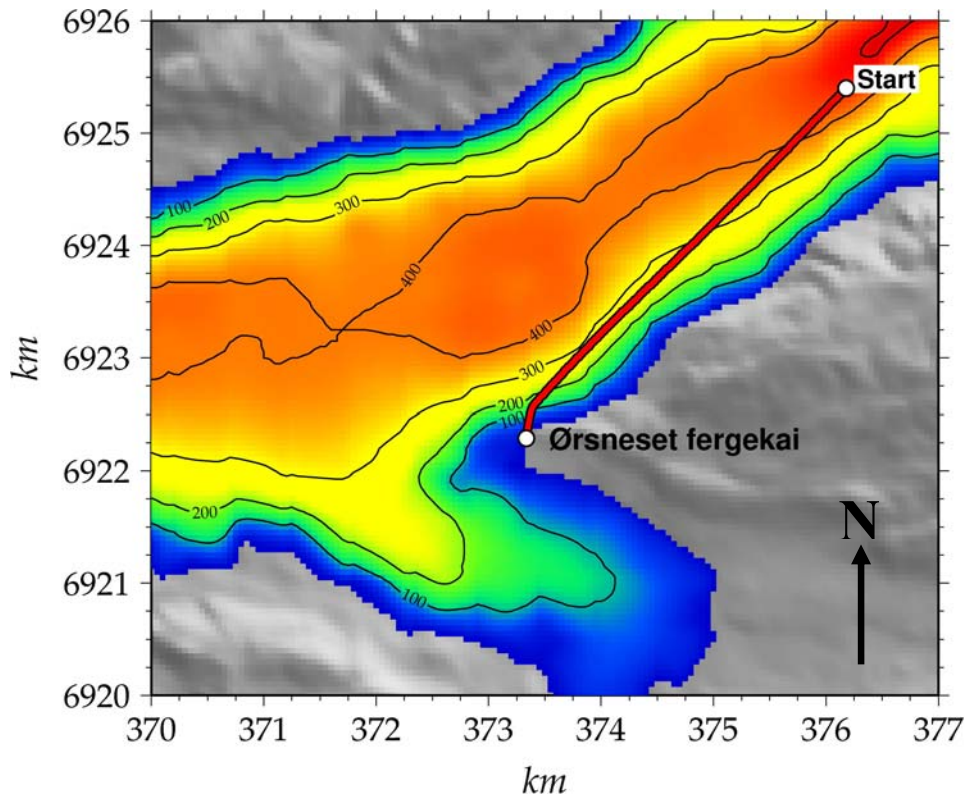
Ikke-linearitet gjør bølgefronten brattere og kan lede til brytning av bølgen, mens dispersjon medfører at bølgenes utbredeshastighet avhenger av bølgelengden. Et eksempel på dispersjon ser vi ved å kaste en stein i dypt vann. I stedet for at vi får én enkelt bølge som går ut fra der steinen treffer, får vi et bølgetog med den lengste bølgen i front, og med kortere og kortere bølger bakover.

Andre steg inkluderer estimater av oppskyllingshøyden og partikkelhastighet ved Ørsneset fergekai, dels basert på beregninger med en ”forbedret” modell som tar hensyn til nettopp ikke-linearitet og dispersjon, og dels på tidligere eksperimentelle og numeriske studier av bølge-oppskylling langs et skråplan. Beregningene med denne forbedrede modellen er utført langs et vertikalt snitt (i én horisontal dimensjon) som tilnærmet følger forplantningsretningen inn mot Ørsneset, se Figur 4.1.

4.2 Om beregningsområdet

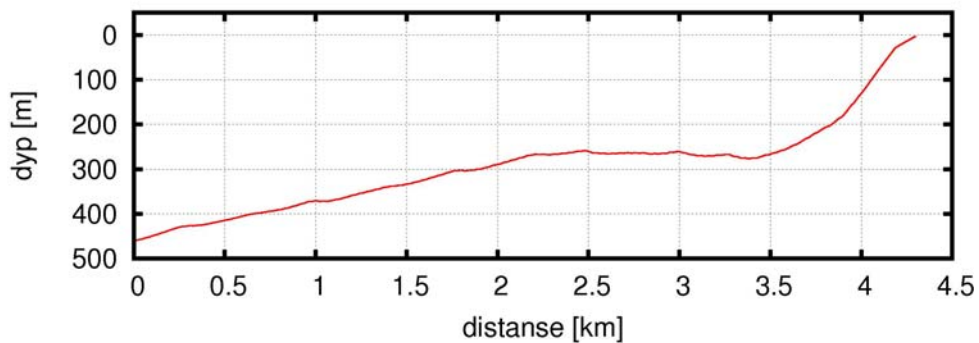
For første steg er det brukt dybde data framskaffet av NGU. Bakgrunnsdataene er Sjøkartverkets data med 50 m oppløsning for de ytre delene av Storfjorden og NGUs data med 3-6 m oppløsning for de indre delene av Storfjorden. Disse datasettene er sammenstilt og lagt over i et gitter med 50 m oppløsning som dekker både indre og ytre deler av Storfjorden. Denne oppløsningen er tilstrekkelig for første steg i beregningene. For andre steg i beregningene bruker vi en finere oppløsning. Dybdeforholdene utenfor Ørsneset er vist i Figur 4.1, mens dypet langs snittet er vist i Figur 4.2.

