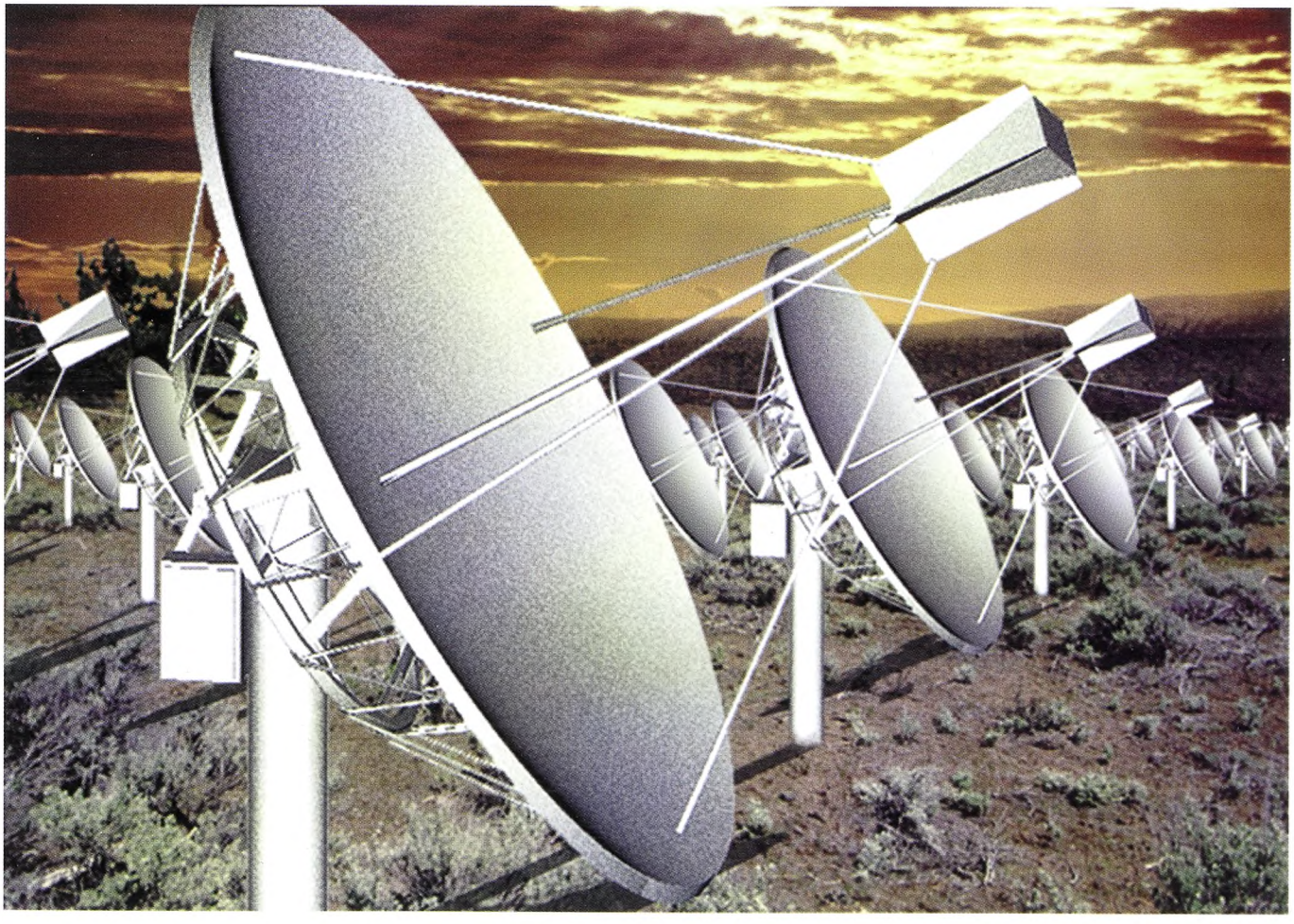
KVANT

September 2002 3

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 13. årgang



- GEOFYSISKE ANVENDELSER AF SATELLITALTIMETRI •
- EFTERSØGNINGEN AF INTELLIGENT IKKE-JORDISK LIV •
- TURBULENS OG TURBULENT DIFFUSION • OM GEOSTROFISK VIND •
- DEKOMMISSIONERING AF RISØS NUKLEARE ANLÆG • BACK TO BASICS! •
- NOBELPRISUDDELINGEN • GEOFYSIKDAG • NATURVIDENSKABSFESTIVAL •

LØSSALGSPRIS: 35 KR

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

Ørsted Laboratoriet, Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

E-mail : kvant@nbi.dk
Giro : 5 84 31 46

Udgives af
Astronomisk Selskab
Dansk Fysisk Selskab
Dansk Geofysisk Forening
Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Redaktion
Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.)
DCESS, NBIfAFG, KU
Michael Cramer Andersen (nyhedsred.)
Astronomisk Observatorium, KU
Camilla Bacher
Kemisk Institut, KU
Jørgen Friis Bak
Aarhus Universitet
Jørn Johs. Christiansen
Roskilde Kathedralskole
Torsten Freltoft
Sophion Bioscience A/S
Mogens Esrom Larsen
Matematisk Institut, KU
Finn Berg Rasmussen
Ørsted Laboratoriet, KU
Svend E. Rugh
Ove Østergaard
Silkeborg Amtsgymnasium

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnementspris: 135 kr/år.

Annoncepriser

1/1 side	3000 kr
1/2 side	1600 kr
1/4 side	1000 kr
Farvetillæg	1800 kr

Priserne er excl. moms og for reproklart materiale. Henv. om annoncer til redaktøren, tlf. 35 32 05 73 / fax 35 32 05 76. Henv. vedr. abonnement til forretningsfører Lene Kørner tlf. 35 32 07 62 (koerner@math.ku.dk).

Oplag: 3.000. Tryk: P. J. Schmidt A/S, Vojens. ISSN 0905-8893

NORDISK MILJØMÆRKNING
541 Trykkeri 373

Produktionsplan
Nr. 4-02 udkommer ca. 15. november
Nr. 1-03 udkommer ca. 1. marts
Nr. 2-03 udkommer ca. 15. maj
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages mindst to måneder før.

Indhold:

Stille....jeg lytter!
Michael J.D. Linden-Vørnle 3

Vind en tur til Nobelprisuddelingen 2002
Christian Uhl 8

Kvant-nyheder
Michael Cramer Andersen 8

Rettelse 10

Turbulens og turbulent diffusion
Jakob Mann, Søren Ott, Hans L. Pécseli, I. Maria Pécseli og Jan Trulsen 11

Læserbrev 18

Om geostrofisk vind
Aksel Wiin Nielsen 19

Geofysiske anvendelser af satellitaltimetri
Henriette Skourup 27

Back to basics!
Jeppe Dyre 34

Breddeopgave nr. 9 og 10
Jens Højgaard Jensen 35

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab 36

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse 38

Nyt fra Astronomisk Selskab 39

Nyt fra Dansk Geofysisk Forening 40

Geofysikdag den 1. november 2002 41

Hvad skal vi med fremtiden?
Dansk Naturvidenskabsfestival 2002 42

Kupon til abonnement på Kvant 47

Dekommissionering af Risøs nukleare anlæg – Miljømæssige aspekter
Per Hedemann Jensen . . . . . Bagsiden

Henvendelser vedrørende abonnement og adresseændring bedes ske til Lene Kørner (koerner@math.ku.dk, telefon 35 32 07 62). Kvant udsendes gratis til alle landets gymnasier, HF-kurser, tekniske skoler, seminarier m.fl. Hvis du er lærer et af disse steder og din arbejdsplads ikke modtager Kvant opfordres du også til at rette henvendelse til Lene Kørner. Bestilling af klassesæt og ældre numre af bladet (20 kr. / stk.) kan ske på kvant@nbi.dk.

Forsiden:

SETI
(Search for Extra-Terrestrial Intelligence – altså eftersøgningen af intelligent ikke-jordisk liv). Forsiden viser en computertegning af SETI Institute's Allen Array som det vil tage sig ud, når det i 2005 er færdigbygget. Læs mere om eftersøgningen af intelligent ikke-jordisk liv i Michael Linden-Vørnles artikel side 3! (Ill: SETI Institute).

Stille....jeg lytter!

Michael J.D. Linden-Vørnle, Tycho Brahe Planetarium.

Af alle de gåder som vi mennesker går og roder med, er spørgsmålet om selve livets oprindelse vel nok en af de største – både i direkte og overført betydning. Hvis vi som udgangspunkt ser bort fra smålige bekymringer som vanskeligheden ved at opstille en entydig operativ definition på liv, så er planeten Jorden det eneste sted i universet, hvor vi med sikkerhed kender til dette fænomen.

Vores udgangspunkt for at forstå livets oprindelse er derfor dets allertidligste historie hér på Jorden. Det er imidlertid langtfra en vanskelig opgave, at kortlægge livets spæde udvikling på vores planet. Den er næsten umulig! Det grundlæggende problem er, at alt for mange brikker til puslespillet er gået tabt – gennemtygget og fordøjet af geologisk aktivitet.

Konsekvensen er, at vi mangler fikspunkter på vores ujævne vej tilbage til livets "år nul". Omvendt savner laboratorieeksperimenter, der forsøger at skabe liv fra bunden i reagensglas og kolber, gode bud på begyndelsesbetingelser.

Dermed ikke sagt, at vi ad åre ikke kan komme frem til et eller flere gode og velfunderede bud på, hvordan livet er kommet på banen. Det eneste man med sikkerhed kan sige er, at det er et stort nøddetræ at gå i krig med!

Gåden kortsluttes

Selvom livets oprindelse diskuteres med Jorden som udgangspunkt, er ekstrapolationen til resten af universet naturlig – ja, nærmest uundgåelig. I børnesangen "Solen er så rød, mor"[1] lyder det lidt beklemt fra den lille dreng:

Himlen er så stor, mor,
med klare stjerner på.
Hvem monstro der bor, mor,
på stjernen i det blå?
Tror du, der er drenge, mor,
der kikker ned til mig?
Og tror du, de har senge, mor,
og sover li'som jeg?

Med sin egen verden som udgangspunkt stiller han det spørgsmål, som de fleste mennesker på et eller andet tidspunkt kommer omkring: er vi alene?

Tanken om et meget stort – måske uendeligt – univers, gør det næsten umuligt at acceptere, at Jorden skulle være det eneste sted, hvor livet har slået rod. Efter vor bedste overbevisning er de samme grundstoffer til stede overalt i universet og de adlyder de samme naturlove.

Eftersom livet er opstået her på Jorden og de grundlæggende forudsætninger er de samme andre steder i universet, så er det vel mest naturligt at antage, at livet er opstået mange steder? Ikke nødvendigvis.

Eftersom vi aldrig har fundet liv andre steder end på Jorden, har vi endnu ingen klare indikationer af, om livet på Jorden blot er en enkeltstående realisation af en umådeligt usandsynlig omgang organisk kemi.

Lige så lidt ved vi, om universet har indbygget én eller flere strukturskabende mekanismer, der behændigt sørger for, at brint og helium brygget i big bang med tiden bliver til gravhunde, ostehandlere og andre lignende kulstofbaserede strukturer med stærke meninger om deres omgivelser (læs f.eks. [1]).

En ting er imidlertid sikker: finder vi blot én eneste vind- og vandtæt indikation af liv uden for Jorden, så ved vi, at livet er opstået mindst to steder i universet. Dermed vil sandsynligheden for, at livet er et hyppigt forekommende fænomen i universet være steget betydeligt.

Selvom et sådant fund ikke kan fortælle os, hvordan livet er opstået hér på Jorden, så vil livets gåde dog alligevel være blevet kortsluttet. Vi vil vide, at der et eller andet sted i høstakken ligger lovmæssigheder og gemmer sig.

I visse kredse er man tilbøjelig til at tro, at dette indicium allerede er fundet. Her hentydes naturligvis til Mars-meteoritten ALH84001, der i 1996 blev verdensberømt som budbringer fra Mars med tegn på forhistorisk liv på den røde planet.

Denne konklusion har naturligt nok været udsat for benhårde angreb, men de senest offentliggjorte undersøgelser tyder på, at ALH84001 måske er det første klare tegn på ikke-jordisk liv [2]. Et 100 % vind- og vandtæt indicium er der dog endnu ikke tale om.

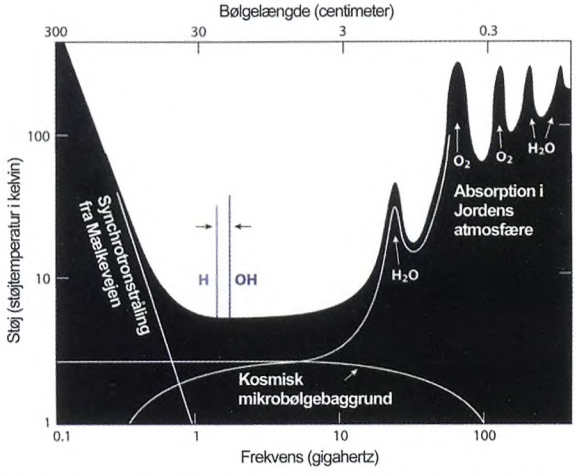
Begrænset rækkevidde

Bortset fra stumper af planeter, der af sig selv dumper ned til os, er den direkte eftersøgning af liv uden for Jorden en vanskelig og bekostelig affære. Rummissioner til solsystemets planeter er dyre og komplicerede, men normalt er den nye viden, der høstes, alle pengene og anstrengelserne værd.

Således er udforskningen af Mars for tiden oppe i høje omdrejninger. I de kommende år vil vi se en lang række ubemandede sonder, der skal se den røde planet

[1] Musik: Carl Nielsen, tekst: Harald Bergstedt

efter i sømmene, igen med danske eksperimenter om bord. I 2004 landsættes en europæisk sonde på Saturns største måne, Titan, der formodes at have visse lighedspunkter med Jorden på det tidspunkt, hvor livet slog rod.



Figur 1. Den naturlige radiostøj som funktion af frekvens. Frekvensintervallet omkring brintlinien ved 1,420 GHz har den laveste støj (Ill: Sky & Telescope).

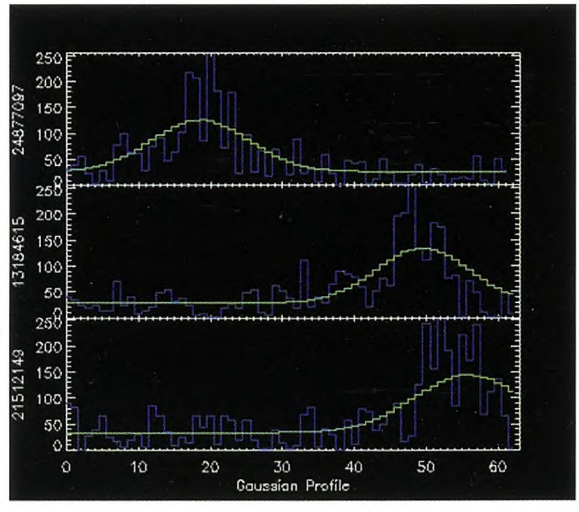
Missioner til asteroider og kometer er på vej fordi disse himmellegemer består af det oprindelige materiale som solsystemet blev dannet af for ca. 4,6 mia. år siden. Endelig leges der alvorligt med tanken om, at sende en rumsonde til jupitermånen Europa for at se nærmere på, om et formodet ocean under månens ispansrede overflade huser primitivt liv eller som minimum væsentlige byggeklodser til livets kemi.

Figur 2. Det store Arecibo teleskop på Puerto Rico. Selve antennen er 305 m i diameter og fast monteret på Jorden. Teleskopet kan derfor ikke dække hele himlen (Ill: NAIC).

Det er bestemt ikke usandsynligt, at missionerne til Mars, Titan, Europa m.fl. vil levere afgørende brikker til puslespillet om livets gåde. Fælles for alle disse gode tiltag er imidlertid, at deres rækkevidde astronomisk set er forsvindende. Med den rumfartsteknologi vi råder over nu og i overskuelig fremtid er det udelukket, at udvide vores aktionsradius for in-situ målinger betydeligt. Vi må i stedet rette vores opmærksomhed mod strømmen af elektromagnetisk stråling, der (bortset fra gravitationsbølger) er astronomernes eneste kilde til viden om "Det Derude".

Således har planetjagende astronomer siden 1995 lokaliseret omkring 100 planeter i kredsløb om andre stjerner end Solen [3]. Vi råder dog stadig ikke over hverken udstyr eller metoder, der kan registrere tilstedeværelsen af en jordlignende planet i bane om selv de nærmeste stjerner. Direkte observation af liv på andre planeter er således heller ikke noget, der ligger lige om hjørnet.

Den sidste mulighed for – inden for overskuelig tid og med beskedne midler – at finde tegn på liv derude er eftersøgningen af intelligent liv, som bevidst eller ubevidst gør opmærksom på sin eksistens ved at udsende elektromagnetisk stråling, der ikke forekommer naturligt i universet. Sagt på dansk: at lede efter intelligente rumvæsner, der sender signaler ud i rummet.



Figur 3. Det til dato mest overbevisende signal registreret af SETI@home-projektet. Signalet er set i tre uafhængige datasæt. Den blå kurve viser selve målingerne, mens de grønne kurver er den teoretiske kurve, der passer bedst med målingerne (Ill: SETI@home).

Slå ørerne ud

Det er vanskeligt at sige, hvem der første gang har tænkt denne tanke, men den 19. september 1959 offentliggjorde tidsskriftet *Nature* en artikel af de to Cornell fysikere, Giuseppe Cocconi og Philip Morrison. Titlen var "Searching for Interstellar Communications" og handlede om muligheden for at registrere budskaber udsendt af intelligente civilisationer i vores egen galakse, Mælkevejen [4].

Cocconi og Morrisons artikel markerer fødslen af det forskningsområde, der kaldes SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence – altså eftersøgningen af intelligent ikke-jordisk liv). I artiklen behandlede Cocconi og Morrison det væsentlige spørgsmål: hvad er den optimale frekvens for interstellar kommunikation?

Deres svar var 1,4 GHz – altså en frekvens i radioområdet – som den mest oplagte. Der er to væsentlige årsager til dette valg:

- Grundstoffet brint udsender i neutral form radiostråling ved en frekvens på 1,420 GHz.
- Den naturlige støj fra såvel Mælkevejen som Jordens atmosfære er mindst ved denne frekvens (se figur 1).

Det er oplagt, at det bedst kan betale sig at kommunikere ved frekvenser, hvor støjen fra omgivelserne er mindst. Med en given sendeeffekt og modtagerfølsomhed får man mere rækkevidde for pengene.

Årsagen til, at brintlinien ved 1,420 GHz er interessant, hænger sammen med, at brint er det hyppigst forekommende grundstof i universet. Det er derfor meget vanskeligt at forestille sig, at denne karakteristiske stråling er undgået andre intelligente rumvæsners opmærksomhed. Vi taler om intet mindre end en fælles kosmisk kulturarv!

Som afslutning på deres artikel kom Cocconi og Morrison med konkrete forslag til, hvor i høstakken man skulle starte med at lede. De nævnte fire sollignende stjerner, der befinder sig forholdsvis tæt på (inden for 15 lysår) og som ligger på positioner på himlen med lav baggrund.

Efter således at have givet bolden op, sluttede de af med at fremhæve, at det var vanskeligt at sige, hvad man skulle forvente sig af en eventuel eftersøgning, men at man var sikker på fiasko, hvis man lod være!

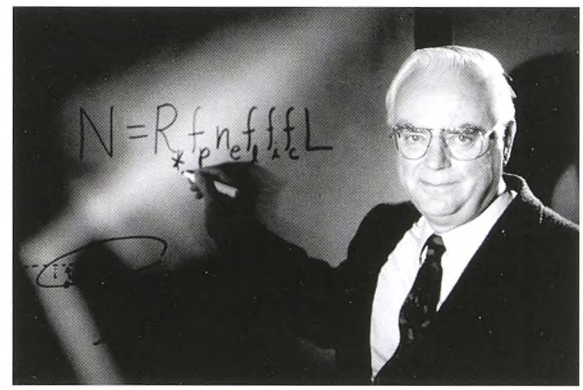
Første skud på SETI-stammen

Allerede før Cocconi og Morrison havde skrevet deres artikel færdig, var deres tanker ved at blive realiseret. Det var den unge radioastronom Frank Drake, der i 1959 var begyndt at forberede verdenshistoriens første SETI eksperiment ved det nationale amerikanske radio observatorium (National Radio Astronomy Observatory; NRAO) i Green Bank, West Virginia.

Uafhængigt af Cocconi og Morrison var Drake nået frem til, at frekvenser omkring 1.4 GHz, var det mest oplagte sted at begynde. Hans argumentation var dog ikke baseret på tanker om den "kosmiske kulturarv", men i langt højere grad tekniske overvejelser, der skulle gøre projektet mere letfordøjeligt hos de ledende indianere i NRAO [5].

Unikke tanker eller ej: den 8. april 1960 begyndte Drake & Co. at lede efter signaler med 26 meter antennen på Green Bank observatoriet. Som mål for deres eftersøgning havde de udvalgt sig to af de fire stjerner som Cocconi og Morrison havde udpeget som oplagte kandidater: tau Ceti og epsilon Eridani.

Projektet, der var blevet døbt "Ozma" efter dronningen i L. Frank Baum's fantasiland "Oz"[2], var knapt en dag gammelt, da der pludselig var bid. Antennen dvælede ved stjernen epsilon Eridani, da nålen på penrecorderen, der udskrev signalet modtaget af antennen, med ét begyndte at slå voldsomt ud. Oven i købet i karakteristiske pulser. Drake og hans kolleger måtte knibe sig selv i armen – var det virkelig så let?!



Figur 4. Frank Drake med sin berømte ligning, der angiver antallet af intelligente civilisationer i vores Mælkevej, som vi - i princippet - kan kommunikere med. Drake ligningen beskrives i anden del af denne artikel, der bringes i næste nummer af Kvant (Ill: Seth Shostak / SETI Institute).

Succesfuld fuser

Selvfølgelig var det ikke det! Det viste sig nogle dage senere, at signalet blev forårsaget af højtgående fly med militære nummerplader. Da Ozma som planlagt blev afsluttet i juli 1960, kunne Drake og de øvrige deltagere i projektet gøre status over, hvad de havde fundet: militærfly, en stor bunke erfaring og en endnu større bunke støj!

Selvom Ozma fra et detektionsmæssigt synspunkt var en fiasko, var det dog som SETI-startskud en ubetinget succes. Især i Sovjetunionen gik radioastronomer i 1960'erne i gang med at gennemsøge himlen for signaler. Med sædvanlig sovjetisk raffinesse og afmålthed satte man næsten-omnidirektionelle antenner ind på at finde signaler fra fremmede civilisationer. Uden held.

Med dette resultat kunne astronomerne som udgangspunkt afskrive eksistensen af oplagte nåle i høstakken. Der findes øjensynligt ikke civilisationer derude, der pumper enorme energimængder ud i rummet – i hvert fald ikke på frekvenser omkring 1.4 GHz. Dette resultat kan måske virke banalt, men sådanne civilisationer kunne ikke udelukkes før, der var blevet lyttet efter.

I begyndelsen af 1970'erne begyndte NASA i form af Ames Research Center i Californien at undersøge, hvad det ville kræve at gennemføre en effektiv eftersøgning af ET-signaler. En gruppe af eksterne eksperter under ledelse af Bernhard Oliver fra firmaet Hewlett-Packard leverede et omfattende designstudie til NASA under projektnavnet "Cyclops".

Rapporten fra Project Cyclops [6] fra 1973 har sammen med NASA-publikationen "The Search for Ex-

[2]Et sted "meget langt væk, vanskeligt at nå og beboet af mærkelige og eksotiske væsner."

traterrestrial Intelligence: SETI" [7] fra 1977, siden været det solide grundlag for langt de fleste SETI projekter. Anbefalingerne var klare: Såvel teknisk som videnskabeligt er det både muligt og ønskeligt, at etablere en seriøs eftersøgning af udenjordisk intelligens.

Ikke mindst fordi NASA således kom på banen, begyndte flere amerikanske radioastronomer i 1970'erne igen at interessere sig for SETI. Som resultat blev flere eftersøgninger sat i gang med eksisterende antenner og modtagere bl.a. "Project META" (Megachannel ExtraTerrestrial Assay) gennemført ved Harvard University med støtte fra den private interesseorganisation The Planetary Society, en langvarig eftersøgning gennemført af Ohio State University og et projekt kaldet SERENDIP (Search for Extraterrestrial Radio Emissions from Nearby Developed Intelligent Populations) ved University of California Berkeley.

SERENDIP's klodsede forkortelse er en kompakt udgave af det engelske ord "serendipity", der dækker over evnen til at finde værdifulde ting uden bevidst at lede efter dem. I erkendelse af at observationstid på store radioteleskoper er svær at få (især når man leder efter radioblip fra små grønne m/k'er) udviklede SETI folkene fra Berkeley det koncept, at deres modtager kunne indsamle data, samtidig med, at radioteleskopet foretog andre observationer. Så var man naturligvis ikke længere herre over, hvor man lyttede og hvornår, men eftersom ingen alligevel vidste noget om "hvor eller hvornår" var dette som udgangspunkt ikke noget problem.

NASA går på jagt

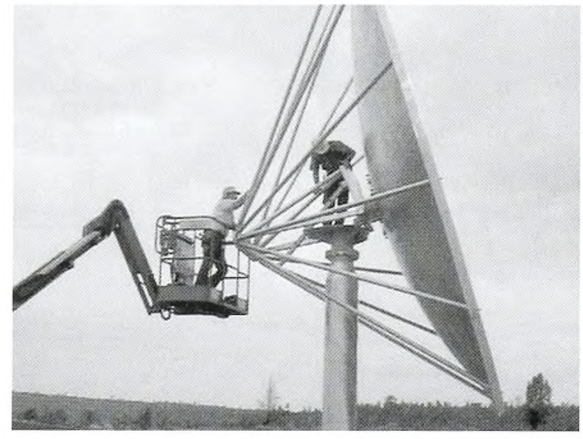
I slutningen af 1970'erne var der officielt blevet oprettet SETI-projekter ved NASA's Ames Research Center og Jet Propulsion Laboratory. Arbejdet drejede sig i første omgang om at designe og bygge et eftersøgningsprogram. Det resulterende program, der blev døbt High Resolution Microwave Survey (HRMS), bestod af to individuelle programmer: en gennemmønstring af hele himlen med moderat følsomhed og en målrettet undersøgelse af nogle tusind sollignende stjerner med meget høj følsomhed.

Efter mere end ti års forberedelse godkendte NASA i 1988 formelt programmet og begyndte at lade pengene strømme. Fire år senere – på 500-års dagen for Columbus' ankomst til den nye verden (12. oktober 1992) – begyndte de første observationer. NASA var efter mange år endelig gået på jagt efter rumvæsner – eller rettere: deres eventuelle radiobudskaber.

Fornøjelsen skulle dog blive kort. Ét år efter observationerne var begyndt, blev HRMS stoppet. Årsagen var ikke modvilje hos NASA, men et resultat af nedskæringer gennemført af den amerikanske kongres.

Med NASA's SETI-program i ruiner, var der i høj grad brug for en frelsende engel – om ikke andet så for at sikre en fornuftig udnyttelse af de mange mio. dollars, der på dette tidspunkt allerede var investeret i projektet.

Redningen var det privatejede SETI Institute [8], der med veteranen Frank Drake som direktør, kom ind fra sidelinien og overtog en del af det skrinlagte HRMS: den målrettede del, der undersøger udvalgte målstjerner med stor følsomhed i et bredt frekvensinterval.



Figur 5. Det første af de 350 teleskoper, der i 2005 skal udgøre SETI Institute's Allen Array, under montage ved Hat Creek Radio Observatory i det nordlige Californien. Dette radioteleskop, bliver det første dedikerede SETI teleskop. De enkelte antenner er 6 meter i diameter. Det færdige Allen Array får således et effektivt areal der er større end de største fuldt bevægelige antenner f.eks. Green Bank Telescope og Effelsberg antennen ved Bonn (Ill: SETI Institute).

SETI Institute døbte meget passende projektet "Phoenix" og siden den 2. februar 1995 har projektet arbejdet sig videre gennem listen af stjerner, der måske indeholder den ensomme nål i en umådelig høstak.

Som en anden reaktion på slagtningen af NASA's HRMS opstod i 1994 en græsrodsbevægelse ved navn "The SETI League" [9]. To år efter sin grundlæggelse lancerede SETI League det ambitiøse "Project Argus" opkaldt efter kæmpen med 100 øjne fra den græske mytologi.

Project Argus går i al sin enkelthed ud på at få etableret 5.000 små radioteleskoper over hele verden, så man har mulighed for konstant at overvåge hele himlen. SETI League financierer ikke selv de mange teleskoper, men baserer sig på lokale initiativer, hvis eftersøgningsindsats så koordineres af SETI League. I november 2000 kunne projektet leve op til sit navn, idet man kunne annoncere tilslutningen af antenne nummer 100.

SETI anno 2002

Ud over SETI Institute's projekt Phoenix og SETI League's Argus er der flere aktive SETI-programmer i verden. Fælles for disse programmer er, at de alle er 100 % privat finansieret. Hovedaktørerne er SETI Institute og The Planetary Society, hvor sidstnævnte er hovedsponsor for "BETA" (Billion channel ExtraTerrestrial Assay), der som efterfølger til META fortsat kører ved Harvard University.

University of California's program kører ligeledes videre – nu som SERENDIP IV på Arecibo teleskopet på Puerto Rico (se figur 2). Dette projekt er støttet både af SETI Institute, The Planetary Society samt en lang række andre sponsorer. Det udmærker sig særligt ved, at de indsamlede data analyseres af mennesker over hele kloden.

I erkendelse af, at de umådelige datamængder, der indsamles fra SERENDIP IV, ville kræve ubetalelig megen regnetid på supercomputerne, lavede folkene bag SERENDIP deres dataanalyse om til et screensaver program. Når man ikke bruger computeren kan dette program køre på pc'en i stedet for flyvende Windows-logo'er. Programmet henter en lille bid af datastrømmen og undersøger den for interessante signaler. Resultatet sendes tilbage til Berkeley og brugeren får en ny bid data. Projektet, der fik navnet SETI@home [10], startede op den 17. maj 1999. Folkene bag SETI@home havde regnet med at 50.000 – måske i bedste fald 100.000 – mennesker ville være med på ideen. I dag mere end tre år efter projektets officielle start er der over tre mio. tilmeldte brugere over hele verden! Disse brugere har leveret, hvad der svarer til mere end en million års beregningstid og har gennemført mere end én milliard billioner regneoperationer. Det er den største beregningsopgave, der nogensinde er blevet gennemført – og den er ikke slut endnu! Med disse imponerende tal for øje kan man så spørge sig selv: Har man fundet noget? Svaret er et forsigtigt "måske". Man har registreret knapt 3,5 mia. signaler, der er interessante og som er blevet undersøgt nærmere. Man har sorteret de signaler fra, der var tilfældig støj eller menneskeskabte. Efter denne filtrering står man nu tilbage med nogle få tusind signaler, der skal efterforskes i detaljer. Man har ansøgt om dedikeret observationstid på Arecibo teleskopet for at lytte efter disse signaler igen. Det mest overbevisende signal ses på figur 3.

