



TYNGDE OG MAGNETISKE DATA VISER SPORENE AV GAMLE STRUKTURER PÅ NORSK SOKKEL

av Jörg Ebbing, Odleiv Olesen, Laurent Gernigon, Reynir Fjalar Reynisson
og sokkelgeofysikklaget på NGU



TYNGDE OG MAGNETISKE DATA VISER SPORENE AV GAMLE STRUKTURER PÅ NORSK SOKKEL

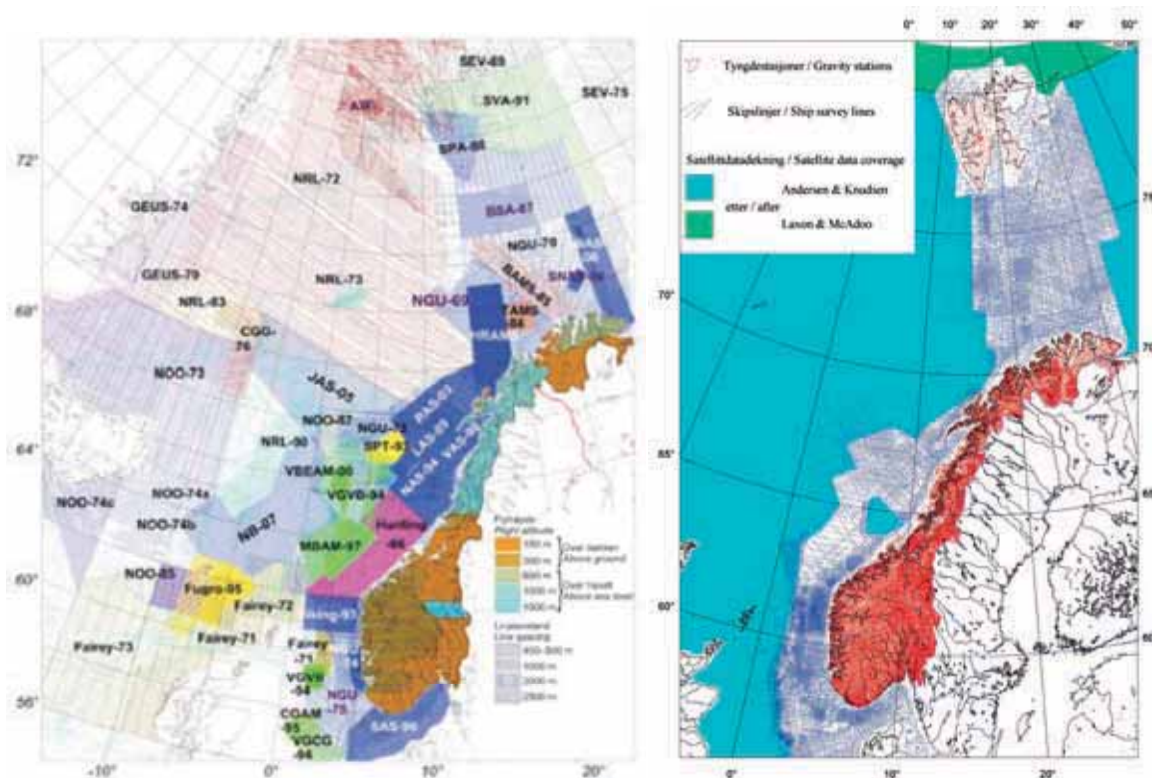
av Jörg Ebbing^{1,2}, Odleiv Olesen¹, Laurent Gernigon¹, Reynir Fjalar Reynisson^{1,2} og sokkelgeofysikklaget på NGU

1. Norges geologiske undersøkelse, 2. Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk, NTNU

Måling og tolkning av tyngdedata kalles gravimetri, som betyr tyngdemåling. Magnetometri er den geofysiske disiplinen hvor man tolker og måler magnetiske data. Data om jordens tyngde- og magnetfelt sammenfattes ofte med fellesbenevnelsen potensialfelldata, som betyr at man egentlig måler en feltstyrke som er sammensatt av felt fra flere forskjellige kilder. Hver stein har innflytelse med sin tetthet eller magnetiske egenskaper på henholdsvis tyngde- og magnetfeltet. Geofysiske anomalifelt, som benyttes for å tolke oppbygningen av øvre skorpe, er korrigert for det normale jordfeltet. Anomalifeltet beskriver altså avviket fra normalfeltet på grunn av forskjellige tettheter og strukturer i skorpen, dvs. det øverste laget av jordkloden. Dette kommer vi tilbake til senere.