Oppskyllingshøyden er avhengig av blant annet helningen på sjøbunnen utenfor oppskyllingsområdet. Fra den dypere delen av fjorden og rett sørover inn mot Ørsneset fergekai er det en helning på ca. 20-30°. Langs snittet som følger flodbølgens forplantningsretning inn mot fergekaia er det ytterst en helning på ca 4°. Denne øker til ca. 26° før det flater noe ut de siste 100 m inn mot fergekaia.



Rapport nr.: 20071856-1
 Dato: 2008-02-15
 Rev.: 0
 Rev. dato:
 Side: 17

Figur 4.1: Dybdeforholdene i Storfjorden utenfor Ørsneset. Dybdekoter med ekvidistanse 100 m. Snittet som er inntegnet ligger tilnærmet langs retningen på bølger inn mot Ørsneset.



Figur 4.2: Dybdeprofil langs snittet vist i Figur 4.1.

4.3 Resultater

4.3.1 Oppskyllingshøyder og partikkelhastigheter

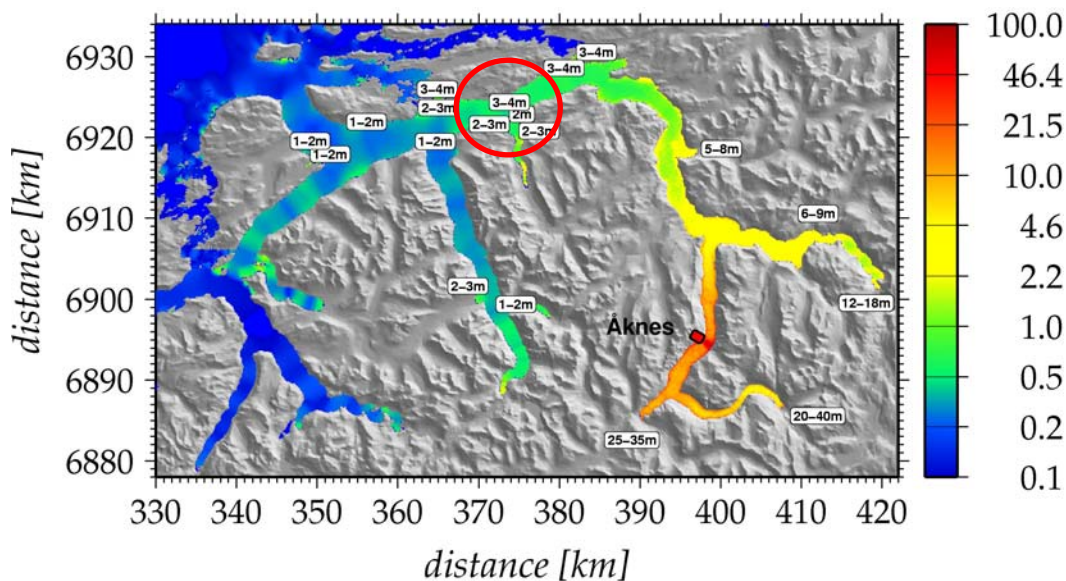
I Figur 4.3 vises den maksimale overflatehevningen fra første steg av beregningene i hele Storfjorden. Det er også inntegnet beregnede oppskyllingshøyder gjort for

Åknes-Tafjord prosjektet i både de indre og de ytre områdene. Disse beregningene viser at overflatehevningene midt i fjorden utenfor Ørsneset er på ca. 0.5 m.

