

# Milankovitch-teorien

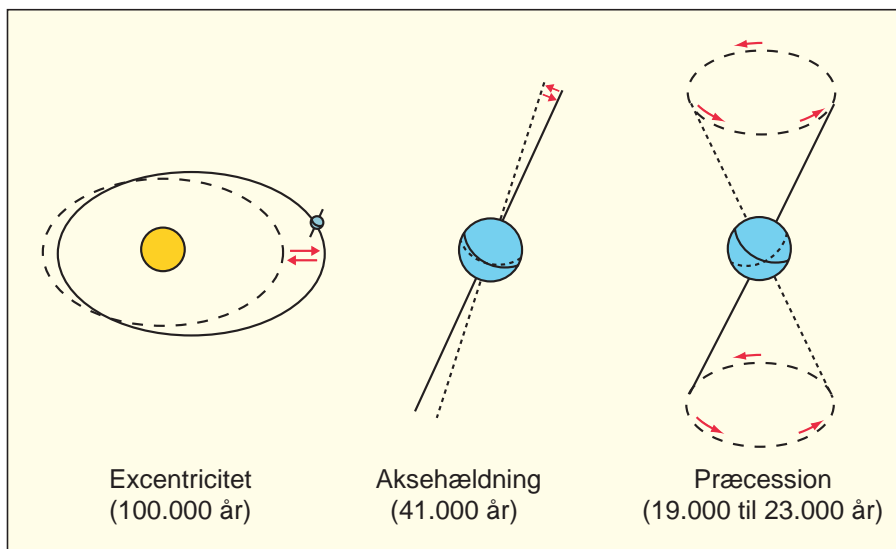
## - istidernes astronomiske forklaring

Af geolog Klaus Petersen

Milankovitch-teorien er den astronomiske forklaring på, at istider finder sted som et resultat af periodiske ændringer i jordens banegeometri. Variationer i jordens kredsløb gennem tid forårsager periodiske ændringer i mængden og fordelingen af solstråling, der når jordens overflade. Disse ændringer tænkes at have været den styrende faktor i udviklingen og dannelsen af iskapper på den nordlige halvkugle i Pleistocæn. Klimaændringerne er sket i regelmæssige tidsintervaller på 20.000-100.000 år.

Teorien bærer navn efter den serbiske matematiker Milutin Milankovitch, som i 1920'erne beregnede variationer i insolationen (den indkomne solstråling) ud fra ændringer i jordens orbitale elementer.

Selve ideen, at variationer i jordens orbitale elementer forårsager glacial-interglacial cykler, opstod allerede i 1800 tallet. Men det var først i 1920'erne at man for alvor fik lavet beregninger og en bedre forståelse af problematikken. Milankovitch-teorien blev dog ikke bredt accepteret før i midten af 1970'erne, da store datamængder fra borer i bl.a. ODP-projekterne (Ocean Drilling Program) og senere iskerne fra Grønland og Antarktis kunne støtte den. "Regnekraften" er siden da også blevet forbedret markant, og teorien raffineret – der er dog stadig visse aspekter i klimahistorien, som teorien ikke helt kan forklare.



De astronomiske parametre som tilsammen forårsager ændringer i den indkomne solstråling (Grafik: Forfatteren og SL)

### De orbitale parametre

De astronomiske parametre udgøres af præcessionen, aksehældningen og excentriciteten. Disse parametre styrer jordens position i rummet som følge af gravitationskræfter fra solen og månen samt fra de øvrige planeter (primært Jupiter og Venus); se figuren ovenfor.

