

Räkna alltid med havet

Det stora äventyret att utforska världshavet har till stora delar skett under 1900-talets andra hälft där ny teknik och nya fjärranalysmetoder blivit ovärderliga redskap för oceanograferna. Årets Crafoordpristagare i geovetenskaper, **Walter Munk**, är en person som under hela denna period rört sig i vetenskapens absoluta frontlinje, i arbetet med att förklara oceanernas cirkulation, tidvatten och vågor och deras roll i jordens dynamik.

Med ständig nyfikenhet och osedvanligt observant sinne har Walter Munk gjort innovativa synteser, använt nya tekniker och utvecklat nya analys- och observationsmetoder, som på ett banbrytande sätt bidragit till och inspirerat utvecklingen av den fysiska oceanografin, liksom geovetenskapen som helhet. Inte minst insikten om tidvattnets betydelse, på olika skalor, är central i Munks vetenskapliga gärning.

Ytvågor, tidvatten och strömmar

Redan som ung oceanograf visade Walter Munk prov på innovationskraft. Under andra världskriget utvecklade han tillsammans med Harald Sverdrup en ny metod för att prognostisera vågförhållanden vid en given strand, vid en given tidpunkt. Metoden tog hänsyn till *havs*vågor, *dyning* samt *vågbrytning* och den kom genast till användning. Den utgjorde underlag exempelvis vid valet av tidpunkt för de allierades landstigningar i Nordafrika och i samband med landstigningen i Normandie.

Två decennier senare utvecklade Munk en nydanande prognosmetod tillsammans med David Cartwright, den så kallade responsmetoden för att bestämma *tidvatten*. Metoden baserades på beräkning av responsfunktionen mellan observerat och teoretiskt potentiellt tidvatten på en ort. Responsmetoden kräver endast korta mätserier och metoden tar indirekt hänsyn till både lokala och regionala djupförhållanden samt jordskorpans lokala nedtryckning och hävning på grund av tidvattenbelastningen.



Foto: Michael Davies

Surfing i världsklass. Utmed exempelvis Kaliforniens kust och på Hawaii är det vanligt att höga vågor uppstår när långa dyningar, som färdats tusentals kilometer från de stormområden där de bildades, når stranden.

Walter Munk har också lämnat värdefulla bidrag till kunskapen om *dyning*. Genom tryckmätningar på havets botten upptäckte forskarna på 1940- och 1950-talen dispersiva vågor som måste härröra från avlägsna källor. Men varifrån kom de och hur kunde de röra sig så långt? Munk arbetade med

denna fråga på 1950-talet tillsammans med Frank Snodgrass och kunde med hjälp av fältobservationer och beräkningar beskriva dyningens egenskaper och visa hur exempelvis stormar väster om Nya Zeeland faktiskt påverkar surfförhållanden i södra Kalifornien.

Steget från vågor till globala strömningssystem tog Munk tidigt. Genom att bygga på tidigare forskning om vinddriven oceancirkulation och utveckla densamma kunde han år 1950 presentera en modell över oceanernas vinddrivna cirkulation där friktionen betraktades som orsakad av horisontella virvlar. Modellen tog därför hänsyn till lateral friktion (friktion mot havsbassängernas gränssidor och inom vattenmassorna själva på grund av att vatten med olika hastigheter möts) snarare än friktion mot botten.

En annan gåta som Munk tog sig an var den antarktiska cirkumpolära strömmen. Denna ström går som ett brett band runt den antarktiska kontinenten och drivs av västliga vindar. Forskarna gäckades länge av att strömmen var långsammare än vad den teoretiskt sett borde vara. Man tog hänsyn till bottenfriktionen, men denna friktion ansågs inte vara tillräcklig. Tillsammans med Erik Palmén föreslog Munk år 1951 en lösning: Ryggar på havsbotten kan utöva så kallat formotstånd, vilket kan balansera vindkraften på ytan.

Världshavens fem vinddrivna strömssystem uppträder på liknande sätt: i norra och södra Atlanten, norra och södra Stilla havet samt södra Indiska oceanen. På norra halvklotet sker cirkulationen medurs och på södra moturs. Virvlarna har på västsidan snabba och smala strömmar mot polerna och på östsidan breda och långsamma strömmar mot ekvatorn. Runt antarktiska kontinenten går den så kallade antarktiska cirkumpolära strömmen.