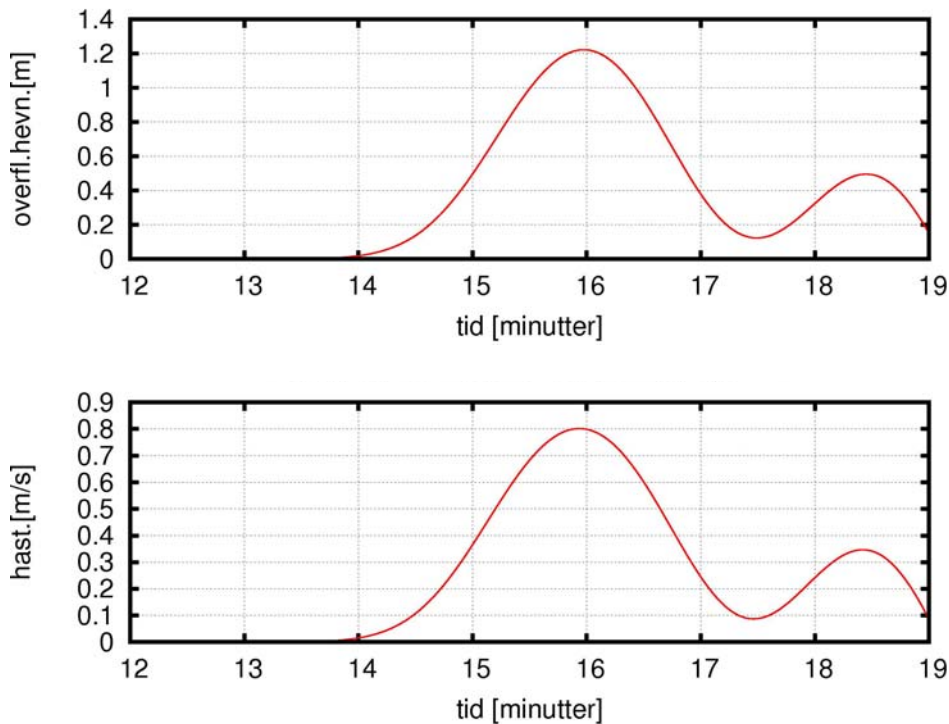
Resultatene fra beregningene videre langs snittet (Figur 4.1) er vist i Figur 4.4. Vi ser her overflatehevning og partikkelhastighet som funksjon av tiden 10 m fra strandlinjen. Overflaten heves med 1.5 m i løpet av ca. 2 min. Ut fra resultatene fra den forbedrede modellen og vurderingen av vinkelen på den skrånende bunnen vil oppskyllingshøyden ved Ørsneset ikke overstige 2 m. Figur 4.4 viser også at partikkelhastigheten vi har beregnet omkring fergekaia vil ligge i størrelsesorden 1 m/s. Denne hastigheten vil øke ytterligere innover land i forbindelse med oppskyllingen. Hastigheten er noe lavere enn de generelle estimatene beskrevet i avsnitt 2.6. Dette er naturlig da estimatene refererer til hastigheter inne på land for høyere og brytende bølger.

Rapport nr.: 20071856-1
 Dato: 2008-02-15
 Rev.: 0
 Rev. dato:
 Side: 18

Det er her forutsatt at flodbølgen får bre seg fra strandlinjen og videre innover land i løpet av oppskyllingen, selv om vannbevegelsen på opprinnelig tørt land ikke er beregnet. Dette gjør at hastigheter knyttet til tilbakestrømmingen av vannet (som kan være større) ikke er med i de numeriske hastighetsberegningene, se neste avsnitt. Dersom bølgen ikke blir så høy at vannet strømmer innover land, så er våre anslag på den konservative siden.



Figur 4.3: Maksimal overflatehevning (i meter) for hele Storfjorden med beregnede oppskyllingshøyder markert i hvite bokser. Skredområdet markert med rød firkant og Ørsneset markert med rød ring.



Rapport nr.: 20071856-1
 Dato: 2008-02-15
 Rev.: 0
 Rev. dato:
 Side: 19

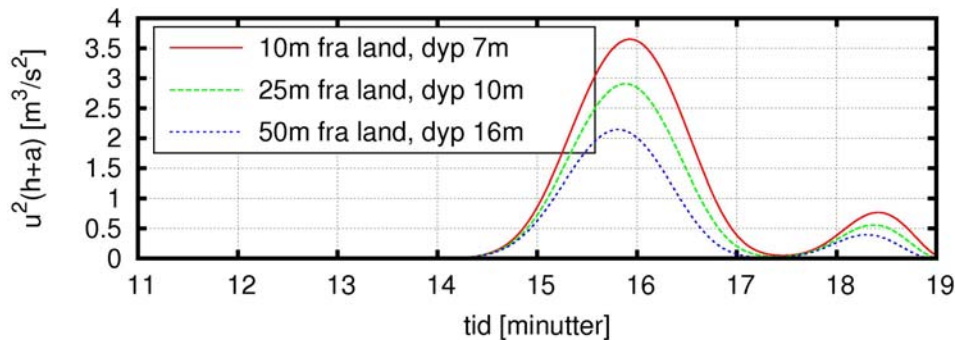
Figur 4.4: Overflatehevning (øverst) og partikkelhastighet (nederst) som følge av flodbølgen på 7 m dyp eller 10 m fra strandlinjen ved lokalisering av ny fergekai.

