

SkyTEM

- grundvandskortlægning med helikopter

Af geofysikerne Max Halkjær, Kurt I Sørensen og Esben Auken, Geofysisk afdeling, Aarhus Universitet

På Geofysisk Afdeling, Aarhus Universitet, har man gennem mange år arbejdet med at udvikle geofysiske instrumenter, som bruges i forbindelse med kortlægning af grundvandsmagasinerne i Danmark. Den nyeste og mest avancerede metode er SkyTEM.

Siden starten af 1990'erne har man i Danmark været i gang med intensivt at kortlægge de danske grundvandsmagasiner. Denne opgave udføres i stort omfang ved hjælp af geofysiske metoder, og specielt med den Transiente ElektroMagnetiske metode (TEM) er der foretaget mange kortlægninger. Til dato er der lavet mere end 60.000 sonderinger. Der er typisk ca. 250 m mellem målingerne, og et effektivt arbejdsteam kan normalt lave 20-25 målinger om dagen (se GeologiskNyt 1/02).

Tidligere TEM-metoder

TEM metoden er følsom over for tilstedeværelsen af installationer som fx kabler og dyrehegn. Hvis måleudstyret kommer for tæt på sådanne installationer, bliver målesignalet forvrænget. I fagsprog kalder man dette for en kobling. Koblede sonderinger skal fjernes for den videre geofysiske og geologiske tolkning.

På Geofysisk Afdeling har man i de sidste 10 år arbejdet med at udvikle flere forskellige TEM-målemetoder; bl.a. PATEM og HiTEM (Højmoment-TEM). PATEM blev anvendt fra efteråret 1998 og kunne producere kontinuerte data. PATEM står for Pulled Array TEM, og virkede på den måde, at en senderspole på 3 x 5 m og en lille modtagerspole blev trukket gennem terrænet efter et lille bæltøkøretøj. Hvis der var snævre passager gennem fx læhegn, skulle senderspolen foldes sammen. Signalniveauet var sammenligneligt med den almindelige TEM-metodes, men fordelene ved PATEM var, at man indsamlede kontinuerte, tætliggende data langs måleprofilen, og disse data gav en meget detaljeret opløsning af jorden. Det var også forholdsvis let for tolkeren at se de data, der var dårlige på grund af fx koblinger.



Produktionsmåling ved Hadsten, august 2003. (Foto: Forfatterne)

PATEM-metoden anvendes ikke mere, men erfaringen med metoden og med de kontinuerte data er brugt i udviklingen af den nye helikopterbårne TEM-metode – SkyTEM.

SkyTEM

SkyTEM-måleudstyret består af en senderspole – p.t. et kvadrat på 12,5 x 12,5 m² – som er monteret på en letvægtsgitterramme. I det ene hjørne af senderspolen ligger modtagerspolen, mens senderinstrumentet er placeret i det modsatte hjørne. På gitterrammen findes to lasere, som måler senderspolens højde over terræn, og to vinkel-målere, som måler rammens hældning. I en kasse, som hænger mellem helikopteren og senderspolen, findes modtagerinstrumentet, 2 GPS-modtagere og to computere. De to computere opsamler, lagrer og transmitterer data til jordpersonalet.

Den danske helikopteroperatør anvender en meget støjsvag én-motors helikopter, som kan flyve produktionsmålinger i 60-75 minutter. Den samlede vægt er ca. 320 kg. Det er vigtigt, at måleudstyrets vægt holdes så lav som mulig, da prisen for leje af en helikopter hurtigt fordobles eller tredobles, hvis udstyrets vægt overstiger den nuværende helikopters kapacitet. Man skal derfor under udviklingsfasen hele tiden vurdere konstruktionen, som skal være stiv

og solid og samtidig veje mindst muligt.

For at opnå et højt målesignal fra jorden, skal senderspolen have et stort areal, og der skal sendes en kraftig strøm rundt i spolen. Med den nuværende kvadratiske ramme, som har et areal på ca. 150 m² og en strøm på op til 45 ampère i 4 vindinger, kan man kortlægge ned til ca. 150 m dybde.

