



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Viking-graben

Pohjanmeren altaan avautuminen linkitettyinä Viking-grabenin kehittymiseen mesotsooisen maailmankauden aikana

Alexandra Merilä

Geologia
LuK-tutkielma
Laajuus: 7 op

18.4.2024
Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidaatin tutkielma

Pääaine: Geologia

Tekijä: Alexandra Merilä

Otsikko: Viking-graben: Pohjanmeren altaan avautuminen linkitettyinä Viking-grabenin kehittymiseen mesotsooisien maailmankauden aikana

Ohjaaja: Eemi Ruuska

Sivumäärä: 28 sivua

Päivämäärä: 18.4.2024

Britteinsaarten ja Euroopan mantereiden luoteisosien välissä sijaitseva Pohjanmeri on kambrikaudesta lähtien käynyt läpi monivaiheisen geologisen kehityksen. Kambrikaudesta lähtien orogeniavaiheet, useat maankuoren venytysprosessit ja niitä seuranneet kallioperän vajoamisvaiheet ovat luoneet koko Pohjanmeren alueelle kattavan hautavajoamien järjestelmän. Tämän järjestelmän tärkein rakenteellinen elementti on Pohjanmeren pohjoisosissa sijaitseva Viking-graben.

Shetlandinsaarten ja Norjan rannikon välissä hautavajoamajärjestelmää halkoo lähes pohjois-eteläsuuntainen Viking-graben. Venytysprosessien seurauksena siitä on muodostunut rakenteeltaan pitkälti epäsymmetrinen puoligraben, jonka länsireunaa hallitsevat suuret normaalisiirroksat. Pohjanmeren useista venytysvaiheista parhaiten tunnetaan permi-triaskauden sekä keskijurakaudesta varhaisliitukauteen kestäneet erkaantumisvaiheet, jotka ovat vaikuttaneet eniten Viking-grabenin muodostumiseen. Rakenteeltaan Viking-graben omaa pääasiassa mesotsooisia piirteitä, jotka ovat peittyneet useiden kilometrien paksuisilla sedimenttikerroksilla. Viking-graben jakautuu tarkemmin pohjoiseen ja eteläiseen Viking-grabeniin.

Pohjanmeren alueelta on löydetty useita merkittäviä hiilivetyalueita, jotka ovat tehneet siitä yhden maailman merkittävimmistä öljyntuotantoalueista. Monet hiilivetyalueista ovat sijoittuneet Viking-grabenin alueelle. Pohjanmeren pohjoisosien hautavajoamajärjestelmä on ollut otollinen hiilivetyjen muodostumiselle alueelle muodostuneiden öljyloukkujen ja paksujen sedimenttisarjojen kerrostumisen myötä. Hiilivetyjen muodostumisen kannalta merkittävimmät sedimenttisarjat ovat kerrostuneet jurakauden aikana.

Viking-grabenia on tutkittu aikojen saatossa valtavasti ja alueella on tehty useita seismisiä tutkimuksia, mutta Viking-grabenin muodostumisen ajankohdasta sekä kehittymisen mekaniikasta ollaan kuitenkin yhä epävarmoja. Viking-grabenia koskevista venytysprosesseista on esitetty niin yksinkertaista hiertomallia kuin yhtenäistä puhdasta hiertomallia puoltavia näkemyksiä. Pohjanmeren pohjoisosien rakenne on kuitenkin seurausta pitkäaikaisesta tektonisesta maankuoren kehityksestä, minkä vuoksi on hyvin todennäköistä, että Viking-grabenin alueella voidaan soveltaa elementtejä molemmista hiertomalleista. Voidaan siis todeta, että Viking-graben on monimutkainen mutta merkittävä rakenne osana pohjoisen Pohjanmeren laajaa hautavajoamajärjestelmää.

Avainsanat: hautavajoama, normaalisiirros, Pohjanmeri, Viking-graben

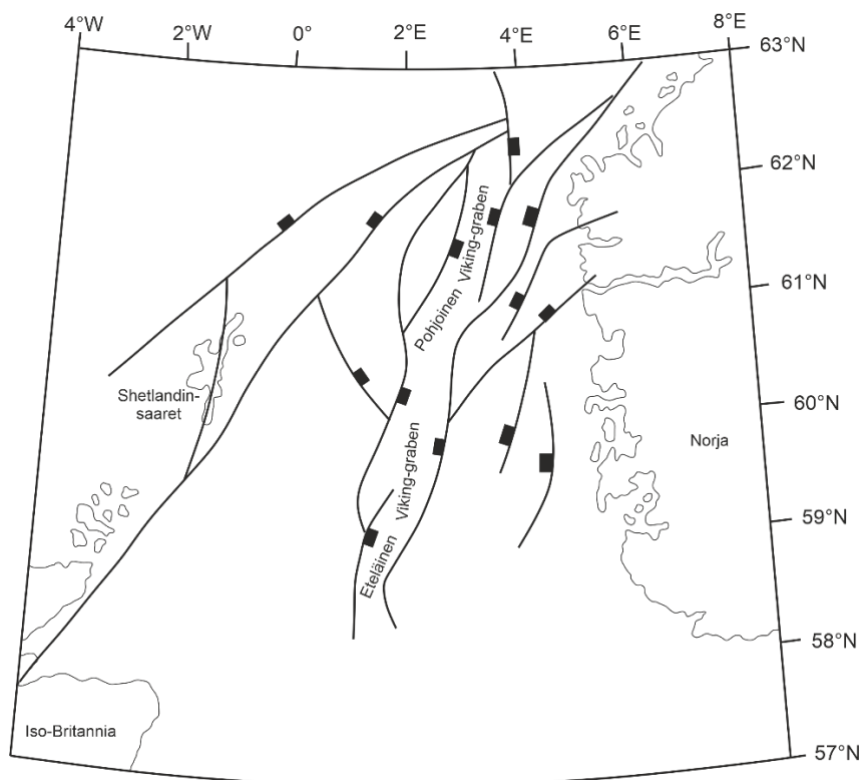
Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Geologinen tausta	6
3	Viking-graben	8
3.1	Pohjoinen Viking-graben	9
3.1.1	Merkittävät rakenteet	9
3.1.2	Tektoninen kehitys permi–liitukausien aikana	9
3.2	Eteläinen Viking-graben	14
3.2.1	Merkittävät rakenteet	14
3.2.2	Tektoninen kehitys permi–liitukausien aikana	14
3.3	Viking-grabenin kivilajiyksiköt	18
4	Yhteiskunnallinen merkitys	20
5	Keskustelu	22
6	Johtopäätökset	25
	Lähteet	26

1 Johdanto

Euroopan mantereen luoteisosien ja Britteinsaarten välissä sijaitsee taloudellisesti merkittävä Pohjanmeri. Kambriikaudesta lähtien yli 500 miljoonan vuoden aikana Pohjanmeren alue on käynyt läpi monimutkaisen geologisen kehityksen (Ziegler 1975). Sitä ovat muokanneet useat venytysprosessit ja niitä seuranneet vajoamisvaiheet (mm. Badley et al. 1988, Johnson et al. 1993). Nämä geologiset vaiheet ovat luoneet Pohjanmereen laajan lähes pohjois-eteläsuuntaisen hautavajoamien järjestelmän, minkä rakenteellista kehitystä on voitu aikojen saatossa ymmärtää ennallistamalla litosfäärilaattojen välistä vuorovaikutusta (Johnson et al. 1993). Nykyisin Pohjanmeren paikoittain syviäkin rakenteita peittävät jopa 11 km:n paksuiset mesotsooiset ja kenotsooiset sedimenttikerrokset (Fichler & Hospers 1990).

Pohjanmeren hautavajoamajärjestelmän tärkein rakenteellinen elementti on Pohjanmeren pohjoisosissa sijaitseva Viking-graben (Johnson et al. 1993). Se on noin 500 km pitkä ja jopa 8–10 km syvä rakenne, joka halkoo Pohjanmeren pohjaa lähes pohjois-eteläsuuntaisesti Shetlandinsaarten ja Norjan länsirannikon välissä (Kuva 1) (Hospers & Ediriweera 1991, Johnson et al. 1993). Rakenteeltaan se on pitkälti epäsymmetrinen puoligraben, jonka suurimmat siirrokset ovat sijoitteen sen länsireunalle (Johnson et al. 1993). Viking-graben jaetaan pohjoiseen ja eteläiseen Viking-grabeniin, joiden kehittyminen sekä rakenteelliset piirteet eroavat jonkin verran toisistaan. Viking-grabenin katsotaan yleisesti olevan pääasiassa mesotsooinen rakenne, mutta sen muodostumisen ajankohdasta sekä kehittymisen mekaniikasta käydään yhä keskustelua (Johnson et al. 1993).



Kuva 1. Viking-grabenin sijainti ja sen jakautuminen pohjoiseen ja eteläiseen Viking-grabeniin (Beach 1986 mukailten).

Pohjanmeren hautavajoamajärjestelmä on muodostunut maankuoren kohtiin, jossa tektoniset voimat vetävät kuorta erilleen (Fossen 2016). Hautavajoamien muodostumiseen on useita syitä, mutta useimmiten puhutaan kahdesta mallista: aktiivisesta erkaantumismallista sekä passiivisesta erkaantumismallista. Aktiivisessa erkaantumismallissa hautavajoama saa alkunsa kohoavasta vaippaperäisestä materiaalista tai pluumista vaipassa, mikä johtaa doomin muodostumiseen ja samalla lisää venyttävää jännitystä kohonneella alueella (Fossen 2016). Passiivisessa erkaantumismallissa hautavajoama muodostuu kohtaan, jonka laattatektoniikkaan liittyy jo ennestään jännitystä (Fossen 2016). Passiivisella erkaantumistavalla muodostuvilla hautavajoamilla on taipumus muodostua litosfäärin heikkousvyöhykkeille, kuten vanhoille orogeenivyöhykkeille (Fossen 2016). Fossenin (2016) mukaan hautavajoamat ovat useimmiten kuitenkin näiden molempien mallien yhdistelmiä.

Hautavajoaman keskelle jäävää painaamaa kutsutaan grabeniksi tai useimmissa tapauksissa puoligrabeniksi (Leeder & Gawthorpe 1987). Grabenia rajaavat venyttävät siirrokset, kuten normaalisiirrokset, jotka aiheuttavat kuoren venymistä (Fossen 2016). Normaalisiirroksessa siirrostaso on kalteva ja kattopuoli liikkuu suhteessa jalkapuolen lohkokon alaspäin siirrostason kaateen suuntaisesti (Marshak 2012). Normaalisiirrosten väliin jäävää vajoavaa lohkoa kutsutaan grabeniksi ja vierekkäistä kohonnutta lohkoa horstiksi (Marshak 2012). Tällaiset niin sanotut symmetriset grabenit, joita rajaavat vastakkaisiin suuntiin kaatuneet normaalisiirrokset, ovat kuitenkin harvinaisia toisin kuin puoligrabenit (Fossen 2016). Puoligrabenit ovat epäsymmetrisiä ja niitä rajaavat samaan suuntaan kaatuneet normaalisiirrokset (Fossen 2016). Useimmiten puoligrabeneissa on toisella reunalla suurempi siirrosvyöhyke, jonka normaalisiirroksysteemissä kattopuolen lohkot ovat kääntyneet ja kaatuneet samaan suuntaan (Marshak 2012, Fossen 2016). Usein näiden normaalisiirroksysteemien siirrokset, joiden kaateet loivenevat syvyyden kasvaessa, saattavat yhdistyä vielä suurempaan irtautumissiirrokseen (Marshak 2012). Epäsymmetrinen puoligraben muodostaa lopulta altaan, joka ajan kuluessa täyttyy sedimenteillä (Marshak 2012).

