

Glaciale Jordskælv

- når isen rykker

Thomas Møller Jørgensen, Tine B. Larsen, Carl Egede Bøggild, GEUS og Johannes Krüger, Geografisk Institut, Københavns Universitet

En helt ny type jordskælv blev i 2003 opdaget af den svenske seismolog Göran Ekström. Det er efterhånden sjældent, at helt nye naturfænomener opdages, så Ekströms artikel i tidsskriftet *Science* vakte betydelig opmærksomhed i forskerkredse. Ekström havde fundet nogle mærkelige signaler, som tydeligvis stammede fra jordskælv, men jordskælv af en helt anden type, end vi hidtil har kendt til. Nu er også danske forskere ved Geocenter København gået i gang med at studere fænomenet.

Skælvene var ikke blevet opdaget tidligere trods over hundrede års seismologiske registreringer, bl.a. fordi de mangler den karakteristiske P-bølge, som normalt benyttes ved detektion og lokalisering af jordskælv. P-bølgen er den hurtigste af de rystelser, der løber gennem jorden efter et almindeligt jordskælv. Rystelserne fra de nyopdagede skælv strækker sig også over meget længere



Adskillige udløbere af gletscher ved Evighedsfjorden, Grønland. (Foto: Carl Egede Bøggild, GEUS)

tid, typisk 15 minutter, end jordskælv, der opstår ved brud i Jordens sprøde skorpe. Det lykkedes Ekström at lokalisere de underlige skælv med en horisontal nøjagtighed på ca. 25-50 km. Det viste sig, at de alle havde deres epicenter under store gletschere og isstrømme, og derfor døbte

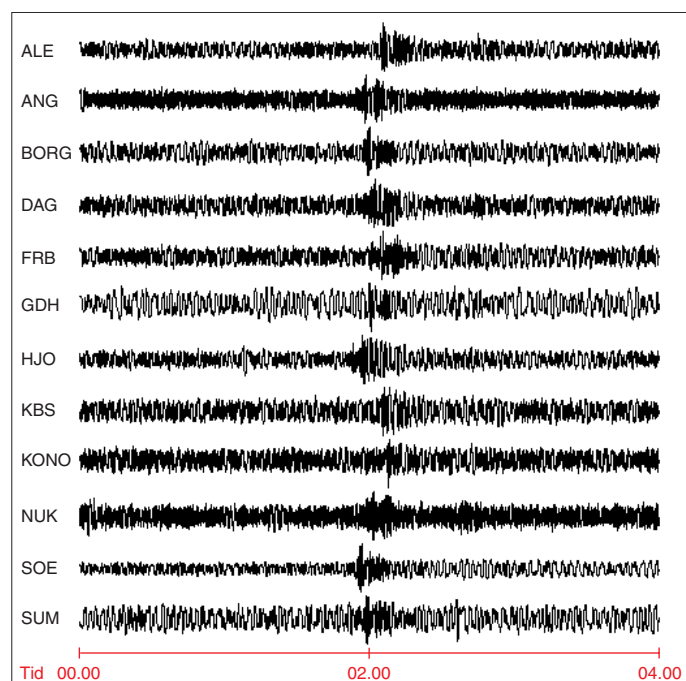
Ekström dem *glaciale jordskælv*. Ekström fandt i første omgang 46 af disse glaciale jordskælv. Heraf lå tre i Antarktis, et i Alaska, og de resterende 42 i Grønland.

Ekström påviste, at signalerne fra de glaciale jordskælv umiddelbart svarer til de signaler, man vil forvente at se, når en stor ismasse rykker sig hen over bunden. Det er dog endnu ikke blevet entydigt påvist, at skælvene er en direkte følge af isens bevægelse. Det kræver både flere målinger og en mere målrettet matematisk/fysisk modellering.

Lokale data

På GEUS er vi i besiddelse af et enestående seismologisk datasæt for Grønland, som er særdeles velegnet til studier af de glaciale jordskælv. GEUS driver fire permanente seismografer i Grønland, som indgår i den internationale overvågning af klodens jordskælv. Data herfra er offentligt tilgængelige og indgår i Ekströms undersøgelser sammen med data fra resten af de globale seismologiske netværk. Men derudover har forskere fra GEUS sammen med internationale samarbejdspartnere gennem de sidste seks år indsamlet et unikt seismologisk datasæt fra Grønland i forbindelse med forskellige forskningsprojekter.