Vågorna under ytan

Stora delar av det som händer i världshavet sker dolt för det mänskliga ögat. Men även om de inte alltid syns på ytan bildas även vågor i gränssytor mellan vattenmassor med olika densitet. Vågorna kallas då för interna vågor.

Tillsammans med Chris Garrett utforskade Walter Munk på 1970-talet hur interna vågor uppträder. De tog fram en empirisk modell för hur energin fördelas i ett internt vågspektrum i havet och deras beskrivning av det interna vågspektrat utgör fortfarande standard och refereras till som *Garrett och Munks interna vågspektrum*. Grunden för förståelsen av det interna vågspektrat hade Munk lagt genom flera decenniers forskning. Interna vågor är viktiga för förståelsen av havets dynamik därför att energin i interna vågor genom olika instabiliteter överförs till turbulens, vilken i sin tur är avgörande för blandningen mellan olika vattenmassor i havet.

Tillsammans med Ernest Anderson beskrev Munk till exempel redan år 1948 hur vertikal skiktning påverkar det turbulenta utbytet – och en av de formler som presenterades återkommer i många oceancirkulationsmodeller allt sedan dess. Munk beskrev också på ett övergripande sätt hur djupvattnet omsätts genom nedblandning av lättare ytvatten. Detta var i en artikel från 1966 med namnet *Djuphavets recept (Abyssal recipes)*. Munk uppskattade att den vertikala turbulenta blandningskoefficienten typiskt är $1 \text{ cm}^2/\text{s}$, ett värde som sedan blivit standardvärde.

ALLMÄNT OM VÅGRÖRELSE

En lokal störning i ett medium utbreder sig som en vågrörelse. Exempel på vågrörelser är ljudvågor, vågor i en vätska eller elektromagnetiska vågor.

Havsvågor är vågrörelser i havsytan som alstras av vinden. Havsvågorna uppstår på grund av instabila återkopplingar mellan havsytans form och luftens rörelser. Kortfattat kan sägas att våghöjden beror på vindstyrkan, vindens varaktighet och vindens stryklängd, det vill säga sträckan som vinden får verka över.

Dyning är havsvågor, ofta med lång våglängd, som uppträder utanför det område där vinden alstrat dem. De rör sig med relativt hög hastighet och kan förflytta sig tusentals kilometer från de stormområden där de bildades.

De längsta havsvågorna är **tidvattenvågorna** som genereras av månens och solens gravitation på jorden. Tidvattnets styrka beror på den relativa positionen mellan jorden, månen och solen.

→ Räkneexempel 1.

Tidvattenvågornas hastighet, v , bestäms enkom av vattendjupet, d , med hjälp av ekvationen $v = \sqrt{g \cdot d}$

där g = gravitationskonstanten = $9,81 \text{ m/s}^2$

Medeldjupet i världshaven är cirka 4 000 meter. En tidvattenvåg i öppet hav rör sig då med en hastighet av cirka 200 meter per sekund, eller 720 kilometer i timmen.

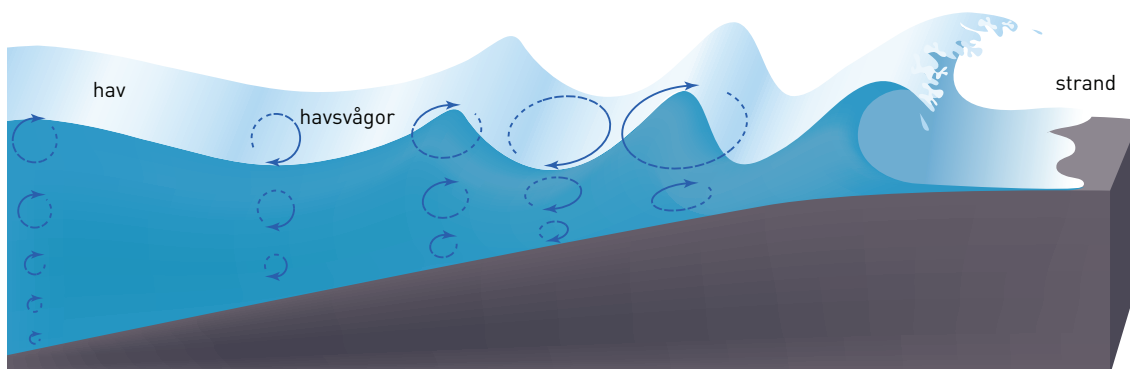
→ Räkneexempel 2.

