Freake havbølger — freake krefter på neddykkede rørbruer

Karsten Trulsen

Seksjon for Mekanikk, Matematisk institutt, Universitetet i Oslo

3 november 2022

En seksjon for Mekanikk på Matematisk institutt? Hos oss betyr det i praksis Fluidmekanikk

Fluidmekanikk er en variant av Newtonsk mekanikk:

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$$

Newtonsk mekanikk kommer i to varianter:

- Anvendt på punktmasser og faststoffer
- Anvendt på fluider

Faststoff: partiklene har faste plasser

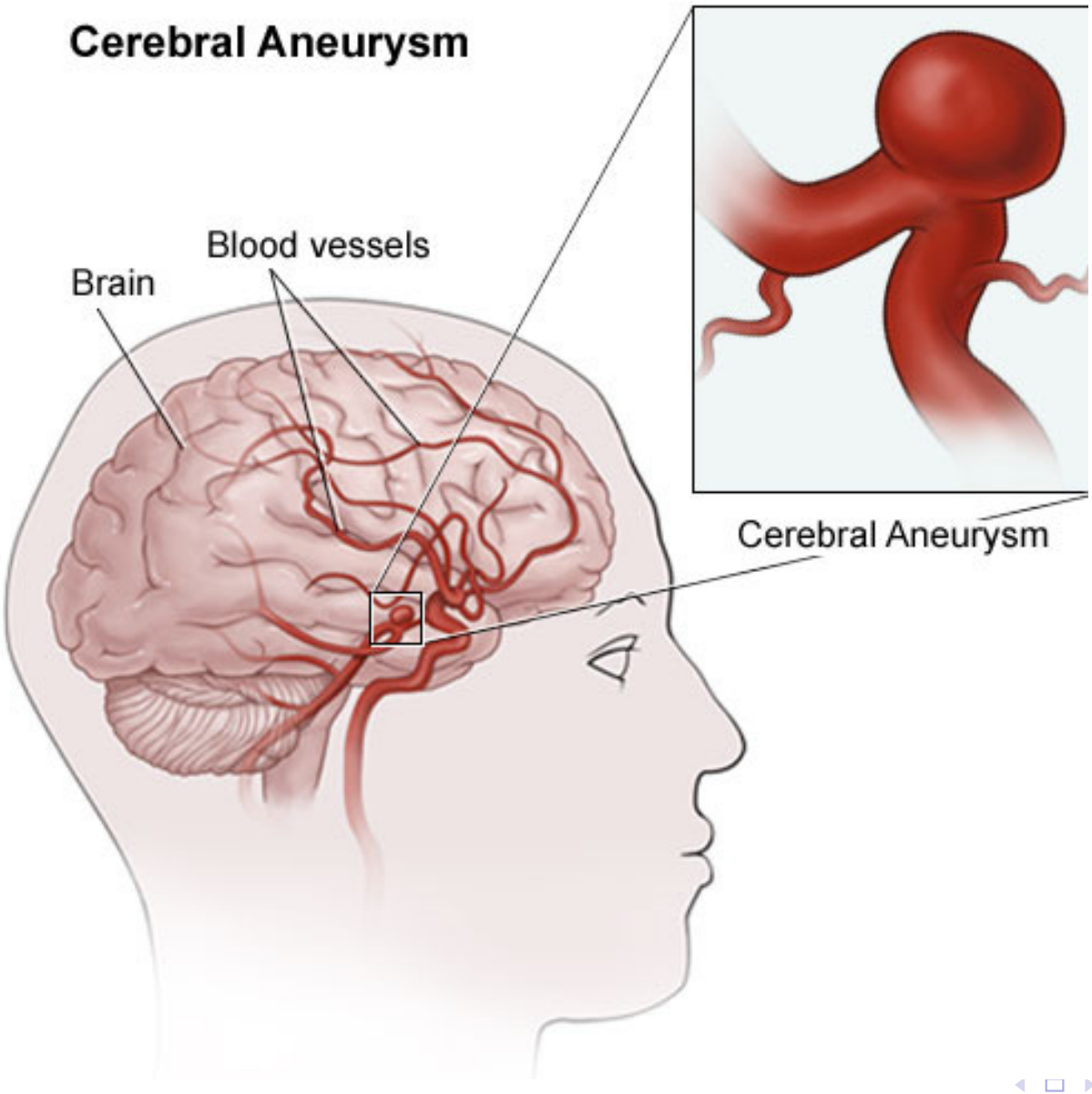
Fluid: partiklene kan bevege seg fritt omkring

Væske: fluid som vanskelig lar seg komprimere, avgrenset volum

Gass: fluid som lett lar seg komprimere, ikke avgrenset volum

Fluidmekanikk




Cerebral Aneurysm
Blood vessels
Brain
Cerebral Aneurysm

Fluidmekanikk



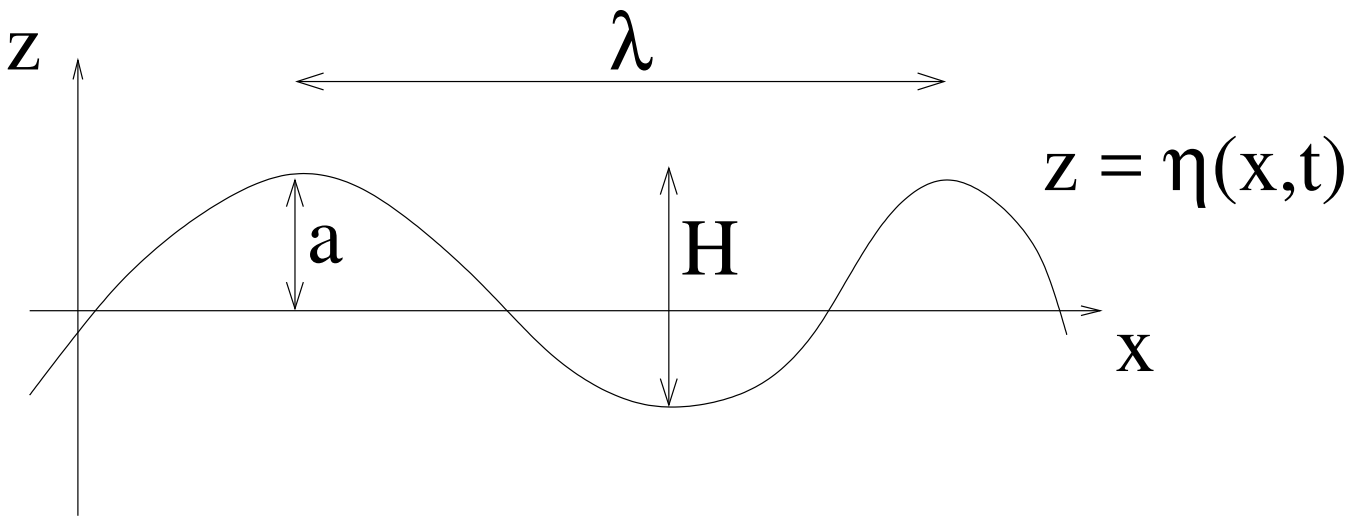
Fluidmekanikk



Fluidmekanikk



Freake bølger, ekstreme bølger, og vanlige bølger



- Overflatehevning $\eta(x, t)$
- Kamhøyde $a = \eta_c$
- Bølgehøyde $H =$ vertikal avstand mellom kam og buk
- Bølgelengde λ