Kortlægningsdybden er imidlertid afhængig af geologien og kan i gunstige tilfælde være større. Der arbejdes for tiden med at udvikle bl.a. en sekskantet ramme med et større areal og et nyt senderinstrument hertil.

Andet luftbårent måleudstyr

I udlandet har man arbejdet med transiente målinger fra fly siden 1960'erne. Disse metoder er alle udviklet til mineralefterforskning, og problemet med dem er, at usikkerheden på datapræcisionen er for stor i forhold til den nøjagtighed, det kræver at kunne kortlægge grundvandsmagasiner. Enkelte udenlandske udviklingsgrupper arbejder med transiente metoder fra helikopter, men deres måleudstyr er heller ikke udviklet med fokus på grundvandskortlægning.

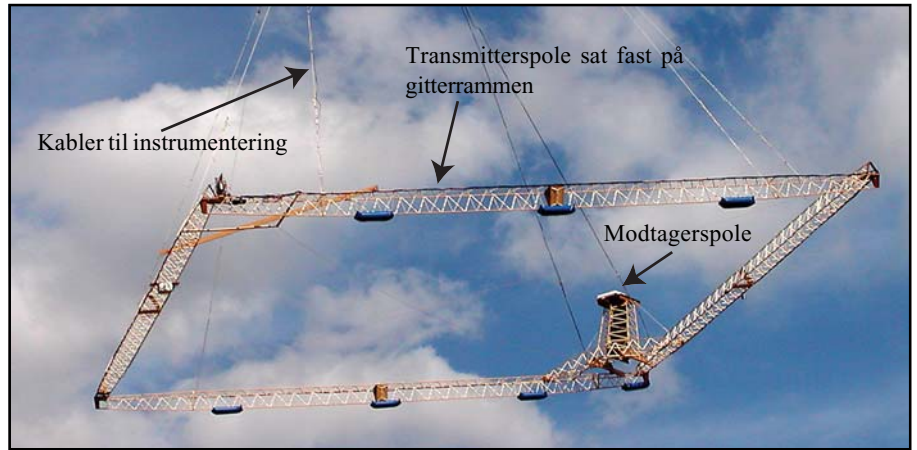
Med andre ord: Der findes ikke udenlandsk geofysisk luftbårent måleudstyr, som opfylder de krav, der stilles, når de danske grundvandsmagasiner skal kort-

lægges. Derfor har udvikling af SkyTEM-metoden været essentiel, hvis man ikke fortsat alene skal anvende den jordbaserede TEM-metode.

Målinger i felten

Så snart helikopteren løfter udstyret, som hænger i en krog, er målingerne sat i gang. Først flyves til en referencelokalitet. Data sendes via en radioforbindelse til jordpersonalet, som tjekker, at data stemmer nøjagtigt overens med de målinger, der i forvejen er foretaget på referencelokaliteten.

Dernæst fortsætter helikopteren ud i selve undersøgelsesområdet, hvor den flyver efter et net af forudbestemte linier. Flyvehastigheden ligger typisk på 15-25 km/t, og måleudstyret hænger i et niveau, som varierer mellem 10 og 25 m over jorden. Det er vigtigt for kvaliteten af målingerne i den videre geofysiske tolkning, at højden holdes så lavt som muligt. Under flyvningen kontrollerer jordpersonalet konstant, om måleudstyret fungerer korrekt. På jorden kører en følgebil, hvorfra man holder øje med, at eventuelle dyr på markerne ikke bliver urolige, når der flyves over dem. Personalet i følgebilen kan også forklare de ofte mange nysgerrige, hvad der foregår, og sidst men ikke mindst har de til opgave at hjælpe piloten med at navigere og i øvrigt være klar, hvis der skulle opstå alvorlige problemer med helikopteren eller udstyret.