En annen metode som ofte brukes til å kartlegge bassengstrukturer er seismikk, som ikke er en potensialfeltmetode, men en direkte metode fordi man måler bølger som går gjennom berggrunnen. Det fører til høyere oppløsning, men seismikk er enten fokusert på dype eller grunne strukturer og er en kostbar metode, mens tyngde og magnetfelt måles hurtig og relativt billig over store områder. I tillegg er seismisk teknologi lite egnet i områder med store mengder vulkansk materiale og salt. Potensialfelldata er spesielt nyttige i undersøkelsen av slike problematiske områder.

FIGUR 1 Oversikt over gravimetriske og magnetiske målinger i Norge og tilgrensende områder.



GRAVIMETRISKE OG AEROMAGNETISKE MÅLINGER VED NGU

Norges geologiske undersøkelse (NGU) er ansvarlig for å forvalte regionale databaser for tyngde og magnetiske data for både Fastlands-Norge og norsk kontinentalsokkel (www.ngu.no/dragon). Siden slutten av 50-tallet har NGU samlet inn nye data og utviklet metoder for innsamling og prosessering av slike data. Prosessering beskriver prosessen fra måling til framstilling av anomalikart som igjen brukes til den geofysiske tolkningen. På samme tid har NGU også bygget opp databaser og utviklet nye metoder for tolkning. Fortsatt samler NGU inn nye data for å oppdatere databasene og for å forbedre kunnskapen om norsk sokkel. Med moderne instrumenter (gravimeter og magnetometer) og moderne metoder for posisjonering, blir nøyaktigheten av målinger bedre. Tolkningen blir dermed også mer presis og verdifull. Spesielt GPS (Global Positioning System) kan i dag hjelpe til å bestemme posisjon med høy nøyaktighet. På 60- og 70-tallet ble posisjoner delvis bestemt med det mindre nøyaktige Decca-systemet eller ved visuell navigasjon etter kart eller flybilder. I dag ligger det mer enn 150 000 tyngdemålinger og magnetiske data fra mer enn 2 millioner profilkilometer innsamlet med fly og helikopter lagret i NGUs databaser (Figur 1).

På Norges fastland er tyngdedata målt på bakken, mens på sokkelen brukes båter til tyngdemålinger, gjerne i kombinasjon med seismiske målinger. Magnetiske målinger foregår hovedsaklig fra helikopter eller fly. På grunn av større rekkevidde og høyere hastighet, er fly foretrukket på norsk sokkel. Metoden med målinger fra fly ble egentlig utviklet under 2. verdenskrig til å finne ubåter, men etter hvert fant forskere ut at den var godt egnet til geovitenskapelig kartlegging. NGUs første magnetometer, som ble anskaffet fra den amerikanske

geologiske undersøkelsen (USGS), var også opprinnelig brukt til ubåtjakt.

Aeromagnetiske målinger ved NGU skjer med et fly som sleper et magnetometer i en "bombe" 70 m under flyet for ikke å påvirkes av stål i flykroppen og motorene (Figur 2). Både tyngde og magnetiske målinger på sokkelen utføres langs profiler. Aeromagnetiske målinger utføres veldig hurtig og med korte avstander mellom profilene (500 m til 5 km). Sjøgravimeteret er installert i en båt og målingene er derfor mer tidkrevende og avstanden mellom profiler kan være betydelig større.

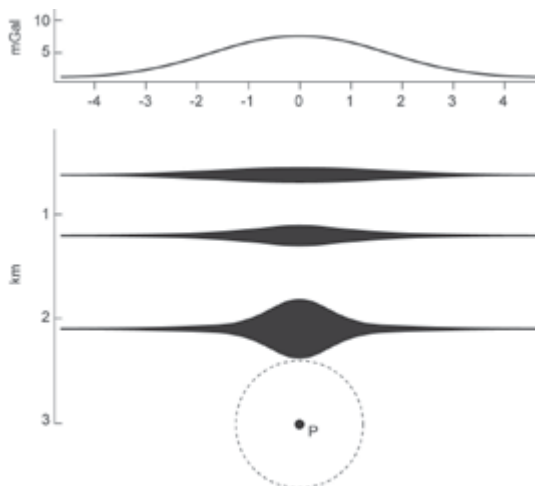


FIGUR 2 Fly med magnetometer ("bombe").