SETI i Danmark?

I Danmark har der hidtil kun været ét aktivt SETI program. I 1998 oprettede Tvind-skolerne med en brugt fem meter antenne fra et norsk tv-selskab et observatorium i skyggen af Tvinds store vindmølle. Antennen blev en del af SETI League's projekt Argus, men observatoriet ser ikke længere ud til at være aktivt. Et nyt initiativ er nu på vej ved Halstedhus Efterskole på Lolland. Her arbejder man for øjeblikket på at etablere et 3 meter radioteleskop til undervisningsbrug, der også vil kunne bruges til SETI [11]. Hvorvidt radioteleskopet på Halstedhus Efterskole skal deltage i f.eks. projekt Argus eller ej er dog endnu ikke blevet afgjort. Afslutningsvis skal det til dato mest ambitiøse SETI-projekt nævnes. Det drejer sig om SETI Institute's Allen Array, der bliver verdens første store radioteleskop dedikeret til SETI. Allen Array bliver ikke ét stort teleskop, men mange mindre antenner, der kan kombineres til at fungere som ét eller flere antenner. Den første af i alt 350 antenner er netop blevet sat op (se figur 5) og det forventes, at hele Allen Array er fuldt operativt i år 2005 [12]. På trods af alle de gode initiativer er det dog uhyre vanskeligt at spå om SETI-programmernes mulighed for succes: det kan ske i aften eller aldrig. Et forhold omkring SETI er dog stensikkert og det blev slået fast allerede ved fødslen af SETI – som slutbemærkningen i Cocconi og Morrisons artikel [4]: "The probability of success is difficult to estimate; but if we never search, the chance of success is zero".

Referencer:

[1] J.M. Knudsen (2001) "Planeten Mars og væksten af orden i Universet", Kvant, bind 12, nr. 2, side 12.

[2] K.L. Thomas-Keprta m.fl. (2002) "Magnetofossils from Ancient Mars: a Robust Biosignature in the Martian Meteorite ALH84001", Applied and Environmental Microbiology, bind 68, side 3663.

[3] http://exoplanets.org/

[4] G. Cocconi og P. Morrison (1959) "Searching for Interstellar Communications", Nature, bind 184, side 844.

[5] D.W. Swift (1990) "SETI Pioneers", The University of Arizona Press

[6] B.M. Oliver og J. Billingham (1973) "Project Cyclops: A Design Study of a System for Detecting Extraterrestrial Intelligent Life", NASA CR 114445

[7] P. Morrison m.fl. (1977) "The Search for Extraterrestrial Intelligence: SETI", NASA SP-419

[8] http://www.seti.org/

[9] http://www.setileague.org/

[10] http://setiathome.ssl.berkeley.edu/

[11] M. Linden-Vørnle (2002) "Med på en lytter" aktuel ASTRONOMI, nr. 3, side 14

[12] http://www.seti.org/science/ata.html

Anden del af denne artikel, der bringes i næste nummer af Kvant, vil fokusere på spørgsmålene: hvilke typer signaler leder vi efter og hvordan?, har vi nogensinde hørt noget?, hvordan kan et budskab fra ET se ud? skal vi selv sende signaler og hvis ja, hvilke? hvad er konsekvenserne af en kontakt?

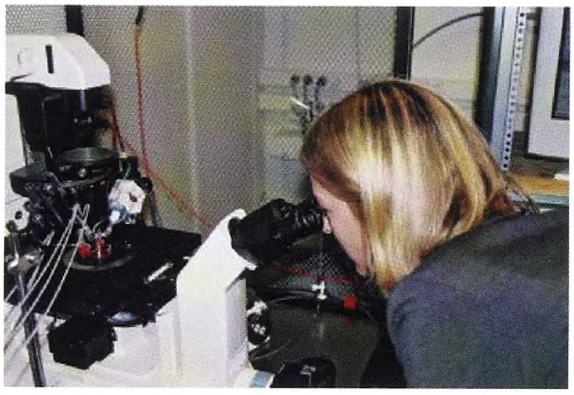
Michael J. D. Linden-Vørnle er astrofysiker ved Tycho Brahe Planetarium.

Vind en tur til Nobelprisuddelingen 2002

Christian Uhl, Ungdommens Naturvidenskabelige Forening.

Ungdommens Naturvidenskabelige Forening har i år den store glæde at kunne stille en billet på højkant til Nobelprisuddelingen den 10. december 2002. Det sker gennem et samarbejde med Stockholm International Youth Science Seminar (SIYSS), der arrangeres af Nobelkomitéen og Forbundet Unge Forskera (FUF).

SIYSS strækker sig fra den 4. til den 11. december, og her er der rig mulighed for at møde nobelpristagerne ved receptioner, pressekonferencer og til gallafesten i forbindelse med selve uddelingen.



Figur 1. Rundvisning på Karolinska Institut.

Samtidig bliver der arrangeret rundvisninger på nogle af Sveriges bedste forskningsinstutioner. Og endelig kommer vinderen til at møde unge naturvidenskabeligt interesserede fra stort set hele verden. Præmien inkluderer naturligvis togrejse, kost og logi.

Figur 2. De mandlige deltagere iført det obligatoriske kjole og hvidt (de kvindelige deltagere er iført balkjoler), umiddelbart inden prisoverrækkelsen. I baggrunden en af de 5 limousiner, der stod for transporten til prisoverrækkelsen, samt Stockholms skyline.

For at vinde skal man indsende et essay på 5-7 computerskrevne sider, der behandler et emne af teknisk eller naturvidenskabelig karakter. Om man vælger at gå i dybden med et snævert emne eller at beskrive et bredere emne er op til én selv. Vinderen, der på afrejsetidspunktet skal være mellem 18 og 25 år, findes blandt en konkurrencejury udvalgt af UNF.

Der er frist for indsendelse af essays den 15. oktober 2002. For mere information om blandt andet tekniske krav til essayet kan du besøge vores Nobelkonkurrencehjemmeside på **http://nobel.unf.dk**

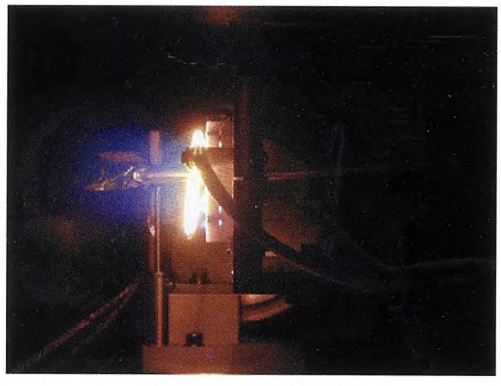
KVANT-nyheder

Redigeret af Michael Cramer Andersen

Mini plasmaraket til mikrosatellitter

RUMFART. En ny og mindre type styreraketter til mikrosatellitter er ved at blive udviklet. Den centrale mikro plasmaraketmotor er ved at blive testet ved NASAs Glenn Research Center i Cleveland. Den kompakte accelerator accelererer Xenon ioner som frigøres fra et plasma, der genereres i hulrum af millimeter størrelse. Der skal hverken bruges tunge magneter eller elektromagneter og plasmamotoren er effektiv: op til 88% af brændstoffet omdannes til ioner. Perfekt til at navigere små satellitter med.

Kilde: AIP Physics News 591, 29. maj 2002



Figur 1. Test af plasmamotoren til mikrosatellitter, fra www.aip.org/mgr/png/

CP-brud testet med høj præcision

PARTIKELFYSIK. To eksperimenter (KEK lab i Japan og SLAC lab i Californien) har for nylig testet CP-brud i B-mesoner. Fænomenet CP-brud går ud på, at ladningen (C) og pariteten (P) ikke altid er bevaret samtidigt i visse vekselvirkninger. CP-brud kan forklares indenfor Partikelfysikkens Standardmodel, en teori som giver en meget præcis beskrivelse af de tre mikroskopiske kræfter: elektromagnetisme, den stærke og den svage kernekræft, gennem udveksling af kraftbærende partikler. Resultaterne af CP-brud i B-mesoner blev rapporteret ved den internationale konference i højenergifysik i Amsterdam. Der har tidligere været uoverensstemmelse imellem forskellige målinger af en parameter kaldet $\sin 2\beta$, som måler graden af asymmetri mellem stof og antistof. BaBar-detektor gruppen ved SLAC målte parameteren til 0.74 ± 0.07. Belle-detektor gruppen i Japan opnåede et lignende resultat og begge værdier ligger tæt på værdien forudsagt af Standardmodellen. Tidligere uoverensstemmelser er således forsvundet. Med til historien hører, at BaBar-eksperimentet, gennem de tre år det har kørt, har produceret den største datamængde fra et enkelt eksperiment: 500.000 Gigabyte, som er blevet analyseret af 500 forskere og ingeniører i hele verden. Graden af asymmetri mellem stof og antistof som skyldes CP-brud kan ikke forklare hvorfor der kun findes stof og så godt som intet antistof. Denne ubalance indtraf i det meget tidlige univers og er ikke forklaret endnu.

Kilder: BaBar announces new result on Charge Parity violation, www.slac.stanford.edu/slac/media-info/20020723/sine2b.html; AIP Physics News 600, 1. aug. 2002

Virtuelle supersymmetriske partikler?

HØJENERGIFYSIK. Et eksperiment ved Brookhaven har målt på myonens magnetiske moment. Myonens magnetiske moment er relateret til myonens spin gennem g-parameteren og forskergruppen søgte at bestemme hvor meget g-parameteren afviger fra værdien 2, som forudsiges af teorien i tilfælde hvor myonen ikke vekselvirker med virtuelle partikler i vakuum. Sidste år blev der rapporteret resultater fra samme eksperiment der antydede, at myonen vekselvirkede med *virtuelle supersymmetriske partikler*. Supersymmetri, som er en populær udvidelse af Standardmodellen, forudsiger at hver boson har en fermion superpartner og hver fermion har en boson superpartner. De supersymmetriske partnere må være tungere end partikelacceleratorernes energiområde, for ellers ville de være blevet produceret og opdaget allerede. Eksperimentet udnytter, at eventuelle supersymmetriske partikler hele tiden vil dukke op i vakuum, som virtuelle partikler, og derved give et bidrag til myonens g-parameter. Ved at måle på mange myoners henfald mens partiklerne svinger i et magnetfelt er det muligt at sætte bånd på eksistensen af de postulerede supersymmetriske partnere. Forskergruppen har nu bekræftet deres tidligere målinger med dobbelt så høj præcision og resultaterne er konsistente med, at der er bidrag fra virtuelle partikler som er udenfor Standardmodellen. De supersymmetriske partikler er de mest eftertragtede. Resultaterne er ikke definitive, men det kan være de første tegn på at naturen er fundamentalt supersymmetrisk, men symmetrien er blevet brudt.

Kilder: Latest Muon g-2 Measurement, www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/2002/bnlpr073002.htm; AIP Physics News 600, 1. aug. 2002

Istider og spiralarme

KLIMAFYSIK. Istiderne på Jorden kan være forbundet med, hver gang Solsystemet passerer gennem en af Mælkevejens spiralarme. I spiralarmene er der særlig mange unge lysstærke stjerner som er hovedkilden til kosmisk stråling. Niveauet af den kosmiske stråling vil være ca. dobbelt så højt i en spiralarm som det nuværende niveau hvor vi befihnder os i den mindre Orion arm. Hvis der er en sammenhæng mellem kosmisk stråling og klimaet er hypotesen derfor meget interessant. Nir Shaviv fra universitetet i Toronto og Jerusalems Hebrew University har kortlagt Jordens eksponering af kosmisk stråling tilbage i tiden ved at studere 42 jernmeteoritter. Shaviv fandt, at den kosmiske strålingsflux varierede med en periode på ca. 143 millioner år hvilket korrelerer fint med både geologiske data for istidsvariationer og Solsystemets placering relativt til spiralarme. Spiralarmene er ikke permanente stive strukturer men går til stadighed i opløsning og gendannes. Ifølge Shavivs model er vi i efterstrømmen af en større istid.

Kilder: AIP Physics News 599, 24. juli 2002 og "Influence of Cosmic Rays on Earths Climate", AIP Physics News 401 (1998)

Sommerens asteroidetrusler

ASTRONOMI. I løbet af sommeren var der en del omtale af asteroiden 2002 NT7, opdaget 9. juli, som i følge de første offentliggjorte beregninger (102 observationer i perioden 9.–22. juli) ville ramme Jorden den 1. februar 2019. Senere beregninger, baseret på 118 positioner (i perioden 9.–29. juli), afslørede heldigvis, at asteroiden, der med sine 2 km i diameter og en masse på 11 mia. tons, kunne have forårsaget voldsomme ødelæggelser, *ikke vil ramme Jorden* men flyve tæt forbi. At truslen fra verdensrummet er reel nok blev sat i perspektiv nogle uger før, da en asteroide (2002 MN) den 14. juni susede blot 120.000 km forbi Jorden, svarende til 10 Jorddiametre eller en trediedel af middelafstanden til Månen. Denne asteroide blev først opdaget tre dage *efter* den tætte passage af det amerikanske LINEAR-program som systematisk gennemsøger himlen for asteroider, men i dette tilfælde altså ikke kunne have advaret i tide om en eventuel kollision. En tredje asteroides (2002 NY40) tætte passage af Jorden den 18. juli var 0,5 mio. km fra Jorden

da den kom tættest (svarende til 1,3 gange middelafstanden til Månen). Passagen kunne observeres med mindre teleskoper og 2002 NY40 blev fotograferet flere steder i verden hvorefter små animationer af begivenheden blev lavet.
Kilder: Tycho Brahe Planetariums nyheder for juli og august, www.tycho.dk; NASA/JPL Near-Earth Object Program, neo.jpl.nasa.gov; Animation, www.noao.edu/outreach/press/pr02/pr0207.html

Solneutrinoproblemet løst

ASTROPARTIKELFYSIK. I 1998 viste de første tegn sig på, at neutrinoer kan oscillere fra en type til en anden. Denne kvantemekaniske effekt kan kun forekomme hvis mindst en af typerne (ν_e, ν_μ eller ν_τ) har masse. Partikelfysikeksperimenter med tritiumhenfald kan kun bestemme kvadratet på neutrinomasseforskelle. Dette giver en øvre grænse på elektronneutrinoens masse på 2,2 eV. Den øvre grænse for myon- og tauneutrinomasserne er i MeV-området og altså ca. 1000 gange højere (måske højere end elektronmassen som er 511 keV). Det årtier gamle "Solneutrino problem" er efterfølgende blevet løst. Ved det nye Sudbury Neutrino Observatory har man målt direkte tegn på transformation mellem forskellige typer neutrinoer (oscillation) gennem målinger med Z^0-boson vekselvirkninger. At man kun målte en brøkdel af de teoretisk forudsagte elektronneutrinoer produceret i Solens fusionsprocesser skyldes, at en del af dem oscillerer på vejen mellem Solen og Jorden og ankommer som myon- eller tauneutrinoer som er vanskelige at detektere.
Kilde: www.aip.org/enews/physnews/2002/split/586-1.html; Sudbury Neutrino Observatory, www.sno.phy.queensu.ca/

Neutrinoer som varmt mørkt stof

KOSMOLOGI. Der er næsten ligeså mange neutrinoer i Universet som fotoner og deres antal overgår antallet af protoner og neutroner med omkring en faktor milliard. Hvis bare neutrinoerne har en lille masse vil de altså kunne bidrage til Universets totale massetæthed. En ny vurdering af neutrinoens masse kommer fra en analyse af 250.000 galaksers fordeling samlet i "2dF Galaxy Redshift Survey". Galaksernes rødforskydning blev målt, 400 af gangen, med et teleskop i Siding Spring Mountain i Australien. Galaksernes indbyrdes afstande blev sammenlignet parvist (den såkaldte statistiske topunkts korrelation) og et galaktisk "power-spektrum" blev tegnet. Denne korrelation giver vigtig information om tætheden af forskellige typer af stof: baryoner (protoner, neutroner), koldt mørkt stof (WIMPs) og varmt mørkt stof (her er neutrinoer en førende kandidat). Konklusionerne på 2dF arbejdet er 1) Neutrinoer kan ikke udgøre mere end 13% af stoffet i Universet og 2) Summen af alle neutrinomasserne (elektron-, myon- og tauneutrinoer) er ikke højere end 2,2 eV. Oystein Elgaroy fra University of Cambridge, udtaler på vejne af gruppen, at dette er den bedste øvre grænse på neutrinomassen baseret på en relativt konservativ antagelse om Universets samlede massetæthed.
Kilde: AIP Physics News 600, 1. aug. 2002.

Sonoluminiscens er kemisk

LYD- og LYSFYSIK. Når en væske udsættes for ultralydbølger omsættes energien til hurtige oscillationer i væsken hvorved der dannes bobler som udsender lys i picosekund pulser (denne effekt kaldes sonoluminiscens). Et eksperiment der havde tilført deuteriumholdige molekyler i væsken og beskød opstillingen med hurtige neutroner søgte at forklare energien ved en kernefusionsproces (se sidste udgave af KVANT-nyheder). Et nyt eksperiment, ved University of Illinois, har aflivet noget af den mystik der var omkring sonoluminiscens. Forskerne bag det nye forsøg, Y. Didenko og K. Suslick, hævder at de intense lydbølger sammenpresser boblerne, og temperaturen stiger til 10.000–20.000 Kelvin, hvorved mange gasmolekyler ioniseres og en række kemiske reaktioner følger. Forskerne fulgte reaktantprodukterne i en enkelt luftbobbel, især nitritioner (NO_2), hydroxylradikaler (OH) og lys. Konklusionen var, at størstedelen af den soniske energi gik ind i kemiske reaktioner, en mindre del blev konverteret til lys og tilbage blev meget lidt energi til eventuelle kernefusionsprocesser.
Kilde: AIP Physics News 599, 24. juli 2002

KVANT-nyheder på nettet: www.nbi.dk/dfs/ny/

Rettelse

Universets alder og de første tunge grundstoffer

I artiklen *"Universets alder og de første tunge grundstoffer"*, Kvant, bind **13**, nr. 2, side 6–8, maj 2002, af Birgitta Nordström og Johannes Andersen, var der desværre en fejl i definitionen af $t_{1/2}$ i afsnittet om "Radioaktive Aldersbestemmelser", to linier over ligning (1). Den korrekte formel skal være $t_{1/10} = t_{1/2}/\log 2$.

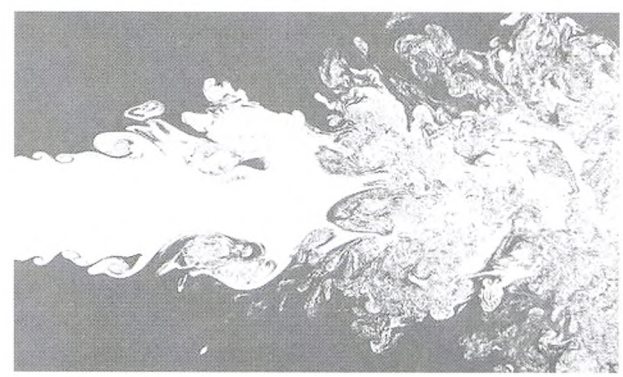
Turbulens og turbulent diffusion

Jakob Mann, Afd. for Vindenergi, Risø, Søren Ott, Afd. for Vindenergi, Risø, Hans L. Pécseli, Fysisk Institut, Universitetet i Oslo, I. Maria Pécseli, Danmarks Miljøundersøgelser, og Jan Trulsen, Institut for Teoretisk Astrofysik, Universitetet i Oslo.

Turbulente, eller kaotiske strømninger har fascineret kunstnere i århundreder. Nogle af de tidligste afbildninger, der kendes, stammer tilbage til Leonardo da Vinci fra omkring år 1500. Turbulente strømninger kan observeres dagligt, og er vel basalt set kendt af alle læsere. Fænomenet illustreres på figur 1, men læserne opfordres til, at tage sig tid til selv at betragte røgen fra en skorsten, mens den deformeres af atmosfærens turbulens. Det behøver såmænd ikke være en dag med nogen videre blæst [1].

Det var imidlertid først omkring 1870 at den engelske fysiker Reynolds udførte nogle banebrydende kvalitative såvel som kvantitative undersøgelser af turbulens. Han lod væsker strømme gennem rør, og førte gennem en lille dyse lidt blæk ind i den ende af røret hvor han tilførte væsken, og kunne derved synliggøre dens bevægelse. Reynolds fandt, at han kunne identificere to tilsyneladende vidt forskellige tilstande for strømningen; en *laminar*, hvor alle strømlinierne var stort set parallelle, og en *turbulent* eller kaotisk strømning. Overgangen fra den ene til den anden tilstand skete ved en veldefineret strømningshastighed. Man har senere fundet, at ved varierende diametre for rørene og forskellige strømningshastigheder kan overgangen fra den ene tilstand til den anden beskrives ved en simpel parameter $R = UL/\nu$, som vi i dag kalder Reynolds tal, her udtrykt ved strømningshastigheden U, rørets diameter L og væskens kinematiske viskositet ν. Hvis R var lille, var strømningen laminar, mens man for store værdier for R fandt den turbulente tilstand. Det var tilsyneladende ligegyldigt om den aktuelle værdi for R blev opnået ved stort U og lille L, eller omvendt. Den kritiske værdi for R lå i Reynolds ekperimenter omkring 1000.

Fra et teoretisk synspunkt blev turbulens i mange år betragtet nærmest som utilgængeligt. Ved betragtning af for eksempel figur 1 virker det helt håbløst, at give et analytisk udtryk for væskehastigheden i et punkt i rummet (når man undtager dysens åbning). Det var først gennem banebrydende arbejder af blandt andre Taylor og Prandtl (henholdsvis en engelsk og en tysk fysiker) i begyndelsen af 1900-tallet og den sovjetiske matematiker Kolmogorov's arbejder omkring 1940, at man opnåede de første skridt på vejen til en grundlæggende teoretisk forståelse. Taylors og Prandtl's fortjeneste bestod i at vise hvorledes man med fordel kunne angribe problemet ud fra et statistisk synspunkt. Kolmogorov tilførte disse betragtninger de første forsøg på en kvantitativ forudsigelse af vigtige statistiske størrelser for usammentrykkelige væsker, hvor han især koncentrerede sig om spektrene for de fluktuerende hastigheder. På grund af forholdene under og lige efter II verdenskrig blev Kolmogorovs arbejder ikke umiddelbart kendt i omverdenen. Det er interessant at bemærke, at en del af hans resultater blev genopdaget af flere andre, for eksempel Onsager, Heisenberg og von Weizsäcker.



Figur 1. Fotografiet viser en vandstråle (en "jet"), der sendes ind i et kar med væske, som til at begynde med er i hvile. Det fremgår, hvorledes strømningen bliver mere og mere kaotisk bort fra dysen til venstre i billedet.

Analytiske betragtninger

Vi skal her prøve at give en kort opsummering af et hovedresultat, der behandler hastighedsforskelle i turbulente væsker. Analysen opsummeret her er stærkt simplificeret, men gengiver dog korrekt de vigtigste resultater. Vi betragter først et turbulent hastighedsfelt, hvor rum-tids variationen af den lokale væskehastighed er beskrevet ved $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$. Herved forstås et vektorfelt, hvor der til hvert punkt i rummet til enhver tid er tilegnet en hastighedsvektor $\mathbf{u}$. Vi går ud fra, at disse hastigheder i en statistisk forstand er homogene, d.v.s. de statistiske egenskaber vedbliver at være de samme, uafhængigt af hvilke punkter i rummet analysen refererer til. Vi går ud fra, at hastighedsfeltet også er isotropt, d.v.s. at de statistiske egenskaber ikke ændres selvom vi beskriver feltet i et koordinatsystem der er drejet i forhold til det oprindelige. Disse antagelser er ensbetydende med at det turbulente hastighedsfelt ikke har noget punkt, der udmærker sig fra andre, og at det heller ikke har nogen udvalgte retninger. Dette modelsystem må naturnødvendigt være uendelig udstrakt (ellers ville det i høj grad betyde noget om man udfører analyse inde i eller udenfor systemet!) og vi kan da ikke have nogen længdeskala L, som karakteriserer systemets størrelse på samme måde som i Reynolds eksperiment. Da der ikke er nogen udvalgt retning, har

vi heller ikke nogen middelstrømningshastighed i mediet. Dette sidste er dog kun en formel begrænsning, man har lov til at ændre beskrivelsen til et referencesystem, der følger med en fast strømningshastighed. Det bør nok fremhæves, at det her beskrevne system er yderst idealiseret, og ikke kan realiseres eksakt i noget laboratorieeksperiment, men det er et, som vi skal se, interessant tankeeksperiment. Man kan vel sige, at hvis ikke engang denne idealiserede situation kan forstås og beskrives, så skal vi heller ikke gøre os forhåbninger ved mere realistiske forhold. Strømningen vist i figur 1 opfylder tydeligvis ikke disse idealiserede forudsætninger, men et begrænset område til højre i billedet *kan* måske betragtes som lokalt homogent.

Vi ønsker nu at finde matematiske udtryk for relevante statistiske middelværdier i det føromtalte idealiserede turbulente hastighedsfelt. For en ordens skyld må vi vel gøre klart hvad vi egentlig mener med en statistisk middeværdi i denne forbindelse; det antages at vi, i det mindste i princippet, har et meget stort, helst uendelig stort, antal uafhængige eksperimentelle observationer til rådighed. Vi kalder dette et ensemble af realisationer, og går ud fra, at de alle er karakteriserede af de samme *ydre* parametre. Disse parametre er væskens kinematiske viskositet ν og den gennemsnitlige energidissipation i hastighedsfluktuationerne. Endelig antages det, at systemet er tidsstationært i en statistisk forstand; ligegyldigt hvilket tidspunkt vi vælger at tage middelværdier over ensemblet, får vi det samme resultat; tidsaksen har ikke noget udvalgt begyndelsespunkt. Dette kræver implicit, at hastighedsfeltet har eksisteret uendelig længe, hvilket igen er en kraftig idealisering, men det er dog let at forestille sig et system, der har nået en statistisk ligevægt. I det omfang vi kun ser på tider efter at denne ligevægt er nået, så er fejlen ved en stationaritets-antagelse nok ikke så stor.

Antag, at der konstant tilføres energi til systemet ved bevægelse på store skalaer (ved "omrøring" på en ikke nærmere specificeret måde), samt at fluktuationsniveauet er konstant i tid når det tages som gennemsnit over hele systemet. Dette betyder, at den tilførte energi balanceres af den energi, der dissiperes af viskositeten. Denne energi bliver til varme. Den dissiperede energi pr. kilogram væske pr. tidsenhed kalder vi ϵ. Det vi *ikke* har kontrol over er den måde energien fordeler sig på i detaljer; for eksempel forventes den nøjagtige position og størrelse af hvirvlerne på figur 1 at være statistisk fordelte. Vi kan vælge at tage middelværdien af hastigheden og finder med de givne antagelser at $\langle u \rangle = 0$. Tegnene $\langle\rangle$ viser at vi tager en middelværdi over det før omtalte ensemble i et udvalgt punkt. En mere interessant størrelse er hastighedens middelkvadrat $\langle u^2 \rangle$, som er forskellig fra 0, og med den givne antagelse om homogenitet og stationaritet er den uafhængig af, hvilket punkt og tidspunkt vi vælger at bestemme den i.

En vigtig størrelse ved beskrivelsen af et turbulent hastighedsfelt er strukturfunktionen Ψ_2, som giver middelkvadratet af hastighedsforskellen mellem to punkter

$$\Psi_2(\boldsymbol{\xi}) = \left\langle (\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) - \mathbf{u}(\mathbf{r} + \boldsymbol{\xi}, t))^2 \right\rangle . \qquad (1)$$

På grund af den antagne homogenitet af hastighedsfeltet vil Ψ_2 ikke afhænge af positionsvektoren $\mathbf{r}$, og på grund af stationariteten heller ikke af tiden t. På grund af antagelsen om isotropi forventer vi, at Ψ_2 afhænger af størrelsen $|\boldsymbol{\xi}|$, men ikke af vektoren $\boldsymbol{\xi}$'s retning. selvom systemet er antaget homogent vil *hastighedsforskelle* alligevel afhænge af separations-afstanden; i to nabopunkter med meget lille separation er hastighederne målt til samme tid *næsten* ens og dermed $\Psi_2(\xi) \approx 0$ for ξ meget lille. For større separationer er afvigelser i de to hastigheder større, og Ψ_2 bliver større.

Vi bemærker som udgangspunkt, at hastighed måles i enheden meter pr. sekund, eller, om vi frigør os fra SI enhedssystemet; længde pr. tidsenhed, som vi her blot skriver som ℓ/T. Strukturfunktionen Ψ_2 måles da i enhederne ℓ^2/T^2. Vi noterer os nu, at enhver benævnt funktion, d.v.s. en funktion som udtrykker en størrelse, der måles med en enhed (i modsætning til et rent tal), kan skrives som et produkt af en størrelse med den korrekte enhed og en ubenævnt funktion af en (eller flere) ubenævnt(e) størrelse(r). Dette lyder måske ikke umiddelbart oplagt, men ved at lave et par prøveeksemper, kan man overbevise sig om at det er rigtigt. Det er nu oplagt, at Ψ_2 må indeholde parametrene ν og ϵ. Disse er også de eneste parametre vi har, med de givne antagelser. Enheden for kinematisk viskositet er ℓ^2/T og for ϵ er den ℓ^2/T^3. Det kan nu let vises, at den eneste kombination af ν og ϵ som giver enheden ℓ^2/T^2 er $(\epsilon\nu)^{1/2}$.

Vi prøver nu at anvende disse betragtninger på $\Psi_2(\xi)$. For at få en dimensionsløs variabel ud fra ξ, som i sig selv måles med længdeenheden, noterer vi os at den eneste ubenævnte størrelse vi kan få ved at kombinere ξ, ν og ϵ er $\xi\epsilon^{1/4}/\nu^{3/4}$. (Læserne opfordres til selv at eftervise dette!) Vi kan derfor skrive

$$\Psi_2(\xi) = (\epsilon\nu)^{1/2} F(\xi\epsilon^{1/4}/\nu^{3/4}) \qquad (2)$$

hvor F er en ubenævnt funktion, som foreløbig er ukendt. Vi bemærker nu, at viskositet kun påvirker de mindste skalastørrelser i et hastighedsfelt. Dette er i overensstemmelse med vore daglige iagttagelser, og har et matematisk grundlag i Navier–Stokes ligningen, som bruges ved den analytiske beskrivelse af væsker og gasser. Med udgangspunkt i denne antagelse venter vi, at der findes et område, hvor (2) er uafhængig af ν. For at ν skal forsvinde fra udtrykket (2) kræves det øjensynligt, at $F(\xi\epsilon^{1/4}/\nu^{3/4}) \sim (\xi\epsilon^{1/4}/\nu^{3/4})^{2/3}$ i det pågældende interval for ξ. Dette ses let. I denne grænse, forventer vi da at

$$\Psi_2(\xi) \approx C_1(\epsilon\xi)^{2/3} \qquad (3)$$

hvor C_1 er en foreløbig ukendt numerisk konstant. Ubenævnte talkonstanter kan ikke bestemmes udelukkende ved diskussioner som de før anførte.

