

ET 'TOMOGRAFI' AF TORNQUIST

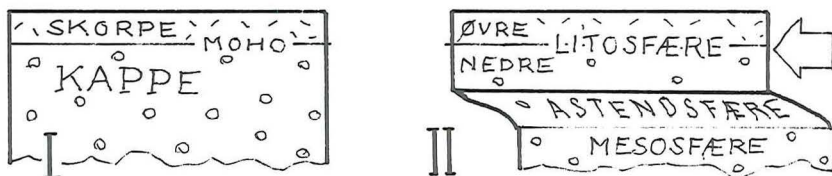
af Asger Berthelsen

Der blev aldrig skrevet mindeord over Alexander Tornquist, da han omkom under et bombeangreb i Graz i 1944. Alt var kaos dengang. Det har heller ikke været muligt at opspore et fotografi af ham, men til gengæld findes der nu indtil flere tomografiske billeder af Tornquist Zonen.

Lad os kalde dem "tomografier". De afslører de dybe strukturer i og under den europæiske lithosfæreplade omkring Tornquist Zonen. De registrerer ikke lysets styrke eller bølgelængde (farve) som et fotografi, men er optaget ved hjælp af seismiske chockbølger med svingninger mellem 10 og 60 mHz. Tomografierne viser derfor ikke strukturerne, som en geolog ville forestille sig dem, men 'kun', hvor meget de forsinker de seismiske bølger, eller får disse til at løbe 'for hurtigt'.

Denne artikel fortæller om, hvordan dette er blevet undersøgt, og om, hvor dybt ned i Jorden strukturerne under Tornquist Zonen har kunnet spores på denne måde.

Først dog et par ord om hovedtrækkene i den ydre Jordklodes opbygning ned til omkring 400 km's dybde. Der er faktisk to overlappende inddelinger, en klassisk og en pladetektonisk, se figur 1.



Figur 1. Klassisk (I) og pladetektonisk (II) inddeling.

Den klassiske inddeling

Den klassiske inddeling, fra før pladetektonikkens fremkomst, skelner mellem skorpe og øvre kappe, som har forskelligt mineralindhold og kemisk sammensætning.

Bortset fra et eventuelt øvre dække af sedimenter består skorpen i kontinenterne overvejende af krystallinske kvarts-feldspat bjergarter (gnejs og

granit), men i den nedre del af skorpen indeholder bjergarterne dog ofte mindre kvarts, og større mængder mørke mineraler. Det medfører, at den seismiske hastighed bliver noget større end i den øvre skorpe.

Den underliggende **kappe** domineres derimod især af ultrabasiske bjergarter med et stort indhold af mineralet olivin. De er tungere og har betydeligt højere seismisk hastighed end skorpebjergarterne.

Den seismisk bestemte grænse mellem skorpen og kappen, hvor jord skælvsbølgernes hastighed stiger ret brat, kaldes **Moho** (*Mohorovičić diskontinuiteten*).

Den pladetektoniske inddeling

I den pladetektoniske inddeling opdeles den ydre del af Jordkloden i sfærer (skaller) efter deres forskellige mekaniske egenskaber. Disse egenskaber er meget afhængige af temperatur (og tryk), mindre af bjergarternes kemiske sammensætning.

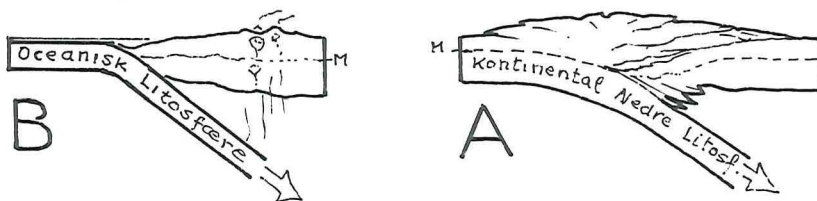
Den øverste sfære, **lithosfæren**, opbygger de tektoniske plader. I en lithosfæreplade bevæger skorpen og den øverste del af kappen sig som et samlet hele. Den seismiske Moho ligger ca. midt i pladen og adskiller **øvre lithosfære** (med skorpebjergarter) fra den **nedre lithosfære** (med kappebjergarter).