HVORDAN TOLKER MAN ANOMALIER?

Et anomalikart viser avvik fra normalfeltet slik at man bare tolker den delen som er ukjent, dvs. anomalien. Hvis man ser på et tyngdekart eller et magnetisk kart, kan man relatere anomalier til egenskaper i skorpen. På et tyngdeanomalikart betyr lave tyngdeverdier at materialet i undergrunnen må ha lavere tetthet enn omgivelsene, mens høy tyngde betyr materiale med høyere tetthet. Det er ikke alltid enkelt å se i hvilket dyp anomaliårsaken finnes eller hvilken størrelse den har. Figur 3 viser at ulike kilder på forskjellig dyp kan gi samme anomali på overflaten. Hvis man vil tolke anomalikart trenger man geologisk kunnskap eller annen informasjon, slik at man kan følge bergarten på dypet og finne størrelsen på de ulike strukturer. Tolkning av magnetfelt er mer komplisert, men prinsippet er det samme.

Geofysikere bruker forskjellige teknikker som filtrering, eller korreksjon for kjente strukturer, for å tolke anomalikartene. Hvis vi ser på norsk sokkel, tolker man ofte isostatisk tyngdeanomalier og totalmagnetiske



FIGUR 3

Tvetydighet i potensialfeltdata. Forskjellige strukturer i undergrunnen kan alle gi det samme tyngdefeltet. God geologisk kunnskap er derfor nødvendig for tolkning av slike geofysiske anomalier. Tyngdefeltet måles ofte i milliGal. Enheten Gal er oppkalt etter Galileo Galilei (1564–1642) som prøvde å bestemme jordens tyngdefelt med eksperimenter fra det skjeive tårnet i Pisa.

skorpe dannes i dag langs midthavsryggene, slik som på Island og Jan Mayen, der smeltemasse strømmer opp fra dypet og størkner til vulkanske bergarter. Det magnetiske mønsteret viser en rekke striper som er nærmest parallelle med midthavsryggene. På grensen mellom norsk sokkel og dyphavet (kontinent-osean grensen), avsluttes det stripete mønsteret, fordi bergartene på sokkelen har en annen geologisk dannelseshistorie og dermed andre magnetiske egenskaper.

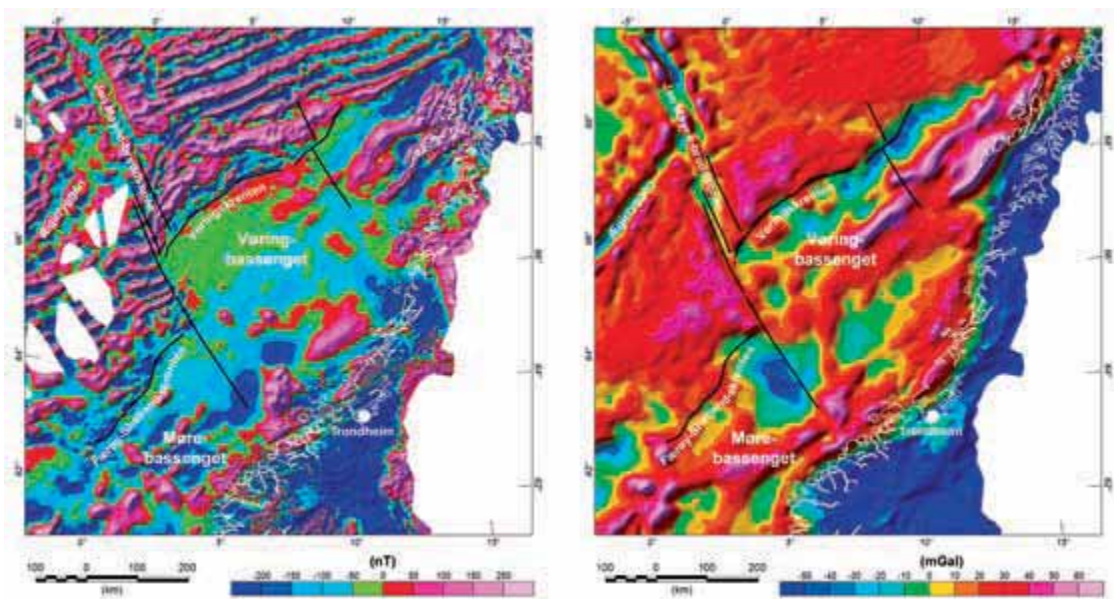
På grunnlag av nye datasett fra 2003 og 2005, ble en alternativ geodynamisk modell for den tidlige

