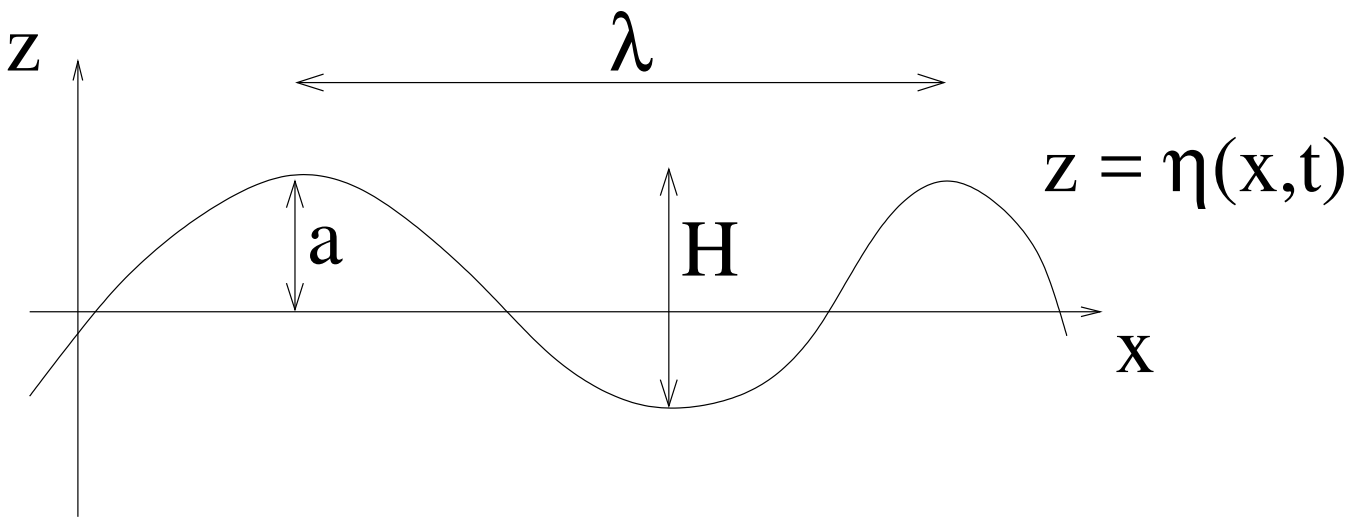
Ekstrembølger i havet — hva er det, hvordan oppstår de og hvilken betydning kan de ha for virksomhet til havs

Karsten Trulsen

Seksjon for Mekanikk, Matematisk institutt, UiO

11 februar 2021

Freake, rogue og ekstreme bølger — hva er det?



- Overflatehevning $z = \eta(x, t)$
- Amplitude a eller kamhøyde η_c
- Bølgehøyde H
- Bølgelengde λ
- Steilhet a/λ

Freak = Rogue ≠ Ekstrem ≠ Tsunami

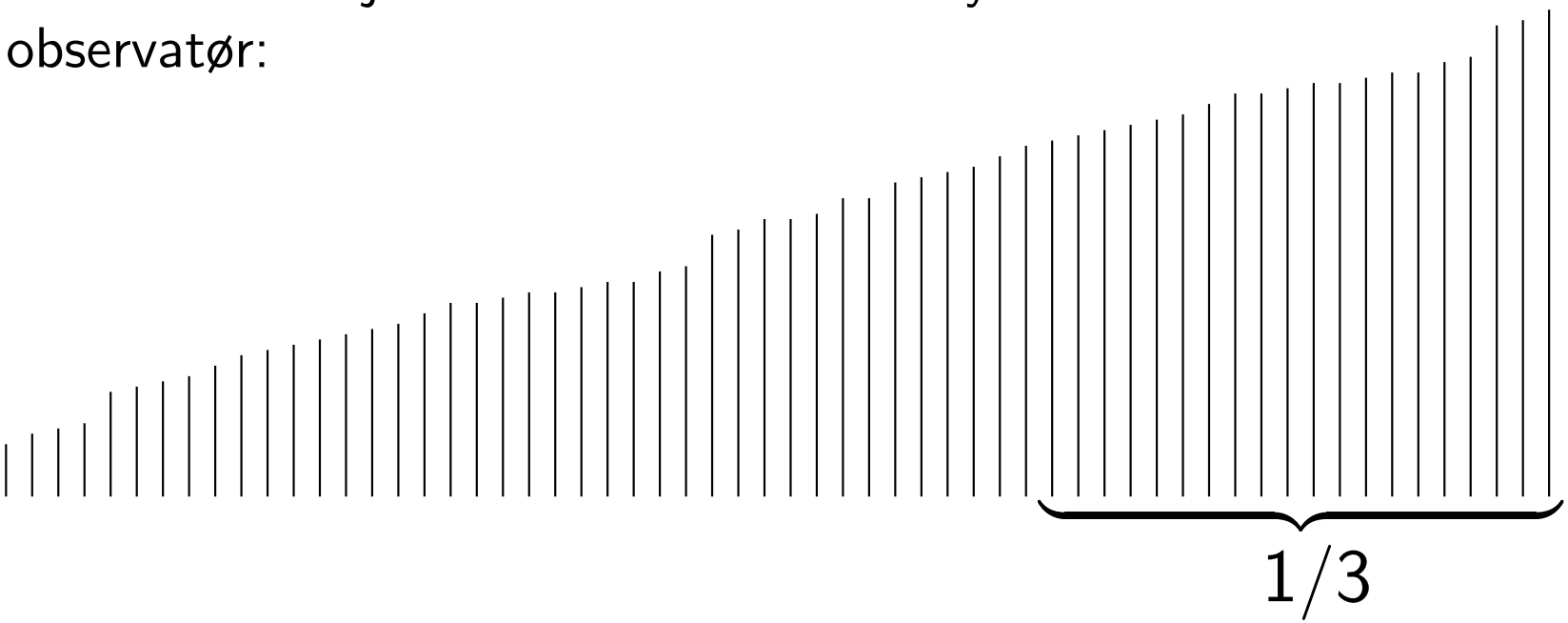
- Freak eller rogue bølge
  - *uvanlig stor og overraskende* sammenliknet med *vanlige* bølger
- Ekstreme bølger
  - store fysiske dimensjoner
  - ikke nødvendigvis *uvanlig stor* eller *overraskende*
- Tsunami
  - en liten gruppe med *lange* bølger generert av en lokal hendelse, f.eks. jordskjelv eller ras (naturkatastrofer)