Lithosfærepladens undergrænse findes, hvor temperaturen er steget til omkring 1300 ° Celcius. Her begynder **astenosfæren**, hvis kappebjergarter befinder sig nær ved deres smeltepunkt, og derfor opfører sig som et 'blødt lag', der tillader den ovenliggende plade at bevæge sig. Astenosfæren karakteriseres af 'nedsatte' seismiske bølgehastigheder. Mod dybet går den gradvist over i **mesosfæren**, som også opbygges af kappebjergarter; men det meget store tryk, der hersker på denne dybde, gør, at de normalt er faste og mekanisk stive.

Store og små afvigelser

De i figur 1 viste inddelinger gælder dog ikke ved de aktive pladegrænser. Her vendes op og ned på sfærene, se figur 2. Hvor der sker tilvækst af oceanisk lithosfære langs divergerende pladegrænser (midtoceaniske rygge), når astenosfæren tæt op mod havbunden. Hvor der sker indsynkning af oceanisk lithosfære i B-type subduktionszoner under vulkanske øbuer, rager den subducerede flap helt ned gennem astenosfæren. Ved kontinent - kontinent kollision synker fraspaltet nedre lithosfære (A-type subduktion) ned gennem

astenosfæren. B-type subduktion er opkaldt efter den amerikanske geofysiker Benioff, A-typen efter den østrigske alpegeolog Ampferer.

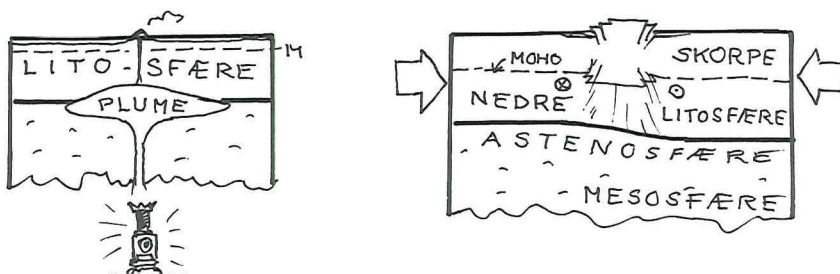


Figur 2. Store afvigelser: Benioff- og Ampferer-type subduktionszoner.

Inddelingen i sfærer gælder også kun i store træk inden for pladerne. Selv her er der afvigelser fra 'normen', se figur 3.

Nogle afvigelser skyldes skorstensagtige opstigende varmestrømme, som måske udgår helt nede fra overgangszonen mellem den nedre kappe og den flydende kerne. De kan udvikle sig til 'hot spots', der krones af magmatiske 'plumes' (se Varv 1990-1). Hvis sådanne 'plumes' med mellemrum gennembyder en lithosfæreplade, der bevæger sig hen over 'plumen', kommer vulkanerne til at ligge 'på stribe'.

Andre afvigelser skyldes, at 'de stive plader' ikke altid er stive eller stærke nok til at modstå de tektoniske spændinger, der overføres fra de aktive pladegrænser. Svage partier inden i en plade kan 'give efter', når spændingerne stiger ekstraordinært. Det skete for eksempel, da Tornquist Zonen i Kridt - tidlig Tertær blev udsat for tektonisk inversion (se Varv 1993-1), fordi der ca. 1000 km længere mod syd indtraf en kontinent-kontinent kollision i Alperne.