anomalier (Figur 4). De isostatiske tyngdeanomalierne er anomalier etter at tyngdefeltet er korrigert for påvirkning av kjente strukturer som jordens form, topografi og variasjon i skorpetykkelse. De totalmagnetiske anomalierne er anomalier etter korreksjon for jordens magnetiske felt slik det er definert i globale referansemodeller; man sitter da igjen med et felt som stammer fra strukturer i jordskorpen. Begge anomalifeltene er altså korrigert på en slik måte at man får spesiell innsikt i øvre skorpe, dvs. tykkelse av sedimentbassenger og overgangen fra sedimenter til gneisunderlaget (grunnfjell).

NORSK SOKKEL

På anomalikart kan man klart se overgangen fra norsk sokkel til dyphavet. Havbunnsskorpen ble dannet langs midthavsrygger og er yngst ved selve spredningsryggene og eldst lengst vekk fra disse ryggene. Utover på 60-tallet oppdaget man at bergartene i havbunnsskorpen er magnetisert. Ny jord-

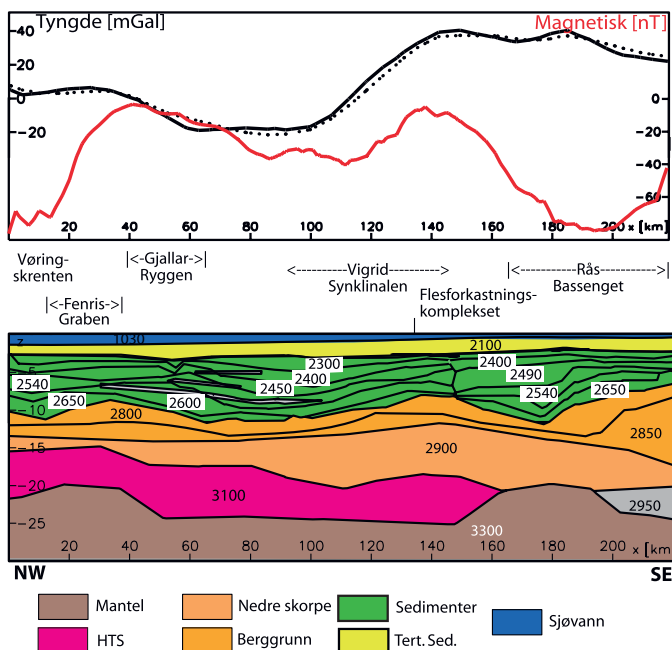
FIGUR 4 Magnetiske (venstre) og isostatiske (høyre) anomalier i Midt-Norge og Norskehavet.



utviklingen av Norskehavet utarbeidet (Olesen med flere 2002). Tidligere tolkninger indikerte et stort antall bruddsoner i dyphavet, som man antok styrte åpningen av Nord-Atlanteren. Nye aeromagnetiske data har vist at disse bruddsonene ikke eksisterer, men var et resultat av ufullstendig deknning og unøyaktig posisjonering av flyet under målingene.

Videre kan man se på anomalikartet at den ytre delen av midtnorsk sokkel (Vøringbassenget) viser færre og mindre magnetiske anomalier enn den indre delen (Trøndelagplattformen). Grunnen til dette er at sedimentbassenger på den ytre sokkelen har dyp på opp til 14 km mens på Trøndelagplattformen er bassengene bare 5–8 km dype. Sedimentære bergarter har

lav tetthet og viser derfor negative tyngdeanomalier. Disse bergartene er dessuten nesten umagnetiske og gir derfor meget små magnetiske anomalier. På Trøndelagplattformen er avstanden fra overflaten til gneisunderlaget ikke så stor, og spesielt de øvre prekambriske og kaledonske bergartene (merket "Berggrunn") kommer tydelig fram på det magnetiske anomalikartet (Figur 5).