Freak = Rogue ≠ Ekstrem ≠ Tsunami

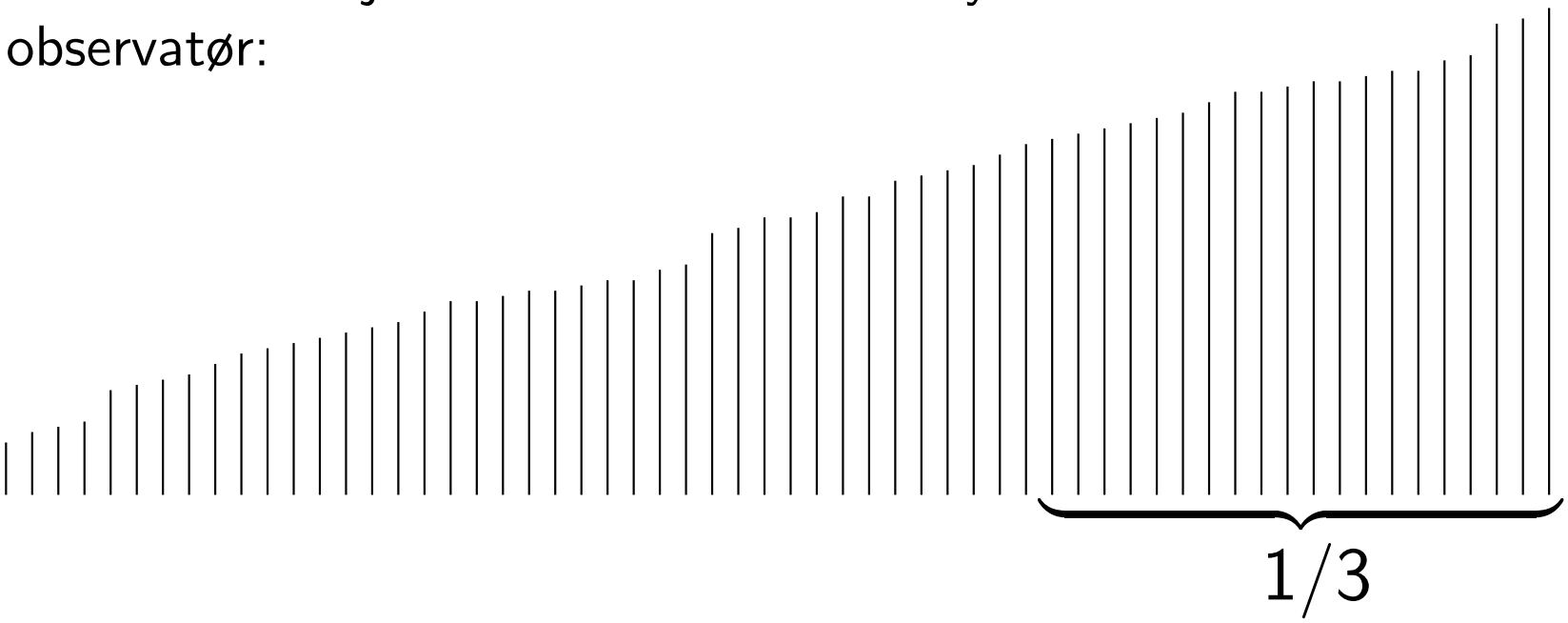
- Freak eller rogue bølge
  - *eksepsjonelt stor og overraskende* sammenliknet med *vanlige* bølger
- Ekstreme bølger
  - store fysiske dimensjoner
  - trenger ikke være *eksepsjonelt stor* eller *overraskende*
- Tsunami
  - en gruppe av *lange* bølger generert av en lokal hendelse, for eksempel jordskjelv eller ras (naturkatastrofer)

Jeg skal snakke om ekstreme bølger som er freake.

Hva er da en "*ordinær*" eller "*vanlig*" bølge?

Signifikant bølgehøyde ≈ ordinær

Klassisk definisjon svarer til visuelt inntrykk for en erfaren observatør:



$H_{1/3}$ = middelverdi av de $1/3$ største bølgehøydene

Moderne definisjon:

$$H_s = 4\sigma$$

hvor σ er standardavviket til overflatehevningen

For an ordinær sjøtilstand:

$$H_s \approx H_{1/3}$$

Freak bølge — definisjon

For en 20 minutter lang tidsserie
målt på et fast punkt i Nordsjøen
er en bølge ansett som freak dersom:

$$H > 2H_s = 8\sigma$$

eller

$$\eta_c > 1.25H_s = 5\sigma$$

Noen eksempler på freake bølger

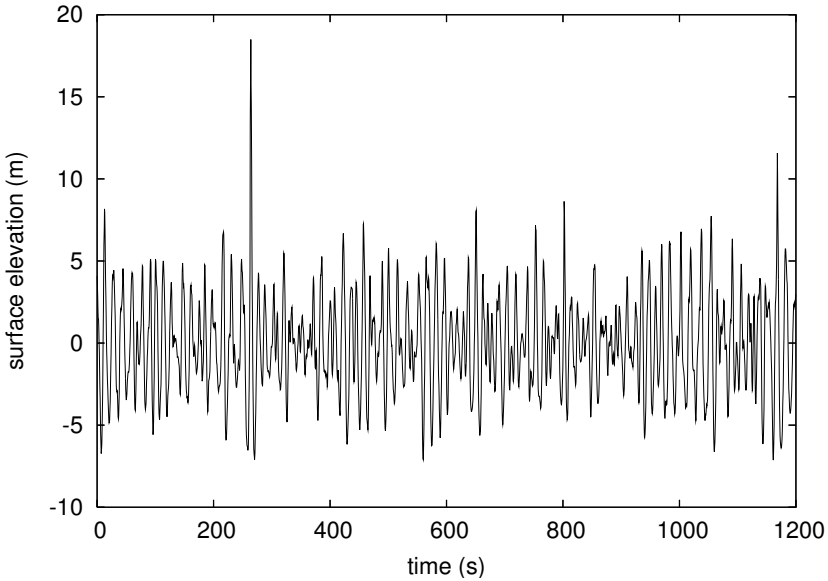
Definitivt freake bølger:

- Nyttårsbølgen på Draupner 1/1–1995
- Andrea-bølgen på Ekofisk 9/11–2007
- Bølgen som traff COSL Innovator på Troll 30/12–2015

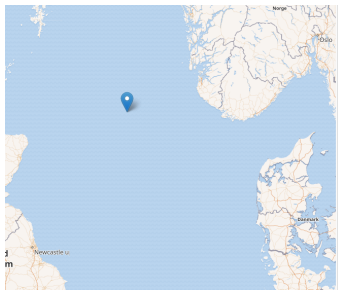
Sannsynligvis ikke en freak bølge

- Prestige ulykken utenfor Spain 13/11–2002

Nyttårsbølgen 1/1–1995 på Draupner







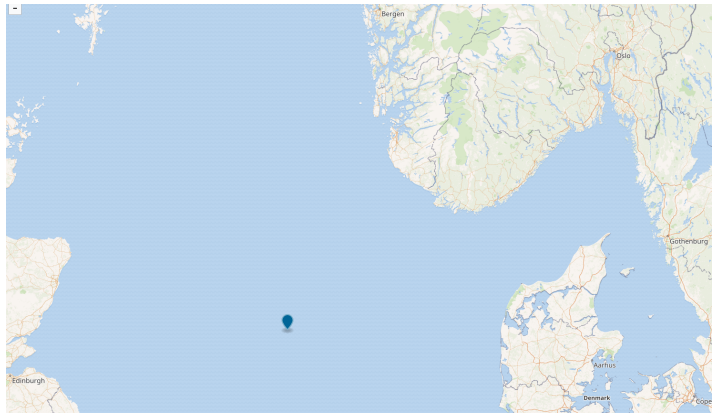
Data fra Statoil. Kart fra Wikimedia map CC BY-SA 4.0

$$\eta_c/H_s = 1.56 > 1.25 \qquad H/H_s = 2.15 > 2$$

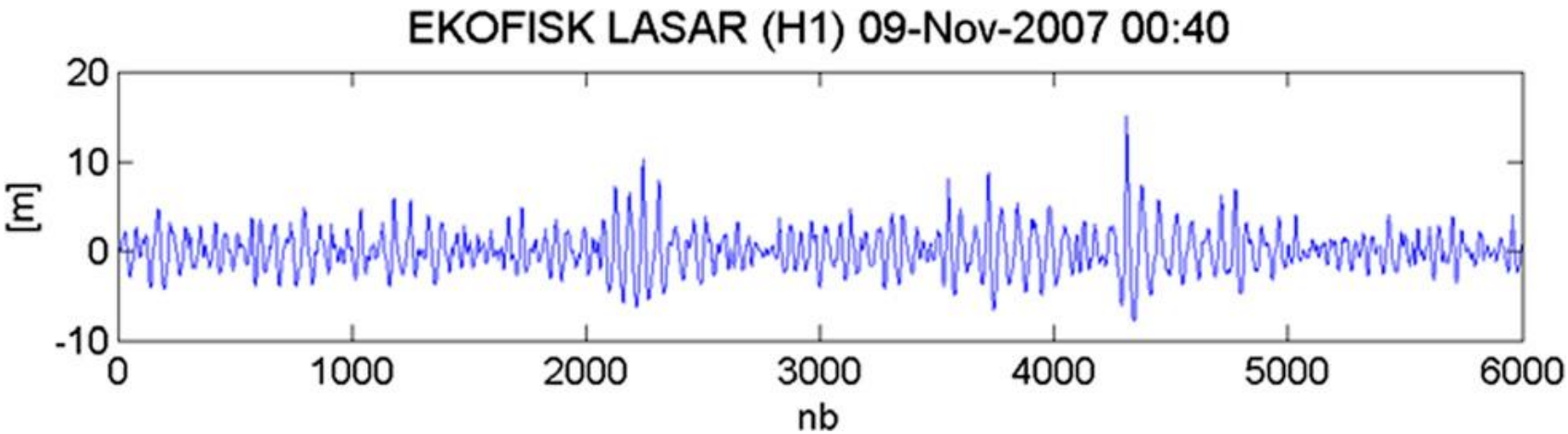
Tilfredsstiller begge kriterier for å være en freak bølge

Andrea-bølgen 9/11–2007 på Ekofisk





Data fra ConocoPhillips, presentert av Magnusson & Donelan (2013). Kart: Wikimedia map CC BY-SA 4.0



$\eta_c/H_s = 1.63 > 1.25 \qquad H/H_s = 2.49 > 2$

Andrea-bølgen er mer freak enn Draupner-bølgen

Bølgen som traff COSL Innovator 30/12–2015 på Troll





Kart: Wikimedia map CC BY-SA 4.0

"Det var en helt alminnelig dag."

Henning Bruvik, kaptein på COSL Innovator

Plutselig ble riggen truffet av en bølge. En ansatt døde momentant når en bølge ødela vinduet til kabinen.

