



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Zagroksen poimu- ja ylityöntövyöhyke

Tiia Lepistö

Geologia

LuK-tutkielma

Laajuus: 7 op

4.4.2025

Turku

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

LuK-tutkielma

Pääaine: Geologia

Tekijä(t): Tiia Lepistö

Otsikko: Zagroksen poimu- ja ylityöntövyöhyke

Ohjaaja: Eemi Ruuska

Sivumäärä: 27 sivua

Päivämäärä: 4.4.2025

Zagroksen poimu- ja ylityöntövyöhyke on muodostunut Euraasian ja Arabian laattojen yhteentörmäyksessä Iranin, Irakin ja Turkin alueille. Zagroksen vyöhykkeen rakenne on muodostunut monien laattatektonisten vaiheiden aikana, joihin lukeutuvat: passiivinen mannerreunus, mannerlaattojen hajoaminen, erkaantuva tektoniikka, puristava tektoniikka ylityöntövyöhykkeineen sekä lopulta manner-mannertörmäys.

Zagroksen poimu- ja ylityöntövyöhykkeen eri osat poikkeavat toisistaan rakenteellisesti. Vyöhyke voidaan jakaa kahteen kaakkois-luoteissuuntaiseen tektoniseen alueeseen, jotka ovat Korkea Zagros ja Poimuttunut Vyöhyke. Poimuttunut Vyöhyke voidaan edelleen jakaa viiteen toisistaan eroavaan osaan. Poimuttuneen vyöhykkeen kolme topografialtaan korkeampaa aluetta ovat Lurestan, Izeh ja Fars, kun taas Kirkuk ja Dezful edustavat matalampia alueita.

Poimu- ja ylityöntövyöhykkeillä deformaatioon vaikuttavat oleellisesti peruskallion ja sedimenttikivikerrosten mekaaniset ominaisuudet. Tietyt kivilajit ovat mekaanisesti heikkoja, ja osa näistä kivilajeista käyttäytyy duktiilisti jo kuoren pinnallisissa osissa. Zagroksen poimu- ja ylityöntövyöhykkeen sedimenttikivikerroksissa on useita mekaanisesti heikkoja kivilajeja. Tällä on ollut merkittävä vaikutus vyöhykkeen deformaatiomekanismeihin ja -tyyleihin, sekä vyöhykkeen eri alueiden rakenteellisiin eroihin. Yksi Zagroksen vyöhykkeen tärkeimmistä deformaatiomekanismeista onkin duktiilien kivilajikerrosten päälle eri syvyyksille muodostunut poimutus.

Zagroksen vyöhykkeen pitkä tektoninen historia on edesauttanut paksun sedimenttikivipatjan muodostumista alueelle ja orgaanista materiaalia sisältävien kivilajien kerrostumisen. Nämä orgaanista ainesta sisältävät kivilajit yhdessä alueen muiden kivilajimuodostumien ja rakenteiden kanssa muodostavat useita hiilivetyysteemeitä. Zagroksen vyöhykkeen tärkeimmät hiilivetyloukut ovat muodostuneet alueen rakenteisiin ja antikliineihin. Alueen hiilivetyysteemit voidaan jakaa stratigrafian perusteella kolmeen sarjaan, jotka ovat paleotsooinen, mesotsooinen ja kenotsooinen sarja.

Zagroksen poimu- ja ylityöntövyöhyke on nuori ja edelleen aktiivinen törmäysvyöhyke, sillä alue on edelleen puristavassa jännityskentässä. Seisminen aktiivisuus tuo alueelle mahdollisia geologisia uhkia, mutta laajat hiilivetyysteemit puolestaan taloudellisia mahdollisuuksia. Osa Zagroksen vyöhykkeen hiilivetyvarastoista on erittäin tuottoisia globaalissa mittakaavassa. Alueen geologisessa ymmärryksessä on vielä aukkoja, mutta merkittävyytensä vuoksi alueen tutkimustietoa pyritään alati kasvattamaan.