### Præcessionen

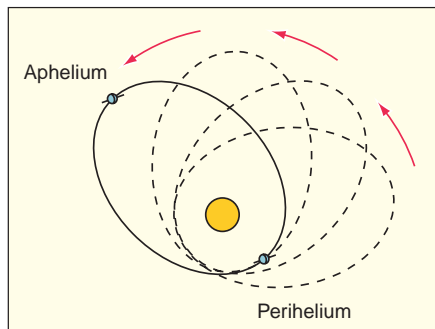
Præcessionen ses som en cirkelformet bevægelse af rotationsaksen forårsaget af de kombinerede effekter af solens og månens gravitationskræfter på jordens ækvatorudbulning. Præcessionen kan bedst illustreres som en roterende snurretop, hvor aksens drejer langsomt rundt. Den absolutte præcessionsperiode er 26.000 år, men da

jordens elliptiske bane om solen (perihelipunktet) ligeledes præcesserer, men den modsatte vej, bliver de gennemsnitlige primærperioder observeret fra jorden omkring til 19.000 og 23.000 år (kaldet de klimatiske præcessionsperioder) – figuren øverst til venstre på modstående side. Præcessionen fører til en bevægelse af jævndøgns punkterne rundt i jordens elliptiske kredsløb. Disse forhold leder til regelmæssige og forudsigelige ændringer i fordelingen af insolationen på jorden – figuren øverst til højre på modstående side. Præcessionseffekten er 180 grader ude af fase mellem den nordlige og sydlige halvkugle. Effekter forårsaget af præcessionen har størst indvirkning ved lave breddegrader (<40 grader).

### Aksehældningen

Jordens omdrejningsakse hælder i dag med ca. 23,45 grader vinkelret på baneplanet om solen. Hældningen varierer regelmæssigt mellem 22 og 25 grader og har hovedperioder omkring 41.000 og 54.000 år samt en amplitudemodulationsperiode på ca. 1,25 mio. år. Aksehældningen modulerer årstiderne og insolationens gradient især på de høje breddegrader (>60 grader). Uden en aksehældning ville der ikke være variation i årstiderne. Effekten af aksehældningen er stærkt koblet med præcessionen og giver ændringer op til 15 % for insolationen på de høje bredde-

<b>NYHED!</b>	<b>NYHED!</b>
Ny software til SAS 1000/4000 - 150-200 % forbedring i forhold til tidligere versioner (lavere end version 3.00)	Terrameter logging/SAS LOG til SAS 4000
	<b>NYHED!</b>
	RAMAG - Ny software til WADI VLF
<b>NYHED!</b>	
Georadar fra Malå Geoscience AB	
<b>Dyno Nobel Danmark A/S</b>	
Telefon 43 45 15 38	
Homepage <a href="http://www.dynonobel.dk">www.dynonobel.dk</a>	



Præcession af perihelium – set fra solens nordpol. (Grafik: Forfatteren og SL)

grader. Det skal bemærkes at aksehældningen kun beskriver selve hældningen, og ikke i hvilken retning akse hælder. Dette bestemmes af præcessionen.

### Excentriciteten

Jordens bane omkring solen udgør ikke et perfekt cirkulært kredsløb, men derimod en ellipse med varierende excentricitet, dvs. afstanden mellem jorden og solen er ikke konstant. Ved aphelium (se figuren øverst til højre modstående side) er jorden længst væk fra solen, og ved perihelium er jorden tættest på solen. Excentricitet angives generelt som et tal mellem 0 og 1. For et perfekt cirkulært kredsløb er excentriciteten 0. Perioden, hvor excentriciteten for jorden går fra maksimum (0,06) til minimum (næsten nul), er i gennemsnit 100.000 år, men består af hovedperioder på ca. 95.000 og 123.000 år. Excentriciteten udviser endvidere regelmæssige overlejlrede perioder på ca. 400.000 år og 2 mio. år. Effekten af excentriciteten er globalt symmetrisk og modulerer præcessionen og aksehældningen, således at insolationens værdierne forøges, når orbitalparametrene er i fase og formindskes, når de er i modfase.