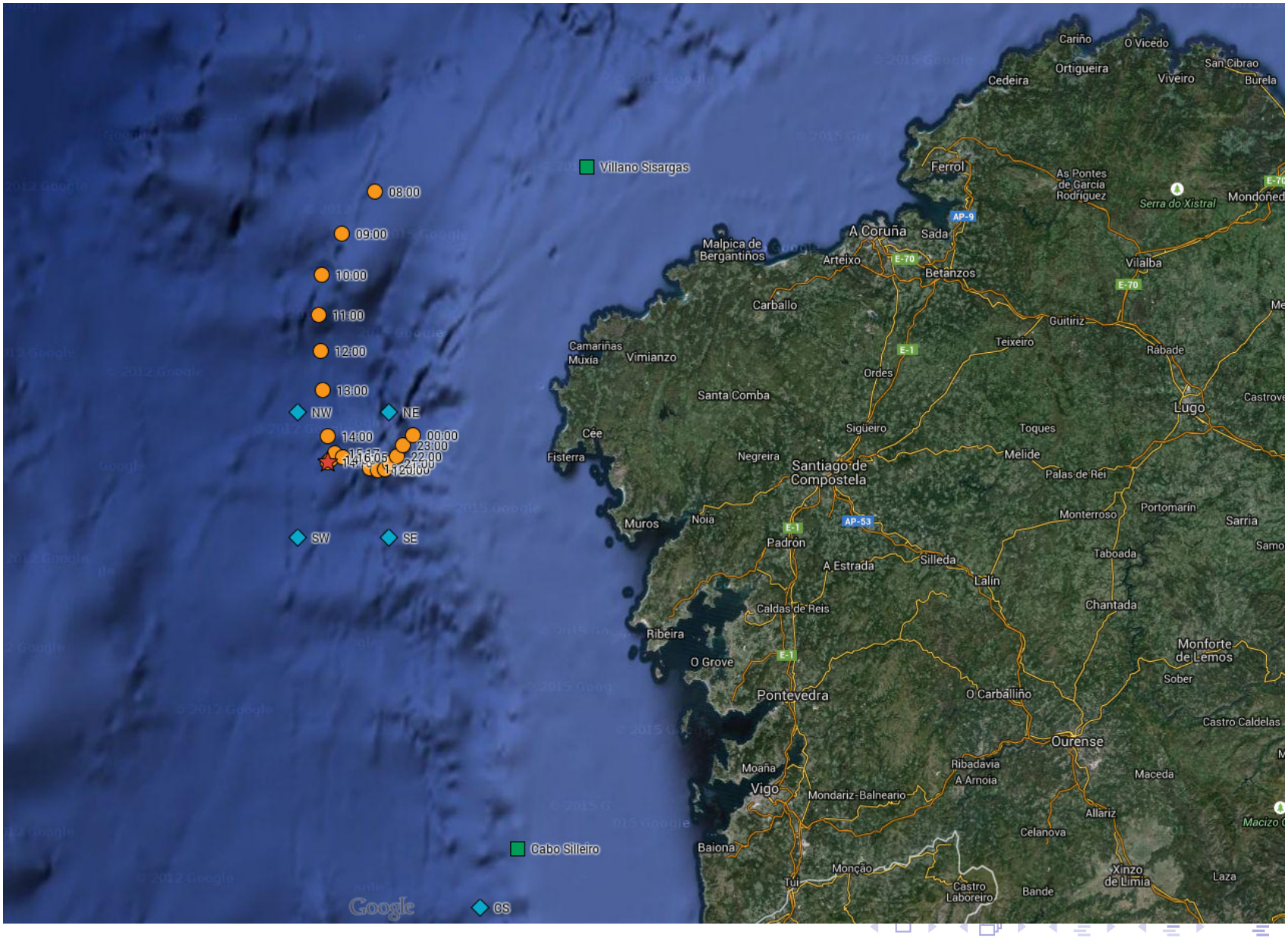
COSL Innovator

Mange vinduer ble ødelagt



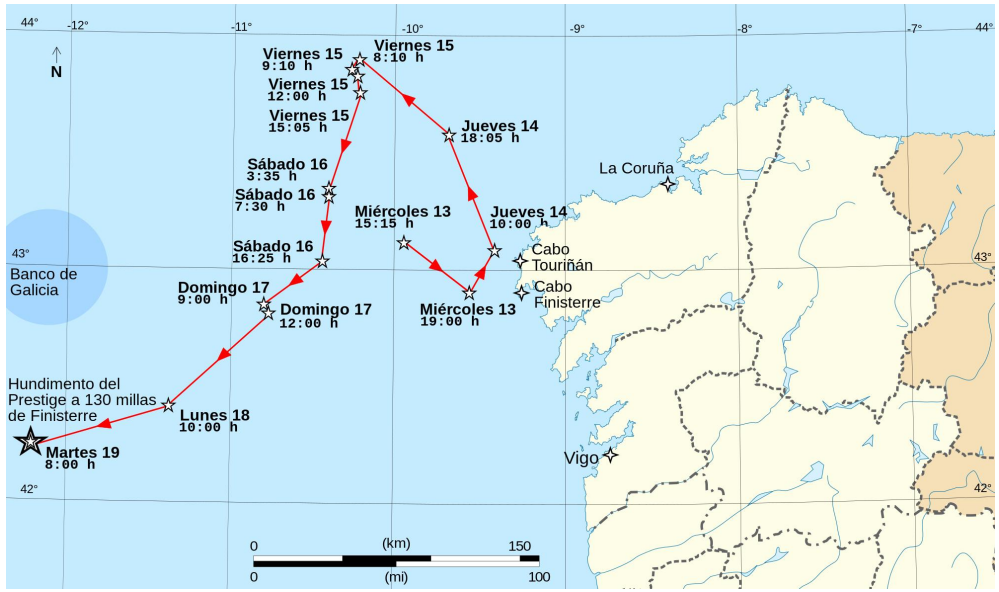
Prestige-ulykken
13/11–2002
og etterfølgende katastrofe
19/11–2002
utenfor Spania

Ulykken: Prestige blir skadet 13 November 2002



Etter ulykken: Prestige blir tauet vekk fra kysten



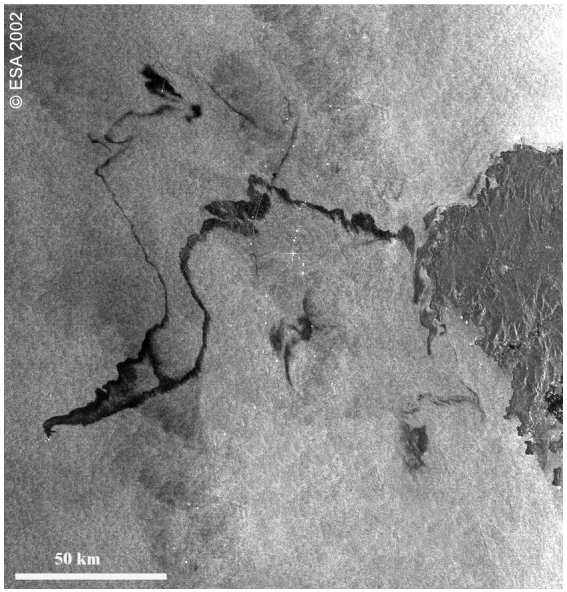


Katastrofen: Prestige knekker og synker 19 November 2002





Katastrofen: Etter at Prestige sank 19 November 2002







Hvordan beskriver vi freake bølger?

To strategier:

- Deterministisk
- Stokastisk

Folk har en tendens til å velge kun én strategi.

Ved å kombinere begge kan vi bli overrasket
— det er morsommere.

Bedre forståelse krever begge strategier samtidig.

Eksempler følger!

Deterministisk beskrivelse: Schrödinger likning. Modulasjonsustabilitet. Pustere.