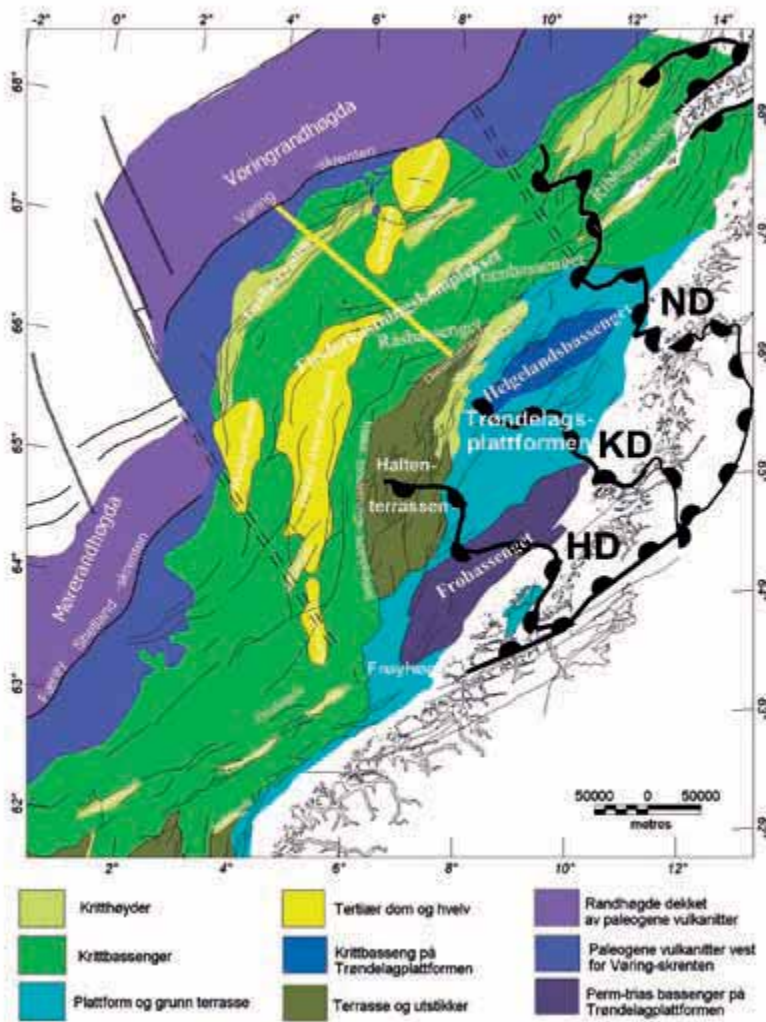


FIGUR 5 Tolkningsprofil gjennom den ytre delen av norsk sokkel. Tallene viser tettheter av geologiske strukturer i kg/m³. HTS=Høytetthetskorpe.

BETYDNING FOR SAMFUNNET

Tolkning av tyngdekart og magnetiske kart er viktige brikker i forståelsen av bassengdannelse og geologisk utvikling av norsk sokkel. Seismiske undersøkelser gir bare informasjon langs et profil eller i et avgrenset område, mens informasjon om tyngde og magnetiske data er tilgjengelig på hele sokkelen og dyphavet utenfor. Derfor kan tolkningen av disse data gi bedre forståelse av sammenhengen mellom forskjellige områder på sokkelen og den geologiske utviklingen (f. eks. Åm 1970, 1975, Olesen med flere 2002, Skilbrei med flere 2002, Ebbing med flere 2006). Dette er spesielt viktig når man vil evaluere hydrokarbonpotensialet i et område. Før man begynner å bore etter olje og gass trengs god geologisk kunnskap. Seismikk gir viktig informasjon, men man trenger ikke å skyte seismikk overalt. Derfor er en billig metode som magnetometri nyttig for å avgrense områder som er interessante for mer detaljert seismisk prospektering. Noen ganger er det også viktig å ta spesielle hensyn til miljøet, som f. eks. i Lofoten. Her kan tyngde og magnetiske data hjelpe geologene med å ta riktige beslutninger uten at man forstyrrer det marine miljøet. Informasjon om tykkelse av sedimentære bergarter og bassenggeometri har spesiell betydning og kan være til hjelp for å avgjøre om det er mulig å finne hydrokarboner. Videre tolkning av tyngde og magnetiske data gir også en pekepinn om temperaturen i undergrunnen, som igjen er viktig for å modellere den geologiske utviklingen av bassenger og vurdere muligheten for å finne forekomster av olje og gass.