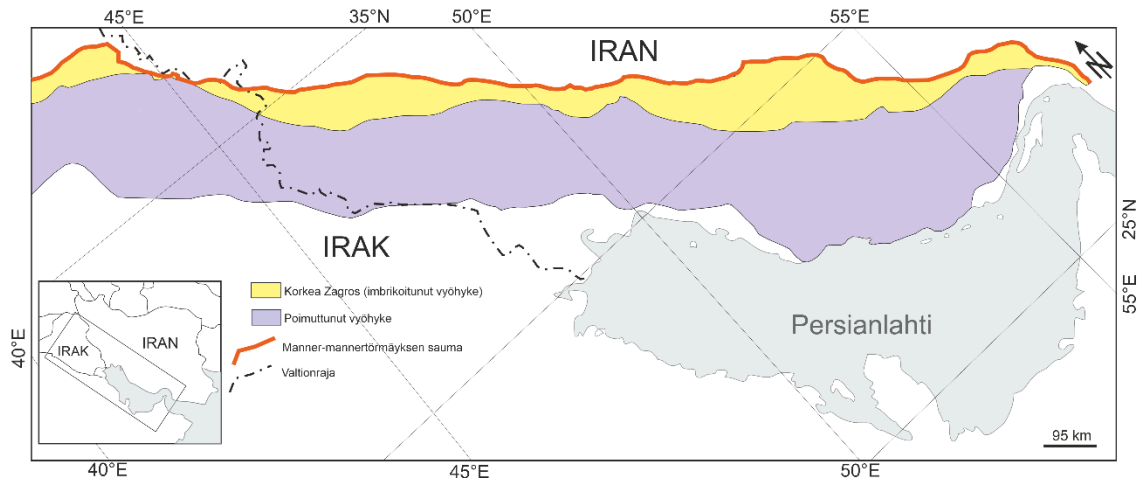
Avainsanat: Zagros, poimu- ja ylityöntövyöhyke, manner-mannertörmäys, mekaaninen stratigrafia, hiilivety

Sisällys

1	Johdanto	4
2	Vyöhykkeen rakenteellinen kehittyminen ja laattatektoniikka	5
3	Zagroksen vyöhykkeen rakenteellinen aluejako	8
3.1	Korkea Zagros	9
3.2	Poimuttunut vyöhyke - korkeat alueet	10
3.3	Poimuttunut vyöhyke - syvänteet.....	11
4	Mekaaninen stratigrafia ja deformaatio	11
4.1	Deformaation jakautuminen ja deformaatiotyylit	12
4.2	ZFTB:n mekaaniset stratigrafiset yksiköt ja muodonmuutos.....	13
5	Zagroksen vyöhykkeen hiilivetysysteemit	16
5.1	Paleotsooinen sarja.....	17
5.2	Mesotsooinen sarja	19
5.3	Kenotsooinen sarja	20
6	Zagroksen vyöhykkeen yhteiskunnallinen ja taloudellinen merkitys ..	21
7	Yhteenveto	23
8	Lähteet.....	25

1 Johdanto

Zagrosen poimu- ja ylityöntövyöhyke (eng. Zagros fold-and-thrust belt, ZFTB) on osa laajaa mannerlaattojen törmäysvyöhykettä, joka sijaitsee Iranin, Turkin ja Irakin alueilla (Sembroni ym. 2024) (kuva 1). Pituudeltaan Zagrosen vyöhyke on lähes 2000 km, josta suurin osa sijoittuu nykyisen Iranin lounaisreunalle. Alueen geologiset rakenteet ovat muodostuneet pitkälti puristavassa tektoniikassa; merellisen laatan subduktiossa ja tätä seuranneessa Arabian ja Euraasian laattojen manner-mannertörmäyksessä (Zhu ym. 2022). Zagrosen poimu- ja ylityöntövyöhyke sijoittuu Arabian mannerlaatan koillisreunaan edustaen manner-mannertörmäyksen aktiivista akkreetioprismaa (Stern ym. 2021, Sembroni ym. 2024).