Enkel modell for å generere en freak bølge fra "intet"

Ikkelineær Schrödinger (NLS) likning

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{2}\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\mathrm{i}}{8}\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - \frac{\mathrm{i}}{4}\frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\mathrm{i}}{2}|A|^2 A = 0$$

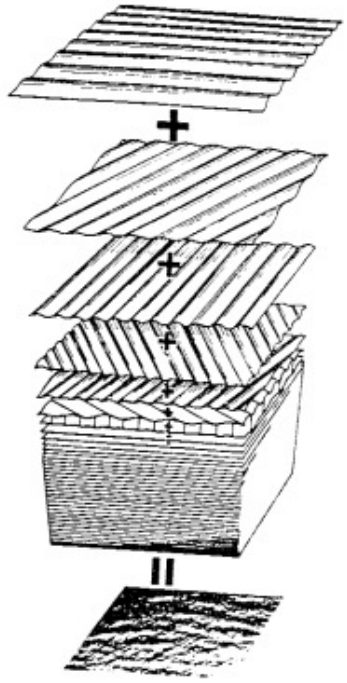
Modulasjonsustabilitet — små forstyrrelser kan vokse og bli store.

Pustere — en uskylding sjøtilstand kan fokusere til en gigantisk bølge, og deretter roe seg ned til en uskyldig overflate igjen.

Peregrine puster

Stokastisk beskrivelse: "ordinær" sjø = Gaussisk prosess

Superposisjon av statistisk uavhengige bidrag



Pierson et al. (1958)

Sentralgrenseteoremet sier at havet er Gaussisk.

Kan freake bølger forekomme oftere enn dette?

Ikkelinearitet forårsaker at sentralgrenseteoremet bryter sammen

...

Litt statistikk:

La η være en stokastisk variabel

Forventning $\mu = E[\eta]$

Varians $\sigma^2 = E[(\eta - \mu)^2]$

Standardavvik $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$

Skjevhet $\gamma = \frac{E[(\eta-\mu)^3]}{\sigma^3}$

Kurtose $\kappa = \frac{E[(\eta-\mu)^4]}{\sigma^4}$

En Gaussisk variabel har skjevhet $\gamma = 0$ og kurtose $\kappa = 3$

Enkleste kriterium for økt sannsynlighet for freake bølger:

$$\kappa > 3$$

Sjøtilstanden ved Prestige-ulykken var skuffende "ordinær"

- Vår modellering viser at da Prestige-ulykken skjedde var kurtosen skuffende nær 3.
- Vi mener derfor det ikke er noen grunn til å snakke om freake bølger i etterfølgende rettsak.
- Likeven har det skjelden blitt snakket mer om freake bølger i noen annen rettsak.

AGU PUBLICATIONS

JGR

Journal of Geophysical Research: Oceans

RESEARCH ARTICLE

10.1002/2015JC011161

Key Point:
- Discuss the crossing sea state and rogue wave probability during the Prestige accident

Correspondence to:
K. Trulsen,
karstent@math.uio.no

Citation:
Trulsen, K., J. C. Nieto Borge, O. Gramstad, L. Aouf, and J.–M. Lefèvre (2015), Crossing sea state and rogue wave probability during the Prestige accident, *J. Geophys. Res. Oceans*, *120*, 7113–7136, doi:10.1002/2015JC011161.

Crossing sea state and rogue wave probability during the Prestige accident

Karsten Trulsen[1], José Carlos Nieto Borge[2], Odin Gramstad[1,3,4], Lotfi Aouf[5], and Jean–Michel Lefèvre[5,6]

[1]Department of Mathematics, University of Oslo, Norway, [2]Department of Signal Theory and Communications, University of Alcalá, Spain, [3]Centre for Ocean Engineering Science and Technology, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, [4]Now at DNV GL Strategic Research and Innovation, Høvik, Norway, [5]Météo-France, Département Marine et Océanographie, Toulouse, France, [6]Deceased April 5th, 2014

Abstract We discuss the crossing sea state and the probability of rogue waves during the accident of the tanker Prestige on 13 November 2002. We present newly computed hindcast spectra for every hour during that day at nearby locations, showing the development of a bimodal sea state with two wave systems crossing at nearly right angle. We employ four different nonlinear models capable of computing the phase-resolved sea surface from the hindcast spectra, allowing us to estimate statistics for the occurrence of rogue waves. At the location and moment of the accident, the models give expected values for the kurtosis

Atlanterhavsveien





Bølger i motgående strøm

Deterministisk beskrivelse: Bølger i motgående strøm bremses og blir større

Stochastisk beskrivelse: Sannsynligheten for freake bølger i midten av en motgående jetstrøm er mindre enn på åpent hav uten strøm

Ph.D. prosjekt til Karina Hjelmervik

Film fra Atlanterhavsveien



Bølger i motgående strøm — konsekvens

- Liker kapteiner å seile i midten av jetstrømmer?
- Bølgene som kommer mot skipet kan være store.
- Blant de er det færre freake bølger enn på "ordinær" sjø.
- Kapteinen vill være mer skyldig dersom noe går galt?

J. Fluid Mech. (2009), *vol.* 637, *pp.* 267–284. © Cambridge University Press 2009
doi:10.1017/S0022112009990607

Freak wave statistics on collinear currents

KARINA B. HJELMERVIK AND KARSTEN TRULSEN†

Department of Mathematics, University of Oslo, P.O. Box 1053 Blindern, NO-0316 Oslo, Norway

(Received 23 March 2009; revised 12 May 2009; accepted 20 May 2009; first published online 17 September 2009)

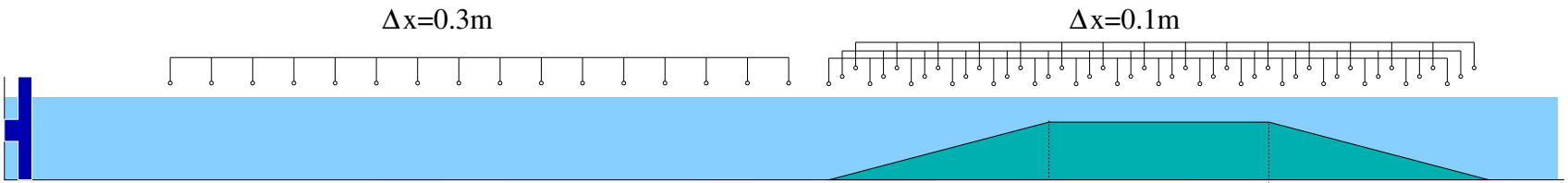
Linear refraction of waves on inhomogeneous current is known to provoke extreme waves. We investigate the effect of nonlinearity on this phenomenon, with respect to the variation of significant wave height, kurtosis and occurrence of freak waves. Monte Carlo simulations are performed employing a modified nonlinear Schrödinger equation that includes the effects of a prescribed non-potential current. We recommend that freak waves should be defined by a local criterion according to the wave distribution at each location of constant current, not by a global criterion that is either averaged over, or insensitive to, inhomogeneities of the current. Nonlinearity can reduce the modulation of significant wave height. Depending on the configuration of current and waves, the kurtosis and probability of freak waves can either grow or decrease when the wave height increases due to linear refraction. At the centre of an opposing current jet where waves are known to become large, we find that freak