Den detaljerede dataindsamling startede i



Som eksempel ses en samling seismogrammer fra tolv af de grønlandske stationer. Seismogrammerne er fra den 20. oktober 2000 og viser de første 4 timer af døgnet. Vi kan se, at der er et signal omtrent midtvejs, ca. klokken 2, men bølgerne drukner næsten i den seismiske baggrundsstøj. Desuden er bølgerne forskudt indbyrdes med op til 10 minutter. (Grafik: T. M. Jørgensen)

1999 med GLATIS-projektet, som havde til formål at studere strukturer i den dybe grønlandske undergrund. GLATIS står for Greenland Lithosphere Analysed Teleseismically on the Ice Sheet, og projektets formål var således at undersøge den grønlandske lithosfære ved hjælp af fjerne jordskælv. Projektet, som var finansieret af Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd, supplerede ammen med forskningsprojektet NEAT de fire permanente seismografstationer med 16 midlertidige seismografer, hvoraf nogle blot var i operation en enkelt sommer, mens andre stadig er i gang. Løbende er der sat nye stationer op, senest med en bevilling fra Grønlands Hjemmestyre, således at vi i dag råder over data fra det meste af Grønland gennem de sidste seks år. Dette datasæt giver os en enestående mulighed for at studere de glacielle jordskælv på nært hold.

Fælles for de grønlandske seismografer er, at de er tre-komponent bredbånds-stationer. De måler altså bevægelser i tre retninger (nord-syd, øst-vest og op-ned), og over et bredt frekvensområde. Det betyder at data er meget velegnede til at lokalisere jordskælv, og til at beskrive jordskælvs-mekanismen, dvs. bevægelsen i det øjeblik jordskælvet udløses.

Et problem med at anvende data fra det globale netværk er, at bølgerne (rystelserne) ofte har tilbagelagt lange afstande, før de når en af stationerne, og at mellemliggende geologiske strukturer derfor har sat deres præg på bølgerne. Samtidig er bølgeenergien blevet spredt, så bølgerne er mindre synlige over den seismiske baggrundsstøj. Tilsammen betyder det, at det er sværere at genskabe det oprindelige signal og dermed konkludere noget om jordskælvet.

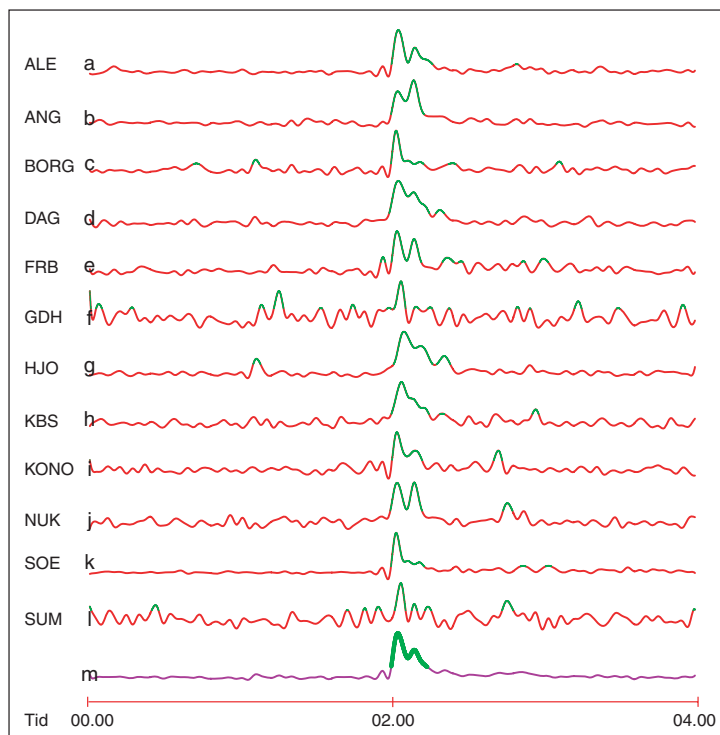
Omvendt betyder et lokalt netværk, at vi registrerer kraftigere bølger, som har været gennem færre forstyrrende strukturer, og som derfor først og fremmest bærer information om selve jordskælvet. Ved at anvende lokale frem for globale data får vi altså bedre besked om de jordskælv, som er foregået. Blandt andet kan lokalisering og beskrivelse af jordskælvs-mekanismer blive langt mere præcis, end tilfældet er med de globale data.

