



Monsterbølger: myte eller virkelighet?

En utfordring til sjøfarende og matematikere

Alastair D. Jenkins

Geofysisk institutt, UiB

Alastair.Jenkins@gfi.uib.no

<http://www.gfi.uib.no/~jenkins>

Takk til bl.a.:

- Mine tidligere kollegaer i EU-prosjektet «Maxwave», fra Met.no, DnV, GKSS, DLR
- Statoil v/Sverre Haver
- Kristian Dysthe, Hervé Socquet-Juglard (UiB), Karsten Trulsen (UiO), Harald Krogstad (NTNU)

Innledning

- Havet har vært arbeidsplass i mange tusenår
 - ikke uten fare



(Foto: NOAA)

Havfiske

[Loddefisket i Barentshavet, M/S *Rav*, 2003,

<http://www.fiskeri.no/Video/Loddefiske.htm>]

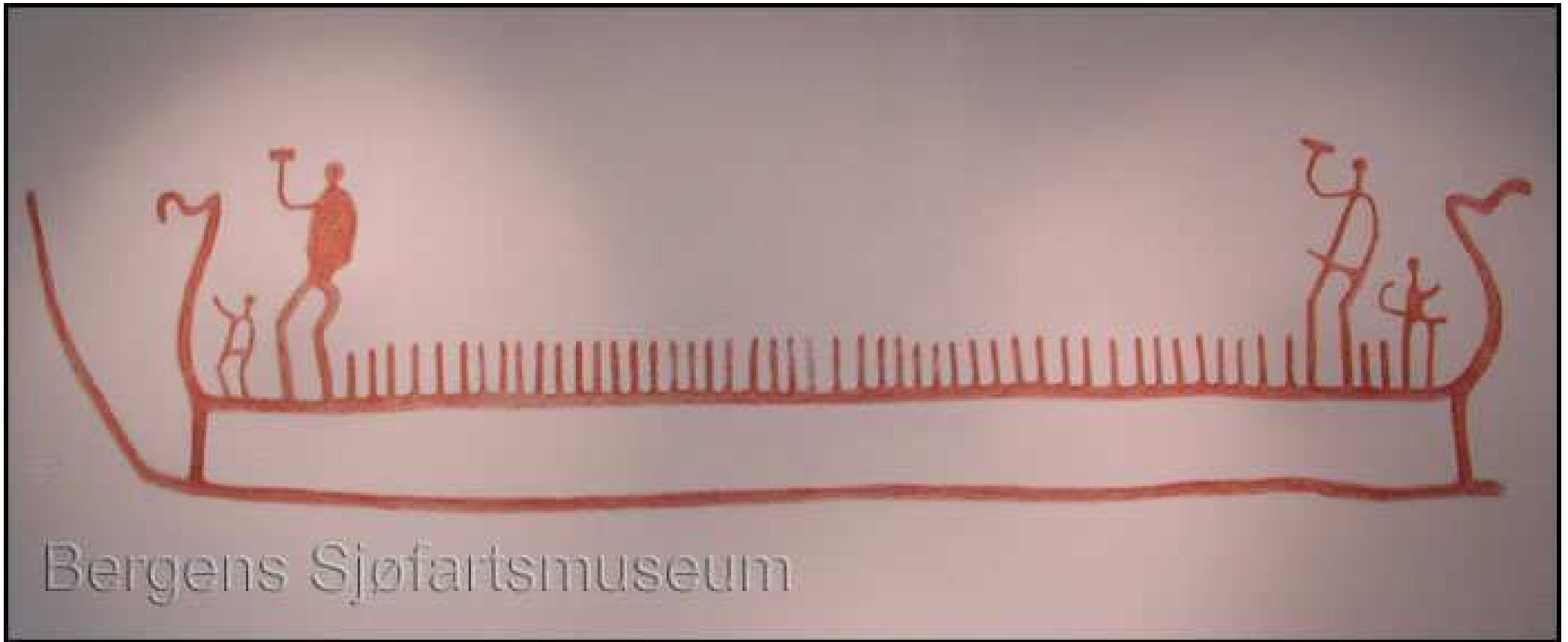
Oljerigg

[Kent-Eivin Austevoll, fra *Transocean Arctic*, 2006,
<http://www.fiskeri.no/Video/Storm.htm>]

Underholdning

[<http://www.archive.org/details/808Talk-808TTVE46GetSomeSurf477>]