Jeg skal snakke om ekstreme bølger som er freake.

Hva er da en "*vanlig*" bølge?

Signifikant bølgehøyde $\approx$ vanlig

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 en vanlig sjø har vi

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

Freakbølge — definisjon

For en 20 minutters tidsserie målt i et punkt i Nordsjøen anses en bølge å være en freakbølge dersom:

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

eller

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

Noen eksempler på freakbølger

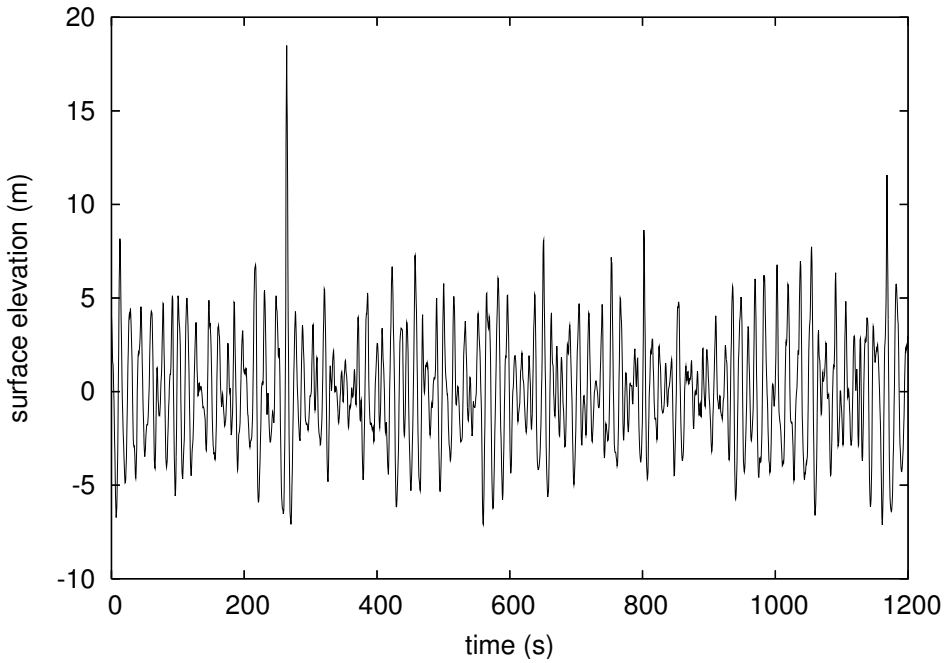
Definitivt freake bølger:

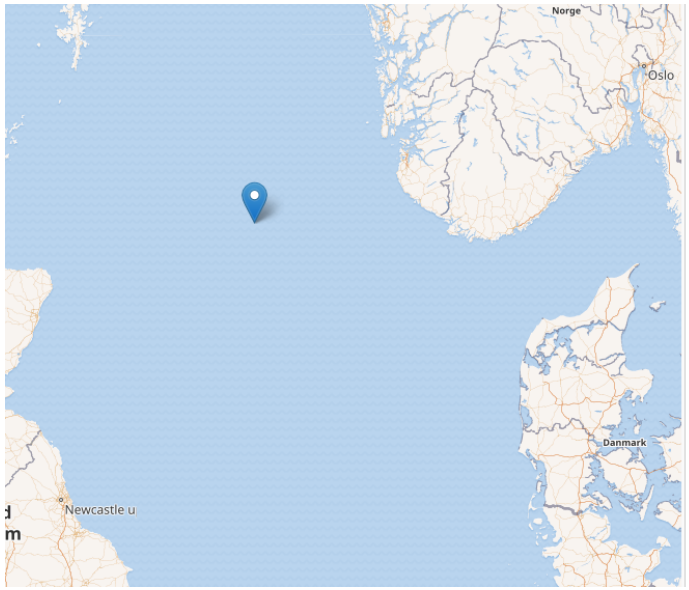
- Nyttårsbølgen på Draupner 1/1–1995
- Andrea-bølgen på Ekofisk 9/11–2007
- Bølgen som traff COSL Innovator på Troll 30/12–2015

Kanskje eller kanskje 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

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

(kriterier for tidsserier av 20 minutters varighet i forhold tilsvarende Nordsjøen)