Der er oplagt grund til skepsis hvad angår (3), idet udtrykket divergerer for $\xi \to \infty$. Intuitivt ville man forvente, at for meget store separationer vil $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$ og $\mathbf{u}(\mathbf{r} + \xi)$ være statistisk uafhængige, hvorved

$$\Psi_2(\xi) \to 2\langle u^2 \rangle \qquad \text{for} \qquad \xi \to \infty \qquad (4)$$

i denne grænse, i modstrid med (3). Udtrykket (3) kan derfor kun forventes at være gyldigt i et begrænset interval. Vi kan antage, at der findes en karakteristisk længdeskala $\mathcal{L}_c$, som begrænser gyldigheden af (3).

Den skarpsindige læser vil nu bemærke, at så må $\mathcal{L}_c$ være en "ydre" parameter, som vi har udeladt i dimensionsanalysen, og det er rigtigt. Man kunne måske tro, at $\mathcal{L}_c$ var proportional med $\nu^{3/4}/\epsilon^{1/4}$, men denne størrelse, som kaldes Kolmogorovs længdeskala, er den karakteristiske størrelse af de *allermindste* hvirvler. $\mathcal{L}_c$ er snarere et mål for størrelsen af de *største* hvirvler. I vores tænkte uendelige system er der ikke nogen grænse for hvirvlers størrelse; men det er der selvfølgelig i et virkeligt system med en endelig størrelse. Den mekanisme, som genererer turbulensen kan også have betydning. Bruger man for eksempel et oscillerende gitter, bliver $\mathcal{L}_c$ proportional med perioden i gitteret. Normalt bliver turbulens sat i gang af bevægelser af forholdsvis store væskemængder, altså store hvirvler. De store hvirvler kolliderer med hinanden og skaber mindre hvirvler, som også kolliderer med hinanden og skaber endnu mindre hvirvler etc. Man taler derfor om en energikaskade, hvor den kinetiske energi af store hvirvler overføres til kinetisk energi af mindre og mindre hvirvler. Det er lidt på samme måde som i en skærveknuser, hvor store sten knuser hinanden og bliver til mindre sten, som igen knuser hinanden osv. Processen stopper når hvirvlerne bliver på størrelse med Kolmogorovs længdeskala og bliver her omdannet til varme. Selvom der skulle være en vis form for organisation i de største hvirvler, er det naturligt at forvente, at enhver form for orden forsvinder undervejs i energikaskaden. De mindste hvirvler er blevet vendt og drejet så mange gange, at alle retninger er blevet lige gode, og deres egenskaber er derfor isotrope. De er også blevet flyttet rundt på så mange gange, at deres egenskaber ikke kan variere ret meget fra punkt til punkt. Det eneste der bestemmer deres egenskaber er derfor selve energiomsætningen ϵ, samt viskositeten ν.

Turbulent diffusion

Udtrykket (3), og andre udtryk afledt af det, er blevet meget overbevisende bekræftet eksperimentelt for store separationsintervaller. Opmuntret af denne succes har man også interesseret sig for andre størrelser, for eksempel de mere generelle strukturfunktioner $\Psi_n \equiv \langle (\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) - \mathbf{u}(\mathbf{r} + \xi, t))^n \rangle$, og fundet at simple skaleringslove, som de før viste ikke længere giver resultater i overensstemmelse med observationer. Turbulente strømninger er et aktuelt og spændende forskningsområde både fra et teoretisk og fra et eksperimentelt synspunkt. Når man tager et blik over den litteratur der findes over emnet, kan man nu alligevel godt blive lidt overrasket over den umådelige mængde af lærebøger og specialtidsskrifter. Sagen er imidlertid at turbulens har stor praktisk og økonomisk betydning i mange forskellige sammenhænge. For eksempel ville luftforurening ikke være noget problem, hvis det ikke var for turbulens i atmosfæren. Diffusion på grund af termiske bevægelser (det vi normalt kalder "Brownske bevægelser") er en meget ineffektiv transportmekanisme. Hvis atmosfæren altid var i ro, kunne man blot feje forureningen sammen under fabriksskorstenene når det var fyraften. Et af de vigtigste egenskaber ved turbulens er, at det medfører en meget effektiv transport i atmosfæren. Dette har eksempelvis betydning ved luftbåren spredning af sygdomme specielt indenfor landbruget, samt blanding af kemisk reaktive materialer, for eksempel luft og benzindampe i forbrændingsmotorer. Det er desuden vigtigt, at tage hensyn til turbulens ved design af vinger til flyvemaskiner og vindmøller, og ved transport af olie og gas i rørledninger, etc. I det følgende skal vi illustrere turbulent transport ved et laboratorieeksperiment, og vise, hvorledes resultaterne kan have betydning i for eksempel biologiske sammenhænge.

Diffusion af enkelt-partikler

Det simpleste spørgsmål man kan stille i forbindelse med turbulent transport berører bevægelsen eller forskydningen af en enkelt partikel i en turbulent væske, hvor det antages at partiklen passivt følger med væskens bevægelse. Hvis en punktformig partikel slippes løs til tiden $t = 0$ i punktet $\mathbf{r} \equiv (x, y, z) = (0, 0, 0)$, vil forskydningen i et meget kort tidsinterval være $\mathbf{r} = \mathbf{u}t$, hvor $\mathbf{u}$ er den hastighed væsken havde på partiklens position til $t = 0$. Tager vi realisationerne i ensemblet, og bestemmer middelværdien finder vi oplagt, at for disse korte tider er $\langle \mathbf{r}(t) \rangle = 0$ da $\langle \mathbf{u} \rangle = 0$, men at $\langle r^2(t) \rangle \approx \langle u^2 \rangle t^2$ i et kort tidsinterval.

For store tider bliver selv dette basale problem kompliceret, og talrige forfattere har arbejdet med teorier, der kan simplificere de analytiske udtryk. For store tider, d.v.s. lang tid efter at partiklen har forladt sit udgangspunkt, er det dog muligt at give et kvalitativt udtryk for $\langle r^2(t) \rangle$. Vi kan antage, at til disse sene tidspunkter er afstanden mellem partiklens udgangsposition og den aktuelle partikel position større end størrelsen på de største hvirvler i systemet, se for eksempel figur 1. Vi kan gå ud fra, at det er disse store hvirvler, som giver de største partikelforskydninger ved konvektion; alle de små hvirvler vil blot give anledning til, at partiklen "virrer" lidt omkring. Hvis disse store hvirvler levede meget længe, for eksempel i form af store kohærente strukturer, ville de under en halv omdrejning føre partiklen langt bort fra udgangspunktet, for derefter at føre den tilbage igen. Imidlertid er levetiden for disse store hvirvler ikke stor; de overlever typisk en halv omdrejning, det man kalder en "eddy turn

over time". Det er vanskeligt at oversætte, men ordet "eddy" kan tages som synonymt med "hvirvel". Når den ene hvirvel dør ud, er en ny allerede ved at blive skabt af de turbulente fluktuationer, men dennes centrum er som regel et andet sted end den forrige hvirvels. Den nye hvirvel flytter igen på partiklen, og processen fortsætter på denne måde. Som en lidt grov illustration kan vi antage, at partiklen i løbet af en "eddy turn over time, τ_c" flytter sig en afstand $\mathcal{L}$ i en tid τ_c, men *retningen* kan være helt tilfældig. $\mathcal{L}$ repræsenterer en karakteristisk diameter af de største hvirvler. Partikelpositionens x, y og z koordinater efter n sådanne skridt kan da skrives som summen af mange sådanne forskydninger. Som en simpel illustration kan vi bruge en todimensional model (d.v.s. en partikel, der bevæger sig på et plan), og finder partiklens koordinater ved det n-te skridt som $(x_n, y_n) = \mathcal{L}\sum_{j=1}^{n}(\cos\theta_j, \sin\theta_j)$, hvor θ_j kan antage alle værdier i intervallet $[0,2\pi[$ med lige stor sandsynlighed. Ethvert skridt antages statistisk uafhængigt af alle andre, d.v.s alle θ_j antages at være statistisk uafhængige. Ved at midle over alle θ ses at $\langle \mathbf{r}_n \rangle = 0$, men at $\langle r_n^2 \rangle \equiv \langle x_n^2 + y_n^2 \rangle \approx \frac{1}{2}\mathcal{L}^2 n$. Ved at indføre tidspunktet for det n-te trin som $t = n\tau_c$ fås $\langle r^2(t) \rangle \approx \frac{1}{2} t\mathcal{L}^2/\tau_c$. Vi kan gøre dette udtryk *lidt* mere præcist ved som størrelsesordens-betragtning at benytte, at partiklen under hvirvlens rotation flyttes med væskens lokale hastighed $\mathbf{u}$, og bruge $(\mathcal{L}/\tau_c)^2 \approx \langle u^2 \rangle$ hvilket giver $\langle r^2(t) \rangle \approx \frac{1}{2} t \langle u^2 \rangle \tau_c$. Dette resultat kan vises at være eksakt i den asymptotiske grænse for store t, såfremt τ_c fortolkes som den såkaldte Lagrangeske integraltidsskala. Det er interessant, at resultatet i denne grænse er det samme man får for en klassisk diffusionsproces, hvis vi fortolker $\mathcal{L}^2/\tau_c \approx \langle u^2 \rangle \tau_c$ som en diffusions koefficent, hvor vi bemærker, at enheden for en sådan diffusions koefficient er ℓ^2/T, eller *længde* $\times$ *hastighed*. Der er fundet særdeles fin overensstemmelse med en sådan diffusions model ved eksperimentelle observationer af partikelbevægelse i turbulente væsker.

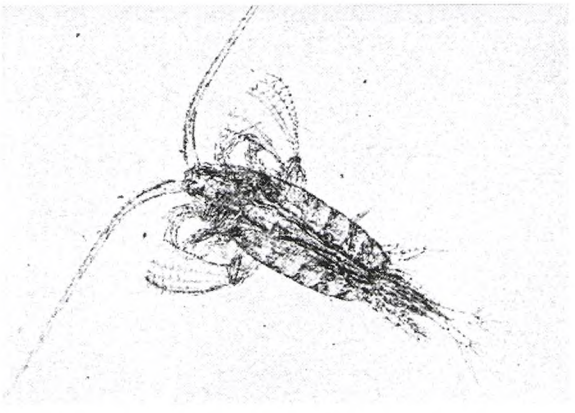
Relativ bevægelse af to partikler

Et andet, og mindst lige så interessant statistisk problem knytter sig til beskrivelsen af den relative bevægelse af *to* partikler, der i udgangspunktet er separeret med en kendt afstand. I dette tilfælde kan man søge oplysning om *to* størrelser; de to partiklers middelposition, og desuden deres separation, begge dele som funktion af tiden. Såfremt de to partikler er langt fra hinanden vil vi forvente, at deres bevægelser er statistisk uafhængige, og problemet reduceres i princippet til det foregående en-partikel problem. Hvis partiklerne er tæt på hinanden, kan væskehastighederne på deres to positioner ikke med rimelighed antages at være uafhængige; partiklernes bevægelser siges at være *korrelerede*.

Opmuntret af succesen af en diffusionsmodel for en-partikelbevægelsen kunne man nu fristes til også at søge en model for den relative bevægelse mellem to partikler. Vi forsøger igen at finde udtryk for en karakteristisk længdeskala og en karakteristisk hastighed. Hvad hastigheden angår er valget let; det bør være den relative partikelhastighed, som vi introducerede i (1). Med de givne forudsætninger er det simpleste udtryk for en karakteristisk hastighed mellem de to partikler $\mathcal{U} \approx \sqrt{\Psi_2(\xi)} \sim (\epsilon\xi)^{1/3}$. Hvad angår en karakteristisk afstand må vi se på de hvirvler, der har betydning for den relative bevægelse. Den mest effektive separationsmekanisme vil opstå i den situation, hvor de to partikler befinder sig på hver sin hvirvel. Meget små hvirvler, meget mindre end partikelseparationen ξ, vil også her blot give anledning til en "virren" af partikler i forhold til hinanden, og ikke bidrage nævneværdigt til deres separation. Sandsynligheden for at finde partiklerne med én hver på to meget store hvirvler (store i forhold til partikel separationen) med diameter $\mathcal{D}$, som ligger "kant mod kant", kan estimeres som forholdet $\xi/\mathcal{D}$, på nær en talkonstant, som ikke er meget forskellig fra 1. Sandsynligheden for at begge partikler er på samme store hvirvel er tilnærmet $(\mathcal{D} - \xi)/\mathcal{D} \gg \xi/\mathcal{D}$. Vi kan da med stor rimelighed gå ud fra at så længe vi begrænser os til at diskutere hvirvler med størrelse $\mathcal{D} \gg \xi$, så vil begge partikler mest sandsynligt befinde sig i samme hvirvel. En stor hvirvel vil imidlertid ikke gøre andet end at flytte de to partikler mere eller mindre parallelt, og bidrager derfor ikke til deres separation. Den mest effektive spredningsmekanisme vil skyldes hvirvler, som er tilnærmet af størrelsen ξ. For en givet partikelseparation er den karakteristiske størrelse $\mathcal{L}$ for de "effektive" hvirvler altså separationen selv, d.v.s. ξ. For partikler der i begyndelsen var nær hinanden, sker forskydningen i begyndelsen med små skridt. Når afstanden øges, bliver større og større hvirvler effektive ved separationen, og forøgelsen af partikelafstanden accelererer. Dette sker dog ikke direkte proportionalt med partikelseparationen, idet "eddy turn over time" for de større hvirvler er større end for små; vi kan bruge estimatet $t \sim \xi/\mathcal{U} \sim \xi^{2/3}/\epsilon^{1/3}$, hvor $\mathcal{U}$ er introduceret tidligere. Hvis vi forestiller os partikelseparationen på et sent tidspunkt som resultatet af mange enkelte skridt, er det sidste skridt større end alle de foregående, og også det der tager den længste tid. Igen kan vi, som et estimat, bruge den forrige størrelseordens-betragtning og får relationen mellem middelkvadratet af partikelafstanden og tidsvariablen til at være $\langle \xi^2 \rangle \sim \epsilon t^3$. Denne relation kendes som *Richardson's lov*, og har været eftervist eksperimentelt med stor nøjagtighed i et betydeligt tidsinterval.

Det er let at forestille sig sammenhænge, hvor det er relativ diffusion mellem to partikler, som er den fysisk relevante problemstilling, og ikke den *absolutte* diffusion. I biologisk sammenhæng kan vi for eksempel forestille os fødeprocessen for fiskelarver, der typisk lever af plankton [2]. I dette tilfælde er både "byttet"og fiskelarven karakteriseret ved at have en negligerbar egenbevægelse. Dette betyder at en fiskelarve, eller anden tilsvarende organisme der befinder sig i stille vand, hurtigt vil tømme sit "nærområde" for bytte, og derefter

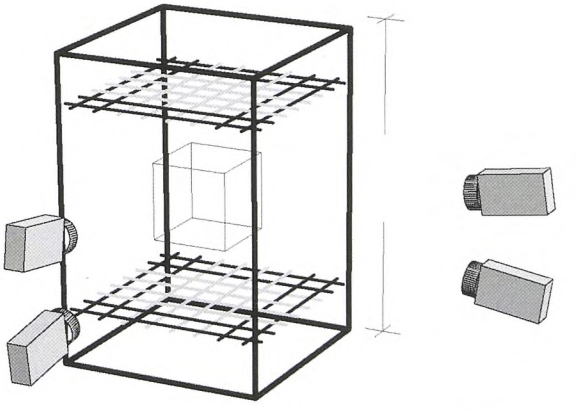
vil sulte. Hvis der er en jævn, laminar, strømning i vandet ændrer dette selvfølgelig ingenting, idet både bytte og fiskelarve føres med vandet, uden at de relative afstande ændres. Hvis strømningen bliver turbulent er sagen imidertid en anden. Somme tider fjerner de to sig fra hinanden, andre gange nærmer de sig, og ind imellem kommer byttet nær nok på fiskelarven til at det kan blive indfanget. Et vigtigt spørgsmål er i denne forbindelse, hvor meget bytte pr. sekund en fiskelarve kan indfange for givne turbulensparametre og koncentration af bytte i det omgivende vand. Argumenterne er selvfølgeligt de samme for en mængde småorganismer, hvor vi i figur 2 viser et illustrativt eksemplar.



Figur 2. "*Centopages violaceus*", en planktonisk marin copepod. I nogle forbindelser optræder den som byttedyr, i andre (overfor alger og lignende) som "rovdyr" [2].

Eksperimentelle observationer

På grund af blandt andet den store opmærksomhed omkring forureningstransport i atmosfæren, er der udført mange eksperimentelle undersøgelser af turbulent diffusion. I det følgende skal vi kort omtale et mindre laboratorieeksperiment, som er opstillet specielt med henblik på at studere relativ partikelbevægelse [3]. Eksperimentet er skitseret i figur 3. Ved at bevæge de to plastikgitre i tankens bund og top (typiske frekvenser for bevægelsen er 1–3 Hz) skabes et kontrolleret og reproducerbart turbulens-niveau i kammeret. Små plastikkugler med diameter 0.5–0.6 mm og samme vægtfylde som vand opslemmes i beholderen, og deres trajektorier følges med 4 videokameraer, som vist på figur 3. Et billede eksponeres hver 1/25 s, med et stroboskop, der er synkroniseret med videokameraerne. (For de særligt interesserede kan det nævnes, at stroboskopet stammer fra et diskotek). Man har altså adgang til partiklernes position 25 gange pr. s, og kan derefter udregne deres hastighed med stor nøjagtighed. Vi kan gå ud fra, at partiklerne passivt følger med vandets bevægelse, og målingen giver derved også *vandets* lokale hastighed. I et eksperiment følges omtrent 1000 partiklers baner samtidigt i op til 40 s. Mange trajektorier er dog kortere, da det ikke altid er muligt entydigt at forbinde partikelbaner, hvis der lokalt sker et stort "spring" på steder med lokalt store hastighedsfluktuationer. I figur 4 vises en trajektorie for en enkelt udvalgt partikel. Typiske partikelhastigheder er 15 mm/s.

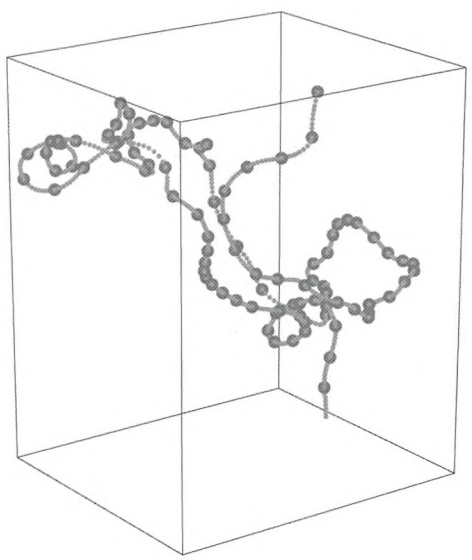


Figur 3. Skematisk præsentation af et laboratorie-eksperiment, hvor et turbulent hastighedsfelt i vand genereres ved to bevægelige gitre i eksperimentets bund og top [3]. Banerne af små plastikkugler kan følges ved 4 videokameraer, hvor positioner bestemmes indenfor det markerede delvolumen midt i eksperimentet. Kammerets indre mål er $32\times32\times45$ cm^3.

Idet vi med god nøjagtighed kan antage, at en partikels hastighed repræsenterer væskens hastighed på partiklens position, er det muligt at opnå en ganske detaljeret statistisk beskrivelse af den turbulente strømnings karakteristiske parametre. I figur 5 vises for eksempel en eksperimentelt bestemt anden ordens strukturfunktion, $\Psi_2(\xi)$. Den fuldt optrukne kurve er det analytiske resultat (3). For små separationsafstande, ξ, ses overensstemmelsen at være god. Vi kan trygt gå ud fra, at turbulensen i det givne eksperiment i et rimeligt stort længde interval *virkelig* følger en universel hastighedsfordeling.

I eksperimentet er det også muligt at udføre detaljerede undersøgelser af turbulent diffusion. Her skal vi diskutere en proces, som har relation til det problem der blev omtalt sidst i forrige afsnit. Vi ønsker at estimere den turbulente fluks af for eksempel plankton til en fiskelarve, og vil vise, at eksperimentet diskuteret her kan bidrage til at belyse også dette og lignende spørgsmål. Fra eksperimentet har vi som nævnt samtidige observationer af op til 1000 partikler. Vi kan nu vælge én af dem til at være fiskelarve med en valgt rækkevidde $\mathcal{R}$, og alle de andre til at være bytte [4]. Lige så snart byttet er indenfor en afstand $\mathcal{R}$, lader vi det blive "spist" d.v.s. vi fjerner det fra databasen. Vi har nu en konkurrence mellem to effekter; på den ene side bliver larvens nærområde tømt for bytte fordi de bliver indfanget, på den anden side tilføres der hele tiden mere bytte på grund af den turbulente "omrøring". Denne konkurrence illustreres ved at tælle antallet af bytte som indfanges pr. sekund, d.v.s. fluksen af bytte. Hvis vi kun udfører den her skitserede analyse én gang, er kurven meget uregelmæssig, men med den store datamængde der er til rådighed kan man udnævne

mange af polystyrenkuglerne til at være fiskelarver, og tage middelværdien af de mange flukskurver og på den måde få en god statistik. I det allerførste tidsinterval er tætheden af bytte størst, og vi forventer, at der indfanges mest bytte der, hvorefter flukskurven vil aftage for eventuelt at nærme sig en stationær værdi. I figur 6 viser vi eksempler på eksperimentelt bestemte flukskurver for tre forskellige værdier af $\mathcal{R}$.

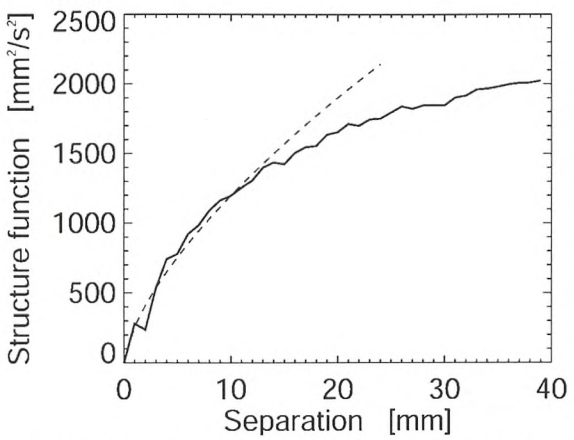


Figur 4. Banen af en udvalgt partikel. De små cirkler er partikel positionen bestemt ved hjælp af stroboskopet, og den optrukne linie er den numerisk interpolerede bane, eller trajektorie.

Igen ved brug af skalaargumenter kan vi opstille et analytisk udtryk for parametervariationen af den turbulente fluks til en kugle med radius $\mathcal{R}$. En partikelfluks måles i enheden *tæthed* $\times$ *hastighed* $\times$ *areal*, som giver antal partikler pr. tidsenhed. Tætheden er her selvfølgelig tætheden af bytte i vandet, og vi kan lige så godt bruge en referencetæthed på for eksempel 1 partikel pr. mm^3. Den relevante hastighed er igen den relative hastighed givet ved (3), udregnet ved fiskelarvens rækkevidde $\xi = \mathcal{R}$, mens det relevante areal er overfladen af den kugle som fiskelarven kan tømme for bytte, $4\pi\mathcal{R}^2$. Vi søger igen en ubenævnt funktion af en ubenævnt variabel. Den eneste ubenævnte variabel vi kan konstruere ud fra tiden, t, samt ϵ og $\mathcal{R}$, er $t\epsilon^{1/3}/\mathcal{R}^{2/3}$. Den normerede fluks måles i enheden *længde*^{3}*/tid*, og ud fra $\mathcal{R}$ og ϵ kan vi kun danne én anvendelig kombination, nemlig $\epsilon^{1/3}\mathcal{R}^{7/3}$. Her har vi antaget, at $\mathcal{R}$ er større end de mindste turbulenshvirvler, så viskositeten ν indgår ikke. For den normerede turbulente fluks, $J(t)$, af bytte til en fiskelarve med rækkevidde $\mathcal{R}$ har vi altså

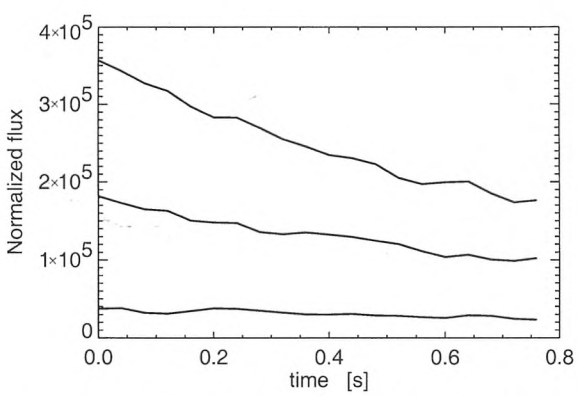
$$J(t) = \epsilon^{1/3}\mathcal{R}^{7/3}\, f(t\epsilon^{1/3}/\mathcal{R}^{2/3}), \qquad (5)$$

hvor f en universel, ubenævnt, funktion af en ubenævnt variabel. Vi kan forvente, at $J(t)$ efter nogen tid når en ligevægt, hvor der er balance mellem det spiste bytte og det der tilføres ved den turbulente bevægelse i væsken. I denne grænse er funktionen f konstant, i overensstemmelse med for eksempel figur 6. Når J kan antages konstant, er skaleringen med parametrene ϵ og $\mathcal{R}$ alene givet gennem koefficienten $\epsilon^{1/3}\mathcal{R}^{7/3}$ i (5), igen på nær en numerisk koefficient [5, 6].



Figur 5. Eksperimentelt bestemt anden ordens strukturfunktion, $\Psi_2(\xi)$. Den punkterede kurve viser resultatet (3).

Vi kan teste parametervariationen af udtrykket (5) ved at udføre data-analysen for flere værdier af $\mathcal{R}$, og finder resultatet vist i figur 7, hvor vi med cirkler viser partikelfluksens værdi til et sent tidspunkt (ca. 0.8 s). For små værdier af $\mathcal{R}$, er overensstemmelsen med (5) ganske overbevisende. Bemærk at overensstemmelsen er bedst for de længdeskalaer, hvor (3) er en god tilpasning til den eksperimentalt fundne anden ordens strukturfunktion, se figur 5. Ved at udføre eksperimentet med forskellige turbulens niveauer, d.v.s. andre værdier for ϵ, kan vi på samme måde analysere variationen med ϵ-parameteren. Også i dette tilfælde er overensstemmelsen rimelig god, omend ikke helt så overbevisende som for parameteren $\mathcal{R}$.

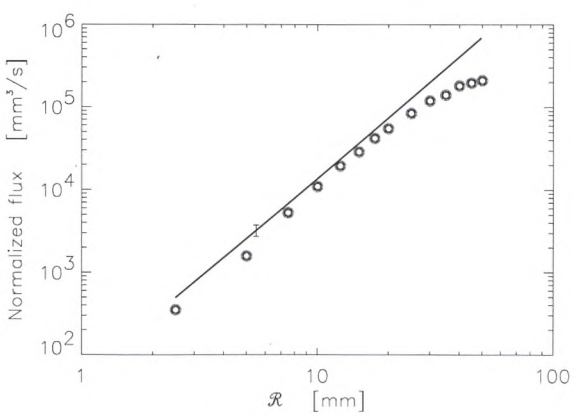


Figur 6. Eksperimentelt bestemt fluks af bytte til en "fiskelarve" for tre forskellige rækkevidder, $\mathcal{R}$.

Analysen beskrevet før kan let gentages for en "fiskelarve" forankret i en fast position, ved simpelthen at bestemme partikelfluksen til en kugle med givet

centrum. Man finder da, for små $\mathcal{R}$, at denne partikelfluks faktisk er større end den man finder for det passivt konvekterede tilfælde. De to flukse er først sammenlignelige, når $\mathcal{R}$ er af samme størrelsesorden som de største hvirvler i den turbulente bevægelse. Dette bekræfter den intuitive forventning, at små organismer i et fast punkt kan drage nytte af *enhver* bevægelse i vandet. I dette tilfælde får de tilført føde selv ved en homogen strømning, som ikke giver anledning til forandring af de relative afstande mellem partikler, der følger med i vandets bevægelse. Ud fra *dette* synspunkt ville det således egentlig være en fordel for mikroorganismer at være forankret i et fast punkt i vandet. Dette ser man sjældent, og det må da antages, at der er andre, mere tungtvejende, fordele ved at flyde med strømmen. Det er foreslået, at de på denne måde undgår at blive spist af deres forældre(!) men får til gengæld lidt større problemer med at skaffe føde.

Det er også muligt på en simpel måde at indbygge for eksempel en "reaktionsevne" for fiskelarverne i analysen. Vi kan, som eksempel, forlange, at byttet er indenfor rækkevidde i mere end et bestemt tidsinterval før vi lader det blive indfanget og spist. Det viser sig påfaldende nok, at dette egentlig ikke har nogen dramatisk effekt. Forklaringen er antageligt, at for store rækkevidder, vil der komme så meget bytte indenfor rækkevidde, at det ikke betyder noget videre om nogle af dem forsvinder for hurtigt til at blive indfanget. For korte rækkevidder vil variationen af hastighedsfeltet indenfor $\mathcal{R}$ på den anden side være moderat, således at det meste af det bytte, der måtte være, som oftest har en lille relativ hastighed i forhold til fiskelarven, og derfor har en stor sandsynlighed for at blive indfanget.



Figur 7. Variationen af fluksen J ved et bestemt tidspunkt, her $t = 0.8$ s, for flere værdier af rækkevidden $\mathcal{R}$. Den fuldt optrukne linie er resultatet fra (5), hvor en numerisk koefficient er bestemt på anden måde, med usikkerheden angivet ved den lille lodrette streg.

Konklusion

Studier af turbulens byder stadig på nye udfordringer, og uventede problemstillinger. Dette delområde af klassisk fysik har vist sig at være af stor betydning for mangeartede praktiske problemer i forbindelse med, for eksempel, studier af forurening i atmosfæren og oceanerne, samt praktisk udnyttelse af vindenergi. Væsentlige indsatsområder er studier af turbulens under inhomogene forhold, ved meteorologiske grænselag. En forståelse af inhomogene turbulente strømninger er afgørende for at optimere placeringen af en vindmølle. Denne type problemer studeres ofte eksperimentelt. Imidlertid er der selv for homogen isotrop turbulens uafklarede problemer; i diskussionen i afsnittet om analytiske betragtninger blev det stiltiende antaget, at ϵ var en konstant, som i princippet kan antages kendt. I virkeligheden er ϵ en statistisk varierende størrelse. I nogle områder er turbulensintensiteten stor, andre steder mindre. Det er kun *middelværdien* $\langle\epsilon\rangle$ vi kan antage kendt. En konsekvens af dette problem er, at skaleringen af højere ordens strukturfunktioner $\Psi_n(\boldsymbol{\xi}) = \left\langle(\mathbf{u}(\mathbf{r},t) - \mathbf{u}(\mathbf{r}+\xi,t))^n\right\rangle$, $n \geq 2$ *ikke* følger den simple lov $\Psi_n(\xi) \sim (\epsilon\xi)^{n/3}$ som argumenterne i forbindelse med (3) ellers kunne indbyde til (selvom afvigelserne dog ikke kan siges at være dramatiske). Generaliseringen af udtryk som (3) med hensyntagen til fluktuationerne i ϵ optog allerede Kolmogorov, og dette såkaldte *intermittensproblem* har endnu ikke fundet sin endelige afklaring. Også forholdene omkring de mindste skalastørrelser, dér hvor dissipationen har betydning, er kun delvis afklarede. Eksperimentet illustreret i figur 3 bliver nu opgraderet med henblik på detaljerede studier også af disse forhold.