4.3.2 Transport av bevegelsesmengde og bølgekrefter

Krefter som følge av flodbølger er et tema som ikke er fullt ut forstått, og retningslinjene er utilstrekkelige. Dessuten vil en flodbølge vise store lokale variasjoner i et komplisert terreng med bygninger, konstruksjoner og annen infrastruktur. Dermed kan også kreftene variere sterkt både på langs og på tvers av strandlinjen. Flodbølger er også en relativt sjelden hendelse, og det er derfor begrenset med erfaringsmateriale å støtte seg til. Erfaring fra andre regioner kan overføres kun i begrenset omfang ettersom bosetningsmønster, bebyggelse, design av konstruksjoner, osv. varierer mye over tid og fra sted til sted.

Det er imidlertid kjent at transport av bevegelsesmengde, u^2h eller mer presist $u^2(h+a)$ er den beste ”skadeindikatoren”. Dette skyldes at så lenge de viskøse kreftene som består av formdrag og friksjon langs legemets overflate dominerer (og ikke bølgedrag som følge av bølgedannelse bak konstruksjonen eller treghetskrefter som følge av at vannmasser må fortrenses), så er også disse proporsjonale med $u^2(h+a)$. Størrelsen $u^2(h+a)$ i ulike avstander fra land med tilhørende dyp ved lokalisering av ny fergekai er vist i Figur 4.5. Vi anbefaler å benytte de maksimale verdiene for de tre kurvene for den første innkommende bølgen som får bre seg fra strandlinjen og videre innover land i løpet av oppskyllingen.

Basert på Yeh (2006) kan man utlede at en 4 m høy flodbølge 10 m fra land for en sjøbunns helning på 10^0 gir $u^2(h+a) = 3 \text{ m}^3/\text{s}^2$, hvilket støtter opp under våre resultater.



Rapport nr.: 20071856-1
 Dato: 2008-02-15
 Rev.: 0
 Rev. dato:
 Side: 20

Figur 4.5: Transport av bevegelsesmengde $u^2(h+a)$ i ulike avstander fra land med tilhørende dyp som følger av flodbølgen ved lokalisering av ny fergekai.

Horisontalkraften fra den første innkommende bølgen på en stasjonær vertikal pilar som strekker seg opp gjennom hele vanddyppet vil være tilnærmet uniform opp gjennom hele vanddyppet (fordi bølgen er mye lengre enn vanddyppet) og samlet være gitt ved

$$F = \frac{1}{2} \rho c_D d u^2 (h+a) \left(\frac{l+a+s}{h+a} \right) \quad [N]$$

der

- ρ \approx 1000 kg/m³, vannets tetthet
- c_D = empirisk drag-koeffisient for pilar, en konservativ verdi 2 er anbefalt for sirkulær pilar
- d = pilarens diameter [m]
- $u^2(h+a)$ = transport av bevegelsesmengde [m³/s²], jfr. Figur 4.5
- h = uforstyrret vanddyp [m] (dyp ved likevektsnivå før bølgen ankommer)
- a = overflatehevning [m], anbefalt verdi 2 m (se avsnitt 4.3.1)
- l = pilarens lengde fra bunnen til uforstyrret vanddyp [m]
- s = eventuelt tillegg for flo sjø [m]

Horisontalkraften er rettet langs vannpartiklenes bevegelsesretning, dvs. innover mot land så lenge vannet stiger. Krefte langsmed pilarene kan mest sannsynlig ignoreres.

Som nevnt over er det imidlertid kjent at $u^2(h+a)$ er størst under vannets tilbaketrekning og rettet ut fra land (Carrier m.fl. 2003). Ved å kombinere disse opplysningene med et arbeid av Kânoğlu og Synolakis (2006) kan det utledes at krefte under tilbaketrekning kan bli opptil 3 ganger så store under vannets tilbaketrekning som under oppskyllingen. Krefte er da rettet utover.

Vi kan ikke utelukke at oppdaterte flodbølgeanalyser vil vise krappere og muligens brytende innkommende bølger, hvilket igjen kan gi større transport av bevegelsesmengde og dermed større krefter. Nærliggende strukturer som kanalisere vannet kan også øke transport av bevegelsesmengde. Beregning av krefter fra

brytende bølger er stort sett basert på eksperimentelle resultater og viser bl.a. at kraften er klart størst når fronten treffer. Disse mulige økte kreftene er imidlertid delvis tatt hensyn til ved et konservativt valg av verdien på drag-koeffisienten ($c_D=2$).

