

2011

geoviden

GEOLOGI OG GEOGRAFI NR. 1

An aerial photograph of a rugged coastline. The foreground shows steep, rocky cliffs meeting the dark blue sea. In the middle ground, there is a green golf course and a small town with white buildings. The background shows a larger landmass under a cloudy sky.

BORNHOLM–SKÅNE REGIONENS TEKTONISKE UDVIKLING

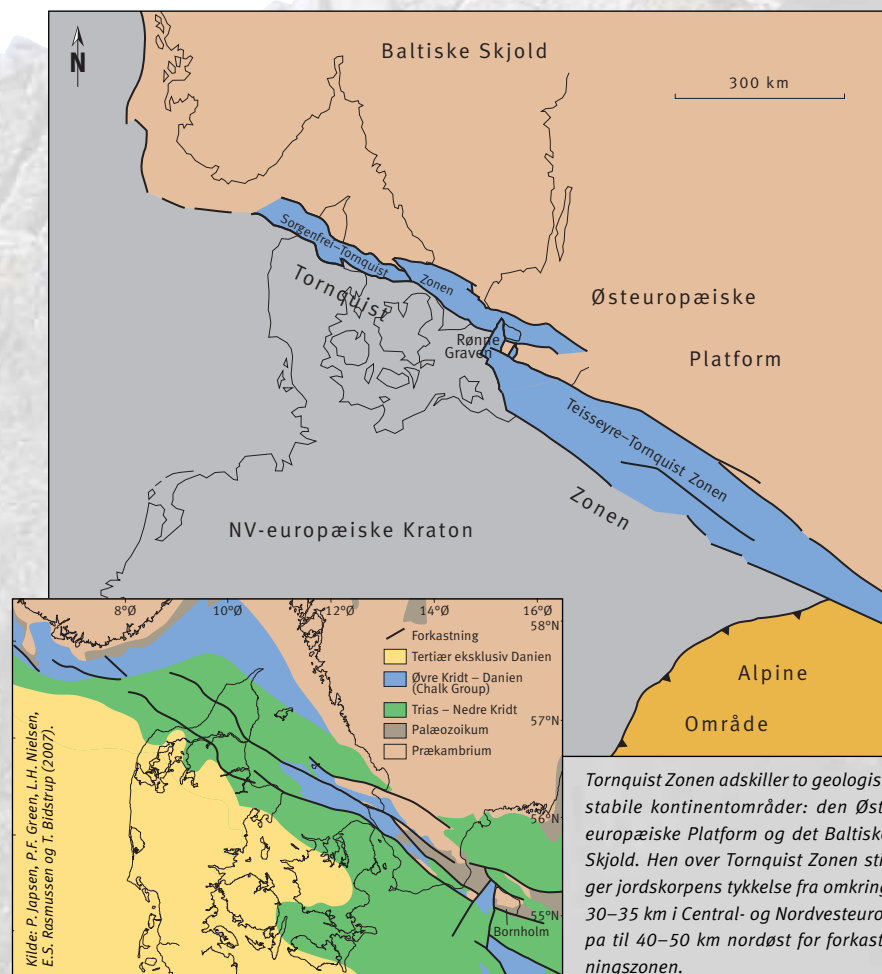
JORDSKÆLV I SORGENFREI–TORNQUIST ZONEN ?

BORNHOLM–SKÅNE REGIONENS TEKTONISKE UDVIKLING

Den geologiske opbygning af Bornholm og Skåne hænger sammen med udviklingen af Sorgenfrei–Tornquist Zonen, hvor højtliggende grundfjeldshorste er karakteristiske elementer i Bornholm–Skåne segmentet mod sydøst. Kattegat–Skagerrak segmentet mod nordvest er præget af dybtliggende grabenbassiner, hvor sedimenterne blev foldet og presset op langs forkastninger i den afsluttende deformationsfase i Sen Kridt. Foldningen af sedimenterne og hævnningen af horstblokkene i Sorgenfrei–Tornquist Zonen har hidtil været henført til kompression opstået ved kontinentkollisionen mellem Europa og Afrika, der førte til opfoldning af Alperne i Sydeuropa. I denne artikel vises det, at den strukturelle udvikling i Sorgenfrei–Tornquist Zonen i stedet kan knyttes sammen med vulkanske intrusioner i Bornholm–Skåne området i sen Palæozoikum og med udviklingen af Nordsø-regionen i Mesozoikum.

Tornquist Zonen er en ca. 2000 km lang forkastningszone, der gennemskærer den centrale del af det europæiske kontinent fra Skagerrak til Sortehavet. Forkastningszonen adskiller to geologisk stabile kontinentområder: Den Østeuropæiske Platform og det Baltiske Skjold mod nordøst og det nordvesteuropæiske kraton (dvs. et stabilt jordskorpeområde) mod sydvest. Tornquist Zonen er underinddelt i Sorgenfrei–Tornquist Zonen og Teisseyre–Tornquist Zonen. De to zoner overlapper hinanden omkring Bornholm, hvor Rønne Graven binder de to zoner sammen på tværs.

Sorgenfrei–Tornquist Zonen ligger på overgangen mellem det Danske Bassin og det Baltiske Skjold. Sedimenterne i Sorgenfrei–Tornquist Zonen blev aflejret i Mesozoikum i tilknytning til en gennemgribende forkastningsaktivitet under indsykning af det Danske Bassin og hævnning af det Baltiske Skjold. Den



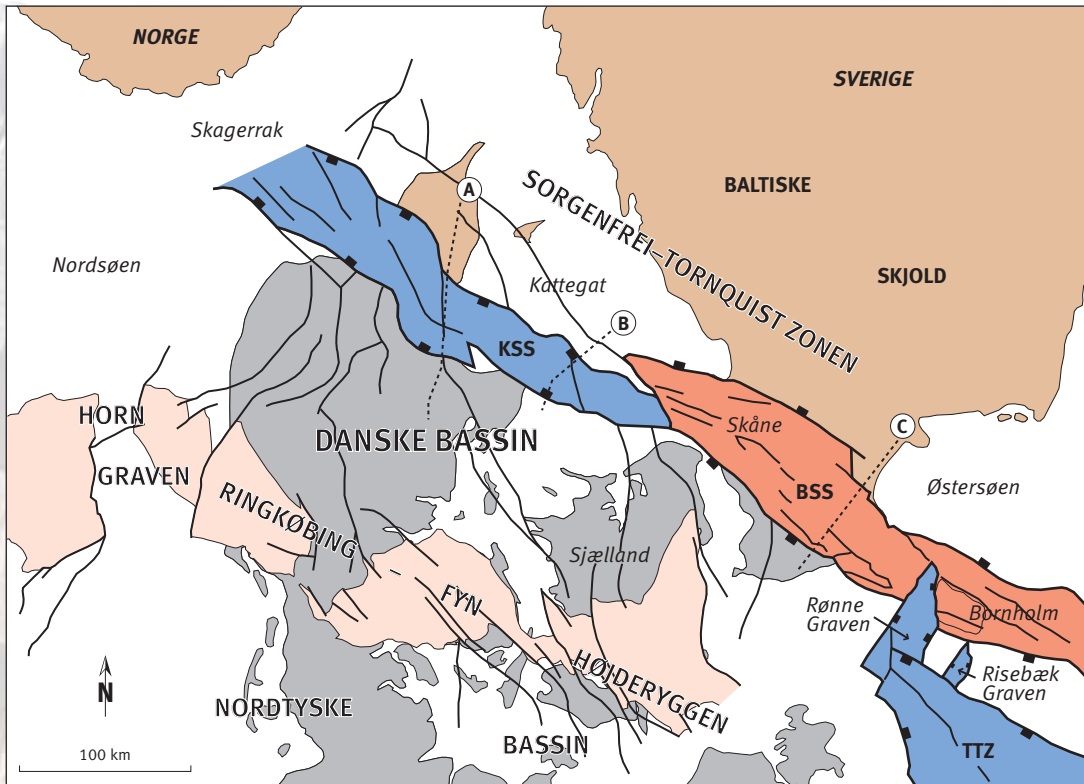
Geologisk kort over Danmarks undergrund.

Tornquist Zonen adskiller to geologisk stabile kontinentområder: den Østeuropæiske Platform og det Baltiske Skjold. Hen over Tornquist Zonen stiger jordskorpens tykkelse fra omkring 30–35 km i Central- og Nordvesteuropa til 40–50 km nordøst for forkastningszonen.

geologiske opbygning er illustreret på profiler (A–C, se næste side) hen over Sorgenfrei–Tornquist Zonen. Med baggrund i den strukturelle opbygning kan Sorgenfrei–Tornquist Zonen deles i to segmenter: Det dybtliggende Kattegat–Skagerrak segment og det højtliggende Bornholm–Skåne segment. Kattegat–Skagerrak segmentet er præget af kilometer-tukke sedimentserier aflejret på nedforkastede blokke, (se boks side 17 om forkastninger). Underlaget for sedimenterne ligger i dag i mere end 9 km's dybde i Nordjylland og Skagerrak. I Bornholm–Skåne segmentet er strukturen vendt på hovedet. Forkastningsaktiviteten har

medført, at underlaget for de mesozoiske sedimentter her ligger over havniveau som de højeste områder i en række fremtrædende horstblokke: Bornholm Blokken og Romele Åsen, Søder Åsen, Kullen og Hallands Åsen m.fl. i Skåne.

Underlaget for de mesozoiske sedimentter lå oprindeligt på samme niveau tæt ved jordoverfladen i hele området. Indsykningen af det Danske Bassin har således ført til udviklingen af et sedimentfyldt bassin med et relief under havniveau, der er i samme størrelsesorden som Himalaya-bjergenes relief over havniveau, se side 4.



Kilde: O. Grauersen, 2009.

Geologiske regioner i Danmark. Det Danske Bassin er placeret nord for Ringkøbing-Fyn højderyggen i den østlige del af Nordsø Bassinet, hvor Sorgenfrei-Tornquist Zonen danner overgang til det Baltiske Skjold. Medens det Danske Bassin er fyldt med sedimenter, så består skjoldet af gnejs- og granitter i nederoderede bjergkæder fra Prækambrium. Linjerne A-C viser placeringen af profilerne A-C. KSS: Kattegat-Skagerrak segmentet; BSS: Bornholm-Skåne segmentet; TTZ: Teisseyre-Tornquist Zonen.

OLE GRAVERSEN

Lektor, IGG.

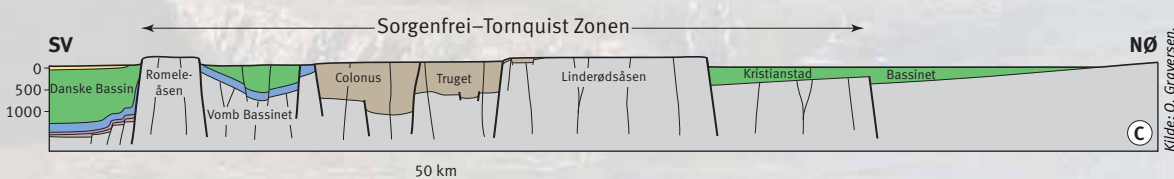
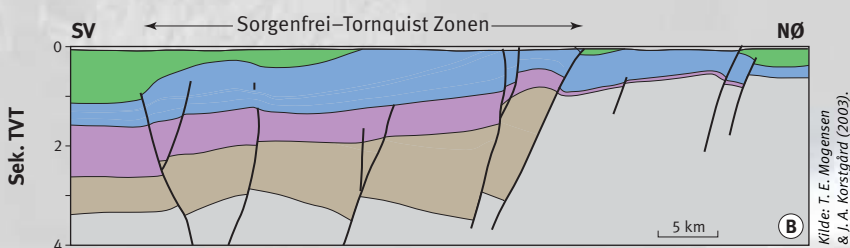
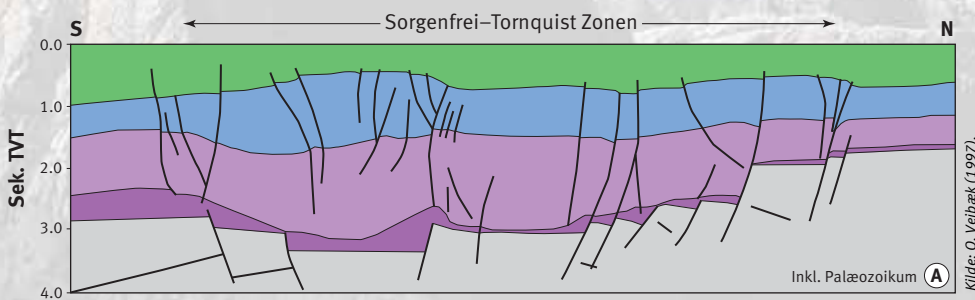
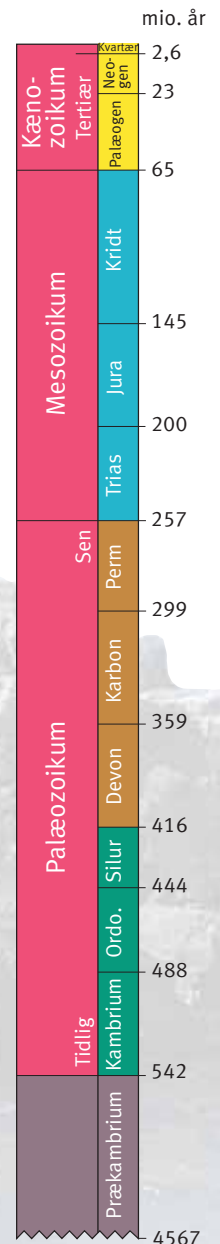
oleg@geo.ku.dk

PAUL M. HOLM

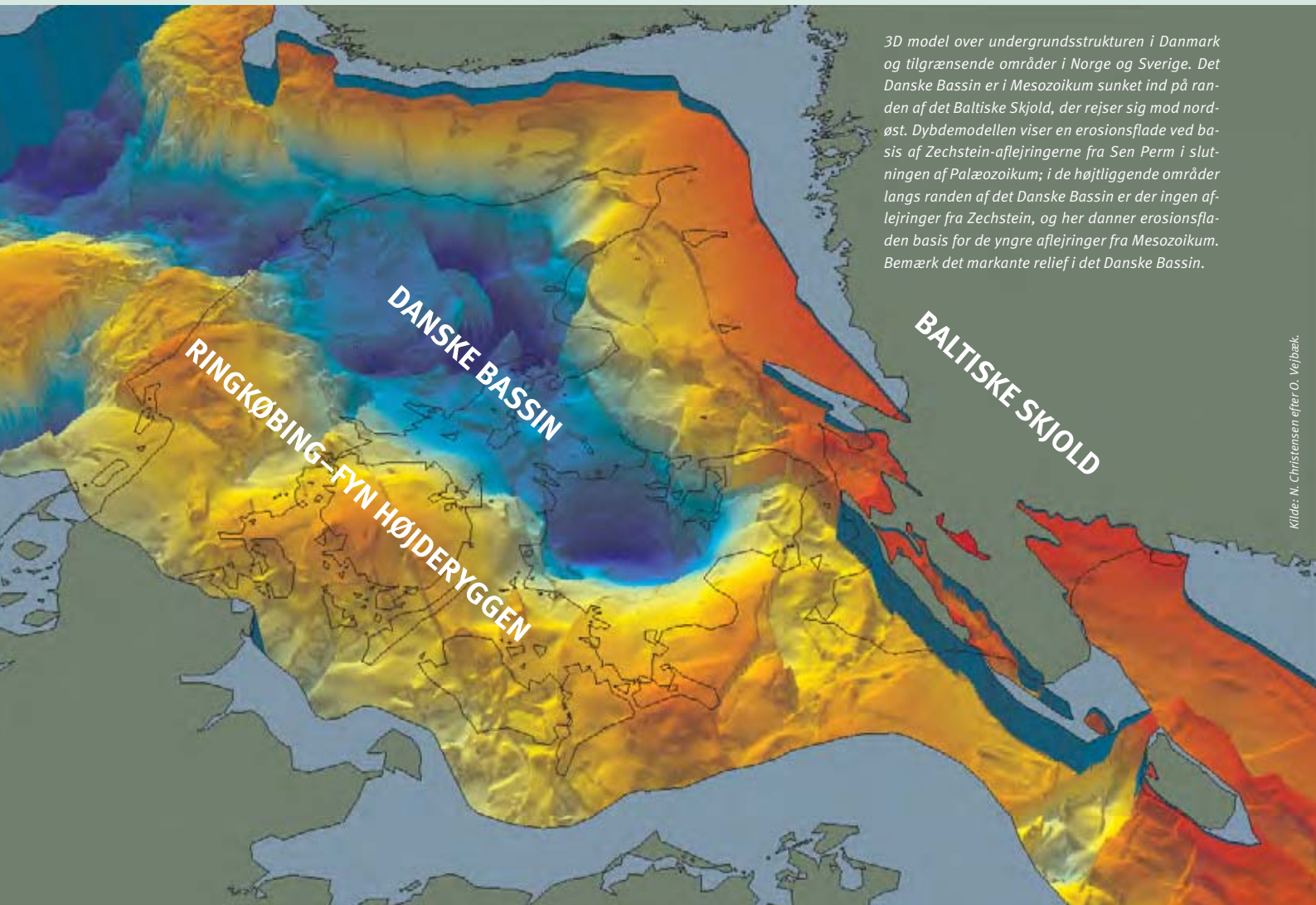
Lektor, IGG.

paulmh@geo.ku.dk

Geologisk tidsskala



Geologiske profiler på tværs af Sorgenfrei-Tornquist Zonen. Placeringen af profilerne er vist på det geologiske kort over Danmark og Skåne ovenfor. A og B: Kattegat-Skagerrak segmentet; C: Bornholm-Skåne segmentet. Se signaturforklaring side 8.