Letvægtsgitterramme med måleudstyr. (Foto: Forfatterne)

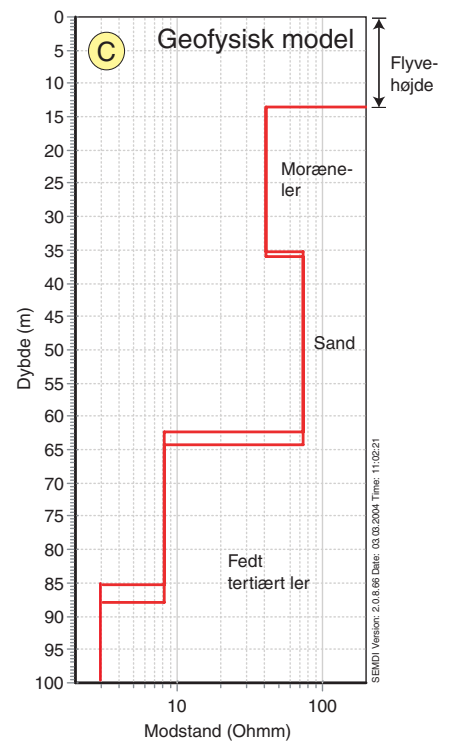
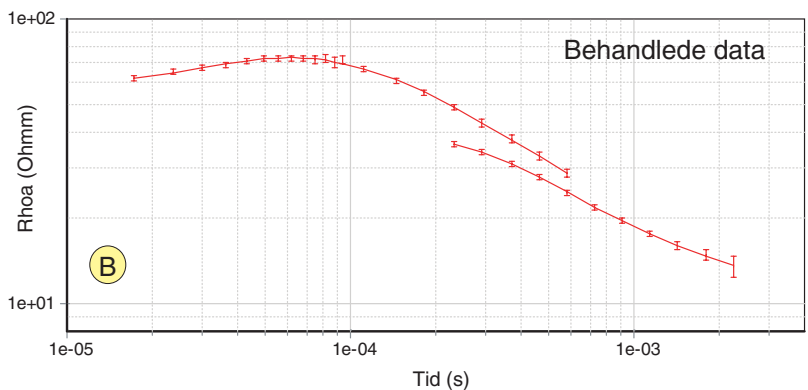
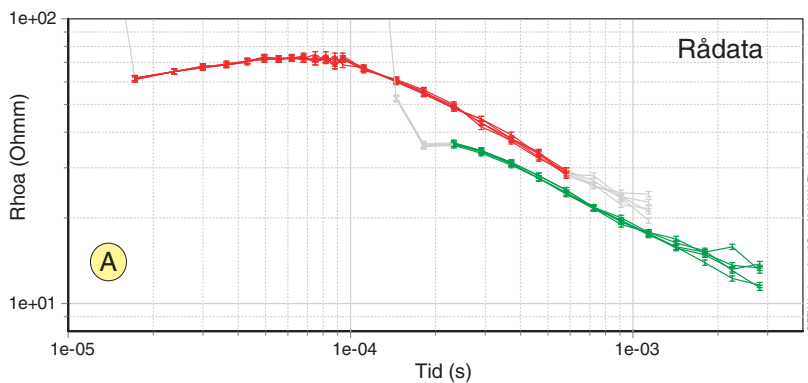
Efter lidt mere end en time, når helikopteren ikke har mere brændstof, returnerer den til referencelokaliteten, hvor der igen foretages målinger, som skal reproducere de tidligere referencemålinger. Umiddelbart efter lander helikopteren med måleudstyret på landingslokaliteten, hvor jordpersonalet står klar med brændstof til helikopteren og friske batterier til måleudstyret. Alle de indsamlede data kopieres fra måleudstyret, og man er klar til en ny produktionsflyvning.

Forløber flyvningerne uden problemer,

udgør en dagsproduktion ca. 75 km produktionsdata plus data fra referencelokaliteten. Dette svarer typisk til et kortlægningsområde på 15 km², hvor der gennemsnitligt er opmålt 5 liniekilometer per kvadratkilometer. Reelt har dagsproduktionen i forbindelse med de udførte forsøgs kortlægninger for det meste været noget mindre.