Kuva 1. Zagrosen poimu- ja ylityöntövyöhykkeen maantieteellinen sijainti sekä tektoniset alueet (Ghanadian ym. 2017, mukaillen)

Sembronin ym. (2024) mukaan Zagrosen poimu- ja ylityöntövyöhyke voidaan jakaa tektonisesti Korkeaan Zagrokseen (eng. High Zagros) ja Poimuttuneeseen Vyöhykkeeseen (eng. Simply Folded Belt) (kuva 1). Heidän mukaansa poimuttuneen vyöhykkeen eri osat ovat sedimentaatioltaan ja topografialtaan erilaisia. Zagros-vyöhykkeen monimuotoiseen geologiseen ympäristöön lukeutuvat vaihtelevien rakenteiden lisäksi muun muassa suoladiapirismi (Bahroudi & Koyi 2003) sekä mittavat hiilivetyvarastot (Alipour 2023).

Poimu- ja ylityöntövyöhykkeillä rakenteiden muodostumiseen vaikuttavat merkittävästi deformaation alla olevan pohjakerroksen, sekä stratigrafiaan sisältyvien mekaanisesti heikkojen kerrosten, ominaisuudet (=mekaaninen stratigrafia) (mm. Koyi & Mansurbeg 2021). Zagrosen poimu- ja ylityöntövyöhykkeen deformaatiotyyleihin on arvioitu

vaikuttaneen muun muassa kiteisen kallioperän vaihteleva topografia, mekaanisen stratigrafian alueellinen jakautuminen (Motamedi & Gharabeigli 2019) sekä siirrokset (Molinaro ym. 2005, Kent 2010). Vaikka Zagroksen vyöhykkeestä on tehty runsaasti geologista tutkimusta jo lähes vuosisadan ajan hiilivetyvarastojen löytymisen myötä (Alavi 2007), täysin yhtenäistä käsitystä Arabian ja Euraasian laatan yhteentörmäyksestä ja alueen rakenteiden kehittymisestä ei ole muodostunut (Alipour 2023, Sembroni ym. 2024). Vyöhykkeen manner-mannertörmäys ja deformaatio ovat edelleen aktiivisia, mikä toisaalta edesauttaa rikkaiden luonnonvarojen kehittymistä, mutta myös geologisten hasardien esiintymistä (Stern ym. 2021). Zagroksen alue on näin ollen geologisessa mittakaavassa tuore ja edelleen kehittyvä poimu- ja ylityöntövyöhyke.

Tämän työn tavoitteena oli tutustua Zagroksen poimu- ja ylityöntövyöhykkeeseen liittyvään tutkimustietoon ja kirjallisuuteen sekä tarkastella alueen tektonista taustaa ja monimuotoisia geologisia rakenteita. Alueen geologisten rakenteiden ja aluejakojen nimitykset vaihtelevat eri lähteissä, ja tässä työssä hyödynnän mm. Sternin ym. (2021), Zhun ym. (2022), Alipourin (2023) ja Sembronin ym. (2024), käyttämiä nimiä ja aluejakoja. Tästä eteenpäin käytän Zagroksen poimu- ja ylityöntövyöhykkeestä pitkälti sen englanninkielisestä nimestä muodostuvaa, ja tieteellisissä julkaisuissa yleisesti käytössä olevaa ZFTB-lyhennettä.