Tämän tutkielman tarkoituksena on tarkastella Pohjanmeren pohjoisosien hautavajoamajärjestelmän muodostumista linkittäen se Viking-grabenin kehitykseen ja sen tyyppisiin rakenteisiin. Tutkielmassa tarkastellaan pohjoisen ja eteläisen Viking-grabenin tektonista kehitystä, joista ensimmäinen on hieman tarkemmassa käsittelyssä. Tutkielman loppupuolella tarkastellaan Viking-grabenin alueen ekonomista merkitystä sen merkittävien öljy- ja maakaasuvarantojen kannalta. Lopuksi keskustellaan Viking-grabenia koskevista erilaisista venytysprosesseista, joita tutkijat ovat ehdottaneet sen muodostumiselle.

2 Geologinen tausta

Siluurikauden lopussa noin 420 miljoonaa vuotta sitten päättynyt Kaledonian orogenia johti Laurentian, Baltican ja Avalonian mantereiden törmäykseen ja muodosti laajan Kaledonian vuoristoketjun nykyisen Pohjanmeren ja läntisen Euroopan alueelle (Kuva 2) (Ziegler 1982). Kaledonian tektoniikan muodostamia maankuoren pääpiirteitä muokkasi myöhäskaledoninen koillis-lounaissuuntainen hiertosysteemi (Coward 1995). Näihin hiertosysteemiin muodostui venytysprosesseihin liittyviä altaita (Coward 1995). Tektoninen venytys ohensi Kaledonian orogeniassa paksuuntunutta kuorta muodostaen pull-apart-altaita, jotka täyttyivät maalta kulkeutuneista sedimenteistä (Coward 1995). Cowardin (1990) mukaan Pohjanmeren pohjoisosissa Länsi-Orkneyn-allas, Itä-Shetlandin-tasanne ja Viking-graben saivat tällä tavoin alkunsa suurena pull-apart-altaana hiertosysteemin länsipuolella devonikauden ja varhaiskivihiilikauden aikana. Variskilaiset rakenteet syntyivät Luoteis-Eurooppaan kivihiili- ja permikauden aikana luoteissuuntaisessa yhteentörmäyksessä, jolloin maankuoren lohkot ja magmaattiset kaaret kasaantuivat ja törmäsivät Laurentiaan (Coward 1995).



Kuva 2. Kaledonian orogeniavyöhyke Pohjanmeren ja läntisen Euroopan alueella (Slagstad et al. 2011).

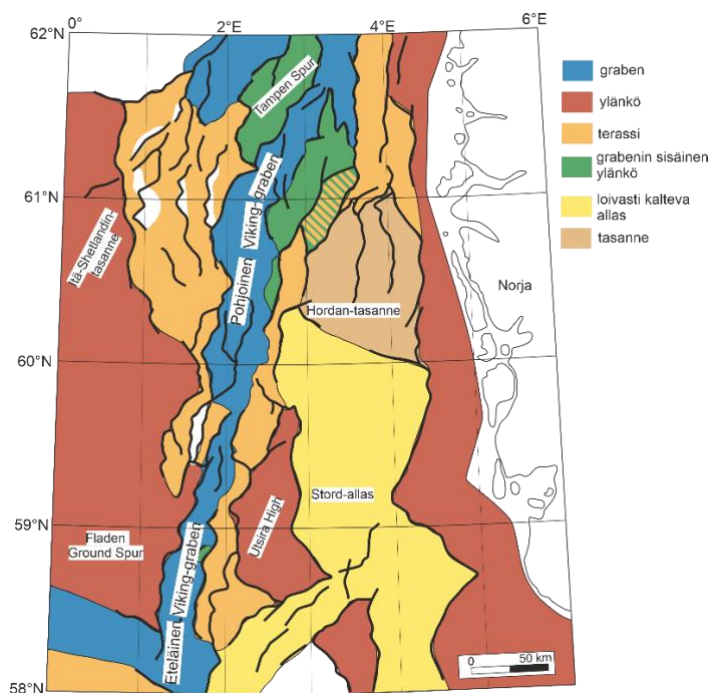
Cowardin (1995) mukaan permikausi ja sitä seurannut triaskausi merkitsivät selkeää muutosta tektonisessa ympäristössä Luoteis-Euroopan alueella. Pangea-supermanter hajosi ja monisuuntaiset hautavajoamajärjestelmät alkoivat kehittyä (Thomas & Coward 1996). Varhaispermikauden aikana kaksi hautavajoamajärjestelmää hallitsi Luoteis-Eurooppaa (Coward 1995). Cowardin (1995) mukaan Arktinen hautavajoamajärjestelmä levisi kohti Länsi-Irlantia Grönlannin itäreunaa pitkin, kun taas toinen hautavajoamajärjestelmä avautui Appalakkien ja Variskilaisten vuorijonojen kautta. Molempia hautavajoamajärjestelmiä yhdisti niiden suunnilleen luode-kaakkosuuntainen venytys (Coward 1995). Permikauden alussa Pohjanmeren alueella sijaitti kaksi merkittävää itä-länsisuuntaista vajoamisallasta: pohjoinen ja eteläinen Permi-allas (Glennie 1990, Johnson et al. 1993). Permikauden loppupuolella merenpinnan nousu johtui permi-kivihiilikauden aikaisesta mannerjäätikön sulamisesta (Coward 1995). Itä-Grönlannin alueella tapahtuneen erkaantumisvaiheen seurauksena Pohjoiselle jäämerelle avautui kulkuväylä mannerjäätikön sulavesille, mikä johti Zechsteinin meren muodostumiseen Pohjois- ja Keski-Eurooppaan (Coward 1995).

Triaskauden aikana Pohjanmeren alueella palattiin takaisin maanpäällisiin olosuhteisiin ja permikautisista altaista tuli laajoja aavikkojärviä (Coward 1995). Pohjois-eteläsuuntainen siirrostumisaktiivisuus laukaisi suoladiapirismen ja johti maankohoamiseen sekä siirroslohkojen eroosioon (Coward 1995). Pohjanmeren pohjoisosien alueella tapahtui myös siirrosaktiivisuuteen liittyvää venymistä ja vajoamista (Coward 1995). Triaskauden aikana Pohjanmeren rakenteellinen kuvio muuttui, mikä viittaa venymissuunnan vaihteluun Pohjanmeren kehityksen aikana (Coward 1995). Permikauden aikana grabenien venyminen oli koillis-lounassuuntainen (Coward 1995). Triaskauden aikana Pohjanmeren pohjoisosien grabenien venymissuunta oli puolestaan luode-kaakkosuuntainen, kun taas etelämpänä grabenien venymissuunta oli vastakkainen (Coward 1995). Cowardin (1995) mukaan Luoteis-Eurooppaan on täten kehittynyt suorakaiteenmuotoinen erkaantumiskuvio. Merkittävin triaskauden aikana muodostunut uusi elementti oli Viking-graben, joka halkaisi pohjoisen Permi-altaan (Coward 1995).

3 Viking-graben

Viking-graben on yksi merkittävimpiä rakenteellisia piirteitä Pohjanmeren pohjoisosissa (Kuva 3) (Johnson et al. 1993). Sen alueelta on aikojen saatossa kerätty valtavasti geologista tietoa, jotka edesauttavat Viking-grabenin geologisen kehityksen tuntemusta (Lepercq & Gaulier 1996). Johnsonin et al. (1993) mukaan Viking-graben on rakenteeltaan kapea, noin 500 km pitkä puoligraben, jonka geometria on pitkälti epäsymmetrinen. Sen länsireunalle on muodostunut suuria siirrosvyöhykkeitä, jotka ovat hallinneet merkittävästi koko Viking-grabenin kehittymistä (Johnson et al. 1993). Sen rakenteelliset piirteet ovat peräisin pääosin mesotsooiselta aikakaudelta (Johnson et al. 1993), jolloin sen kehityksen kannalta merkittävimmät tektoniset vaiheet ovat tapahtuneet (Badley et al. 1988). Nämä rakenteet ovat miljoonien vuosien ajan peittyneet paksuilla mesotsooisilla ja kenotsooisilla sedimenttikerrostumilla (Fichler & Hospers 1990). Nykypäivänä alue toimii merkittävänä öljyn ja maakaasun esiintymispaikkana.

Pohjoisen ja eteläisen Viking-grabenin tektoniseen kehitykseen on vaikuttanut erityisesti kaksi suurempaa pääerkaantumisvaihetta (Badley et al. 1988, Odinsen et al. 2000). Ensimmäisen erkaantumisvaiheen katsotaan tapahtuneen permi- ja triaskausien aikana ja toisen keskijurakauden ja varhaisliitukauden välisenä aikana (Badley et al. 1988). Nämä molemmat erkaantumisvaiheet, joita seurasivat vielä myöhemmin kallioperän vajoamisvaiheet, määrittelevät pitkälti koko Viking-grabenin rakenteellisen kehityksen aina myöhäispaleotsooiselta ajalta lähtien (Badley et al. 1988). Tektonisen aktiivisuuden vaiheiden jälkeen koko Viking-grabenin kehitys on jatkunut vajoamisena ja sedimenttien kerrostumisena niiden kuitenkin hidastuessa huomattavasti (Fichler & Hospers 1990).