Excentriciteten er i dag omkring 0,017, hvilket giver en forskel i den indkomne solenergi mellem aphelium og perihelium på ca. 7 %. For mellem 120.000-90.000 år siden var excentriciteten omkring 0,04 og forskellen i solenergi mellem aphelium og perihelium lå på ca. 14-17 %. Når excentriciteten når sin maksimale værdi 0,06 vil forskellen i solenergien mellem aphelium og perihelium ligge på ca. 25 %. Det skal i denne sammenhæng bemærkes, at variationen i den totale årlige solenergi er ganske lille nemlig ca. 0,3 %, men denne beskedne variation spiller tilsyneladende en afgørende rolle for udviklingen i glacial-interglacial cykler, i hvert fald for Pleistocæn.

At den totale årlige solenergi ikke varierer mere skal ses ud fra Keplers love om planet bevægelser. Ifølge Keplers 2. lov bestryger radiusvektor (linjen mellem solen og jorden) lige store arealer til lige store tidsrum. Dette medfører at jordens banehastighed stiger ved perihelium og falder ved aphelium.

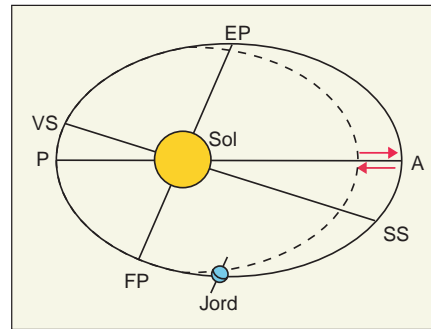
De tre astronomiske parametre i kombi-

nation influerer på mængden og fordelingen af solstråling, som når jorden. Ændringerne varierer både med breddegrad og med årstid. De orbitale elementer udgør tilsammen en meget kompleks sammensat variation for solindstrålingen. Selvom forbindelsen ikke er direkte og ligefrem, så er det ændringer i solstrålingen, som tænkes at være den drivende kraft bag ved opbygning og smeltning af de store iskapper i Pleistocæn og muligvis også længere tilbage. For de sidste 900.000 år har der således været ca. 8 istider – omtrent en hvert 100.000 år.

### Stabilitet af de astronomiske parametre

Har solsystemet altid været stabilt, og har perioderne af de astronomiske parametre været konstante? Planetbaner ændrer sig ganske langsomt (pertuberes) som følge af gravitationskræfter fra andre planeter i solsystemet. Man kan spekulere over, hvorvidt ændringerne i planetbanerne har ændret – og vil ændre solsystemets udseende væsentligt. Set over meget lange tidsrum opfører solsystemet sig meget konservativt – planetbanerne er med andre ord stabile. Solsystemets stabilitet/bevægelse kan ikke beregnes nøjagtigt længere tilbage end ca. 100 mio. år. Dette skyldes, at de matematiske bevægelsesligninger for 10 legemer fører til kaotiske (ikke-liniære) effekter og dermed uforudsigelige bevægelsesmønstre. Men alligevel antyder mere "generelle" beregninger, at solsystemet har opført sig pænt og stabilt i de sidste 3-4 mia. år. Dette støttes af geologiske undersøgelser. Usikkerhederne på beregningerne ligger primært i forbindelse med diskussioner af solsystemets dannelse de første 1-1,5 mia. år. Excentriciteten for jorden har antageligt ikke ændret sig nævneværdigt siden da.

For jordens vedkommende må det dog nævnes, at de astronomiske parametre som præcession og aksehældning ikke er konstante set over meget lange tidsrum - dvs. betragtet over mere end 5 mio. år. Dette skyldes det forhold, at månen fra sin fødsel var meget tæt ved jorden og havde en væsentligt hurtigere omløbsperiode. Endvidere var Jordens døgn væsentligt kortere