Kolmogorovs arbejder fra 1941 var, som sagt, de første skridt mod en teoretisk forståelse af turbulens. På trods af dette tidlige arbejde, mangler vi i dag en sammenhængende fysisk teori for turbulens. For eksempel findes der ikke en teoretisk metode som leder til en korrekt bestemmelse af konstanten C i ligning (3). Det samme gælder for andre konstanter, der indgår i lignende relationer, som man kan udlede ved hjælp af dimensionsanalyse. Som sagerne står, må alle disse konstanter bestemmes eksperimentelt hver for sig.

Vi har ovenfor argumenteret for, at de mindste skalaer i turbulens er isotrope. Det samme gjorde Kolmogorov for 60 år siden, og denne antagelse er en af grundpillerne i beskrivelsen af turbulens. En mængde eksperimenter, senest nogle foretaget ved Cornell Universitetet, udfordrer denne antagelse, og noget tyder på, at anisotropi faktisk *kan* overleve energikaskaden. Det betyder at vi må give afkald på forestillingen om at de mindste hvirvler har universelle egenskaber. Turbulens byder på mange helt fundamentale udfordringer.

I denne artikel har vi beskrevet anvendelsen af relativ turbulent diffusion på et marinbiologisk problem med den tankevækkende konklusion, at turbulens tilsyneladende er af afgørende betydning for denne del af fødekæden. Oceanografi, atmosfærefysik og astrofysik er eksempler på andre fagområder, hvor turbulens spiller en stor rolle. Turbulens har desuden betydning for en række praktiske og tekniske problemer, for eksempel indenfor den hurtigt voksende

vindmølleindustri. Der er derfor ingen tvivl om, at der også fremover vil være efterspørgsel på viden om turbulens.

Referencer:

[1] H. Tennekes og J. L. Lumley, *A First Course in Turbulence*, MIT–press (1972).

[2] T. G. Nielsen og P. J. Hansen, *Dyreplankton i Danske Farvande*, Tema–rapport fra DMU. No. 28 (1999).

[3] S. Ott og J. Mann, J. Fluid Mech., **422**, 207 (2000).

[4] J. Mann, S. Ott, H.L. Pécseli, og J. Trulsen, Phys. Rev. E, **65**, 26304/1-4 (2002).

[5] T. Kiørboe og E. Saiz, Mar. Ecol. Prog. Ser., **122**, 135 (1995).

[6] T. Osborn, J. Plankton Res., **18**, 185 (1996).

Forfatterne fra venstre mod højre: Søren Ott og Jakob Mann er seniorforskere ved Afdelingen for Vindenergi, Forskningscenter Risø. Hans Pécseli er professor ved Fysisk Institut, Universitetet i Oslo. Maria Pécseli er biolog, uddannet ved Universitetet i Århus, og p.t. på DMU, Roskilde.

Jan Trulsen er professor ved Institut for Teoretisk Astrofysik, Universitetet i Oslo.

Læserbrev

Hr. redaktør.

I KVANT for december 1999 fik vi endelig en artikel om kvante-teleportation, og efter en halv snes gennemlæsninger i de forløbne år blev det meget hurtigt klart, at det her drejede sig om stof for specialister snarere end for opvakte gymnasiaster (disse bør jo i øvrigt passe deres arbejde).

Selv er jeg på ingen måde specialist, men enhver har jo *sine* fortrin, og blandt disse er ikke-specialistens som bekendt *bedreviden* (melior sciens). Ud over denne anser jeg mig egentlig ikke for i større grad at være mere kompetent end andre, men mener blot, at det nok kunne være på sin plads at rette et par misforståelser hos de unge mennesker, så deres læsere undgår de samme.

Straks ved artiklens begyndelse får vi at vide, at ordet "teleportation" betyder at flytte noget ved tankens kraft. Dette synes mig at være en noget søgt symbolik i betragtning af, at det jo er den måde, vi alle flytter os på til daglig. Hvorfor ikke bare kalde benzin for benzin??

I den omhandlede artikel bruges udtrykket imidlertid om at flytte et objekt ved at flytte den information, som beskriver det. Dette er – får vi at vide – trivielt på et *makroskopisk* plan, hvorfor fåret Dolly kunne klones, medens det, efter det såkaldte *ikke-kloningsprincip*, ikke kan klones mikrofysisk. Man synes her som en slags parallel til Schrødingers halvdøde kat at have fået et halvklonet får, som mangler sin mikrofysik. Man må jo derfor retfærdigvis vente at se det stakkels dyr færdigklonet ved artiklens teleportation og skuffes betragteligt, da det viser sig, at det kun er en laserstråle, man vil flytte. Viel Geschrei und wenig Dolly!!! En sådan "laser faire" (fransk: udtales læsé fær, dvs. opgiven af ævret) må jo støde den kvalificerede læser.

Nu foregår teleporteringen i stedet ved hjælp af en noget "firkantet" opstilling, idet "Alice" nemlig under anvendelse af *kvadratur* sender sorteper videre til de sagesløse "Bob" og "Victor", som modtager den med større eller mindre "fidelitet", alt efter, hvor troværdig de finder den.

Ak ja. Igen denne moderne hang til overflødig high-tech. *Kvadratur!* Havde det så endda kun været rektangulært. Men hvad er der galt med et ganske almindeligt *rundt* ur? Der er forhandlere nok: En kort rundtur, og man har et rundt ur – eller for den sags skyld så mange, det skal være. Til overflod forekommer der også sidst i artiklen et "apparatur", hvis ydelse dog må forbedres for at realisere det. Om det er rundt eller firkantet afsløres ikke.

At det hele så sker efter et princip som "ikke lokalitet" er for så vidt forståeligt, som man jo dårligt kan flytte noget uden at det skifter opholdssted, men at det også skal være nødvendigt at opgive det gode danske "non locality", som alle andre bruger, er mindre forståeligt.

Det siger noget om hele kvaliteten, at man som referencer anvender de tre kendte kvantekværulanter Einstein, Podolsky og Rosen – skønt Bohr jo for længst har diskvantificeret disse.

Idet jeg håber med dette indlæg at have bidraget til en mere afbalanceret forståelse af disse vanskelige emner hos den intelligente del af læserne, er jeg med venlig hilsen

Deres ærbødige
A. K. Selbo
Doctor mel. scient.
Selskabet for Naturlovenes Udbedring.

Om geostrofisk vind

Aksel Wiin Nielsen, Collstrop Fonden

En af de gamle vejrregler siger, at når man står med vinden i ryggen, så har man det lavere lufttryk til venstre og det høje til højre (på den nordlige halvkugle). Denne regel siger jo kun, at vinden blæser langs med isobarerne, og at der derfor må være ligevægt mellem trykkraften og andre kræfter.

Den horisontale vind i atmosfæren er geostrofisk, hvis der er ligevægt mellem de horisontale komponenter af trykkraften og Corioliskraften. I denne artikel bruger vi ordet "Corioliskraft", som defineres som en vektor, der er modsat af Coriolisaccelerationen. Da trykkraften er vinkelret på isobarerne og Corioliskraften er vinkelret på den horisontale vind og virker til højre på den *nordlige* halvkugle, vil den geostrofiske vind blæse langs med isobarerne med det lave tryk på den venstre side. Det er naturligvis klart, at hvis man skal have en nøjagtig geostrofisk balance, må isobarerne være rette linier. Hvis de ikke er rette linier, må der mindst endnu en kraft til, hvis bevægelsen skal følge isokurverne for geopotentialet.

Observationerne viser, at den virkelige horisontale vind er næsten geostrofisk udenfor det tropiske og subtropiske område i den såkaldte frie atmosfære, d.v.s. over det atmosfæriske grænselag nær ved Jordens overflade, hvor gnidningen mellem atmosfæren og Jordens overflade forhindrer den geostrofiske ligevægt. Da Corioliskraften er lille nær ved ækvator, fordi dens størrelse er proportional med sinus til breddegraden, kan der ikke være geostrofiske vinde på de meget lave breddegrader.

Det er forbavsende, at der i en så stor del af atmosfæren findes en kvasi-ligevægt, som betyder, at den horisontale del af accelerationen er lille sammenlignet med de to kræfter. På den ene side giver den geostrofiske kvasi-ligevægt en stor hjælp, når man skal analysere atmosfæren, specielt i områder, hvor der er langt mellem observationerne. På den anden side skaber kvasi-ligevægten store problemer i atmosfæriske forudsigelser. Disse problemer førte i 1950'erne til de såkaldte kvasi-geostrofiske modeller, hvor man antager, at vorticiteten og den horisontale vind kan beregnes geostrofisk. Disse modeller anvendes ikke så meget mere, fordi man har lært at integrere de såkaldt primitive modeller, hvilket betyder, at man integrerer de horisontale bevægelsesligninger, den termale ligning og kontinuitetsligningen for både den tørre del og den fugtige del af atmosfæren under den antagelse, at atmosfæren er i hydrostatisk ligevægt.

Siden 1930'erne er der fremsat forskellige forsøg på at vise, hvorfor atmosfæren er i kvasi-geostrofisk ligevægt. De først foreslåede modeller er skabt af Rossby [1], men andre mere indviklede modeller er undersøgt af Cahn [2], Obukhov [3], Bolin [4], Kibel [5], Winninghoff [6], Blumen [7] og Kuo [8]. Fælles for alle disse modeller er, at ingen af dem tager hensyn til den atmosfæriske opvarmning eller til friktionen i atmosfæren, men den kvasi-geostrofiske ligevægt er jo også til stede i den virkelige atmosfære, hvor disse to processer virker. I de kommende afsnit af denne artikel, skal jeg forsøge at demonstrere, at den geostrofiske ligevægt også opstår, når opvarmningen og friktionen er til stede. En anden svaghed i de omtalte modeller er, at flere af dem er lineære, hvilket betyder, at man ikke tager hensyn til advektionsleddene i bevægelsesligningerne og den termodynamiske ligning. Disse processer vil også findes i de numeriske ekperimenter, som skal beskrives i de følgende afsnit.

Formålet med denne artikel er derfor at undersøge om relativt enkle modeller er i stand til at komme til en kvasi-geostrofisk tilstand, når de integreres med hensyn til tiden. Modellerne kan formuleres enten som zonale eller som meridionale modeller, når man er villig til at forenkle de grundlæggende ligninger. Med hensyn til ligningerne er det klart, at man ikke kan anvende de velkendte kvasi-geostrofiske modeller, fordi man her går ud fra de resultater, som modeller gerne skulle producere. De grundlæggende modeller bygger derfor på forenklede former af de to bevægelsesligninger for de horizontale komponenter af hastigheden, på kontinuitetsligningen og på den termodynamiske ligning. Undersøgelserne deles i zonale og meridionale tilfælde, som behandles hver for sig. Der er også en model, hvor ligningerne er integreret i to horisontale dimensioner.

I det generelle tilfælde skal man have opvarmningen som en del af den termodynamiske ligning. Man kan imidlertid forenkle behandlingen, hvis man indfører en ydre påvirkning i kontinuitetsligningen. Normalt udtrykker denne ligning naturligvis massens bevarelse, men hvis vi betragter en homogen væske med en vandret overflade kan man forestille sig, at man i nogle områder forøger væskemængden, medens man i andre områder formindsker den på en sådan måde, at den totale væskemængde forbliver uforandret. Denne behandling af kontinuitsligningen skal vi anvende i de mest forenklede tilfælde. Enkelthederne kan findes i Wiin-Nielsen [9].

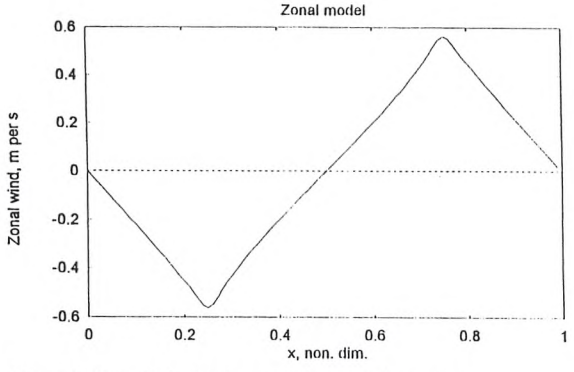
En zonal model

I den zonale model har vi kun vest-øst variationer. Bevægelsesligningerne og kontinuitetsligningen kan

derfor skrives som angivet i systemet (1).

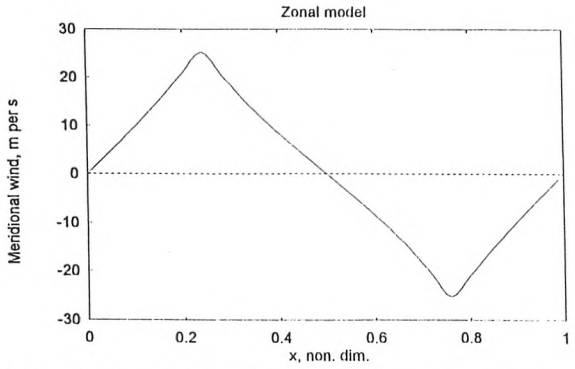
$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} &= -\frac{\partial \phi}{\partial x} + fv - \epsilon u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} &= -fv - \epsilon v \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} + \Phi_0\frac{\partial u}{\partial x} + u\frac{\partial \phi}{\partial x} + \phi\frac{\partial u}{\partial x} &= gS(x) \end{aligned} \qquad (1)$$

$S(x)$ er den ydre påvirkning af systemet. Dimensionen af S er m per s, og S angiver den væskemængde, som tilføres ($S > 0$) eller fjernes ($S < 0$) fra væskemængden, således at gennemsnittet af S er nul. u og v er den zonale og den meridionale hastighedskomponent, medens ϕ er geopotentialet. Φ_0 er geopotentialet, når væsken er i ro. Hvis Φ_0 skal svare til atmosfæren er værdien af størrelsesordenen 10^5 m^2 s^{-2}, men der er naturligvis også andre anvendelser, f.eks. i oceanografien.



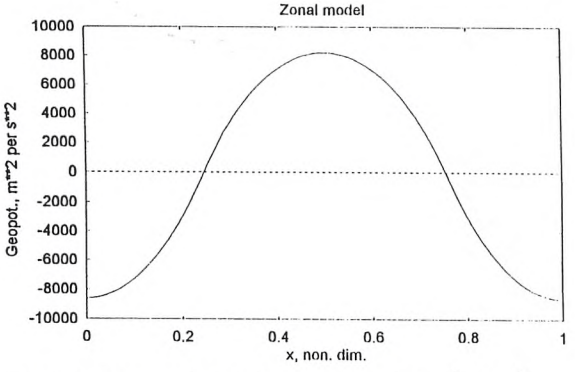
Figur 1. Zonal vind i den zonale model, m per s.

Integrationen af ligningerne i (1) udføres, når $S(x)$ er blevet valgt. I alle tilfælde, behandlet i dette afsnit, starter integrationen fra en tilstand uden bevægelse ligesom den variende del af geopotentialet sættes til nul. Tidsintegrationerne af (1) udføres for en given breddegrad, som i figurerne altid er 45 grader nord. Man har et valg med hensyn til den metode, som anvendes ved tidsintegrationen. Man kan enten bruge endelige differencer eller den spektrale metode. I alle de een-dimensionale tilfælde er integrationen udført, når ligningerne er omsat til bølgetalsområdet. Enkelthederne i udledningen af de nye ligninger er ikke væsentlig for forståelsen af resultaterne, og derfor er disse ligninger ikke udledt i denne tekst. De findes i den engelske udgave (Wiin-Nielsen [10]). Det skal dog nævnes, at de ikke-lineære led fører til dobbelte summeringer, som bestemmer udvekslingerne mellem de forskellige spektrale komponenter. Integrationerne er udført med et største bølgetal lig med 20, hvilket svarer til en bølgelænde på 1400 km, idet den totale længde af breddecirclen på 45 grader er ca. 28000 km.



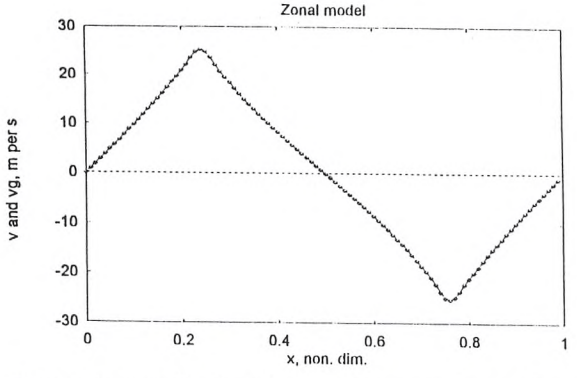
Figur 2. Meridional vind in den zonale model, m per s.

I det første tilfælde er funktionen $S(x)$ defineret således, at den er konstant og positiv i intervallet $0.25 < x < 0.75$ og konstant og negativ udenfor dette interval. Med denne fordeling af $S(x)$ vil man forvente, at væsken vil bevæge sig fra midten til begge sider. Figur 1 viser, at dette er tilfældet, idet $u < 0$ for $x < \frac{1}{2}$, medens $u > 0$ for $x > \frac{1}{2}$. Med denne bevægelse vil man også forvente, at den meridionale hastighed vil være være positiv for $x < \frac{1}{2}$, fordi Corioliskraften vil dreje partiklerne mod højre, medens de partikler, som befinder sig i områder $x > \frac{1}{2}$ vil resultere i en sydgående hastighed, d.v.s. $v < 0$, som det også ses på figur 2. Opmærksomheden henledes på, at størrelsen af den zonale vind er meget mindre end den meridionale vind. Endeligt er det jo klart, at da man adderer væsken i midterområdet og tager den bort i de andre områder, får man en variation of geopotentialet som vist i figur 3. Det sidste led i ekperimentet er at beregne den geostrofiske vind fra fordelingen of geopotentialet som vist i figur 3 og sammenligne denne fordeling med fordelingen af den meridionale vind i eksperimentet. Som det ses i figur 4 er v-komponenten geostrofisk med stor nøjagtighed. Sluttilstanden er en stationær tilstand, som man nærmer sig nok så langsomt under integrationen. Denne tilstand er kvasi-geostrofisk, fordi den meridionale komponent er næsten geostrofisk, medens den zonale komponent er lille som set i figur 1.



Figur 3. Geopotentialet i den zonale model, m^2 per s^2.

Det er naturligvis ikke svært at bestemme den stationære tilstand af de tre ligninger i (1), hvis man ser bort fra de ikke-lineære advektions led i ligningerne. Man kan imidlertid se, at de ikke-lineære led giver et bidrag til den stationære tilstand ved at sammenligne den beregnede stationære tilstand opnået ved integration af ligningerne indtil den stationære tilstand er nået med den stationære tilstand, som kan bestemmes fra de lineære ligninger. Figur 5 viser den nok så store forskel, som findes mellem de to stationære tilstande for den meridionale vind komponent. Det er derfor vigtigt, at de ikke-lineære led tages med i integrationen. Figur 5 er taget fra et andet tilfælde, hvor $S(x)$ er beskrevet med en cosinus funktion, som er positiv i midten af området og ellers negative. En tilsvarende stor forskel ses i figur 6, der viser geopotentialet for de to tilfælde.



Figur 4. Sammenligning af v og v_g i den zonale model, m per s

I de resultater, der er vist i figurerne 1 til 6, er integrationen gennemført for 20 dage, fordi det tager denne lange tid før modellen kommer i en virkelig stationær tilstand. Man kan imidlertid spørge, om det tager tilsvarende tidsintervaller for at komme frem til den kvasi-geostrofiske tilstand. Figur 7 viser en sammenligning mellem v og v_g efter en integration på 24 timer. Man ser, at forskellen mellem de to meridionale komponenter er relativt lille og efter integration til 36 timer, har man opnået, at de to komponenter er næsten sammenfaldende. Erfaringen med disse beregninger viser, at selvom man efter en dag eller to er ganske nær ved geostrofisk ligevægt, så kan svingninger med en lille amplitude fortsætte i ganske lang tid. Til trods for disse svingninger kan man sige, at den kvasi-geostrofikse tilstand i denne model er næsten fuldført efter et par dage.

En meridional model

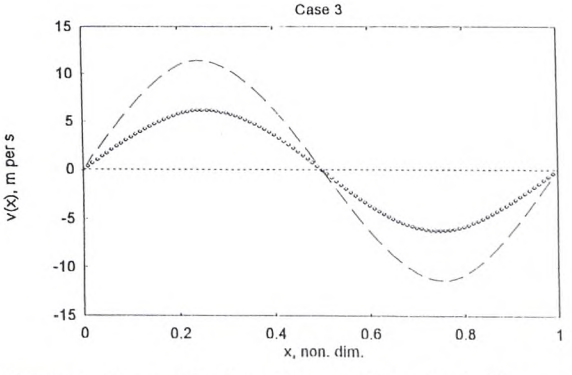
Denne model er formuleret følgende de samme principper som indledningen, idet man blot i dette tilfælde ser på variationerne i syd-nord retningen. Ligningerne bliver derfor i dette tilfælde et sæt ligninger, som ligner dem, som findes i (1). De nye ligninger er givet i (2).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + v\frac{\partial u}{\partial y} &= fv - \epsilon u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial \phi}{\partial y} - fu - \epsilon v \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} + v\frac{\partial \phi}{\partial y} + \Phi_0\frac{\partial v}{\partial y} + \phi\frac{\partial v}{\partial y} &= gS(y) \end{aligned} \qquad (2)$$

I dette tilfælde må man behandle f som en variabel i y-retningen. Normalt udtrykkes denne variation som $f = f_o + \beta y$, men da ligningerne, ligesom i det indledende afsnit, integreres ved hjælp af rækkeudviklinger i bøljetalsområdet er det ønskværdigt, at variationen af f udtrykkes på samme måde som de andre variable. Efter en kort udregning kommer man derfor til formuleringen, der er givet i (3).

$$f = \frac{f_N + f_S}{2} - \frac{f_N - f_S}{2}\cos(\pi y/D) \qquad (3)$$

hvor værdien på f ved den nordlige og den sydlige grænse kan beregnes, når integrationsområdet er centreret på 45 grader nord og D angiver syd-nord afstanden for integrationsområdet. Også i dette tilfælde er ligningerne omformet til bølgetalsområdet før tidsintegrationen udføres. Ligningerne i bølgetalsområdet kan ses i den engelske udgave. I denne model vil man forvente, at det er den zonale komponent, som bliver geostrofisk, medens den meridionale vind komponent skulle blive relativt lille i sammenligning med de zonale komponent af den horisontale vind vektor.

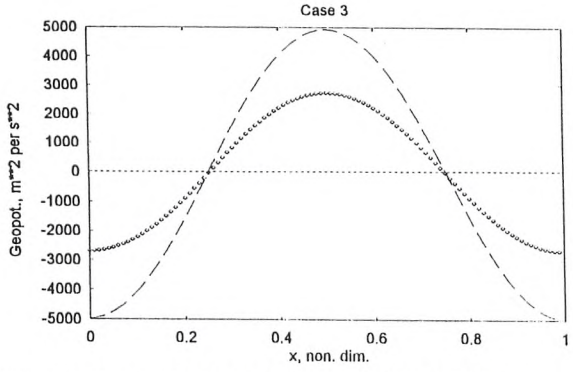


Figur 5. Sammenligning af den meridionale vindkomponent i den lineære og den ikke-lineære model, m per s.

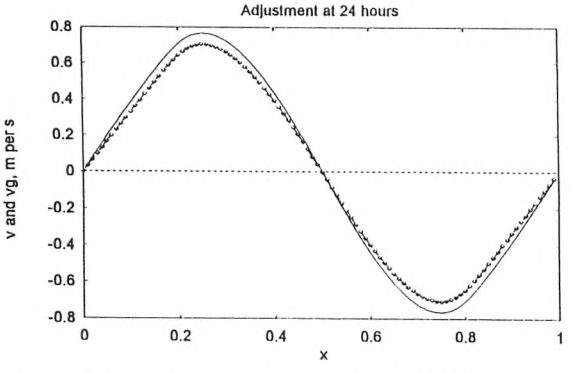
I integrationen er $S(x)$ positiv i den sydlige halvdel og negative i den nordlige halvdel med en maksimal værdi på 0.01 m per s i den sydlige halvdel og symmetrisk omkring midtpunktet, se figur 8. Den zonale vindkomponent i den asymptotiske stationære tilstand er vist i figur 9 sammen med den geostrofiske zonale vindkomponent. Man ser, at også i dette tilfælde er der næsten fuldstændig geostrofisk tilpasning.

Ligesom i den zonale model skal det undersøges, hvornår denne geostrofiske tilpasning er fremkommet.

Efter en del integrationer viser det sig, at den ønskede tilstand ankommer efter 150 timers integration af model ligningerne, se figur 10. Den eneste afvigelse findes i nærheden af den sydlige grænse, hvor den geostrofiske vind u_g er lidt større end modelværdien u. Hvis integrationen stoppes efter 145 timer er der en noget større afvigelse mellem de to kurver, som man ser på figur 11, men nu er den geostrofiske kurve under u-komponenten i integrationen. Et tilsvarende fænomen findes ikke ved den nordlige grænse, som man kan se på figurerne 10 og 11. Forklaringen er formodentlig at finde i den minimale værdi på Coriolis parameteren ved den sydlige grænse, hvor man derfor behøver en længere tid for at få geostrofisk tilpasning.



Figur 6. Sammenligning af geopotentialet i den lineære og den ikke-lineære model, m^2per s^2.



Figur 7. v og v_g, m per s, efter integration i 24 timer.

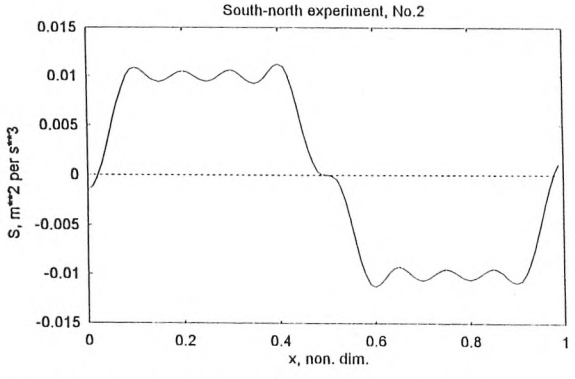
En model med to niveauer, opvarmning og dissipation

I denne model skal vi gå bort fra den form for ydre påvirkning, som er anvendt i de første enkle modeller. Modellen i dette afsnit er baseret på de primitive bevægelseslignnger, kontinuitetsligningen and den termodynamiske ligning. Også i dette tilfælde skal vi først se på en model, som kun har variationer i vest-øst retningen, hvorfor modellen vil have de uafhængige variable (x, t), idet vi vælger en model med kun to niveauer i den vertikale retning. Vi begynder med at se på kontinuitetsligningen, når vi anvender grænsebetingelserne, at den vertikale p-hastighed (ω) er nul ved atmosfærens top og ved 1000 hPa. Hovedniveauerne i modellen er 0, 250, 500, 750 og 1000 hPa. De markeres med tallene 0, 1, 2, 3, 4. Selve kontinuitetsligningen er med vore restriktioner forenklet som vist i (4).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \tag{4}$$

(4) anvendes på niveauerne 1 og 3, og differentialet af ω erstattes af endelige differencer, som bestemmes af grænsebetingelserne ved atmosfærens top og bund. Man får da ligningerne, som er vist i (5).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\omega}{P} &= 0 \\ \frac{\partial u_3}{\partial x} - \frac{\omega}{P} &= 0 \\ P &= 500\text{hPa} \end{aligned} \tag{5}$$



Figur 8. Væske tilføjes i den sydlige halvdel og fjernes i den nordlige halvdel, m per s.

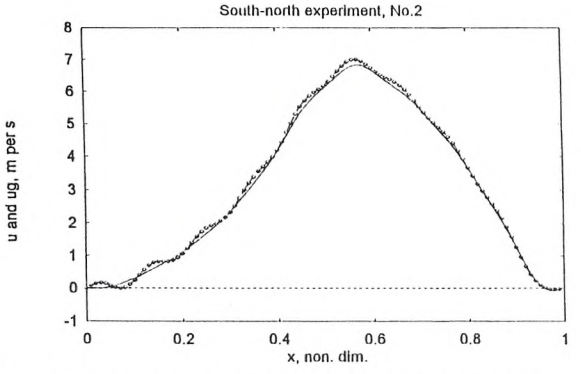
Som sædvanligt skal vi addere og subtrahere disse to ligninger, og vi får da resultatet, som er angivet i (6).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_\star}{\partial x} &= 0 \\ \omega &= -P\frac{\partial u_T}{\partial x} \end{aligned} \tag{6}$$

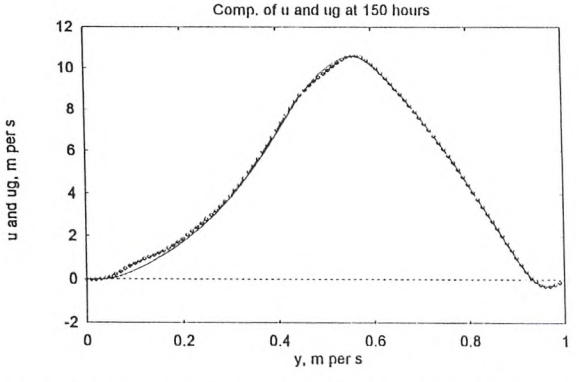
I (6) er størrelser med $\star$ den halve sum af værdierne på niveauerne 1 og 3, medens størrelser med T er den halve differens af værdierne på de samme niveauer. På grund af vor begrænsning til een dimension finder vi derfor, at $u_\star$ må være en konstant i modellen. Da denne konstant kun er en forskydningshastighed, kan vi uden at tabe noget sætte $u_\star = 0$. Derefter anvender vi bevægelsesligningerne på niveauerne 1 og 3 og lægger sammen og trækker fra, medens den termodynamiske ligning anvendes på niveau 2. Resultaterne af disse ma-

nipulationer er angivet i (7).

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u_T}{\partial t} &= \frac{\partial \Phi_T}{\partial x} + f v_T - \epsilon u_T \\
\frac{\partial v_\star}{\partial t} &= -u_T \frac{\partial v_T}{\partial x} \epsilon v_\star \\
\frac{\partial v_T}{\partial t} &= -u_T \frac{\partial v_\star}{\partial x} - f u_T - \epsilon v_T \\
\frac{\partial \Phi_T}{\partial t} &= \frac{1}{2}\kappa Q - \frac{1}{2}\sigma P^2 \frac{\partial u_T}{\partial x}
\end{aligned} \tag{7}$$



Figur 9. Den zonale komponent sammenlignet med den zonale, geostrofiske komponent i syd-nord modellen, m per s efter integration til stationær tilstand.