Kuva 3. Viking-grabenin avautuminen pohjoisen Pohjanmeren hautavajoamajärjestelmässä (Sneider et al. 1995 mukailten)

3.1 Pohjoinen Viking-graben

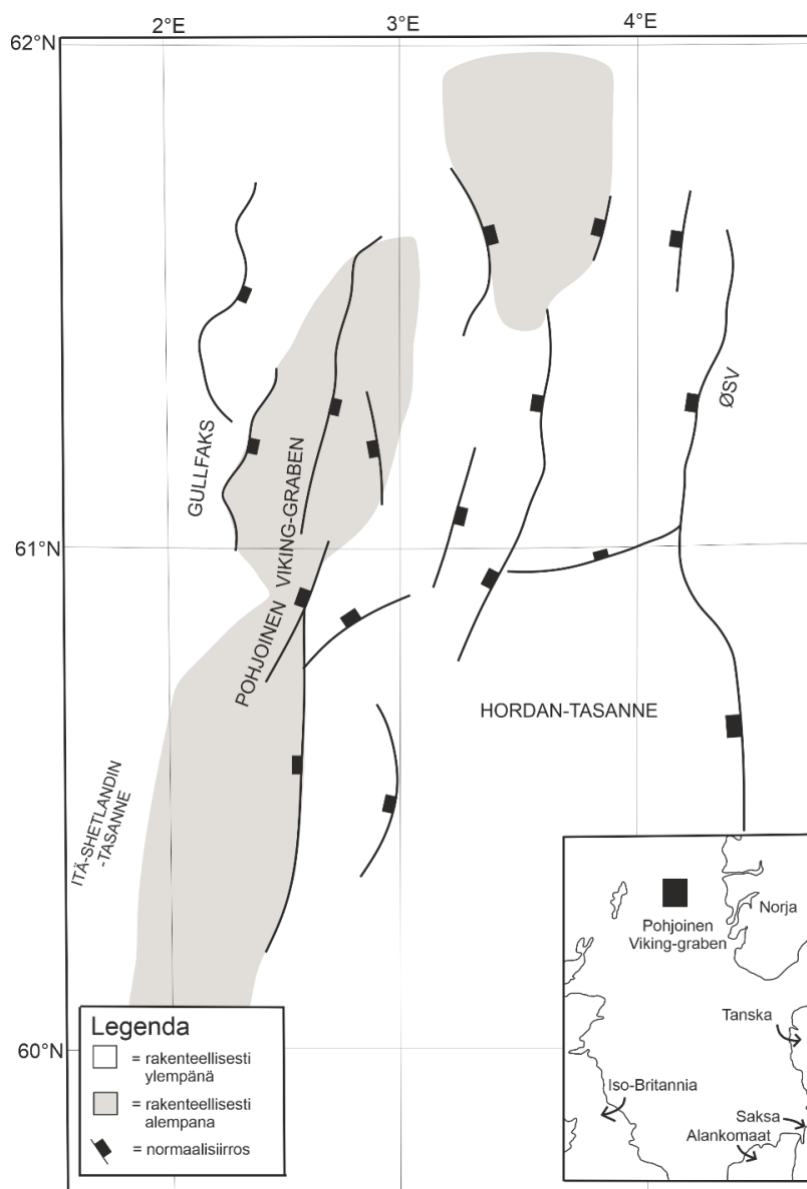
Pohjoinen Viking-graben on muodostunut monivaiheisen tektonisen kehityksen seurauksena mesotsooisien kauden aikana (Lepercq & Gaulier 1996). Sen merkittävä rakenteellinen piirre on sen länsireunan laaja siirrosvyöhyke, joka on pitkälti hallinnut koko pohjoisen Viking-grabenin muodostumista (Johnson et al. 1993). Erityisesti pohjoisen Viking-grabenin tektoniseen kehitykseen ovat merkittävästi vaikuttaneet kaksi suurempaa mesotsooista erkaantumisvaihetta, joita ovat seuranneet kallioperän vajoamisvaiheet (Badley et al. 1988).

3.1.1 Merkittävät rakenteet

Pohjoinen Viking-graben on tyypillinen Pohjanmeren sedimenttiallas (Brun & Tron 1993). Sitä on tutkittu aikojen saatossa paljon kairauksien sekä seismisen datan avulla. Grabenin läpi kulkevista seismisistä leikkauksista on voitu havaita, että pohjoinen Viking-graben on ylemmän kuoren rakenteeltaan epäsymmetrinen ja sitä hallitsevat länteen kallistuneet siirroslohkot (Kuva 4) (Beach 1986). Pohjoisen Viking-grabenin länsiraja koostuu suurista siirroslohkoista, jotka ovat kallistuneet itään päin (Brun & Tron 1993, Odinsen et al. 2000). Länsireunan siirrokset ovat listrisiä eli niiden kaade loivenee syvemmälle mentäessä (Odingsen et al. 2000, Shelton 1984). Näiden listristen siirrosten irtautumissiirrokset sijoittuvat matalammalle kuin kuoren isot siirrokset (Odingsen et al. 2000). Tällaiset rakenteet ovat tallentuneet muun muassa Gullfaks-siirroslohkon alle, joka rajaa pohjoista Viking-grabenia lännessä (Odingsen et al. 2000). Grabenin keskiosassa lähellä toisiaan olevat siirrokset kallistuvat joko itään tai länteen (Brun & Tron 1993). Itärajan merkittävä rakenne on puolestaan Øygardenin siirrosvyöhyke, jonka siirrokset kaatuvat länteen (Odingsen et al. 2000). Tämän siirrosvyöhykkeen ja pohjoisen Viking-grabenin väliin jää Hordan-tasanne, josta löytyy itään päin kallistuneita normaalisiirroksia (Odingsen et al. 2000).

3.1.2 Tektoninen kehitys permi–liitukausien aikana

Permi- ja triaskausien aikana altaiden avautuminen kallioperään kiihtyi Norjan ja Grönlannin merillä, mikä synnytti pohjoisen Viking-grabenin, kun suuret pohjois-eteläsuuntaiset siirrokset aktivoituivat (Lepercq & Gaulier 1996). Badley et al. (1988) mukaan ensimmäinen erkaantumisjakso on mitä todennäköisimmin tapahtunut myöhäispermi- ja varhaistriaskausien välisenä aikana. Tätä ajankohtaa vahvistavat kiteisen kallion päälle kerrostuneet vajoamisen jälkeiset sedimentit, jotka ovat vanhimpia, mitä kairauksissa on tavattu (Badley et al. 1988). Viking-grabenin pohjoisosan itäreunalla sijaitsee noin 15 km:n etäisyydellä toisistaan olevia pohjois-eteläsuuntaisia siirroksia, jotka ovat aiheuttaneet



Kuva 4. Pohjoisen Viking-grabenin sijainti sekä tärkeimmät rakenteelliset piirteet. ØSV = Øygardenin siirrosvyöhyke (Lepercq & Gaulieria 1996 ja Jacksonia & Larsenia 2009 mukailten).

kallioperän yläosaan erisuuntaista kallistumista (Badley et al. 1988). Siirrosten erisuuntainen kallistuminen on merkki listrisestä normaalsiirrostumisesta (Badley et al. 1988). Näiden listristen siirrosten päälle on kerrostunut pääasiassa maanpäällisten olosuhteiden permi- ja triaskausten sedimenttisarjoja, joiden paksuus kallistuneiden lohkojen päällä vaihtelee 4–6 km välillä (Badley et al. 1988, Lepercq & Gaulier 1996). Vastaavasti altaan länsireunalla kallioperän päälle on kerrostunut saman aikakausten sedimenttejä 0,5–1,5 km:n paksuudelta (Badley et al. 1988). Kerrostuminen on näin altaan länsipuolella merkittävästi ohuempaa kuin altaan itäpuolella (Badley et al. 1988). Badleyn et al. (1988) mukaan nämä huomattavat erot sedimenttikerrostumien paksuusjakaumissa viittaavat rakenteeltaan epäsymmetriseen altaaseen, jonka aktiivisimmat siirrokset ovat sijoittuneet altaan itäreunalle.

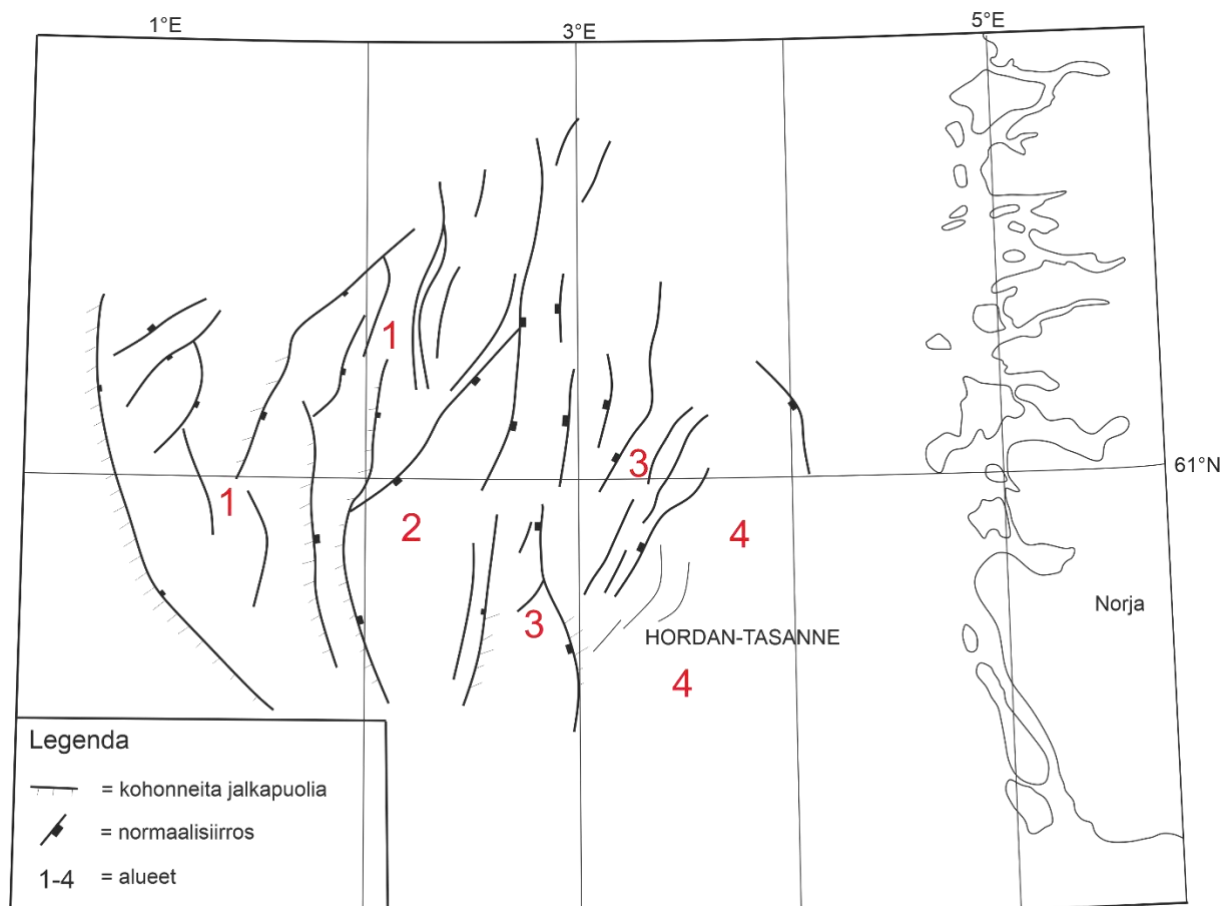
Ensimmäistä erkaantumisjaksoa seurasi koko pohjoiseen Viking-grabeniin vaikuttanut vajoaminen (Badley et al. 1988, Lepercq & Gaulier 1996). Lepercqin ja Gaulierin (1996) mukaan vajoaminen oli hidasta, mutta se lisääntyi reunoilta kohti grabenin keskiosaa ollen noin 0–10 m/Ma. Badleyn et al. (1988) mukaan selvä todiste kallioperän vajoamisesta on Brent- ja Dunlin-nimisten sedimenttikerrostumien paksuuntuminen pohjois-eteläsuuntaisia siirroksia pitkin kohti altaan keskustaa. Vajoamisvaihe kesti aina toisen erkaantumisjakson alkamiseen saakka (Badley et al. 1988).