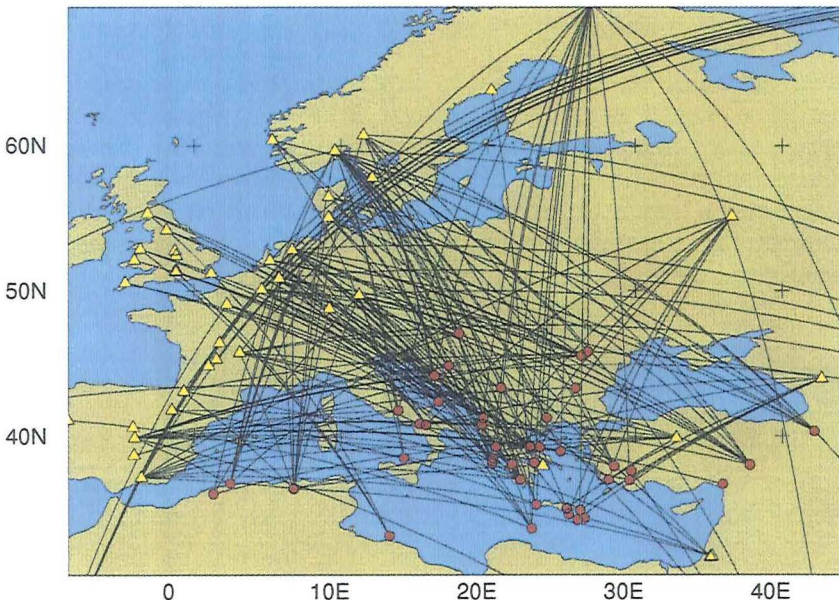


Figur 3. Mere lokale afvigelser: 'hot spot' og 'plume' strukturer (til venstre) og 'intra-plate inversion' som i Tornquist Zonen (til højre).

Hvordan et 'tomografi' bliver til

De større træk i opbygningen af lithosfæren og astenosfæren kan kortlægges ved hjælp af en særlig seismisk metode: *seismisk tomografi* ('seismisk scanning'). Med denne metode, hvori der anvendes en kompliceret matematisk teori, kortlægges variationer i den hastighed, hvormed seismiske P- og S-bølger eller overflade-bølger udbreder sig i forskellige områder og dybder. Herved opnås et tredimensionalt billede af hastighedsfordelingen. Dette billede er mere eller mindre grovmasket, afhængigt af fordelingen af bølgebanerne, bølgelængden, den totale seismiske datamængde, 'baggrundsstøjen' og den sikkerhed, hvormed jordskælvene er lokaliseret.

Benyttes data fra ujævnt fordelte, naturlige jordskælv, opnås et ret grovmasket billede, men hastighedsstrukturer vil blive erkendt ned til mindst 400 km. Anvendes kunstigt frembragte eksplosioner, som udsender chockbølger med lille bølgelængde, og som registreres af et stort antal midlertidigt opstillede seismiske stationer, er opløsningsevnen større, men kun ned til 50-70 km's dybde. Sådanne eksperimenter er også kostbare at udføre.



Figur 4. Seismiske data benyttet af dr. Zielhuis: Jordskælvenes geografiske placering er vist med røde cirkler, bølgebanerne som sorte buestreger, og stationerne, hvor rystelserne blev registreret, ses som gule trekanter.

Selv om der er grænser for, hvad der kan skelnes, når data fra naturlige jordskælv benyttes, har en forskergruppe ved universitetet i Utrecht (Holland) alligevel opnået flere spændende nye resultater. De belyser bl.a. hovedtrækkene i S-bølgers hastighedsfordeling omkring og under Tornquist Zonen - helt ned i mesosfæren. Vi vil se på nogle eksempler fra dr. Alet Zielhuis' disputats fra 1992.

'Tomografier' af Tornquist zonen

Dr. Zielhuis benyttede cirka 200 registreringer af jordskælv med styrke større end 4, som indtraf i perioden 1972 - 1982 i Europa (figur 4). Rystelserne blev registreret digitalt (omsat til talværdier) af de permanente stationer, der da indgik i det internationale seismiske stationsnet. Ved en kompliceret teknik, konstruerede Alet Zielhuis en tredimensional model ud fra S-bølge registreringer og overfladebølgers bølgeform.

Modellen viser, hvor og på hvilken dybde, bølgerne enten forsinkes eller bevæger sig 'for hurtigt' i de enkelte 'celler'. Hastighedsvariationerne beregnes som afvigelse fra, hvad en teoretisk (enkelt opbygget) kappe med en seismisk hastighed på 4,5 km/sek. ville have resulteret i. Variationerne afbildes dels på kort for forskellige dybdeniveauer, og dels i profiler.