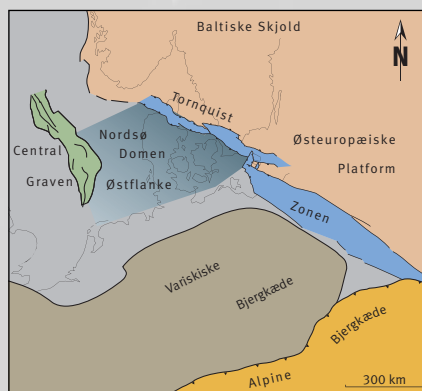


3D model over undergrundsstrukturen i Danmark og tilgrænsende områder i Norge og Sverige. Det Danske Bassin er i Mesozoikum sunket ind på randen af det Baltiske Skjold, der rejser sig mod nord-øst. Dybdemodellen viser en erosionsflade ved basis af Zechstein-aflejringerne fra Sen Perm i slutningen af Palæozoikum; i de højtliggende områder langs randen af det Danske Bassin er der ingen aflejringer fra Zechstein, og her danner erosionsfladen basis for de yngre aflejringer fra Mesozoikum. Bemærk det markante relief i det Danske Bassin.

Kilde: N. Christensen efter O. Vejlbæk.

STRUKTUREL UDVIKLING OMKRING SORGENFREI-TORNQUIST ZONEN UNDER SKIFTENDE TEKTONISKE RAMMER

I tidlig Palæozoikum udgjorde det nuværende Skandinavien den vestlige del af det omfattende Baltika kontinent, der strakte sig til Uralbjergene. Kontinentets gamle bjergkæder var allerede ved afslutningen af Prækambrium blevet eroderet ned til et omfattende fladt område, et peneplan. Herefter trængte havet ind over Baltika kontinentet og fornyet sedimentation medførte, at der i det tidlige Palæozoikum blev opbygget en omfattende platform af sedimenter, Baltika Platformen, oven på det prækambriske grundfjeld, som bestod af gnejser og granitter. Senere blev den nordvestlige del af platformen hævet og eroderet, hvorved grundfjeldet igen blev blotlagt. Denne struktur betegnes som det Baltiske Skjold.

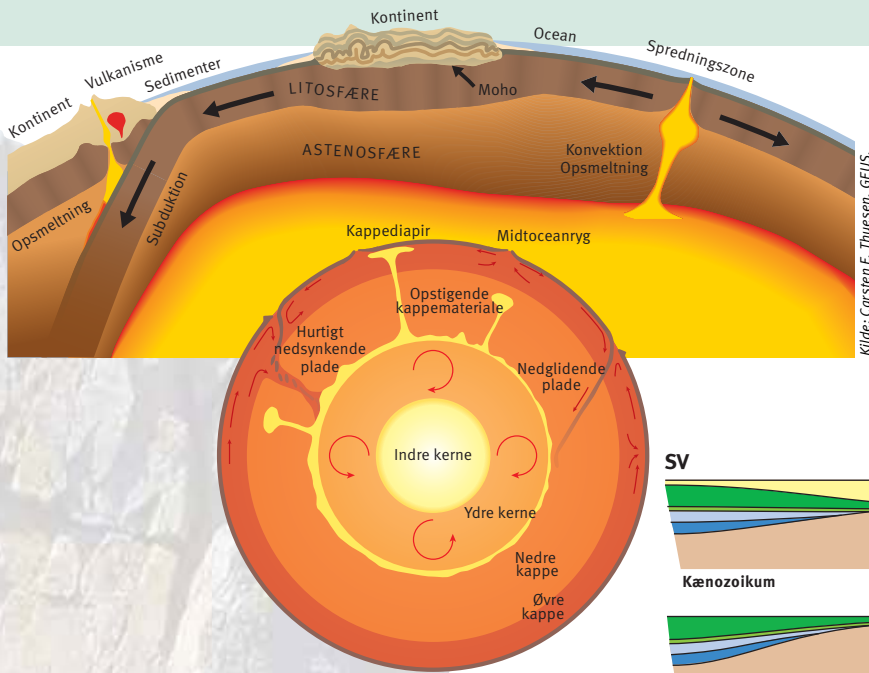


Tektoniske regioner i Central- og Nordvesteuropa knyttet til udviklingen og tolkningen af Sorgenfrei-Tornquist Zonen.

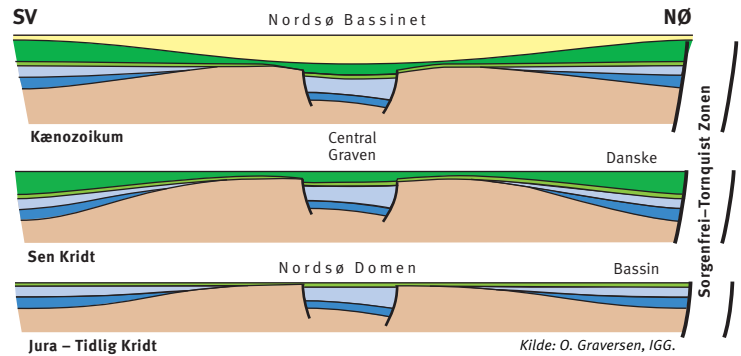
FORKASTNINGER OG VULKANISME I SEN PALÆOZOIKUM

Udviklingen af Sorgenfrei-Tornquist Zonen begyndte i Sen Palæozoikum, hvor den vestlige del af Baltika platformen var udbredt under det nuværende Danmark og Sverige. Nedbrydningen af platformen begyndte i Karbon, hvor området var placeret i forlandet nord for den variskiske bjergkæde, der blev foldet op i Centraleuropa i løbet af Karbon. Forlandet var samtidig under strækning, og Baltika platformen blev brudt op i flere større grabenzoner. Deformationen gennemtrængte stedvis jordskorpen, og flydende magma trængte fra kappen op igennem skorpen og ud på jordoverfladen, hvor magmaet gennem vulkanudbrud

Kilde: O. Grønvold, IGG.



Jordens opbygning med indre kerne, ydre kerne, kappe og skorpe. Forstørrelsen viser Jordens ydre del, som består af litosfæren (den stive del) og den underliggende bløde astenosfære. Litosfæren er igen delt i skorpen og den underliggende kappe (den litosfæriske kappe). Lit(h)o- er græsk for stenagtig, ast(h)eno- for blød, og en sfære er en skal eller kugle. Litosfæren danner de stive plader, der dækker hele Jordens overflade, og hvis indbyrdes bevægelser kaldes pladetektonik.



I Jura og Kridt hævede Nordsø Domen sig i den centrale del af Nordsø-regionen, hvor Central Graven skar sig ned i toppen af domestrukturen. Nordsø Domen og Central Graven døde ud i begyndelsen af Kænozoikum, og Nordsø Bassinet sank ind til et skålformet bassin over Central Graven.

dannede udbredte lavadækker. En sværm af vulkanske gange fra Sen Karbon og Tidlig Perm gennemskærer således Sorgenfrei-Tornquist Zonen i Skåne.

Den tektoniske aktivitet og vulkanismen ophørte i Tidlig Perm. Ved indgangen til Sen Perm var området blevet eroderet helt ned, og ophøret af den tektoniske deformation og vulkanismen er markeret med en vinkeldiskor-

dans (se boks side 17) ved basis af de overliggende Zechstein-aflejringer. I Nordsø-regionen var sedimentationen i Sen Perm domineret af passiv indsynkning under aflejring af Zechstein saltbassinene.

DYNAMISK UDVIKLING AF SORGENFREI-TORNQUIST ZONEN OG NORDSØ-REGIONEN I MESOZOIKUM

I Mesozoikum fortsatte udviklingen af Sorgenfrei-Tornquist Zonen som en intrakontinental forkastningszone placeret på overgangen imellem det Baltiske Skjold og det Danske Bassin. Den dynamiske udvikling var knyttet til skiftende blokbevægelser hen over forkastningszonen. Den største indsynkning fandt sted i den nordøstlige del af det Danske Bassin og i Kattegat-Skagerrak segmentet, der blev etableret som en langstrakt grabenstruktur. Udviklingen af sedimentationsbassinernes struktur i Kattegat-Skagerrak segmentet blev styret af forkastningsblokkernes dynamik og fandt sted i vekselvirkning med indsynkningen i det Danske Bassin. I den overordnede tektoniske ramme var det Danske Bassin placeret på den hæn-

gende blok (se boks side 17) i forhold til det Baltiske Skjold, der blev udviklet på den liggende blok. Sorgenfrei-Tornquist Zonen blev således op igennem Mesozoikum udviklet som en kompleks forkastningszone på overgangen mellem den hængende blok mod sydvest og den liggende blok mod nordøst.

Den mesozoiske forkastningsaktivitet indledtes i Trias med en betydelig indsynkning og aflejring af op til 4-5 km tykke sedimentserier i Kattegat-Skagerrak segmentet og det Danske Bassin. Sedimentationen i det danske område var knyttet til østranden af Nordsø Blokken, der strakte sig ud over Nordsø-regionen.

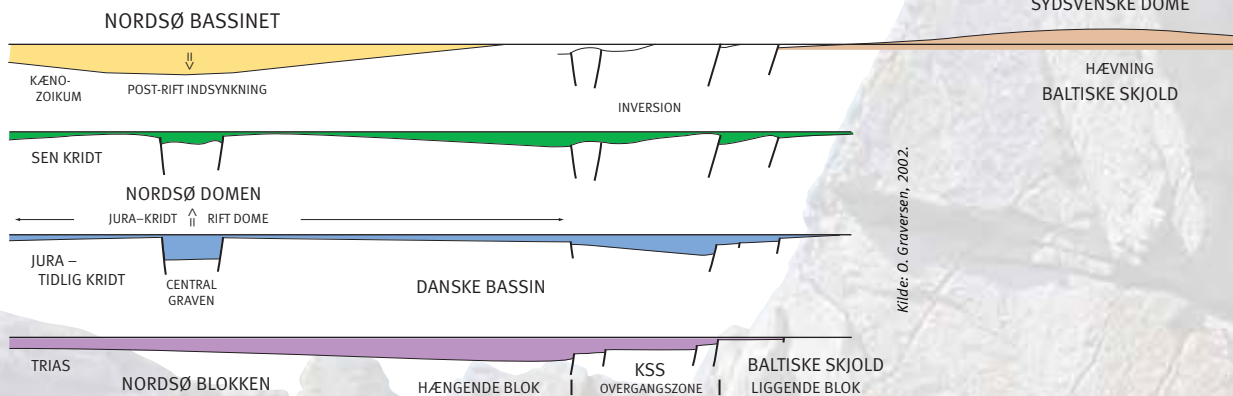
Efter Trias ændredes den tektoniske ramme igen: I Jura og Kridt udvikledes en rift-dome i

Nordsø-regionen, hvor Central Graven sank ind på toppen af domestrukturen. Det Danske Bassin blev herved placeret på østflanken af Nordsø Domen, der grænsede op til Sorgenfrei-Tornquist Zonen, se figuren ovenfor.

Ved overgangen til Sen Kridt ophørte graben-indsynkningen i Kattegat-Skagerrak segmentet og blev afløst af bassin-inversion. Strækning af skorpen under graben-indsynkningen blev nu afløst af sammenpresning og foldning af sedimentterne, der blev skubbet op over graben. Samtidig flyttede hovedindsynkningen mod sydvest fra Sorgenfrei-Tornquist Zonen og ind i det Danske Bassin, hvor op til flere kilometer-tykkede sedimentter blev aflejret langs nordøst-randen af Nordsø Domen i Sen

VSV

ØNØ

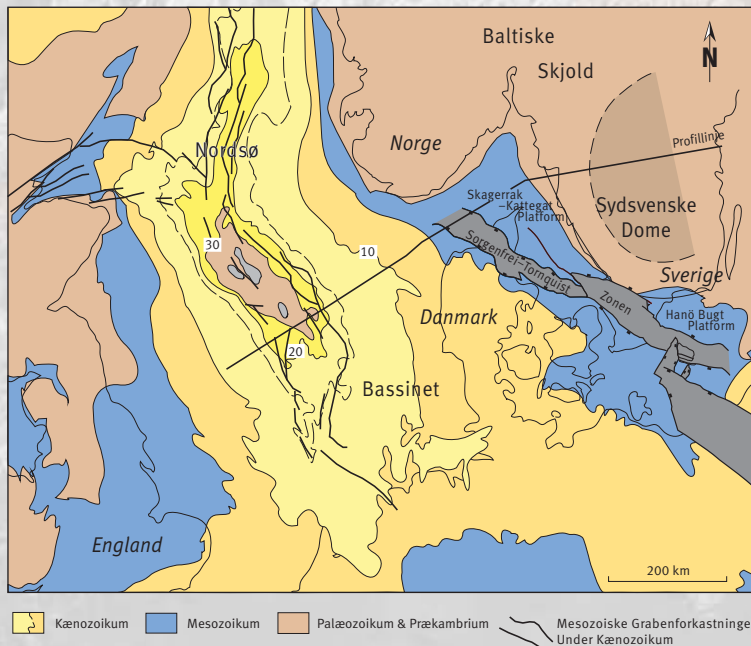


Kilde: O. Grønvold, 2002.