Pohjoisen Viking-grabenin toinen erkaantumisjakso alkoi keskijurakauden aikana noin 125 miljoonaa vuotta ensimmäistä jaksoa myöhemmin (Badley et al. 1988). Badleyn et al. (1988) mukaan tätä tukee siirroslohkojen merkittävä kallistuminen, joka on nähtävissä kairatuista Brent-ryhmän sedimenttien paksuussuhteista. Juuri ennen toisen erkaantumisjakson alkamista pohjoinen Viking-graben oli merenpinnan tasolla, sillä Brent-ryhmä kerrostui vedenalaisessa ympäristössä (Badley et al. 1988). Badleyn et al. (1988) mukaan venytykseen ei liittynyt juurikaan kohoamista, ja vajoaminen alkoi välittömästi tämän jälkeen. Edellä mainittu siirroslohkojen kallistuminen ei tapahtunut koko pohjoisen Viking-grabenin alueella samanaikaisesti, mutta sen päättymisen katsotaan loppuneen samaan aikaan (Badley et al. 1988).

Badleyn et al. (1988) mukaan merkittävä osa toisen erkaantumisjakson siirroksista olivat uudelleen aktivoituneita ensimmäisen erkaantumisjakson siirroksia. Siirrostensa erisuuntainen kallistuminen viittaa kuitenkin siihen, että siirrokset ovat osa toisiinsa liittyvää systeemiä tai ne erkaantuivat maankuoren hauras-duktiili-siirtymävaiheessa (Badley et al. 1988). Badleyn et al. (1988) mukaan siirrostuminen tapahtui pääasiassa koillis-lounaissuunnassa, mikä kuvastaa alla olevan kallion rakennetta. Alueen rakenteellisen kehityksen tulkintaa vaikeuttaa kuitenkin koillis-lounaissuuntainen venytys pohjoisempaan sijaitsevassa Møre-altaassa (Badley et al. 1988).

Badley et al. (1988) jakavat toisen erkaantumisjakson kahteen vaiheeseen, jotka ajoittuvat suunnilleen Heather- ja Draupne-muodostumien kerrostumisvaiheisiin keskijurakauden ja varhaisliitukauden väliselle ajalle. Ensimmäinen venytysvaihe tapahtui keski- ja myöhäisjurakausien aikana ajoittuen suunnilleen Heather-muodostuman kehittymiseen (Badley et al. 1988). Badley et al. (1988) jakavat ensimmäisen venytysvaiheen tarkemmin neljään erilaiseen alueeseen rakenteellisen tyylin ja vajoamisen määrän perusteella (Kuva 5). Ensimmäinen, altaan länsireunalle ulottuva alue, on monimutkainen eri suuntiin kallistuneista siirroslohkoista muodostuva kokonaisuus (Badley et al. 1988). Badleyn et al. (1988) mukaan silmiinpistävässä alueessa ovat erityisesti selkeät paksuusvaihtelut toisen erkaantumisjakson aikana ja sitä ennen kerrostuneissa sedimenteissä. Toinen alue sijaitsee hautavajoaman keskiosan länsipuolella, joka alkoi vajota nopeasti siirroslohkojen kallistumisen seurauksena. Tälle alueelle kerrostui paksuin erkaantumisen aikainen sedimenttikerros (Badley et al. 1988). Kolmas alue sijaitsee hautavajoaman keskiosan itäpuolella, ja sille on tunnusomaista aktiivinen

lohkojen kallistuminen sekä pohjois-eteläsuuntaisten siirrostien uudelleen aktivoituminen (Badley et al. 1988). Badleyn et al. (1988) mukaan tällä alueella vajoaminen on hallitseva tekijä ja siirroskuvio on luonteeltaan hyvin monimutkainen. Neljännellä alueella, Pohjois-Hordan-tasanteella, sedimenttien paksuuksissa ei ole merkittäviä eroja, mikä viittaa tektoniseen rauhallisuuteen erkaantumisvaiheen alkuaikoina (Badley et al. 1988).



Kuva 5. Toisen erkaantumisvaiheen ensimmäinen venytysvaihe, joka on jaettu neljään eri alueeseen rakenteellisen tyylin ja vajoamisen perusteella. Ensimmäinen (1) alue sijoittuu altaan länsireunalle ja koostuu monimutkaisesta siirrostien kokonaisuudesta. Toinen (2) alue jää altaan keskiosan länsipuolelle ja se alkoi vajota nopeasti siirroslohkojen kallistumisen myötä. Keskiosan itäpuolelle jäävälle kolmannelle (3) alueelle on tunnusomaista aktiivisesti kallistuneet siirroslohkot sekä uudelleen aktivoituneet pohjois-eteläsuuntaiset siirrokset. Neljäs (4) alue pysyi venytysvaiheen aikana tektonisesti hiljaisena. (Badley et al. 1988 mukailen).

Toinen venytysvaihe ajoittui Draupne-muodostuman kerrostumisen aikoihin myöhäisjurakaudesta varhaisliitukauteen (Badley et al. 1988). Badleyn et al. (1988) mukaan siirrosaktiivisuus keskittyi lähinnä altaan reunoille ja kallioperän varhaisempien siirrostien yläpuolelle. Vaikka venymisen määrä oli vähäistä, se läpäisi kuitenkin aiemmin tektonisesti hiljaisena pysyneen Hordan-tasanteen (Badley et al. 1988).

Badleyn et al. (1988) mukaan toisen erkaantumisjakson päätyttyä lähes koko pohjoisen Viking-grabenin allas oli vedenalaisessa ympäristössä lukuun ottamatta joitakin pääsiirroslohkoja. Erkaantumisen päättymisen seurauksena merkittävät lohkoliikunnot lakkasivat ja liitukauden alussa alkoi vajoamisen vaihe (Badley et al. 1988). Vajoaminen oli aluksi siirrostien ohjaamaa ja se tapahtui lähinnä altaan keskiosassa, kunnes se keski- ja myöhäisliitukausien aikana siirtyi aktiivisten siirrostien myötä myös altaan reunoille aina Hordan-tasanteelta ja Gullfaksin-siirroslohkon reunalle asti (Badley et al. 1988, Lepercq & Gaulier 1996). Jotkin merkittävät siirrokset olivat aktiivisia aina keskiliitukauden lopulle asti, mikä on voitu todeta useista kulmikkaista epäjatkuvuuspinnoista altaan sisällä (Lepercq & Gaulier 1996). Lepercqin ja Gaulierin (1996) mukaan myöhäisliitukausi vaikuttaa olleen tektonisesti hiljainen kausi.

Paleogeeni- ja mesotsooisella vajoamisnopeus kasvoi merkittävästi (30–40 m/Ma) pohjoisen Viking-grabenin alueella, ja sen katsotaan vaikuttaneen tasaisesti myös koko Pohjanmeren alueella (Lepercq & Gaulier 1996). Mesotsooisesta sedimentaatiosta rajoittuessa lähinnä grabenin alueelle, kenotsooinen sedimentaatio ylitti Viking-grabenin rajat (Lepercq & Gaulier 1996). Myöhäisliitukaudelta lähtien karkeiden sedimenttien kerrostuminen ylänköjen, kuten Norjan kratonin, Skotlannin tai Shetlannin reunoille oli kuitenkin vähäistä (Lepercq & Gaulier 1996). Lepercq ja Gaulier (1996) pitävät tähänärkeimpänä selityksenä kyseisten alueiden paikallista kohoamista ja näiden alueiden keskelle jäävien osien, kuten pohjoisen Viking-grabenin alueen ja Hordan-tasanteen, samanaikaista voimakasta vajoamista. Myöhemmin eioseenin ja oligoseenin aikana koko pohjoinen Viking-grabenin alue pysyi suhteellisen vakaana, kunnes oligoseenin loppupuolella koko alueella tapahtui maankohoamista (Lepercq & Gaulier 1996). Lepercqin ja Gaulierin (1996) mukaan kohoaminen oli suhteellisen tasaista pohjoisen Viking-grabenin länsireunalla, kun taas Øygardenin siirrosvyöhykkeen alueella kohoaminen oli huomattavasti merkittävämpää. Syynä tähän oli luultavasti siirrosvyöhykkeen aktiivisuus (Lepercq & Gaulier 1996). Kvartaarikaudella suuret jäätiköt kehittyivät Pohjanmeren alueelle ja viimeisimpien jääpeitteiden sulaminen aiheutti alueella yhä nykyisinkin tapahtuvaa taipuvaa maankohoamista (Fjedskaar & Cathles 1993, Lepercq & Gaulier 1996 mukaan).

3.2 Eteläinen Viking-graben

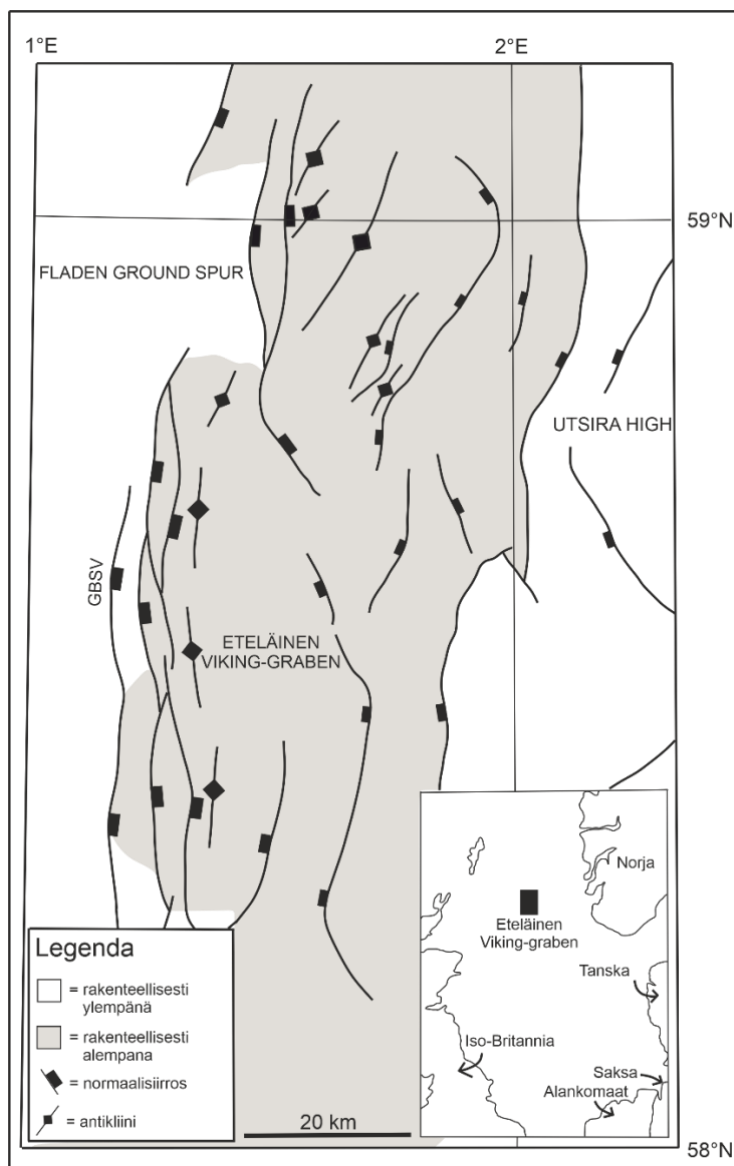
Eteläinen Viking-graben on muodostunut useiden maankuoren venytysjaksojen ja sitä seuranneiden vajoamisvaiheiden seurauksena mesotsooisen kauden aikana (Jackson & Larsen 2009). Se on rakenteeltaan huomattavan epäsymmetrinen, ja sen merkittävin rakenteellinen piirre on sen länsireunaa rajaava Graben Boundary -siirrosvyöhyke (Johnson et al. 1993, Jackson & Larsen 2009). Tämän siirrosvyöhykkeen tektoninen aktiivisuus aina mesotsooisen kaudelta lähtien on vaikuttanut merkittävästi koko eteläisen Viking-grabenin muodostumiseen (Johnson et al. 1993, Thomas & Coward 1996).