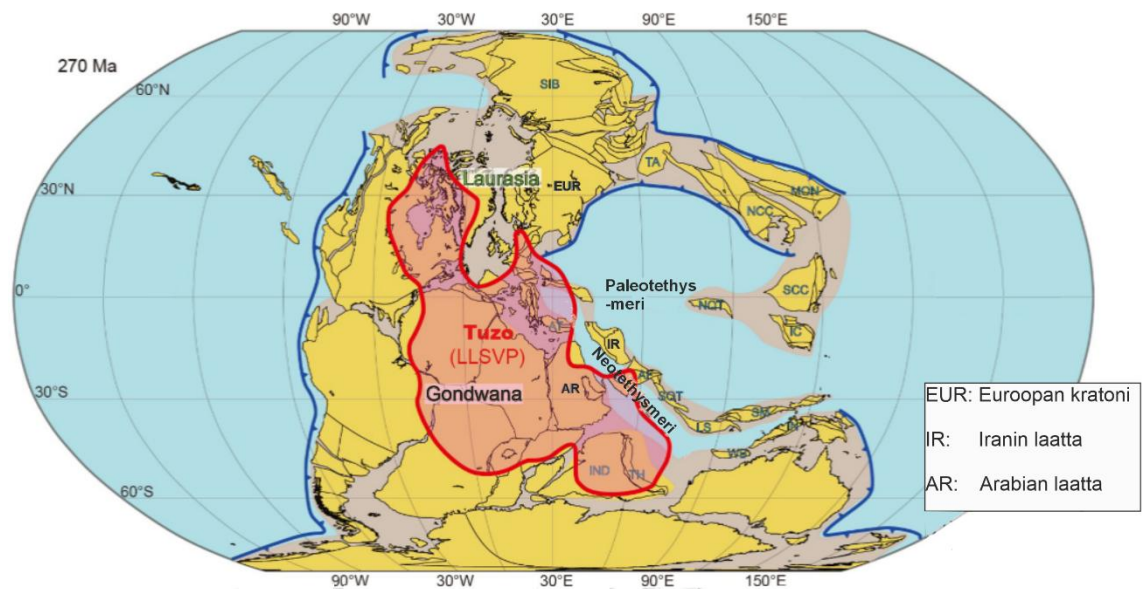
2 Vyöhykkeen rakenteellinen kehittyminen ja laattatektoniikka

ZFTB:n muodostuminen liittyy Gondwanamantereen hajoamiseen ja sen jälkeiseen laattojen uudelleenjärjestäytymiseen viimeisen 600 miljoonan vuoden aikana (Stern ym. 2021). Merkittävimmät ZFTB:n muodostumiseen vaikuttaneet laattatektoniset tapahtumat aikajärjestyksessä ovat: Gondwanan stabiili kratoni (Kordi 2019), mikrolaattojen irtaantuminen Gondwanan laatasta, uuden merellisen ympäristön synty ja laajeneminen, erkaantuneiden mikrolaattojen törmäys Euraasian laatan eteläreunaan sekä lopulta Arabian laatan manner-mannertörmäys Euraasian mannerreunukseen (Zhu ym. 2022).

Passiivinen mannerreunus

Sekä Iranin että Arabian laatat ovat sijainneet Gondwanan laatan pohjoisreunalla osana Gondwanan stabiilia kratonia ja passiivista mannerreunusta (Kordi 2019).

Paleomagneettisten tutkimusten mukaan Iranin on päätelty olleen osa Gondwanan mannerta ainakin myöhäisestä ordoviikkikaudesta varhaiseen kivihilikauteen saakka (Wensink ym. 1978, Zhu ym. 2022). Berberianin ja Kingin (1981) mukaan yhteisen sijaintinsa vuoksi varhaisen paleotsooisen maailmankauden kerrostumat vastaavat toisiaan mm. Iranin, Arabianlaatan, Intian ja Turkin alueilla. Aikaisesta permikaudesta alkaen Gondwanan laatasta alkoi irtaantumaan useita mikrolaattoja, joista yksi oli Iranin mikrolaatta (Zhu ym. 2022) (kuva 2). Selkeää ja yhtenäistä teoriaa tälle mikrolaattojen irtaantumisen syyllä Gondwanasta ei ole. Yhteisenä tekijänä teorioissa on kuitenkin ekstensionaalisen jännityksen muodostuminen Gondwanan pohjoisosiin ja mikrolaattojen erkaantumisen alkaminen (mm. Kordi 2019, Stern ym. 2021, Zhu ym. 2022).



