

# Tsunamibølgens voldsomme kraft

## - fysiske karakteristika

Af civilingeniør Bettina M. Christiansen, DMI

I Japan er tsunamier en velkendt naturkraft. Ifølge statistikken forekommer ca. 17 % af verdens tsunami-hændelser i Japan. Navnet Tsunami er da også japansk og betyder "havnebølge" (udtales soo-n'a-mee). Fejlagtigt bliver tsunamibølger også kaldt for tidevandsbølger. Men tsunamibølger er ikke at sammenligne med tidevandsbølger, som er drevet af tyngdekraften mellem jorden og månen.

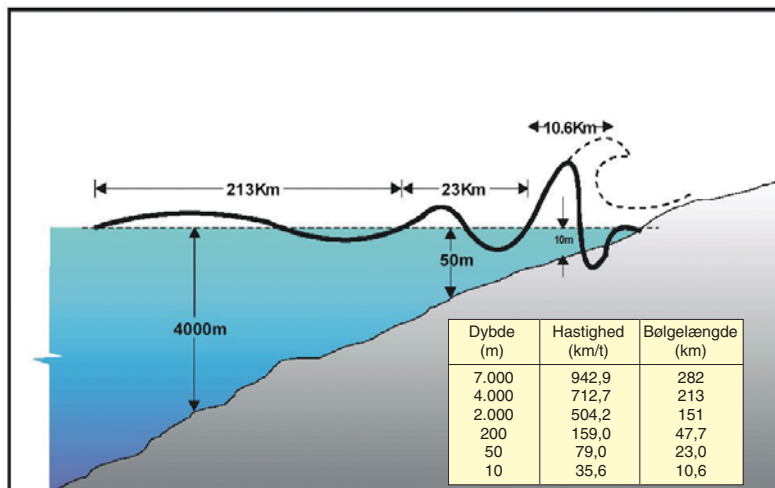
Tsunamibølger kan bl.a. genereres på grund af seismiske forstyrrelser i undergrunden og havbunden – som en følge af undersøiske jordskælv. Endvidere kan tsunamibølger blive dannet som følge af jordskred, vulkanudbrud, eksplosioner og sammenstød/nedslag fra meteorsten og asteroider. Altså ikke seismiske hændelser som jordskælv.

Når en tsunami først er blevet udløst via et jordskælv eller andre tsunami-dannede kilder, vil den forplantes og transportere destruktiv energi tusinde af kilometer væk fra dens kilde gennem bølgebevægelse, indtil den når kystlinier, hvor det sidste stadium af tsunamibølgens udfoldelse begynder, når den støder på grund som en brydende bølge.

Den vil vise sig som en væg af vand eller et tidevandslignende højvande og oversvømme land. Den vertikale såkaldte "run-up" kan blive 10 meter eller mere. Den horizontale oversvømmelse kan trænge flere hundrede meter ind over landeområder, hvis den er uhindret af kyst eller andre stejle topografier.



Tsunami-advarselsvejskilt ved Takatoyo-stranden på Enshu-kysten, Japan. (Kilde: H. Chan-son, S. Aoki og M. Maruyama, 2003)



Bølgehøjde og vanddybde: På det åbne ocean, hvor vanddybden er stor, er en tsunamis bølgehøjde mindre end en meter, men forøges hurtigt, når den nærmer sig lave vanddybder. Tsunamien sætter havet i bevægelse fra havoverfladen til havbunden. Når bølgen rammer kysten, bliver dens energi koncentreret på meget mindre dybde, så der opstår dramatiske høje, destruktive og livstruende bølger. (Kilde: International Tsunami Information Center (ITIC))

### Når jordskælv danner tsunamibølger

Når et jordskælv udløses på havbunden, forskydes dele af havbunden opad, mens en anden del af havbunden synker ned. Der dannes en perturbation på havoverfladen, hvor formen af havoverfladen afspejler de nye konturer af havbunden – dvs. et vandareal bliver skubbet opad og et andet vandareal synker. Dette sætter en serie af bølger i gang, som er begyndelsen på en tsunami. Bølgerne breder sig i koncentriske cirkler ligesom de ringe, der dannes, når man kaster en sten i vandet.

### Tsunamier adskiller sig fra andre bølger

På bølgeperioden – det vil sige, tiden mellem to efterfølgende bølger – adskiller tsunamibølger sig fra andre bølger. Vindgenerede bølger har sædvanligvis bølgeperioder på omkring 5-20 sekunder, mens en tsunamis bølgeperiode kan være lige fra 10 minutter til et par timer. Endvidere er vindgenerede bølgers bølgelængde (afstand mellem to efterfølgende bølgetoppe) kun omkring 100-200 meter, hvorimod tsunamiers bølgelængder typisk er fra 100-500 kilometer på dybt vand.