Hastigheten för kortare vågor,

$$v = g \cdot T / (2\pi)$$

där T = perioden (tiden för en våglängd att passera en viss punkt)

En lång dyning i öppet hav kan ha perioden 10 sekunder, vilket ger en våghastighet på 16 meter per sekund eller 58 kilometer i timmen.



På bilden ser vi havsvågor som går mot stranden. På djupt vatten känner havsvågorna, som alstrats av vinden, inte av botten. Partiklar i vattnet följer cirkulära banor där vattnet i vågbergen rör sig med vågens utbredningsriktning och i vågdalarna mot densamma. Våglängden är avståndet mellan två successiva punkter i samma rörelsetillstånd. På grundare vatten hämmar närheten till botten vertikala rörelser vilket gör att partiklar i vattnet rör sig i elliptiska banor stället för cirkulära. När havsvågor närmar sig stranden, där djupet är mindre, minskar vågornas utbredningshastighet. Detta leder till att våglängden minskar, våghöjden blir istället större och vågorna bryter.

Vidare diskuterade Munk varifrån turbulensen kunde få sin energi och kom fram till att tidvattnet kunde vara en möjlig kandidat utan att han på den tiden kunde visa vilka mekanismer som kunde vara aktuella. Det är först under senare år som mekanismer för överföring av energi i vågor (så kallat internt tidvatten) har beskrivits och verifierats, inte minst genom studier av tröskelfjordar med tidvatten. Det är helt klart att tidvatten driver blandningen i många fjordar och förmodligen också i djuphaven.

Trots att oceanograferna steg för steg under årens lopp avslöjat flera av havets fördolda egenskaper, är fortfarande mycket ogjort i utforskandet av havet. Dagens globala modeller för ocean-cirkulation är till exempel ännu alltför översiktliga för att kunna inkludera interna vågor. Men i takt med att upplösningen blir högre kommer modellerna för oceanernas dynamik att förbättras genom att de i ökad grad tar hänsyn till blandningen som orsakas av interna vågor.

INTERNA VÅGOR

Under havsytan bildas så kallade interna vågor på gränssytor mellan vattenmassor med olika densitet. En intern våg uppkommer när en densitetsskiktning rubbas ur sitt jämviktsläge. Interna vågor, som vanligtvis inte syns för människans öga eftersom de uppträder i skikten under vattenytan, har stor betydelse för havens dynamik, främst genom att bidra med energi till turbulens och därmed till blandning.

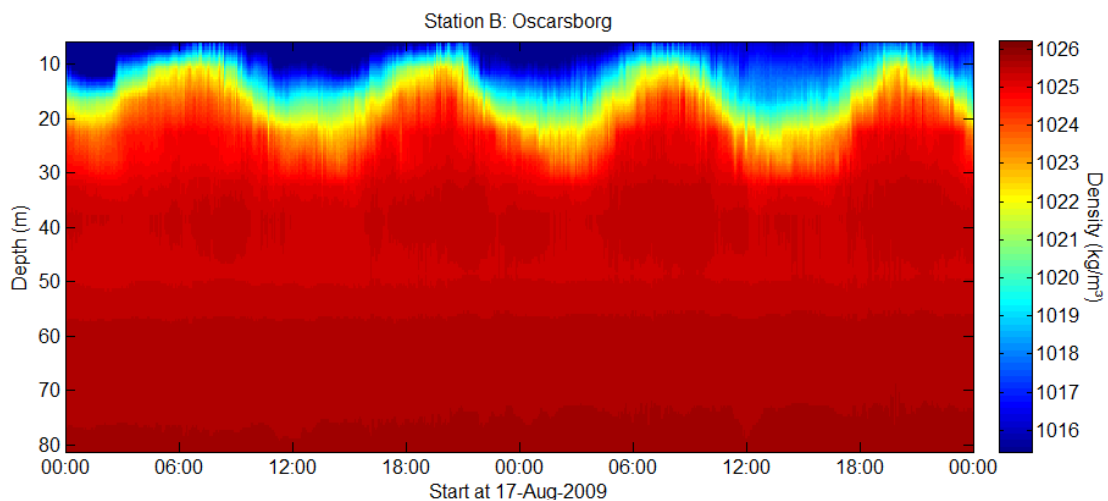
Garrett och Munks interna vågspektrum beskriver empiriskt hur energin i interna vågor i havet fördelas som funktion av frekvensen. Den lägsta frekvens som interna vågor kan ha är den så kallade tröghetsfrekvensen, f , vilken är en konsekvens av jordens rotation. Vid denna frekvens har den interna vågens rörelse degenererat till en rent horisontell cirkulation, en tröghetscirkulation.