Tilfredsstiller begge kravene for å være freakbølge

Andrea-bølgen 9/11–2007 på Ekofisk



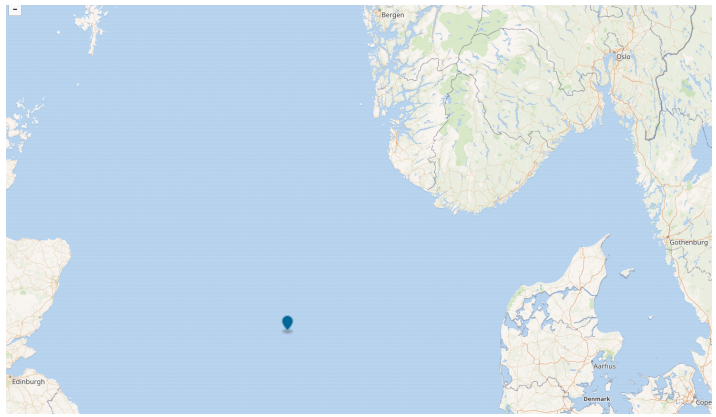
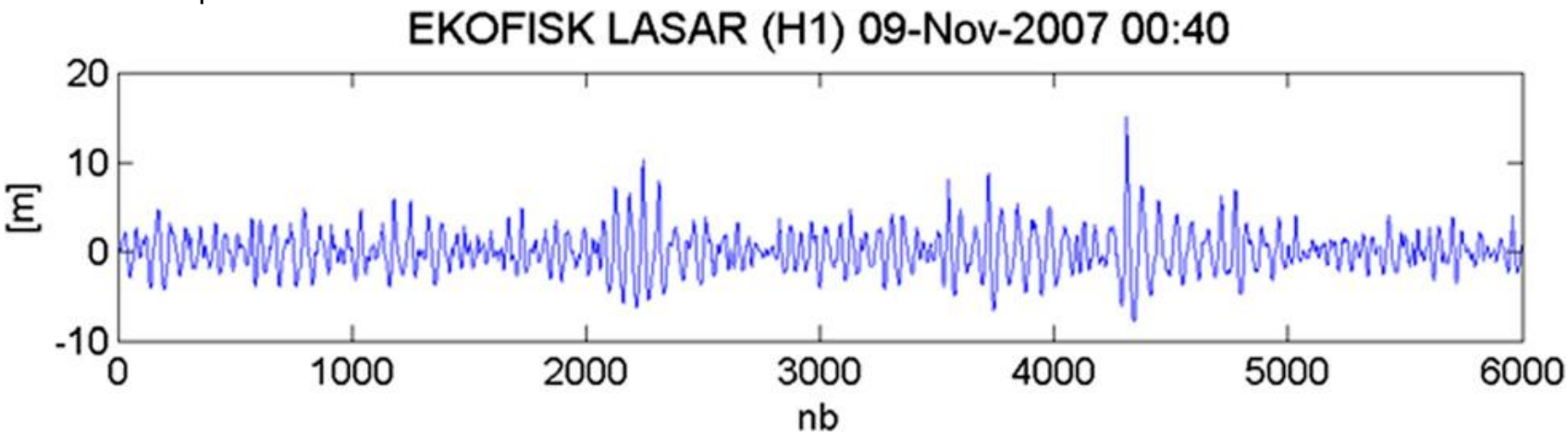


Foto: By BoH - Own work, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11223835. Kart: Wikimedia map CC BY-SA 4.0



Data fra ConocoPhillips, presentert av Magnusson & Donelan (2013)

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

Andrea-bølgen er mer freak enn Draupner bølgen

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





By L.C. Nøttaasen from Sandnes, Norway - Oil Rigs at Coast Center Base outside Bergen, CC BY 2.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=53068057. Kart: Wikimedia map CC BY-SA 4.0