Lokalisering af jordskælv

Normale jordskælv findes typisk ved at søge efter P-bølger i seismogrammet. Dette er den hurtigste seismiske bølgetype og derfor den første, som ses på seismogrammer efter jordskælv. Et kendetegn ved de glacielle jordskælv er fraværet af P-bølgen, hvilket formodentlig er den væsentligste årsag til, at de ikke er blevet opdaget tidligere. Konsekvensen er, at vi må benytte en ny metode til at opdage og lokalisere dem.

Vores metode, som minder en del om Ekstrøms, benytter sig af *overfladebølgerne*. Det er bølger, som modsat P-bølgerne bevæger sig langs Jordens overflade snarere end gennem Jordens indre.

Envelopes af seismogrammerne fra den 20. oktober 2000 for det optimale test-epicenter. De grønne områder viser, hvor seismogrammerne har værdier over den valgte tærskel-værdi. På enkelt-seismogrammerne vil en automatisk søge-algoritme finde mange tilfældige toppe, som ikke er bølger fra et jordskælv. På middel-seismogrammet (nederst, lilla) er de tilfældige toppe forsvundet. (Grafik: T. M. Jørgensen)



Overfladebølger er typisk kraftige signaler, som desværre har den egenskab, at de er *dispersive*. Det vil sige, at bølgenes forskellige frekvenser bevæger sig ved forskellige hastigheder, hvilket giver en forvrængning af bølgen. Denne forvrængning er kraftigere, jo længere bølgen har bevæget sig, og det gør det besværligt at sammenligne overfladebølger målt ved forskellige seismografer.

Heldigvis kan forvrængningen fjernes, hvis vi kender den tilbagelagte afstand, og fordelingen af hastigheder for de forskellige frekvenser. Fra GLATIS-projektet har vi et detaljeret kendskab til frekvensernes hastigheder, så den eneste ubekendte er afstanden mellem jordskælvet og de enkelte stationer.

I korte træk består metoden til at finde de glacielle jordskælv i at afprøve et antal test-epicentre. For hvert punkt fjernes den forvrængning fra seismogrammerne, som en bølge udsendt fra punktet og udbredt til hver af seismograf-stationerne har været udsat for. De herved fremkomne seismogrammer vil indeholde et ens signal på samme tidspunkt, hvis en jordskælvsbølge faktisk har været udsendt fra dette test-epicenter. Vi beregner derfor gennemsnittet af alle seismogrammerne og afsøger det resulterende middelseismogram for en bølge. Et seismogram har både positive og negative udslag. Når vi beregner gennemsnittet, risikerer vi derfor at lægge store positive og negative udslag sammen, og derved udslætte det signal, vi søger. For at undgå dette beregner vi middel-seismogrammet ud fra de enkelte seismogrammers *envelope*.

Envelopen kan sammenlignes med at benytte den absolutte værdi af seismogrammet, dvs. droppe fortegnet. Hvis et jordskælv er

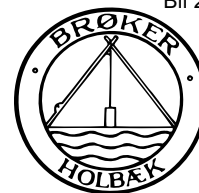
forekommet inden for det tidsvindue, som seismogrammerne repræsenterer, vil resultatet af ovennævnte behandling være en synlig

BRONDBORINGSFIRMAET 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:

BRONDBORING, 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.

bølge ved en stor del af test-epicentrene. Bølgen vil være størst, hvor sammenfaldet mellem seismogrammerne er bedst, så det sandsynligste epicenter er det, som giver den største bølge på middel-seismogrammet.

For at automatisere processen har vi valgt en tærskel-værdi, således at alle værdier i middel-seismogrammet, som er større end tærsklen, markeres som en jordskælvs-kandidat. Det er muligt fordi tilfældig støj, som på enkelt-seismogrammerne kan overdøve en eventuel bølge, dæmpes ved at beregne gennemsnits-signalet, så bølgen bliver tydelig. Efter den automatiserede registrering følger så en manuel inspektion af seismogrammerne for de tidspunkter, hvor en jordskælvs-kandidat er registreret.