Sjøfart



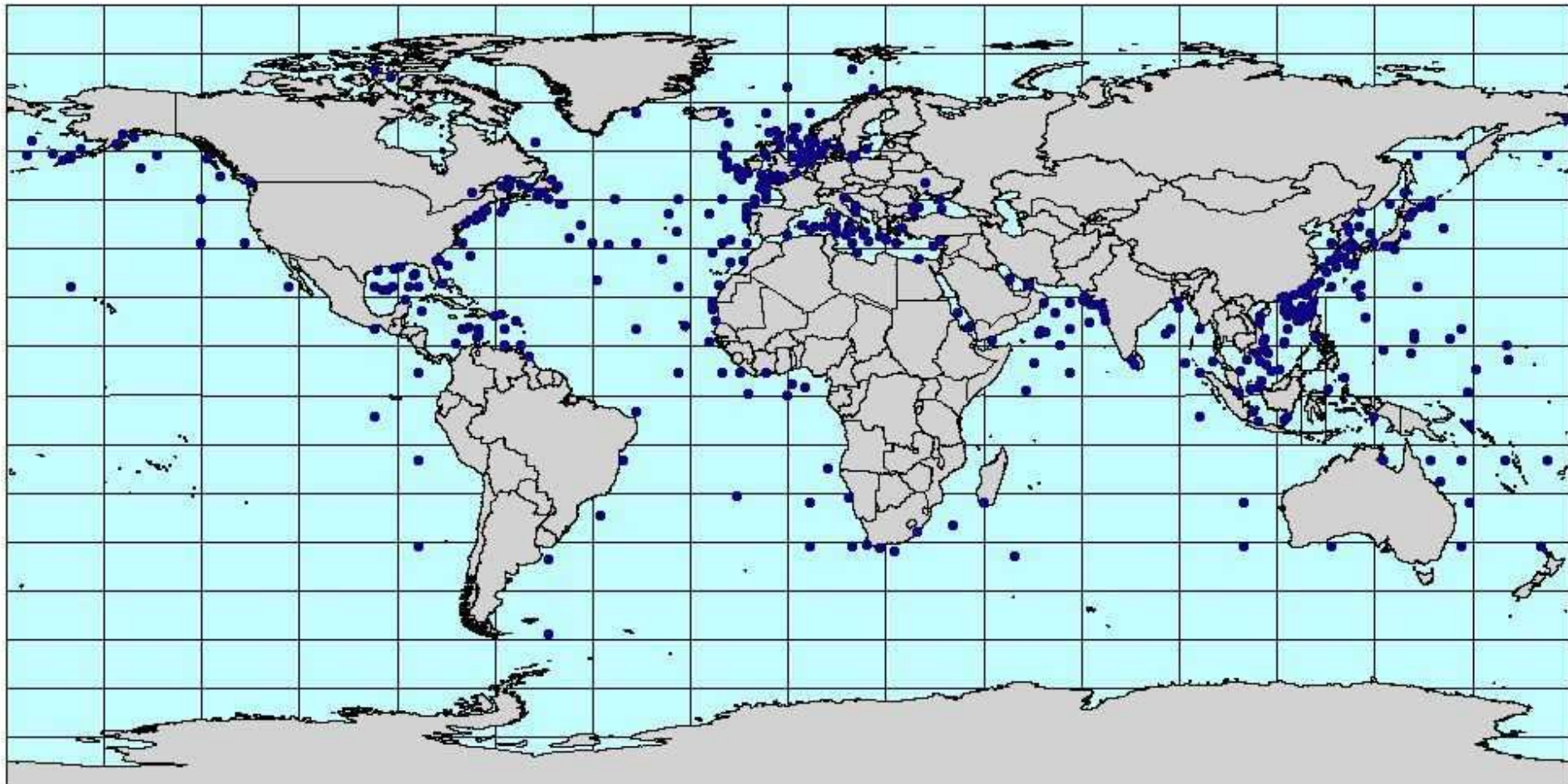
Kopi av helleristning fra bronsealder. Originalen er i Skjeberg, Østfold.

(<http://www.bsj.uib.no/utstillingene/eldstesjo.shtml>)

Skip som blir skadet, forliser, eller forsvinner

- Kjente farlige områder ved kysten (grunner, sterk strøm, ...)
- I dyphavet kan fartøyer bare «forsvinne».
- Neste side: kart fra rapport i EU-prosjektet «Maxwave» (<http://w3g.gkss.de/projects/maxwave/>), som viser steder der det ble rapportert skader pga. «severe weather conditions». I sjeldne tilfeller ble det rapportert «freak wave damage».

World Wide Ship Accidents (1995-1999)



0 4000 8000 Kilometers

SOURCE: Lloyd's Maritime Information Services (LMIS),
Casualty Data Base and Lloyd's Casualty Report



- Ship Accidents
- Continent
- Ocean

Eksempler

- Oktober 1903, NV-Atlanterhavet *RMS Etruria*, skader fra bølge > 15 m.
- 1933, N-Stillehavet, *USS Ramapo*, bølge ≈ 34 m
- 1942, NØ-Atlanterhavet, *RMS Queen Mary*, bølge 28 m.
- 1966, NV-Atlanterhavet, *Michelangelo*, bølgekam 24 m.
- 1995, N-Atlanterhavet, *RMS Queen Elizabeth 2*, 29 m.
- 2001, S-Atlanterhavet *Bremen* og *Caledonian Star*, bølgekam ≈ 30 m.
- 2004, orkan Ivan, bunntrykkmålinger fra Mexicogolfen, maks. observert bølgehøyde 27,7 m. (Wang et al., *Science*, 5. august 2005). Forfatterne mente at maks. bølgehøyden i stormen var ca. 40 m.

- I år: Skagerrak, 20. januar 2007

(<http://web3.aftenbladet.no/lokalt/article401110.ece>):

Color Lines ferje «Prinsesse Ragnhild» lå sent i går kveld med vinden i Nordsjøen og fikk reparert de to vinduene i konferanseavdelingen forut i båten. Det var ei kraftig bølge som slo over båten og knuste vinduene. Restaurant- og konferanseavdelingen er stengt ombord.

–Vannet fosset inn og ned trappene på flere dekk. Veldig mange om bord synes det var ubehagelig - og enkelte barn ropte at de trodde vi skulle drukne.

Konferanseavdelingen er nå full av vann, forteller Petter Toftøy-Andersen til Aftenbladet.no.

Bevis?

(Data: Statoil)