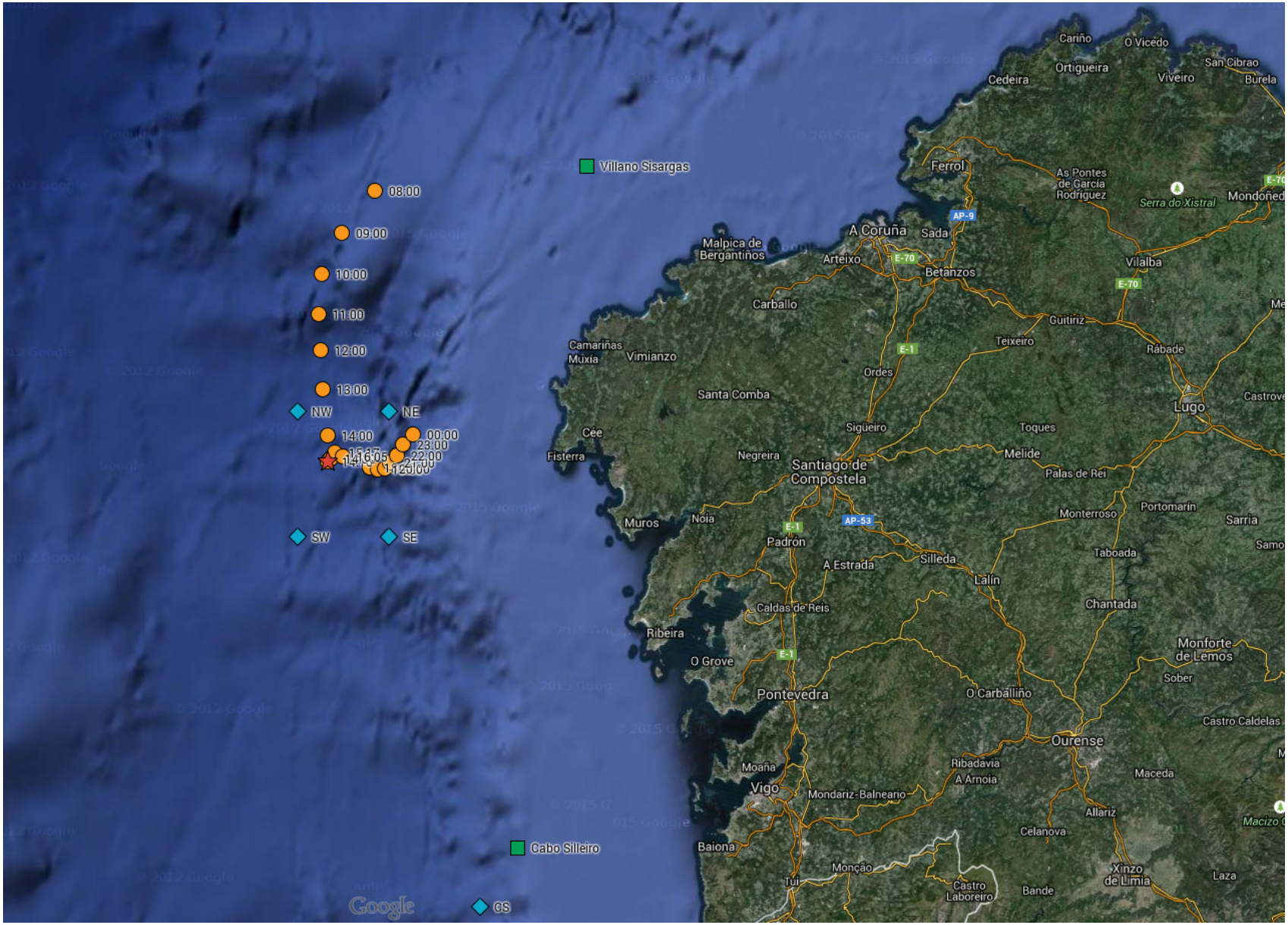
"Det var en helt alminnelig dag."

Henning Bruvik, kaptein på COSL Innovator

Plutselig ble riggen truffet av en bølge. Én av de ansatte omkom momentant da bølgen slo inn vinduet på lugaren.

Prestige-ulykken 13/11–2002 og den etterfølende katastrofen 19/11–2002 utenfor Spania