Figur 10. Som figur 10, men integrationstiden er 150 timer.

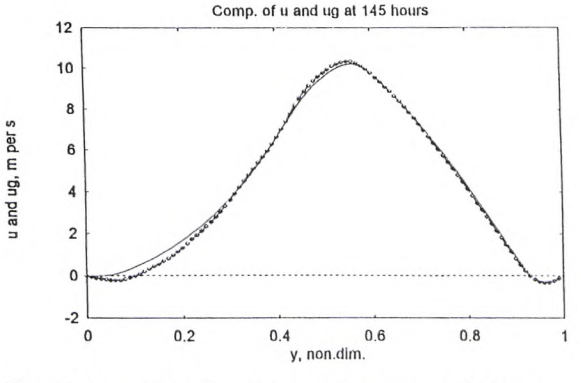
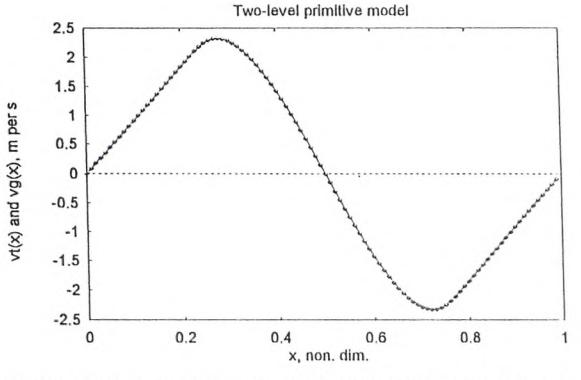
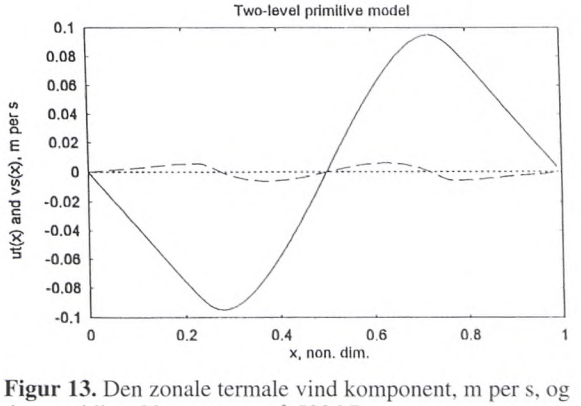


Fig. 11. Som figur 10, men integrationstiden er 145 timer.

Ligningerne i (7) skal integreres med hensyn til tiden, når opvarmningen (Q) er specificeret. Det bemærkes, at $\kappa = R/c_p$, og at $\sigma = -\alpha\delta(\ln(\theta)/\delta p$ er den sædvanlige parameter for atmosfærens stabilitet. Denne konstante værdi skal kun bruges på niveau 2. Som i de andre tilfælde er ligningerne i (7) omregnet til bølgetalsområdet, hvorefter de er blevet integreret med hensyn til tiden. Da det tager ganske lang tid at komme til en stationær tilstand, hvis man starter fra en tilstand uden bevægelse, har man i dette som i andre tilfælde en mulighed for at definere en begyndelsestilstand, som er bedre. Det gøres ved at beregne en tilstand under antagelse af små accelerationer og ved at se bort fra de ikke-lineære led. Som man kan se fra den sidste ligning i (7) kan man beregne u_T, når man kender opvarmningen. Tredie ligning giver derefter en bestemmelse af v_T, og man kan da beregne geopotentialet fra den første ligning. Under de givne forudsætninger får man da fra den anden ligning at $v_\star$ må antages at være nul. Denne begyndelsestilstand kommer noget hurtigere i nærheden af den ønskede virkelige stationære tilstand, selv om bidragene fra de ikke-lineære led slet ikke er i nærheden af nul, hvilket kan ses ved at sammenligne begyndelsestilstanden med den beregnede sluttilstand.



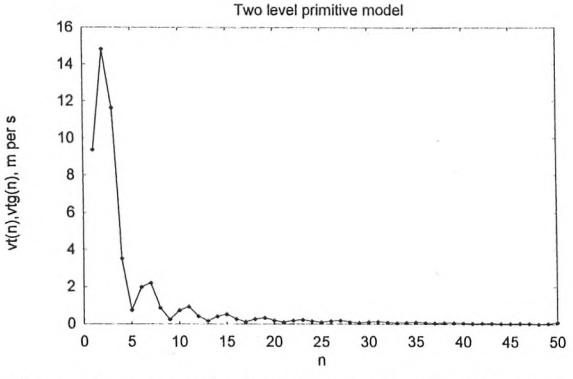
Figur 12. Den meridionale vindkomponent sammenlignet med den meridionale geostrofiske komponent, m per s, i modellen baseret på de primitive ligninger.



Figur 13. Den zonale termale vind komponent, m per s, og den meridional komponent på 500 hPa, m per s.

Figur 12, som indeholder $v_T(x)$ og $v_g(x)$, viser, at

også i dette tilfælde får man en geostrofisk tilpasning, som er meget nøjagtig, når man integrerer helt frem til en stationær tilstand. Samtidigt er de andre komponenter ganske små, som man kan se i figur 13, som viser $u_T(x)$ og $v_\star(x)$ i den stationære tilstand. Som man kan se i figur 12 er de hastigheder, som opnås i den stationære tilstand relativt små. Det skyldes naturligvis, at den maksimale opvarmning er relativt lav i disse integrationer hvor den største værdier er 0.01 J/(kg s). Mere realistiske værdier opnås for større værdier af Q.

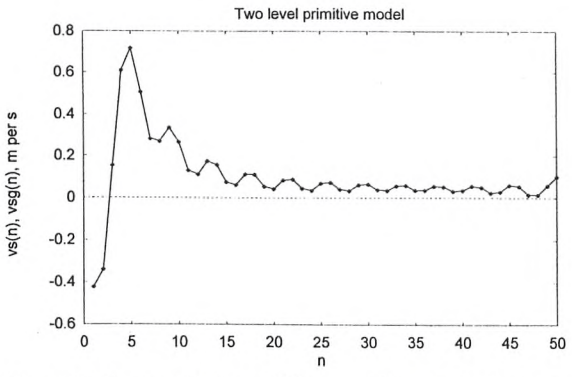


Figur 14. Sammenligning af den termale meridionale vindkomponent i modellen og den termale, meridionale, geostrofiske vindkomponent, m per s, som funktion af bølgetallet.

Det næste eksperiment er derfor udført med den maksimale værdi sat til 0.1 J/(kg s). Samtidigt skal vi i dette tilfælde præsentere resultaterne som funktion af bølgetallet. Integrationen er udført med den maksimale værdi på bølgetallet sat til 50. Da den totale længde af breddecirklen er ca. 28000 km på breddegraden 45, så vil den mindste bølgelængde være 560 km. Figur 14 viser v_T og v_{Tg} som funktion af bølgetallet. Den største værdi er nu ca. 15 m per s for bølgetal nummer 2, og der er geostrofisk tilpasning for alle bølgetal. På figur 15 finder man $v_\star$som funktion af bølgetallet. Da vi i dette tilfælde har $u_\star = 0$, bliver den første bevægelsesligning reduceret til en diagnostisk ligning, som kan ses i (8).

$$\frac{\partial \phi_\star}{\partial x} = f v_\star \tag{8}$$

Denne udtrykker, at $v_\star$ er geostrofisk, som man også kan se i figur 15, hvor denne vindkomponent er beregnet som funktion af bølgetallet. Det eneste indhold i denne figur er naturligvis kun, at vore beregninger er korrekte. Samtidigt kan man se, at denne vindkomponent har sin maksimale værdi for n=5 svarende til 5600 km.



Figur 15. Sammenligning af den meridionale vindkomponent og den geostrofiske meridionale vind, begge på 500 hPa, som funktion af bølgetallet.

En model i to dimensioner

Alle modeller, som er beskrevet i de tidligere afsnit, har den egenskab, at den ene af de to vindkomponenter har en chance for at blive næsten geostrofisk, medens den anden komponent ikke kan være geostrofisk, fordi vi i alle tilfælde har afprøvet modeller med variationer i kun een retning, som enten er den zonale eller den meridionale retning. Man kunne endda få den opfattelse, at disse modeller er så langt fra virkeligheden, at de ikke vil gælde i to dimensioner. For at imødegå et sådant synspunkt skal vi i dette afsnit se på en model i to dimensioner. Vi vælger en model af samme slags, som de to vi begyndte med i afsnit 2 og 3.

Vi vælger en rektangulær region med længden L og bredden D. Ved den nordlige og den sydlige grænse skal den meridional vind være 0, medens vi skal antage, at bevægelsen er periodisk i vest-øst retningen. De grundlæggende ligninger er givet i (9).

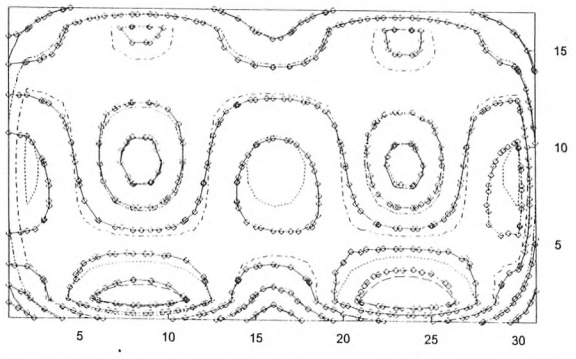
$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial \phi}{\partial x} + fv - \epsilon u \\
\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial \phi}{\partial y} - fu - \epsilon v \\
\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \phi u}{\partial x} + \frac{\partial \phi v}{\partial y} &= \gamma(\phi_F - \phi)
\end{aligned} \tag{9}$$

Man lægger mærke til, at $S(x, y)$ i denne model er skrevet på Newtonsk form, hvor $\gamma = 1.0 \times 10^{-6}$ s^{-1}. Den valgte ydre påvirkning er givet i (10).

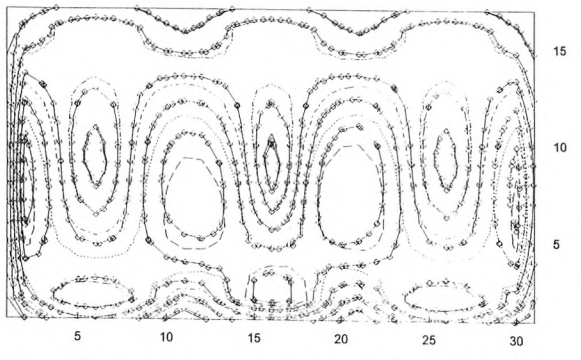
$$\phi_F = \phi_a \sin\left(\pi \frac{j-1}{j_m - 1}\right) \sin\left(2\pi \frac{i-1}{i_m - 1}\right) \tag{10}$$

I dette tilfælde blev integrationen udført med centrerede endelige differencer i tid og rum. Periodiske betingelser bruges ved den vestlige og den østlige grænse. Gridafstanden er 280 km, Δt = 5 minutter. I x-retningen går tælleren i fra 0 til 31, medens j (tælleren i den meridionale retning) går fra 0 til 17 i

y-retningen. Når tidintegrationen er gennemført beregnes de geostrofiske vindkomponenter fra det forudsagte geopotential-felt. Man kan da sammenligne de forudsagte vinde med de geostrofiske vinde.



Figur 16. Sammenligning af størrelserne af model vinden og den geostrofiske vind i den to-dimensionale model efter en integration på 75 timer.



Figur 17. Samme som figur 17, men for 37.5 timer.

Figur 16 viser to felter. Kurverne uden markering er størrelsen på vinden i modellen, medens de andre er størrelsen på den geostrofiske vind beregnet ved eksperimentets afslutning. Som man vil observere er der god overensstemmelse mellem de to kurvefamiler eller med andre ord: modellen viser udmærket geostrofisk tilpasning. Integrationstiden er 75 timer eller lidt over 3 dage. Figur 17 viser de samme to felter, når integrationen stopper ved den halve tid, altså 37.5 timer. Her er den geostrofiske tilpasning også godt på vej, men der er dog visse forskelle på de to felter. Vi kommer derfor igen til konklusionen, at den geostrofiske tilpasning tager 2 til 3 dage.

Forenklede betragtninger

Det kan være passende at undersøge, om man kan få yderligere forståelse af geostrofisk tilpasning ved at se på et forenklet tilfælde, hvor man bestemmer den stationære tilstand ved at se bort fra tidsvariationerne og de ikke-lineære advektions led i ligningerne. Vi ved allerede, at advektionsprocesserne giver et væsentligt bidrag i den stationære tilstand, som fremkommer ved tidsintegrationen. Det er derfor ikke muligt at få den samme og nøjagtige stationære tilstand fra de forenklede ligninger, men man kan muligvis få yderligere forståelse af resultaterne. Vi ser på det to-dimensionale tilfælde. De forenklede ligninger er i dette tilfælde givet i (11).

$$\begin{aligned} \Phi_0\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right) &= gS(x,y) \\ -\frac{\partial \phi}{\partial x}+fv-\epsilon u &= 0 \\ -\frac{\partial \phi}{\partial y}-fu-\epsilon v &= 0 \end{aligned} \tag{11}$$

Den første ligning kan bruges til at bestemme divergensen, når $S(x, y)$ er defineret. Imidlertid skal vi bruge de to sidste ligninger til at sammenligne den geostrofiske vind med vinden i den stationære tilstand. Disse vindkomponenter kan imidlertid deles i den ikke-divergent vind, som beskrives med en strømfunktion og den divergente vind, som udtrykkes ved et hastighedspotentiale. Disse størrelser er lettest at komme til ved at erstatte de to bevægelsesligninger med en vorticitetsligning og en divergensligning. De findes i (12).

$$\begin{aligned} f_0\nabla^2\chi+\epsilon\nabla^2\psi &= 0 \\ -\nabla^2\phi+f_0\nabla^2\psi-\epsilon\nabla^2\chi &= 0 \end{aligned} \tag{12}$$

Den første af disse ligninger kan bruges til at bestemme strømfunktionen. Når denne er kendt, kan den anden ligning i (12) bruges til at beregne geopotentialet, hvorefter man kan beregne de geostrofiske vindkomponenter, som så kan sammenlignes med den ikke-divergente og den divergente vindkomponenter. For at komme til et konkret tilfælde må vi vælge formen på den ydre påvirkning, d.v.s. $S = S(x, y)$. Det valgte eksempel er givet i (13).

$$\begin{aligned} S(x,y) &= S_0\cos(kx)\cos(\mu y) \\ K &= \frac{2\pi}{L};\ \mu=\frac{\pi}{D} \end{aligned} \tag{13}$$

Med dette enkle valg for $S(x, y)$ er det let at løse ligningerne for strømfunktionen, hastighedpotentialet og geopotentialet. Når disse størrelser er bestemt, kan man fra dem bestemme vindkomponenterne, som vi skal betegne med u_s og v_s for den ikke-divergente vind, u_p og v_p for de divergente komponenter og u_g og v_g for de geostrofiske vindkomponenter. Efter disse beregninger kan man bestemme forholdet mellem den geostrofiske vind og den ikke-divergent vind ligesom man kan beregne forholdet mellem den divergent og den ikke-divergente vind. Disse relationer findes i (14).

$$\begin{aligned} \frac{u_g}{u_s}=\frac{v_g}{v_s} &= 1+\left(\frac{\epsilon}{f_0}\right)^2 \\ \frac{u_p}{v_s}=-\frac{\epsilon}{f_0};\ \frac{v_p}{u_s} &= \frac{\epsilon}{f_0} \end{aligned} \tag{14}$$

Fra disse komponent forhold kan man let beregne længden af de forskellige vindvektorer. Når man anvender værdierne $\epsilon = 4.0 \times 10^{-6}$ og $f = 1.0 \times 10^{-4}$ finder man, at $V_g/V = 1.0008$, som viser en næsten perfekt geostrofiske tilpasning. På tilsvarende måde finder man, at forholdet mellem den divergente vind og den ikke-divergente vind er 0.04, som viser, hvor lille den divergente vind er sammenlignet med den ikke-divergente vind. Det er naturligvis klart, at den ydre påvirkning af systemet bestemmer størrelsen af de forskellige vindkomponenter, men i vores enkle eksempel har den ydre påvirkning ingen indflydelse på forholdet imellem komponenterne.

I de numeriske integrationer har vi set, at den geostrofiske tilpasning foregår langsommere i den sydlige del af området. Vi kan med fordel se på dette fænomen gennem en analyse af de to bevægelsesligninger under anvendelse af de sfæriske koordinater. Ligningerne er dette tilfælde vist i (15).

$$\begin{aligned} -\frac{1}{a\cos(\phi)}\frac{\partial \Phi}{\partial \phi} + 2\Omega\sin(\phi) - \epsilon u = 0 \\ -\frac{1}{a}\frac{\partial \Phi}{\partial \phi} + 2\Omega\sin(\phi)u - \epsilon v = 0 \end{aligned} \qquad (15)$$

Ved at benytte definitionerne af de geostrofiske vindkomponenter og sætte $\mu = \sin(\phi)$ kan (15) også skrives på formen, som findes i (16).

$$\begin{aligned} v_g &= v - \frac{\epsilon}{2\Omega\mu}u \\ u_g &= u + \frac{\epsilon}{2\Omega\mu}v \end{aligned} \qquad (16)$$

Vi ser først på størrelsen af de to vindvektorer, som er at finde i (17).

$$V_g = \left(1 + \frac{\epsilon^2}{4\Omega^2\mu^2}\right)^{1/2} V \qquad (17)$$

Den sidste ligning siger, at den geostrofiske approximation bliver mere og mere unøjagtig jo lavere bredden er. Approximationen er udmærket i nærheden af Polerne, hvor μ er nær ved 1, men jo lavere bredde vi betragter des mindre er μ. For μ =0.1 (bredden = 5.7 grader) finder vi $V_g = 1.0370V$, medens $\mu = 0.01$ (bredden= 0.57 grader) giver $V_g = 2.92V$.

Afsluttende bemærkninger

Hovedformålet har været at give en ny og anderledes behandling af tilnærmelsen til geostrofisk ligevægt. I modsætning til andre behandlinger bruges en model med både ydre påvirkninger og dissipation, og det viser sig i den mest almindelige model, som tager hensyn til de ikke-lineære advektionsprocesser, at man er nær ved geostrofisk ligevægt efter en integration svarende til 2-3 døgn. En fuldstændig geostrofisk ligevægt opnås, når integrationen gennemføres til en stationær tilstand. Den anvendte model bruges først til enkle formuleringer, som kun har een dimension i rummet i vest-øst eller syd-nord retningen. Senere anvendes modellen i to rumdimensioner.

I forrige afsnit findes en behandling af de lineære tilfælde under antagelse af en stationær tilstand. Medens en sådan analyse er ret let at gennemføre, bemærkes det, at analysen ikke er generel, fordi bidragene fra de ikke-lineære processer er udeladt.

Referencer:

[1] C.-G. Rossby (1937 og 1938) "On the mutual adjustment of pressure and velocity distribution in certain simple current systems, I, II", Jour. of Marine Research, bind **1**, side 15–27 og side 239–263.

[2] A. Cahn (1945) "An investigation of the free oscillations in a simple current system" *Jour. of Meteor.*, bind **2**, side 113–119.

[3] A. M. Obukhov (1949) "On the problem of geostrophic wind", *Edz. USSR Academy of Sciences, Ser. Geogr. and Geophys.*, bind **13**, side 281–306.

[4] B. Bolin (1953) "The adjustment of a nonbalanced velocity field towards geostrophic equilibrium in a stratified fluid", *Tellus*, bind **5**, side 373–385.

[5] E. A. Kibel (1955) "On geostrophic adaptation of atmospheric motion", *Daklad USSR Academy of Sciences*, bind **106**, nr. 1, side 60–63 (på russisk).

[6] F. Winninghoff (1968) "On the adjustment toward geostrophic balance in a simple primitive equation model with application to the problem of initialization and objective analysis", *Ph. D. Diss., UCLA*, 161 pp.

[7] W. Blumen (1972) "Geostrophic adjustment", *Rev. of Geophysics and Space Physics*, bind **10**, nr. 2.

[8] H. L. Kuo (1998) "A new perspective of geostrophic adjustment", *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, bind **27**, side 413–437.

[9] A. Wiin-Nielsen (1999) "Steady state and transient solutions of the nonlinear forced shallow water equations in one space dimension", *Atmósfera*, bind **12**, nr. 3, side 145–159.

[10] A. Wiin-Nielsen (2001) "A note on nonlinear aspects of large-scale atmospheric instabilities", *Atmósfera*, bind **14**, nr. 2, side 53–68.

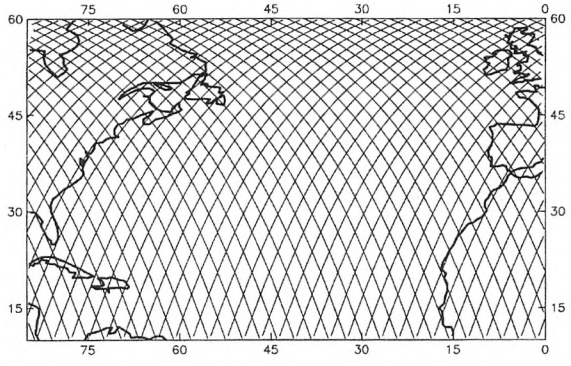
Aksel Wiin Nielsen er professor emeritus, Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Fysik, Astronomi og Geofysik.

Geofysiske anvendelser af satellitaltimetri

Henriette Skourup, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik og DMI.

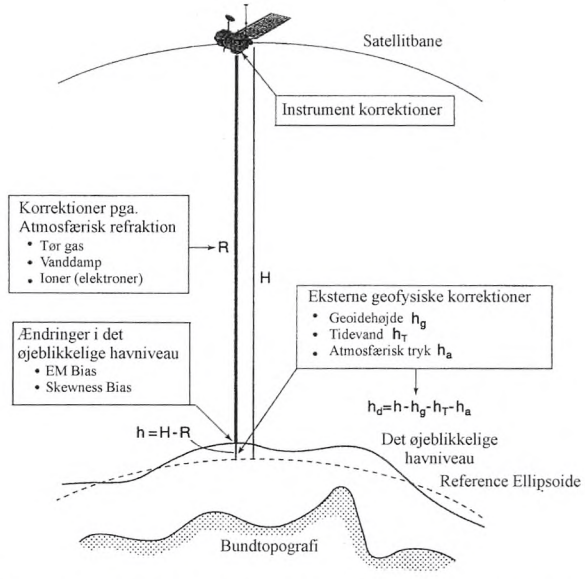
Satellitaltimetri er en metode, der med stor præcision bestemmer jordens højdevariation i forhold til en referenceflade. Metoden er baseret på aktive satellitbårne instrumenter, der udsender stråling i mikrobølge området af det elektromagnetiske spektrum. Ved at måle tiden fra strålingen udsendes fra satellitten, til den reflekteres på jordens overflade og returnerer til satellitten, kan højden beregnes.

Principperne virker umiddelbart simple, men bagved er der megen teknisk og geofysisk kompleksitet at tage hensyn til. Da systemet er baseret på en satellit, der er i bevægelse i jordens tyngdefelt vil satellittens højde variere i forhold til jordens massemidtpunkt. Der skal vælges referencesystemer og satellittens position i rummet skal kendes meget præcist. Derudover er der vigtige ydre faktorer, der indvirker på den elektromagnetiske stråling, som der skal korrigeres for, her kan bl.a. nævnes spredning i jordens atmosfære. Når der er taget højde for alle disse faktorer er satellitaltimetri et utroligt stærkt værktøj til opmåling af jorden.



Figur 1. Satellittens bane projiceret ned på jordens overflade. [2]

Anvendelsen af satellitaltimetri er indenfor de seneste år øget eksplosivt, idet den teknologiske udvikling har gjort det muligt at øge målenøjagtigheden væsentligt. Fra det første altimeter blev sendt op ombord på GEOS-3 i 1975 til TOPEX/POSEIDON (T/P) blev opsendt i 1992 er præcisionen på højdemålingerne øget fra 25 cm til 1,7 cm. En anden stor fordel ved anvendelse af satellitmålinger er, at de giver homogene resultater over store områder. På figur 1 ses satellittens bane projiceret ned på jordens overflade. Hvert punkt på banerne bliver dækket hver 10. dag indenfor en kilometers nøjagtighed. Den hyppige frekvens af målingerne giver et godt stabilt datasæt til at bestemme højde variationer over store områder over en længere tidsrække. Specielt er det en stor landvinding i udforskningen af oceanerne samt de isdækkede flader (iskapper, gletchere og havis), der inden satellitterne har været vanskelige at skaffe observationsdata for.



Figur 2. Viser de højder og korrektioner, der er relevante indenfor satellitaltimetri. [2]

De fysiske principper – højder og korrektioner

Til beskrivelsen af satellitbaserede højdemålinger tages udgangspunkt i figur 2, som er en oversigt over de parametre, der skal tages højde for og korrigeres for undervejs i processen.

Det altimeteret rent fysisk måler er to-vejs tiden, t, dvs. tiden det tager for den elektromagnetiske stråling fra den udsendes fra satellitten, til den reflekteres på overfladen og returnerer til satellitten. Da elektromagnetisk stråling udbreder sig med lysets hastighed i vakuum, bestemmes afstanden fra satelliten til overfladen, som halvdelen af den tilbagelagte vejlængde, R_0, ved:

$$R_0 = c\frac{t}{2} \tag{1}$$

Denne højde er dog overestimeret grundet refraktion i atmosfæren. Vakuum har et refraktionsindeks på n=1. Dette ændres i atmosfæren, hvormed hastigheden ændres gennem relationen

$$v = \frac{c}{n} \tag{2}$$

og den korrigerede afstand, R, er således givet ved:

$$R = v\frac{t}{2} = \frac{c(t/2)}{n} \tag{3}$$

Idet refraktionsindekset for atmosfæren summarisk er større end én medfører det, at hastigheden bliver mindre, hvilket giver en mindre afstand. For at bestemme den sande afstand skal følgende korrektionsled indføres

$$\Delta R = R_0 - R \tag{4}$$

Det atmosfæriske korrektionsled kan deles op i tre forskellige kategorier, se figur 2. Et bidrag fra gasserne i atmosfæren, hvoraf den største effekt stammer fra iltindholdet (0_2), et bidrag fra vanddamp (H_2O) og et fra de ionosfæriske forstyrrelser (primært elektroner). Summeres op over disse fås:

$$R = R_0 - \sum \Delta R \tag{5}$$

Til beregning af den øjeblikkelige højde (h) indføres en referenceflade, reference ellipsoiden, der defineres som den flade, der bedst approksimerer middelhavniveau. Til beregning af den øjeblikkelige højde forekommer den ukendte faktor (H) højden af satellitten i forhold til reference ellipsoiden. Satellittens bevægelse sker i jordens tyngdefelt, der fluktuerer i tid og rum. Desuden er den udsat for overflade påvirkninger af tryk fra solens stråling, hvilket afhænger af den enkelte satellits fysiske udformning. Der er flere forskellige metoder til bestemmelse af satellittens tredimensionale position. Her kan nævnes SLR (Satellite Laser Ranging), DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), radiometri samt anvendelse af de satellitbaserede positionsbestemmelser GPS (Global Positioning Satellites).

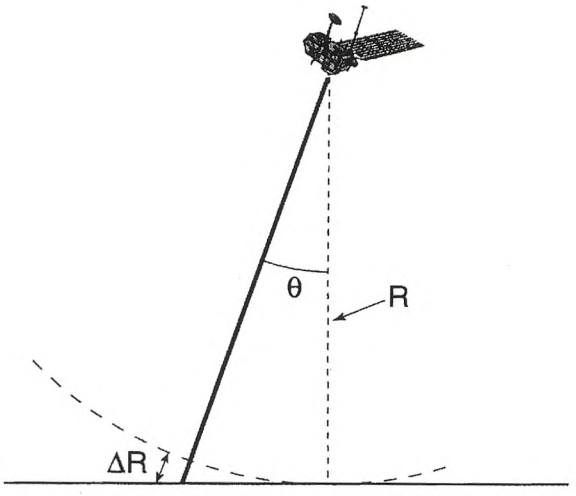
Når satellitens højde over reference ellipsoiden (H) er fundet, kan den øjeblikkelige højde (h) bestemmes udfra relationen:

$$h = H - R \tag{6}$$

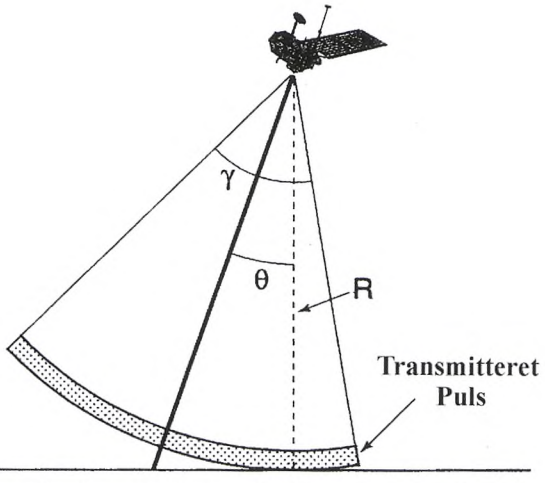
Dertil kommer flere instrumentkorrektioner, der f.eks. tager hensyn til satellitens hastighed i forhold til jorden, hvilket resulterer i et dopplerskift i frekvensen af den udsendte elektromagnetiske stråle.

For rent praktisk at kunne beskrive metoderne til, hvordan målingerne af den øjeblikkelige højde (h) udføres, er det nødvendigt, at se på de fysiske principper der ligger til grund for satellitaltimetri.

[1] Nadir er det punkt på overfladen, der ligger lige under satellitten.



Figur 3a. Det strålebredde afgrænsede altimeter. Bemærk den store afvigelse i højden en hældning af antennen vil medføre. [2]



Figur 3b. Det puls afgrænsede altimeter. Viser uafhængigheden af antennens hældningsvinkel i forhold til nadir. [2]

Pulsafgrænset altimeter

Strålingen der udsendes over store afstande (T/P orbithøjde 1336 km) vil have en vis udbreddelse, se figur 3b, der er angivet ved vinklen γ.

På et altimeter med en meget lille strålebredde $\gamma \sim 0$, ses fra figur 3a, at en meget lille ændring af antennens hældningsvinkel θ i forhold til nadir[1], vil give en stor ændring af den målte afstand. Problemet kan fuldstændig overvindes ved anvendelse af et pulsafgrænset altimeter, se figur 3b. Et pulsafgrænset altimeter udsender en puls i et meget kort tidsinterval på nanosekund skalaen (T/P: $\tau = 3,2$ ns) i en forholdsvis bred vinkel (T/P, $\gamma = 1-2°$). Pulsen udbredes sfærisk og medfører at den korteste afstand til overfladen altid returneres først. Er den halve pulsbredde ($\gamma/2$) min-

dre end antennens hældningsvinkel (θ), vil målingerne være uafhængige af antennens hældningsvinkel.

En anden fordel ved det pulsafgrænsede altimeter er, at den kræver mindre effekt ved udsendelse af signalet end det strålebredde afgrænsede altimeter samt en mindre antenne konfiguration. Det giver en længere levetid af altimeteret, da der er en begrænset energiforsyning ombord på satellitten.