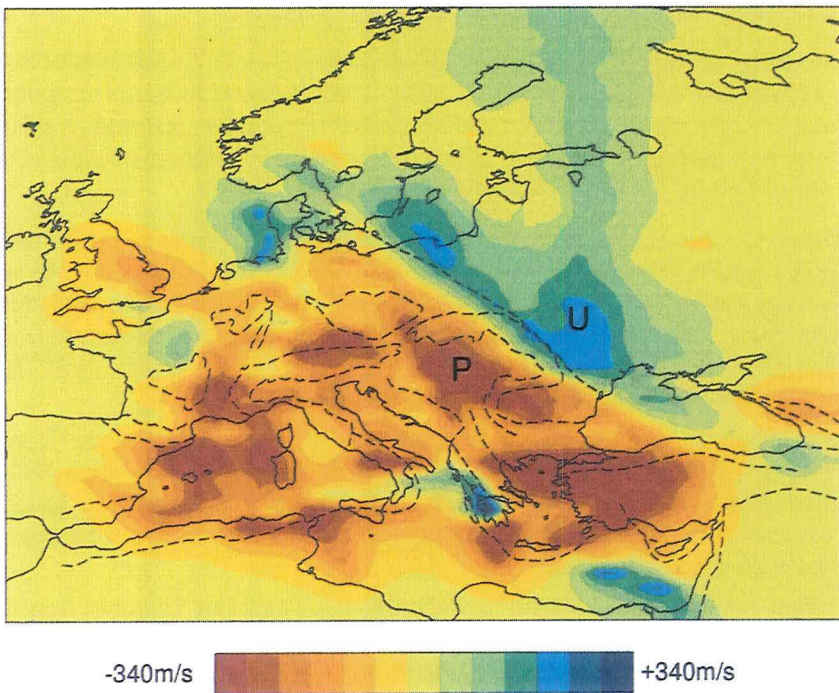
Figur 5 viser et tomografisk billede af hastighedsafvigelse i 80 km's dybde under Europa. De orange og røde farver angiver områder, hvor S-bølge hastigheden er henholdsvis lidt mindre eller klart mindre end den teoretiske. De grønne og blå områder har lidt højere til tydeligt højere hastighed. Bemærk, at grænsen mellem de røde og blå områder stort set følger Tornquist Zonen fra Nordsøen til Sortehavet.

Sammenfaldet er mindst tydeligt inden for 'Tornquist Hånden' (se Varv 1993-1) omkring Danmark. Her er metodens opløselighed åbenbart ikke tilstrækkelig. På grund af seismiske bølgers store bølgelængde, bliver 'cellerne', der her anvendes i beregningerne, for store i forhold til fingertykkelsen i 'Tornquist Hånden'.

I figur 5 optræder den største hastighedskontrast omkring Tornquist Zonen mellem det Pannoniske Bassin (P bag Karpaterbuen) og det Ukrainske Massiv (U i den Østeuropæiske Platform). Den er på 12 %. Her, i en konstant dybde på 80 km, hvor trykket praktisk taget er ens overalt, vil 'varme' kappebjergarter vise lavere S-bølge hastigheder end 'kolde' bjergarter med tilsvarende sammensætning.

Men forskellen i temperaturerne i 80 km niveauet på de to sider af Tornquist Zonen kan ikke forklare hele hastighedskontrasten. De temperaturer, der

hersker i 80 km's dybde, kan beregnes ret nøje ved hjælp af den ved jordoverfladen målte varmestrøm fra kernen, kappen og skorpen, og skønnede værdier for, hvor meget varme, der produceres af bjergarterne over 80-km niveauet. Denne varmeproduktion sker især i skorpen og skyldes henfald af naturligt optrædende radioaktive grundstoffer. Figur 6 viser et kort over varmestrømmen (heat flow) i Europa. 'Heat flow' værdierne er mindst over den gamle skorpe og tykke lithosfære under NØ-Europa, mens der på den anden side af Tornquist Zonen er målt en høj varmestrøm over det Pannoniske Bassin. Men selv om temperaturkontrasten i 80 km niveauet her er den største i hele Europa (ca. 550 °C), forklarer den alligevel kun knapt halvdelen af S-bølgernes hastighedskontrast omkring denne del af Tornquist Zonen. Der må også være en anden, medvirkende årsag!



Figur 5. 'Et Tomografi af Tornquist' i 80 km's dybde, 'optaget' af A. Zielhuis, 1993. Farverne angiver områder i 80 km niveauet, hvor S- bølger med en referencehastighed af 4500 m/s (gult) får formindsket (- 340 m/s : rødt) eller forøget (+ 340 m/s: blå) deres hastighed. De brudte sorte streger viser vigtige tektoniske grænser.