Ulykken: Prestige blir skadet 13 november 2002

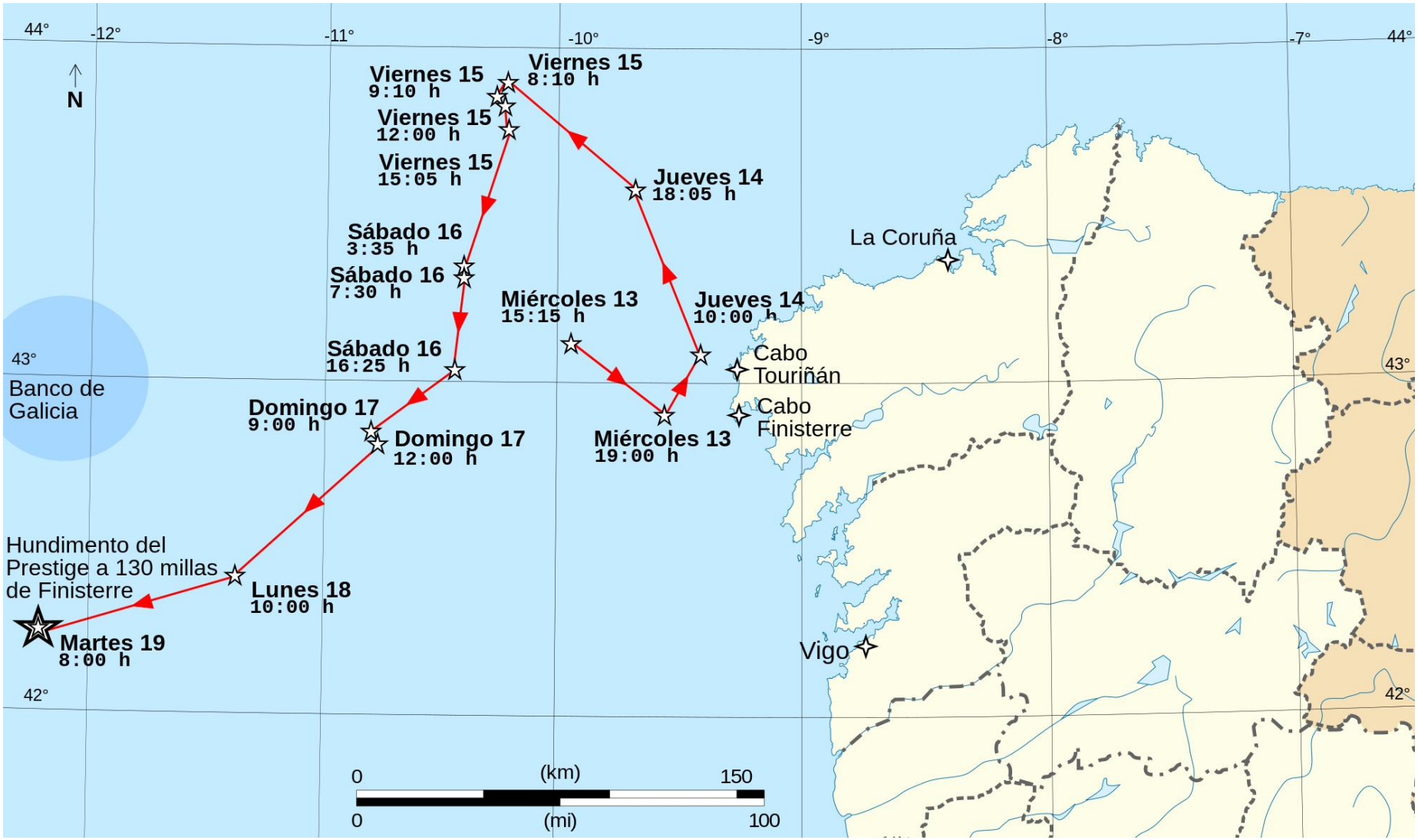


Etter ulykken: Prestige blir tauet vekk fra kysten



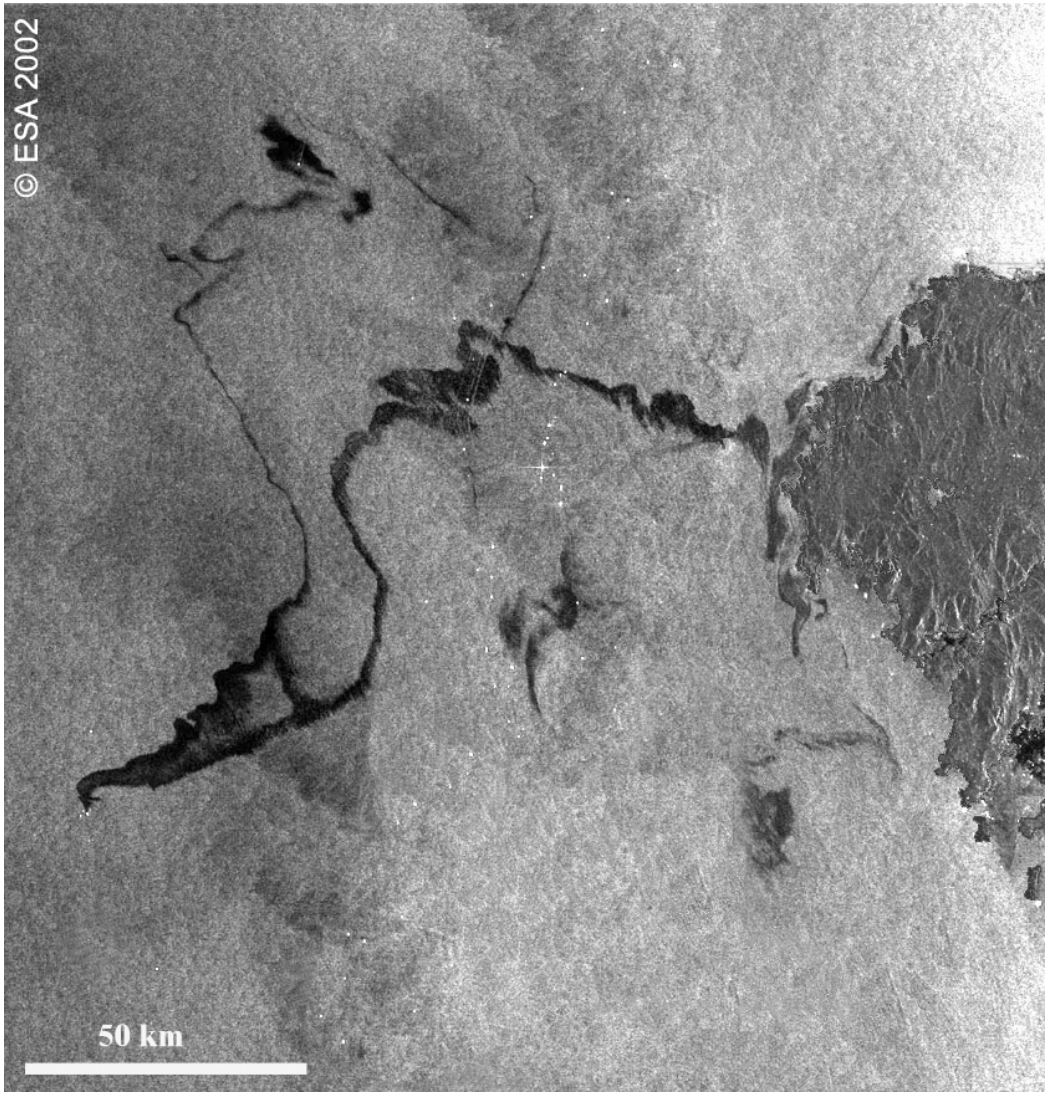
By Bahamas Maritime Authority - https://www.bahamasmaritime.com/wp-content/uploads/2017/06/Prestige.pdf, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=89095374

Etter ulykken: Prestige blir tauet vekk fra kysten



By Original source by Bourrichon Derivative work by Elisardojm Derivative work by Albertojuanse - Percorrido_Prestige.svg, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29629213

Katastrofen: Prestige synker midt ute i Atlanterhavet



By ESA, CC BY-SA 3.0 igo, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59274146

Katastrofen: Prestige synker midt ute i Atlanterhavet





De Viajero de Wikipedia en inglés - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=427480
By Adela Leiro - https://web.archive.org/web/20161026011331/ http://www.panoramio.com/photo/82859023, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22953241

Prestige sank ikke på grunn av en freak bølge!
Noen aviser presenterte dette helt feil!