Kuva 2. Mikrolaattojen erkaantuminen Gondwanamantereesta permikaudella (Zhu ym. 2022, mukaillen)

Erkaantumisyöhyke

Mikrolaattojen erkaantuminen Gondwanasta muodosti Neotethysmeren Gondwanan ja mikrolaattojen väliin (Kordi 2019, Zhu ym. 2022) (kuva 2). Arabian laatan permikautisen vulkanismin on arvioitu muodostuneen mantereisesta erkaantumisyöhykkeestä, mikä saattaa edustaa juuri Neotethysmeren avautumista (Gray ym. 2005, Zhu ym. 2022 mukaan). Berberianin ja Kingin (1981) mukaan Neotethysmeri oli avautunut Arabian laatan ja Iranin laatan välille viimeistään myöhäisellä triaskaudella, minkä seurauksena ajanjakson sedimenttikerrostumat eroavat toisistaan näillä alueilla. Muun muassa Berberianin ja Kingin (1981) sekä Zhun ym. (2022) mukaan Arabian laatta oli yli 200 miljoonan vuoden ajan Gondwanan passiivinen mannerreunus. Paleomagneettisiin ja

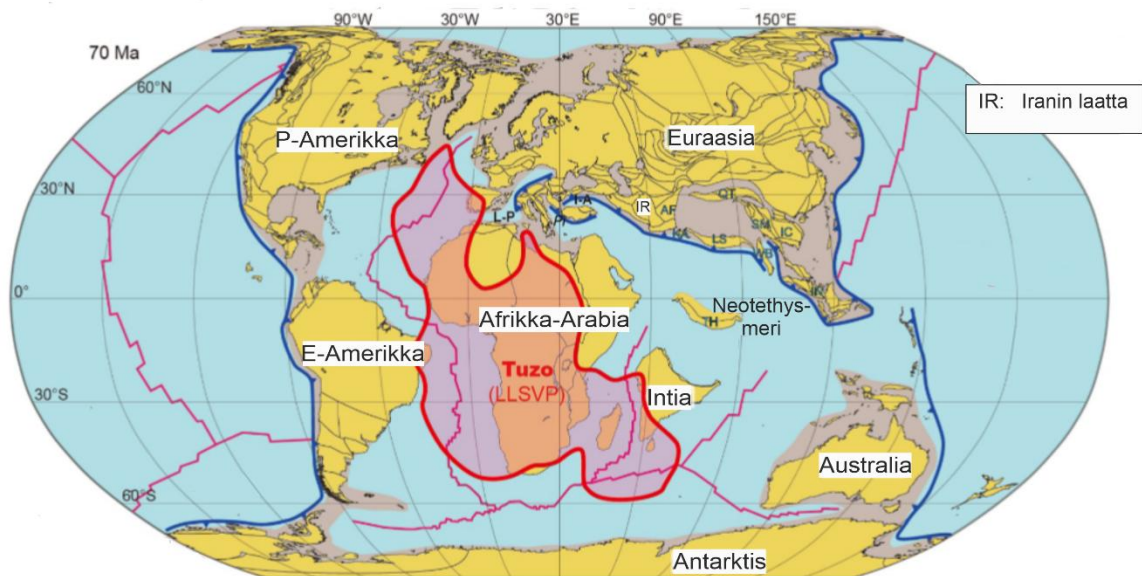
paleogeografisiin tietoihin perustuen on esitetty myös, että varhaisessa vaiheessa liitukautta Arabian laatan edustalla olisi ollut väliaikainen ylityöntövyöhyke (Berra ym. 2014, Kordi 2019 mukaan).