Tolkning

For at kunne lave en geologisk tolkning af SkyTEM-data, skal geofysikeren nøje gennemgå data og beregne modeller, som passer



Eksempel på rådata og modellering af data. På den aktuelle lokalitet er der beregnet en geofysisk model, som beskriver en nedre afgrænsning af grundvandsmagasinet i ca. 64 m dybde.

a. Rådata i form af 5 datasæt med lav strøm og data til tidlige tider (røde kurver) og 5 datasæt med høj strøm og data til sene tider (grønne kurver).

b. Behandlede rådata og modelkurve, som tilpasser rådata.

c. Geofysisk-tolkningsmodel hørende til modelkurven vist i figur b. Flyvehøjde 14 m, dybdeinterval 14-35 m med en modstand på 40 ohmmeter – tolket som moræneler, dybdeinterval 35-64 m med modstand på 80 ohmmeter – tolket som sand, dybere end 64 m modstande under 10 ohmm – fedt ler. (Grafik: Forfatterne)

til de indsamlede data. Disse geofysiske modeller beskriver de geologiske lag i form af elektriske modstand.

Herefter er det geologens opgave at omsætte de geofysiske modeller til geologiske modeller. Jordlagenes modstande varierer. Sand, grus og kalk har høje og moræneler mellemhøje modstande, mens ler og saltholdige aflejringer har lave modstande. Geologen sammenstiller SkyTEM-tolkningerne med geologiske observationer fra borer og eventuelt andre geofysiske data i det pågældende område. Resultatet er en 3-dimensionel geologisk model, som beskriver de overordnede geologiske strukturer i området ned til en dybde på 150 m.

For at kunne foretage en tolkning af SkyTEM-data skal der på hvert eneste sonderingspunkt fastsættes en flyvehøjde og en position. Højden indgår som en vigtig del i selve tolkningen. På hvert sonderingspunkt vurderes data for koblinger, og støjede data skæres væk. Tolkningsprocessen er p.t. noget tidskrævende, da den software, der anvendes, ikke er beregnet til så store datasæt, som produceres ved SkyTEM-kortlægninger. Der arbejdes nu med at udvikle nyt programmel til processering og tolkning, som skal gøre tolkningen både bedre og hurtigere.