Formodentlig skyldes S-bølgernes kraftige forsinkelse under det Pannoniske Bassin, at kappebjergarterne her er delvist opsmeltede i 80 km's dybde.

S-bølger udbreder sig ikke gennem flydende medier, og vil blive forsinkede i bjergarter, hvor der er små spredte smeltdråber imellem mineralkornene.

Konklusionen må derfor være, at 80 km niveauet under det Panoniske Bassin når ned i selve astenosfæren. På den anden side af Tornquist Zonen, under den Østeuropæiske Platform, hvor lithosfæren er betydeligt tykkere, ligger det kortlagte 80 km niveau 'oppe i' den nedre litosfæres 'kolde' kappebjergarter.

Er det Tornquist skyld ?

'Aha ! ville nogen måske sige, 12 % hastighedsafvigelse! Det viser jo klart, at Tornquist Zonen også i 80 km's dybde er udviklet som en vigtig tektonisk grænse'. Og denne 'nogen' ville måske blive helt overbevist om Tornquist Zonens dybe oprindelse ved at erfare, at der i samme område i 140 km's dybde endnu kan observeres mindst 6 % hastighedskontrast omkring Tornquist Zonen.

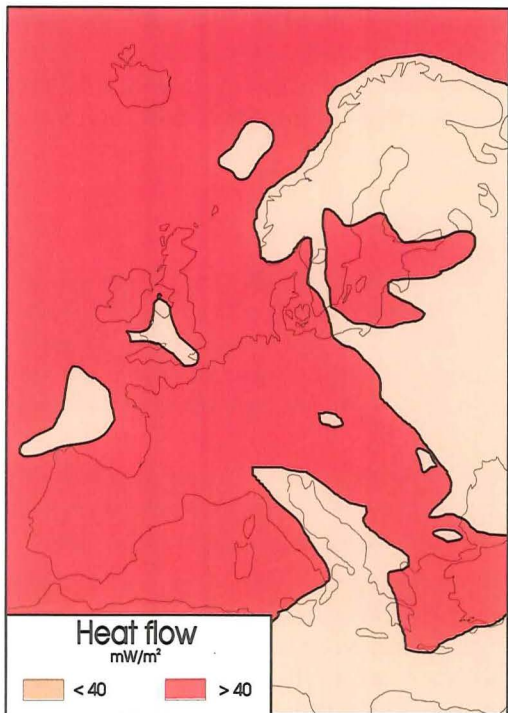
Nu er der bare det ved det, at man næppe bør give 1. Verdenkrig skylden for alle de dødsfald, som er indtruffet efter 1918! Det er også et stort spørgsmål, om det er Tornquist Zonen, der er skyld i de nævnte hastighedskontraster.

Den nordvestlige del af Tornquist Zonen fra Danmark til det sydlige Polen blev anlagt og udformet mellem slutningen af Karbontiden og begyndelsen af Tertiærtiden, for ca. 300-60 mill. år siden (se Varv 1993-1). Karpaterne og det Pannoniske Bassin er derimod meget yngre geologiske dannelser; strukturerne i lithosfærepladen er her af ung-Alpin alder, og Moho anses for at være yngre end 24 mill.år.

Den kraftige hastighedskontrast må derfor skyldes, at Tornquist Zonen er blevet 'ødelagt', da der udvikledes en ung-Alpin subduktionszone under Karpaterne med ledsagende øbue-vulkanisme og 'back arc spredning' under det Pannoniske Bassin. Når 'zonen' tilsyneladende fremtræder så tydelig her, skyldes det altså, at der senere blev 'pyntet' på tomografiet. Det er blevet kraftigt 'retoucheret' af den ung-Alpine tektonik.

En tilsvarende, meget stor hastighedskontrast ses længere mod syd i Figur 5. Her bliver den Afrikanske plade - umiddelbart syd for Kreta og Cypren - den dag i dag subduceret skråt ned under Grækenland og Tyrkiet, mens der er aktiv 'back-arc' spredning inden for det Ægæiske Øhav. Heller ikke denne kontrast kan tilskrives anlægget og inversionen af Tornquist Zonen.