I Ekstrøms oprindelige metode blev korrelationen, altså ligheden mellem middel-seismogrammet og et test-signal, beregnet og det korrelerede signal undersøgt for høje værdier. Det var nødvendigt, idet Ekstrøm benyttede globale data, på hvilke bølgerne efter glaciare jordskælv var meget svage. På de lokale data er skælvene tydeligere, og vi behøver derfor ikke begrænse os til at søge efter bølger med en given, forudfattet form. De glaciare jordskælv, som blev fundet af Ekstrøm, har en styrke på mellem 4,7 og 5,1 på Richter-skalaen. Der er således tale om jordskælv, som kan mærkes tydeligt af folk i omegnen. At der ikke er rapporteret forstyrrelser i forbindelse med skælvene skyldes, at de foregår under indlandsisen, altså i områder uden befolkning.

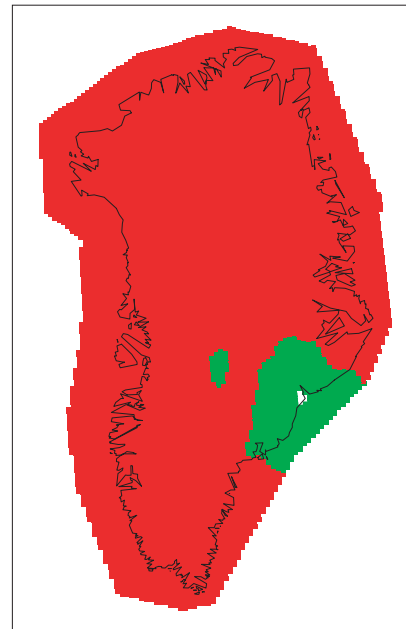
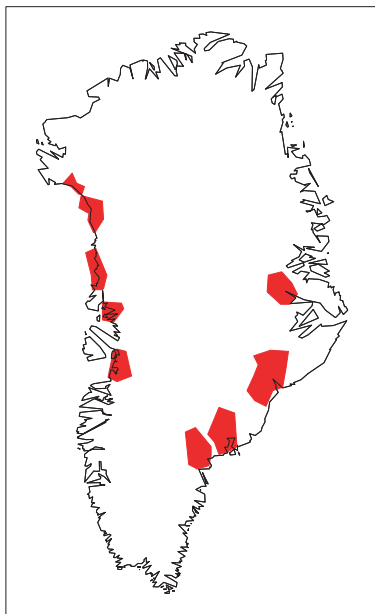
Det forventes, at vi med de lokale data vil være i stand til at gå et trin ned ad skalaen og således finde skælv af styrke ned til ca. 3,7 på Richterskalaen. Den øgede følsomhed er vigtig på grund af Richter-skalaens logaritmiske indretning: Et trin op betyder en ti-dobling af jordskælvet styrke. For normale jordskælv betyder et trin ned desuden en ti-dobling af antallet af jordskælv. Hvis de glaciare jordskælv følger samme regel, vil vi altså ved at finde skælv som er ti gange svagere også finde ti gange flere af dem.

Hvad sker der egentlig?

Fokalmekanismen er en beskrivelse af, hvordan jorden bevæger sig under skælvet. Den kan bestemmes ved at benytte en matematisk model af skælvet og ud fra den beregne syntetiske seismogrammer, som viser fordelingen af bølger i forskellige retninger. Ved at sammenligne disse med observerede seismogrammer kan det vurderes, hvor godt modellen beskriver skælvet.

Et normalt jordskælv kan beskrives ved en *dip-slip-strike* forkastning, som viser, hvordan to blokke af jorden har flyttet sig i forhold til hinanden. Den matematiske model for sådan et skælv er en *dobbelt-koblet kraft*, hvor der indgår kræfter både langs med forkastningsplanet og vinkelret på det. Den giver anledning til et firkløver-formet mønster af bølger.