Imodsætning til vindgenerede bølger, som kun sætter havet i bevægelse ved havoverfladen, sætter tsunamier havet i bevægelse fra havoverfladen og helt ned til havbunden. Dette betyder blandt andet, at dykkere ikke kan mærke en stormbølge, mens

tsunamiers voldsomme kraft, der jo forplanter sig hen over havbunden, kan være livstruende for dykkere, hvis de bliver fanget i bølgens cirkelbevægelse og derved suget op og ned i vandsøjlen. En for hurtig nedsynkning og opstigning i vandsøjlen kan forårsage, at dykkerne får dannet kvælstofsbobler i blodet. Kvælstofsbobler i blodet kan medføre lammelse af nervesystemet og i værste fald forårsage blodpropper og hjertestop. Bliver en dykker fanget i en nedadgående strøm i den cirkulære bølgebevægelse og derved suget ned til fx 60 meters dybde eller dybere, vil der kunne opstå iltforgiftning og en såkaldt dybderus, hvor kvælstofophobningen i blodet får en narkotisk virkning på kroppen. Under tsunamien den 26. december 2004 i Det Indiske Ocean oplevede dykkere på 30 meters dybde, at de blev kastet rundt i vandsøjlen – som befandt de sig i en vaskemaskine. For eksempel er der rapporteret om dykkere, som på få sekunder blev suget fra 16 meters dybde op til 1,5 meter under vandoverfladen og derefter igen ned på 30 meters dybde. Dykkerne blev således fanget i bølgens cirkelbevægelse.

Tsunamiers lange bølgelængder kombineret med, at deres bølgehøjder på dybt vand er mindre end en meter, bevirker, at mennesker på et skib langt fra kysten ikke vil kunne se eller mærke tsunamibølger, når de passerer, men måske kun registrere dem som et let fald eller en stigning af vandoverfladen.



Før



Efter

Satellitbilleder taget før og efter, at tsunamien ramte Aceh ved Sumatras kyst d. 26 december 2004. (Fotos er venligst udlånt og bearbejdet af CRISP, National University of Singapore IKONOS image © CRISP 2004))

### Tsunamier på åbent, dybt hav/ocean

Tsunamiers lange bølgelængde betyder, at de opfører sig som "lavvandede bølger", hvor bølgenes udbredelsehastighed er lig med kvadratroden af produktet af Jordens tyngdeacceleration og vanddybden. Det betyder, at tsunamier flytter sig med en hastighed, der er afhængig af vanddybden. På det dybe ocean vil tsunamibølger derfor vandre med hastigheder på 500-1.000 km i timen og bevæge sig over store oversøiske afstande med begrænset energitab. Eksempelvis vil tsunamier bevæge sig med 880 km/timen, hvis havet er 6.100 m dybt – det samme som hastigheden af et jettfly. Tsunamier kan altså bevæge sig fra den ene side af Stillehavet til den anden side på mindre end en dag. Deres lange bølgelængder betyder endvidere, at de kun vil miste lidt energi, hvilket er forklaringen på, at det er muligt for tsunamier at bevæge sig over uhyre store afstande og stadig udløse ødelæggelser, når de rammer kyster.

### Når en tsunami nærmer sig land

Når en tsunami bevæger sig fra det dybe vand på det åbne ocean og ind på lavere vand ved kontinentalsoklen nær kyster, vil den gennemgå en transformation. Tsunamiens hastighed er relateret til vanddybden, hvilket medfører, at hastigheden af tsunamien bliver formindsket, eftersom vanddybden aftager. For eksempel vil tsunamiens hastighed på 20 meters vanddybde kun være ca. 50 km/timen.

Da tsunamien består af en serie af bølger, som ligger med en bølgelængdes afstand fra hinanden, vil en sænkning af den forreste bølges hastighed betyde, at den bølge, der bevæger sig bagved og har en større hastighed – vil "vælde" ind i bølgen foran. Efterhånden som tsunamibølgerne

bliver komprimeret tæt på kysten, bliver bølgelængden forkortet og bølgeenergien rettet opad, herved forøges bølgenes højde betydeligt. På grund af denne effekt, som kaldes for "shoaling", kan en tsunami, der er næsten umærkelig på det dybe åbne ocean, vokse til flere meter i højde nær kysten. Selvom bølgelængden forkortes nær kysten, vil tsunamien typisk have en bølgelængde over 10 km, når den rammer land.