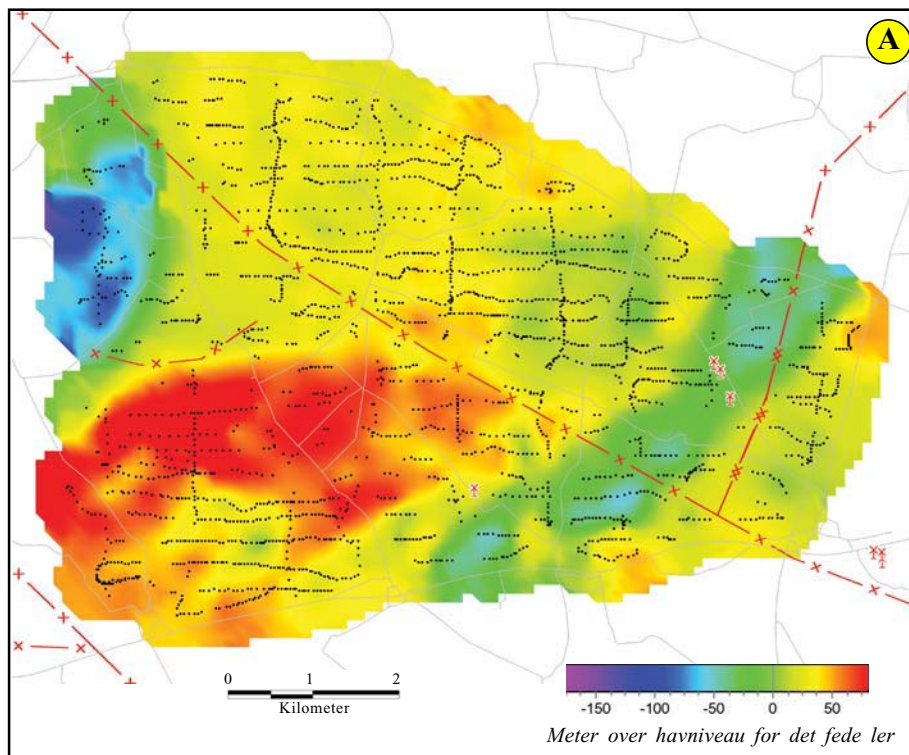
Eksempel

I december 2002 blev den første forsøgs-kortlægning lavet, og der er til dato lavet i alt fem. De har til formål at dokumentere, at metoden giver data af en kvalitet, som er på niveau med eller bedre end data fra de traditionelle, jordbaserede TEM-målinger.

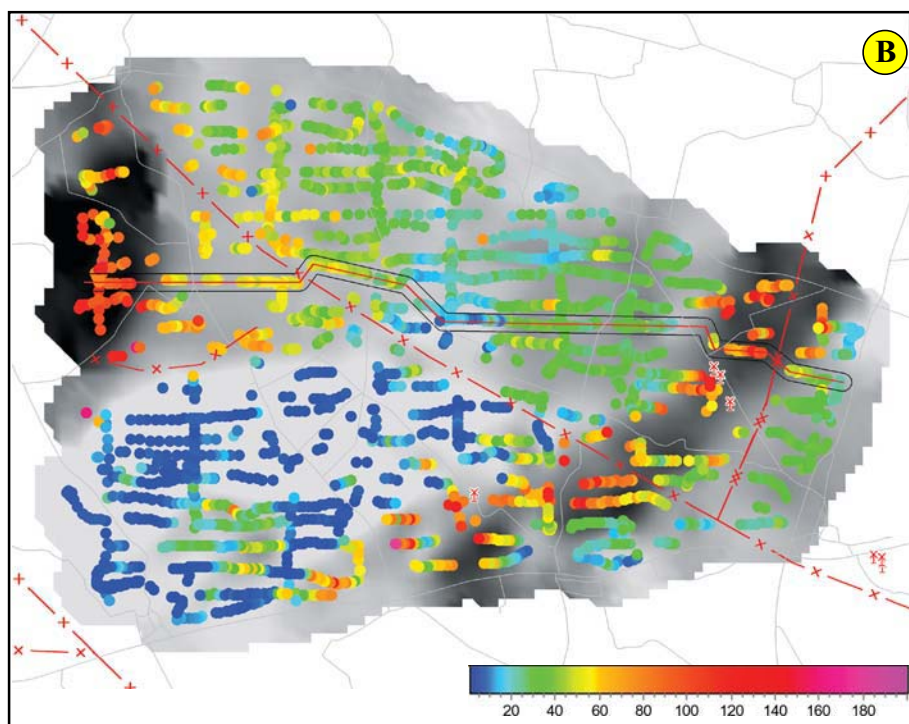
Forsøgs-kortlægningerne har naturligvis også været vigtige for den intense udvikling af måleudstyret i det sidste år. Måleudstyret fungerer nu stabilt, og der registreres en lang række overvågningsparametre, som sikrer datakvaliteten. Forsøgs-kortlægningerne er udført i samarbejde med Århus Amt og – i lidt mindre omfang – Vejle Amt.

Den første egentlige forsøgs-kortlægning dækkede et område på 40 km² ved Sabro lidt vest for Århus, hvor data er indgået på lige fod med Århus Amts øvrige geofysiske grundvandskortlægninger. Amtet havde på forhånd ringe kendskab til grundvandsmagasinernes udstrækning i området, eftersom områdets borer overvejende er knyttet til enkelttindvindere, og borerne kun når ned i meget beskedne dybder.