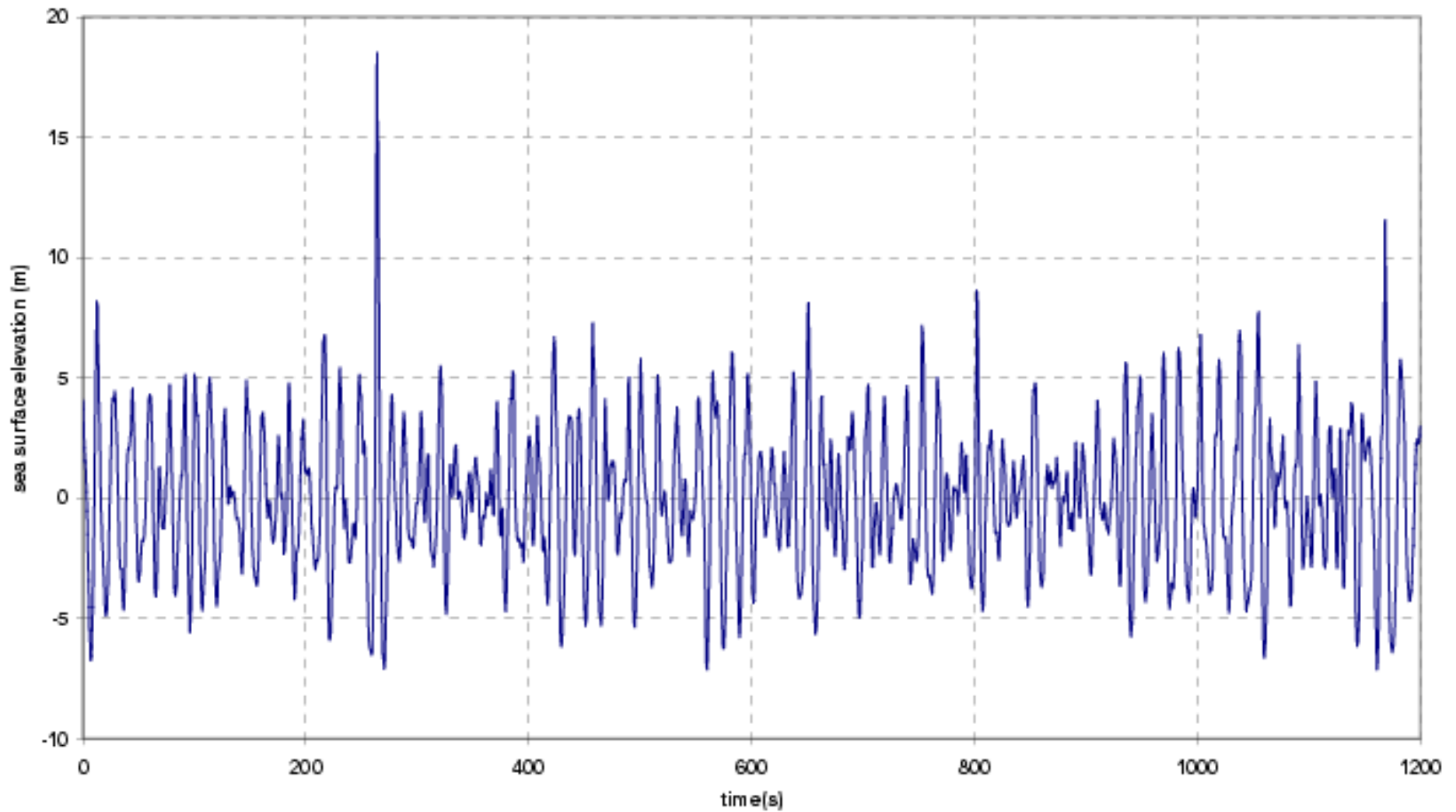


Figure 2.1: Time series recorded at “Draupner”, January 1, 1995 at 15:20

(Data: Statoil)

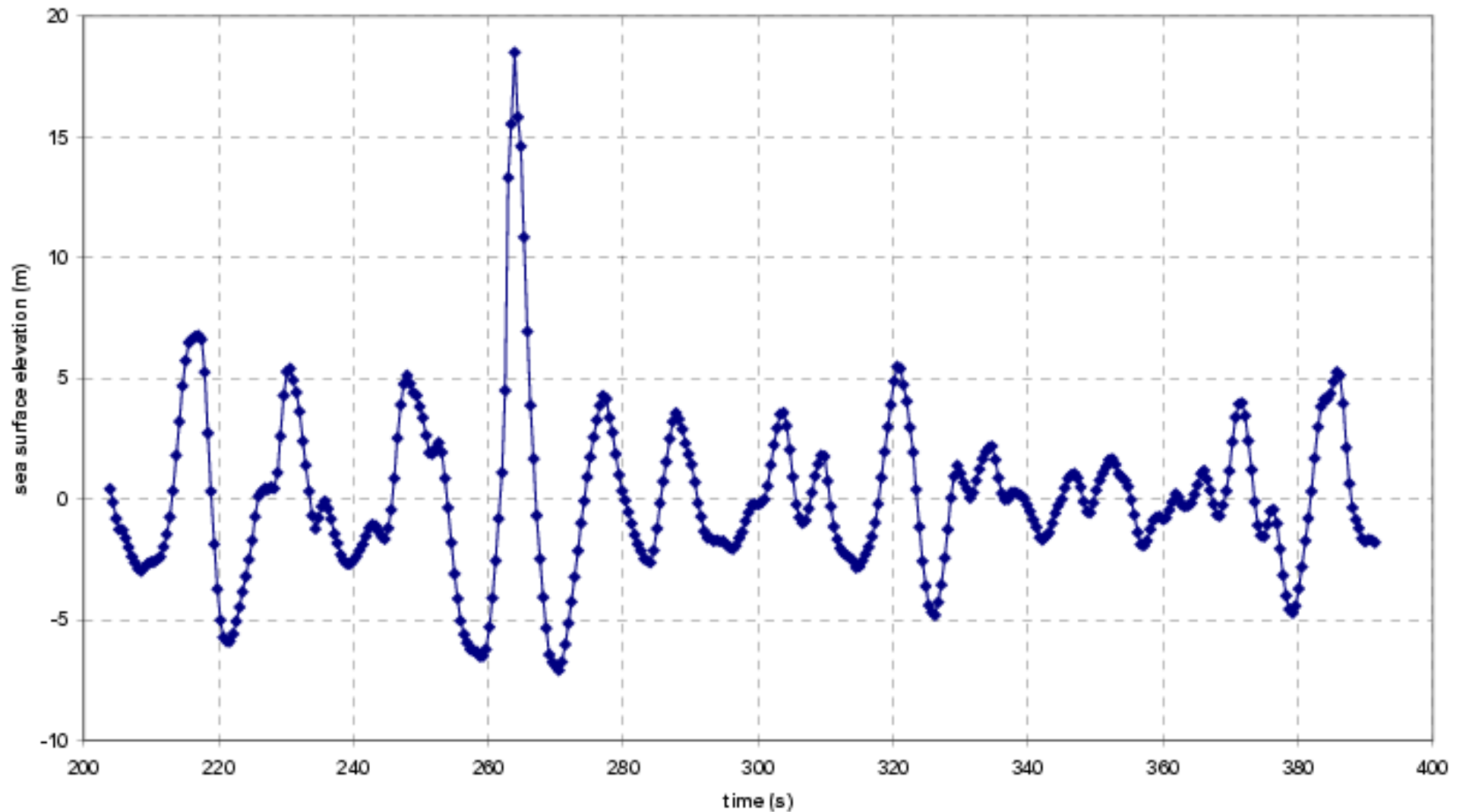


Figure 2.2: Extract from time series recorded at “Draupner”, January 1, 1995 at 15:20