### Når tsunamien rammer land

Når en tsunami endelig når kystbredden, vil den vise sig som et hurtigt voksende eller faldende tidevand, en serie af brydende bølger eller i værste tilfælde som en serie af tårnhøje flodbølger på 10-30 meters højde. Oversvømmelserne af et område fra en flodbølge kan have en strækning på flere hundrede meter ind over landområder. Kræfterne fra flodbølgerne er uhyre kraftige og kan rive næsten alt med på deres vej, såsom store klipper, bygninger og træer. Ved flodbølgenes tilbagetrækning vil de typisk transporte løse genstande og mennesker med ud i havet. Der kan gå flere dage, før havet vender tilbage til sin normale tilstand.

En tsunami består af en serie af bølger, som ankommer hver med 10 - 60 minutters interval – alt afhængigt af dens bølgeperiode. Selvom der kan være intervaller på minutter eller måske timer mellem ankomsten af tsunamibølger, kan den anden eller tredje bølge være betydeligt mere destruktiv end den første bølge. Faren fra en tsunami kan derfor være flere timer efter den først ankomne bølge. Det er derfor vigtigt, at befolkningen i områder med fare for tsunami-bølger lærer havets natur at kende. Hvis den forreste kant af tsunamibølgen er en bølgetop, vil det første tegn på en tsunami være

en stigning af vandstanden. Hvis det derimod er bølgedalen, der er forrest, når bølgen rammer land, vil det første tegn på en tsunami være en kraftig tilbagetrækning af vandet. Det første tegn er således at vandet bliver trukket ud i havet, efterladende store bredstrækninger på stranden med eksempelvis fisk. Mennesker der går ud for at indsamle disse fisk, vil da pludselig når bølgetoppen kommer ind på kysten måske 20 minutter senere være i stor fare for at drukne, fordi de bliver trukket ned med bølgens enorme kraft.

Endvidere skal man være opmærksom på, at en lille tsunami på en strand – kan blive

**DYNO**  
Dyno Nobel

Tel. 43 45 15 38  
www.dynonobel.com

en kæmpe tsunami kun nogle få kilometer derfra, idet kystliniens topografi og havbund påvirker bølgens størrelse. Hvis tsunamibølgen kommer samtidig med et højt tidevand, eller hvis der er sammenfald med en stormbølge i området, vil effekten blive kumulativ, dvs., det hele akkumuleres, og oversvømmelserne og ødelæggelserne vil blive endnu større.

#### Tsunami-beregninger er komplicerede

Beregninger af tsunamiers hastigheder, bølgehøjder og deres destruktive kræfter, når de rammer en kystlinie, kompliceres af flere forskellige faktorer. Blandt andet vil formen af havbunden kunne udløse effekter,

som ikke kan forudsiges ud fra simple bølgeligninger. Kystliniers forme og bugtninger, havnekonstruktioner etc. kan få bølgerne til at reflektere, diffraktere og refraktere. Her ved ændrer bølgerne retning. Andre komplicerende faktorer, såsom selve effekten fra efterdønninger fra en bølge på bølgen, der kommer bagved, ligesom den eksakte forstyrrelse, der udløste tsunamien i første omgang, kan være komplicerede at beskrive eksakt.

Disse faktorer er alle komplikationer, som forskerne prøver at tage højde for i de numeriske matematiske modeller, der anvendes til computerberegninger af forudsigelser af tsunamier.

#### Tsunami-advarselscenter

I Stillehavet, hvor der forekommer flest tsunamibølger grundet det store antal af jordskælvszoner, er der oprettet et operationelt "Pacific Tsunami Warning Center (PTWC)" i nærheden af Honolulu, Hawaii. Centret samarbejder med 26 internationale medlemslande. Centret overvåger seismiske data og tidevandsmålinger for hele Stillehavet, og man beregner ankomsttiden af forskellige bølger rundt på kystlinierne i hele oceanet. Hensigten hermed er at kunne evaluere potentielle jordskælvs-kabte tsunamier og dermed informere og advare mod tsunamier til nationale og internationale myndigheder i Stillehavsområdet. ■