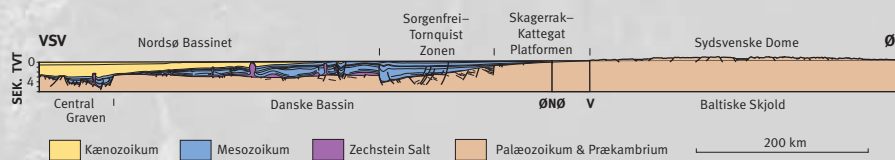
Model for udviklingen af den centrale og østlige Nordsø-region og den Sydsvenske Dome i Mesozoikum og Kænozoikum. Modellen viser udviklingen af Sorgenfrei-Tornquist Zonen (profil B – se kortet side 3) i Kattegat-Skagerrak segmentet (KSS) på overgangen mellem det Danske Bassin og det Baltiske Skjold.

Kridt. Ændringen af den geologiske udvikling omkring Sorgenfrei-Tornquist Zonen skete samtidig med, at Nordsø Domen begyndte at synke sammen langs Central Graven.

I takt med den tektoniske udvikling i Nordsø-regionen op igennem Mesozoikum ændres hældningen af lagene i Sorgenfrei-Tornquist Zonen. I Trias hældede lagene i Kattegat-Skagerrak segmentet mod sydvest hen over en serie trappforkastninger med maksimal indsynkning i det Danske Bassin. Den maksimale indsynkning rykkede i Jura – Tidlig Kridt ind i Kattegat-Skagerrak segmentet, hvor lagene blev kippet mod nordøst, se figuren ovenfor. I Sen Kridt rykkede den maksimale indsynkning tilbage til det Danske Bassin, medens lagene i Kattegat-Skagerrak segmentet roterede tilbage til en sydvestlig hældning, og samtidig blev inverteret.



Kilde: O. Grønvold, 2002.



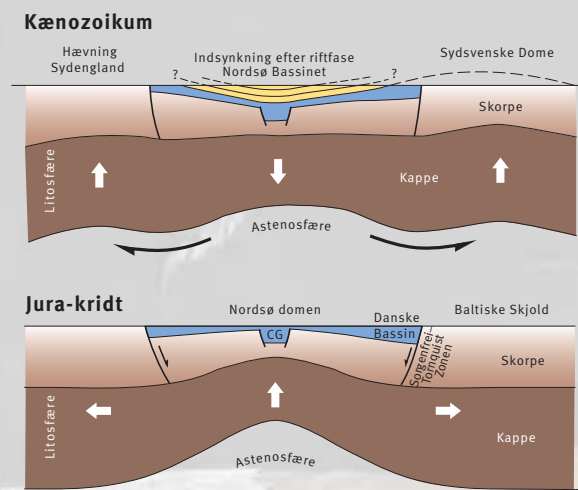
Kilde: O. Vejlbæk.

Geologiske strukturer i det østlige Nordsø Bassin. Se teksten for en nærmere beskrivelse.

ETABLERING AF NORDSØ BASSINET OG DEN SYDSVENSKE DOME I TERTIÆR

Nordsø Domen og Central Graven døde ud i begyndelsen af Tertiær (Palæogen), og Nordsø Bassinet sank ind til et skålformet bassin over Central Graven. Under indsynkning af Nordsøbassinet ophørte aktiviteten i Sorgenfrei-Tornquist Zonen, og det Baltiske Skjold blev løftet op i en regional domestruktur, den Sydsvenske Dome.

Model der viser, hvor ændringerne på jordoverfladen er knyttet sammen med ændringer i astenosfæren: Kappen stiger op under Nordsø Domen i Jura-Kridt. Når dommen synker ind i Tertiær, fortrænges kappematerialet i astenosfæren ud til siderne, hvor litosfæren løftes tilsvarende op i England og Sydsverige. CG = Central Graven.



Kilde: O. Grønvold, 2007.

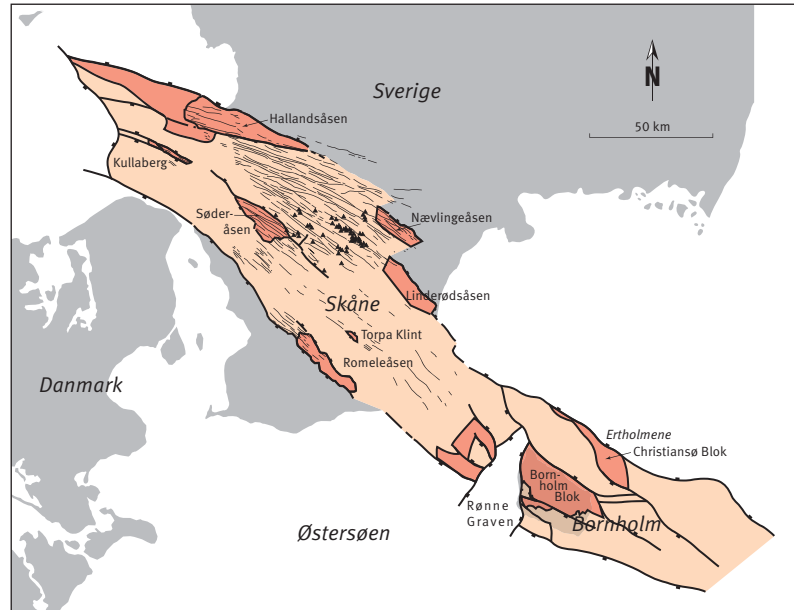
GEOLOGISK OG STRUKTUREL UDVIKLING I BORNHOLM–SKÅNE SEGMENTET

Selv om hele Sorgenfrei–Tornquist Zonen har været underlagt den samme tektoniske udvikling, er strukturerne i Kattegat–Skagerrak segmentet og Bornholm–Skåne segmentet alligevel meget forskellige. Medens Sorgenfrei–Tornquist Zonen er skjult i dybet i Kattegat–Skagerrak segmentet, så markerer Bornholm–Skåne segmentet sig tydeligt på jordoverfladen. Skåne og Bornholm er således domineret af en række højtliggende grundfjeldshorste, hvoraf de højeste hæver sig mere end 200 m.o.h. I Skåne rejser horstene sig over yngre nedforkastede sedimentbassiner fra Mesozoikum, hvorimod grundfjeldet i Kattegat–Skagerrak segmentet ligger dybt begravet under mesozoiske sedimenter. Bornholm–Skåne segmentet afviger også ved, at der i Skåne har været en betydelig vulkansk aktivitet både i sen Palæozoikum og Mesozoikum, se side 11 om vulkaner i Skåne.

Den strukturelle udvikling i Bornholm–Skåne segmentet er domineret af blokforkastninger forårsaget af spændinger i jordskorpen. Den primære deformation finder sted i det krystalline grundfjeld, der er underlag for sedimenterne. Den krystalline skorpe er sprød, og spændingerne udløses ved dannelse af sprækker og forkastninger. Men de overliggende sedimenter er mere eller mindre plastiske, og i den sydvestlige randzone er sedimenterne blevet deformeret som folder med mindre forskydninger over de underliggende stive blokke.

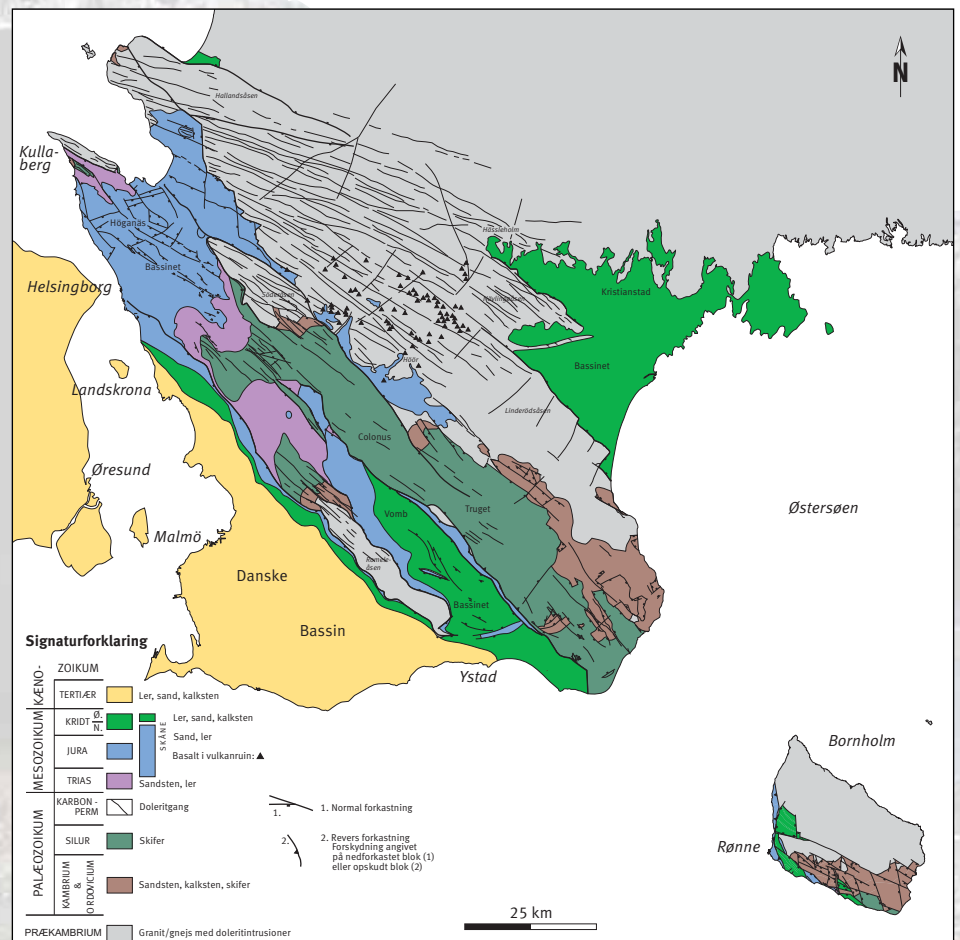
PALÆOZOIKUM

Udviklingen i Sen Palæozoikum tager udgangspunkt i nedbrydningen af den tidlige palæozoiske Baltika platform under omfattende blokforkastningsaktivitet i det variskiske forland. Omfattende aflejringer fra Kambrium, Ordovicium og Silur er således bevaret i det nedforkastede Colonus Trug og tilgrænsende områder hen over Skåne. På overgangen Karbon–Perm opstod en vulkansk graben, der er markeret af en nordvest–sydøst-orienteret gangsværm, der gennemskærer de ældre bjergarter. Ved overgangen til Mesozoikum skete en omfattende erosion af den vulkanske graben og de ældre bjergarter, der danner underlaget for de mesozoiske sedimenter.



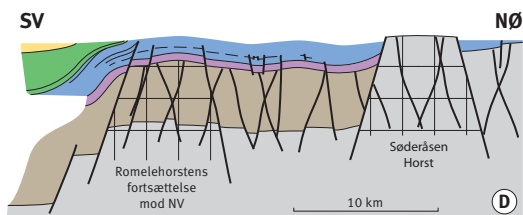
Kilde: O. Grønvold, 2009.

Bornholm–Skåne segmentet er karakteriseret af 9 grundfjeldshorste og magmatiske intrusioner i Sen Palæozoikum (gange: sorte linjer) og Mesozoikum (vulkaner: trekantede).



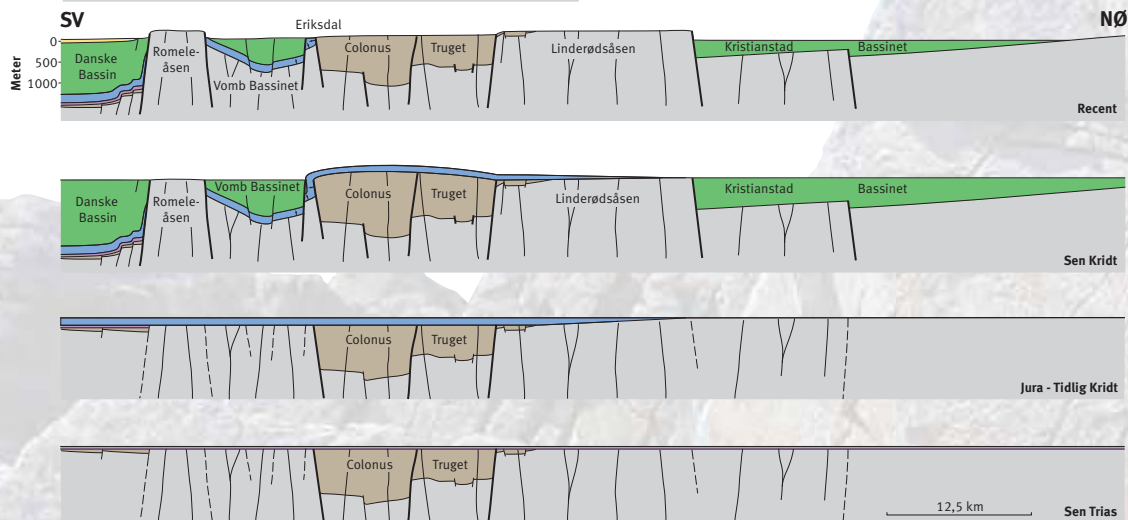
Geologisk kort over undergrunden i Skåne og på Bornholm.

Kilde: O. Grønvold, 1988. Skånes geologi efter Sveriges Geologiska Undersøgning.



Geologisk profil over det vestlige Skåne.

Profil på tværs af Bornholm-Skåne segmentet i det sydøstlige Skåne (profil C på kortet nedenfor) med rekonstruktion af udviklingen i Sen Trias, Jura – Tidlig Kridt og Sen Kridt.



Signaturforklaring

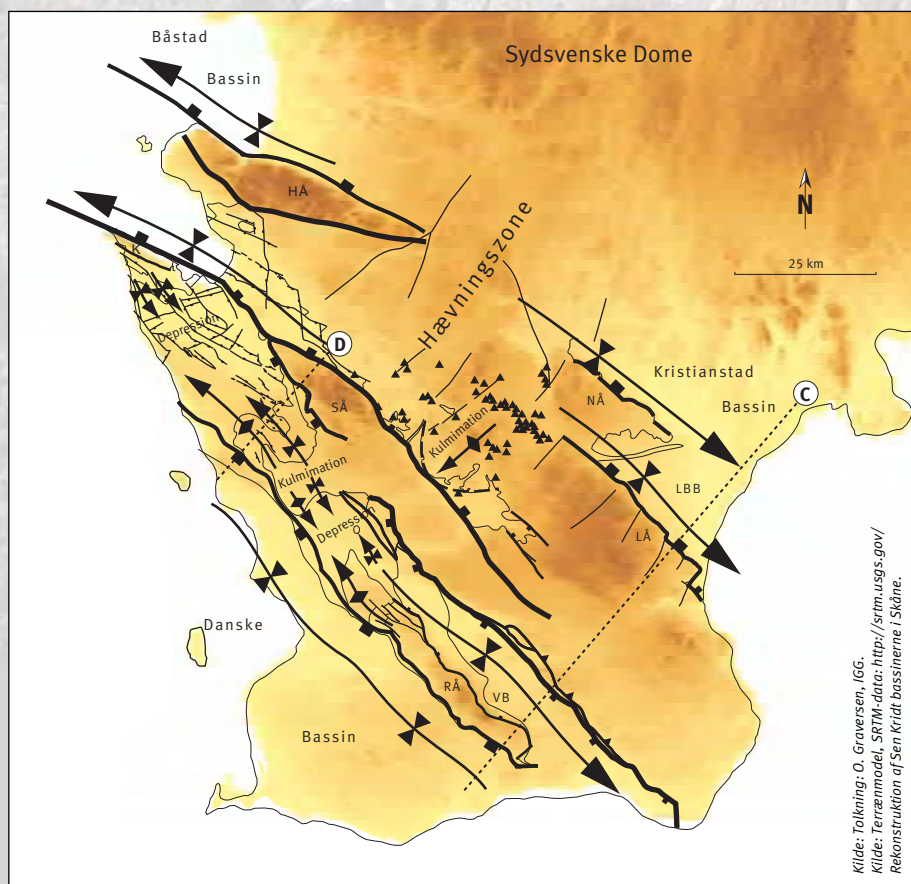
ZOIKUM	Symbol
TERTIÆR	Orange
KRIDT Ø. N.	Grøn
JURA	Blå
TRIAS	Lilla
KARBON - PERM	Grå
SILUR	Beige
ORDOVICIUM	Brun
KAMBRIUM	Gråbrun
PRÆKAMBRIUM	Hvid
FORKASTNING	Linje med piler

MESOZOIKUM

Op igennem Mesozoikum er Bornholm-Skåne segmentet præget af gentagne tektoniske faser, der veksler mellem indsynkning med aflejring og hævnning med erosion. I Sen Trias opstår den omfattende forkastningsaktivitet i det Danske Bassin, og store flodsletter breder sig ud over området. I Skåne aflejres jura-sedimenterne oven på trias-lagene mod sydvest; mod nordøst medfører fornyet forkastningsaktivitet hævnning og erosion af trias-lagene, og jura-sedimenter blev her aflejret direkte på grundfjeldet. I Jura og Kridt blev der intruderet en række vulkaner i det centrale Skåne.