18 | Aftenposten Junior

Sånn funker det

Ukens tema:
Freakbølger
Livsfarlige bølger

Freakbølger er store og plutselige bølger som oppstår langt ute på havet. Kan være farlig for store tankskip.

NY VITEN-SERIE

Heftig møte med freakbølge!

PRESTIGE

FOTO: RICHARD BEHN, NOAA

Oljetankeren Prestige ble delt i to av en kjempebølge i Atlanterhavet utenfor Spania i november 2002.

Bølgebeistene

Livsfarlige freakbølger oppstår brått og uventet på åpent hav. Det kan få dramatiske konsekvenser. Tekst: Kjetil Johansen / Åshild Skadberg

Hva er en freakbølge?
Freakbølger er mye større enn de andre bølgene de opptrer sammen med. Tenk deg Nordsjøen under en fryktelig storm. Nesten hver eneste bølge vil være ekstrem. Da vil en freakbølge under slike omstendigheter være ørusomt ekstrem.

Hvor lenge eksisterer den?
Veldig kort. Den oppstår plutselig, og etter noen få «bølgeperioder» er den borte igjen. På havet varer en bølgeperiode bare i 5–15 sekunder.

Hvorfor blir noen bølger så mye større enn de andre?
Forskerne tror én bølge stjeler

Kan freakbølger varsles på forhånd?
Ikke i dag, men forskerne jobber med saken.

Finnes det andre typer farlige kjempebølger?
Ja. Tidevannsbølger, som skyldes påvirkning fra månen og andre himmellegemer, kan bli både

Hvordan oppstår freake bølger? Kan de varsles?

To måter å angripe problemet:

- Deterministisk
- Stokastisk / statistisk

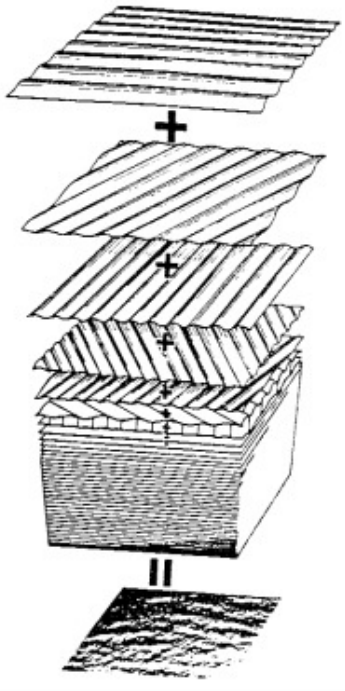
Vi som jobber med ekstreme bølger rendyrker ofte den ene eller andre angrepsvinkelen.

Om vi kombinerer de to kan vi få overraskelser — jeg skal vise tre eksempler.

En bedre forståelse krever begge synsmåter samtidig.

Stokastisk beskrivelse av "vanlig" sjø — Gaussisk prosess

Superposisjon av statistisk uavhengige bidrag



Pierson et al. (1958)

Sentralgrenseteoremet fra statistikk sier at havet er Gaussisk.

Dette medfører en mengde freake bølger i "vanlig" sjø.

Kan freake bølger forekomme oftere enn dette?

Schrödinger likning. Modulasjonsustabilitet. Pustere.

Enkel modell for å generere en freak bølge ut fra "ingenting"

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 seg store.

Pustere — en uskyldig havoverflate kan fokusere seg selv til en kjempebølge, og deretter roe seg ned til en uskyldig havoverflate igjen.

Peregrine puster

Varsling av freake bølger med BFI — Benjamin–Feir Indeks

$$\text{BFI} = \text{Benjamin–Feir Indeks} = \frac{\text{steilhet}}{\text{båndbredde}}$$

stor BFI impliserer sterk modulasjonsustabilitet

liten BFI impliserer lite modulasjonsustabiltet

BFI kan varsles, men metoden har ikke vært så vellykket som man hadde håpet

Bølger i motstrøm

Deterministisk beskrivelse: Bølger i motstrøm bremses og blir større

Stokastisk beskrivelse: Sannsynligheten for freake bølger i motgående jet-strøm er mindre enn på åpent hav uten strøm

Ph.D. arbeid til Karina Hjelmervik

Film fra Atlanterhavsveien



Bølger i motstrøm — konsekvens

- Skipskaptein liker å seile i medstrøm?
- Da vet vi at bølger som kommer mot skipet kan bli store.
- Blant slike bølger er det færre freake enn i "vanlig" sjø.
- Kapteinen blir mer ansvarlig dersom det 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)