Den högsta frekvens som interna vågor kan ha ges av den så kallade *Brunt-Väisälä frekvensen*, N , vilken är helt bestämd av den vertikala skiktningens styrka. Vid denna frekvens sker all rörelse i ett vertikalt plan.

För frekvenser mellan f och N rör sig partiklar på grund av interna vågor både horisontellt och vertikalt.

Interna vågor kan genereras av tidsberoende strömmar, till exempel tidvattenströmmar, utmed en sluttande botten, över en tröskel i ett trångt sund eller över en undervattensrygg i öppna havet. Interna vågor rör sig mycket långsamt jämfört med vågorna på havets yta, däremot kan amplituden vara stor. Innanför Gibraltar sund förekommer interna vågor med upp till 100 meters våghöjd. De strömmar som är förknippade med interna vågor kan ge upphov till storskaliga mönster som vid gynnsam väderlek kan observeras på havsytan.

Brytande interna vågor bidrar till den vertikala omblandningen i havets inre, vilket har stor betydelse för den vertikala transporten av vattenmassor upp från djupet. Ju mer energi som överförs från tidvattnet och andra rörelser till interna vågor desto större blir omblandningen. Detta har man kunnat demonstrera i fjordar där det är relativt lätt att uppskatta hur stor energiöverföringen är från tidvattnet till internt tidvatten.



Bilden visar densiteten i en vertikal profil i Oslofjorden där de interna vågor som bildats vid tröskeln vid Drøbak, alstrade av halvdagligt tidvatten (två perioder per dag), utbreder sig inåt i fjorden. Mätning av salthalt och temperatur, som tillsammans bestämmer densiteten, har skett var femte minut, via instrument som förankrats på en vertikal lina mellan yta och botten. Våghöjden är uppemot tio meter vilket är 30 gånger högre än vattenståndsskillnaden mellan flod och ebb.

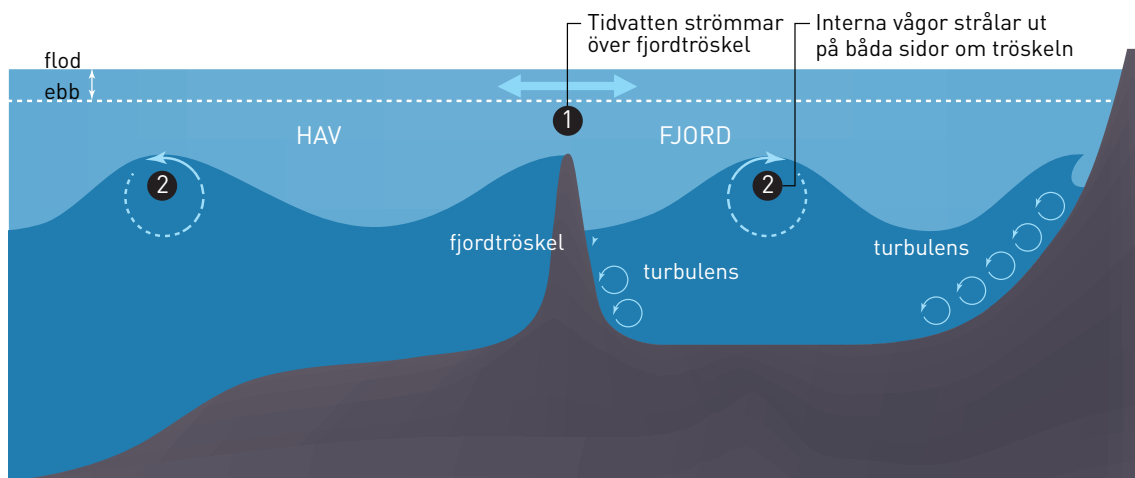
Källa: Anders Stigebrandt, Institutionen för geovetenskaper, Göteborgs universitet.