Som vist gir også tyngde og magnetiske data informasjon om strukturene i gneisunderlaget på sokkelen.



FIGUR 6 Strukturelementer på norsk sokkel.

PERSPEKTIVER

Gravimetri og magnetometri er de eldste geofysiske metodene, men er fremdeles under utvikling og gis stadig nytt liv. I de siste årene har to nyvinninger ført til ny interesse: fra nye satellitter måler man i dag jordens tyngde og magnetiske felt med høy presisjon, noe som gir ny kunnskap om lite tilgjengelige områder, f. eks. Antarktis. Men større betydning for norsk sokkel har utviklingen av gradiometermålinger. Dette gjør det mulig å få bedre opplysninger om undergrunnen i områder som er vanskelige å tolke fra seismikk. På den ytre delen av norsk sokkel finnes det mange steder vulkanske bergarter som kan ligge som plater (sills eller lavaer) i sedimentære bergarter. Med seismiske metoder er det vanskelig å kartlegge strukturer under vulkanske bergarter, men sammen med tolkning av gravimetri og magnetometri kan man få et bilde av de store geologiske strukturene i disse problemområdene (Ashcroft med flere 1999, Smallwood med flere 2001, Reynisson med flere 2007). I tillegg kan elektromagnetiske metoder gi ny kunnskap om den ytre sokkelen og muligheter for nye olje- og gassfunn. Kombinasjon og samtolkning av seismiske og gravimetrisk data kommer også til å bli enda viktigere i framtiden. Den relativt enkle sammenhengen mellom seismisk bølgehastighet og tetthet brukes til automatisk tolkning (inversjon) i ukjente områder og kan gi informasjon som er mer nøyaktig enn hva hver enkelt metode kan gi.

Denne kunnskapen kan hjelpe oss med å forstå hvordan basengene er dannet. De senkaledonske strukturene som avspeiles i det magnetiske feltet er viktige for å forstå sammenhengen mellom fjellkjeden som vi ser på land og hvordan norsk sokkel er oppbygd (jf. Figur 4 og 6). En rekke av NGUs aktiviteter på norsk sokkel er til nytte for petroleumsvirksomheten, men den samme magnetiske metoden kan også brukes på fastlandet i planlegging av tunneler (Olesen med flere 2007).

Det er bare med kunnskap om geologiske strukturer i tre dimensjoner og geologisk utvikling av undergrunnen vi kan forvalte våre naturressurser på en bærekraftig måte. Derfor er det viktig at NGU har ansvar for å forvalte databasen med tyngde og magnetiske data og at denne er tilgjengelig både for industrien, universiteter, forskere og politikere.

Gradiometer, som måler en bestemt komponent av tyngdefeltet, hjelper i tillegg til å måle forandringer i undergrunnen. Med repeterte målinger kan man nå se forandringer både i oljereservoarer og langs forkastningssoner over tid. Dermed har forskere nye muligheter til å studere dynamiske prosesser. Gravimetri og magnetometri er fortsatt viktige geofysiske metoder og vil forbli viktige i de kommende årene. En av de siste store brikkene i puslespillet rundt dannelsen av Norskehavet legges i disse dager med flymagnetiske målinger i Norskebasenget utenfor den midtnorske kontinentalskråningen.

TAKK

Flymålinger og sammenstilling av data på norsk sokkel og fastlandet skjer i samarbeid og med finansiering fra forskjellige institusjoner: BP, Chevron, ConocoPhillips, Eni, RWE Dea, Shell, StatoilHydro, Total, Jardfeingi, Oljedirektoratet, Statens Kartverk, TGS, Fugro, SGU og GTK. Vi er takknemlige for langvarig samarbeid med disse selskapene og institusjonene.