Banegeometri for jordens vigtige punkter: VS = Vintersolhverv, SS = Sommersolhverv, FP = Forårspunkt, EP = Efterårspunkt, P = Perihelium, A = Aphelium. I dag er P og VS næsten sammenfaldende. (Grafik: Forfatteren og SL)

pga. den hurtigere rotation. Friktionskræfter fra månen på jorden i form af tidevand og tidejord nedsætter jordens omdrejningshastighed. Forenklet kan man sige, at det, som månen vinder i afstand, taber jorden i rotationshastighed, ganske som en skøjteløber stopper sin piruette ved at strække sine arme længere og længere ud fra kroppen. Konsekvensen af dette er først og fremmest, at døgnet bliver længere, men også at perioderne for præcessionen og aksehældningen langsomt bliver længere. Ser man tilbage i tiden, bliver de kortere. Man har f.eks. beregnet "Devon-året" til ca. 400 dage, hvilket støttes af palæontologiske undersøgelser af devone korallers vækstlag. De astronomiske parametre vil derfor resultere i kortere perioder, jo længere tilbage i tiden man kigger – se nedenstående tabel. Milankovitch-perioderne er "fundet" i mange palæozoiske og mesozoiske lagserier med netop de beregnede kortere perioder.

### Udvikling af de første ideer

De første ideer til en mere matematisk forståelse af istiderne dukkede op i anden halvdel af 1800-tallet og udviklede sig for alvor igennem 1900-tallet. Astronomen Urban Le Verrier publicerede i 1840'erne formler til beregninger af kredsløbsgeometrien for jorden og de øvrige af solsystemets planeter. I 1864 anvendte James

Geologisk periode	Tid (mio. år)	Astronomiske perioder (år)			
		Præcession		Aksehældning	
Holocæn	0	19.000	23.000	41.000	54.000
Sen Kridt	72	18.645	22.481	39.381	51.226
Tidlig Perm	270	17.638	21.034	35.145	44.284
Sen Karbon	298	17.421	20.725	34.291	42.936
Mellem Devon	380	16.824	19.886	32.053	39.484
Tidlig Silur	440	16.399	19.296	30.546	37.222

Ændringer i Jord-Månesystemet bevirker ændringer i periodiciteten for præcessionen og aksehældningen. (Grafik: Forfatteren og UVH)

Croll disse formler til grafisk at illustrere jordens ændringer i excentriciteten for de sidste 3 mio. år. Le Verrier fandt, at den totale mængde af den indkomne solenergi næsten er konstant i løbet af et år uanset excentriciteten. Han mente derfor, at høj excentricitet ikke var nok til at forklare istiderne. Crolls studier af jordens banegeometri førte til en ny vinkel på problematikken nemlig "timmingen"; fx at det er af stor betydning hvornår på året, "varmen" i form af sommeren ankommer i forhold til jordens geometriske placering i baneplanet.

Hvis der er sammenfald mellem vinterhemisfæren i en periode med høj excentricitet, og det tidspunkt hvor jorden netop er længst væk fra solen (aphelium) vil "vintren blive forlænget". Dette fandt Croll var ideelle betingelser for starten på en istid med længere vintre og muligheden for større sneakkumulation. Den forøgede sne-mængde ville yderligere forlænge hemisfærens vinter via en tiltagende albedo, som forårsager yderligere afkøling. Denne selvforstærkende effekt hævdede Croll var udløseren for væksten i iskjoldene. Skepsis var stor, og Croll manglede et mere håndgribeligt og matematisk bevis for at kunne begrunde sin teori – nemlig kobling til insolationen.

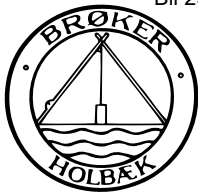
## BRØNDBORINGSFIRMAET BRØKER I.S.

Kontor og værksted: Telefon 59 44 04 06  
Spånnebæk 7, 4300 Holbæk.

Fax 59 44 69 00

Thomas Brøker, privat 59 44 08 71  
Bil 21 42 38 71

Henrik Brøker, privat 59 43 09 94  
Bil 23 34 77 01



VORT SPECIALE ER:

BRØNDBORING, rotations- og tørboring.

MILJØBORING, hulsneglsboring med kærneprøveudtagning.

REGENERERING af borer.