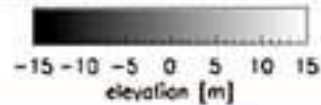
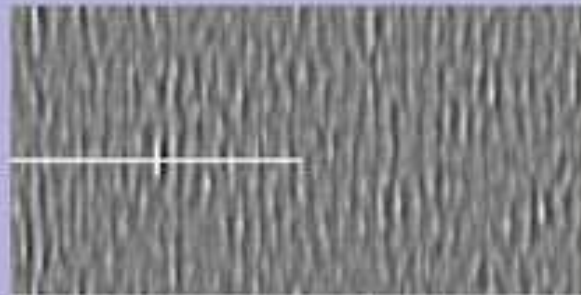
- According to Sverre Haver:

The extreme pattern of this wave event is its asymmetry about the still water level. The crest height reaches about 18.5m above still water level. For the actual area, the crest height occurring with an annual probability of 10^{-4} (i.e. 10000-year crest height) was at that time estimated to be 19.5m. This means that the crest event was not beyond design parameters, but we did not expect such a wave to occur for a significant wave height of 12m. None of our basic engineering approaches suggest the possibility of such a crest height for a 12m sea state.

Possible detection by space radar instruments

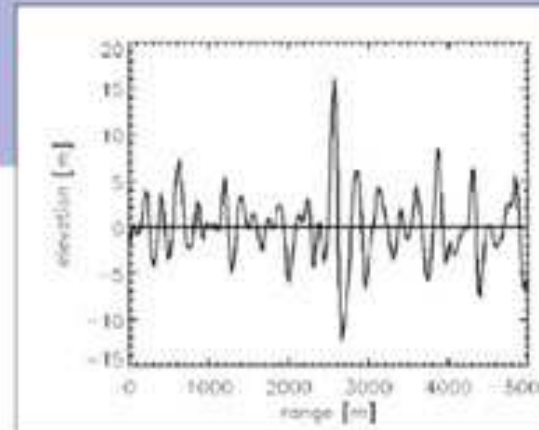
ERS-2 SAR Detected Extreme Wave

Aug 20, 1996, 22:51:17 UTC, 44.6 S, 7.1



$H_{\text{max}} = 29.8 \text{ m}$

$H_{\text{max}} / H = 2.9$



Årsaker til «monster-», «freak-», eller «rogue-» -bølger?

- Kombinering av bølgekomponenter med forskjellige frekvenser og/eller retninger
- Fokusering: refraksjon pga. bunntopografi og strømmønstre
- Ikkelineære effekter:
 - Småperturbasjoner av 2. og høyere orden
 - «Solitoner»
 - Store perturbasjoner (bølger som bryter eller nesten bryter)

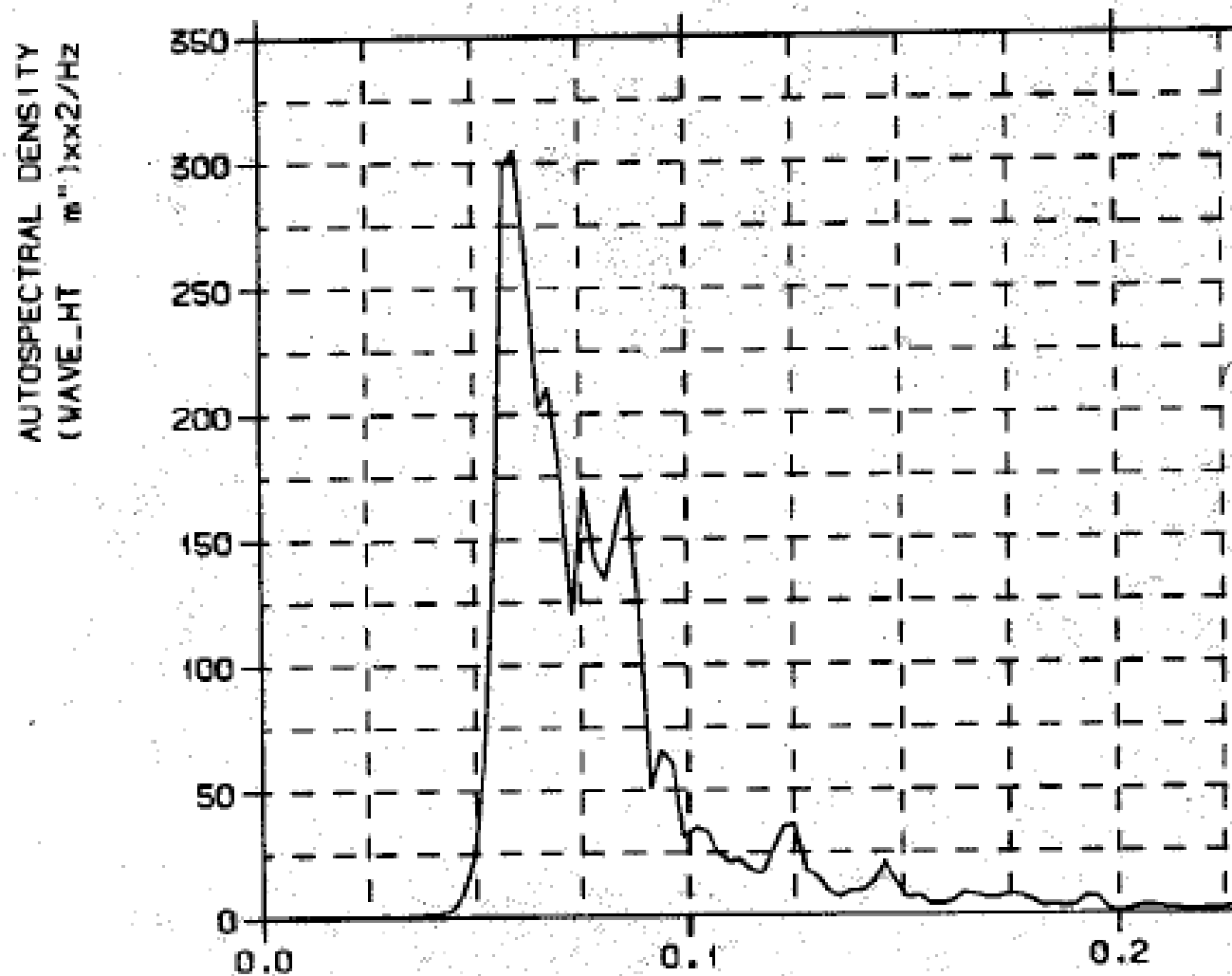
Lineære kombinasjoner, bølgespektere, Fourieranalyse