SkyTEM-metoden er meget velegnet til at kortlægge overfladen af lerlag, som ofte udgør afgrænsningen af grundvandsmagasinerne. I Sabro fandt man nogle meget markante dalstrukturer i overfladen af det fede ler. I den østlige del ses et dalforløb, som løber fra nordøst mod sydvest. Bunden af dalen ligger mere end 100 m under terrænet. I den nordvestlige del er der kortlagt dele af en endnu dybere dal, som når dybder på mere end 160 m. De tolkede data, der er brugt som grundlag for optegning af kortet, er markeret med sorte prikker. Punkternes



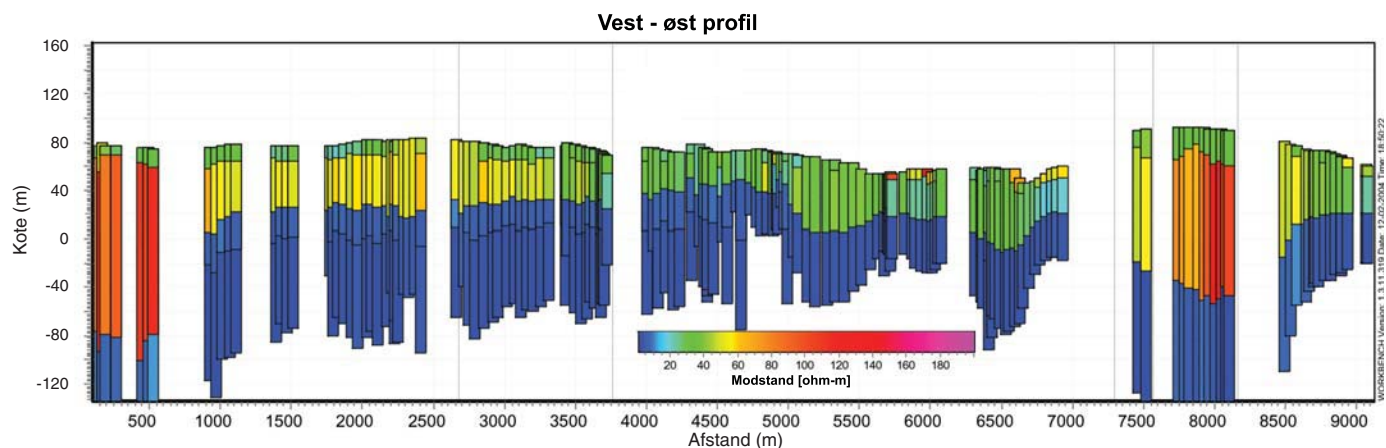
A) Konturkort over koten for oversiden af det fede ler. I de blå og mørkegrønne områder ligger det fede ler meget dybt, mens leret mod sydvest er højtliggende. (Grafik: Forfatterne)



B) Koten (meter over havniveau) for oversiden af det fede ler er vist som en gråtonet konturkort. Med farvede punkter er modstanden af jordlagene i et koteinterval fra kote 0 til 20 m præsenteret, hvilket svarer til dybder på ca. 60 m. De begravede dalforløb træder frem, hvor kontureringen er mørk. Dalforløbene indeholder generelt jordlag med høje modstande, hvilket ses som røde og gule prikker. (Grafik: Forfatterne)

tæthed varierer meget; det skyldes, at der i områder med mange installationer er fjernet forholdsvis mange punkter i forhold til områder med store marker, skove og søer. De fjernede data er koblede. For hver kilometer

har helikopteren fløjet en linie nord-syd, som krydser linierne øst-vest. Når man sammenligner de krydsende linier, ser man, at reproducerbarheden er stor, idet selv små strukturer reproduceres perfekt i lighed



Det 9 kilometer lange VØ-orienterede profil viser tydeligt, at der i de begravede dalforløb findes høje modstande ved 500 m og 8.000 m, hvilket tolkes som sandlag med grundvand. Placeringen af profilet fremgår af den foregående figur. (Grafik: Forfatterne)

med afgrænsningen af dalforløbene.