Bølger over en grunne

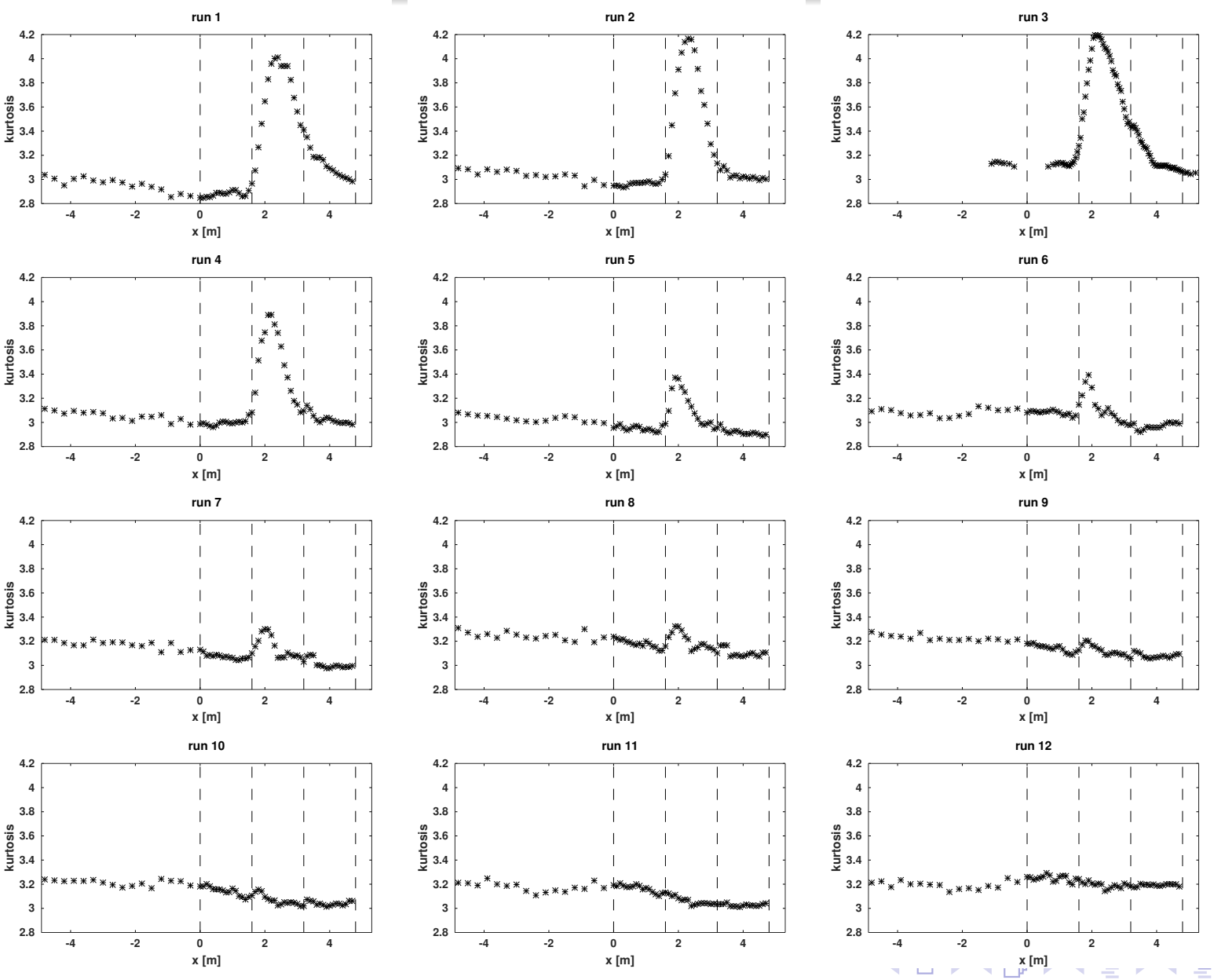
Deterministisk beskrivelse: Bølger som ankommer grunnere vann bremses og vokser. Modulasjonsustabilitet blir mye svakere.

Stokastisk beskrivelse: Sannsynligheten for freake bølger over en grunne kan være betydelig større enn over flat bunn.

Masteroppgave til Anne Raustøl



Bølger over en grunne — kurtose (Masteroppgave til Anne Raustøl)



Bølger over en grunne — konsekvens

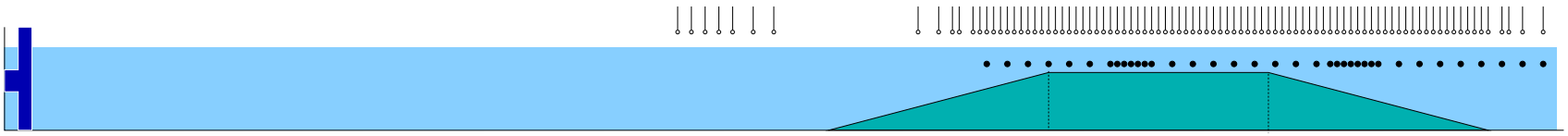
- Dersom en grunne er tilstrekkelig grunn kan den framprovosere betydelig økt forekomst av freake bølger.
- Fiskebanker er grunner . . .
- Kystområder kan ha mange grunner . . .

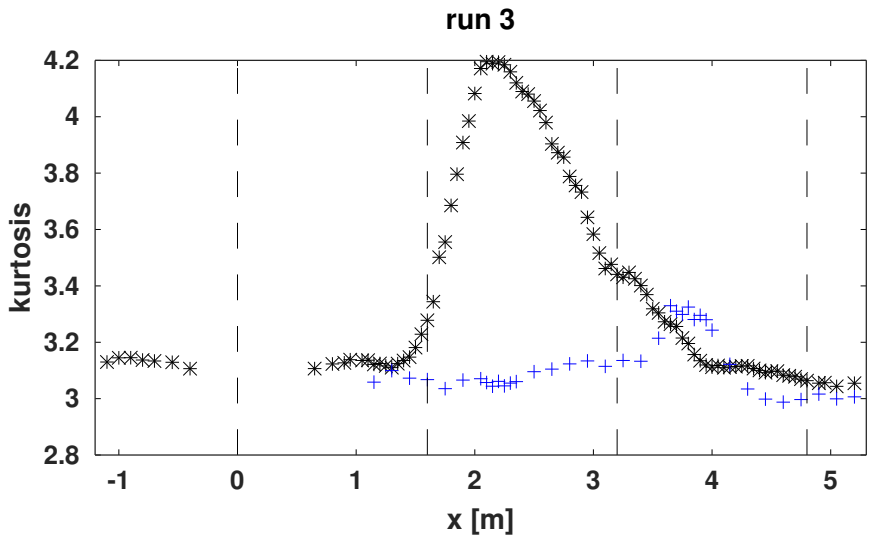
Overflatehevning og hastighetsfelt — over en grunne

Deterministisk beskrivelse: Overflatehevning og hastighetsfelt er låst til hverandre.