SEN KRIDT

I Sen Kridt sker den endelige strukturering af Sorgenfrei-Tornquist Zonen. Hovedindsynkningen i det Danske Bassin rykker ind til Romeleåsen. Og nordøst for Romeleåsen etableres Vomb Bassinet, der synker ind langs en kompleks forkastningszone langs sydvestranden af Colonus Truget, hvis sydvestlige rand samtidig inverteres. Den tidligere normal forkastning ændres til en revers forkastning, der trækker de overliggende jurallag med op; lagene bliver overkippet og kommer til at hælde stejlt med bunden i vejret. Nye forkastningsbassiner afgrænses mod nord langs Hallandsåsen, hvor Båstad Bassinet aflejres på Skagerrak-Kattegat Platformen. Mod sydøst etableres Kristianstad Bassinet langs Nævlingeåsen og Linderødsåsen i Skåne. Kristianstad Bassinet udgør den nordvestlige del af Hanø Bugt Platformen, der mod sydøst grænser op til Christiansø Blokken.



Højdekort over Skåne med mesozoiske strukturelementer. Sammenlign med geologisk kort side 7. K: Kullaberg; HÅ: Hallandsåsen; NÅ: Nævlingeåsen; LÅ: Linderødsåsen; SÅ: Søderåsen; RÅ: Romeleåsen; VB: Vomb Bassinet. Trekanter = vulkaner.

I Sen Kridt skar forkastningsblokke i det sydøstlige Skåne sig ind mod kernen af Bornholm-Skåne segmentet; Vomb Bassinet fra sydvest og Linderød Bugt bassinet fra nordøst. Forkastningerne langs randen af bassinet hæl-

der alle ud mod kridtaflejringerne. Nævlinge forkastningen og Linderød forkastningen overlapper hinanden, og imellem de to forkastninger hælder Nævlingeåsen mod sydøst og synker som en flad rampe ned under kridtaflejringerne.

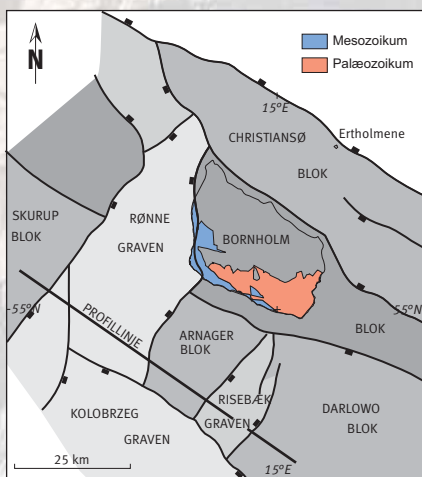
gerne. Tilsvarende er en rampe udviklet mod sydvest, hvor de begrænsende forkastninger langs det Danske Bassin og Vomb Bassinet overlapper hinanden. De overlappende forkastninger er udviklet symmetrisk på de to flanker af Bornholm-Skåne segmentet. Mod

nordøst er Båstad Bassinet og Kristianstad Bassinet afsnøret fra hinanden. Underlaget i de to bassiner hælder i modsatte retninger; Båstad Bassinet mod nordvest og Kristianstad Bassinet mod sydøst. I området imellem de to bassiner findes spredte erosionsrester fra

kridthavet, der viser at bassinerne tidligere har hængt sammen tværs over Skåne. Den centrale del af Skåne må således være blevet hævet, hvorved sedimentdækket er blevet eroderet og fjernet.

BORNHOLM

I overgangszonen mellem Bornholm-Skåne segmentet og Teisseyre-Tornquist Zonen skærer Rønne Graven sig ind i Bornholm-Skåne segmentet fra sydvest. Sammenhængen i Bornholm-Skåne segmentet bliver herved brudt, og Bornholm Blokken og de tilgrænsende forkastningsblokke i overgangszonen bliver delvist afsnøret fra Skåne segmentet.



Forkastningsblokke omkring Bornholm. Farverne angiver beliggenheden af det prækambriske underlag for sedimenterne: Mørke farver angiver højtliggende basement, og lyse farver viser dybtliggende basement.

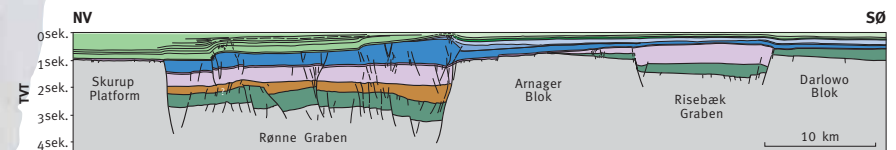
RØNNE GRAVEN

Rønne Gravens indsynkning og sedimentation op igennem Mesozoikum står i skærende kontrast til udviklingen i Bornholm-Skåne segmentet. Mens grundfjeldet synker ind til flere kilometers dybde i Rønne Graven, så ender grundfjeldet som de højeste områder i de udbrede horstblokke i Bornholm-Skåne segmentet. Indsynkningen af Rønne Graven fandt sted i samspil med de tilgrænsende forkastningsblokke og Risebæk Graven mod sydøst. Den mesozoiske indsynkning startede i Trias. I Sen Trias gik indsynkningen i stå, og aflejringer

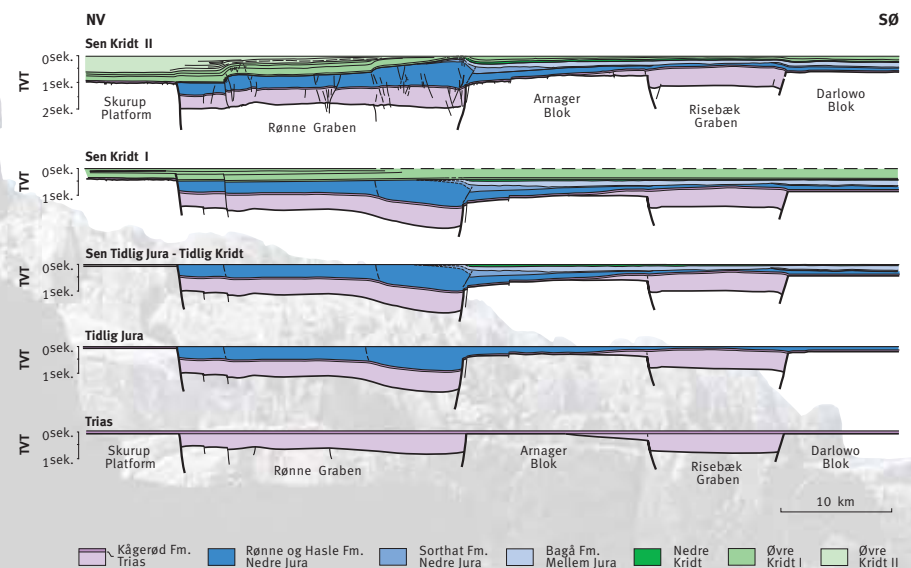
gerne spreder sig ud over hele området. Efter en kompleks udvikling op igennem Jura og Tidlig Kridt gik blokbevægelserne i stå igen. I lighed med udviklingen i Kattegat-Skagerrak segmentet inverteres sedimenterne i Rønne Graven i Sen Kridt under indsynkning af Skurup Blokken mod nordvest og hævnning af Bornholm Blokken og Arnager Blokken mod øst og sydøst.

DYNAMISK UDVIKLING AF BORNHOLM BLOKKEN

Bornholms undergrund er bygget op af højtliggende grundfjeld, der udgør de højeste områder på den centrale og nordlige del af øen. De



Geologisk profil hen over Rønne Graven og Risebæk Graven sydvest for Bornholm.



Rekonstruktion af den geologiske udvikling i tilknytning til Rønne Graven og Risebæk Graven op igennem Mesozoikum. I Sen Kridt bliver Rønne Graven inverteret; dvs. at sedimenterne bliver presset sammen og skubbet op over Rønne Graven i store folder.

tidligere sammenhængende sedimentserier fra Palæozoikum og Mesozoikum er brudt op i forkastningsblokke, der indtager de lavereliggende, nedforkastede områder på den vestlige og sydlige del af øen. De palæozoiske sedimentserier dominerer mod syd og sydøst, mens de mesozoiske sedimentserier indtager de sydvestlige områder samt et par mindre forekomster på Sydbornholm. Juraaflejringerne langs vestkysten tilhører den østlige forkastningszone af Rønne Graven, der således er tilgængelig på Bornholm.

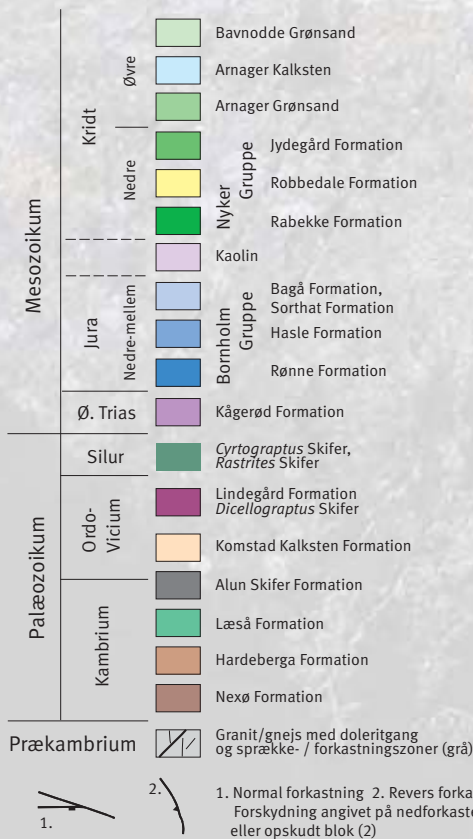
Nedbrydningen af Baltika Platformen fra tidlig Palæozoikum skete i Sen Palæozoikum og i Mesozoikum samtidig med forkastningen



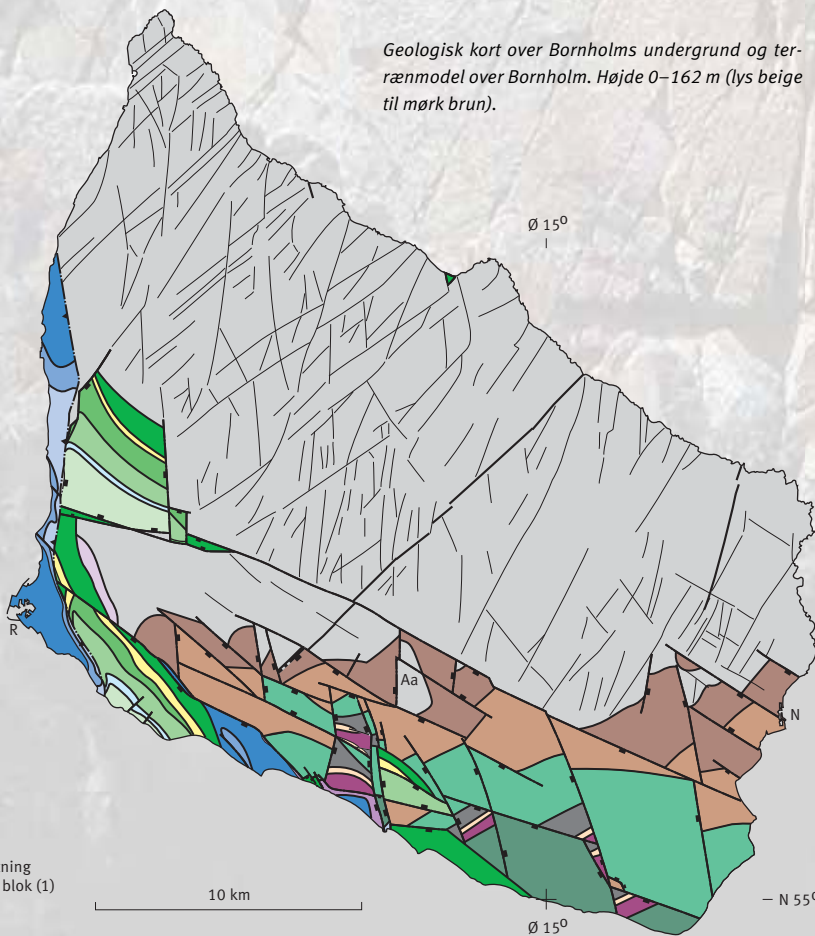
Copyright Kort- og Matrikelstyrelsen; reproduceret med tilladelse (G. 15-03).

Geologisk kort over BORNHOLMS UNDERGRUND

Signaturforklaring



Geologisk kort over Bornholms undergrund og terrænmodel over Bornholm. Højde 0–162 m (lys beige til mørk brun).



O. Grøvsen, IGG efter Gry (1969a,b), Münther (1973), Hamann (1987), Nielsen (1988) og Grøvsen (2009).

af de mesozoiske sedimenter. De palæozoiske forkastninger var knyttet til bevægelser i det variskiske forland. De ældste forkastningsblokke er knyttet til de nordvest-sydøst-orienterede forkastninger i tidlig Karbon. De yngre vestnordvest-østsydøst-orienterede forkastninger formodes at være udviklet i tilknytning til den opsprækning, der førte til intrusionen af de basaltiske gange i Bornholm-Skåne segmentet i sen Karbon – tidlig Perm.

Forkastningsudviklingen i Mesozoikum blev indledt i Trias med indsynkning af Rønne Gra-

ven og Risebæk Graven. På Bornholm er Trias-sedimenterne i Rønne Graven begravet under Jura-lagene langs vestkysten. I sen Trias var der pause i forkastningsaktiviteten og et sedimentdække bredte sig ud over hele regionen. I Jura videreførtes sedimentationen på Bornholm Blokken, og under fornyet forkastningsaktivitet fortsatte indsynkningen af Rønne Graven, mens nye forkastningsblokke samtidig skar sig ind langs sydkysten af Bornholm. Inden starten af Kridt blev Bornholm Blokken hævet og sedimenterne fra Trias og Jura blev

fjernet ved erosion. I Tidlig Kridt var forkastningsaktiviteten igen gået i stå: Bornholm Blokken blev atter oversvømmet og nye sedimenter aflejret. Efter en kortere pause fortsatte sedimentationen i Sen Kridt. Efterfølgende forkastningsaktivitet medførte, at Kridt-aflejringerne blev brudt op i en række forkastningsblokke. Kridt-aflejringerne er bevaret på de nedforkastede blokke, men fjernet af erosion i de øvrige områder. Inversionen af Rønne Graven afslutter den tektoniske udvikling.