- *Hipparkos* fra Nikea (ca. 190–120 f.Kr.) brukte *episykler* til å beregne ikke-sirkulære planetbaner:

$$f(t) + ig(t) = (a_1 + ib_1)(\cos \omega_1 t + i \sin \omega_1 t) + (a_2 + ib_2)(\cos \omega_2 t + i \sin \omega_2 t) + \dots$$

- Episyklusmetoden også anvendt av *Copernicus* i sin gjeninnføring i 1500-tallet av *Aristarchus*' heliosentriske teori.
- *J. B. J. Fourier* i sitt verk *Théorie analytique de la chaleur* (1822) brukte denne rekkeutviklingen også for ikke-deriverbare funksjoner.
- Hvis man legger sammen uendelig mange statistisk uavhengige sinusfunksjoner med uendelig små amplituder (uten å være rigorøs!!) kommer man fram til en *gaussisk prosess* med et *kontinuerlig Fourierspektrum*.

Bølgeenergi(-varians-)spekteret for «Draupnerbølgen» 1.1.1995, 15:20



(Frekvens / Hz)

Høye bølger er vanligere enn du tror

Fra dr.scient.-oppgaven til Hervé Socquet-Juglard (<https://bora.uib.no/handle/1956/1103>)

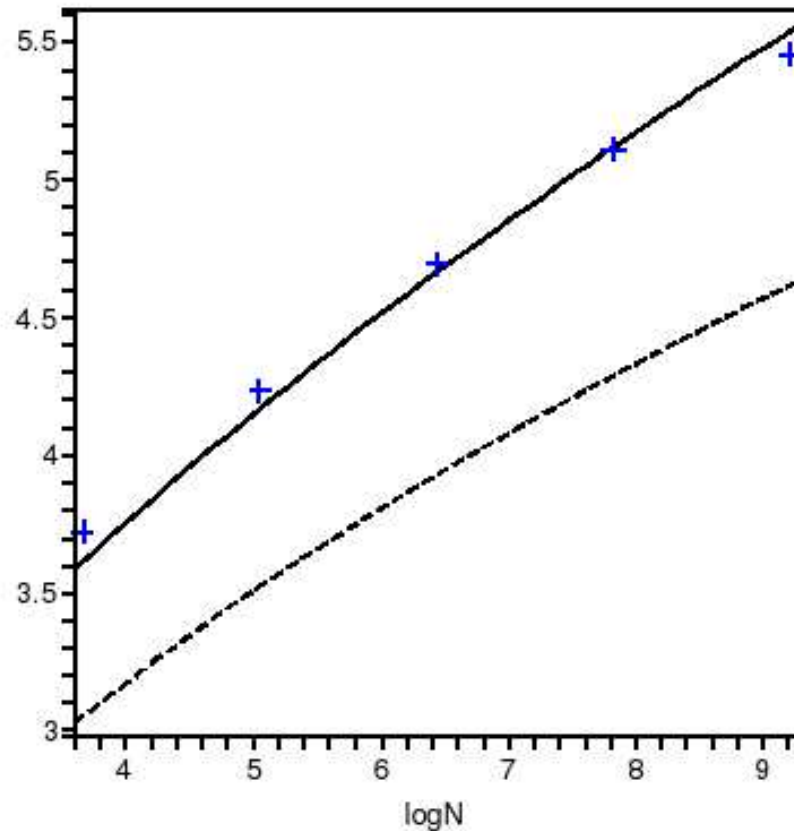


Figure 24: The average largest surface elevation of scenes containing N waves. Full curve : Expected value of η_m according to the asymptotic Gumbel limit of the Piterbarg-Tayfun distribution. Dashed curve : Expected value of η_m according to the Gaussian distribution. Crosses : Simulations. The sizes of the scenes in term of the number of "waves" go from 40 to 10.000.

Metoden som ble brukt

- K. Dysthe, K. Trulsen, og H. Socquet-Juglard brukte følgende metoder:
 - Den teoretiske fordelingen av bølgehøyde: Piterbarg–Tayfun-fordelingen, som er basert på *M. S. Longuet-Higgins'* analyse av bølgehøydefordelingen for lineære bølger (gaussisk prosess), men tar hensyn til 2. ordens effekter, dvs. ledd som \propto den kvadrerte bølgeamplituden (eller *bølgesteilheten*, = amplitude / bølgetall = $\pi \times$ bølgehøyde/bølgelengde)
 - Numeriske simuleringen av hvordan *bølgeamplituden* utvikler seg. Man løser en modifisert form av den ikkelineære Schrödingerligningen.
 - Resultatene viser at en gitt ekstrem bølgehøyde (eller bølgekamhøyde) blir ca. 100 ganger mer sannsynlig enn hvis man anvender den «vanlige» teorien for gaussiske prosesser. Da blir en «10.000-årsbølge» en «100-årsbølge».

Einstein og Schrödinger

- Schrödinger foreslo følgende ligning for å forklare elektronets oppførsel:

$$i\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + V(x)\psi$$

(her bruker vi kun 1 dimensjon, og velger rom- og tidenheter slik at Planck-konstanten blir 2π og elektronmassen blir 1)

- *Max Born* tolket $|\psi|^2$ som elektronets *sannsynlighetsfordeling*
- *Einstein* skal ikke ha trodd at «Gud» kunne «spille terninger», så forkaster vi kvantemekanikk. (Maxwells bølge-ligninger er relativistisk invariant.)
- Da kommer vi tilbake til klassisk mekanikk. Det viser seg at *amplituden* A av vannbølger tilnærmet tilfredsstillende følgende ligning:

$$i\frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + |A|^2 A$$

Denne ikke-lineære Schrödinger ligningen har en del interessante egenskaper:

- Bølgegrupper som propagerer uten å endre form («envelope solitons»)

– Lange bølgetog er ustabile og brytes opp («Benjamin-Fejr ustabilitet»)

– ...

slik at de høyeste bølgene blir noe høyere enn i et tilsvarende lineært system

Hva skjer når bølger blir store?