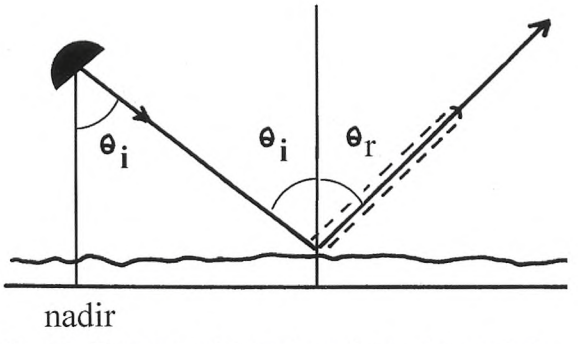
Radarligningen

Signalet der udsendes fra satellitten med effekten, P_t, reflekteres på overfladen. Effekten, P_r, af det returnerede signal er svækket pga. spredning i atmosfæren, samt spredning og absorption på overfladen, og afhænger også af overfladens evne til at reflektere den pågældende stråling. Effekten af det returnerede signal kan gennem geometrisk optik udtrykkes ved radarligningen:

$$P_r = \frac{t_\lambda^2 G_0^2 \lambda^2 A_{f,eff} \sigma^0}{(4\pi)^3 R^4} P_t \qquad (7)$$

De involverede parametre i ligningen er, transmittansen (t_λ) af den elektromagnetiske stråle gennem atmosfæren, hvor λ antyder at transmittansen er bølgelængdeafhængig. Da strålingen passerer gennem atmosfæren to gange er det nødvendigt at tage kvadratet af t_λ. G_0 er den maksimale værdi af antennens karakteristiske strålingsmønster, der er omvendt proportional med strålebredden. Da både afsender- og modtagerantennen i et altimeter er den samme, er det også nødvendigt at kvadrere G_0. λ er bølgelængden af den udsendte stråling, og R er den målte afstand efter korrektion af refraktion i atmosfæren.

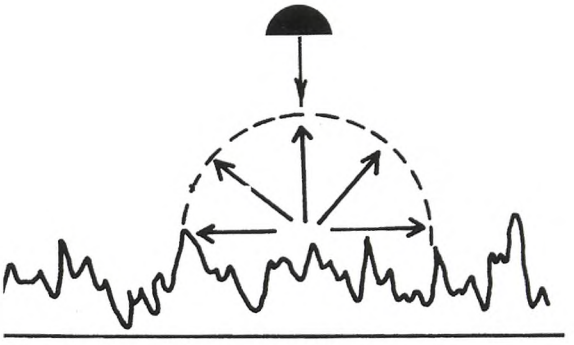
Backscatter koefficienten (σ^0) afhænger af overfladens egenskaber til at reflektere, sprede, absorbere og reemittere den indkomne stråling.



Figur 4. Illustrerer reflektionsloven for en plan overflade.

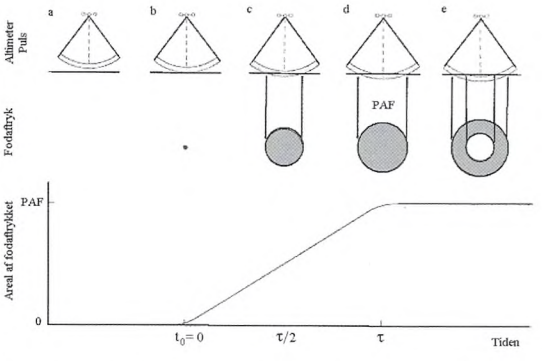
For det første er backscatter koefficienten afhængig af indfaldsvinklen (θ_i) af den indkomne stråling. I tilfældet af reflektion på en plan overflade vil indfaldsvinklen være den samme som antennes hældningsvinkel, se figur 4 øverst. Reflektionsloven fra den geometriske optik er givet ved: $\theta_i = \theta_r$ hvor θ_r er vinklen af den reflekterede stråle i forhold til overfladenormalen. Er vinklerne for store reflekteres der ingen stråling tilbage til satellitten. Fordelen ved et pulsafgrænset altimeter er netop at den er uafhængig af antennens hældningsvinkel, hvilket medfører at den indkomne stråle altid er vinkelret på overfladen og derfor reflekterer al stråling tilbage til satellitten.

Ydermere er backscatter koefficienten et mål for spredningen. På en plan overflade vil al den indkomne stråling reflekteres tilbage til altimeteret, er overfladen derimod ru, vil en del af strålingen blive spredt og kun en del af den indkomne stråle, vil blive reflekteret tilbage til altimeteret, se figur 5.



Figur 5. Spredning på en ru overflade.

Som en sidste afhængighed kan nævnes dielektriciteten af den bestrålede flade. Backscatter koefficienten vil derfor indirekte afhænge af saliniteten og temperaturen for en given overflade, da dette er bestemmende for dielektriciteten af hav og is.

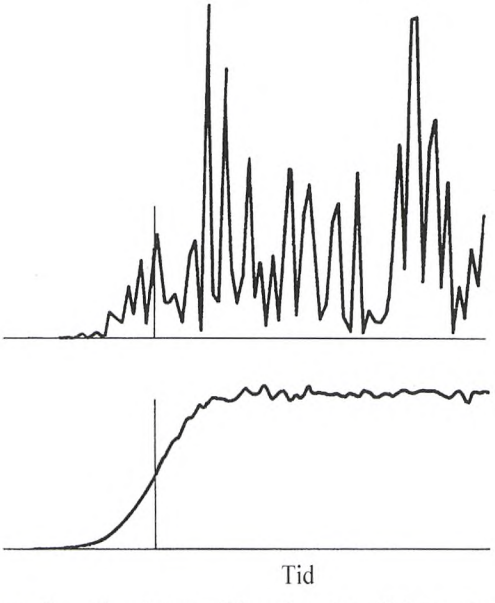


Figur 6. Tidsudviklingen af fodaftrykket af pulsen udsendt af altimeteret for en plan overflade. [1]

$A_{f,eff}$ er det effektive areal af pulsens geometriske udbredelse på overfladen (fodaftrykkets form) og er den faktor, der har størst betydning for formen af retursignalet. Pulsens udbredelse kan betragtes som en kugleskal med tykkelse givet ved pulsbredden $c\tau$. Når en kugleskal skærer en plan flade, vil den første kontakt til tiden $t_0 = 0$ aftegnes som et punkt på overfladen, se figur 6b. Efterhånden som kugleskallen bevæger sig gennem planen med lysets hastighed (c), vil der i perioden $t_0 = 0$ til τ, aftegnes en stadig større cirkel på overfladen, figur 6c og d. Herefter skærer indersiden af

kugleskallen planen og den videre udbredelse vil være ringformet, figur 6e. Nederst på figur 6 vises, hvordan arealet af fodaftrykket, udvikler sig med hensyn til tiden. Fra tiden t_0 til τ vokser arealet af fodsporet lineært, for derefter at blive konstant. Det maksimale areal kaldes det Puls Afgrænsede Fodaftryk (PAF) figur 6d.

For en plan overflade vil hele fodaftrykket være bestrålet 100 % til en given tid, hvilket vil sige det effektive areal er lig med fodaftrykket. På en ikke plan overflade, f.eks. ved forekomsten af bølger, vil det kun være en del af fodaftrykket der er bestrålet til en bestemt tid. Det effektive areal for en ikke plan overflade, er arealet der til en øjeblikkelig tid er bestrålet indenfor fodaftrykket. Da dette areal fluktuerer i tiden pga. fordelingen af bølgetoppe og dale, vil retursignalet for én puls fluktuere kraftigt. Det er derfor nødvendigt at midle over flere pulser, se figur 7.



Figur 7. Simulation af hvordan det effektive areal af fodaftrykket af én puls fluktuerer kraftigt i tid for en Gaussisk bølgefordeling. Nederst er midlet over 1000 pulser. [2]

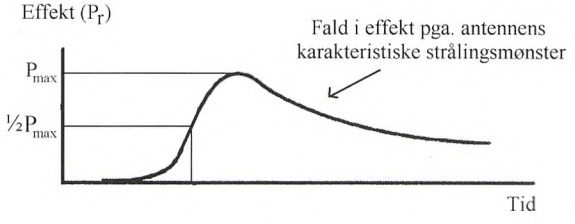
Det returnerede signal afhænger desuden af antennens karakteristiske strålingsmønster (G), der er en effekt af at antennen ikke udsender eller modtager stråling lige effektivt over hele strålebredden. Typisk vil antennen være konstrueret så den har en maksimal effekt i midten af strålebredden for at aftage kraftigt i yderkanterne. Efterhånden som pulsen udbredes vil fodaftrykket, bevæge sig længere ud i periferien af strålebredden, hvor antennen ikke udsender og modtager signalet særlig godt. Resultatet vil være et fald i effekten på retursignalet, se figur 8.

Geofysiske anvendelsesmuligheder – højdemålinger af havet

Hvorfor er det vigtigt at kunne måle havniveauet meget præcist?

Det er der ikke noget enkelt svar på, men idet oceanerne dækker ca. 70 % af jordens overflade, spiller de en meget vigtig rolle i det globale klimasystem, dels ved lokal vekselvirkning med atmosfæren i form af varme og vanddamp, og dels ved havstrømmenes transport af varme og salt. Her kan f.eks. nævnes den varme Nordatlantiske Havstrøm med relativ høj salinitet, og Den Østgrønlandske Strøm, som er en kold og forholdsvis fersk overfladestrøm, der transporterer store mængder havis sydpå fra Polarhavet.

Disse strømme indgår i det globale strømningsmønster, ofte betegnet som den termohaline cirkulation, hvor det er oceanernes temperatur- og saltfordelinger, der er de styrende parametre for strømingsmønstret. Endvidere er vinddrevne påvirkninger af overfladestrømmen heller ikke uvæsentlige.



Figur 8. Formen på retursignalet midlet over flere pulser fra en gaussisk bølgefordeling. To-vejs tiden findes ved halvdelen af den maksimale effekt. Desuden ses et fald i effekten pga. antennens karakteristiske strålingsmønster. [2]

Bestemmelse af disse strømme er dog vigtig for den fysiske forståelse af oceanerne og deres påvirkning af det globale klimasystem. Inden "satellittidsalderen" var det kun muligt at karakterisere havstrømmene i grove træk, baseret på oceanografiske feltmålinger og oceanmodeller. Satellitaltimetri har givet helt nye muligheder for med stor nøjagtighed at bestemme havoverfladen, og dermed få en indirekte observation af overfladestrømmen. En meget anvendt approksimation i oceanografien er antagelsen om geostrofisk og hydrostatisk balance, idet en hældning af overfladevandspejlet vil være udtryk for en overfladestrøm. Overfladen og dermed dens hældning kan bestemmes ved hjælp af satellitaltimetri.

Det ville umiddelbart virke indlysende, hvis højdevariationerne af den geostrofe strøm (h_d), var givet direkte ved den øjeblikkelige højde (h). Dette er dog ikke tilfældet, da den øjeblikkelige højde til en bestemt tid og position, er en superposition af flere forskellige eksterne geofysiske parametre

$$h = h_g + h_d + h_T + h_a \tag{8}$$

De enkelte bidrag til ovenstående er, geoideafvigelsen (h_g) som repræsenterer middelhavniveau, hvis der ses bort fra alle andre kræfter end gravitations- og centrifugalkraften. Variationerne i højden h_T repræsenterer tidekræfterne og h_a er knyttet til det atmosfæriske tryk på havoverfladen.

Det øjeblikkelige havniveau (h)

Havet kan opfattes, som en superposition af bølgefelter med forskellig amplitude og bølgelængde. Til en given tid kan en gaussisk fordelingsfunktion benyttes, som model for højden af havets bølger:

$$f(\zeta) = \frac{4}{\sqrt{2\pi}H_{1/3}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{4\zeta}{H_{1/3}}\right)^2\right] \qquad (9)$$

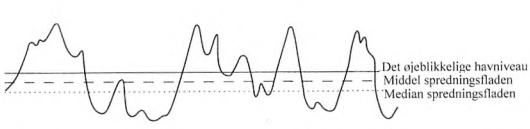
Her er ζ den øjeblikkelige højde og $H_{1/3}$ er den signifikante bølgehøjde, defineret som gennemsnittet af den højeste tredjedels bølgetoppe. For at finde en middelværdi af det øjeblikkelige havniveau skal to-vejs tiden findes. Denne bestemmes ved den tid, der svarer til halvdelen af den maksimale effekt (1/2 P_{max}) af retursignalet, se figur 8.

Hvis højdevariationerne af havet var en perfekt gaussisk fordeling, ville to-vejs tiden svare til en midlet værdi af det fysiske øjeblikkelige havniveau. Der er dog en forskydning i havets bølgefelt væk fra denne fordeling, således at bølgetoppene har en større krumningsradius end bølgedalene, hvilket giver en større backscatter koefficient. Selv uden en forskydning i krumningsradius vil bølgetoppene have en større backscatter koefficient end bølgedalene. Dette skyldes at toppene er mere udsat for vindpåvirkninger samt har en mere turbulent overflade, hvilket giver overfladen en større ruhed. En stor backscatter koefficient vil give mindre retursignal fra toppene, hvilket "favoriserer" retursignalet fra bølgedalene, hvorfor det umiddelbare resultat vil være at overfladen tilsyneladende forskydes til et lavere niveau. Den forskudte flade kaldes middel spredningsfladen og effekten kaldes EM (Elektromagnetisk) forskydning se figur 9. Da den EM forskydning tiltager med tiltagende bølgehøjde indføres korrektionsleddet, der giver forskydningen af middelspredningsfladen fra det fysiske øjeblikkelige havniveau:

$$\Delta R_{EM} \propto H_{1/3} \qquad (10)$$

To-vejs tiden der aflæses på retursignalet ved den halve effekt af maksimalværdien svarer derfor ikke helt til middel sprednings overfladen, men derimod til median sprednings overfladen. Forskydningen af denne flade i forhold til middel spredningsfladen er givet ved korrektionsleddet:

$$\Delta R_{SKEW} = \lambda_\xi (H_{1/3}/24) \qquad (11)$$

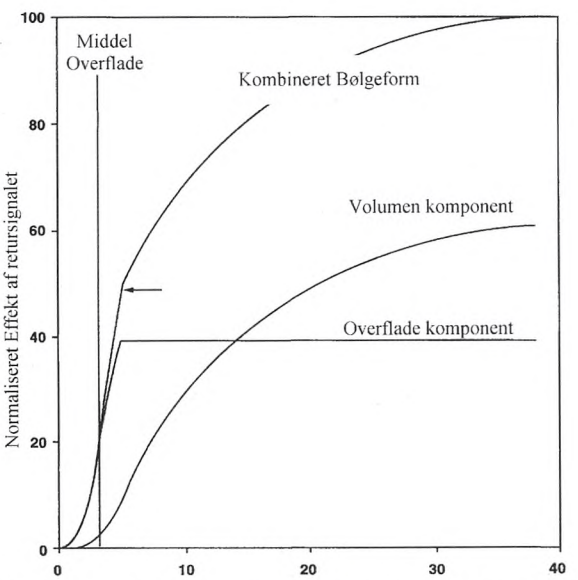


Figur 9. Forskydningerne af det øjeblikkelige havniveau (midlet over flere pulser) i forhold til middel og median sprednings overfladerne. [2]

Højdemålinger af iskapper og gletchere

Ismasser (iskapper, gletchere samt havis) har en betydelig indflydelse på jordens klima gennem stadig vekselvirkning med oceanerne og atmosfæren.

Massebalancen af iskapper og gletchere er en vigtig klimaparameter, men da det er en svært målelig størrelse er det nødvendigt at kende akkumulationen, der inkluderer tilvæksten i iskappen fra nedbør, og ablationen der inkluderer afsmeltning og kælving af isbjerge. Kendes højdeforholdene for en iskappe gennem en længere periode, er det muligt at bestemme massebalancen, og dermed vide om disse bidrag er positive eller negative. En postitiv massebalance vil være ensbetydende med større akkumulation end ablation. En negativ massebalance vil betyde at iskapperne bliver mindre og dermed bidrager til at øge vandstanden i havene. Altimetrimålinger kan benyttes til at udarbejde topografiske kort over isen.



Figur 10. Formen på retursignalet af spredning på en iskappe, hvor der både er reflektion fra overfladen og volumenelementet umiddelbart under overfladen. [2]

Højdemålinger af iskapper (Grønland og Antarktis) er betydeligt vanskeligere at estimere end højdemålinger af oceanet. For det første er overfladen ikke klart defineret. Det øverste lag består af firn, der er løst pakket sne, med en forholdsvis lav vægtfylde 50–830 kg/m^3. Først i en dybde på omkring 10 m er firnen blevet omdannet til kompakt is med en vægtfylde på[2] 830–917 kg/m^3. Firnen bevirker at strålingen ikke kun reflekteres på overfladen, men også trænger ned i de øverste lag. Nedtrængningsdybden afhænger af størrelsen på snekornene, jo større korn

[2]Den nederste grænse er defineret, hvor luftboblerne lukkes af så de ikke kan vekselvirke med atmosfæren, og den øverste grænse er der hvor isen forbliver konstant med dybden uden yderligere kompression.

desto mere spredning af strålingen, hvilket giver en lille nedtrængningsdybde. Små korn giver derimod en stor nedtrængningsdybde. De vekslende overfladeforhold gør, at spredningsfordelingen ændres lokalt. Formen på retursignalet stammer fra to bidrag, se figur 10. Det ene bidrag er fra en plan overflade tilsvarende den for oceanet og det andet bidrag kommer fra volumen spredningen under overfladen. Lægges bidragene fra overfladen og det underliggende volumen sammen, fås det returnerede signal. Små nedtrængningsdybder giver det retursignalet, der minder mest om en ren overfladereflektion.

Et andet og det største problem, i forbindelsen med altimetrimåling af iskapper, er hældningen af overfladen, enten pga. overfladeondulationer eller en kraftig hældning i nærheden af iskappens randzoner. Idet altimeteret altid måler højden til det punkt, der er tættest på pulsens sfæriske bølgeudbredelse, vil en hældning med vinklen α i forhold til vandret give en fejl på højden taget i nadir, se figur 11. Dette giver en forholdsvis stor fejl på ΔH. En hældning på 0,5° giver en afvigelse i højden på cirka 30 m og ved iskappers randzoner er denne afvigelse op til 100 m.

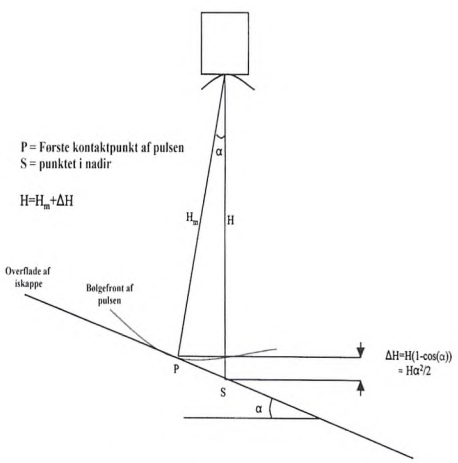
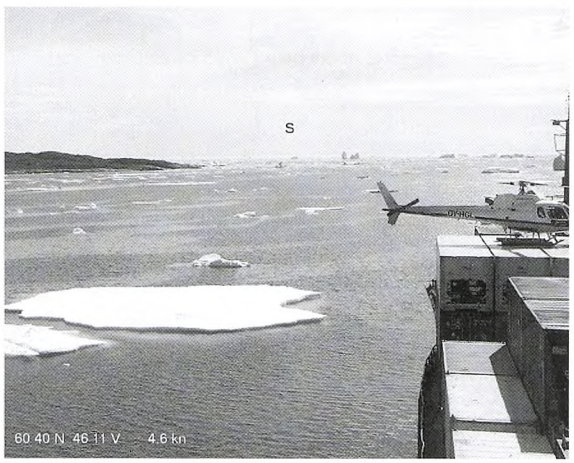


Fig. 11 På en hældende flade reflekteres det punkt, der er tættest på pulsens sfæriske bølgefront. Dette resulterer i en fejl på højden ΔH. [2]

Retracking er en metode udviklet til at tage højde for de "falske" højder, der opstår under målingerne. Princippet går ud på at simulere bølgeformer af forskellige overfladehældninger og derudfra finde den model, der passer bedst til målingerne, hvorfra den "sande" højde bestemmes.

Havistykkelser

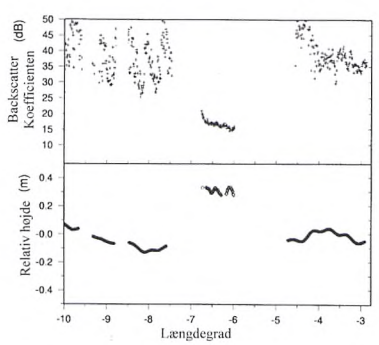
Tilsvarende har havis en stor betydning for klimaet. Havis har en meget større albedo[3] end havet. Uden isen vil havet blive varmere da det absorberer solens stråler. Varmere vand giver større afsmeltning. Akustiske målinger fra undervandsbåde og forankrede bøjer under vandet har indikeret at der sker en udtynding af havisen specielt i området omkring Arktis. Målingerne er sparsomme både i udstrækning og diskontinuerte i tid, og det er derfor oplagt at undersøge mulighederne og begrænsningerne ved satellitaltimetri af havisens tykkelse.



Figur 12. Fribordet kan fornemmes på denne isflage, der er omkring 1,5 m tyk. (Foto: Henriette Skourup, 2000)

Tykkelsen af havisen kan måles vha. det konventionelle pulsafgrænsede altimeter. Fysisk er det fribordet af havisen der måles, dvs. højden fra det øjeblikkelige havniveau til overfladen af isflagen se figur 12. Er højden af fribordet, f, kendt, benyttes arkimedes lov til at beregne istykkelsen, t_{is}:

$$t_{is} = f\frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_{is}} \tag{12}$$



Figur 13. Øverst ses forskellen på backscatter koefficienten (σ^0) for vand og is, hvilket svarer til en ændring i den relative højde, nederst. Den relative højde er taget i forhold til en middel af havniveauet taget på langs af satellitbanen. [3]

Massefylden af havet svinger dog lidt i værdi, da den er afhængig af temperatur og salinitet. Indsættes middelværdier af massefylderne for havvand ρ_w = 1,025 g/cm^3 og for havis ρ_{is} = 0,920 g/cm^3, vil et fribord af isen på f = 20,0 cm give en tykkelse på t_{is} = 195,2 cm, hvilket svarer til at fribordet udgør ca. 10 % af den

[3]En given overflades evne til at reflektere solens stråling. En stor albedo, reflekterer mest.

samlede tykkelse af isflagen. Retursignalet fra isen kan skelnes fra retursignalet af havoverfladen, idet den har en anden backscatter koefficient σ^0 se figur 13. Problemet med denne fremgangsmetode er, at kun 5 % af havisen har tilpas store flager (sammenhængende overflader) til at give den forventede information. Ydermere kan meget tynde flager samt smeltevand på flagerne komplicere detekteringen af fribordet, idet backscatter koefficienterne for havet og flagerne i disse grænsetilfælde, kan være svære skelne fra hinanden. En videre opmåling af havistykkelser kræver et altimeter med en bedre opløsning.

Forskning og anvendelse af satellitaltimetri de kommende år

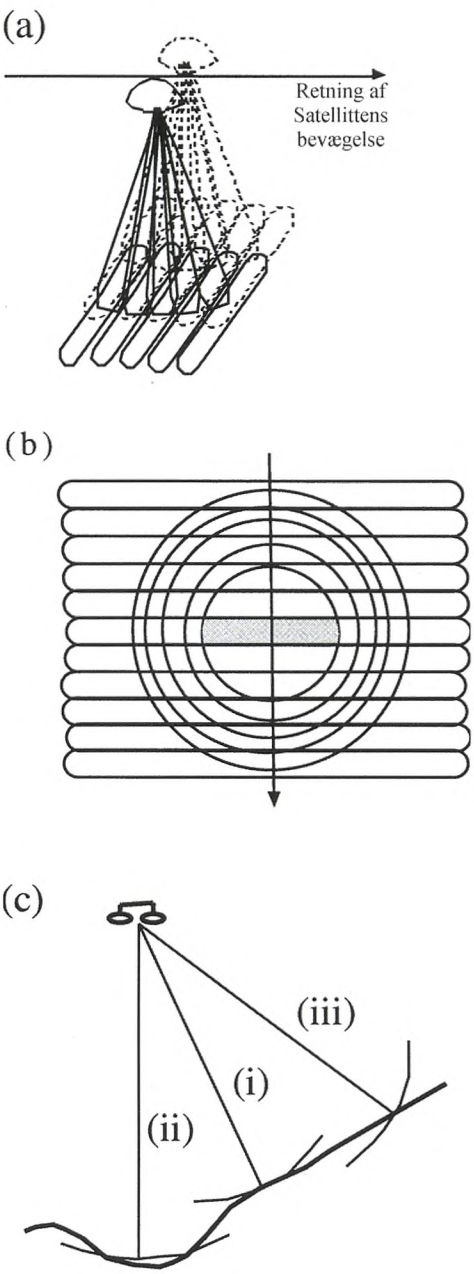
Det er ønskværdigt at fortsætte de kontinuerlige højdemålinger baseret på satellitaltimetri, idet datasæt opsamlet over lange perioder, vil være uundværlige i forskningen af de langtidsvarierende effekter af den globale opvarmning. Her tænkes på ændringen i middelhavniveauet, der p.t. øges med 2 mm/år, og bl.a. inkluderer effekter fra varmeudvidelse af havene og afsmeltning fra iskapper/gletchere.

På trods af at der idag er en del aktive satellitter med altimeter ombord, har disse en begrænset levetid, og de næste missioner er allerede i fuld gang. Til at overtage funktionerne til opmåling af havet efter T/P, er satellitten JASON-1 netop blevet opsendt 7. december 2001 og forventes at være operationel omkring 6 måneder efter opsendelsen med en efterfølgende mission JASON-2 forventet opsendt 2005 i et fortsat samarbejde mellem NASA og CNES.

Figur 14. Billedet viser de komplekse højdevariationer, der er i randzonen af den Grønlandske indlandis. (Foto: Keld Q. Hansen, 2001)

Seneste missioner har indikeret at de største flader af indlandsisen forholder sig stabile, og dermed ikke bidrager til den globale vandstandsforøgelse. De steder, der bidrager til vandstandsforøgelsen skal altså findes:

- I randzonerne af de store iskapper.
- Fra små lokale gletchere og iskapper med negativ massebalance. Da randzonerne og små gletchere ofte har en meget ujævn overflade struktur og en kraftig hældning, se figur 14, er det nødvendigt at udvikle altimetre med en finere horisontal opløsning.



Figur 15. (a) SAR scanner overfladen i baner vinkelret på satellittens bevægelsesretning. (b) Det pulsafgrænsede altimeters fodaftryk (cirkulære baner) sammen med de aflange baner fra SAR, giver en bedre horisontal opløsning. (c) To SAR antenner scanner overfladen. Denne konfiguration virker som et interferometer og giver en tredimensional opfattelse af overfladen. [3]

Til dette formål har NASA planlagt en mission ICESat (Ice, Clouds and land Elevation Satelllite) med forventet opsendelse inden udgangen af 2002. Altimeteret ombord på satellitten er en LASER med et fodaftryk på 65 m, hvilket giver en bedre horisontal opløsning end

de hidtidige missioner (T/P har et fodaftryk på 100 m).

Desuden har ESA planlagt CryoSat missionen, som forventes opsendt i 2003. Denne mission anvender en kombination af det konventionelle pulsafgrænsede altimeter og SAR (Synthetic Aperture Radar) til opmåling over havis. SAR scanner overfladen i baner på tværs af satellittens bevægelsesretning se figur 15a. Kombineres fodaftrykkene fra SAR og det pulsafgrænsede altimeter, vil de tilsammen deles ind i områder, der giver en bedre horisontal opløsning, se figur 15b. Til opmåling af iskapperne scanner to SAR antenner overfladen, figur 15a. Denne konfiguration bevirker, at retursignalerne vil interferere med hinanden og give en tre dimensional model af overfladen, figur 15c. Metoden kaldes for interferometri.

Referencer:

[1] Dudley B. Chelton (1988) "WOCE/NASA Altimeter Algorithm Workshop", U.S. WOCE Technical Report No. 2, 70 pp., U.S. Planning Office for WOCE, College Station, TX.

[2] Lee-Lueng Fu og Anny Casenava (2001) "Satellite Altimetry and Earth Sciences, A Handbook of Techniques and Applications". Academic Press.

[3] Duncan Wingham (1999) "CryoSat, Science and Mission Requirements". Department of Space & Climate Physics. University College London.

Henriette Skourup har arbejdet 5 år ved iskortlægningen DMI. Hun forventer snarest at påbegynde et speciale ved Kort- og Matrikelstyrelsen indenfor analyse af satellitdata til måling af havistykkelser i samarbejde med NBIAFG.

Back to basics!

Jeppe Dyre, IMFUFA, Roskilde Universitetscenter.

Fysik er sjovt. Fysik er spændende. Man bliver aldrig træt af at beskæftige sig med fysikkens indsigter, og man fascineres løbende af ny gennembrud på forskningsfronten. Der er nærmest tale om en permanent forelskelse. Sådan tror jeg de fleste fysikere føler for deres fag. Men disse følelser er det svært at formidle til folk der ikke er fysikere. De – og samfundet som sådan – har nærmere holdningen: *Fysik er nyttigt*, og derfor er fysikere nyttige. Nøjagtigt ligesom alle mulige andre eksperter er nyttige, for eksempel elektrikere eller tandlæger. Men er fysik blot ét af mange specialer, er fysikere bare en slags avancerede ingeniører? Hvad er egentlig fagets berettigelse? Disse spørgsmål bør fysikere stille sig selv en gang imellem. Svarene har konsekvenser for vores opfattelse af faget og for hvordan der skal undervises i faget.

Et kort og klart synspunkt på hvad fysik er, blev givet i 1995 af Sol Gruner, James Langer, Phil Nelson og Viola Vogel i artiklen *"What future will we choose for physics?"* [1]. De understreger at fysik ikke er kendetegnet ved, *hvad* der studeres, men ved *hvordan* det studeres. Faget er karakteriseret ved hvilken slags spørgsmål man stiller til de studerede systemer, og hvilken slags information man søger om dem. Som et eksempel nævnes i artiklen at astronomer studerer pulsarer, og biologer studerer levende systemer, men fordi der er interessant fysik i både pulsarer og levende systemer, studerer fysikere dem begge. Denne afgrænsning af faget i termer af dets "conceptual tools" – frem for i termer hvad der studeres - har faktisk kendetegnet fysikken helt tilbage til Galileo.

Hvad er det så der karakteriserer fysikkens tænkemåde, hvilke "conceptual tools" kendetegner fysikeren? De er [1]:

1) En kvantitativ og reduktionistisk tilgang.

2) Et ønske om at identificere universelle træk af systemet der studeres, med henblik på at opnå erkendelse der går ud over systemet. [2]

De dygtigste fysikere gennem tiderne har studeret systemer som kunne lære os noget alment – noget der strækker sig langt ud over systemet selv. I den daglige forskning har de fleste af os selvfølgelig ikke på samme måde fat i den lange ende, men pointen er at vores *drivkraft* går i ovennævnte retning. Vi er – modsat f.eks. kemikere – ikke helt tilfredse med resultater der ikke i det mindste *kunne* vise sig at være almene. Vi leder efter det universelle, og vi begejstres når vi finder det.