3.2.1 Merkittävät rakenteet

Eteläinen Viking-grabenin alue muodostaa lähes pohjois-eteläsuuntaisen, loivasti länteen kallistuvan epäsymmetrisen puoligrabenin, joka on kehittynyt jaksoittaisten mesotsooisten venytysvaiheiden seurauksena (Kuva 6) (Johnson et al. 1993, Thomas & Coward 1996). Se rajoittuu lännessä Fladen Ground Spur -rakenteeseen (Thomas & Coward 1996, Jackson & Larsen 2009). Tämän rakenteen ja eteläisen Viking-grabenin väliin jää monimutkainen itään/kaakkoon kaatuvien siirrosten järjestelmä, jota kutsutaan Graben Boundary -siirrosvyöhykkeeksi (Thomas & Coward 1996, Jackson & Larsen 2009). Kyseinen siirrosvyöhyke on hallinnut eteläisen Viking-grabenin muodostumista koko sen kehittymisen ajan (Cherry 1993, Jackson & Larsen 2009 mukaan). Itäreunalla eteläinen Viking-graben ohenee rakenteellisesti monimutkaiselle Utsira High-alueelle, jossa vallitsevat paikallinen siirrostuminen ja eroosio (Thomas & Coward 1996). Muita tärkeitä rakenteellisia piirteitä eteläisen Viking-grabenin alueella ovat Sleipnerin-allas sekä Brae-provinssi, jossa sijaitsee Pohjanmeren alueen merkittäviä öljyvarantoja (Thomas & Coward 1996).

3.2.2 Tektoninen kehitys permi–liitukausien aikana

Pohjoisen Viking-grabenin tavoin eteläisen Viking-grabenin katsotaan muodostuneen alun perin myöhäispermikauden ja varhaistriaskauden aikana tapahtuneen siirrosten ohjaaman vajoamisen seurauksena (Coward 1995). Glennien (1990) mukaan eteläinen Viking-graben sijaitsi tuolloin Pohjois-Permin altaan pohjoisreunalla, jossa se muodosti laajalti pohjois-eteläsuuntaisen siirrosten rajoittaman merenlahden. Kyseiseen merenlahteen kerrostui Zechstein-ryhmän evaporiittisia sedimenttejä (Thomas & Coward 1996). Thomasin ja Cowardin (1996) mukaan grabenin alueella on seismisiä todisteita suolatektoniikasta. Etelä-Viking grabenin alueella todisteena tästä ovat alueelle kehittyneet suolapatjat, diapirit sekä epäjatkuvat pohjois/koillis-etelä/lounaissuuntaiset seinämät (Jackson & Larsen 2009).



Kuva 6. Eteläisen Viking-grabenin sijainti sekä tärkeimmät rakenteelliset piirteet. GBSV = Graben Boundary –siirrosvyöhyke (Jackson & Larsen 2009 mukailten).

Thomasin ja Cowardin (1996) mukaan eteläisen Viking-grabenin rakenteellinen tulkinta on haastavaa triaskauden ajoilta, sillä alueelta kairatuista näytteistä ei ole saatu juurikaan tältä ajalta koskevia tietoja. Pohjanmeren pohjoisosan alueella triaskauden aikaista siirroskuviota hallitsevat koillis-lounassuuntaiset rakenteet (Thomas & Coward 1995, Thomas & Coward 1996 mukaan). Pohjanmeren pohjoisosissa sedimenttisarjat paksuuntuvat pääsääntöisesti itään/kaakkoon päin alueen epäsymmetrisissä grabeneissa, joita ohjaavat länteen kallistuvat suuret normaalisiirrokset (Thomas & Coward 1996). Triaskauden aikainen Pohjanmeren pohjoisosan venyminen näyttää keskittyvän pääasiassa länteen kallistuvien normaalisiirrostien kohdalle (Thomas & Coward 1996). Venymissuuntaa on puolestaan ollut vaikeampi määrittää, joskin se näyttää olevan enemmän tai vähemmän suorakulmainen luode-kaakkosuuntainen (Thomas & Coward 1996). Thomas ja Coward (1996) toteavat, että venymissuunta

on kuitenkin todennäköisesti vaihdellut, mikä on johtanut ristikkäisen siirroskuvion muodostumiseen. Vaikka triaskauden venymisen ja siirrostensa hallitsemisen vajoamisen laajuudesta on melko vähän tietoa, Graben Boundary -siirrosvyöhykkeen eteläisen Viking-grabenin länsireunalla arvellaan olleen aktiivinen (Thomas & Coward 1996).

Eteläisestä Viking-grabenista on laajojen tutkimusten avulla saatu melko yksityiskohtainen käsitys myöhäisjurakauden aikaisesta rakenteellisesti ympäristöstä, mutta varhais- ja keskijurakaudesta tiedot ovat hajanaisempia (Thomas & Coward 1996). Jacksonin ja Larsenin (2009) mukaan tämä johtuu eteläisen Viking-grabenin kohoamisesta ja eroosiosta varhaisjurakauden aikana. Underhillin ja Partingtonin (1993) mukaan varhaisjurakauden aikana litosfäärin pohjaan iskeytyi vaippaperäinen pluumi, jonka seurauksena muodostui Keski-Pohjanmeren doomi. Sen muodostumisen seurauksena eteläinen Viking-graben alkoi kohota (Underhill & Partington 1993). Keskijurakauden aikana Keski-Pohjanmeren doomi romahti, ja Graben Boundary -siirrosvyöhykkeellä alkoi merkittävä aktiivisuus (Thomas & Coward 1996). Tämän seurauksena siirrostensa aiheuttama vajoaminen kasvoi ja eteläinen Viking-graben alkoi taas vajota nopeasti (Thomas & Coward 1996, Kane 2010). Keskijurakauden lopulta lähtien alkanut venymisvaihe grabenin länsireunaa pitkin loi syvän epäsymmetrisen puoligrabenin ja synnytti samalla alueellisen kallistumisen länteen/luoteeseen (Thomas & Coward 1996, Kane et al. 2010).

Myöhäisjurakauden aikana eteläisen Viking-grabenin alueella alkoi laajamittaisempi venymisvaihe (Thomas & Coward 1996). Thomasin ja Cowardin (1996) mukaan länsireunan siirrosjärjestelmän NNE-SSW-suuntaisia siirroksia pitkin tapahtuneet kallistumis- ja liukumaliikkeet johtivat entisestään syvän ja epäsymmetrisen puoligrabenin kehittymiseen. Myöhäisjurakauden lopulla aktiivisuus Graben Boundary -siirrosvyöhykkeellä hiljeni ja vajoaminen eteläisen Viking-grabenin alueella alkoi vähitellen hiipua (Thomas & Coward 1996). Eteläisen Viking-grabenin itäreunalla aktiivisuus pysyi jurakauden ajan maltillisena pienempien siirrostensa rajatessa grabenia (Johnson et al. 1993).

Tektonisesti aktiivisten vaiheiden jälkeen myös lähes koko eteläinen Viking-graben oli veden alla varhaisliitukaudella (Johnson et al. 1993). Siirrostensa ohjaama vajoaminen rajoittui alkuun grabenin keskialueille, kunnes se myöhemmin levisi asteittain myös Viking-grabenin reunoille (Badley et al. 1988). Vajoamisen leviäminen kauemmas grabenin keskialueilta oli samanaikaista maailmanlaajuisen merenpinnan nousun kanssa (Haq et al. 1987). Myöhäisliitukauden aikana vajoaminen muuttui suhteellisen tasaiseksi koko Viking-grabenin alueella, ja siirrostumisen rajoittui lähinnä altaan reunoille (Badley et al. 1988). Vajoamisen lisäksi eteläisen Viking-grabenin alueella alkoi inversiovaihe eli niin sanottu käänteisvaihe, joka muutti grabenin erkaantumisrakennetta (Cherry 1993, Thomas & Coward 1996 mukaan). Thomasin ja Cowardin (1996) mukaan inversiovaihe johti puoligrabenin puristumiseen.

Puristumisvaiheen alkuperä on kuitenkin epäselvä, mutta siihen liittyy merkittävää poimuttumista, irtautumissysteemin kääntymistä ja kulku-liukusiirostumista (Thomas & Coward 1996).

Thomas ja Coward (1996) ehdottavat eteläisen Viking-grabenin kehittymiselle ohutkuorista irtautumissiiros-mallia. Heidän mukaansa Zechsteinin evaporiiitit ovat toimineet irtautumissiiros-horisonttina (Thomas & Coward 1996). Irtautumissiiros-horisontilla tarkoitetaan matalan kulman venymissiirosvyöhykettä, joka on työntövoimien vaikutuksesta irtautunut vähemmän deformatuneesta pohjakerroksesta (Fossen 2016). Tätä irtautumissiiros-horisonttia pitkin tapahtui triaskauden ja sitä nuorempien kerrostumien irtautuminen vanhemmista kivistä ja pohjakerroksesta (Thomas & Coward 1996).

3.3 Viking-grabenin kivilajiyksiköt

Pohjanmeren pohjoisosien kiteinen kallioperä koostuu Kaledonian orogenian ja sitä edeltävien orogenioiden kokoonpuristuneista kivistä (Johnson et al. 1993). Kiteistä kallioperää peittävät Viking-grabenin alueella sedimenttikerrokset, joiden paksuudet vaihtelevat ohuista 1 kilometrin paksuisista kerroksista jopa 11 kilometrin paksuisiin kerroksiin Viking-grabenin syvimmissä osissa (Fichler & Hospers 1990). Lepercqin ja Gaulierin (1996) mukaan mesotsooinen stratigrafiakehitys Viking-grabenin alueella on kokonaisuudessaan hyvin vakiintunut (Taulukko 1). Eteläisen ja pohjoisen Viking-grabenin stratigrafioissa on kuitenkin joitakin eroja.