- Hvis væskestrømningen er *virvelfri*:
 - for periodiske bølger i dyptvann som så vidt bryter blir amplitude \times bølgetall ≈ 0.42
(bølgehøyde/bølgelengde ≈ 0.142)
 - vinkelen i bølgekammen blir 120 grader
 - observert av matematikeren G. G. Stokes ved «Giant's Causeway» i Nordirland
 - *Longuet-Higgins* benyttet seg av de tilnærmede løsningene «pendelmodellen» og «sekskantransformasjonen»
 - En båt med kjøll som ligger parallelt med bølgekammen kunne vippes over

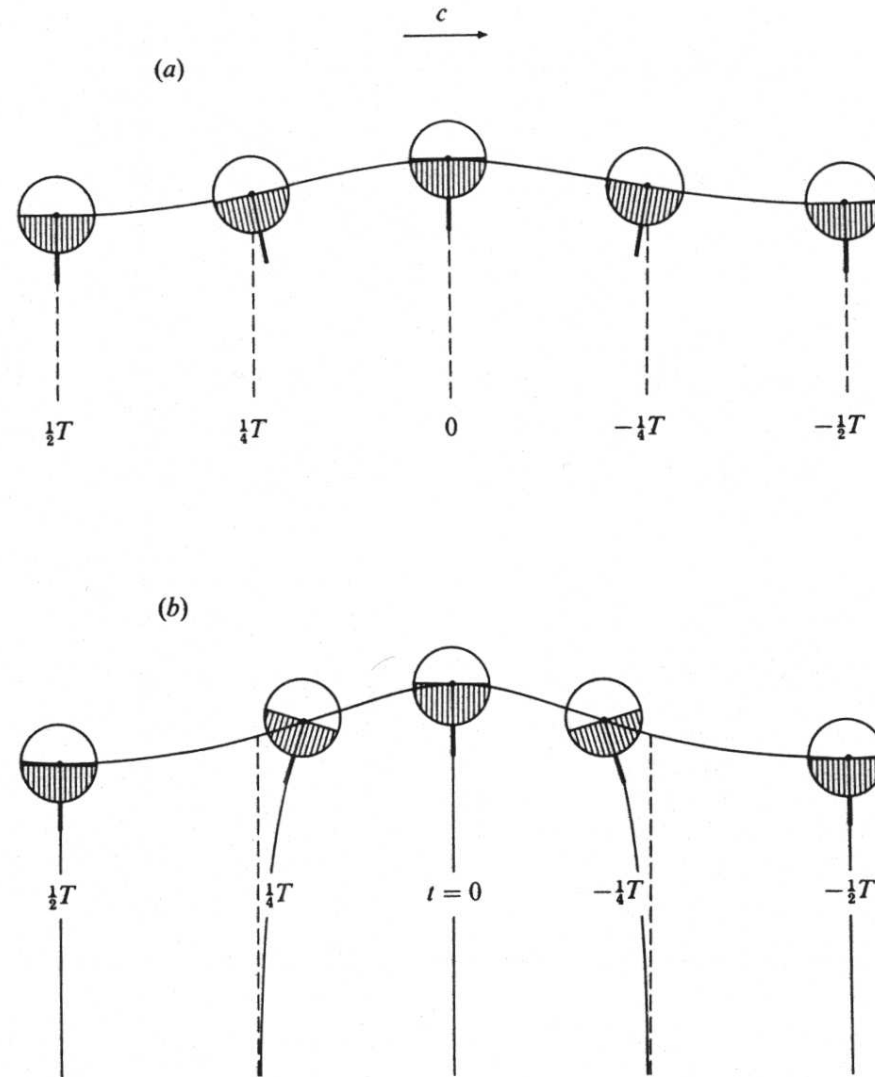


FIGURE 21. Types of rolling motion for a floating cylindrical hull: (a) hydrostatic, (b) inertial.

(Longuet-Higgins, *J. Fluid Mech.* 173:683–707)

- Og så kan bølgene bryte:

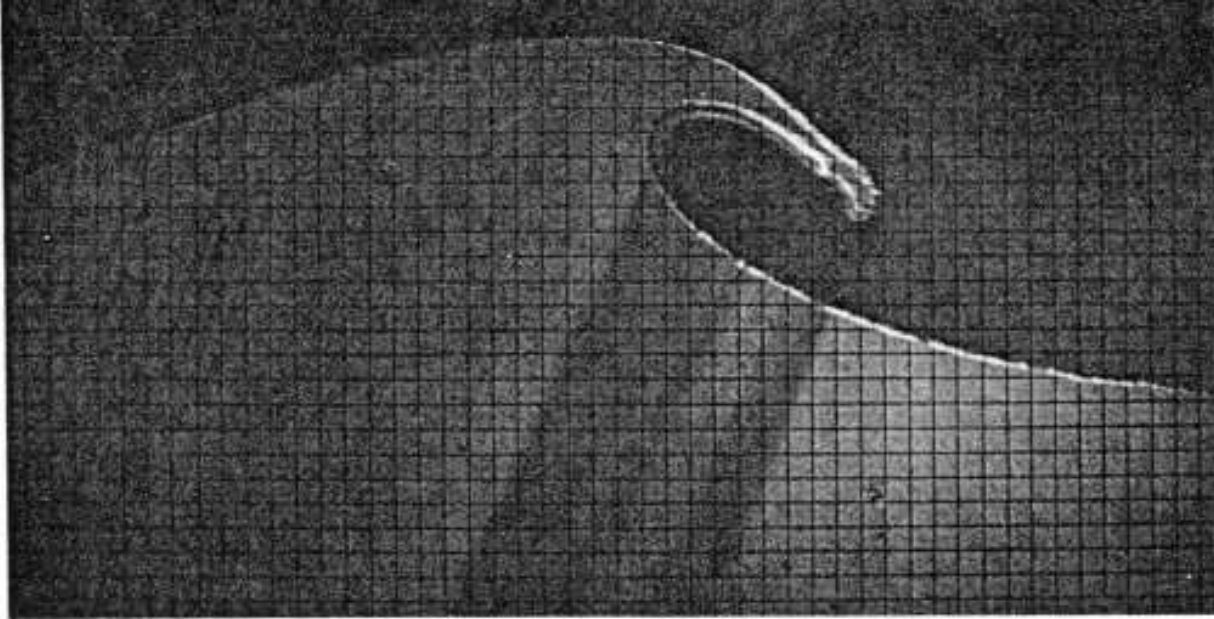


FIGURE 1. Profile of a plunging breaker (from Miller 1957).