Jeg tror langt hen ad vejen det er disse "conceptual tools", der gør fysikeren nyttig på arbejdsmarkedet. Det er tænkemåden, den måde fysikeren angriber et problem på, der gør ham eller hende nyttig. Fysikeren er ikke "bare" skrap til at bruge fysikkens formler. Fysikeren tænker lidt anderledes end folk med andre uddannelser. For eksempel skelner en fysiker i sin verdensopfattelse – modsat de fleste andre – skarpt mellem grundlæggende, almengyldige ligninger (f.eks. Maxwells ligninger) og empiriske lovmæs-

sigheder (f.eks. Hookes lov). Der er i den veluddannede fysikers hoved et *hierarki* af erkendelser med de kendte grundpiller nævnt i note [2].

En fysiker skabes gennem en lang og hård universitetsuddannelse. Det er uddannelsen det gør forskellen på fysikeren og ingeniøren, på fysikeren og andre naturvidenskabeligt uddannede. En fysikuddannelse bør hele tiden understrege de bærende elementer i fysikkens bygning. Selvom vi her i landet stadig har gode uddannelser, er udviklingen i mange år gået i en uheldig retning, synes jeg. De store fysikmiljøer (KU og AU) har efterhånden et meget stort og avanceret pensum på førstedelen; vi på de små universiteter er vist ikke meget bedre. Det meste af det jeg selv lærte på andendels-studiet er nu pensum på første del. Dette skyldes måske et pres for tidligt at præsentere det "ny" og "spændende".

Samtidig med at de studerende på papiret lærer meget mere er frafaldet blevet mindre og studietiden kortere. Hvordan kan det hænge sammen? Jeg tror det store pensum for mange studerende har ført til en delvis overfladisk forståelse. Dette er særlig farligt for fysik, fordi fagets kerne er *dyb forståelse af grundlæggende sammenhænge*. Vi risikerer at smide barnet ud med badevandet. Mange andre fag giver (nødvendigvis) en ret fragmenteret og overfladisk forståelse af mangfoldige fænomener, men fysik er i denne sammenhæng ikke bare er et blandt mange fag. Fysik er noget særligt, et fag med en strengt hierarkisk erkendelsesstruktur – med symmetrier og bevarelseslove som det helt grundlæggende. I fysikken skelner man skarpt mellem det grundlæggende og det afledte. Fysik er faget per excellence hvor spørgsmålet: *Hvorfor?* kan besvares og skal besvares.

Hvis jeg har ret i ovenstående grunde til fagets berettigelse, bør fysikstudierne revideres. Vejen frem er først og fremmest at skære betydeligt ned på pensum, især på førstedels-studiet. I stedet skal vi konsekvent lægge vægten på det helt grundlæggende. Studiet bliver ikke nemmere eller på et lavere niveau hvis dette gennemføres, for kravene til den grundlæggende forståelse skal samtidig øges betydeligt.

Det er fysikere der er godt grundskolede, der er nyttige for samfundet, ikke dem med en overfladisk forståelse af en mangfoldighed af fænomener. Dermed har og får fysikken sin særlige berettigelse.

Referencer:

[1] S. M. Gruner, J. S. Langer, P. Nelson og V. Vogel (1995) *Physics Today*, December 1995, side 25.

[2] En tredje og sidste "conceptual tool" der nævnes i ref. [1] er at fysikere alle har gennemgået "advanced training in core subjects". Dvs. at vi alle har lært mekanik, termodynamik og statistisk mekanik, kvantemekanik og elektrodynamik, så vi mestrer disse "core subjects" på et højt niveau.

Jeppe Dyre er professor i fysik på RUC.

Breddeopgave nr. 9 og 10

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, Roskilde Universitetscenter.

De følgende to breddeopgaver bringes apropos artiklen om Coriolis og corioliskraften i det sidste nummer af KVANT. Breddeopgave nr. 9 blev stillet ved vintereksamen 1999 og lyder:

Vurder størrelsesordenen af vandstandsforskellen mellem østsiden og vestsiden af Storebælt ved en strømhastighed gennem bæltet på ca. 5 km i timen.

Breddeopgave nr. 10 blev stillet ved sommereksamen 2000 og lyder:

Det lodrette tryk på skinnerne fra et hurtigtkørende tog er svagt afhængigt af om toget kører imod øst, vest, nord eller syd. I hvilken kørselsretning er trykket størst og i hvilken mindst? Hvad er størrelsesordenen af den relative trykforskel? Begrund svarene.

Løsninger og kommentarer til opgaverne bringes i næste nummer af KVANT.

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Dansk Fysisk Selskab

Hjemmeside: www.nbi.dk/dfs

Henrik Bruus (formand)
MIC, bygn. 345ø
DTU, 2800 Kgs. Lyngby

E-mail: bruus@mic.dtu.dk
Tlf. 45 25 63 99 / Fax 45 88 77 62

Ole Bakander (ole.bakander@post.tele.dk)

Per Morgen (per@fysik.sdu.dk)

Erik Horsdal Pedersen (kasserer) (horsdal@ifa.au.dk)

Dorthe Posselt (Dorthe@ruc.dk)

Beretning for året 2001 i Dansk Fysisk Selskab

Dansk Fysisk Selskab afholdt sin årlige generalforsamling på Hotel Nyborg Strand fredag den 31. maj 2002 kl. 13.15. På mødet afgav den afgående formand sin beretning, der gengives her i skriftlig form.

Dansk Fysisk Selskab år 2001

af Dorthe Posselt, IMFUFA, RUC.

Det nu lukningstruede "Børsens Nyhedsmagasin" har i et par år offentliggjort en liste over "magtDanmark". Den seneste rangliste over de 250 mest magtfulde mænd og kvinder i Danmark blev offentliggjort i nr. 10, 18. marts 2002. Listen laves ved at en række navne udvælges af Børsens Nyhedsmagasin og sendes til universitetsansatte indenfor forskellige samfundsvidenskabelige discipliner. Disse tildeler derefter navnene på listen point på en skala fra 1–7. Børsens Nyhedsmagasin definerer "magt" som "muligheden for at påvirke det danske samfunds udvikling". Listen er deprimerende læsning for en akademiker – der optræder selvfølgelig en række navne på politikere, erhvervsfolk og chefredaktører, men hvor er landets intellektuelle og forskere? Hvor er universiteterne?

Økonomiprofessor Nina Smith optræder på plads nr. 139, rektorer for landets handelshøjskoler og universiteter optræder spredt på pladserne over 170, og der optræder en valgforsker, en fremtidsforsker og en samfundsforsker på de sidste pladser sammen med f.eks cykeldirektør Bjarne Riis og fodboldspiller Peter Schmeichel. Der er naturligvis grænser for hvor seriøst man kan tage en sådan liste med de præmisser, den er lavet udfra. Men listen er udtryk for en tendens i tiden – (akademisk) viden er tilsyneladende ikke længere magt.

Leder man på listen efter personer med indsigt i naturvidenskab og teknologi er der heller ikke meget at komme efter – Haldor Topsøe, bestyrelsesformand for Haldor Topsøe, er at finde på plads 102. Viden og indsigt er tilsyneladende for en stor del af befolkningen blevet synonymt med den overfladiske viden, man kan plukke via en hurtig søgning på internettet – den respekt, der tidligere stod om "atomfysikere" er for nedadgående, det er jo blot en anden kategori af smagsdommere! Der er altså meget at være bekymret over – og jeg er her slet ikke kommet ind på nedskæringer og manglende nyansættelser samt frustration over skiftende magthaveres skiftende cigarkasser. Der er dog også grund til optimisme. Ganske vist er der plads til mange flere fysikstuderende, men vi skal jo ikke glemme at der allerede i systemet er rigtig mange studerende, der brænder for faget fysik og har store faglige ambitioner. I min daglige omgang med nye universitetsstuderende på den naturvidenskabelige basisuddannelse ved RUC er det en fornøjelse at følge udviklingen hver gang en student opdager glæden ved at tilegne sig egentlig indsigt i en kompliceret problemstilling. Hen mod uddannelsesforløbets afslutning er de unge ofte faglige idealister – de vil hellere end gerne fortsætte som ph.d studerende, myterne (og realiteterne) om de meget højere lønninger i det private erhvervsliv trækker slet ikke så meget som lysten til at fordybe sig. At der er mange engagerede og dygtige studerende ses bl.a. på Dansk Fysisk Selskabs årsmøde, der har udviklet sig til et forum, hvor mange specialestuderende for første gang præsenterer deres arbejde for en bredere kreds – i 2002 var antallet af ansøgere til fripladser fordoblet i forhold til 2001. Debatmødet "Dansk Fysik 2015" på Dansk Fysisk selskabs årsmøde 2002 blev sat i værk som et bidrag til at få de visioner frem, der skal være med til at sætte dagsordenen og fremme optimismen. Mange yngre deltagere i mødet har givet udtryk for, at paneldebatten var præget af for megen jammer. Også her er det således på sin plads at minde de unge om, at de har en opgave at løfte med at frembringe nye visioner og være med til at genvinde naturvidenskabens positive rolle i det offentlige rum. Vi må holde fast i at en konstruktiv påvirkning af det danske samfunds udvikling (dvs. udfoldelse af magt i Børsens Nyhedsmagasins terminologi) fordrer viden og indsigt – viden er grundlaget for (konstruktiv) magt.

Bestyrelsen

Ansvaret for DFS's daglige arbejde ligger hos bestyrelsen, der pr. 10. maj 2000 blev konstitueret med Dorthe Posselt som formand, Henrik Bruus, næstformand, Erik Horsdal, kasserer, Karsten Wedel Jacobsen, Jens Juul Rasmussen, Poul V. Thomsen, Ole G. Mouritsen og Ole Bakander. Der har i april 2002 været nyvalg til bestyrelsen og i den nye bestyrelse sidder: Henrik Bruus (nyvalg som direkte valgt), Erik Horsdal Pedersen, Ole Bakander, Per Morgen (nyvalg), Dorthe Posselt (KIF) samt på skrivende tidspunkt endnu ikke

valgte sektionsformænd. Sekratariatsfunktioner i DFS varetages af Anette Skovgaard i Århus og Stine Timmerman, der er ansat som studentermedhjælp på RUC. I 2001 blev foreningens medlemsregister lagt ind på en database med netadgang for formand, sekretariat og nogle få andre. I forbindelse med oprettelsen af denne database har Janus Schmidt været ansat som studentermedhjælp. Bjarne Andresen og Michael Linden-Vørnle har også i 2001 ydet et stort arbejde med henholdsvis medlemsregister og hjemmeside.

Sektionerne

Sektionerne i Dansk Fysisk Selskab er faststoffysiksektionen (formand i 2001 Henrik Bruus), atomfysiksektionen (formand i 2001 Jens Juul Rasmussen), uddannelse og undervisning (formand i 2001 Poul V. Thomsen) samt netværk for kvinder i fysik (formand i 2001 Eva Danielsen). Netværk for kvinder i fysik har i 2000 udsendt tre nyhedsbreve og formand samt bestyrelsesmedlemmer har i 2001 deltaget i flere internationale "Women in Science" møder.

Medlemsskaren

Pr. 1. oktober 2000 havde Dansk Fysisk Selskab 633 betalende medlemmer, heraf 359 ordinære medlemmer, 238 studentermedlemmer, 35 pensionister og et firma. Medlemstallet pr. 4. juli 2001 var 726, heraf 397 ordinære medlemmer, 232 studentermedlemmer, 56 Ph.D.-studerende, 39 pensionister samt et firma. Pr. 23. maj 2002 her der været en stigning i medlemstallet, men en meget stor del af medlemmerne har ikke betalt kontingent (12% af de ordinære medlemmer, 29% Ph.D.-studerende og 26% studerende har ikke betalt til tiden).

Det giver Bjarne Andresen et unødvendigt stort arbejde at skulle sende så mange rykkere ud – derfor kære medlem: overhold betalingsfristen! En folder med oplysninger om selskabet er i 2001 trykt i et par hundrede eksemplarer og delt ud på landets universiteter.

Kvant

Antallet af abonnenter er steget med ca. 200 det sidste år til 2415. Stigningen skyldes især, at det norske astronomiske selskab har tilbudt bladet til deres medlemmer, hvilket et par hundrede har taget imod. Den generelle tilgang af artikler til Kvant er god, men redaktøren, Jens Olaf Pepke Pedersen, efterlyser flere artikler fra speciale og Ph.D. studerende. Det forlyder fra redaktøren, at det ikke er usædvanligt at få henvendelser om flere år gamle artikler. Desuden kommer enkelte af artiklerne fra Kvant ud til en større kreds af læsere gennem publicering i Europhysics News, hvor Jens Olaf Pepke Pedersen sidder i redaktionen.

Internationalt arbejde

Per-Anker Lindgård har siden 1997 været medlem af Europæisk Fysisk Selskabs bestyrelse (EPS – www.eps.org) med opbakning fra de skandinaviskbaltiske selskaber. Per-Anker Lindgårds valgperiode udløb i marts 2002 og Dansk Fysisk Selskab støttede i den forbindelse direktør for NORDITA, Paul Hoyer som skandinavisk kandidat til at efterfølge Per-Anker Lindgård. Paul Hoyer blev ikke valgt. Per-Anker Lindgård har i 2001 fungeret som vicepræsident i EPS og har været aktiv i en arbejdsgruppe, der undersøger mulighederne for bedre kontakt mellem erhvervsvirksomheder og EPS. Der er i EPS blevet ansat en professionel konsulent til at følge op på arbejdsgruppens arbejde.

Per-Anker Lindgård har taget initiativ til og er formand for for en ny division under EPS: Division of Physics in Life Sciences, der skal samle fysikere, der arbejder indenfor biologisk fysik og fysikere beskæftiget indenfor f.eks. medicin. Se den nye divisions hjemmeside: DPL.risoe.dk. Udover Per-Anker Lindgårds arbejde i bestyrelsen, er dansk fysik også på anden vis synlig i EPS, idet Preben Alstrøm er formand for sektionen for Statistisk og Ikke-lineær fysik og Stig Steenstrup er formand for komiteen for studentermobilitet (European Mobility Scheme for Physics Students).

Dansk Fysisk Selskabs bestyrelse er nationalkomite for IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics – www.IUPAP.org). IUPAPs arbejde foregår i 20 kommissioner, hvor der er danske repræsentanter i bestyrelsen i to: Jakob Bohr (Kommissionen for Struktur og Dynamik af Faste Stoffer) og Kurt N. Clausen (Kommissionen for Magnetisme). Næste valg til kommissionerne foregår i forbindelse med generalforsamlingen i Berlin, 7.–12. oktober 2002. En meget aktiv arbejdsgruppe under IUPAP er "Working group on women in physics". I 2001 er der arbejdet med organisering af en konference, afholdt i Paris 7.–9. marts 2002 under overskriften "IUPAP International Conference on Women in Physics". Konferencen havde mere end 300 deltagere (15% mænd) fra 65 lande, heriblandt en delegation på 6 deltagere fra Danmark med deltagelse af bl.a. KIF. DFS søgte i 2001 om penge til at støtte dansk deltagelse i konferencen og fik en bevilling gennem ICSU's SNF ansøgning (koordineret af Videnskabernes Selskab). Som opstart til mødet var der bl.a. blevet lavet en større statistisk analyse med input fra de deltagende lande. De indsamlede data viser bl.a. at den største andel af kvindelige Ph.D.-studerende i fysik findes i Indien, Australien, Polen og Frankrig (20-27%), mens de laveste tal findes i Japan, Syd Korea, Holland og Tyskland (8-9%). Andelen af kvinder falder alle steder for hvert trin op ad karrierestigen, særlig markant i f.eks. Danmark. På konferencen blev følgende emner diskuteret i diskussionsgrupper: Attracting Girls into Physics; Launching a Successful Physics Career; Getting Women into the Physics Leadership Structure Nationally and Internationally; Improving the Institutional Climate for Women in Physics; Learning from Regional Differences og Balancing Family and Career. Derud-

over var der plenar foredrag af en række internationale kapaciteter og en række resolutioner og anbefalinger blev vedtaget. De danske deltagere betegner konferencen som en stor succes. Yderligere information kan findes: www.if.ufrgs.br/ barbosa/conference.html.

Jeg minder i lighed med sidste år om, at der arbejdes i EPS på at gøre 2005 (100 året for Einsteins tre banebrydende arbejder) til et internationalt "fysikkens år".

Som det fremgår af ovenstående har Dansk Fysisk Selskab i det forløbne år haft yderligere medlemsfremgang og det nuværende medlemstal er blandt de højeste i selskabets 30 årige historie. Der er arbejdet med en optimering af selskabets interne forretningsgange. Dertil kommer et pænt internationalt aktivitetsniveau. Sektionen for uddannelse og undervisning samt KIF har haft aktiviteter udover deltagelse i årsmødet, mens faststoffysiksektionen og atomfysiksektionens aktivitet har drejet sig om afvikling af årsmødet. Årsmødet er selskabets hovedaktivitet og kan betegnes som en etableret succes, hvor det som tidligere nævnt er en særlig glæde at se de mange yngre mødedeltagere – seniore medlemmer skal dog hermed opfordres til at huske på at prioritere deltagelse i årsmødet med jævne mellemrum. Økonomien i selskabet er god og giver basis for iværksættelse af aktiviteter, der fremmer selskabets formål – som alle andre aktiviteter i selskabet fordres dog et væsentligt indslag af frivillig arbejdskraft. Bestyrelsen lytter meget gerne til gode forslag fra medlemmerne.

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Hjemmeside: www.snu.nbi.dk

Direktionen for SNU udgøres af:

Professor Dorte Olesen (formand)
UNI-C
Vermundsgade 5
2100 København Ø
E-mail: bente.egaa@uni-c.dk
Tlf. 35 87 88 04

Professor Søren Brunak

Direktør, Ph.D. Søren Damgaard

Professor Poul Erik Hansen

Lektor Erik Schou Jensen

Direktør, adjungeret professor Ole Mørk Lauridsen

Lektor Malte Olsen

Lektor Jørn Johs. Christiansen (sekretær)
Aakjærs Alle 24 B
2860 Søborg
Tlf. 39 69 58 18

Efterårets program i SNU

Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd har i foråret udgivet sin nye strategiplan, der indeholder 6 tværgående indsatsområder, som i efterårets program i SNU vil blive belyst gennem foredrag af nøglepersoner indenfor hvert af områderne.

Alle foredrag starter kl. 19.30 og holdes på Geologisk Museum, Øster Voldgade 5–7, København, efter denne kalender:

30. september 2002
Biokompleksitet
v/Professor Mogens Høgh Jensen, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik.

14. oktober 2002
IT uden grænser
v/Lektor Brian Vinter, Institut for Matematik og Datalogi, Syddansk Universitetscenter.

28. oktober 2002
Livets molekylære grundlag
v/Lektor Peter Mose Larsen, Center for Proteom Analyse, Syddansk Universitetscenter.

11. november 2002
Universets skabelse, solsystemets dannelse og jordens udvikling - den subatomare del af emnet.
v/Lektor Jens Lyng Petersen, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik.

25. november 2002
Universets skabelse, solsystemets dannelse og jordens udvikling - geodelen af emnet.
v/Lektor Klaus Mosegaard, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik.

9. december 2002
Molekylære reaktioner og katalyse
v/Professor Bjerne Clausen, Haldor Topsøe.

Nyt fra Astronomisk Selskab

Astronomisk Selskab

Hjemmeside: AS.dsri.dk

Michael Quaade (formand)
Hviddingvej 48
2610 Rødovre

E-mail: mq@dsri.dk
Tlf. 36 72 36 34 (priv.) / 43 58 69 47 (arb.)

Hans Sørensen (kasserer)
Stavnsholtvej 32
3520 Farum

E-mail: hans-soh@post1.tele.dk
Tlf. 44 95 11 79

Universet set fra Nordsjælland

Dansk Naturvidenskabsfestival er et landsdækkende arrangement, der finder sted i perioden fra fredag 27. september til søndag 6. oktober. Her præsenteres et bredt udvalg af naturvidenskabelige emner. I samarbejde mellem Astronomisk Selskab, Helsinge Kulturhus og Tisvilde Bio afholdes i Helsinge og Tisvilde et arrangement med titlen: *Universet set fra Nordsjælland*. Programmet omfatter observationer med teleskoper – af Solen om dagen og af nattehimlen om aftenen – samt foredrag.

Observationerne foretages gennem to meget spændende teleskoper. I Wieth–Knudsen Observatoriet i Tisvilde har vi et helt nyt 40cm Meade LX200 GPS teleskop, som nok er det mest avancerede til alment brug i Danmark. Det har bl.a. en GPS modtager, som giver den indbyggede computerstyring nøjagtige oplysninger om både tidspunktet og teleskopets geografiske position. Teleskopet styres fra en lommeregnerlignende betjeningsenhed og de indbyggede databaser indeholder oplysninger om over 140.000 objekters positioner på himlen.

I Helsinge observerer vi Solen gennem et dobbelt solteleskop. Det består af to 60mm Unitron linsekikkerter på en fælles opstilling. Kikkerterne er forsynet med to forskellige solfiltre. Det ene filter er et almindeligt fuld-spektrum filter, der viser Solen i hvidt lys. Dette filter viser Solen stort set sådan som man ser den med det blotte øje, blot er lyset dæmpet passende så vi kan se det uden at blive blændet.

Det andet filter er et smalbånds H_α filter, der kun lader lyset i et 0,07 nm interval omkring 656 nm passere. Ved denne bølgelængde findes brints kraftige H_α spektrallinie, så fotosfærens lys er dæmpet, mens kromosfæren, hvis lys hovedsagelig udsendes i H_α linien, træder tydeligere frem. Filtret gør det muligt at se fænomener som protuberanser og strukturer i kromosfæren, som ikke kan ses gennem et sædvanligt solfilter.

Programmet for festivalperioden ser således ud:

Mandag 30. september kl. 19.15-21.00
Foredrag i Kulturhuset, Skolegade 43, Helsinge
John Leif Jørgensen: *Fremtidens øjne er rettede mod stjernerne*. USA og Europa kæmper om at sammenkoble kæmpeteleskoper, så de tilsammen virker som et gigantisk teleskop. Med interferometri kan man se detaljer i det fjerne univers, som før levede i skjul – måske liv i Rummet.

Torsdag 3. oktober kl. 19:15-21.00
Foredrag i Kulturhuset, Skolegade 43, Helsinge
Martin Götz: *Universets mørke side*. De lysende stjerner og galakser er kun "toppen af isbjerget" – størstedelen af Universet er mørkt og ukendt. I foredraget kigger vi på, hvordan astronomer opdagede Universets mørke stof, og hvad det kunne bestå af.

Søndag 6. oktober kl. 15:00-17.00
Foredrag i Tisvilde Bio, Hovedgaden 38, 3220 Tisvildleje
Michael Quaade: *Stjernehimlen er porten til Universet*. Mylderet af stjerner, vi ser på himlen om natten, er i sig selv et imponerende syn. De danner indgangen til en fascinerende verden af stjernehobe, tåger og galakser, som kan observeres med moderne teleskoper.

Lørdag 28. september og fredag 4. oktober kl. 11.00-14.00
Fremvisning af Solen i Østergade, 3400 Helsinge med dobbelt solteleskop, der viser Solen i forskellige bølgelængdeområder (kun i tilfælde af godt vejr).

Lørdag 5. oktober kl. 11.00 - 14.00
Fremvisning af Solen i Østergade, 3400 Helsinge med et enkelt teleskop (kun i tilfælde af godt vejr). I denne weekend er det dobbelte teleskop i brug ved et arrangement på Stevns.

Hele festivalperioden i Kulturhuset/bibliotekets åbningstid
Astronomiens Ansigter. Plancheudstilling med billeder og tekst om stjerner, planeter og andre astronomiske emner i Kulturhuset, Skolegade 43, 3400 Helsinge

Hele festivalperioden kl. 21.00-23.00
Observation af stjernehimlen med 40cm teleskop i Wieth-Knudsen Observatoriet, Margot Nyholms Vej 19, 3220 Tisvildeleje (kun på aftener med godt vejr).

Alle interesserede er velkomne ved arrangementerne. De tre foredrag koster hver 20 kr. og de øvrige arrangementer er gratis.

Foredragsrække i København og Århus i efteråret 2002 om store asteroider og meteoritter

Vi minder endvidere om efterårets foredragsrække, hvor der stadig er mulighed for at deltage i fire foredrag:

Jørgen Albertsen, Greve Gymnasium:
Strukturen i jernmeteoritter
30. september i København
7. oktober i Aarhus

Kristoffer Leer, Niels Bohr Institutet:
Marsmeteoritter
21. oktober i København
28. oktober i Aarhus

Anja C. Andersen, Nordita:
Stjernestøv i meteoritter
11. november i København
18. november i Aarhus

Leif Kahl Kristensen, Aarhus Universitet:
Asteroider
2. december i København
9. december i Aarhus

Alle foredragene holdes kl. 19.15, i København i Rockefeller Komplekset, Juliane Maries Vej 30, og i Århus på Matematisk Institut, Aarhus Universitet.

Nyt fra Dansk Geofysisk Forening

Dansk Geofysisk Forening

Hjemmeside: www.gfy.ku.dk/~dgf

Geofysisk Afdeling
Juliane Maries Vej 30
2100 København Ø
E-mail: dgf@gfy.ku.dk

Kristian Keller (formand) (krk@kms.dk)

Henning Haack (hh@savik.geomus.ku.dk)

Karen Guldbæk Schmidt (kgs@gfy.ku.dk)

Lennart Sorth (Lennart.Sorth@uni-c.dk)

Anders Svensson (kasserer) (as@gfy.ku.dk)

Dansk Geofysisk Forenings Rejselegat

Næste ansøgningsfrist 1. oktober 2002. Se foreningens hjemmeside www.dgf.gfy.ku.dk for yderligere deltaljer.

Vor Magnetiske Klode

Efterårets første arrangement byder på to foredrag á ca. 45 minutter med en ca. 30 minutters pause imellem.

Det første foredrag har titlen: *Vender Nordpolen? Om magnetisk "polvandring" og polvending,* og holdes af Niels Abrahamsen, lektor ved Geologisk Institut, Aarhus Universitet.

Mediernes interesse for om jordens magnetiske poler måske flytter sig ekstra hurtigt i nutiden, eller om de ligefrem er ved at vende om, kan sættes i relief ved at se tilbage på den geologiske fortid. Feltet har varieret drastisk både i retning, styrke og polaritet, hvilket er geologisk, geofysisk og geomagnetisk - og måske også biologisk - interessant. Fortidens mange polaritetsskift er blevet et stærkt redskab ved de palæogeografiske rekonstruktioner af kontinenterne, samt til geologisk datering af oceanbunden (60% af jordens overflade). Under et polaritetsskift er feltstyrken desuden lav (kun 10–20% af det normale), hvilket måske har biologisk betydning ved at feltets "skjold" mod kosmisk stråling svækkes. Feltstyrken indvirker også på raten af C14–dannelsen i atmosfæren og skaber systematiske "fejl" i C14–dateringer, hvis disse ikke korrigeres.

Det andet foredrag har titlen: *Rumvejr og Nordlys*, og holdes af Tina Christensen, Ph.D.-studerende ved DMI.

I samspillet mellem solvinden og jordens magnetfelt dannes den magnetiske boble der beskytter os mod de ladede solvindspartikler. Denne boble kaldes magnetosfæren, og dens vekselvirkning med solvinden giver anledning til voldsomme og imponerende fænomener: rumvejr og nordlys. Begrebet rumvejr beskriver de meget variable forhold der hersker i magnetosfæren og i de øverste atmosfærelag. Det er vigtigt at kende strålingsforhold og styrken af de elektromagnetiske felter fordi de kan påvirke og ligefrem ødelægge satellitter, de kan forårsage forhøjede strålingsdoser på visse flyruter, de kan give give problemer med radiokommunikation og i grelle tilfælde kan de endog true vores langstrakte forsyningslinier som højspændingsnet og rørledninger. Derudover giver rumvejrsforstyrrelser (rumstorme) anledning til nordlys, nogen gange helt ned til danske breddegrader.

Arrangementet finder sted:

Tirsdag den 1. oktober 2002 kl. 16.30 i Auditoriet, Geofysisk Afdeling, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø.

Vin og Geologi

Erik Schou Jensen, lektor ved Geologisk Museum, Københavns Universitet, holder et foredrag om vin og geologi **torsdag den 5. december 2002 kl. 19.00**, ligeledes i Auditoriet, Geofysisk Afdeling, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø.

Traditionen tro er der arrangeret noget særligt i forbindelse med vores julearrangement – efter foredraget er der derfor vinsmagning. Beskrivelse af foredraget samt information om pris og tilmelding for deltagelse i vinsmagningen følger i næste nummer af Kvant.

GEOFYSIKDAG

Fredag den 1. November 2002

Arrangeret af Dansk Geofysisk Forening i samarbejde med Geofysisk Afdeling, KU og Geofysisk Studenterforening, KU for alle studerende med interesse i geofysik. Deltagelse er gratis.

Der vil være studenterpræsentationer (mundtlige præsentationer samt postersession), virksomhedsmesse samt et festforedrag med Jens Martin Knudsen. Man er meget velkommen til at deltage, selvom man ikke selv skal præsentere et projekt (tilmelding, se nedenfor).

Hvorfor er det noget for mig?

- Fortæl andre om dit projekt.
- Lær studerende med samme interesser som dig at kende.
- Hør om spændende muligheder for at arbejde med geofysik.
- Få inspiration til en kommende opgave.
- Øv dig i at formidle dit projekt.

Tid og sted

Arrangementet finder sted fredag den 1. november 2002 og foregår dels i auditoriet, dels i andre lokaler på Geofysisk Afdeling, KU, Rockefellerbygningen, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø.

Præsentationer

Der vil blive givet to slags præsentationer af de deltagende studerende:
Mundtlige præsentationer (10 minutter med mulighed for overhead og videoprojektor m. PC/Mac).
Poster præsentationer (Op til A0 format ved poster session).

For at præsentere sit projekt skal man indsende et abstract, samt indikere om man foretrækker at give en mundtlig fremstilling eller præsentere en poster. Da der er begrænset tid til mundtlige fremstillinger, vil de indsendte abstracts blive gennemlæst og programmet sammensat herefter.

Foreløbigt program

Formiddag:	Mundtlige præsentationer.
	Frokost
Eftermiddag:	Mundtlige præsentationer, poster præsentationer, virksomhedsmesse.
	Middag
Aften:	Foredrag med Jens Martin Knudsen. Titel: Magnetfeltet på Mars

Det endelige program vil blive opslået på hjemmesiden **www.dgf.gfy.ku.dk** i begyndelsen af oktober. Programmet vil også kunne downloades inklusive abstracts i pdf-format.

Spørgsmål

Har du kommentarer, forslag eller spørgsmål angående Geofysikdagen kan du kontakte os pr. mail via geodag@gfy.ku.dk.
Vil du gerne vide mere om Dansk Geofysisk Forenings arrangementer eller meldes ind (gratis for studerende det første år) se **www.dgf.gfy.ku.dk** eller kontakt os på dgf@gfy.ku.dk.