Den känsliga jorden

Inte bara till oceanografin, utan även till förståelsen av jordens hela dynamik, har Walter Munk lämnat oerhört värdefulla bidrag. Under 1950-talet studerade Munk oregelbundenheter i jordens rotation. Han utvärderade bland annat polrörelsen som har en 14-månaders period och som orsakar ett litet så kallat poltidvatten, det enda tidvatten som inte har med månens och solens gravitationskrafter att göra.

I boken *The Rotation of the Earth: A Geophysical Discussion* från år 1960 kopplade sedan Munk och Gordon MacDonald ett helhetsgrepp genom att behandla polrörelse och variationerna i jordens rotationshastighet utifrån ett geofysiskt perspektiv.

Det geofysiska angreppssättet blev en nyckel. Forskarvärlden hade länge genom både beräkningar och mätningar (genom noggranna latitudbestämningar respektive tidsbestämningar) kunnat påvisa att oregelbundenheter existerade, men inte helt tillfredsställande kunnat förklara varför.



1. När tidvatten strömmar in och ut över en fjordtröskel genereras interna vågor (internt tidvatten) i densitets-skiktningarna i angränsande bassänger.

2. De interna vågorna strålar ut från tröskeln. När de interna vågorna bryter överförs deras energi till turbulens som blandar om vattnet.

Tidvattnets energiförlust vid tröskeln leder till att tidvattnet (ytvågen) får reducerad amplitud och färförskjutning inne i fjorden, vilket dock inte är utritat i bilden. Detta fjordexempel kan också ses som en modell för hur interna vågor genereras över ryggar på djuphavets botten.

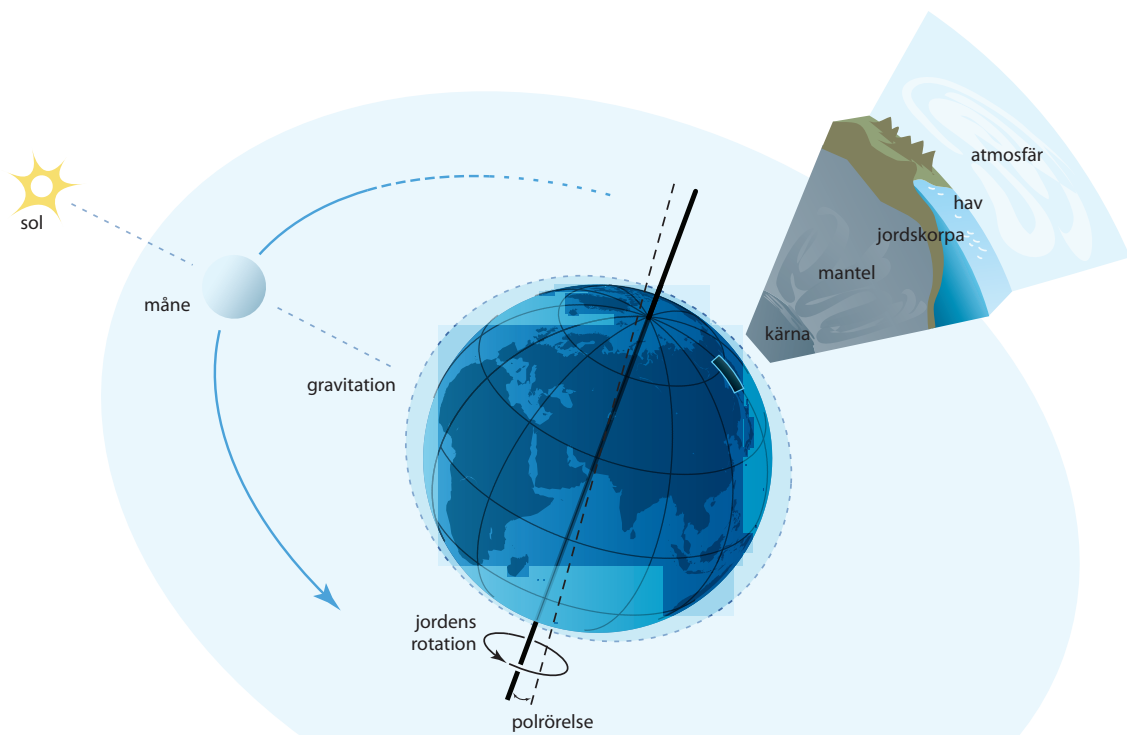
Munk och MacDonald resonerar i boken kring hur oregelbundenheter på kortare tidsskalor beror på vindar, luftmassor, havsnivåer, underjordiskt vatten och rörelser i jordens inre, samt tidvatten i havet och dess motsvarighet i den fasta jorden (så kallad tidjord) och i atmosfären. De diskuterar även jordens rotation i ett historiskt och geologiskt perspektiv.