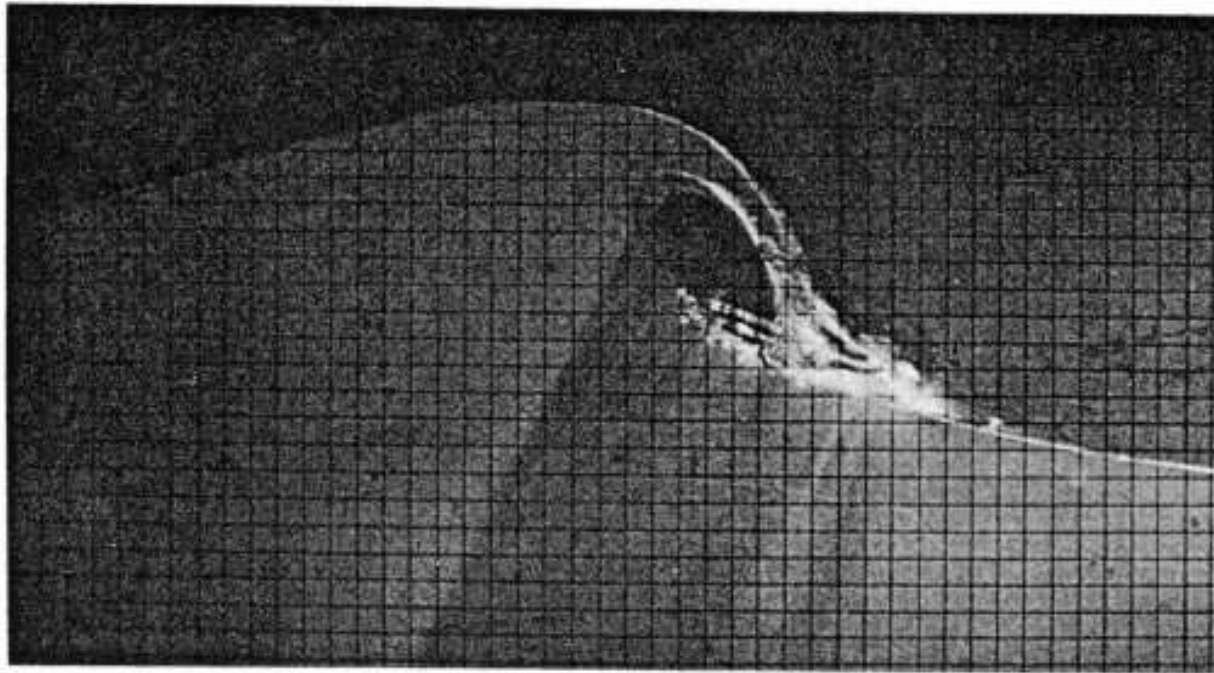
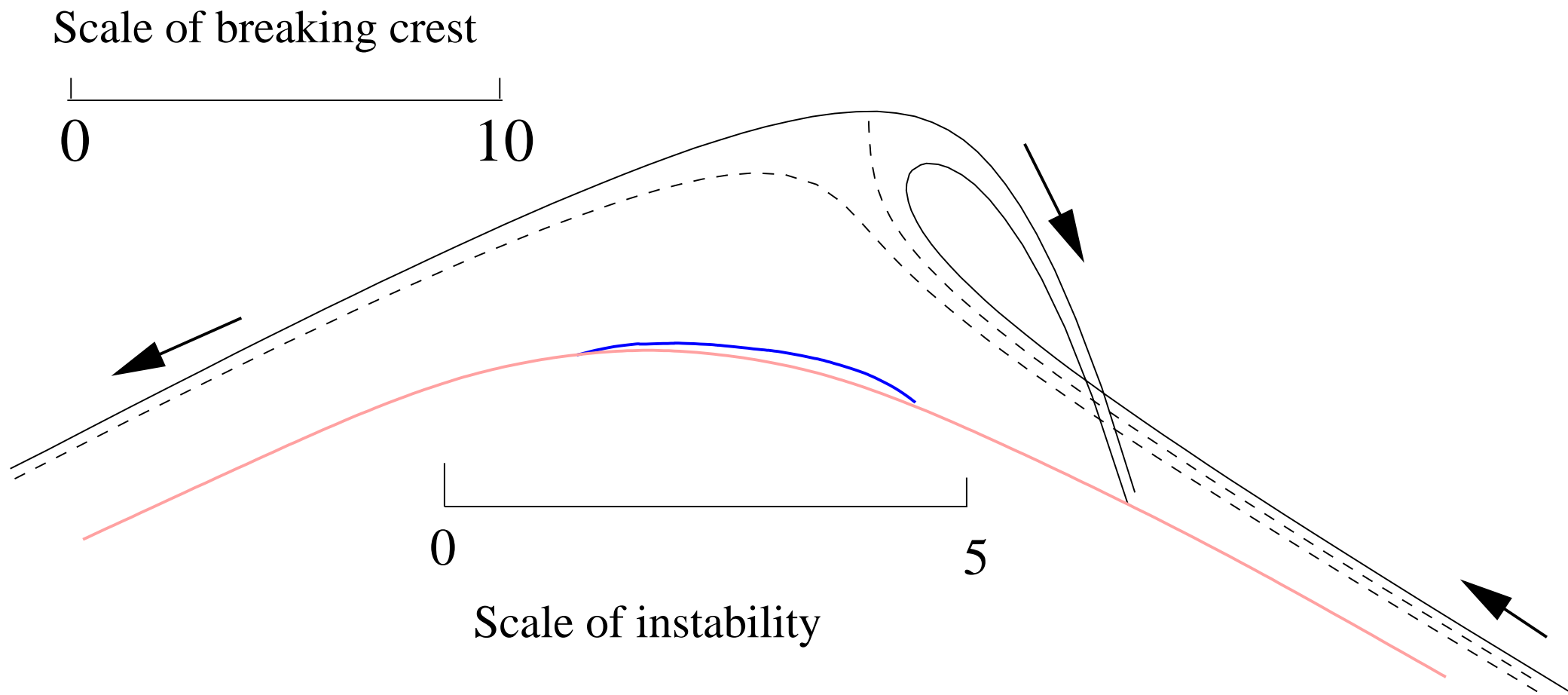


FIGURE 2. Tip of a plunging breaker striking the forward face of the wave (from Miller 1957).