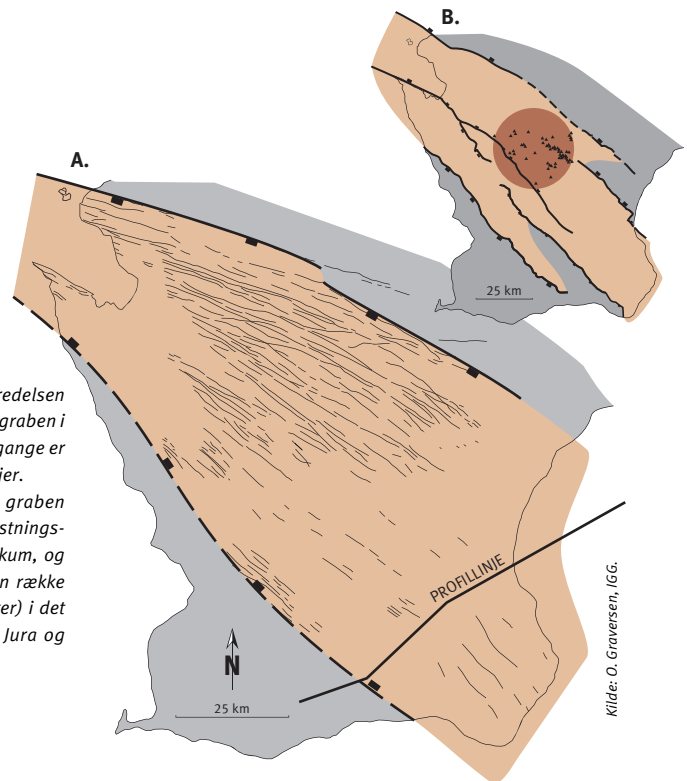
VULKANER I SKÅNE

Skåne har i flere perioder i Sen Palæozoikum og Mesoikum været præget af vulkansk aktivitet knyttet til Sorgenfrei-Tornquist Zonen. Den mest udbredte vulkanisme fandt sted fra slutningen af Karbon til et stykke ind i Perm. Under opsprækning og udtynding af litosfæren med riftdannelse på overfladen til følge, blev der i denne periode dannet magma i den underliggende astenosfære, se figur side 5. De basaltiske smelter trængte op i skorpen og som gange ind i sprækkerne på langs i denne rift, og derfra ud på jordoverfladen som lava fra langstrakte spaltevulkaner. Udviklingen af den vulkanske riftzone fandt sted over mange mio. år, og kun vulkaner langs enkelte sprækker var i udbrud samtidig. Tilsvarende riftvulkanisme kendes i vore dage bl.a. fra den østafrikanske Rift Valley og de aktive spredningszoner på Island. Vulkanismen menes at være knyttet til en opstigende diapir af særlig varm kappe, der kunne opsmelte delvist under riftzonens fortyndede litosfære. Efter vulkanismens ophør er området blevet eroderet, så det nu kun er de basaltiske tilførselsgange i den øverste del af jordskorpen, der er blevet bevaret. Udstrækningen af den oprindelige rift er således bestemt på baggrund af udbredelsen af de basaltiske gange.

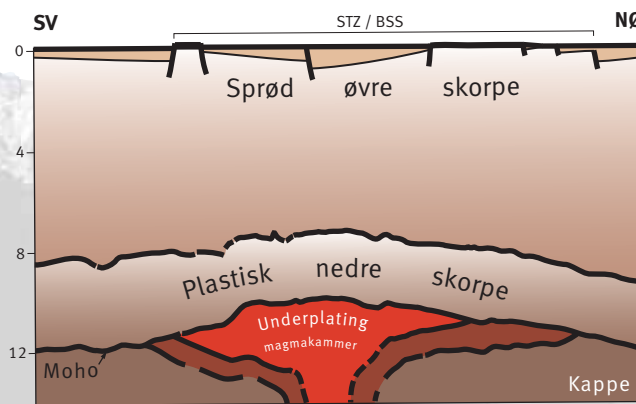
Opstigningen af magma fra astenosfæren gennem den litosfæriske kappe hindredes af skorpens lave massefylde, og det førte til dannelsen af store magmakamre i en dybde af 30–40 km ved bunden af skorpen. Denne proces

A. Model for udbredelsen af Perm-Karbon-graben i Skåne. Intrusive gange er vist som sorte linjer.

B. Perm-Karbon graben brydes op i forkastningsblokke i Mesozoikum, og kraterløb føder en række vulkaner (trekanter) i det centrale Skåne i Jura og Kridt.

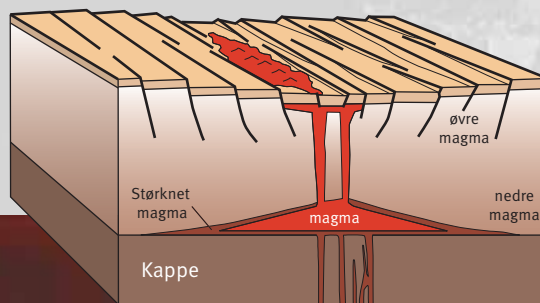


Kilde: O. Grøvsen, IGG.



Profil gennem skorpen på tværs af Sorgenfrei-Tornquist Zonen i Skåne. Moho betegner skorpe-kappe-overgangen.

Kilde: O. Grøvsen, IGG efter BABEL Working Group (1993).



Kilde: Lotte Melchior, GEUS, modificeret efter Upton m.fl. 1990, Varv 1/1998.

Model af vulkansk graben.

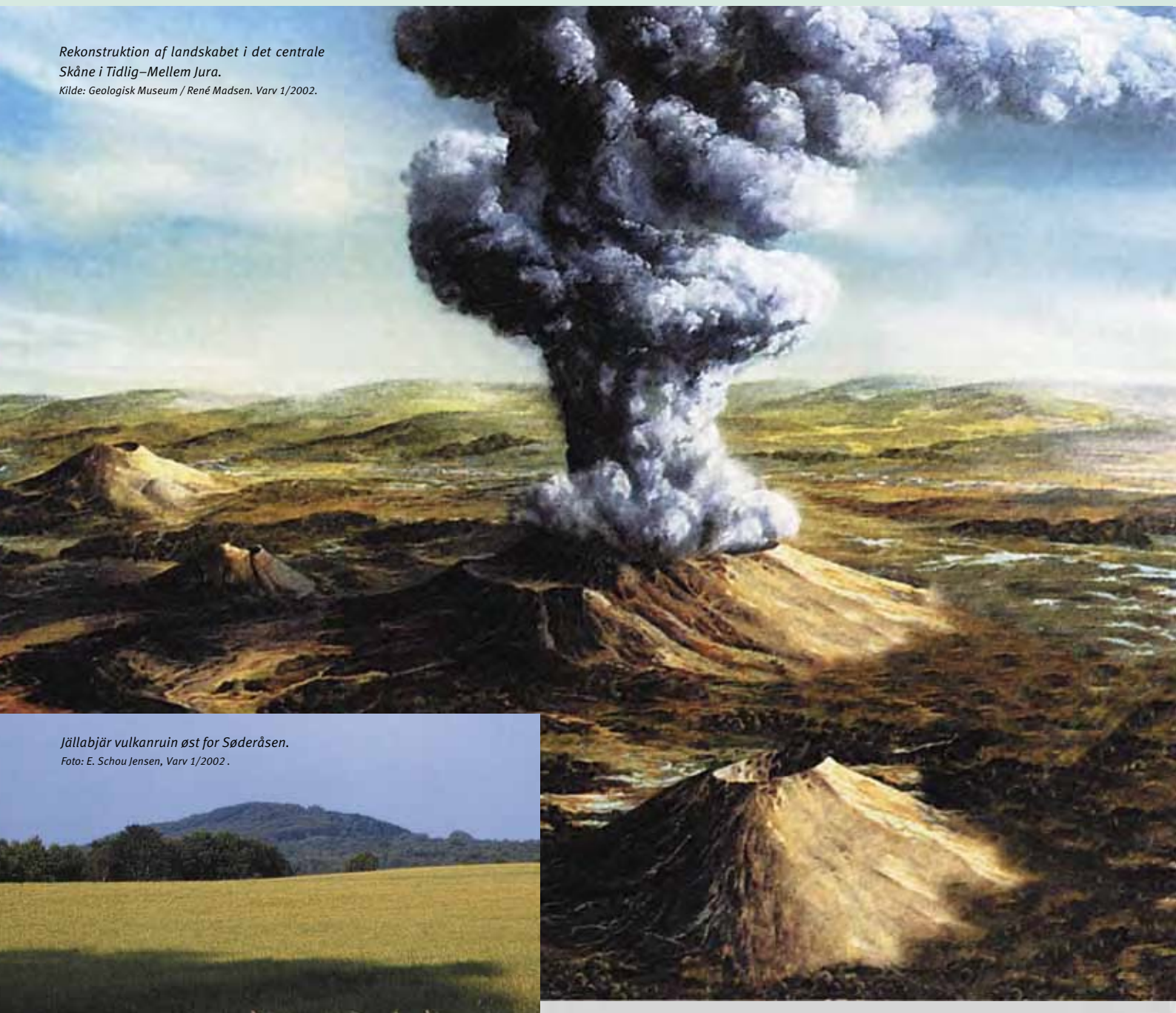


Foto: Guðmundur E. Sigvaldason.

Spalteudbrud i vulkansk graben i Island 1980. Tilsvarende må man forestille sig, at vulkanismen har taget sig ud i Skåne i Sen Karbon – Tidlig Perm. Foto venligst udlånt af Institute of Earth Sciences, Island.

Rekonstruktion af landskabet i det centrale Skåne i Tidlig–Mellem Jura.

Kilde: Geologisk Museum / René Madsen. Varv 1/2002.



Jällabjär vulkanruin øst for Søderåsen.

Foto: E. Schou Jensen, Varv 1/2002.

kaldes underplating, se figur side 11. Udbredelsen af magmakammeret, og udbredelsen af de intrusive gange ved overfladen svarer til afgrænsningen af Sorgenfrei–Tornquist Zonen. På tyngdefeltskortet (side 14) fremstår Bornholm–Skåne segmentet som en markant positiv tyngdeanomali, der tilskrives intrusionen af de tungere basaltiske bjergarter i dette skorpe-segment.

VULKANISME I JURA–KRIDT

I den centrale del af Skåne er der identificeret et vulkanområde fra Mesozoikum baseret på vulkanruiner og vulkanrør intruderet i jordskorpen i Tidlig–Mellem Jura og på overgangen Tidlig–Sen Kridt. Den mesozoiske vulkanisme i det centrale Skåne omfatter resterne af

mere end 100 vulkanbygninger. I modsætning til den udbredte spaltevulkanisme i Karbon–Perm, er der i Mesozoikum tale om enkeltstående vulkanbygninger begrænset til et udbredelsesområde på ca. 35 km i diameter. Omkring halvdelen af vulkanerne er intruderet i en nordvest–sydøst-orienteret langstrakt zone, der følger Sorgenfrei–Tornquist Zonen's overordnede udstrækning. Lavastrømme og rester af vulkaners føderør er de hyppigste spor af vulkanismen, men også vulkanske sedimenter forekommer. Fødegange til nogle forekomster skærer sedimenter fra Jura, og såvel relateret palynologisk materiale som palæomagnetiske målinger på udvalgte forekomster indikerer en tidlig Jura alder. Isotop-dateringer giver ligeledes hovedsaglig tidlig Jura aldre, medens nog-

le få forekomster synes at være langt yngre, nemlig fra Tidlig Kridt.

De skånske lavaer og kraterrør har stærkt basiske og relativt primitive sammensætninger. Magmaerne stammer alle fra den relativt dybtliggende kappe og er karakteriseret ved en ringe grad af opsmeltning. En del forekomster har indeslutninger af materiale fra kappen, som viser, at vulkanerne blev forsynet af et magma, der steg direkte op til overfladen, formodentlig fra en underplating intrusion ved basis af skorpen. Opsmeltningen må være forårsaget af en strækning af litosfæren. Hvis vulkanismen fandt sted både i Jura og i Kridt, vil dette være et yderligere indicium på at vulkanismen er direkte forårsaget af ekstension i litosfæren.

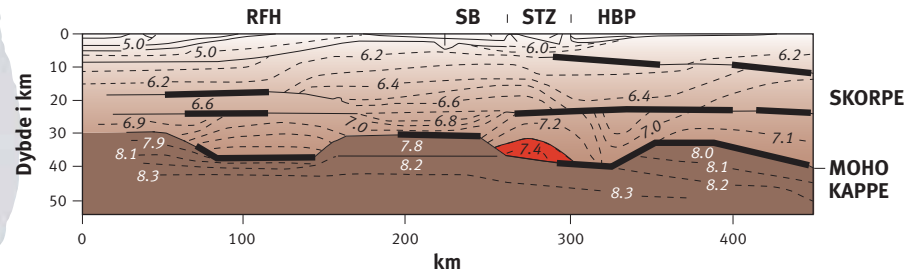
SKORPESTRUKTUR OG GEOFYSIK

Kendskab til jordskorpens struktur og fysiske egenskaber er vigtigt for forståelsen af de geologiske processer, som har været aktive under Jordens udvikling. For at få et indblik i undergrundens strukturelle opbygning udføres dyb-seismiske eksperimenter, som giver information om variationer i lydbølgnehastigheden ned gennem Jordens skorpe og den øverste kappe. Seismiske eksperimenter er baseret på, at lydbølger fra kraftige eksplosioner (fx store dynamitladninger eller atombomber) eller jordskælv udbreder sig gennem Jorden med forskellig hastighed, afhængig af hvilke bjergarter der forekommer. Analyse og tolkning af seismiske bølgers forløb i undergrunden kan fortælle om opbygningen af Jordens skorpestruktur og dens dannelse. Bearbejdning af seismiske data giver således et visuelt indtryk af de lag og strukturer i undergrunden, som giver anledning til lydbølgernes udbredelsesbaner. Refraktions-seismiske data er baseret på tolkning af seismiske løbetider for både refrakterede bølger (dvs. bølger som afbøjes og udbreder sig gennem lagene) og reflekterede bølger (dvs. bølger som kastes tilbage ved en laggrænse). Den refraktionsseismiske metode benyttes til at bestemme de seismiske hastigheders fordeling i undergrunden og er derfor meget velegnet til at identificere de større byggesten, som Jordens skorpe og øvre kappe, litosfæren, består af.

JORDSKORPENS DYBE STRUKTUR

Viden om jordskorpens dybe struktur, opnået fra tolkningen af dyb-seismiske data, giver information om både de sedimentære og krystalline bjergarter i jordskorpens, den totale tykkelse af skorpen samt information om den underliggende øvre kappe. To vigtige dyb-seismiske eksperimenter er udført på tværs af Sorgenfrei-Tornquist Zonen: BABEL- og EUGENO-S projekterne.

BABEL-profilet skærer Sorgenfrei-Tornquist Zonen i Østersøen, og den vigtigste information er, at den 3-delte kontinentalskorpe, som karakteriserer det Baltiske Skjold, strækker sig et godt stykke ind under Danmark. Det betyder, at Sorgenfrei-Tornquist Zo-



Hastigheds-dybde model baseret på refraktions-seismisk undersøgelse gennem jordskorpens og den underliggende kappe på tværs af Sorgenfrei-Tornquist Zonen. Tallene og de stiplede linjer angiver lydbølgnehastigheden i km/s i undergrunden. STZ: Sorgenfrei-Tornquist Zonen; SB: Skurup Blok; HBP: Hanø Bugt Platform; RFH: Ringkøbing-Fyn Højderyggen.