Om en oppsummerer alt dette og kombinerer med formelen over innsatt de anbefalte verdier, anbefaler vi til slutt at horisontalkreftene på hver pilar beregnes ut fra

$$F = 3\rho d u^2 (h+a) \left(\frac{l+a+s}{h+a} \right) \quad [N]$$

Retningen på horisontalkreftene vil variere mens flodbølgen skyller inn og ut igjen. De største kreftene kan oppstå under vannets tilbaketrekning. Da vannet ikke vil trekke seg tilbake nøyaktig samme retning som flodbølgen kom inn (på grunn av skrått innkommende bølge), så anbefales det i beregningene å benytte hele lengden l fra bunnen til overflaten også for en skråttstilt pilar (ikke bare lengden av pilarens komponent i et plan normalt forplantningsretningen for innkommende flodbølge).

Flodbølgene vil naturligvis også føre til et økt hydrostatisk trykk og en ekstra vertikal oppdriftskraft

$$B = \rho \Delta V$$

for det volum ΔV av kaia som blir neddykket som en følge av flodbølgen.

Vannet stiger såpass langsomt for en lang flodbølge at et vertikalt drag som følge av at vannet strømmer opp gjennom kai-konstruksjonen trolig vil være av liten betydning.

Drivgoods representerer en ytterligere fare ved oppskylling. Det skal ikke spesielt store bølger til for å frakte store gjenstander. Det finnes eksempler på at en 3 m høy flodbølge har flyttet kjøretøy mer enn 100 m innover. Kunnskapen om strømning med drivgoods er liten, men US Federal Emergency Management Agency anbefaler ganske enkelt å beregne kreftene ved $F = mV/t$, der m er massen til gjenstanden som treffer konstruksjonen, V er gjenstandens hastighet og t er tiden sammentreffet tar. Det gis også anbefalinger for m , V og t , der den siste avhenger av hva konstruksjonen er laget av (trolig godt under 1 s). Estimaten blir konservative for store gjenstander som beveger seg saktere enn vannpartiklene.

Det vil for alle forhold være fordelaktig å utforme hele kai-konstruksjonen slik at flodbølgen lettest mulig kan strømme gjennom denne både horisontalt og vertikalt. På denne måten vil kaia oppta minst krefter fra flodbølgen. Videre blir amplifikasjonen av bølgen mindre jo brattere bunner er, skjønt dette er av minimal betydning for såpass lange bølger.

5 Referanser

- Carrier, G.F., Wu, T.T. og Yeh, H. (2003). Tsunami Runup and Drawdown on a Plane Beach. *J. Fluid Mech.* 475, 79-99.
- Kânoğlu, U. og Synolakis, C.E. (2006). Initial value problem solution of nonlinear shallow water-wave equations. *Phys. Res. Lett.*, 97, 148-501.
- NGI (2005). Innledende numeriske analyser av flodbølger som følge av mulige skred fra Åkneset. NGI rapport 20031100-2.
- 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 (in final prep.).
- Pedersen, G. og Gjevik, B. (1983). Run-up of solitary waves. *J. Fluid Mech.* 135, 283-299.
- Reese, S., Cousins, W.J., Power, W.L., Palmer, N.G., Tejakusuma, I.G., and Nugrahadi, S. (2007). Tsunami vulnerability of buildings and people in South Java – field observations after the July 2006 Java tsunami. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 573-589, 2007.
- Yeh, H. (2006). Tsunami Forces in the Runup Zone. In: *Caribbean Tsunami Hazard – Proceedings of the NSF Caribbean Tsunami Workshop*. Eds: Mercado-Irizarry and Liu, P.L.-F. World Scientific Publishing Co. Pte.Ltd. ISBN 981-256-535-3.

Rapport nr.: 20071856-1
Dato: 2008-02-15
Rev.: 0
Rev. dato:
Side: 22

Vedlegg A - Om flodbølger generert av fjellskred

INNHold

A1 Om flodbølger generert av fjellskred	2
--	----------

A1 Om flodbølger generert av fjellskred

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

Rapport nr.: 20071856-
1
Dato: 2008-02-15
Rev.:
Rev. dato:
Side: A2

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) bølgeoppskylning i strandsonen.