Neotethysmeren laajeneminen

Neotethysmeri laajeni voimakkaasti myöhäisestä permikaudesta varhaiseen triaskauteen (Zhu ym. 2022). Varhaisessa vaiheessa ylätriaskautta Iranin ja Afganin mikrolaatat törmäsivät Gondwanan pohjoispuolella sijainneeseen Euraasian laattaan sulkien mikrolaattojen ja Euraasian välisen meren (Paleotethysmeri) kyseisellä alueella (Kordi 2019, Zhu ym. 2022). Tämän törmäyksen myötä Iranin laatasta muodostui väliaikaisesti osa Euraasian eteläreunan passiivista mannerreunusta (Stern ym. 2021).

Neotethysmeren sulkeutuminen

Euraasian passiiviseen mannerreunukseen muodostui lopulta pohjoiseen kaatuva ylityöntövyöhyke, jossa Neotethyksen merellinen kuori alkoi työntyä Euraasian laatan alle (Stern ym. 2021) (kuva 3). Neotethysmeren sulkeutuminen alkoi Afrikka-Arabian laatan irtautuessa Gondwanasta ja liikkeessa kohti Euraasian mannerreunusta (Zhu ym. 2022). Afrikka-Arabian laatan ja Euraasian laatan välisen lähenevän liikkeen myötä merellisen kuoren osia (ofioliittejä) ylityöntyi Arabian mantereisen laatan päälle (Kordi 2019, Sembroni ym. 2024).



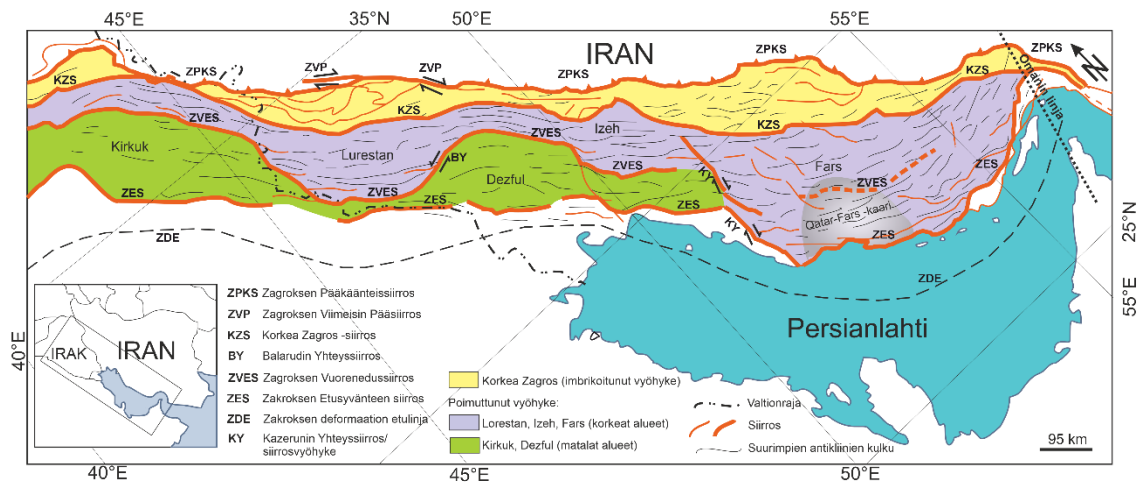
Kuva 3. Iranin laatta osana Euraasian aktiivista mannerreunusta Neotethysmeren sulkeutuessa, sekä Afrikka-Arabian laatan lähenevä liike kohti Euraasiaa myöhäisellä yläliitukaudella (Zhu ym. 2022, mukailten)

Manner-mannertörmäys

Arabian ja Euraasian laattojen törmätessä muodostui törmäyssauma, jota edustaa Zagroksen Pääkäänteissiirros (eng. Main Zagros Reverse Fault) ZFTB:n koillisreunalla (Sembroni ym. 2024) (kuva 4). Muun muassa Alavi (2007) on esittänyt eriävän näkemyksen törmäyssauman sijainnista, jonka mukaan sijainti olisi pidemmällä koillisessa. Arabian ja Euraasian välisen subduktion sekä sitä seuranneen manner-mannertörmäyksen alkamisajankohdista on tehty vaihtelevia päätelmiä, mutta yleisimmin manner-mannertörmäyksen on katsottu olevan iältään 35–20 Ma (McQuarrie & Van Hinsbergen 2013). McQuarrien ja Van Hinsbergenin (2013) mukaan Arabian ja Euraasian laatan törmäys on tapahtunut diakronisesti 28–20 Ma.