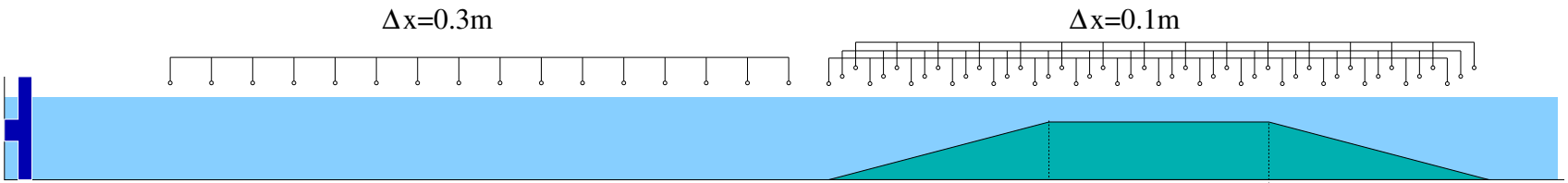
Linear refraction of waves on inhomogeneous current is known to provoke extreme waves. We investigate the effect of nonlinearity on this phenomenon, with respect to the variation of significant wave height, kurtosis and occurrence of freak waves. Monte Carlo simulations are performed employing a modified 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

Bølger over en grunne

Deterministisk beskrivelse: Bølger inn på grunnere vann bremses litt og blir litt større. Modulasjonsustabilitet blir betydelig svekket.

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

Masteravhandling til Anne Raustøl



En liten leksjon statistikk . . .

La η være en stokastisk variabel

Middelverdi $\mu = E[\eta]$

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

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

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

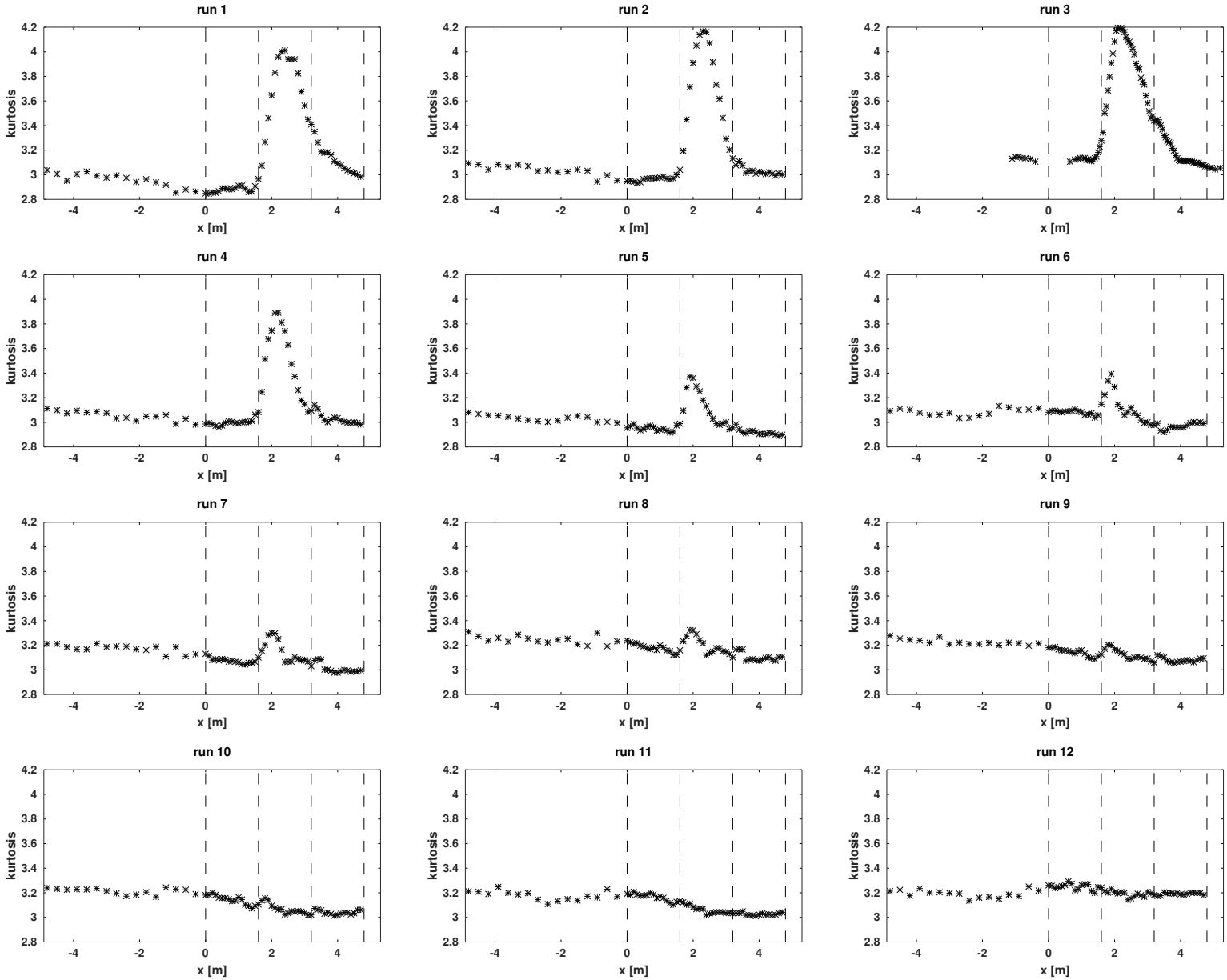
Kurtose $\kappa = \frac{E[(\eta-\mu)^4]}{\sigma^4}$