Bølgens karakteristika avhenger av skredets volum, form og hastighet, så vel som av vanddypet. Karakteristisk overflatehevning vil normalt være mye mindre enn vanddypet i størstedelen av området. Dette er innfridd også i dette konkrete tilfellet, og fører til at enklere, lineære likninger er gyldige.

Bølgene klassifiseres som lange bølger dersom størsteparten av den energi som overføres fra skred- til vannbevegelse fordeles på bølgelengder mye større enn karakteristisk vanddyp. Ut fra dette følger at de vertikale variasjoner i horisontal-hastigheten er små, og at trykket er tilnærmet hydrostatisk.

Sagt med andre ord er bevegelsen på ethvert sted tilnærmet den samme i hele vanddypet. 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 (fordi hastigheten avtar) og høyere (fordi energifluksen må være konstant) på grunnere vann inn mot land.

Under utbredelsen bort fra skredområdet vil bølgens form endres avhengig av dempning og bunntopografi. Først 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 tillegg utsettes bølgen for refraksjon, diffraksjon, 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 lengden på innkommende bølge og lengden på horisontalprojeksjonen av oppskyllingsskråningen under stille vannstand.

Amplifikasjonsfaktoren for bølger mot en skrånende strand vil normalt være omkring 2 - 4. Lokale forhold kan imidlertid føre til refraksjon, interferens og fokusering som øker oppskyllingshøyden ytterligere. Vi vil derfor anslå en faktor opptil 5 - 6 i områder spesielt utsatt for slike effekter (for eksempel bukter og nes). For oppskylning langs en slak, "ideell" skråning er amplifikasjonsfaktoren

maksimalt omkring 6. For refleksjon mot en tilstrekkelig høy tilnærmet vertikal vegg er amplifikasjonsfaktoren omkring 2.

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.

Rapport nr.: 20071856-
1
Dato: 2008-02-15
Rev.:
Rev. dato:
Side: A3



Rapport nr.: 20071856-
1
Dato: 2008-02-19
Rev.:
Rev. dato:
Side: B1

Vedlegg B - Notat fra Statens Vegvesen

8. november 2007

NOTAT

FLODBØLGE FRA ÅKNESET RISIKO- OG SÅRBARHETSANALYSE.

SPØRSMÅL OM HVILKE "KREFTER" FRA FLODBØLGEN SOM VIL PÅVIRKE VEGER OG FERJEKAIER.

Vi viser til rapport datert 4. november 200⁵ fra NGI om Åknes/Tafjorprosjektet, og tilleggsberegninger datert 29. august 2007 for oppskyllingshøyder lenger ute i Storfjorden. (I våre beredskapsplaner er vi anbefalt å regne med oppskyllingshøyder 25 % over beregnet nivå ved et ras på 35 mill. m³).

1. For å få en bedre forståelse av hvordan en slik flodbølge vil påvirke våre vegger og ferjekaier ønsker vi en generell orientering om hvordan bølgen vil "oppføre seg" når den treffer land ved ulike terrengformasjoner.
2. I en konkret reguleringplansak for Ørsneset ferjekai i Sykkylven kommune er det krav om at det blir utarbeidet en risiko- og sårbarhetsanalyse med tanke på en slik flodbølge (35 mill. m³) før planen kan godkjennes. Se vedlagt plankart. Her ønsker vi en mest mulig konkret risiko- og sårbarhetsanalyse. (Planlagt byggestart for ny ferjekai er våren 2008).

Til punkt 1 har vi blant annet følgende spørsmål:

I store deler av fjordsystemet vil båter ligge "trygt" ute på fjorden. Hvor langt fra land (avstand/-dybde) kan vi regne det for å være trygt (ved ulike oppskyllingshøyder og terrengformasjoner)?

Tolker vi figur 26 - 28 i NGI - rapporten rett hvis vi grovt regner at det tar et halvt minutt for bølgen (overflatehevingen) å bygge seg opp til maks. høyde og at det deretter tar ca. 1 minutt før vannstanden er på minimumsnivå? Gjelder dette i så fall for størstedelen av Storfjordområdet?

Er dette også den tiden det tar for vannstanden å variere fra normalnivå til oppskyllingshøyde og videre til minimumsnivå ved ferjekaier og på landareal som overflømmes?

Når vannet når oppskyllingshøyden kan en da regne med at havoverflata står horisontalt på dette nivået i hele landområdet? Står vannet for eksempel 2 m meter over normalt nivå ved en ferjekaikonstruksjon der oppskyllingshøyden inne på land er beregnet til 2 m?

Ut fra ankomsttidene (side 44 i NGI-rapporten) kan det se ut til at bølgen forflytter seg 150 - 200 km/t utover fjorden. Er dette i hovedsak en vertikal bevegelse i vannmassene før bølgen når og flommer inn over grunnere områder og land? - eller er det også en sterk vannstrøm langs land der det bratt ned i sjøen?