## Tsunamibølger i Asien

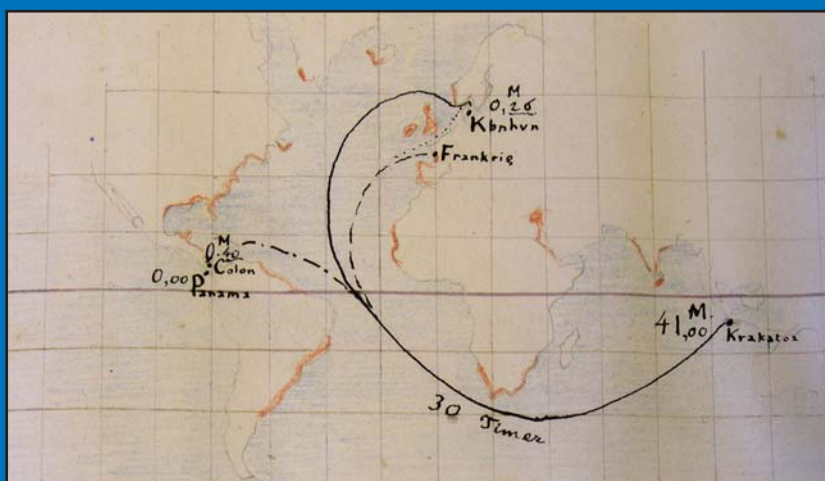
2. juledag – den 26. december 2004 om morgenen lokal tid, blev Det Indiske Ocean ramt af katastrofale flodbølger som følge af et jordskælv 315 km vest for nordspidsen af den indonesiske ø Sumatra. Jordskælvet blev målt til 9,0 på den åbne Richterskala og dannede et epicenter på 1.200 km, der strakte sig i en nord-sydgående linie. Den kraftigste udbredelse foregik derfor primært mod øst og vest. Jordskælvet er det kraftigste i 40 år, der dannede tsunamibølger, som bredte sig som ringe i vandet fra epicentret. Bølgerne bevægede sig med ekstreme hastigheder på omkring 700 km/time.

Da tsunamibølger er meget energirige bølger, der bevæger sig over lange afstande, blev en stor del af kystlandene i Det Indiske Ocean oversvømmet af flodbølger fra tsunamien. Flodbølgerne fra tsunamien, der blandt andet ramte kysterne Sri Lanka, Indonesien, India, Thailand, Malaysia og Maldiverne, blev komprimerede, da de nærmede sig kysterne. Jo mere de blev komprimerede, jo mere voksede deres bølgehøjder, og man kunne sammenligne dem med høje tårne, da de ramte kysterne, idet bølgerne nåede op til 10 meters højde.

Tsunamibølgerne ramte Sumatra efter kun ca. 15 min, Sri Lanka og Thailand efter et 1-2 timer, Maldiverne efter ca. 3-4 timer. Og efter kun 6-8 timer nåede tsunamibølgerne den afrikanske vestkyst og skyllede ind over bl.a. Somalias og Kenyas kyster.

På Maldiverne, hvor den gennemsnitlige højde over havniveau kun er én meter, skyllede tsunamibølger på mere end én meter bølgehøjde tværs over mange af øerne. Bølgerne overskyldede halvdelen af Male, som er Maldivernes største ø.

Tsunamibølgerne 2. juledag var de kraftigste i Det Indiske Ocean siden 27. august 1883, hvor et stort udbrud fra vulkanen Krakatoa i Indonesien udløste voldsomme



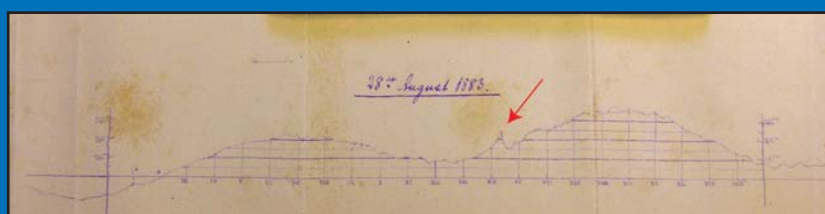
Krakatau-tsunamibølgens bevægelseslinje fra Det Indiske Ocean til Danmark blev i 1883 håndtegnet af P.A. Monnet, og overrakt til DMI's første direktør "Kaptain N. Hoffmeyer" i 1883. (Kilde: DMIs arkiv)

tsunamibølger, der skyllede ind over kysten ved Java og Sumatra med bølgehøjder på omkring 37-40 meter. Til sammenligning var Tsunamibølgerne i 1883 kun destruktive lokalt i Indonesien, dog blev små tsunamibølger målt i hele Stillehavet og kunne måles helt op i de danske farvande - kun 36 timer efter den blev udløst i det Indiske Ocean.

Tsunamibølgen blev registreret i Kø-

benhavns Havn ved en vandstandsstigning på 26 cm., og gennemsnitshastigheden fra Det Indiske Ocean til Københavns havn var ca. 660 km/t eller 185 m/s.

Den seneste tsunamibølge fra Det Indiske Ocean, 26. december 2004 har man ikke kunnet registrere på det danske net af vandstandsmålestationer. Det skyldes sandsynligvis, at denne bølge var 20-25 meter mindre end 1883-Bølgen.



Registrering fra 28. august 1883 af vandstanden i Københavns havn ved Karantænebygningen. Romertallene på x-aksen angiver tidspunktet på dagen, mens tallene på kurven angiver vandstanden i cm. Pilen på figuren angiver tidspunktet for vandstandssignalet fra tsunamibølgen. (Kilde: DMIs arkiv)