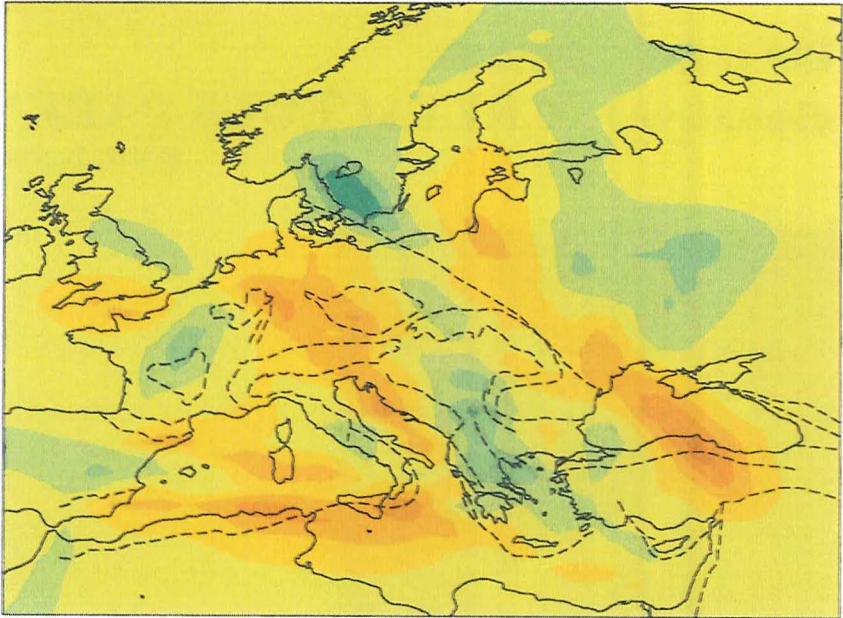
Bemærk i øvrigt, at den gamle afrikanske plade og den adriatiske mikro-plade, som er brækket af Afrika, begge viser relativt lave 'heat flow' værdier (figur 6).



Figur 6. Varmestrømmens størrelse i Europa målt i milli-Watt/m². Den fuldt optrukne kurve svarer til 40 mW/m².

I figur 7 ses hastighedsvariationerne for S-bølger i 300 km's dybde. Nu er fordelingen helt anderledes, og kontrasterne er mindre. Et højhastighedsbælte med flere maxima strækker sig fra Sydsverige til Grækenland, skråt over Tornquist Zonen. Men her er vi også nede i en dybde, der svarer til astenosfærens nedre del eller den øvre del af mesosfæren. Det samme højhastighedsbælte ses i øvrigt endnu tydeligere i 400 km's dybde - hvad det så end betyder? En rimelig forklaring er, at de enkelte maxima i denne dybde flyder helt sammen, fordi den tomografiske opløsning aftager med dybden.

Dr. Zielhuis mener, den sydlige del af bæltet i 300 km niveauet skyldes, at der optræder dybt subducerede, kolde litosfæreflapper under Grækenland og under det Pannoniske Bassin. Men den høje hastighed i 300 km niveauet un-



Figur 7. Tomografi fra 300 km's dybde optaget af A.Zielhuis 1993

der Sydsverige lader sig ikke forklare ved hjælp af den Alpine tektonik. De meget markante anomalier under Sydsverige er noget af en gåde.

En sikker slutning kan dog uddrages af 'tomografierne' i dr. Zielhuis' disputats. De viser klart, at Tornquist Zonen, hvad enten den er ægte eller retoucheret, kun kan spores ned til bunden af den europæiske lithosfæreplade. På større dybder, i astenosfæren og mesosfæren optræder der helt andre hastighedsstrukturer. Der hersker et helt andet tektonisk miljø. Det stemmer godt overens med den pladetektoniske teori!

EFTERSKRIFT:

Forfatteren skylder dr .Zielhuis en stor tak for så beredvilligt at have computertegnet figur 4, 5 og 7 i farver og for kritisk at have gennemlæst teksten. Forfatten har dog stadig ansvaret for mulige fejl og misforståelser.

Kilde: Zielhuis A.,1992: S-wave velocity below Europe from delay-time and waveform inversions. *Mededel. van de Faculteit Aardwetenschappen der Rijksuniversiteit te Utrecht, No.88, 148 sider.*