Hvilken horisontale hastigheter må en regne med at vannmassen (bølgen) har når denne når land? Den vil naturligvis variere sterkt avhengig av om det er bratt/brådjupt eller om store grunner og landareal innenfor vil overflømmes, som for eksempel ved E39 Solevåg ferjekai (Sunde). Der bølgen når terreng høyder = oppskyllingsnivået blir vannhastigheten nødvendigvis lik 0.

Strømhastigheten på vannet inn over, og ut igjen fra, overflømte landareal vil mange steder trolig være det som er mest avgjørende for skadepotensialet på våre konstruksjoner/anlegg. Kan det sies noe om hvilke krefter/belastninger vi må regne fra slike vannstrømmer?

Hvor langt under normal vannstand kan vi regne med at vannstanden (i "bølgedalen") kommer når bølgene trekker seg tilbake?

Hva har vært vanlige skader på kaier, andre konstruksjoner og landareal der en har erfaring fra lignende flodbølger?

Til punkt 2 (for Ørsneset ferjekai)

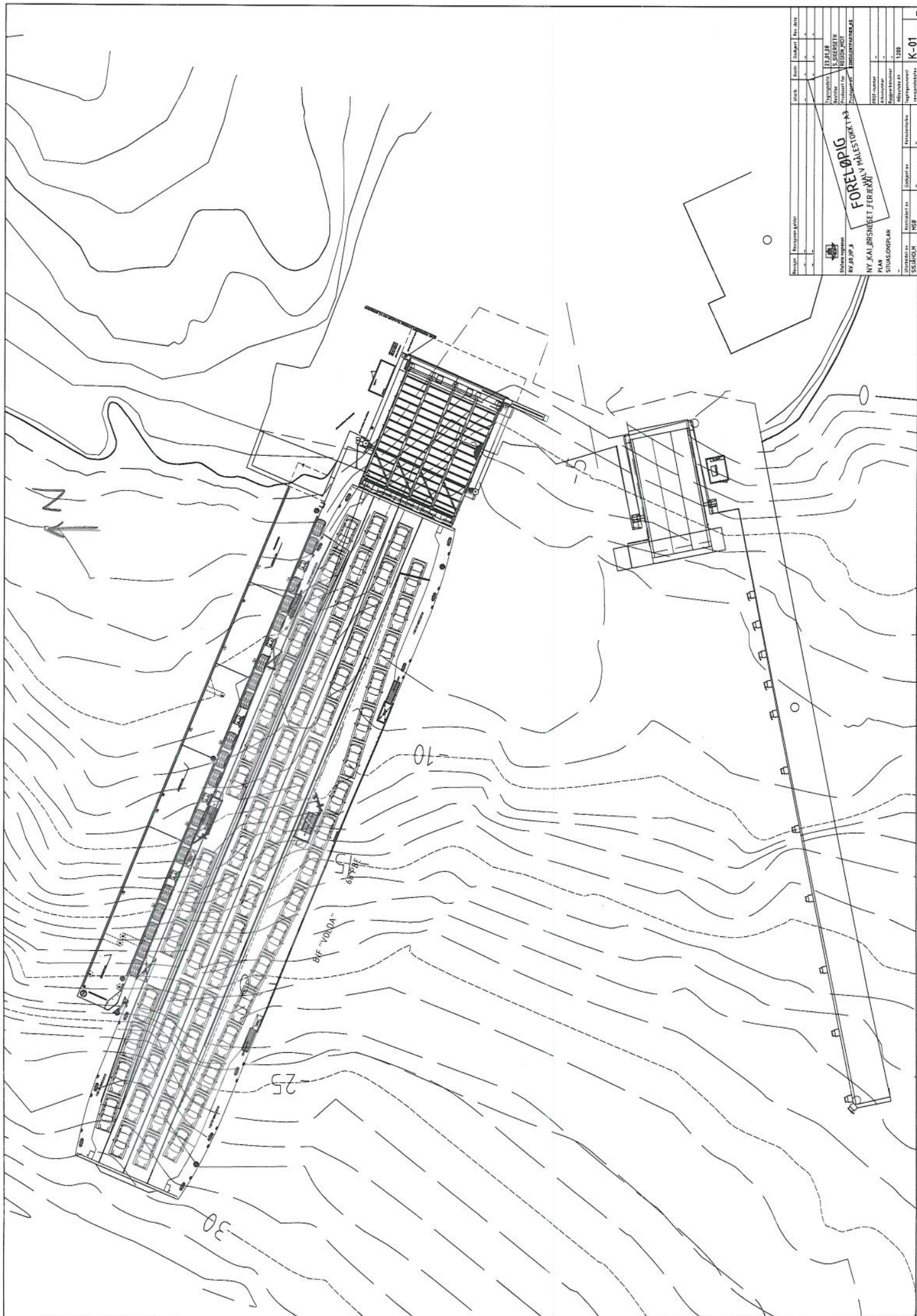
Med anslått oppskyllingshøyde (ca. 2 m), og veg/oppstillingsområde i stigning, regner vi med at det vil bli relativt begrensa skader på land selv om raset skulle inntreffe på flo sjø. Spørsmålet blir derfor i første rekke å få en mer konkret beskrivelse av hvilke krefter den nye ferjekaikonstruksjonen på Ørsneset kan bli utsatt for, slik at vi får grunnlag til å beregne hva som eventuelt kan gjøres for å unngå eller redusere skadevirkningene på kaikonstruksjonen.