REFERANSER

- Ashcroft, W. A., Hurst, A. & Morgan, C. J. 1999. Reconciling gravity and seismic data in the Faeroe–Shetland Basin, West Shetland. I Fleet, A. J. & Boldy, S. A. R. (red.). *Petroleum Geology of Northwest Europe: Proceedings of the 5th Conference*. The Geological Society of London, London, United Kingdom, s. 595–600.
- Ebbing, J., Lundin, E., Olesen, O. & Hansen, E.K. 2006. The mid-Norwegian margin: A discussion of crustal lineaments, mafic intrusions, and remnants of the Caledonian root by 3D density modelling and structural interpretation. *Journal of the Geological Society, London*, 163, 47–60.
- Olesen, O., Lundin, E., Nordgulen, Ø., Osmundsen, P.T., Skilbrei, J.R., Smethurst, M.A., Solli, A., Bugge, T. & Fichler, C. 2002. Bridging the gap between the onshore and offshore geology in Nordland, northern Norway. *Norwegian Journal of Geology*, 82, 243–262.
- Olesen, O., Dehls, J.F., Ebbing, J., Kihle, O. & Lundin, E. 2007. Aeromagnetic mapping of deep-weathered fracture zones in the Oslo Region—a new tool for improved planning of tunnels. *Norwegian Journal of Geology*, 87, 253–267.
- Reynisson, R.F., Ebbing, J. & Skilbrei, J.R. 2007. Magnetic basement recognition in sub-basalt settings. EGM2007: Innovation in EM, Grav and Mag Methods: a new Perspective for Exploration, Capri, Italy, April 15–18, 2007.
- Skilbrei, J.R., Olesen, O., Osmundsen, P.T., Kihle, O., Aaro, S. & Fjellanger, E. 2002. A study of basement structures and onshore-offshore correlations in Central Norway. *Norwegian Journal of Geology* 82, 263–279.
- Smallwood, J. R., Towns, M. J. & White, R. S. 2001. The structure of the Faeroe–Shetland Trough from integrated deep seismic and potential field modelling. *Journal of the Geological Society*, 158, 409–412.
- Åm, K. 1970. Aeromagnetic investigations on the continental shelf of Norway, Stad–Lofoten (62–69°N). *Norges geologiske undersøkelse*, 266, 49–61.
- Åm, K. 1975. Aeromagnetic basement complex mapping north of latitude 62°N, Norway. *Norges geologiske undersøkelse*, 316, 351–374.

HVA ER TYNGDEFELTET?

Tyngdefeltet dannes på grunn av jordens masse. Sir Isaac Newton beskrev allerede i 1687 grunnlikninger for å beskrive jordens tiltrekningskraft. Jordens tyngdefelt er hovedsakelig avhengig av jordens form og rotasjon. På grunn av sentrifugalkraften som oppstår som følge av rotasjon om jordaksen, er jordradien mindre ved polene enn ved ekvator. Jordens tyngdefelt og form kan bestemmes fra målinger med satellitt, men detaljer om oppbygning av øvre skorpe, for eksempel sedimenttykkelse, kan man bare kartlegge med mer detaljerte sjø- og landmålinger. Tyngdemålinger fra fly er sjeldent brukt på grunn av varierende akselerasjon av fly som må korrigeres (tyngdekraft=masse x akselerasjon). Tyngdeanomalier varierer på grunn av variasjoner i tetthet i undergrunnen. Tettheten av steiner avhenger hovedsaklig av mineralsammensetning og hvordan de ble dannet, for eksempel som sedimentære eller magmatiske bergarter.

HVA ER DET MAGNETISKE FELTET?

Jordens magnetiske felt kan beskrives som en N-S orientert stavmagnet i den innerste kjernen. Dette normalfeltet forandrer seg langsomt over tid og i dag ligger den magnetiske nordpol i Canada. Normalfeltet kan gi nyttig informasjon om oppbygning av jordkloden, men til geovitenskaplig tolkning på sokkelen er vi mest interessert i anomalifeltet. Anomalifeltet beskriver avvik fra normalfeltet på grunn av forskjellig magnetisering i skorpen.

Magnetiske anomalier viser variasjoner i det magnetiske feltet hovedsakelig fra to kilder: (1) indusert felt og (2) remanent felt. Det induserte magnetiske feltet er et produkt av intensiteten av det geomagnetiske feltet og magnetisk susceptibilitet i berggrunnen. Magnetisk susceptibilitet er en fysisk parameter som avspeiler materialeegenskaper i de forskjellige magnetiske mineraler (f.eks. magnetitt og magnetkis). Remanent magnetisering er en egenskap som produserer et magnetisk felt uten et geomagnetisk (tilleggs-) felt.