Kilde: BABEL Working Group (1993).

nen ikke udgør en pladegrænse, men at forkastningszonen må betragtes som en langstrakt tektonisk anomali i den sydvestlige del af det Baltiske Skjold. BABEL-profilet viser en udtalt bølgende topografi af Moho, som er skorpe/kappe-overgangen, hen over Sorgenfrei-Tornquist Zonen, hvor dybderne til Moho varierer mellem 34 og 40 km. Skorpen er tyndest under Hanø Bugt Platformen og Skurup Blokken og tykkest under selve Sorgenfrei-Tornquist Zonen i Bornholm-Skåne segmentet.

JORDSKORPENS TYKKELSE

Variationen af jordskorpens tykkelse i det sydlige Skandinavien er vist på Moho-kortet side 14. På basis af dyb-seismiske eksperimenter udført langs profiler hen over det Baltiske Skjold og det Danske Bassin, har man kortlagt tykkelsen af jordskorpens, dvs. dybden til undergrænsen af Jordens skorpe ved overgangen til kappen, der er karakteriseret ved en markant og ofte abrupt stigning i hastigheden af de primære bølger.

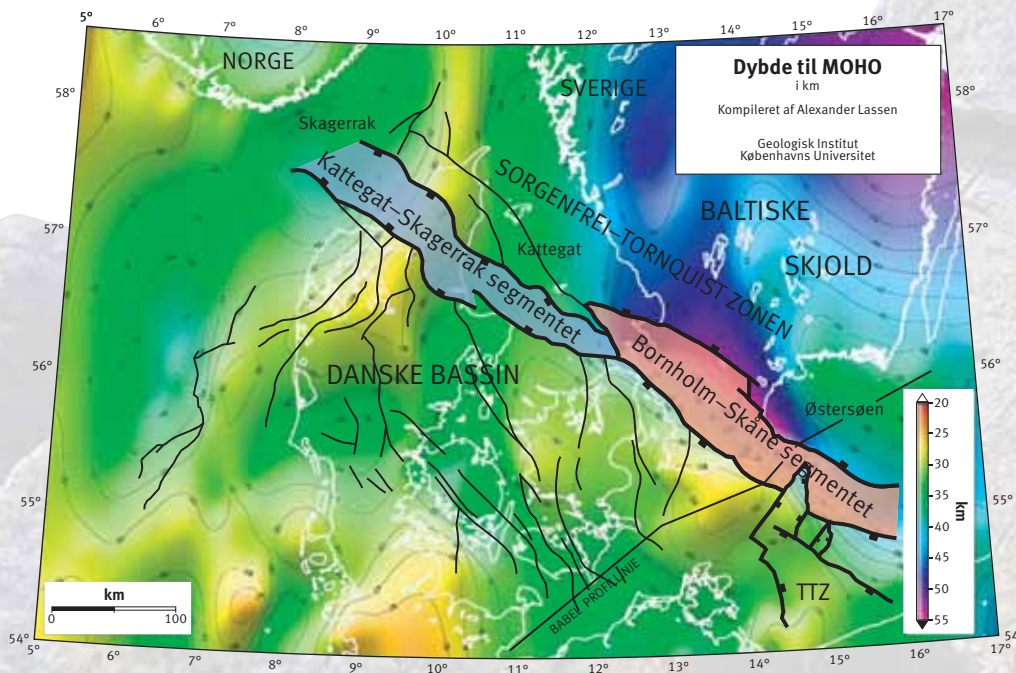
Fra tolkningen af 2D data fra dyb-seismiske eksperimenter ved man, at i det Baltiske Skjold og under det Danske Bassin består den krystalline jordskorpe af 3 lag karakteriseret ved generelt stigende hastigheder af primærbølgerne ned gennem øvre, mellem og nedre skorpe. Af Moho-kortet (side 14) fremgår det, at skorpens tykkelse ændres markant henover Sorgenfrei-Tornquist Zonen i det sydlige Sverige, fra mere end 50 km tykkelse (blå-lilla farve) i den østlige del af Bornholm-Skåne seg-

mentet og ned til ca. 30 km under den vestlige del (gul-grøn farve). Generelt er skorpen tykkest under det sydlige Sverige (40–55 km) og tyndere under det Danske Bassin (28–36 km).

Udbredelsen af de overfladenære forkastninger som afgrænser Sorgenfrei-Tornquist Zonen er indtegnet på Moho-kortet. Det ses, at der ikke er nogen korrelation mellem Mohodybderne og de overfladenære forkastninger i Kattegat-Skagerrak segmentet mod nordvest, hvor nordvest-sydøst-retningen af Kattegat-Skagerrak segmentet går på tværs af strukturen ved skorpens undergrænse. De overfladenære forkastninger er begrænset til den øverste stive del af skorpen og fortsætter således ikke ned gennem jordskorpens til Moho. Derimod er Bornholm-Skåne segmentet, som er karakteriseret ved højtliggende horstblokke og intrusion af vulkanske bjergarter op igennem skorpen, sammenfaldende med den zone inden for kortområdet, hvor skorpens undergrænse har den stejleste hældning, dvs. den største Moho-gradient.

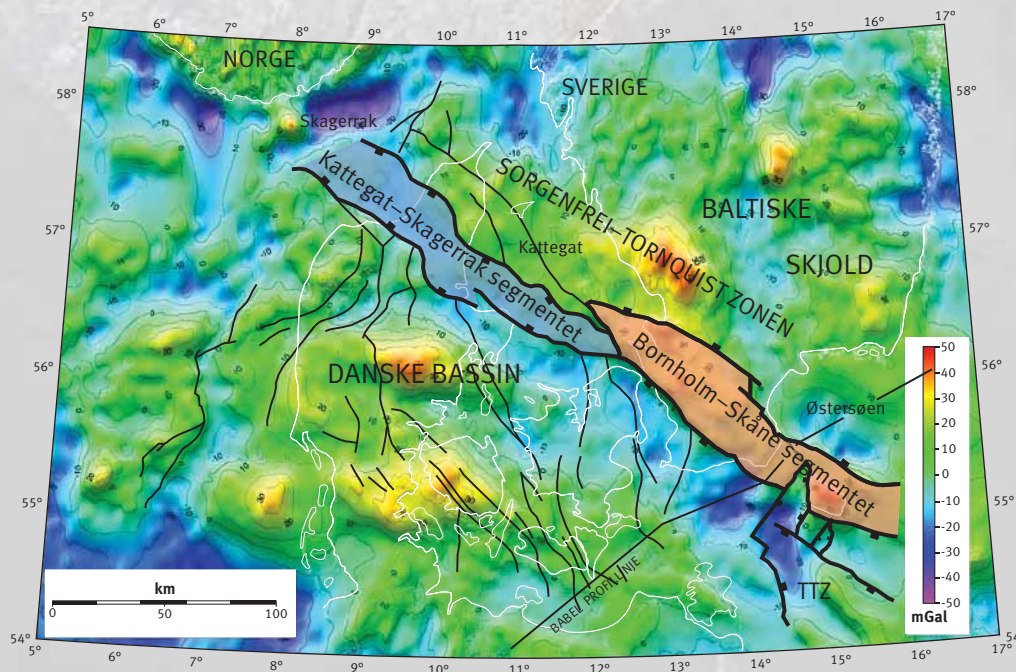
JORDENS TYNGDEFELT

Geofysiske målinger af Jordens tyngdefelt viser, at Sorgenfrei-Tornquist Zonen er karakteriseret af markante tyngdeanomalier. Tyngdeanomalier er afvigelser i Jordens tyngdefelt, som skyldes kontraster i massefylde mellem forskellige bjergartstyper i undergrunden. Generelt har sedimentære bjergarter, fx sandsten, skifer og kalksten, lavere massefylde end krystalline bjergarter som fx gnejs, granit



Moho-kort over skorpe tykkelsen i Danmark og tilgrænsende områder. Kortet er fremkommet ved en konturering af de relativt spredte målepunkter langs de 2D seismiske profiler, som findes i området.

Kilde: A. Lassen, H. Thybo, O. Graversen, IGG.



Kort over tyngdefeltet i Danmark og tilgrænsende områder. Tyngdeanomalier måles i enheden mGal opkaldt efter astronomen Galileo, hvor 1 mGal svarer til en tusindedel af tyngdeaccelerationen 1cm/s^2 . Tyngdeanomalikortets farveskala fortæller med de røde-gule farver om områder, hvor der findes bjergarter, som er tungere end normalt (som er en massefylde på $2,63\text{ kg/m}^3$ svarende til granit), og de blå-lilla farver, som viser hvor der er bjergarter, som er lettere end normalt fordelt i jordskorpen.

Kilde: T. Abramovitz, GEUS; O. Graversen, IGG.

og basalt. Tyngdeanomalikortet viser en kraftig ændring på ca. 50–70 mGal (fra blå til rød farve) på langs af Sorgenfrei-Tornquist Zonen.

Udstrækningen af Bornholm-Skåne segmentet afgrænser et langstrakt område med høje tyngdeanomalier (+30–50 mGal). Området er karakteriseret af grundfjeldshorste og af

basaltiske gangsværme i Skåne. De høje tyngdeanomalier kan forklares ved tilstedeværelsen af intrusive basaltiske legemer i skorpen med højere massefylde end de omgivende granitter og gnejsler. Kattegat-Skagerrak segmentet mod nordvest er karakteriseret ved et smalt nordvest-sydøst-orienteret tyngdemi-

nimum (turkisblå farve ca. -10 mGal) som skyldes tilstedeværelsen af tykke sedimentserier med en lavere massefylde end det krystalline grundfjeld. Dette tyngdeminimum er sammenfaldende med de overfladenære forkastninger, som er kortlagt fra seismiske refleksionsdata.

SKORPEDYNAMIK OG STRUKTURUDVIKLING

Strukturel inversion af grabenbassiner er karakteristisk for den seneste udvikling af Tornquist Zonen. Bassininversion er forbundet med kompression, der fører til foldning og opresning af sedimenterne i de ældre grabenbassiner. Bassininversion var udbredt i Tornquist Zonen i Sen Kridt, og man har igennem de sidste 30 år arbejdet med en model med kontinent-kontinent-kollision imellem Afrika og Europa som årsag til de kompressive kræfter. I forbindelse med kollisionen blev Alperne foldet op i Sydeuropa. Modellen arbejder således med en kompression i det alpine forland i Central- og Nordvesteuropa kombineret med en sideværts forskydning mellem det Nordvest-europæiske kraton og den Østeuropæiske Platform. Imidlertid opstod den nord-syd-rettede bevægelse mellem den europæiske og den afrikanske plade først i løbet af Tertiær, altså efter inversionen af grabenbassinerne i Tornquist Zonen i Sen Kridt.

KONTRASTER OG MODSÆTNINGER I STRUKTURUDVIKLINGEN I SORGENFREI-TORNQUIST ZONEN

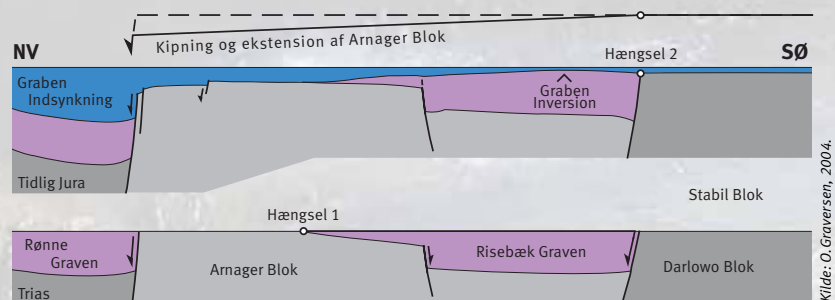
Strukturudviklingen i Sorgenfrei-Tornquist Zonen i Sen Palæozoikum og Mesozoikum var i Kattegat-Skagerrak segmentet mod nordvest meget forskellig fra Bornholm-Skåne segmentet mod sydøst. I begge områder blev de grundlæggende forkastninger anlagt i Sen Karbon-Tidlig Perm, hvorimod den gennemgribende vulkanske aktivitet i dette tidsrum overvejende var knyttet til Bornholm-Skåne segmentet. Den magmatiske aktivitet ændrede helt skorpen karakter i dette segment med etablering af underplating intrusioner ved basis af skorpen og intrusion af gange i skorpen som tilførselskanaler for vulkanismen ved jordoverfladen. Forkastningsudviklingen i Mesozoikum medførte, at der i Kattegat-Skagerrak segmentet blev udviklet en graben med aflejring af op til 8 km tykke sedimentserier igennem Trias, Jura og Tidlig Kridt. I Sen Kridt blev grabenen presset sammen, og herved opstod der bassininversion, hvor de tidligere aflejeede sedimentter blev skubbet op over graben.

I modsætning til udviklingen i Kattegat-Skagerrak segmentet blev Trias – Tidlig Kridt-sedimentterne i Bornholm-Skåne segmentet

ikke aflejet i en graben. Sedimentterne blev afsat på en platform med begrænset forkastningsaktivitet, og sedimenternes samlede tykkelse har ikke oversteg 1 km. I Sen Kridt opstod storskala overlappende forkastninger i det sydøstlige Skåne i tilknytning til indsykningen af Vomb Bassinet og Linderød Bugt bassinet (se kort side 7), der er etableret symmetrisk over for hinanden på hver sin flanke af Bornholm-Skåne segmentet. Det viser, at de to forkastningssæt opstod som resultatet af nordøst-sydvest-orienteret strækning af jordskorpen på tværs af Bornholm-Skåne segmentet. Under strækningen og indsykningen af Vomb Bassinet opstod der samtidig inversion af Colonus Truget nordøst for Vomb Bassinet, hvor overliggende lag fra Jura – Tidlig Kridt blev inverteret. En model for udviklingen af skorpestrukturen skal således forklare, at bassinindsyknning i Sen Kridt knyttet til ekstension på tværs af Sorgenfrei-Tornquist Zonen skete samtidig med bassininversion under kompression i de tilgrænsende graben-områder. Bassininversion i Sorgenfrei-Tornquist Zonen kan imidlertid ikke i sig selv forklare det højtliggende grundfjeld og det tynde sedimentdække fra Mesozoikum i Bornholm-Skåne segmentet. En model for udformningen af dette segment må også tage hensyn til opdriften i tilknytning til den magmatiske aktivitet såvel i Sen Palæozoikum som i Mesozoikum.

BLOKFORCASTNING OG BASSININVERSION

Rønne Graven og Risebæk Graven syd for Bornholm blev etableret i Trias, hvor begge grave sank ind under strækning af skorpen. Efter en tektonisk stilstand i Bornholm-Skåne-området i Sen Trias fortsatte indsykningen af Rønne Graven i Tidlig Jura. Indsykningen af Risebæk Graven var gået i stå, og samtidig med indsykningen af Rønne Graven undergik Risebæk Graven nu en svag inversion. Under indsykningen af Risebæk Graven i Trias blev grabenblokken kippet mod sydøst omkring hængselslinje 1 placeret nordvest for graben, se figuren nedenfor. I Tidlig Jura bliver Risebæk Graven inkluderet i Rønne Gravens liggende blok, og denne blok bliver nu kippet i modsat retning mod nordvest, mens hængselslinje 2 er placeret mod sydøst langs grænsen mellem Risebæk Graven og den stabile Darlowo Blok. Den fortsatte indsykning af Rønne Graven i Tidlig Jura viser, at området stadigvæk er under ekstension, og dette gælder også for Arnager Blokken, der bliver gennemsat af en række normale ekstensionsforkastninger, der synker ind ned mod Rønne Graven. Under kipningen af Arnager Blokken kommer Risebæk Graven i klemme ind imod den stabile Darlowo Blok mod sydøst. Risebæk Graven bliver herved inverteret i et lokalt kompressionsfelt opstået som et resultat af en overordnet regional strækning af skorpen. Inversionen af Risebæk Graven var således knyttet til en ændring af dynamikken i forkastningsblokkenes bevægelser under fortsat strækning af skorpen.