Indsendelse af abstract

Frist for indsendelse af abstracts:
Fredag den 20. September 2002.

Indsendelse af abstracts sker til adressen geodag@gfy.ku.dk med subject: "Abstract" + efternavn.

Mailen SKAL indeholde (i nævnte rækkefølge):

- Navn (er man flere forfattere skal alle navne på, og den der evt. skal give en mundtlig præsentation markeres med *).
- Postadresse.
- Hvilken del af studiet man læser på (f.eks ph.d. studerende eller specialestuderende).
- Hvilken type projekt man vil præsentere: 1) ph.d.-projekt (igangværende), 2) speciale (i afslutningsfasen eller afsluttet) eller 3) bachelor-projekt (afsluttet).
- Hvilket universitet samt eventuel sektorforskningsinstitution man er tilknyttet.
- Mailadresse.
- Om man foretrækker mundtlig eller poster præsentation. (Vi forsøger at opfylde dit ønske, men det kan ikke garanteres, da der er begrænset tid til rådighed til mundtlige præsentationer).
- Titel på præsentationen.
- Selve abstractet. Abstractet må *max. fylde 200 ord* og skal indsættes som ren tekst. Indeholder abstractet specialtegn eller formler skrives disse med LaTeX-kode.
- Eventuel adresse på egen hjemmeside (behøver ikke udfyldes).

Tilmelding for tilhørere

Alle studerende med interesse for geofysik samt videnskabeligt personale kan melde sig som tilhørere til Geofysikdagens program.

Frist for tilmelding som tilhører:
Fredag den 18. oktober 2002.

Send en mail til adressen geodag@gfy.ku.dk med subject: "Tilhører" + efternavn.

Mailen skal indeholde:

- Navn.
- Postadresse.
- Hvilken del af studiet man læser på (f.eks. ph.d. studerende eller specialestuderende - eller VIP titel).
- Hvilket universitet samt eventuel sektorforskningsinstitution man er tilknyttet.
- Mailadresse.

Hvad skal vi med fremtiden?

Hvorfor bekymre sig om fremtiden, når den kommer alligevel? Ganske enkelt, fordi vi selv er med til at bestemme, hvordan det skal gå. Stor, landsdækkende festival sætter fokus på fremtiden i år 2022.

"Det er svært at spå – særligt om fremtiden". Sådan lød det fra den gode Storm P., og nogenlunde sådan lyder det til efteråret fra den 27. september til den 6. oktober, når Dansk Naturvidenskabsfestival 2002 springer i luften for tredje gang landet over. I år er temaet fremtiden – "2022.dk, fremtid, forskning, fantasi".

Hvordan vil fremtiden forme sig inden for forskning, teknik og naturvidenskab – og hvordan ønsker vi, den skal forme sig? Er genmanipuleret mad godt eller skidt, bliver jorden overbefolket, bor der mennesker på Mars, har den bioteknologiske udvikling givet bedre sygdomsbehandlinger? Det er nogle af de spørgsmål, som festivalen sætter fokus på. Landet over vil det være muligt at besøge virksomheder og universiteter, høre foredrag, deltage i naturvandringer mm. Mange af arrangementerne er med til at give et bud på, hvordan fremtiden kan udvikle sig.

Figur 1. Børn, der udforsker en rumkapsel.

Børn og unge er vores fremtid

Nutidens børn er fremtidens ressource. Festivalen har derfor designet en række tilbud til børn og unge som inviterer de unge til at kigge tyve år frem i tiden og overveje, hvordan de ønsker vores fremtid skal se ud i år 2022.

Mange skoler forbereder netop nu temauger og emneforløb der sætter fokus på fremtidens naturvidenskab og teknik. Flere skoler får besøg af en foredragsholder, der giver de unge input til deres overvejelser om fremtidens samfund og naturvidenskab.

Science fiction, fremtidsbus eller astronomiforedrag

Festivalen tilbyder en lang række gratis arrangementer som tager dig med ind i naturvidenskabens og teknologiens spændende verden. Over hele landet inviterer biblioteker, foreninger, virksomheder og andre til åbne foredrag om teknologi, naturvidenskab og samfund. Foredragene bliver holdt af et korps af 250 dygtige naturvidenskabsfolk som er trænede i at holde foredrag for et bredt publikum.

Figur 2. Et kig ind i uendeligheden.

Danmarks største udstillingsbus bliver indrettet som "Fremtidsbus 2022" og præsenterer et bud på vores samfund i år 2022. Bussen turnerer rundt i hele landet. Festivalen inviterer også til en science fiction konkurrence, hvor børn mellem 10 og 16 år kan skrive videre på en science fiction historie på Internettet. Se det samlede program for Dansk Naturvidenskabsfestival 2002 på www.dnf2002.dk

Figur 3. Konstruktion med spaghetti.

For yderligere information kontakt sekretariatet for Dansk Naturvidenskabsfestival 2002 på telefon 70 20 86 20.

Dekommissionering af Risøs nukleare anlæg – Miljømæssige aspekter

Per Hedemann Jensen, Forskningscenter Risø

Artiklen er fortsat fra Bagsiden!

Hot Cell anlægget blev anvendt til undersøgelser af bestrålet reaktorbrændsel og til håndtering af stærke radioaktive kilder til medicinske bestrålingsanlæg. Arbejdet blev udført fjernbetjent bag tykke betonmure med blyglas-vinduer. Anlægget blev lukket i 1993.

Behandlingsstationen med tilhørende lagre for radioaktivt affald skal fortsat være i drift for at kunne behandle det radioaktive affald fra både nedbrydningen af de øvrige anlæg og fra institutioner uden for Risø (hospitaler, industrien mv.). Derfor er Behandlingsstationen det sidste anlæg, der skal dekommissioneres, efter en ny er opført et sted i Danmark.

Anlæggenes indhold af radioaktive stoffer

Indholdet af radioaktive stoffer i konstruktionsdelene i de tre reaktorer skyldes neutronaktivering, og reaktor DR 3 indeholder den største mængde. Hovedparten af de radioaktive stoffer sidder her i topafskærmning (21 tons), indre afskærmning (23 tons), betonafskærmning (820 tons), reaktortank (1 ton), grafitblokke (26 tons), og ståltank med blyafskærmning (63 tons). De radioaktive stoffer i betoncellerne i Hot Cell anlægget hidrører fra eksperimenter med bestrålet reaktorbrændsel. Aktiviteten er her tilstede som små partikler på overflader af gulve, borde og vægge.

Aktivitetsindholdet[1] i Risøs nukleare anlæg i år 2000 er vist i tabel 1 [3].

Tabel 1. Indhold af radioaktive stoffer i de nukleare anlæg på Risø i år 2000.

Anlæg	β-/γ-aktivitet [Bq]	α-aktivitet [Bq]
DR 1 (incl. brændsel)	$1 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{9}$
DR 2	$6 \cdot 10^{10}$	-
DR 3 (^{3}H i tungt vand)	$3 \cdot 10^{15}$	-
DR 3 (excl. brændsel)	$2 \cdot 10^{14}$	-
Hot Cell	$3 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{11}$
Behandlingsstation	$9 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{10}$
Lagerhal	$5 \cdot 10^{12}$	-
Centralvejslager	$7 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$

Aktivitetsindholdet i konstruktionsdelene i reaktorerne DR 1 og DR 2 er relativt beskedent. De dominerende radionuklider i DR 3 er ^{60}Co, ^{133}Ba, ^{152}Eu, ^{154}Eu og ^{3}H (tritium). De dominerende radionuklider i Hot Cell anlægget er ^{90}Sr og ^{137}Cs og aktinider (^{239}Pu, ^{241}Am etc.). De dominerende radionuklider i Behandlingsstationens affaldslagre er ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{60}Co og aktinider.

Den største aktivitetsmængde findes, som det fremgår af tabel 1, som tritium i DR 3's tunge vand, der er oplagret i 200 liter tromler. Det tunge vand har været brugt i det primære kølekredsløb på DR 3 under reaktorens drift.

Som følge af radioaktivt henfald vil aktiviteten formindskes med tiden. Aktivitetsindholdet i DR 3 og Hot Cell anlægget er vist på figur 3 og 4 som funktion af tiden. Det fremgår af figur 3, at hovedparten af aktiviteten i reaktor DR 3 befinder sig i topafskærmningen og i betonafskærmningen. Figur 4 viser, at aktiviteten i Hot Cell anlægget aftager relativt langsomt med tiden, da de dominerende radioaktive stoffer har meget lange halveringstider [3].

Strålingsdoser

Alle mennesker udsættes for den "naturlige baggrundsstråling", der består af stråling fra verdensrummet samt fra radioaktive stoffer i undergrunden, i atmosfæren og i mennesket.

Fra rummet rammes Jorden af kosmisk stråling. I Jordens atmosfære vekselvirker de kosmiske partikler med atmosfærens molekyler, og ved vekselvirkningerne dannes sekundær stråling og radioaktive stoffer, der kan nå ned til jordoverfladen og optages i mennesker og fødemidler.

Radioaktive stoffer har også været på Jorden siden dens dannelse, og de findes i undergrunden, i vand, i luft, i byggematerialer, i fødemidler og i mennesker. Det er radioaktive stoffer med en meget lang halveringstid (op til flere milliarder år) samt deres radioaktive henfaldsprodukter. Den strålingsmæssigt mest betydningsfulde af de naturligt forekommende radioaktive stoffer er radon, der er en luftart, som kan trænge ind i huse fra undergrunden og fra byggematerialer.

[1] Enheden for aktivitet er Bq (1 Bq = 1 radioaktivt henfald pr. sekund). Hver dansker indeholder ca. 10^{4} Bq, hovedsageligt som ^{3}H, ^{14}C og ^{40}K. Det årlige nedfald af radioaktive isotoper i Danmark dannet af den kosmiske stråling er omkring $2 \cdot 10^{14}$ Bq, primært i form af ^{3}H, ^{7}Be og ^{14}C.

Figur 2. Reaktor DR 2.

Tabel 2. Strålingsdoser fra røntgenundersøgelser af forskellige organer.

Undersøgelse	Dosis (mSv)
Arme/ben	0.01
Lunger	0.1
Ryg	1
Mave-tarmkanal	10
Hoved (CT-scanning)	1
Krop (CT-scanning	10

Den årlige strålingsdosis til den danske befolkning fra baggrundsstrålingen varierer mellem ca. 2 og 20 mSv (millisievert)[2], afhængig af bopæl. Den gennemsnitlige årlige strålingsdosis udgør omkring 3 mSv, sammensat af 2 mSv fra radon i huse, 0.4 mSv fra fødemidler, 0.3 mSv fra jord og byggematerialer og 0.3 mSv fra den kosmiske stråling.

Fra medicinsk bestråling modtager hver dansker i gennemsnit ca. 1 mSv pr. år. Tabel 2 viser typiske doser fra forskellige røntgenundersøgelser.

Miljømæssige påvirkninger

Arbejdsmiljømæssige påvirkninger

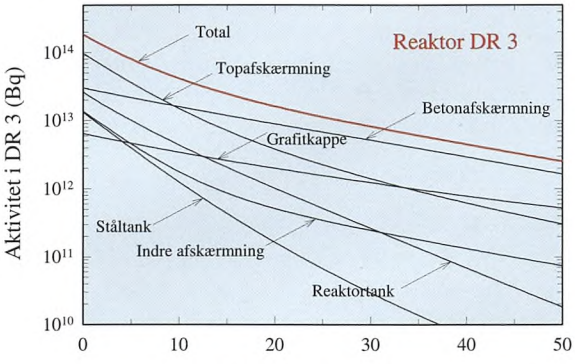
Under de forskellige arbejdsoperationer kræves en løbende overvågning og kontrol af den helsefysiske arbejdshygiejne for at holde strålingsudsættelsen af personalet på et passende lavt niveau – normalt ikke mere end 10–20% af de af myndighederne fastsatte dosisgrænser[3].

I de situationer, hvor der kan optræde høje strålings- og kontaminationsniveauer, vil der blive brugt specialudstyr for at nedsætte eksponeringen af personalet. Eksempelvis kan de stærkt radioaktive indre konstruktionsdele i reaktor DR 3 ikke uden afskærmning skæres i mindre stykker på grund af en meget høj

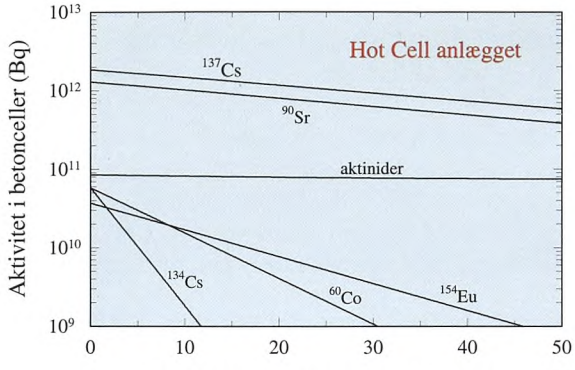
[2]Den absorberede strålingsdosis, D, der måles i enheden gray (Gy), defineres som middelværdien af den afsatte strålingsenergi, ε_a, pr. masseenhed i et punkt: $D = \mathrm{d}\bar{\varepsilon}_a/\mathrm{d}m$ (1 Gy = 1 joule/kg). Ækvivalent dosis, H, der måles i enheden sievert (Sv), defineres som: $H = w_R \cdot D$. Strålingsvægtfaktoren, w_R, beskriver de forskellige strålingsarters, R, effektivitet til at fremkalde senskader (f.eks $w_\gamma = 1$ og $w_\alpha = 20$). Ækvivalente doser fra forskellige strålingsarter er – til forskel fra absorberede doser – additive.

[3]Dosisgrænsen for helkropsbestråling er for erhvervsmæssigt strålingsudsatte 20 mSv pr. år.

strålingsintensitet fra de dannede radionuklider. Det er imidlertid nødvendigt, at disse store komponenter bliver skåret i mindre dele, så de kan placeres i affaldscontainere uden samtidig at give personalet for store strålingsdoser. Herved opnås også, at der ikke bliver for høje strålingsniveauer uden på de enkelte affaldscontainere.



Figur 3. Aktivitetsindhold i DR 3 fordelt på konstruktionsdele som funktion af tiden efter lukningen af reaktoren i 2000.

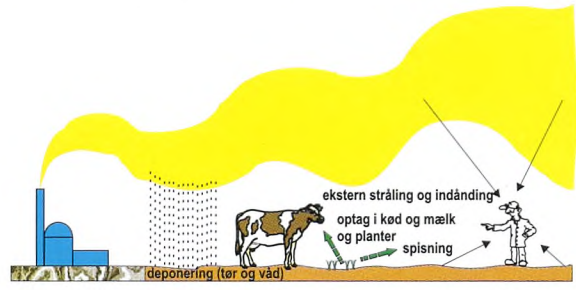


Figur 4. Aktivitetsindhold i Hot Cell anlægget fordelt på isotoper som funktion af tiden efter forseglingen af betoncellerne i 1993.

Fjernbetjent opskæring kan f.eks foretages i et skærebassin med en vanddybde på 4–5 meter. Vand yder nemlig en god afskærmning mod gammastråling og muliggør ved sin gennemsigtighed, at skærende operationer kan udføres under flere meter vand. I et sådant bassin kan stærkt radioaktive konstruktionsdele skæres i mange mindre stykker ved hjælp af specialfremstillet undervandsværktøj. Herefter kan de kan tages op af bassinet og placeres i affaldscontainere uden større helsefysiske problemer.

Omegnsmiljømæssige påvirkninger

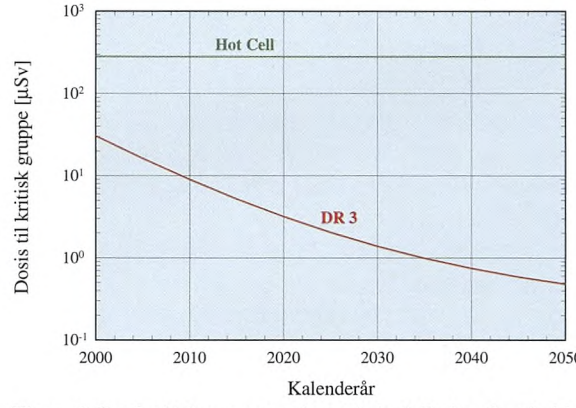
Udslip under drift.
Risøs nukleare anlæg har i løbet af deres driftsperiode på omkring 40 år kun haft en marginal påvirkning af omegnsmiljøet som følge af meget små udslip af radioaktive stoffer til omgivelserne. I forbindelse med nedbrydningen af de nukleare anlæg er der mulighed for, at mindre mængder af de radioaktive stoffer i anlæggenes konstruktionsdele kan undslippe til omegnsmiljøet. Herved kan den omkringboende befolkning blive udsat for små strålingsdoser [3].



Figur 5. Eksponeringsveje fra et atmosfærisk udslip af radioaktive stoffer. De dominerende eksponeringsveje er normalt indånding af forurenet luft og spisning af forurenede fødevarer.

Det vil være usandsynligt, at udslip under dekommissioneringen vil blive større end de konstaterede udslip i driftsperioden. De maksimale årlige doser til den nærmestboende befolkning fra driftsudslippene fra DR 2 og DR 3 samt fra Behandlingsstationen har været nogle få μSv og ikke større end 10 μSv. Mens Hot Cell og DR 1 var i drift, var der tale om negligible udslip af radioaktive stoffer fra disse anlæg.

Doser fra radioaktive stoffer, der frigøres til atmosfæren eller til Roskilde Fjord, kan beregnes på grundlag af atmosfæriske og akvatiske spredningsmodeller. I modellerne tages der hensyn til forskellige meteorologiske og hydrologiske forhold som f.eks. vindhastighed og atmosfæriske stabilitetsforhold. Eksponeringsvejene ved atmosfæriske udslip er vist på figur 5.



Figur 6. Dosis til den nærmestboende befolkning fra uheldsudslip i et givet kalenderår af radioaktive stoffer fra topafskærmningen på DR 3 og fra en betoncelle på Hot Cell anlægget.

For de hyppigst forekommende vejrforhold i Danmark (under hensyn til både skiftende vindretning, vindhastighed og atmosfærisk stabilitet) er der foretaget beregninger af doserne til den nærmestboende befolkning fra pessimistiske skøn af udslip af radioaktive stoffer til omgivelserne under dekommissioneringen. De

maksimale doser er beregnet til at blive mindre end 1 μSv pr. år.

Udslip under uheld.
I løbet af de sidste 40 års drift af de nukleare anlæg er der kun forekommet få unormale hændelser med små udslip af radioaktive stoffer til omgivelserne. Doserne fra disse udslip var mindre end 1 μSv til de mest udsatte personer i den omkringboende befolkning (kritisk gruppe) [3].

Under dekommissioneringen kan der forekomme uheld, som det er vanskeligt at forudse. For at vurdere risikoen for den omkringboende befolkning er der postuleret nogle meget pessimistisk vurderede uheld:

- Ved en operation på DR 3 med åben reaktorhal, hvor topafskærmningen løftes med en ekstern kran uden for reaktorhallen, tabes topafskærmningen ned på reaktorblokken og knuses delvist. De radioaktive stoffer sidder fordelt i en relativt lille del i bunden af topafskærmningen, og det antages, at 1% af aktivitetsindholdet frigøres som små partikler til atmosfæren fra den åbne reaktorhal.

- Under rengøringen af de indvendige overflader i en betoncelle på Hot Cell anlægget ved hjælp af 'shot blasting' teknik, ødelægges ventilationsfilteret af små metalstykker. I løbet af en arbejdsdag frigøres der nogle få procent af cellens overfladeforurening til omgivelserne, inden fejlen opdages. (Shot blasting er en teknik, hvor et stort antal små metalkugler under højt tryk bliver 'skudt' mod overfladen. Herved bliver de yderste millimeter af overfladen samt overfladeforureningen løsgjort.)

Selv om de postulerede uheld er usikre, men pessimistiske skøn, giver den anvendte metode mulighed for at skønne over de maksimale doser, der kan forekomme, svarende til at hele aktivitetsindholdet i topafskærmningen og i betoncellen blev frigjort under uheldet.

Strålingsdoserne til den kritiske gruppe fra disse uheld er beregnet for de hyppigst forekommende vejrforhold i Danmark, og resultaterne er vist på figur 6 for perioden indtil år 2050.

Det fremgår af figur 6, at hvis uheldet på DR 3 sker på nuværende tidspunkt, ville det kunne forårsage en dosis til de nærmestboende på omkring 30 μSv. Tilsvarende ville det beskrevne uheldsudslip fra Hot Cell kunne forårsage en dosis til de nærmestboende på omkring 300 μSv.

Det fremgår endvidere af figur 6, at uanset tidspunktet for uheldet på Hot Cell vil doserne ikke ændres, fordi de hovedsageligt stammer fra langlivede aktinider. Hvis det betragtede uheld på DR 3 derimod først sker i år 2020, ville dosis til de nærmestboende være reduceret til omkring 4 μSv på grund af radioaktivt henfald.

Der udføres et omfattende omegnskontrolprogram for Risø-området som et led i den generelle overvågning af den radioaktive forurening i Danmark. Denne kontrol er nødvendig for at kunne vurdere en eventuel radioaktiv forurening af omgivelserne fra dekommissioneringen af de nukleare anlæg. Prøver indsamles dels fra Risø-området dels fra omegnen. Erfaringen fra de seneste 40 års overvågning af omegnen viser, at måleprogrammet har afsløret alle "unormale" udslip. I forbindelse med dekommissioneringen af de nukleare anlæg vil det rutinemæssige omegnskontrolprogram blive justeret, specielt tæt på de nukleare anlæg.

Radioaktivt affald

Affaldet fra dekommissioneringen af de nukleare anlæg på Risø skal oplagres i større affaldsbeholdere end de tromler, der er godkendt til mellemlagring i Risøs lagerbygninger for radioaktivt affald. En kasseformet betonbeholder er for øjeblikket under udvikling. Hensigten er at kunne anvende disse standardbeholdere til mellemlagring af dekommissioneringsaffald, så nedtagning af de nukleare anlæg kan påbegyndes uden at skulle afvente, at et slutdepot er til rådighed. Der planlægges derfor med bygning af et nyt mellemlager til disse affaldsbeholdere. Hensigten er endvidere, at de nye affaldsbeholdere med indhold af affald på et senere tidspunkt – og forudsat myndighedernes godkendelse – direkte skal kunne overføres til et slutdepot. Beholderne skal også kunne bruges som ydre emballage omkring tromler og andre beholdere med allerede eksisterende affald. Det mest sandsynlige deponeringsbehov i et slutdepot er af størrelsesordenen 5000 m^3 affald [4].

Tidlig eller udskudt dekommissionering

Set fra et miljømæssigt synspunkt er der ingen reelle alternativer til en tidlig dekommissionering af Risøs nukleare anlæg, hovedsagelig fordi:

- der kun er marginal forskel mellem strålingsudsættelsen af personalet ved en umiddelbar eller en udsat nedbrydning, da fjernbetjent nedbrydning i et vist omfang er nødvendig i begge tilfælde

- der ingen nævneværdig forskel er mellem potentielle doser fra drifts- eller uheldsudslip ved en umiddelbar eller en udsat nedbrydning, da langlivede radioaktive stoffer dominerer dosisbilledet

- mængden af radioaktivt affald ikke ændres ved en udskudt dekommissionering over nogle årtier, da koncentrationen af radionuklider fortsat vil være for stor til at karakterisere affaldet som ikke-radioaktivt affald

Dekommissionering af Risøs nukleare anlæg bør derfor gennemføres over de næste 15–20 år, hvor der endnu er ekspertise tilstede på Risø-området, både hvad angår

de nukleare anlægs opbygning og funktion og de helsefysiske forhold af relevans for nedrivningen. Herved undgås overvågning og vedligeholdelse i en lang ventetid.

Udskudt dekommissionering vil nemlig blive dyrere, jo længere man venter, fordi der i ventetiden fortsat skal anvendes ressourcer til overvågning af anlæggene, og fordi selve nedrivningen ikke vil blive væsentlig billigere ved en udskydelse eller give væsentlig mindre strålingsdoser til dekommissioneringspersonalet [2]. Udskudt nedrivning vil endvidere stride mod den almindelige opfattelse, at man ikke skal videregive sine problemer til de kommende generationer.

Myndighedsforhold

Nukleart Kontor i Beredskabsstyrelsen (NUC) og Statens Institut for Strålehygiejne i Indenrigs- og Sundhedsministeriet (SIS) har myndighedskompetencen vedrørende drift og nedlæggelse af nukleare anlæg. NUC og SIS er ansvarlige for udarbejdelsen af de regler og betingelser, under hvilken dekommissioneringen skal udføres, og for tilsyn med projektet.

Ifølge Miljø- og Energiministeriet skal dekommissioneringen af de nukleare anlæg på Risø ledsages af en redegørelse, der indeholder en særlig vurdering af dekommissioneringens virkning på miljøet (VVM-redegørelse). Denne redegørelse udarbejdes af Hovedstadens Udviklingsråd (HUR). Efter to offentlige høringer, kan HUR give en VVM-tilladelse, hvorefter dekommissioneringen kan igangsættes.

Danmark (SIS) skal ifølge Euratom-traktatens artikel 37 forsyne EU-kommissionen med en redegørelse, der indeholder vurderinger af strålingsdoserne til de nærmeste befolkningsgrupper i et naboland fra forventede udslip af radioaktive stoffer til omegnsmiljøet under dekommissioneringen. Efter en høring af en ekspertgruppe, afgiver Kommissionen en udtalelse inden for en frist på seks måneder.

Referencer:

[1] P. Hedemann Jensen (2001) "Alternativer til dekommissionering af Risøs nukleare anlæg." Risø Dekommissionering.

[2] K. Lauridsen (red.) (2001) "Decommissioning of the nuclear facilities at Risø National Laboratory. Descriptions and cost assessment." Risø-R-1250(EN).

[3] P. Hedemann Jensen (2002) "Miljømæssige forskelle mellem tidsmæssige scenarier for dekommissionering af de nukleare anlæg på Risø-området." Risø Dekommissionering.

[4] "Teoretisk udredning af de tekniske krav til et dansk slutdepot for radioaktive affald." Dansk Dekommissionering (2002).

Per Hedemann Jensen er helsefysiker på Forskningscenter Risø.

Kupon til bestilling af Kvant

Navn: _____

Stilling: _____

Adresse: _____

Postnr. og by: _____

Telefon: _____

E-mail: _____

Jeg er ☐ under uddannelse ☐ pensionist

Jeg ønsker

☐ abonnement på Kvant (135 kr. pr. år)
☐ medlemsskab af Astronomisk Selskab
☐ medlemsskab af Dansk Fysisk Selskab
☐ medlemsskab af Dansk Geofysisk Forening
☐ medlemsskab af Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Du modtager automatisk Kvant, hvis du er medlem af en af de fire foreninger.

POST

Sendes ufrankeret
Modtageren
betaler portoen

KVANT
Ørsted Laboratoriet
Universitetsparken 5
+++ 1385 +++
2100 København Ø

Dekommissionering af Risøs nukleare anlæg – Miljømæssige aspekter

Per Hedemann Jensen, Forskningscenter Risø

Risø har efter mere end 40 års forskning med anvendelse af nukleare anlæg besluttet at lukke anlæggene og overføre denne del af sin forskning til udenlandske anlæg. De nukleare anlæg på Risø skal derfor dekommissioneres, hvilket betyder, at alle bygninger og anlæg, som ikke kan renses for forurening med radioaktive stoffer, skal fjernes.

Det er et velkendt og accepteret princip, at den ansvarlige for driften af anlæg, der indeholder stoffer med en vis miljø- og sikkerhedsmæssig risiko, rydder op efter sig, når driften ophører. Dette gælder ikke mindst nukleare og kemiske anlæg [1].

I givet fald det fra politisk side besluttes at dekommissionere Risøs nukleare anlæg, er målet set fra et fagligt synspunkt at opnå "grøn mark" (green field) i løbet af en 15–20 år. Ved "grøn mark" forstås, at alle bygninger og områder skal renses, så de frit kan bruges til andre formål uden restriktioner [2]. Det frembragte radioaktive affald fra dekommissioneringen skal mellemlagres på Risø-området, indtil der er bygget et slutdepot for radioaktivt affald et sted i Danmark.

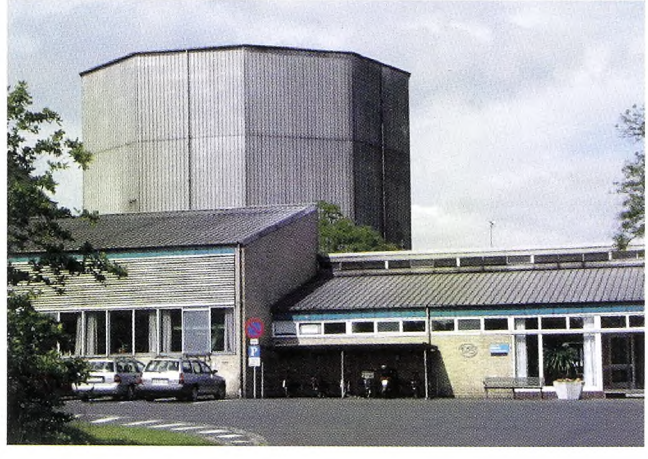
Risø vil fortsætte sin forskningsvirksomhed, herunder nuklear sikkerhedsforskning, men med brug af nukleare reaktorer i udlandet.

Risøs nukleare anlæg

Risø-området omfatter halvøen Risø med tilstødende land på østsiden af Roskilde Fjord. De nukleare anlæg er placeret på Risø-halvøen, og de omfatter:

- Dansk Reaktor 1 (DR 1)
- Dansk Reaktor 2 (DR 2)
- Dansk Reaktor 3 (DR 3)
- Hot Cell anlægget
- Behandlingsstationen for radioaktivt affald og tilhørende affaldslagre

Den lille reaktor DR 1 er en laveffekt reaktor (maksimum effekt 2 kW). Reaktorkernen består af en kugleformet ståltank, som indeholder en vandig opløsning af uranylsulfat med 20% beriget uran svarende til ca. 1 kg ^{235}U. Reaktoren har i de seneste mange år primært været anvendt til undervisning af studerende fra DTU og andre højere læreanstalter samt gymnasieklasser.



Figur 1. Reaktor DR 3.

DR 2 var en 5 MW letvandsreaktor af "pool-typen", dvs. åben opad til, således at man kunne se ned til reaktorkernen gennem nogle meter vand, som udgjorde dels kølemiddel, dels moderator og dels strålingsafskærmning. Reaktor DR 2 blev anvendt til fysikforskning og til fremstilling af radioaktive isotoper, inden reaktoren blev lukket i 1975.

DR 3 var en 10 MW tungtvandskølet reaktor. Reaktoren blev anvendt som neutronkilde til grundforskning, materialeforskning, herunder undersøgelser af brændselselementer, til produktion af radioaktive isotoper, blandt andet til medicinske og industrielle anvendelser, og til bestrålinger af bl.a silicium til brug i halvlederindustrien. DR 3 blev lukket i 2000.

Fortsættes inde i bladet side 43.