Varhaisjurakauden alussa Viking-grabenin alueella siirryttiin permi- ja triaskausten ei-merellisistä kerrostumista jurakauden merellisten liuskeiden kerrostumiseen (Sneider et al. 1995). Tätä siirtymää edustaa pohjoisen Viking-grabenin alueella kerrostunut hiilipitoinen Statfjordin-muodostuma (Sneider et al. 1995, Lepercq & Gaulier 1996). Tämän päälle kerrostuivat Dunlin-ryhmän liuske- ja savipitoiset hiekkakivet (Lepercq & Gaulier 1996). Eteläisen Viking-grabenin alueella varhaisjurakauden stratigrafia puuttuu kokonaan (Sneider et al. 1995). Lähtökohtaisesti varhaisjurakauden sedimenttisarjat paksunevat itään päin kohti pohjoista Viking-grabenia, kun taas etelään päin ne ohenevat tai paikoitellen puuttuvat kokonaan eteläisen Viking-grabenin alueelta (Thomas & Coward 1996).

Taulukko 1. Stratigrafiakehitys pohjoisen Viking-grabenin (a) (Pedersen et al. 2006 mukaillen) ja eteläisen Viking-grabenin alueilla (b) triaskaudesta varhaisliitukauteen (Kane et al. 2010 mukaillen).

(a)		(b)					
Ajanjakso	Ryhmä	Muodostuma	Ajanjakso	Ryhmä	Muodostuma		
Liitu	Ala	Cromer Knoll	Rødberg	Liitu	Ala	Cromer Knoll	Rødberg
			Sola				Sola
			Åsgard				Åsgard
Jura	Ylä	Viking	Draupne/Mandal	Jura	Ylä	Viking	Draupne
			Heather				Heather
	Keski	Brent	Tarbert/Hugin	Keski	Vestland	Hugin	
			Ness/Bryne			Sleipner	
			Etive				
			Rannoch				
			Broom/Oseberg				
	Ala	Dunlin	Statfjord	Trias	Ylä	Herge	Skagerrak
Trias	Ylä	Hegre	Lunde/Skagerrak	Ala	Herge	Smith Bank	
	Keski		Lomvi				
	Ala		Teist/Smiths Bank				

Keskijurakauden aikana tapahtuneen transgression seurauksena pohjoisen Viking-grabenin alueella kerrostui enimmäkseen orgaanista ainesta sisältäviä liuskeita ja hiekkvoja (Selley 1998). Tällaisia olivat esimerkiksi merkittävät Brent-ryhmän deltamaiset sedimentit (Lepercq & Gaulier 1993). Eteläisen Viking-grabenin alueella keskijurakauden aikana kerrostui Sleipnerin-muodostuma siirrostumisesta johtuvan vajoamisen myötä (Sneider et al. 1995, Jackson & Larsen 2009). Sen päälle kerrostui matalan meren ympäristöön Hugin-muodostuma, joka kuvastaa siirtymää maanpäällisistä olosuhteista merellisiin olosuhteisiin eteläisen Viking-grabenin alueella (Sneider et al. 1995, Jackson & Larsen 2009).

Myöhäisjurakaudella toisen erkaantumisvaiheen kanssa samaan aikaan sekä pohjoisen että eteläisen Viking-grabenin alueella kerrostui merellisiä liuskeita (Badley et al. 1988, Sneider et al. 1995). Näitä olivat Heatherin-muodostuman hyllykerrokset sekä tätä peittävä syvän meren Draupne-muodostuman kerrostumat (Jackson & Larsen 2009, Kane et al. 2010). Näistä erityisesti Draupne-muodostuma on tunnettu erityisen rikkaasta orgaanisen aineksen määrästä sekä korkeasta radioaktiivisuudestaan (Brown 1990). Jurakauden lopulla eteläisen Viking-grabenin länsireunalla sedimentaatiota hallitsivat karkearakaisemmat ja paikallisemmin kerrostuneet viuhkerrostumat, joista yksi esimerkki on Brae-muodostuma (Thomas & Coward 1996). Kyseiset kerrostumat sekoittuivat savimaisten sarjojen, kuten edellä mainittujen Heather- ja Hugin-muodostumien kanssa (Thomas & Coward 1996). Pohjoisen Viking-grabenin alueella kerrostui samoihin aikoihin syvän meren Magnus-muodostuman hiekkakivet (Sneider et al. 1995). Magnus- ja Brae-muodostumat kerrostuivat molemmat suurien siirrosvyöhykkeiden läheisyyteen (Sneider et al. 1995). Liitukauden aikana jurakauden aikaiset kerrostumat peittyivät liuskeilla ja kalkkikivillä, mikä mahdollisti osaltaan jurakautisten merkittävien öljykenttien muodostumisen (Selley 1998). Tämän jälkeen sedimenttien kerrostuminen on hidastunut merkittävästi koko Viking-grabenin alueella (Fichler & Hospers 1990).

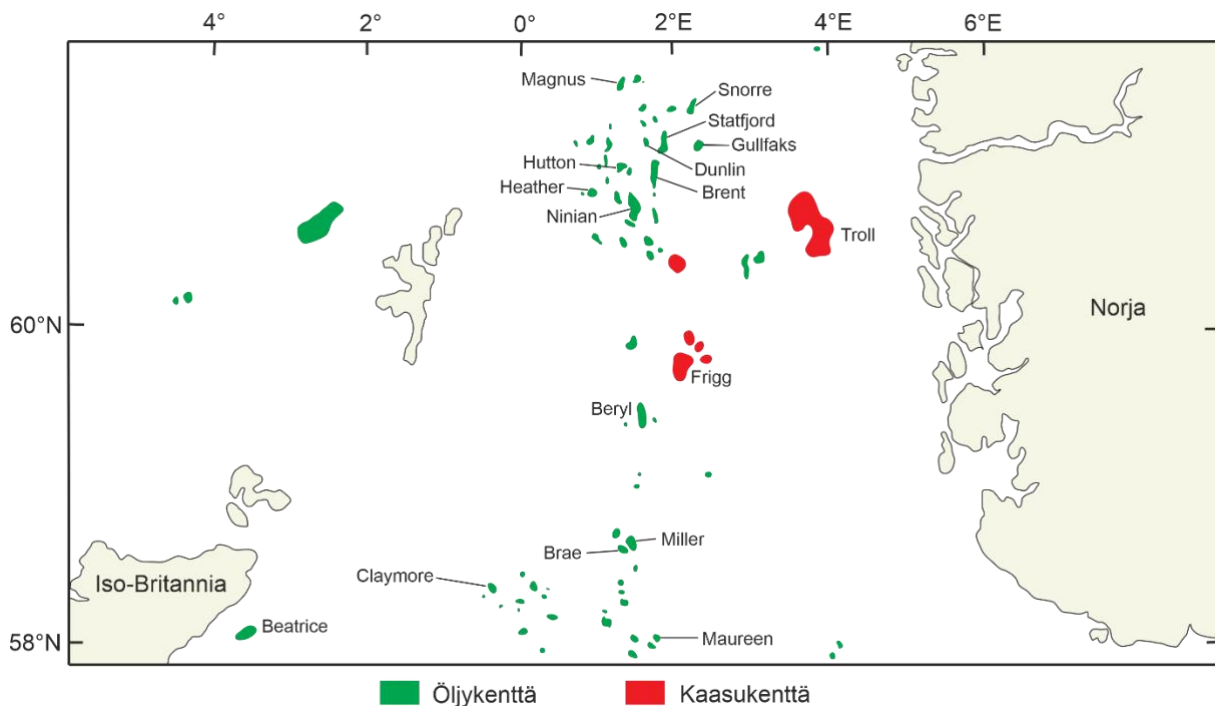
4 Yhteiskunnallinen merkitys

Jurakauden aikainen sedimenttijärjestelmän kehitys on taloudellisesti merkittävä Pohjanmeren alueella, sillä tuona ajanjaksona kerrostuivat alueen tärkeimmät luonnonvaroja sisältävät kerrostumat (Thomas & Coward 1996). Kenotsooisena kauden aikana hiilivetyjä alkoi muodostua Pohjanmeren alueella, ja etenkin viimeisen neljän miljoonan vuoden aikana hautavajoamiin on muodostunut merkittäviä määriä öljyä ja maakaasua (Dahl & Augustson 1993, Gormly et al. 1994 mukaan). Viking-grabenin alueella on useita erittäin tuottavia hiilivetyalueita, jotka koostuvat pohjoisen ja eteläisen Viking-grabenin alueilla sijaitsevista laajoista öljy- ja kaasukentistä (Kuva 7) (Gormly et al. 1993, Justwan et al. 2006). Beachin (1986) mukaan Viking-grabenin rakenteen epäsymmetrinen kehittyminen kuitenkin korostuu hiilivetyalueiden ko'issa, jotka vaihtelevat järjestelmällisesti pienempien sijoituksessa länteen ja suurempien itään.

Merkittävien hiilivetyalueiden muodostuminen Pohjanmeren hautavajoamiin on useiden öljyn muodostumista suosivien olosuhteiden seurausta (Selley 1998). Selley (1998) mukaan erinomaisia säiliöitä ovat muun muassa huokoiset hiekat sekä hautavajoamien keskiosissa sijaitsevat paksut sedimenttikerrostumat. Pohjanmeren alueella sijaitsevat erilaiset öljyloukut ovat myös merkittäviä öljyvarastoja (Selley 1998). Hiilivedyt voivat jäädä loukkuun usealla eri tavalla, mutta ne pääsääntöisesti jaetaan rakenteellisiin ja stratigrafisiin loukkuihin (Selley 1998). Rakenteellisten öljyloukkujen geometria muodostuu kerrostumisen jälkeisen tektonisen muodonmuutoksen seurauksena (Selley 1998). Stratigrafisten loukkujen geometria syntyy puolestaan kivilajimuutosten seurauksena (Selley 1998). Johnson et al. (1993) mukaan suurin osa Pohjanmeren pohjoisosan loukkumekanismeista sisältävät sekä rakenteellisia että stratigrafisia piirteitä, joissa hiekkaa esiintyy kallistuneiden siirroslohkojen taitekohdissa.