Författarna konstaterar att sett över ett sekel eller mer är det tidvattnets friktion som är den kraft som påverkar jordens rotation mest. Det sker nämligen en gradvis inbromsning av jordens rotationshastighet som resultat av friktionen. Den därmed gradvisa förlängningen av dygnet tas numera hänsyn till vid beräkningen av koordinerad universaltid genom att vissa år lägga till en extra sekund, en så kallad skottsekund. Om vi blickar bakåt på den geologiska tidsskalan var dygnets längd vid tiden för livets uppkomst på jorden, i början av paleozoikum för drygt 500 miljoner år sedan, uppskattningsvis 21 timmar.

Som en följd av att jordens rotationshastighet minskar, avlägsnar sig också solen och månen från jorden. Solens avståndsökning är så gott som försumbar i jämförelse med månens. Månens avståndsökning från jorden uppgår till cirka fyra centimeter per år.

Nya sätt att mäta

Walter Munk började på 1970-talet att studera havets akustiska egenskaper. Han utvecklade *akustisk tomografi*, en fjärranalysmetod som baseras på hur lågfrekvent ljud fortplantas i havet med hänsyn till temperatur och strömmar. Genom att mäta tiden som det tar för ljudet att färdas mellan akustiska sändare och mottagare, kan exempelvis genomsnittstemperaturen inom mätintervallet bestämmas med god precision. Även strömhastigheter kan mätas med denna metod. Med hjälp av akustisk tomografi har Stilla havet och norra Atlanten utforskats. I början av 1990-talet genomfördes ett globalt experiment under ledning av Munk och Andrew Forbes med en akustisk sändare placerad i södra Indiska oceanen och mottagare



Munk och MacDonald resonerade kring oregelbundenheterna i jordens rotation. De studerade hur polrörelser och förändringar i jordens rotationshastighet beror på vindar, luftmassor, havsnivåer, underjordiskt vatten och rörelser i jordens inre, samt tidvatten i havet och dess motsvarighet i den fasta jorden (tidjord) och i atmosfären.

ombord på tolv båtar utplacerade i de fem världshaven. Mätningen skulle kunna fungera som referenspunkt för havets globala uppvärmning men försöket har hittills inte blivit upprepat. Ett annat område där Munk varit en föregångare handlar om hur man genom mätningen av solens reflektion i havsytan kan få information om vågornas egenskaper. Munk skrev artiklar i detta ämne första gången år 1954 tillsammans med Charles Cox. Artiklarna handlade om hur man kan använda fotografier av solreflektionen från havets yta för att beräkna sannolikhetsfördelningen för havsytans lutning. Om havsytan var helt horisontell skulle bara en bild av solen förekomma. Även med en lätt vind fördelas solljuset i ett mönster med tusentals glitterpunkter. Varje glitterpunkt representerar en facett som har rätt vinkel för att återspegla solen in i kameran. Ytterkanterna på varje glittermönster innehåller de största lutningarna och lutningarna ökar med ökad vindhastighet.

Ett halvt sekel senare återkommer Munk till solreflektionen från havets yta. År 2008 undersökte han statistik från åtta miljoner glitterbilder, tagna från satellit, och fördelade globalt, vilket resulterade i artikeln *An Inconvenient Sea-Truth: Spread, Steepness and Skewness of Surface Slopes*. Forskningsområdet bedöms ha stor framtida potential för att utvärdera vågors strukturer, något som oceanograferna inte haft mätparametrar för tidigare.

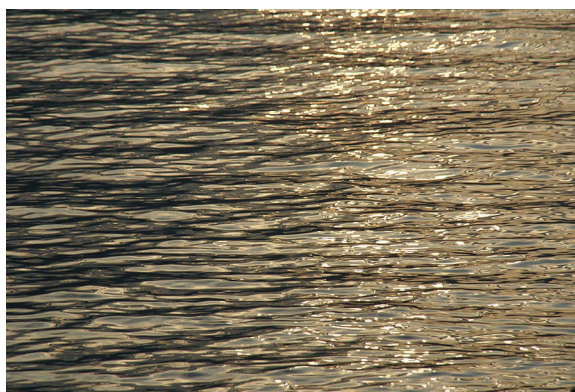


Foto: Ian Britton, FreeFoto.com

Solglitter har mycket att berätta om vågornas egenskaper.