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

Enkleste kriterium for økt forekomst av freake bølger:

$$\kappa > 3$$

Bølger over en grunne — Kurtose til overflatehevning



Bølger over en grunne — konsekvens

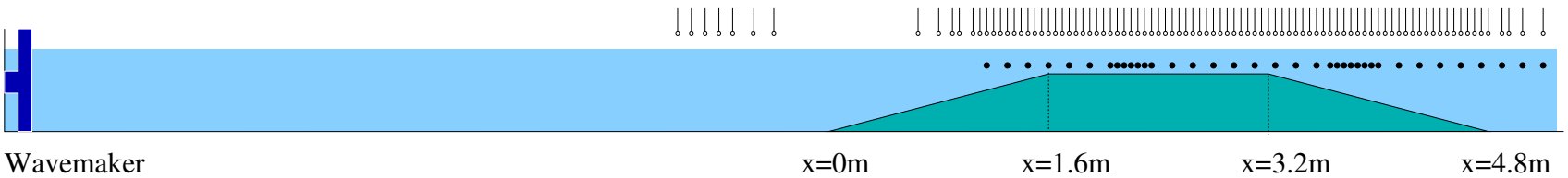
- Dersom en grunne er tilstrekkelig grunn kan den provosere betydelig økt forekomst av freake bølger.
- Fiskebanker er grunner ...
- Kystnære områder har mange grunner ...

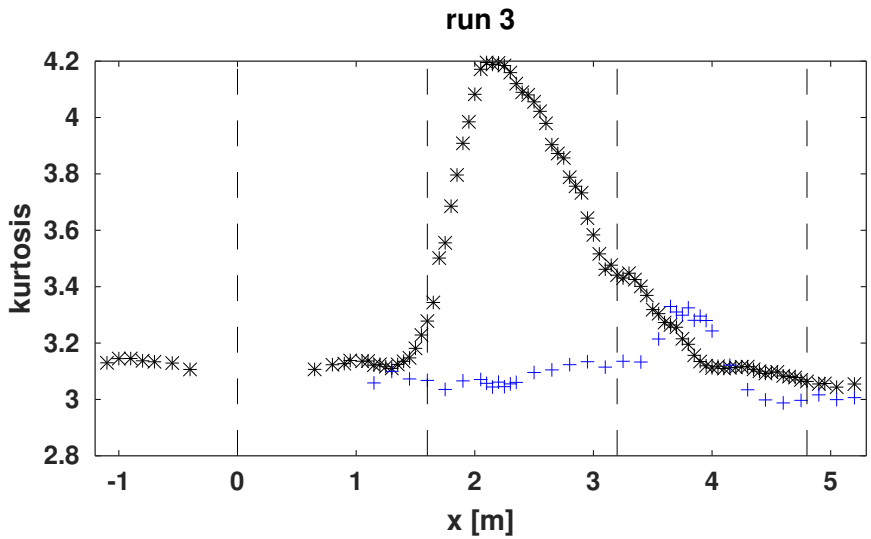
Overflatehevning og hastighetsfelt — over en grunne

Deterministisk beskrivelse: Overflatehevning og hastighetsfelt til bølger er låst til hverandre.

Stokastisk beskrivelse: Freake overflatebølger og freake hastighetsbølger skjer på forskjellig sted over en grunne.

Masteravhandling til Stian Jorde





Bølger over grunne

Arbeid til tre masterstudenter hvorav to 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

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

Konklusjon for Prestige — skuffende "vanlig" sjø

- Alle våre anstrengelser for å modellere sjøtilstanden når Prestige forulykket antyder at kurtosen var skuffende nær 3.
- Vi konkluderer derfor at ingen hadde noen grunn til å snakke om freake bølger under rettsaken.
- Dette til tross for at det aldri har vært snakket mer om freake bølger i noen 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*,

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

Konklusjoner fra grunna

- **Det kan være betydelig økning i kurtose, og derfor freake bølger, over toppen av grunna dersom den er tilstrekkelig grunn.**

- **Hastighetsfeltet kan ha statistiske egenskaper svært forskjellig fra overflatehevningen.**

- **Dette kan ha implikasjoner for offshore vindmøller, fiskeoppdrett og fiskeri.**

Konklusjoner fra bølger på strøm

- Skip bør ikke seile i medstrøm for å få ekstra fart.
- Da vet vi at bølger som kommer mot skipet kan bli store.
- Blant slike bølger er det færre freake enn i "vanlig" sjø,
- . . . og derfor lite unnskylding dersom det går galt.

Konklusjon fra arbeid i min gruppe

- Mekanikk er gøy
- Statistikk er gøy
- Kombinasjonen er **mer en dobbelt så gøy**
- Deterministisk og stokastisk beskrivelse kan i mange tilfeller gi motsatt konklusjon, det er tryggest kombinere dem og beherske begge

Som masterstudent kan du komme nær forskningsfronten, spesielt med eksperiementell oppgave.

I det foregående har jeg spesielt vist bidrag fra:

- Anne Raustøl — Lektorstudent
- Stian Jorde — Lektorstudent
- Karina B. Hjelmervik — Ph.D. student
- Odin Gramstad — Master og Ph.D. student og Postdoc