Brownin (1990) mukaan luonnonvaroja sisältäviä kiviä löytyy kaikista jurakauden kerrostumista. Vanhimpiin varhaisjurakauden varantoihin kuuluu Statfjord-muodostuman sedimentit (Gautier 2005). Keskijurakauden laajimmalle levinneisiin ja jurakauden tärkeimpiin luonnonvaroihin kuuluu Brent-ryhmän muodostuma (Brown 1990). Se on merkittävin koko pohjoisen Pohjanmeren alueella ja se hallitsee koko Viking-grabenin öljy- ja kaasutuotantoa (Johnson et al. 1993, Gautier 2005). Brent-ryhmän deltaiset hiekkakivet ovat useiden pohjoisen Viking-grabenin öljykenttien pääasiallisia varantolähteitä, joita ovat muun muassa Brentin, Gullfaksin, Ninianin ja Huttonin öljykentät monen muun joukossa (Gautier 2005). Brentin öljykentän löytyminen vuonna 1971 oli merkittävä löytö koko Pohjois-Pohjanmeren ja sen myötä Viking-grabenin alueelta etsittiin erityisesti matalan meren hiekkakiviesiintymiä (Johnson et al. 1993, Gautier 2005). Brentin öljykentän löytymisen jälkeen viiden seuraavan vuoden aikana Viking-grabenin alueelta löydettiin kymmenen merkittävää öljykenttää, joista osa sijaitsi myös eteläisen Viking-grabenin alueella (Gautier 2005). Edellä mainitut Statfjord- ja Brent-

muodostumat ovat molemmat öljyloukkuja, jotka ovat muodostuneet kääntyneiden siirroslohkojen reunoihin ja peittyneet myöhäisjurakauden ja varhaisliitukauden liuskeilla (Brown 1990).



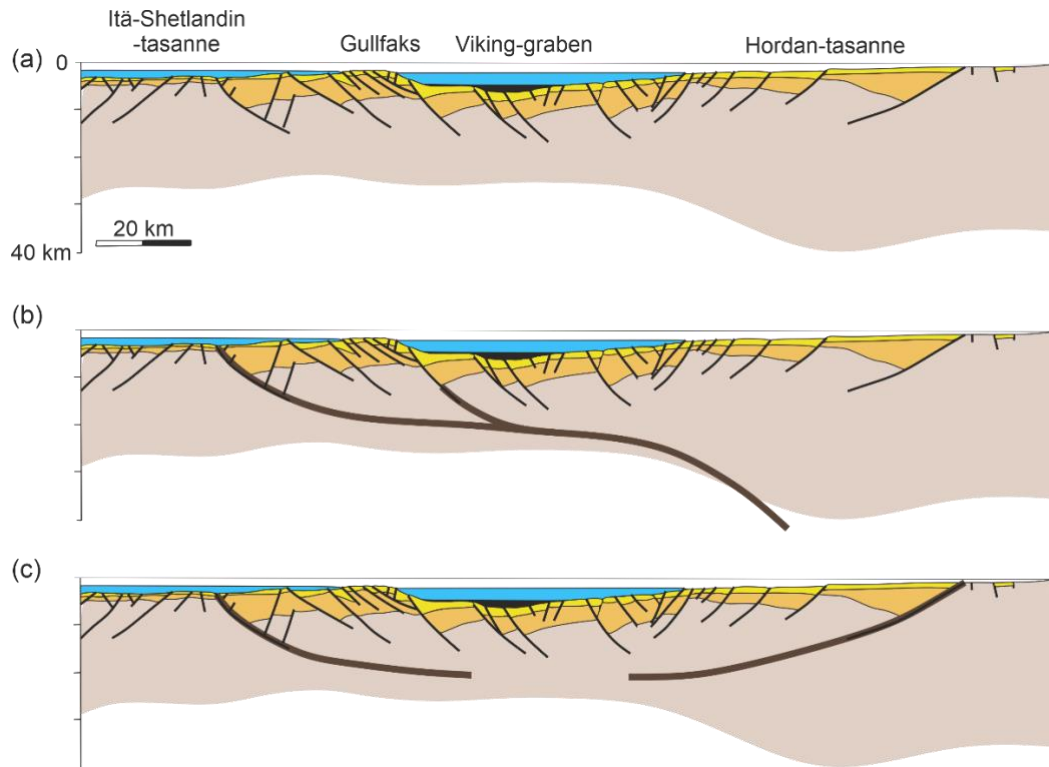
Kuva 7. Pohjoisen Pohjanmeren alueella olevat öljy- ja kaasukentät, joista merkittävä osa Viking-grabenin alueella (Gautier 2005 mukailien).

Myöhäisjurakauden muodostumat ovat muihin jurakauden kerrostumiin verrattuna paikallisemmin muodostuneita (Brown 1990), ja ne sijaitsevat suurten siirroslohkojen välittömässä läheisyydessä (Gautier 2005). Johnson et al. (1993) mukaan myöhäisjurakauden hiekkakerrostumat ovat kehittyneet merkittävimiksi öljyvarastoiksi etenkin eteläisen Viking-grabenin alueella. Siellä sijaitsevat muun muassa Braen ja Millerin laajat öljykentät, jotka sijoittuvat aivan Fladen Ground Spur -rakenteen läheisyyteen (Johnson et al. 1993). Eteläisen Viking-grabenin alueella sijaitsee myös merkittävä Sleipnerin kaasukenttä (Justwan et al. 2006). Saman aikakauden öljyvarastoista merkittävin pohjoisen Viking-grabenin alueella on Magnusin öljykenttä (Johnson et al. 1993), jonka geologinen rakenne on samanlainen kuin aiemmin mainituilla Statfjord- ja Brent-muodostumilla (Brown 1990).

5 Keskustelu

Viking-grabenia on aikojen saatossa tutkittu paljon, mutta sen kehityksestä on käyty kuitenkin paljon keskustelua. Viking-grabenin muodostumisen alkamisajankohta on yksi eriäviä mielipiteitä herättäneitä aiheita, sillä näihin rakenteisiin liittyvistä erkaantumisen aikaisista sedimenteistä on hyvin vähän tietoa (Odinsen et al. 2000). Muun muassa Steel ja Ryseth (1990) esittävät, että Viking-grabenin muodostuminen on voinut alkaa jo permikauden alkupuolella tai vielä aiemmin. Useat tutkijat kuitenkin mieltävät Viking-grabenin muodostumisen alkaneen myöhäispermikauden tai varhaistriaskauden aikana (Giltner 1987, Badley et al. 1988). Yksimielisempiä ollaan siitä, että kuoren erkaantuminen on hyvin todennäköisesti tapahtunut kahdessa pääerkaantumisvaiheessa. Ensimmäinen tapahtui myöhäispermikauden ja varhaistriaskausien välisenä aikana ja jälkimmäinen keskijurakauden ja varhaisliitukauden välissä (Badley et al. 1988, Johnson et al. 1993). Tämän lisäksi myös Viking-grabenin muodostumisen mekanismeista ja kehityksestä on käyty paljon keskustelua. Alueella on tehty lukuisia seismisiä tutkimuksia ja syvälle ulottuvat seismiset mittaukset antavat melko selkeän kuvan Viking-grabenin rakenteesta maankuoren tasossa (Brun & Tron 1993). Sen sijaan Viking-grabenia koskevista kuoren venytysprosesseista ollaan kuitenkin edelleen epävarmoja (Brun & Tron 1993). Seuraavaksi tarkastellaan kahta erilaista venytysprosessia, joita on ehdotettu Viking-grabenin muodostumisen mekanismeiksi. Ensimmäisenä käsitellään Wernicken (1985) teoriaa yksinkertaisesta hiertomallista, jonka jälkeen tarkastellaan McKenzién (1978) esittämää teoriaa yhtenäisestä hiertomallista.

Viking-grabenia koskevista venytysprosesseista muun muassa Beach (1986) ehdottaa sen alueelle yksinkertaista hiertomallia (Kuva 8, b), joka on yhtenevä Wernicken (1985) kuvaaman mallin kanssa. Wernickenin yksinkertaista hiertomallia ohjaa maankuoren tai mahdollisesti koko litosfäärin läpäisevä matalankulman irtautumissiirros tai hiertovyöhyke. Tämä hiertomalli johtaa epäsymmetrisen hautavajoaman kehittymiseen (Fossen 2016). Beach (1986) perustelee näkemyksensä Viking-grabenin seismisten tietojen osoittaman rakenteellisen epäsymmetrian avulla. Beachin (1986) mukaan Viking-grabenin epäsymmetrisyyden tulkitaan johtuvan sen alla olevasta itään päin kallistuvasta matalan kulman irtautumissiirroksista. Tämän venyneen hiertovyöhykkeen tulkitaan kulkevan maankuoren alaosaan Viking-grabenin länsireunan alle, josta se suuntautuu Hordan-tasanteen alla ylävaippaan (Beach 1986). Beachin (1986) mukaan Wernicken yksinkertainen hiertomalli selittää Viking-grabenin tärkeimmät geometriset piirteet ja on täten sopiva malli sen kehittymiselle.



Kuva 8. Kuvassa esitetty seisminen poikkileikkaus pohjoisesta Viking-grabenista (a), jossa vasemmalle jää Viking-grabenin länsireuna ja oikealle itäreuna. Keskellä tulkinta yksinkertaisesta hiertomallista (b) ja alimpana yhtenäisestä, puhtaasta hiertomallista (c) (Odinsen et al. 2000, Fossen 2016 mukaan, mukailten).

McKenzien (1978) malliin perustuvaa yhtenäistä hiertomallia kannattavat puolestaan muun muassa Badley et al. (1988) sekä Giltner (1987) (Kuva 8, c). McKenzien puhtaassa hiertomallissa erkaantuminen venyttää litosfääriä niin, että yksittäisten siirrostien kokonaisvaikutus aiheuttaa kuoren symmetrisen ohenemisen. Kuoreen kohdistuva kokonaisjännitys on yhtenäistä hiertoa, jossa vaakasuuntaista venytystä tasapainottaa pystysuuntainen kuoren oheneminen (Fossen 2016). Giltner (1987) on verrannut pohjoisen Viking-grabenin vajoamiskäyriä yhtenäisen mallin ennustamaan vajoamiseen. Giltnerin (1987) mukaan teoreettisten vajoamisprofiilin tekemisessä käytettyjen erkaantumsvaiheiden ajoitusta ja kestoa oli rajoitettava alueelta dokumentoidun geologisen historian avulla. Tähän hyödynnettiin muun muassa Badleyn et al. (1988) tekemää tutkimusta pohjoisen Viking-grabenin tektonisesta kehityksestä, jossa on tunnistettu selkeästi kaksi pääerkaantumsvaihetta. Tämän jälkeen Viking-grabenin geologisesta historiasta kootut vajoamishavainnot sovitettiin yhteen yhtenäisen hiertomallin kanssa (Giltner 1987). Tulkintojen perusteella ennustettu ja havaittu vajoaminen näyttävät osoittavan hyvää vastaavuutta, ja täten yhtenäinen hiertomalli näyttää kuvastavan hyvin Viking-grabenin keskiosien vajoamista (Giltner 1987). Viking-grabenin reunoilla mallin soveltaminen on kuitenkin ongelmallisempaa (Giltner 1987). Reunoilla ei näytä tapahtuvan ollenkaan vajoamista (Giltner 1987). Tämä vajoamattomuus näyttää viittavan siihen, että syvemmällä kuoressa tapahtuu mahdollisesti jotain monimutkaisempaa (Giltner 1987). Giltnerin (1987) mukaan useissa erkaantumisympäristöissä

on tavattuja ilmiöitä, kuten syvyydestä riippuvaista venytystä, vaipan konvektioita ja isostaattista jalkapuolien kohoamista, jotka selittäisivät vajoamattomuutta.