PRØVEPUMPNING af borer og kildepladsundersøgelser med avanceret elektronisk udstyr og EDB-behandling.

Vi forhandler GRUNDFOS pumper og vort veludstyrede værksted renoverer Grundfos' vandværkspumper.

Vi leverer og monterer underjordiske GLASFIBERPUMPEBRØNDE af eget fabrikat med udstyr i rustfrit stål tilpasset de aktuelle dimensioner.

## Tilbagekoblingsmekanismer (feedbacks)

Den drivende kraft og udløser for istiderne er sandsynligvis de astronomisk styrede ændringer i insolationen. Ændringen i insolationen mellem de to excentricitetspunkter er dog så lille, at den ikke alene forklarer klimaskiftene. Man tænker sig, at klimatiske tilbagekoblingseffekter (feed-backs) forstærker den svage "Milankovitch-ændring" i insolationen og dermed bliver den udløsende faktor.

Der er flere tilbagekoblingsmekanismer fx:

Klimatisk afkøling → forøger sne- og isdækket → større planetalbedo → mindre absorberet energi → yderligere afkøling → mere sne og is osv.

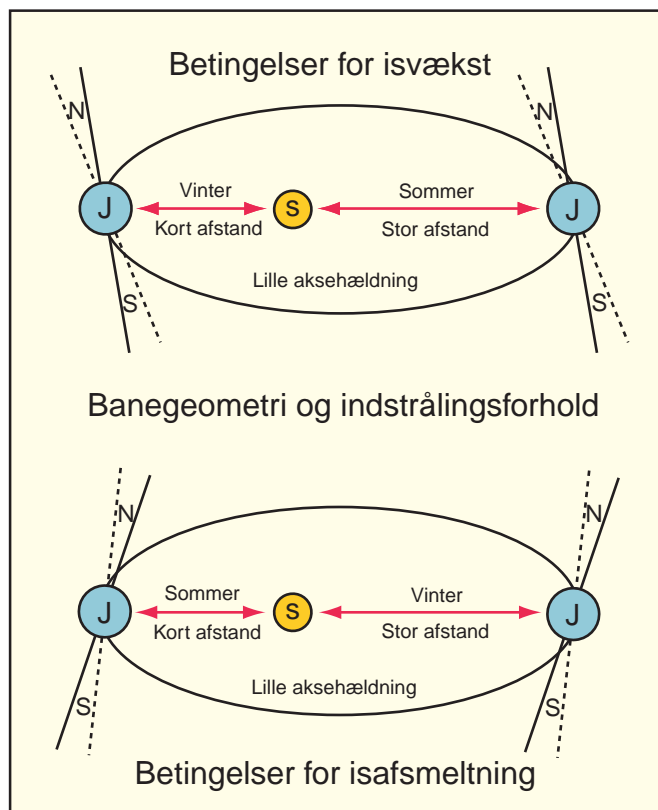
Opvarmning vil forstærkes af en tilsvarende tilbagekobling gennem mindre sne- og isdække → mindre albedo → yderligere opvarmning

Et feedback-system (klimaet) kan beskrives som værende positivt eller negativt som respons på en given information ("input-fejl"). Positivt når det er i fase med den "fej", som forstærker systemet – eller negativt hvis systemet i modfase reducerer "fejlen"