Även plankton

Walter Munk har förmåga att se jordens dynamik i ett helhetsperspektiv. Han ser också sammanhang och nyanser som få andra upptäcker och arbetar gärna tvärvetenskapligt för att angripa problem ur nya vinklar. Ett exempel är när Munk tillsammans med biologen Gordon Arthur Riley diskuterade fysikens betydelse för växtplanktons näringstillförsel i en

publikation år 1952. De beräknade planktons näringsupptag som funktion av planktons form, storlek och sjunkhastighet men även av näringskoncentrationen i vattnet och andra faktorer. (Näringsupptaget sker via en fysikalisk så kallad diffusiv process. Om vattnet är stillastående runt plankton tömmer planktonet vattnet på näring. För att upprätthålla en hög koncentration av näring kring sig kan ett växtplankton sjunka eller stiga). Detta arbete i biologisk oceanografi kom ”före sin tid”, men har citerats ganska ofta under senare år i ekologisk modellering och visar hur Munks stora vetenskapliga bredd har haft betydelse även bortom fysisk oceanografi och geofysisk hydromekanik.

PRISTAGARE

WALTER MUNK

Scripps Institution of Oceanography
University of California, San Diego
9500 Gilman Drive
La Jolla CA, 92093
USA

Scripps: <http://sio.ucsd.edu/Profile/wmunk>

IGPP: www.igpp.ucsd.edu/people/detail.php?name=Munk_Walter

Amerikansk medborgare. Född 1917 i Wien, Österrike. F.D. i oceanografi 1947 och professor i geofysik 1954, båda vid Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, La Jolla, CA, USA. Grundare (1959) och föreståndare (1959–1982) av Cecil H. and Ida M. Green Institute of Geophysics and Planetary Physics (IGPP).

LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Mer information om årets pris finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, <http://kva.se>, och på www.crafoordprize.se.

POPULÄRVETENSKAPLIG ARTIKEL

Fjæstad, B. (2001): Tidvatten driver strömmar. *Forskning & Framsteg*, 2/2001, sid. 51.

BÖCKER (engelska)

Munk, W. och MacDonald, G.J.F. (1960): *The Rotation of the Earth: A Geophysical Discussion*. Cambridge University Press, 323 sid.

Munk, W., Worchester, P. och Wunsch, C. (1995): *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge University Press, 450 sid.

von Storch, H. och Hasselmann, K. (2010): *Seventy years of exploration in Oceanography. A prolonged weekend discussion with Walter Munk*. Springer Verlag, 250 sid.

VETENSKAPLIGA ARTIKLAR

Munk, W. (1950): On the wind-driven ocean circulation. *Journal of Meteorology* 7(2): 72–93.

Munk, W. och Palmén, E. (1951): Notes on the dynamics of the Antarctic Circumpolar Current. *Tellus* 3(1): 53–55.

Cox, C. och Munk, W. (1954): Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs. *Journal of the Optical Society of America* 44(11): 838–850.

Munk, W. (1966): Abyssal recipes. *Deep-Sea Research* 13: 707–730.

Munk, W. och Cartwright, D.E. (1966): Tidal Spectroscopy and Prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Ser. A*, No. 1105, 259: 533–581.

Garrett, C. och Munk, W. (1972): Oceanic mixing by breaking internal waves, *Deep-Sea Research* 19, 823–832.

Munk, W. och Wunsch, C. (1998): Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing. *Deep-Sea Research* I 45:1977–2010.

Munk, W. (2003): Ocean freshening, sea level rising. *Science* Vol. 300, No. 5628: 2041–2043.

Munk, W. (2008): An Inconvenient Sea Truth: Spread, Steepness, and Skewness of Surface Slopes. *Annual Review of Marine Science* Vol. 1: 377–415.

LÄNKAR

Deborah Days biografi över Walter Munk: <http://escholarship.org/uc/item/2tw4z5zs>

Läs mer om oregelbundenheterna i jordens rotation hos International Earth Rotation and Reference Systems Service: www.iers.org/