Odinsenin et al. (2000) mukaan Viking-grabenin alueella on kuitenkin mahdollista soveltaa molempien yllä esitettyjen hiertomallien elementtejä. Yksinkertaista hiertomallia suosivat ylemmän ja keskimmäisen kuoren deformaatio, joka paikallistuu useiden normaalisiirrosten kohdalle (Odinsen et al. 2000). Yhtenäinen hiertomalli soveltuu taas paremmin huomattavasti heikommalle alemmalle kuorelle, jota tukevat duktiilit hiertovyöhykkeet (Odinsen et al. 2000). Odinsenin et al. (2000) mukaan ylemmässä vaipassa on tulkittu myös näkyvän itään kallistuvia, matalan kulman heijastuspintoja, joiden arvioidaan olevan siirroksia tai hiertovyöhykkeitä. Myös Brun ja Tron (1993) esittävät, että venytys on yhtenäistä litosfäärin mittakaavassa, mutta epäyhtenäistä maankuoren mittakaavassa. Epäyhtenäisyyden perusteluna nähdään kaledonilaisten työntövoimien uudelleenaktivoituminen (Brun & Tron 1993).

6 Johtopäätökset

Pohjanmeren pohjoisosien rakenne on seurausta pitkäaikaisesta tektonisesta maankuoren kehityksestä. Tektonisen kehityksen aikana toistuvat venymis- ja vajoamisvaiheet sekä maankuoren uudelleen muodostumiset ovat muokanneet Pohjanmeren rakenteesta monimutkaisen pohjois-eteläsuuntaisen hautavajoamien järjestelmän (Odinsen et al. 2000). Tätä monimutkaista kokonaisuutta halkova lähes pohjois-eteläsuuntainen Viking-graben eroaa merkittävästi muusta ympäristöstä syvänä ja kapeana rakenteena. Viking-grabenin muodostumiseen ja kehitykseen ovat vaikuttaneet eniten kaksi mesotsooisella kaudella tapahtunutta pääerkaantumisvaihetta (Badley et al. 1988, Odinsen et al. 2000). Näiden erkaantumisvaiheiden aikana Viking-grabenin länsireunan suuret siirrokset ovat hallinneet grabenin kehitystä ja ohjanneet erkaantumisvaiheita seuranneita vajoamisvaiheita (Johnson et al. 1993). Viking-grabenin kehittymisen ajan Pohjanmeren hautavajoamajärjestelmät ovat miljoonien vuosien aikana peittyneet paksuilla mesotsooisilla ja kenotsooisilla sedimenttikerroksilla (Johnson et al. 1993). Nämä paksut sedimenttikerrokset yhdessä toistuvien kuoren erkaantumisvaiheiden seurauksena ovat luoneet otolliset olosuhteet hiilivetyjen muodostumiselle (Selley 1998).

Pohjanmeren alueelta 1900-luvun puolivälin jälkeen löydetty ensimmäiset hiilivetyalueet ovat tehneet Pohjanmerestä ekonomisesti merkittävän sekä geologisesti kiinnostavan alueen (Johnson et al. 1993). Hiilivetyvarantojen löytymisen myötä Viking-grabenin aluetta on tutkittu valtavasti useiden vuosikymmenen ajan. Lukuisista tutkimuksista huolimatta Viking-grabenin muodostumisen ajankohdasta ja tektonisen kehityksen mekaniikasta on käyty paljon keskustelua, ja tutkijat ovat esittäneet useampia erilaisia teorioita. Venytysprosesseille on esitetty niin yksinkertaista hiertomallia kuin yhtenäistä puhdasta hiertomallia puoltavia näkemyksiä. Osa tutkijoista on kuitenkin todennut, että Viking-grabenin muodostumiseen on mahdollista soveltaa näitä molempia malleja. Voidaan siis todeta, että Viking-graben on geologisesti hyvin monimutkainen rakenne merkittävänä osana Pohjanmeren laajaa hautavajoamien järjestelmää.

Lähteet

- Badley, M. E., Price, J. D., Rambech Dahl, C. & Agdestein, T. 1988. The structural evolution of the northern Viking Graben and its bearing upon extensional modes of basin formation. *Journal of the Geological Society, London*, 145 (3): 455–472.
- Barnard, P.C. & Bastow, M.A. 1991. Hydrocarbon generation, migration, alteration, entrapment and mixing in the Central and Northern North Sea. Geological Society, Special Publication, London, 59: 167–190.
- Beach, A., 1986. A deep seismic reflection profile across the northern North Sea. *Nature*, 323: 53–55.
- Brown, S. 1990. Jurassic. Teoksessa: Glennie, K. W. (toim.): Introduction to the Petroleum Geology of the North Sea. 3. ed. Oxford: Backwell, 219–254.
- Brun, J.-P. & Tron, V. 1993. Development of the North Viking Graben: inferences from laboratory modelling. *Sedimentary Geology*, 86: 31–51.
- Coward, M. P. 1990. The Precambrian, Caledonian and Variscan framework to NW Europe. Teoksessa: Hardman, R. F. P. & Brooks, J. (toim.): Tectonic Events Responsible for Britain's Oil and Gas Reserves. Geological Society, Special Publication, London, 55: 10–34.
- Coward, M.P. 1995. Structural and tectonic setting of the Permo-Triassic basins of northwest Europe. Teoksessa: Boldy, S. A. R. (toim.) Permian and Triassic Rifting in Northwest Europe. Geological Society, Special Publication, London, 91: 7–39.
- Fichler, C. & Hospers, J. 1990. Deep crustal structure of the northern North Sea Viking Graben: results from deep reflection seismic and gravity data. *Tectonophysics*, 178: 241–254.
- Fossen, H. 2016. *Structural Geology*. 3. ed. Cambridge University Press, 524 s.
- Gautier, D. L. 2005. Kimmeridgian Shales Total Petroleum System of the North Sea Graben Province. U. S. Geological Survey Bulletin 2204-C, 24 s.
- Giltner, J. P. 1987. Application of extensional models to the northern Viking Graben *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 67: 339–352.
- Glennie, K. W. 1990. Introduction to the Petroleum Geology of the North Sea. 3. ed. Oxford: Backwell, 402 s.
- Gormly, J. R., Buck, S. P. & Chung, H. M. 1994. Oil-source rock correlation in the North Viking Graben. *Organic Geochemistry*, 22: 403–413.
- Haq, B. U., Hardenbol, J., and Vail, P. R. 1987. Chronology of fluctuating sea level since the Triassic. *Science, New York*, 235: 1156–1167.
- Hospers, J & Ediriweera, K. K. 1991. Depth and configuration of the crystalline basement in the Viking Graben area, Northern North Sea. *Journal of the Geological Society*, 148 (2): 261–265.
- Jackson, C. A. L. & Larsen, E. 2009. Temporal and spatial development of a gravity-driven normal fault array: Middle-Upper Jurassic, South Viking Graben, northern North Sea. *Journal of Structural Geology*, 31(4): 388–402.

- Johnson, H., Richards, P. C., Long, D. & Graham, C. C. 1993. United Kingdom offshore regional report: The geology of the northern North Sea. London: HMSO for the British Geological Survey, 113 s.
- Justwan, H., Dahl, B. & Isaksen, G. H. 2006. Geochemical characterisation and genetic origin of oils and condensates in the South Viking Graben, Norway. *Marine and Petroleum Geology*, 23, 213–239.
- Kane, K. E., Jackson, C. A. L. & Larsen, E. 2010. Normal fault growth and fault-related folding in a salt-influenced rift basin: South Viking Graben, offshore Norway. *Journal of Structural Geology*, 32(4): 490–506.
- Leeder, M. R. & Gawthorpe, R. L. 1987. Sedimentary models for extensional tilt-block/half-graben basins. Geological Society, London, Special Publications, 28: 139–152.
- Lepercq, J.-Y. & Gaulier, J.-M. 1996. Two-stage rifting in the North Viking Graben area (North Sea): inferences from a new three-dimensional subsidence analysis. *Marine and Petroleum Geology*, 13: 129–148.
- Marshak, S. 2012. *Earth: Portrait of a Planet*. 4. ed. New York: W.W. Norton, 819 s.
- McKenzie, D. 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40: 25–32.
- Odinsen, T., Christiansson, P., Gabrielsen, R. H., Faleide, J. I. & Berge, A. M. 2000. The geometries and deep structure of the northern North Sea rift system. Geological Society, London, Special Publications, 167: 41–57.
- Pedersen, J. H., Karlsen, D. A., Backer-Owe, K., Lie, J. E. & Brunstad, H. 2006. The geochemistry of two unusual oils from the Norwegian North Sea: implications for the new source rock and play scenario. *Petroleum Geoscience*, 12: 85–96.
- Selley, R. C. 1998. *Elements of Petroleum Geology*. 2. ed. London: Academic Press, 470 s.
- Shelton, J.W. 1984. Listric normal faults: An illustrated summary. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 68: 801–815.
- Slagstad, T., Davidsen, B. & Daly, J. S. 2011. Age and composition of crystalline basement rocks on the Norwegian continental margin: Offshore extension and continuity of the Caledonian-Appalachian orogenic belt. *Journal of the Geological Society*, 168: 1176-1185.
- Sneider, J. S., Clarens, P. De & Vail, P. R. 1995. Sequence stratigraphy of the middle to upper jurassic Viking Graben, North Sea. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 5: 167–197.
- Steel, R. and Ryseth, A. 1990. The Triassic-Early Jurassic succession in the northern North Sea: megasequence stratigraphy and intra-Triassic tectonics. *Teoksessa: Hardman, R. F. P. & Brooks, J. (toim.): Tectonic events responsible for Britain's oil and gas reserves. Geological Society, Special Publication, London, 55: 139–168.*

- Thomas, D.W. & Coward, M. P. 1996. Mesozoic regional tectonics and South Viking Graben formation: Evidence for localized thin-skinned detachments during rift development and inversion. *Marine and Petroleum Geology*, 13 (2): 149–177.
- Underhill, J.R. & Partington, M.A., 1993. Jurassic thermal doming and deflation in the North Sea: Implications of the sequence stratigraphic evidence. *Petroleum Geology Conference series*, 4: 337–345.
- Wernicke, B. 1985. Uniform-sense normal simple-shear of the continental lithosphere. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22: 108–125.
- Ziegler, P. A. 1975. The geological evolution of the North Sea area in the tectonic framework of North-Western Europe. *Norges geologiske Undersøkelse*, 316, 1–27.
- Ziegler, P. A. 1982. *Geological Atlas of Western and Central Europe*. The Hague: Shell Internationale Petroleum Maatschappij, 130 s.