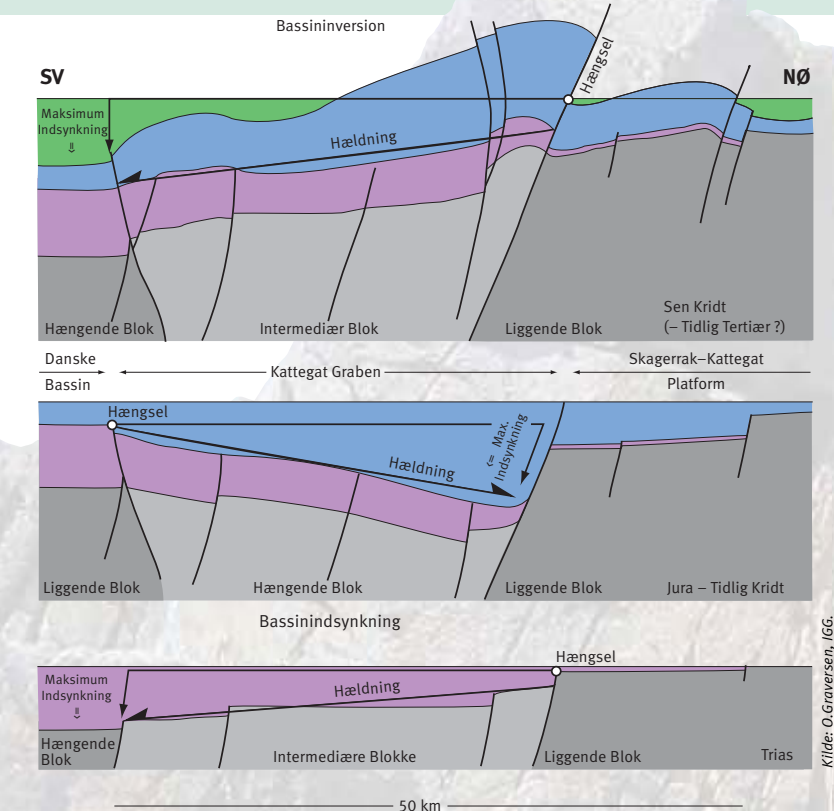
Model for inversion af Risebæk Graven. I Trias synker såvel Rønne Graven som Risebæk Graven ind mod sydøst. I Jura genoptages indsykningen af Rønne Graven, mens Arnager blokken med Risebæk Graven nu kippes i modsat retning. Det medfører en strækning af Arnager blokken, der synker ind ned mod Rønne Graven. Under kipningen kommer Risebæk Graven i klemme ind mod den stabile Darlowo Blok, hvorved Risebæk Graven inverteres.

KATTEGAT-SKAGERRAK SEGMENTET

En analyse af Kattegat-Skagerrak segmentet viser, at den strukturelle udvikling af Kattegat Graven blev grundlagt i Trias, hvor den maksimale indsykning fandt sted i det Danske Bassin på den hængende blok. Under indsyknningen blev Skagerrak-Kattegat platformen etableret mod nordøst på den liggende blok langs randen af det Baltiske Skjold, se figuren til højre. I overgangszonen mellem den hængende blok og den liggende blok opstod en række intermediære forkastningsblokke udviklet som en trappeformet forkastningszone; den intermediære forkastningszone var hængslet mod nordøst og sank ind mod sydvest. Kattegat Graven blev etableret i Jura over den intermediære forkastningszone, der nu blev kippet i modsat retning: Hængselszonen var placeret mod sydvest, mens den maksimale indsykning af Jura – Tidlig Kridt bassinet skete mod nordøst. Den intermediære blok blev derved etableret som den hængende blok imellem det Danske Bassin og Skagerrak-Kattegat platformen som de liggende blokke. Under den efterfølgende ekstensionsfase i Sen Kridt genoptog blokbevægelserne indsykningsmønstret fra Trias: Den maksimale indsykning rykkede tilbage til det Danske Bassin på den hængende blok, mens den intermediære blok med Kattegat Graven blev kippet mod sydvest. Den intermediære blok var nu igen hængslet mod nordøst og under tiltagende indsykning mod sydvest. Det medførte, at Kattegat Graven blev inverteret, da den intermediære blok kom i klemme imellem den hængende blok og den liggende blok på hver sin side af Kattegat Graven. Kipningen og inversionen af den intermediære blok medførte, at Trias-Jura-Tidlig Kridt-lagene kom til at hæle mod sydvest.

MODEL FOR UDVIKLING AF BASSININVERSION UNDER OVERORDNET STRÆKNING AF JORDSKORPEN

Inversionen af Kattegat Graven svarer til udviklingen af bassininversion illustreret ved Bornholm. Det gennemgående træk er, at den oprindelige graben efterfølgende er blevet kippet i modsat retning i en ny strækningsfase under indsykning af en tilgrænsende forkastnings-



Model for udvikling af bassininversion i Kattegat Graven langs profil B (på side 3) på tværs af Kattegat-Skagerrak segmentet.

blok. Under kipningen kan der herved opstå lokal kompression internt i den oprindelige grabenblok. Graben-inversionen i Sorgenfrei-Tornquist Zonen har således været knyttet til lokal kompression etableret under en overordnet strækning af jordskorpen.

MAGMATISKE INTRUSIONER OG ISOSTASI

Hidtil er forekomsten af de mange grundfjeldshorste i Bornholm-Skåne segmentet blevet knyttet sammen med strukturel inversion af Sorgenfrei-Tornquist Zonen i en regional kompressiv tektonisk ramme. Ud over de højtliggende horstblokke adskiller Bornholm-Skåne segmentet sig også fra den øvrige del af Sorgenfrei-Tornquist Zonen ved den vulkanske aktivitet i Skåne i Sen Karbon – Tidlig Perm og i Jura og Kridt. Dannelsen af store magmakamre ved basis af skorpen og intrusionen af gange og vulkanrør op igennem skorpen til jordoverfladen har således ændret massefylden og opdriften af Bornholm-Skåne segmentet i forhold til de øvrige områder. På tyngdekortet fremstår Bornholm-Skåne segmentet derfor som en positiv tyngdeanomalie (se kort side 14). De magmatiske gange og vulkanrør intruderer i skorpen er tungere end skorpebjergarterne, hvorimod magmaerne intruderer ved basis af

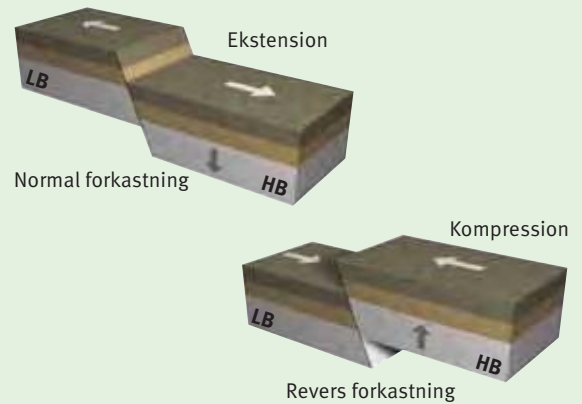
skorpen er lettere end de underliggende kappebjergarter. Den overskydende vægt af gang- og vulkanintrusionerne i skorpen vil derfor tynge skorpen ned, hvorimod magmakamrene i den nedre skorpe modsat vil løfte den overliggende skorpe op. Om der er indsykning eller hævnning af Bornholm-Skåne segmentet ved jordoverfladen vil derfor afhænge af, om der er isostatisk ligevægt, dvs. om der er balance mellem indsykning og opdrift. Da den relativt højtliggende jordoverflade i Bornholm-Skåne segmentet er modsvaret af en langstrakt køl ved basis af skorpen, tyder det på, at Bornholm-Skåne segmentet er i isostatisk ligevægt. På denne baggrund foreslås det, at det højtliggende grundfjeld i Bornholm-Skåne segmentet er knyttet sammen med udviklingen af den isostatisk ligevægt i denne zone, efter den vulkanske rift-graben blev etableret i Skåne i Sen Palæozoikum.

Udbredelsen af vulkanismen i Jura og Kridt er begrænset til det centrale Skåne. Hævningszonen på tværs af Skåne segmentet løber hen over vulkanområdet og den formodede underplating intrusion ved basis af skorpen (se side 11). Det er derfor sandsynligt, at hævningszonen ved overfladen kan være knyttet til en isostatisk hævnning af vulkanområdet over intrusionen.

FORKASTNINGER

En forkastning er en brudflade i jordskorpen, hvor to blokke på hver sin side af forkastningen er forskudt i forhold til hinanden. En forkastning opstår, hvor spændingen i jordskorpen overstiger bjergarternes sammenhængskraft. Ved pludselig udløsning af større spændinger vil der opstå et jordskælv, som er kendetegnet ved rystelser. Man kan således tale om, at nogle forkastninger repræsenterer fossile jordskælv. Forskydningen langs en forkastning afhænger af forkastningens orientering i forhold til de udløsende spændinger.

Forkastningsblokken **over** en hældende brudflade betegnes som den hængende blok (HB), medens blokken **under** forskydningsplanet kaldes den liggende blok (LB). Når den hængende blok har bevæget sig ned i forhold til den underliggende blok, taler man om en normal forkastning, medens der er tale om en revers forkastning, når den hængende blok har bevæget sig op i forhold til den liggende blok. En normal forkastning er knyttet til trækspændinger, hvor der sker en strækning af jordskorpen. Modsat er en revers forkastning knyttet til trykspændinger, hvor der sker en forkortelse af jordskorpen.



Illustrationer: Stefan Selberg, GEUS.

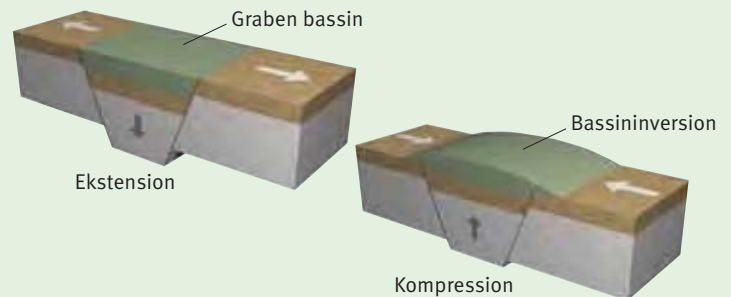
HORST, GRABEN

En horst og en graben (grav, rift bassin) er større overfladestrukturer, der er begrænset af modsat hældende forkastninger. En horst hæver sig over omgivelserne, og de begrænsende forkastninger hælder væk fra horstblokken. En graben er et forkastningsbegrænset bassin, hvor forkastningerne hælder ind mod bassinet. Både horste og grabens er dannet under strækning af jordskorpen. En højtliggende horst vil blive eroderet, medens en graben normalt bliver fyldt op af sedimenter, efterhånden som bassinet synker ind. De nedforkastede sedimenter er beskyttet mod erosion i en graben.



BASSININVERSION

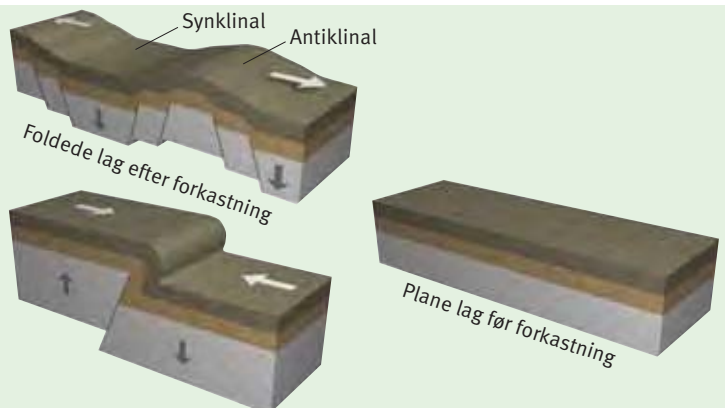
Hvis stressfeltet i jordskorpen ændrer sig, så en sedimentfyldt graben i stedet bliver udsat for trykspændinger, vil sedimenterne i grabenen blive presset sammen og presset op over det oprindelige aflejringsniveau. En normal indsynkningsforkastning kan herved blive ændret til en modsattret revers forkastning, der hæver graben-blokken og løfter de øverste sedimenter ud af grabenen igen. Når den oprindelige bassinindsynkning, som sker under strækning af jordskorpen, ændres til en hævnning og sammenpressning af sedimenterne under kompression, taler man om, at grabenen og sedimenterne i bassinet bliver inverteret (vendt på hovedet).



FORKASTNINGER OG FOLDER

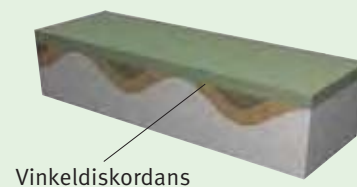
I den øverste del af jordskorpen, hvor forholdsvis bløde sedimenter er aflejret på et stift underlag, vil efterfølgende strækning eller forkortelse kunne føre til, at det stive underlag brydes op i skarpkantede forkastningsblokke, mens de overlejrende bløde sedimenter følger sig plastisk omkring blokkene. Ved ekstension (strækning) vil der blive dannet synklinale folder over de nedsunkne blokke og antiklinale folder over de højtliggende blokke.

Ved kompression vil sedimenterne ved reverse forkastninger omkring opskudte blokke kunne danne overkippede folder, hvor sedimenterne bliver vendt på hovedet (inverteret) under den opskudte blok.



VINKELDISKORDANS

De oprindeligt horisontalt aflejrede lag er på et tidspunkt blevet foldet og efterfølgende eroderet til en horisontal flade. Ovenpå den eroderede flade er der senere blevet aflejret et nyt lag. Grænsen mellem det nye lag og de underliggende, eroderede lag kaldes en vinkeldiskordans.