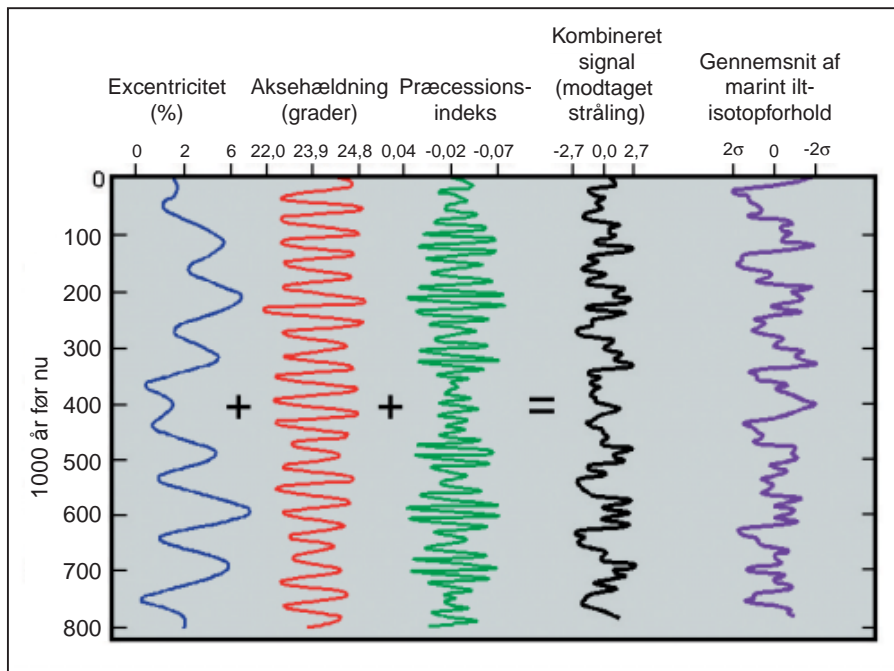
I 1920'erne udbyggede og reviderede Milankovitch Crolls istidsteori og fik beregnet ændringerne i insolationen som et resultat af ændringer i jordens banegeometri. I 1938 publicerede Milankovitch beregnede indstrålingskurver for udvalgte breddegrader. Han formulerede en matematisk sammenhæng mellem sommerindstrålingen og højden for sneinjen på den nordlige halvkugle. Snehøjden ville sandsynligvis være 0 m (havniveau) nær minimumsudbredelsen for iskappen. En af hovedpointerne var, at det er variationen i sommerinsolationen på 65 grader nord, der er ansvarlig for udløsningen af iskappedannelsen. Det meste af jordens landmasser befinder sig på den nordlige halvkugle,

hvilket naturligvis er væsentligt. På den sydlige halvkugle forholder det sig noget anderledes med geografien, og iskappet er her mere begrænset. Med Milankovitchs astronomiske kurver fik geologerne grafer med breddegraden til en iskappes udbredelse på et givet tidspunkt de sidste 650.000 år – teoretisk set.

I modsætning til Croll mente Milankovitch, at der skal være sammenfald mellem aphelium og sommertidspunkt – figuren nederst på modstående side. For at kunne danne store iskapper må sne akkumuleres i vinterperioden og ikke smelte væk i løbet af sommeren. Hvis vi har en relativt kold sommer og samtidigt en ikke for kold vinter, er betingelserne for iskappet vækst



Jordens optimale geometriske baneposition for hhv. isvækst og isafsmeltning på den nordlige halvkugle ifølge Milankovitch-teorien. (Grafik: Forfatteren og SL)



Det kombinerede signal fra de astronomiske parametre matcher næsten perfekt iltisotopkurven fra dybhavskernerne. Dette anses som et afgørende bevis for Milankovitch-teorien. Iltisotopkurven er sammensat af flere borer i ODP. (Grafik: modificeret efter Berger m.fl., 1995 samt Imbrie et al., 1984)

størst. Vinteren må ikke være for kold, da atmosfæren ved meget lave temperaturer ikke kan indeholde ret meget vanddamp, og der falder således ikke sne.

Milankovitch-teorien siger, at er det sommerindstrålingen på 65 grader N, som er kardinalpunktet for vækst eller afsmeltning af iskapperne i Pleistocæn. Hypotesen er altså, at milde vintre og kolde somre er ansvarlige for dannelsen af istider i kombination med is-albedo-feedback-effekten (se boksen øverst på næste side. Dette kan ske i perioder med høj excentricitet, hvor solhverv og aphelium falder sammen.