Det viser sig, at en sådan beskrivelse passer dårligt på de glaciare jordskælv. Uan-



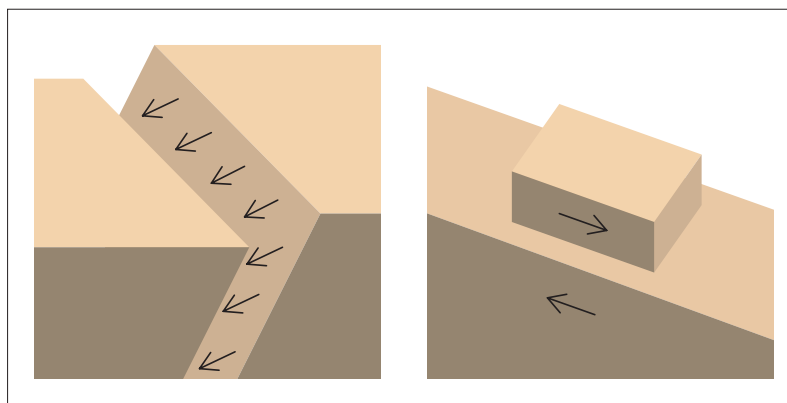
Her ses lokaliseringen af det glaciare jordskælv den 20. oktober 2000. Farver viser højden af bølgen i middel-seismogrammet for de forskellige test-epicentre. Hovedparten af test-epicentrene giver en bølge, som er lavere end tærskel-værdien (den røde farve). I ét område bliver bølgen høj nok til at registreres som et muligt jordskælv (det grønne område). Sandsynligheden for, at et jordskælv fandt sted, er størst i det hvide felt ved 68°N, 32°W. Kortet til venstre viser de områder, som samtlige de grønlandske glaciare skælv er fundet i. (Grafik: T. M. Jørgensen)

set hvordan forkastningen vendes og drejes, passer de syntetiske seismogrammer samlet set dårligt med de observerede. Vi har derfor brug for en anden model for jordskælvet. Et alternativ er at benytte en model, som beskriver *jordskred*. Her er spændinger opstået mellem en overliggende masse, som aftyngdekraften eller omgivelserne trækkes nedad, og underlaget hvis gnidningsmodstand holder igen. Når spændingen bliver for stor, brydes bindingen mellem den overliggende masse og underlaget, og massen begynder at skride. Samtidig fjernes det nedadrettede træk i underlaget, som derfor bevæger sig op (på samme måde som en strakt elastik, der pludselig slippes).

Jordskred kan modelleres ved en *enkelt kraft*, som peger op ad bakke, og som beskriver den elastiske sammentrækning af undergrunden. En sådan model genererer

bølger, som udbreder sig i et ottetals-mønster fra epicentret, altså et væsentlig anderledes mønster end ved en dip-slip-strike forkastning. Syntetiske seismogrammer beregnet ud fra jordskred-modellen giver en langt bedre overensstemmelse med de observerede seismogrammer. Da bølgemønstret fra et glaciare skælv således minder mest om jordskredsmodellen, må vi konkludere, at de glaciare jordskælv sandsynligvis udløses af skred-lignende bevægelser.

På grund af de glaciare jordskælvs placeringer under isstrømme og gletschere er det sandsynligt, at de hænger sammen med isens bevægelser: Gletscheren bevæger sig langsomt ud mod kysten, men et sted hænger isen fast i underlaget. Spændinger opbygges, og når de bliver for store, går isen løs af underlaget, og det udløser det glaciare jordskælv.



Venstre: Et normalt jordskælv beskrevet ved to blokke, som forskydes i forhold til hinanden. I dette tilfælde er den ene blok gledet skråt nedad uden at slippe kontakten med den anden blok, som har bevæget sig op. Højre: En jordskreds-model. En klump jord har løsrevet sig fra skrenten og glider/vælter nedad. Samtidig vil underlaget som modreaktion bevæge sig i modsat retning, altså opad og bagud. (Grafik: T. M. Jørgensen)



Elefantfods-gletscheren i det nord-østlige Grønland. Et meget tydeligt eksempel på, hvordan isen flyder. (Foto: Carl Egede Bøggild, GEUS)

Teorien kan dog ikke bevises alene ud fra de seismologiske data. En af projektgruppens opgaver i det kommende år bliver derfor at foretage målinger af gletscherbevægelse med GPS for at søge en sammenhæng mellem isbevægelse og jordskælv. Derudover vil konkrete flydemodeller af isen kunne bidrage til en forståelse af fænomenet. Hertil kræves både kendskab til isens tykkelse, bundtopografi samt de klimaparametre, der styrer isens bevægelser.