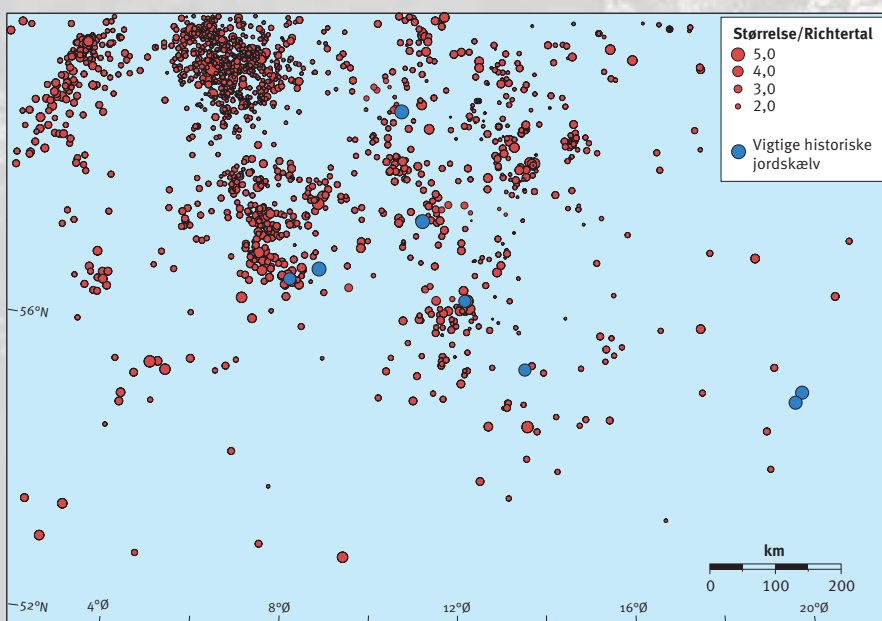
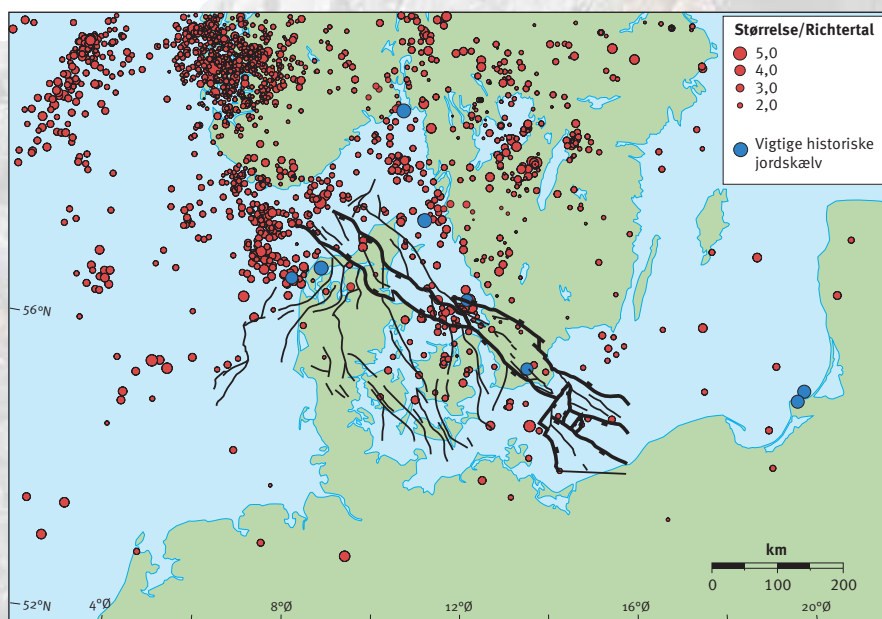
JORDSKÆLV I SORGENFREI-TORNQUIST ZONEN?

Det vil være nærliggende at tro, at en så markant geologisk zone som Sorgenfrei-Tornquist Zonen giver anledning til livlig jordskælvsaktivitet. Men det er ikke tilfældet.

Danske observationer af jordskælv gennem flere hundrede år viser ingen tegn på, at der er flere eller større jordskælv i zonen end udenfor. Den eneste undtagelse herfra er et område i Kattegat. I de to figurer til højre er jordskælvsaktiviteten præsenteret fuldstændig ens, blot har det ene kort kystlinjer og Sorgenfrei-Tornquist Zonen indtegnet, mens det andet er vist uden disse hjælpelinjer. Man kan overbevise sig selv om, at der ikke er nogen sammenhæng mellem jordskælvsaktiviteten og Sorgenfrei-Tornquist zonen ved at prøve at finde zonen i kortet uden hjælpelinjerne.

Alle observerede jordskælv i den danske og svenske del af Sorgenfrei-Tornquist Zonen er små og ufarlige, og langt de færreste af rystelserne kan mærkes af mennesker. Det sker dog med års mellemrum at et lille jordskælv giver beboerne i en del af Danmark, Sverige eller Norge en ufrivillig rystetur. Det er vigtigt at understrege, at de mærkbare jordskælv forekommer oftere uden for Sorgenfrei-Tornquist Zonen end i selve zonen.

I Kattegat ramte det største nylige, følte jordskælv i 1985. Det målte 4,7 på Richterskalaen og blev især mærket kraftigt i Nordsjælland. Der optrådte to efterskælv samme sted i Kattegat i 1986 med Richtertal 4,2 og i 1990 med Richtertal 3,3. De seneste følte jordskælv i Danmark har været uden for Sorgenfrei-Tornquist zonen, i Skagerrak i 1997, to gange i 2001 og i 2010, og nær Holbæk i 2001. To nylige svenske jordskælv blev følt i Danmark, et i 1996 nær Malmø og et i 2008 60 km øst for Malmø, midt i Skåne. Det første af skælvene lå uden for, det andet i Sorgenfrei-Tornquist zonen. Fra Norge er det kun det historiske jordskælv i 1904 i Oslofjorden, der har kunnet mærkes i Danmark.



Kort over jordskælvsaktiviteten i og omkring Danmark. Den moderne, instrumentelt registrerede aktivitet 1929-2008 er i begge kort vist med røde prikker. Nederst er kystlinjerne fjernet. Skælvets størrelse = Richtertallet er angivet ved størrelsen af prikkerne. Med blå prikker er angivet de vigtigste følte jordskælv inden for de sidste 250 år.

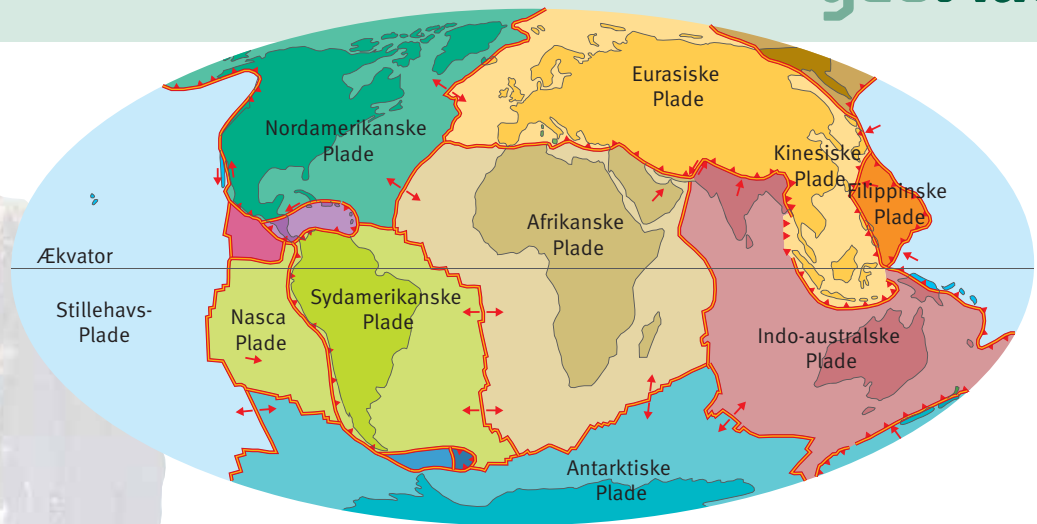
JORDSKÆLVSGEOGRAFIEN OMKRING DANMARK

Beretninger om jordskælv på dansk område går helt tilbage til 1073. De gamle optegnelser

dækker kun de kraftigste jordskælv, som præster eller andre skrivekyndige har fundet anledning til at beskrive, og det er ikke muligt at bestemme et nøjagtigt epicenter for disse

Illustrationer: Peter Voss, GEUS.

Den Eurasiske Plade, som Danmark hører til, bliver presset fra flere sider. Dels ved pladespredning langs den Midtatlantiske Ryg, væk fra den Nordamerikanske Plade, dels ved sammenstød med den Afrikanske Plade i Middelhavet.



Kilder: Niels Henriksen, Grønlands Geologiske udviking, GEUS.

jordskælv. Fra 1926 har vi instrumental dækning af jordskælv i det danske område og i takt med, at instrumenterne er blevet mere og mere fintfølede, registrerer vi langt flere af de helt små rystelser.

De mest aktive jordskælvszoner i Danmark ligger i Kattegat og Skagerrak (se kortet øverst side 18), men områderne er kun i mindre omfang sammenfaldende med Sorgenfrei-Tornquist Zonen. Også det centrale Sjælland har lidt jordskælvs-aktivitet. Det ses på kortet, at Nordtyskland, Polen og de Baltiske lande er lige så heldige som Danmark, ikke at have nævneværdig jordskælvsaktivitet. Retter man derimod interessen mod Norge og Sverige, nordøst for Sorgenfrei-Tornquist Zonen, finder man større aktivitet. Der ses spredt aktivitet i grundfjeldsområderne i Sydsverige og Sydnorge. Og man får indtryk af særlig aktivitet ved den norske vestkyst. Det er ikke store jordskælv, men der er flere af dem. Der er også større jordskælvsaktivitet i Viking Graven i Nordsøen ud for Sydnorge end der er i Central Graven vest for Danmark. Aktiviteten varierer henover området, men synes ikke at have sammenhæng med Sorgenfrei-Tornquist Zonen.

Geologiske studier af forkastninger i de sedimentære lag nær overfladen i Danmark har resulteret i forslag om, at nogle af disse for-

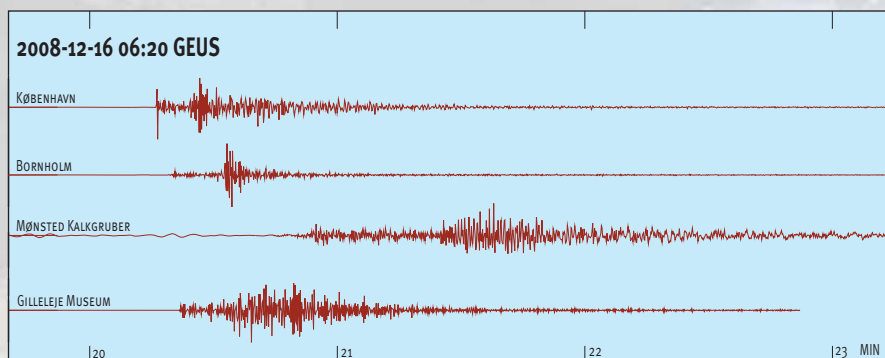
kastninger har været aktive med jordskælv inden for de seneste tusinder af år. Det drejer sig om lokaliteter i københavnsområdet, på Læsø, i Nordjylland og i Midtjylland. Når disse studier sammenholdes med de ovennævnte seismologiske oplysninger, må skælvne tolkes som bevægelser eller skred i de løse sedimenter, der er for små til at kunne klassificeres som egentlige jordskælv. En nylig gennemgang af disse forkastningsstudier har ikke ændret ved konklusionen, at Sorgenfrei-Tornquist zonen ikke er aktiv.

Jordskælvet i Skåne d. 16. december 2008 lå lige i Sorgenfrei-Tornquist Zonen (blå prik på side 18), men der er ingen grund til at tro, at den slumrende forkastning nu er vakt til live. Små jordskælv forekommer både i og uden for zonen, og i perioden 1970 til 2009 blev der blot registreret tre andre jordskælv i Skåne. Alle disse jordskælv målte under 3 på Richterskalaen. Ser man nøje på kortene til venstre, vil man lægge mærke til, at jordskælvne i Skagerrak hovedsagelig er lokaliseret syd for Sorgenfrei-Tornquist Zonen. Og både i Norge og Sverige er der mange flere jordskælv nord og nordøst for zonen, end der er i zonen selv. Sydvest for Sorgenfrei-Tornquist Zonen er der meget få jordskælv.

HVAD FORÅRSAGER VORES JORDSKÆLV?

Hovedårsagen til jordskælv i Danmark med nærmeste omgivelser er de spændinger, som opbygges i undergrunden på grund af presset fra Den Midtatlantiske Ryg (se figuren øverst). En mindre kilde til spændinger i jordskorpen er Skandinaviens hævning siden Istiden, som giver anledning til at Danmark vipper, sådan at Nordøstdanmark hæver sig og Sydvestdanmark synker. Disse overlejlrede spændinger udløser de små jordskælv, hvor der er svaghedszoner. Man kunne meget vel have forestillet sig, at Sorgenfrei-Tornquist Zonen er en sådan svaghedszone men det er den åbenbart ikke.

Sammenpresningsretningerne kan man regne sig frem til ved at analysere seismogrammerne og på den måde fastslå, i hvilken retning undergrunden bevægede sig i brudøjeblikket. Den form for beregning kan man dog kun gennemføre på de største af vores jordskælv, da analysen kræver mange og tydelige registreringer, som figuren nedenfor viser et eksempel på for Skånejordskælvet.



Skånejordskælvet d. 16. december 2008, som det blev registreret 4 forskellige steder i Danmark.

Illustration: Peter Voss, GEUS.

SØREN GREGERSEN

Adjungeret professor, GEUS.
sg@geus.dk

TINE LARSEN

Seniorforsker, GEUS.
tbl@geus.dk

PETER VOSS

Forsker, GEUS.
pv@geus.dk



Foto: Ole Gravesen, IGG.

Kullen set fra Lerhamn. Grundfjeldshorsten i baggrunden er hævet langs en forkastning over de yngre sedimenter i forgrunden, hvor grundfjeldet ligger under sedimenterne.

GEOCENTER DANMARK

GEOCENTER DANMARK

Er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Geologisk Institut ved Aarhus Universitet samt Institut for Geografi og Geologi og Geologisk Museum begge ved Københavns Universitet. Geocenter Danmark er et center for geovidenskabelig forskning, uddannelse, rådgivning, innovation og formidling på højt internationalt niveau.

UDGIVER

Geocenter Danmark.

REDAKTION

Geoviden – Geologi og Geografi redigeres af Seniorforsker Merete Binderup (ansvarshavende) fra GEUS i samarbejde med en redaktionsgruppe.

Geoviden – Geologi og Geografi udkommer fire gange om året og abonnement er gratis. Det kan bestilles ved henvendelse til Finn Preben Johansen, tlf.: 38 14 29 31, e-mail: fpj@geus.dk og på www.geocenter.dk, hvor man også kan læse den elektroniske udgave af bladet.

ISSN 1604-6935 (papir)

ISSN 1604-8172 (elektronisk)



Produktion: Annabeth Andersen, GEUS.

Tryk: Rosendahls - Schultz Grafisk A/S.

Forsidebillede: Kullen set mod sydøst.

Foto: Lars Bygdemark.

Reprografisk arbejde: Benny Scharck, GEUS.

Illustrationer: Forfattere og Grafisk, GEUS.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.

HER KAN DU LÆSE MERE:

Geoviden 2010, 2: Danmarks geologiske udvikling fra 1.450 til 65 mio. år før nu

Geoviden 2010, 3: Danmarks geologiske udvikling fra 65 til 2,6 mio. år før nu

Naturen i Danmark: Geologien. Gyldendal 2006

Geologiske naturperler – danske brikker til Jordens puslespil.

Gyldendal 2011 (udkommer juni 2011)

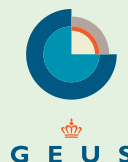
DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND (GEUS)

Øster Voldgade 10

1350 København K

Tlf: 38 14 20 00

E-mail: geus@geus.dk



INSTITUT FOR GEOGRAFI OG GEOLOGI

Øster Voldgade 10

1350 København K

Tlf: 35 32 25 00

E-mail: geo@geo.ku.dk

GEOLOGISK MUSEUM

Øster Voldgade 5-7

1350 København K

Tlf: 35 32 23 45

E-mail: rcp@snm.ku.dk



GEOLOGISK INSTITUT

Høegh-Guldbergs Gade 2, B.1670

8000 Århus C

Tlf: 89 42 94 00

E-mail: geologi@au.dk



PortoService, Postboks 9490, 9490 Pandrup

DANMARK

PP

Magasinpost UMM
ID-nr. 46439