Stokastisk beskrivelse: Freake overflatebølger og freake hastighetsbølger skjer på forskjellige steder over en grunne.

Masteroppgave til Stian Jorde





Bølger over en grunne

Oppgavene til tre masterstudenter, to av dem lektorstudenter:

J. Fluid Mech. (2020), *vol.* 882, R2, doi:10.1017/jfm.2019.861



JFM RAPIDS
journals.cambridge.org/rapids

Extreme wave statistics of long-crested irregular waves over a shoal

Karsten Trulsen[1],†, Anne Raustøl[1], Stian Jorde[1] and Lisa Bæverfjord Rye[1]

[1]Department of Mathematics, University of Oslo, 0371 Oslo, Norway

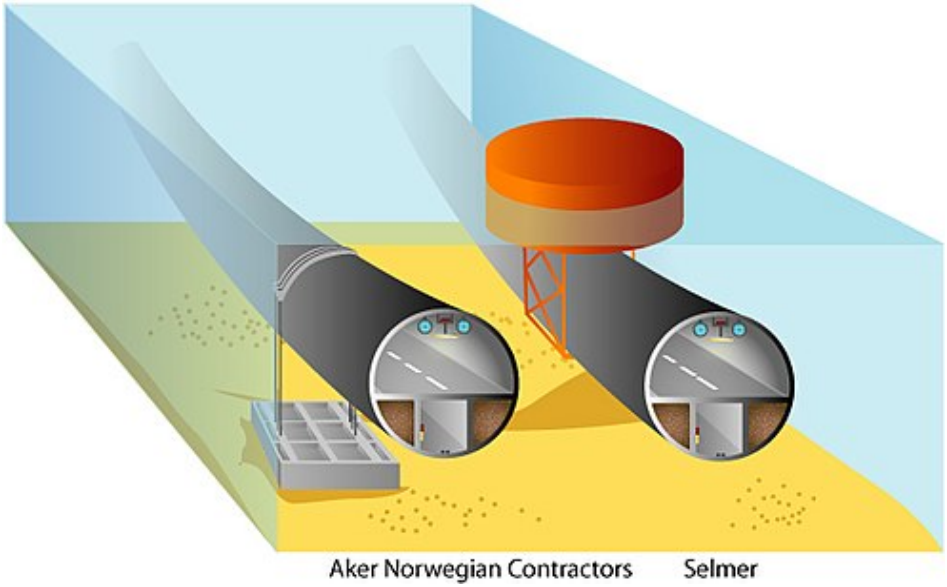
(Received 14 August 2019; revised 23 September 2019; accepted 14 October 2019)

We report laboratory experiments of long-crested irregular water surface waves propagating over a shoal. For a sufficiently shallow shoal we find that the surface elevation can have a local maximum of skewness and kurtosis above the shallower part of the shoal close to the edge on the incoming side, and a local minimum of skewness over the downward slope on the lee side of the shoal. We find that the horizontal fluid velocity can have a local maximum and minimum of skewness at the same locations as those for the surface elevation. However, the kurtosis of the

4:35:20, subject to the Cambridge Core terms of use, available at https://www.cambridge.org/core/terms.

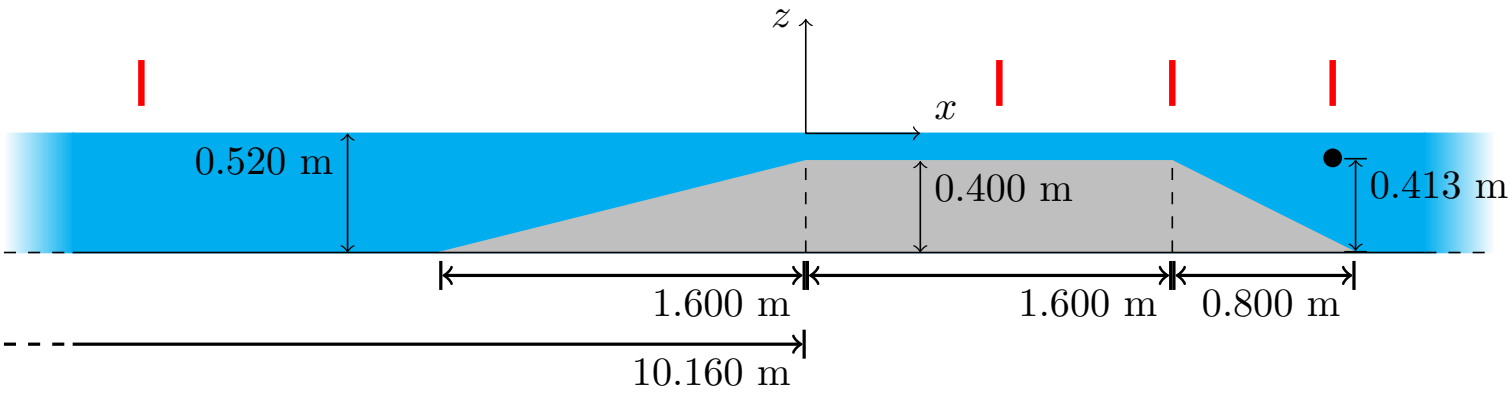
Neddykket flytende tunnel bro — Arkimedes bro