R. L. Miller 1957 in *Beach & Nearshore Sedimentation* ed. Davis & Ethington, cited in Longuet-Higgins JFM 1982

Kvasistasjonær strømning i en brytende bølgekam

- Fellestrekk for brytende bølgekammer: stagnasjonspunkt og vannstråle
- Konform avbildning i det komplekse planet (Jenkins, J. Fluid Mech. 1994)
- Sitter på en «Stokes corner flow»
- Valgfritt målestokk: lengde- og hastighetsskalaene øker med vannfluks i strålen ($2/3$ - og $1/3$ -potens)
- Liten skala: «spilling breaker». Stor skala: «plunging breaker»



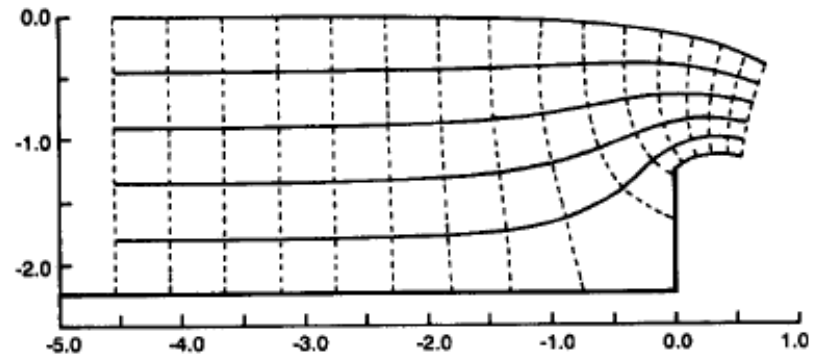
Brytende bølgekam fra Jenkins 1994 JFM og voksende instabilitet fra Jillians (1989) og Longuet-Higgins & Cleaver (1994).

Beslektede strømninger

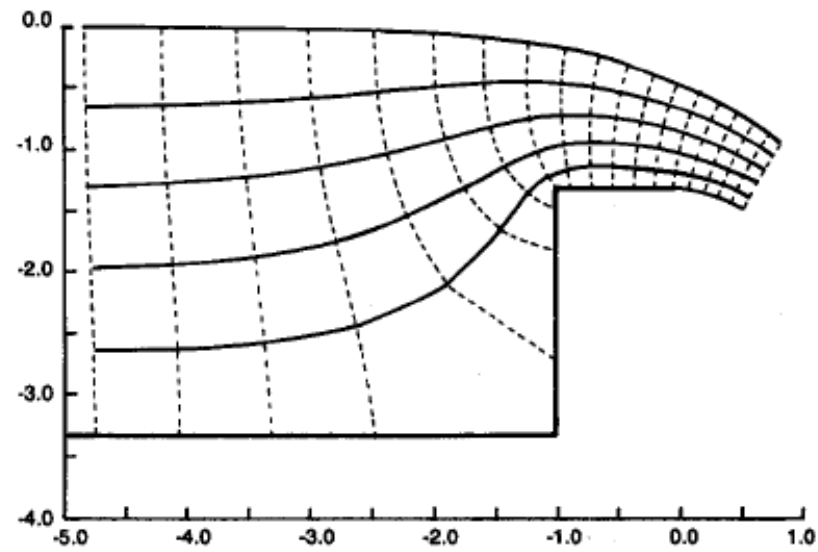
Strømninger med fri overflate og tyngdeakselerasjon

- Sluser
- Tekanner
- ...

Dias et al., Phys. Fluids (1988), «Flows over rectangular weirs»



(a)



(b)

Vanden-Broeck & Keller, Phys. Fluids (1986), «Pouring flows»

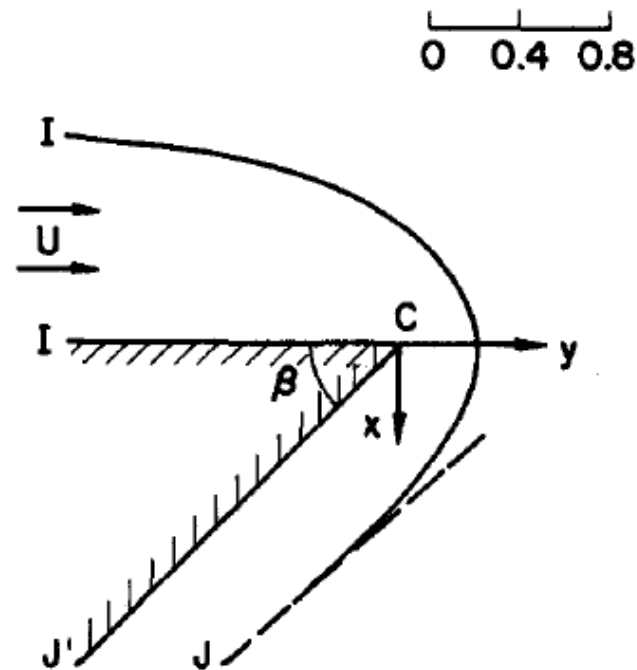


FIG. 4. The teapot effect flow over a wedge-shaped lip of angle β . The points I and J are at infinity on opposite sides of the wedge. The flow along the horizontal wall has thickness H and velocity U at I . The x, y coordinates have their origin at C , the vertex of the wedge, with x increasing in the downward direction and y increasing horizontally to the right. The streamline shown was computed by the method of Sec. II with $F^2 = 1.3$ and $\beta = \pi/4$.

(Dette arbeidet, som kan forklare hvorfor tekanner ikke alltid fungerer, fikk en humoristisk «Ignobel-pris» i 1999!)

Oppsummering/konklusjon

- Ekstreme havbølger eksisterer og kan gjøre store skader
- men ser ut til å kunne forklares med «dagens teknologi».
- Forskere fra klassisk tid til nåtiden har bidratt til forklaringen
- ikke minst norske og bergenske forskere
- Kunnskapen blir nyttig i andre bransjer, f.eks. hotell- og restaurantnæringen.