#### Skepsis og beviser

Som med Croll gik det også Milankovitch - hans teori blev af mange betragtet med stor skepsis og afvist, da "beviset" syntes at mangle – årsvariationen i insolationen var alt for svag til at kunne styre klimaet, mente man. Beviset, som kunne bekræfte Milankovitch-teorien (i hvert et langt stykke af vejen), kom senere – i 1970'erne - fra ODP- projekternes mange dybhavsboringer. Her blev sedimentkerner, mikrofossiler og deres ilt-isotopforhold analyseret. Spektralanalyser fandt de samme frekvenser i ilt-isotopkurverne som dem, der blev forudsagt af Milankovitch-teorien, nemlig perioder omkring 100.000, 41.000 og 21.000 år. Analyserne af dybhavskerner bekræftede endvidere, at istiderne sker synkront på begge hemisfærer. Disse resultater betragtes i dag som bekræftelse på teorien.

#### Hvornår kommer den næste istid

Fortidens klima indeholder tydeligvis nøgler til forståelsen af fremtidens klima. Det er derfor naturligt interessant med et bud

på, hvornår vi kan forvente den næste istid. Studier af de sidste par glacialer og især interglacialer førte i 1980'erne til opfattelsen af, at istider sker med faste afbrydelser hver ca. 10.000 år som fx Eem Interglacial. Mange forskere forudsagde således næste istid til at være lige "om hjørnet", idet Holocænet nu har været de ca. 10.000 år. Sådant bliver det ikke nødvendigvis. Skal vi holde os til Milankovitch-teoriens fremskrevne insulationsvariationer går der mindst 50.000 år, ja endog op til 600.000 år, før den astronomiske geometri er lige så gunstig for dannelse af istider som for 20.000-300.000 år siden. Excentriciteten er på vej mod den laveste værdi (cirkulært kredsløb) og holder sig her i mindst de næste knap 50.000 år. Næste maksimum for excentriciteten ligger først 5-600.000 år ude i fremtiden – så må geologerne til den tid se, om Milankovitch får ret eller ej. ■

#### Litteratur:

Dansgaard, W. (1987): *Klima, Vejr og Menneske*. Geografiforlaget. 128 pp.

Helt, B.E. (1975): *Klassisk Astronomi*, Akademisk Forlag. 72 pp.

Schwarzacher, W. (1993): *Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory*. *Developments in sedimentology* 52. Elsevier. 225 pp.

### Flere oplysninger

<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/>  
Her findes yderligere oplysninger og datafiler om emnet palæoklima.

Bøger ...

**Nyheder!**

## Geologisk set Fyn og Øerne

Forfatter: geolog Gunnar Larsen, Fyns Amt

Nu er Fyn og de fynske øer også dækket i denne værdifulde håndbogsserie, som beskriver lokaliteter af national geologisk interesse.

144 sider, fuldt farveillustreret. 225 kr.

Serien omfatter desuden:

**Det nordlige Jylland.** 208 s. 200 kr.

**Det mellemste Jylland.** 272 s. 275 kr.

**Bornholm.** 208 s. 200 kr.

## Danske landskaber – billedatlas

Forfattere: Knud Binzer og Ib Marcussen  
Fotos: Peter Warna-Moors

En flot bog, som i smukke fotos og en let tilgængelig tekst beskriver de danske landskabstyper.

Se anmeldelsen i *Geologisk Nyt* 1/2002. 80 sider. Indbundet. 125 kr.

Bogen er udgivet af GEUS, og forhandles kun af Geografforlaget.

## Djurslands Geologi

Forfattere: Stig A. Schack Pedersen og Kaj Strand Petersen

Omfattende bog om Djurslands geologiske historie. Med bilag: Stort geologisk kort, 1:50.000. Fuldt farveillustreret med fotos, detajlkort og instruktive tegninger. Indbundet. 225 kr.



GEOGRAFFORLAGET  
5464 BRENDERUP · 6344 1683

... fra GEOGRAFFORLAGET