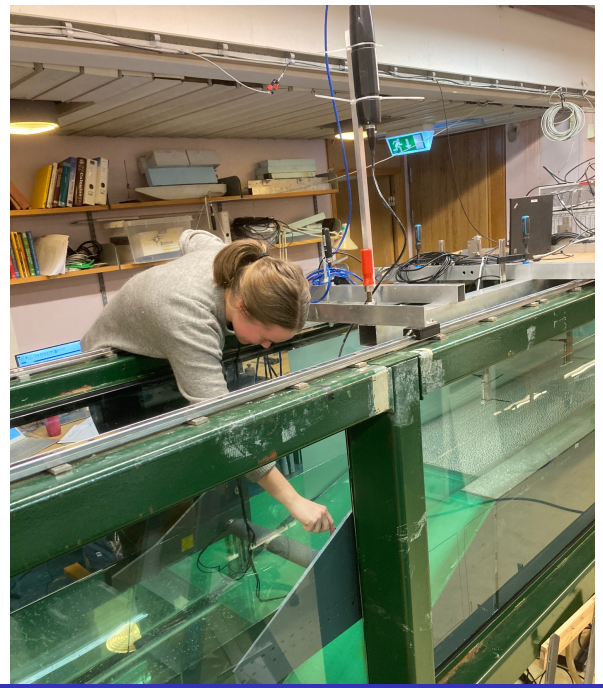
Kraft på en nedsenket horisontal sylinder — bak en grunne

Masteroppgave til Karen Samseth

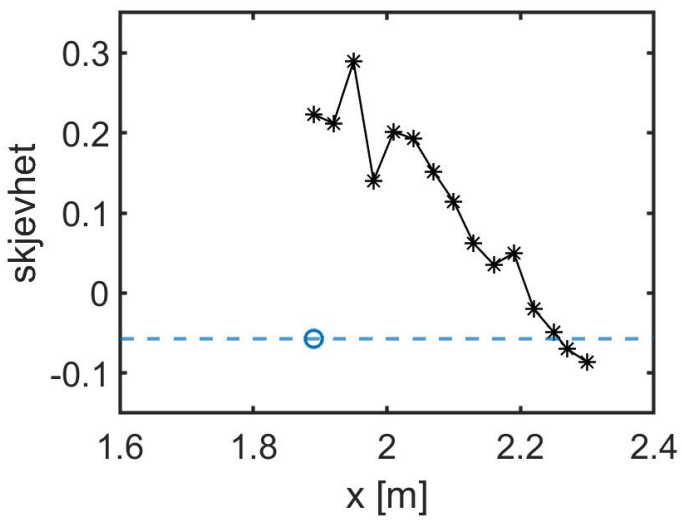


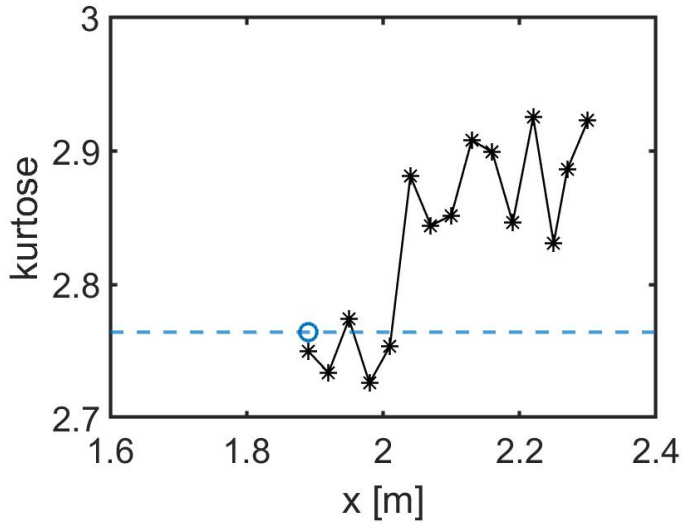
Den horisontale sylinderen





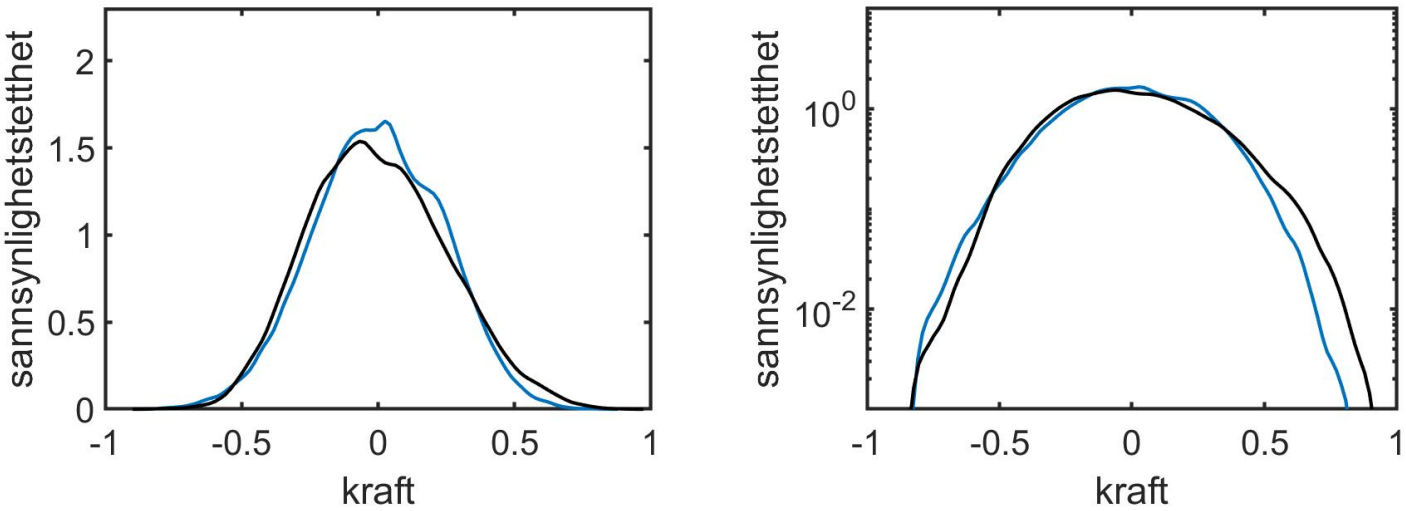
Statistiken avhenger av posisjonen relativt til grunna





- Blå referanseverdi uten grunne
- Sort verdi med grunne — ulike posisjoner relativt til grunna

Distribusjonen til krefter kan bli mer ekstrem på grunn av en grunne



- Blå referanseverdi uten grunne
- Sort verdi med grunne — ved én posisjon relativt til grunna

Statens veivesen
poengterer at de ikke planlegger
nedsenkede flytende rør tunneller
nær grunner!

Konklusjon

- Mekanikk er gøy og statistikk er gøy
- Kombinasjonen er **mer enn dobbelt så gøy**

Som masterstudent kan du komme svært nær forskningsfronten, spesielt dersom du jobber i laboratoriet.

Bidrag fra:

- Karen Samseth — Lektor
- Eva Charlotte Berner — Master
- Anne Raustøl — Lektor
- Stian Jorde — Lektor
- Karina B. Hjelmervik — Ph.D.
- Odin Gramstad — Master og Ph.D. og Postdoc

Se så lykkelige mine studenter er!