Fremtidsperspektiver

Allerede Ekstrøms første studier af de glacial jord-skælv viste en tydelig årstidsvariation i fordelingen af antallet af skælv. Langt de fleste skælv finder sted i sommerhalvåret, hvilket forstærker indtrykket af, at skælvne er følsomme over for klimaet og dermed er relateret til isens bevægelser. I de senere år er en øget afsmeltning og udtynding af Grønlands indlandsis blevet påvist, hvilket ifølge teorien vil medføre flere jord-skælv. Viser teorien sig at holde stik, står vi altså med et nyt værktøj til klimaovervågning, et værktøj som blandt andet tillader os at overvåge hele Indlandsisens bevægelser på én gang.

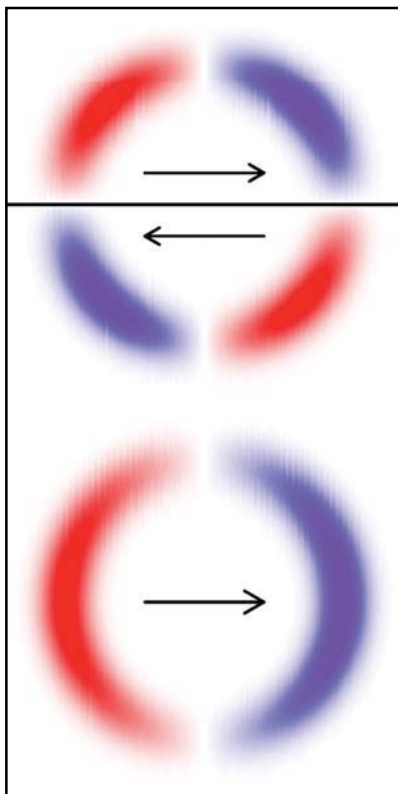
Hvis vi kan påvise, at de glacial jord-skælv er udslag af bevægelser i isen, vil de endvidere kunne anvendes til at opspore nye isstrømme. Et mere detaljeret kendskab til

Sammenligning af bølgemønstret fra et almindeligt jordskælv og et jordskred/glacialt jordskælv. Det almindelige jordskælv sender overtryks-bølger (blå) ud i to retninger og undertryks-bølger (rød) i de to andre. De glacial skælv udsender kun to bølgefronter: Overtryk i den retning undergrunden bevæger sig og undertryk i den modsatte retning. (Grafik: T. M. Jørgensen)

forekomsten af isstrømme vil både være relevant af hensyn til forståelse af det grønlandske isskjolds dynamik og også med henblik på at finde moderne analogier til isstrømme i det skandinaviske isskjold. En sådan analogi vil kunne bidrage med ny viden om den glacial landskabsdannelse, og dermed en dybere forståelse af det landskab vi lever i dag.

Litteratur:

Glacial Earthquakes – Ekström G., Nettles M., Abers G. A., Science vol. 302, 24. okt. 2003, sider 622-624. ■



NYHED!

Geologiske set

Det sydlige Jylland

En beskrivelse af områder af national geologisk interesse

English summary
Deutsche Zusammenfassung

Miljøministeriet • Skov- og Naturstyrelsen

Geologisk set

Det sydlige Jylland

Forfattere: Peter Gravesen, Peter Roll Jakobsen, Merete Binderup og Erik Skovbjerg Rasmussen, alle Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse.

Nu er også lokaliteterne af national geologisk interesse i det sydlige Jylland beskrevet. Bogen indeholder en – ny – sammenstilling af den miocæne udvikling i Syd- og Midtjylland.

Et godt udgangspunkt for at opleve, studere, forstå og formidle de geologiske processer og naturområder.

188 sider, fuldt farveillustreret. Pris 216 kr. eksklusiv moms og forsendelse.

Tidligere titler i serien kan alle stadig leveres:

Fyn og øerne - Kr. 180

Bornholm - Kr. 180

Det mellemste Jylland - Kr. 220

Det nordlige Jylland - Kr. 180

Alle priser er ex moms

Bestil og få vejledning: 6344 1683
Webbutik: www.geografforlaget.dk
Mail: go@geografforlaget.dk