Generelt

Det vil være en fordel om det er mulig å få til et møte der aktuelle personer hos oss kan bli orientert om disse problemstillingene. Gjennom en orientering/diskusjon vil det sikkert dukke opp en rekke andre spørsmål underveis. Fra vår side vil det være aktuelt å stille med folk med ansvar for bl.a. beredskap, vegvedlikehold, bru/ferjekai, geoteknikk, vegplanlegging.

Terje Lindstad

Vedlegg C - Statens Vegvesen: Foreløpig situasjonsplan og oversiktstegning for ny Ørsneset fergekai



**FORELØBIG
NY KAI ØRSNSET I FERENTU MALESTORNA**

PROJEKTANTER: D. J. J. B.
S. ØRSNSET
BYGGER: FERENTU MALESTORNA
BYGGER: FERENTU MALESTORNA

Projektant	D. J. J. B.	Byggher	Ferentu Malestorna
Bygger	S. Ørsnset	Byggher	Ferentu Malestorna
Byggher	Ferentu Malestorna	Byggher	Ferentu Malestorna
Byggher	Ferentu Malestorna	Byggher	Ferentu Malestorna
Byggher	Ferentu Malestorna	Byggher	Ferentu Malestorna

**NY KAI ØRSNSET I FERENTU MALESTORNA
PLAN
SITUASJONSPLAN**

Skala: 1:200

Arbeidstittel	BYG	Arbeidets art	Situasjonsplan
Byggher	Ferentu Malestorna	Arbeidets art	Situasjonsplan
Arbeidets art	Situasjonsplan	Arbeidets art	Situasjonsplan

K-01

Kontroll- og referanseside/ Review and reference page



Dokumentinformasjon/Document information					
Dokumenttittel/Document title Flodbølge fra Åkneset - innvirkning på veier og fergekaier i Storfjorden, Møre			Dokument nr/Document No. 20071856-1		
Dokumenttype/Type of document		Distribusjon/Distribution		Dato/Date 15. februar 2008	
<input checked="" type="checkbox"/> Rapport/Report		<input type="checkbox"/> Fri/Unlimited		Rev.nr./Rev.No. 0	
<input type="checkbox"/> Teknisk notat/Technical Note		<input checked="" type="checkbox"/> Begrenset/Limited			
		<input type="checkbox"/> Ingen/None			
Oppdragsgiver/Client Statens vegvesen Region midt					
Emneord/Keywords Flood wave, geohazard, harbour, mathematical model, numerical model, rock slide, run-up, surface wave, tsunami, wave action, wave load					
Stedfesting/Geographical information					
Land, fylke/Country, County Norge, Møre og Romsdal			Havområde/Offshore area		
Kommune/Municipality Sykkylven			Feltnavn/Field name		
Sted/Location Ørsneset			Sted/Location		
Kartblad/Map 1219 IV Sykkylven			Felt, blokknr./Field, Block No.		
UTM-koordinater/UTM-coordinates Karttilvisning: LQ734223					
Dokumentkontroll/Document control					
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev./ Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egen- kontroll/ Self review av/by:	Sidemanns -kontroll/ Colleague review av/by:	Uavhengig kontroll/ Independent review av/by:	Tverrfaglig kontroll/ Inter- disciplinary review av/by:
0	Original dokument	CH	SGI	Flo	PG
Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release		Dato/Date		Sign. Prosjektleder/Project Manager	
				Carl Bonnevie Harbitz	

NGI 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.

NGI arbeider i følgende markeder: olje og gass, bygg og anlegg, 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 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 environment, installations and structures.

NGI works within the oil and gas, 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