Ud over at kende placeringen af dalforløbene er det vigtigt at bestemme de materialer, der opfylder dalene. På kortet er dybden til det fede ler vist med en grå farveskala, mens de farvede prikker er modstanden i et koteinterval fra 0 til 20 m over havniveau. Som det ses, er prikkerne overvejende gule og røde i dalforløbene (figuren nederst forrige side), hvilket kan tolkes som sand- og grusaflejringer i dalene. Der er med andre ord mulighed for at finde højtydende

grundvandsmagasiner i de dybe dale.

Erfaringerne med tolkning af SkyTEM-dataene viser, at de kontinuerede data giver bedre mulighed for at udpege dårlige datapunkter, samtidig med at de høje krav til datakvalitet giver meget fine kortlægningsresultater. Detaljeringsgraden er langt højere end den, man hidtil har set ved TEM-kortlægninger. Dette giver mulighed for mere sofistikerede geologiske modeller som et resultat af en dybere geologisk forståelse af de geologiske dannelsesmiljøer.

Andre anvendelsesområder

I takt med, at SkyTEM-metoden er blevet præsenteret på bl.a. internationale konferencer, har det vist sig, at selvom den er udviklet med henblik på kortlægning af de danske grundvandsmagasiner, er den også attraktiv i forbindelse andre typer kortlægninger, fx kortlægning af istykkelse på Arktisk og Antarktisk, kortlægning af vanddybder og kortlægning af mineralforekomster. Fremtiden vil vise, hvilke af disse projekter der bliver ført ud i livet. ■

Kort nyt

10 milliard trilliard trilliarder carat

Astronomer fra Harvard Smithsonian Center for astrofysik har fundet galaxens største diamant. Det drejer sig om en krystalliseret, hvid dværg med en diameter på omkring 4.000 km med det fængende navn: BPM 37093. Astronomerne kalder den lille sol en diamant, fordi den består af krystalliseret kulstof omsluttet af et lille tyndt lag hydrogen- og heliumgaslag. Det antages, at dette er slutstadiet for mange stjerner i universet, inkluderende vores egen sol. Om fem milliarder år vil vores sol udvikle sig til en hvid dværg, og to milliarder år senere vil det tilstedeværende kulstof krystalliseres til en gigantisk diamant.

“Du vil få brug for en juvelerlup på størrelse med solen for at værdisætte denne nye diamant”, udtalte astronom Travis Metcalf fra Harvard-Smithsonian Center for astrofysik. Metcalf leder et hold forskere, der har opdaget den enorme diamant.

Da Ronald Winston, chef for Harry Winston Inc. blev bedt om at estimere værdien af diamanten, indikerede han, at en

sådan diamant sandsynligvis ville undergrave verdensøkonomien.

Den kosmiske diamant er blevet opdaget 50 lysår fra Jorden i Centaurus konstellationen. Diameteren er på ca. 4.000 km, og vægten omkring 5 millioner trilliard trilliard pounds, som oversat til carat bliver til et ettal med 34 nuller bagefter.

Diamantstjernen overstiger med mange længder den største diamant nogensinde fundet på Jorden nemlig moderen til Afrikas Stjerne på 530 carat, der oprindeligt var på 3.100 carat.

I fire årtier har stjerneforskere ment, at det indre af hvide dværge var krystalliseret, men det har først været muligt at få direkte beviser for denne formodning her for nyligt.

Den hvide dværg, der har været studeret i et stykke tid, stråler ikke kun, den er også musikalsk. Den ringer ligesom en gigantisk gong-gong, da den undergår en konstant pulsering. “Ved at måle på disse pulseringer har vi været i stand til at studere det indre af den hvide dværg – akkurat som seismiske målinger af jordskælv giver geologer mulig-

hed for at studere det indre af Jorden”, udtaler Metcalf.

www.spacedaily.com/PBSJ ■

FALKENBERG
A/S MILJØRÅDGIVNING

- Undersøgelser
- Oprydning
- Risikovurdering
- In-situ
- Projektering
- Monitorering

Vassingerødvej 145, Lyngø
Tlf: + 45 48 18 75 66

Herningvej 36, Nykøbing F
Tlf: +45 54 82 45 65

www.falkgeo.dk
falkenberg@falkgeo.dk