3 Zagroksen vyöhykkeen rakenteellinen aluejako

ZFTB voidaan jakaa tektonisesti kahteen toistensa kanssa samansuuntaiseen vyöhykkeeseen, jotka ovat Korkea Zagros ja Poimuttunut Vyöhyke (Sherkati ym. 2006, Sembroni ym. 2024) (kuva 4). Näiden kahden vyöhykkeen väliin sijoittuu Korkea Zagros -siirros (eng. High Zagros Fault) (Sherkati ym. 2006) (kuva 4), joka on matalakulmainen ylityöntösiirros (Bosold 2005, Kent 2010 mukaan). Poimuttunut vyöhyke rajautuu lounaisreunaltaan deformaation etulinjaan (kuva 4), jota edustaa merkittävä kuoren taipuma (Tavakoli-Shirazi ym. 2013a). Poimuttunut vyöhyke voidaan edelleen jakaa topografialtaan ja rakenteeltaan viiteen erilaiseen alueeseen (Sembroni ym. 2024). Kolme korkeaa ja vuoristoista aluetta ovat Lurestan, Izeh ja Fars, ja kaksi topografialtaan matalampaa aluetta ovat Kirkuk ja Dezful (kuva 4). Pääsääntöisesti ZFTB:n useasti uudelleenaktivoituneet siirrokset jakavat poimuttuneen vyöhykkeen näihin viiteen alueeseen (Kent 2010) (kuva 4). ZFTB:n merkittävimmät siirrokset ovat Zagroksen Pääkäänteissiirros, Viimeisin Pääsiirros (eng. Main Recent fault), Korkea Zagros -siirros, Vuorenedussiirros (eng. Mountain Front fault) sekä Zagroksen Etusyvänteen siirros (eng. Zagros Foredeep fault) (Berberian 1995) (kuva 4). Pohjois-eteläsuuntaisista siirroksista ja rakenteista merkittävimpiä ovat Kazerunin siirrosvyöhyke (oikeakätisiä kulkuliukusiirroksia) sekä ZFTB:n kaakkoispäädystä sijaitseva Omanin linja (Kalaneh & Agh-Atabai 2016). Linja on Zagroksen törmäysvyöhykkeen ja Makranin subduktiovyöhykkeen (ZFTB:n kaakkoispuolella) välinen siirtymävyöhyke (Kalaneh & Agh-Atabai 2016).



Kuva 4. ZFTB:n aluejaot ja merkittävimmät rakenteet (Berberian 1995, Kalaneh & Agh-Atabai 2016 ja Ghanadian ym. 2017, pohjalta)

Poimutuksen geometria vaihtelee sekä pysty- että vaakasuunnassa ZFTB:n eri osissa (Sherkati ym. 2006). Deformaation voimakkuus on suurempi Korkean Zagroksen alueella verrattuna Poimuttuneeseen Vyöhykkeeseen (Lawa ym. 2013). Tämän seurauksena Korkean Zagroksen poimut ovat korkea-amplitudisia ja niitä erottavat toisistaan tiukat synkliinit, kun taas poimuttuneella vyöhykkeellä synkliinit ovat laajoja ja poimutus matala-amplitudista (Lawa ym. 2013).

3.1 Korkea Zagros

Korkea Zagros sijoittuu Zagroksen Pääkäänteissiirroksen ja Korkea Zagros -siirroksen väliin (Sembroni ym. 2024) (kuva 4). Muun muassa Sepehr ja Cosgrove (2004) käyttävät Korkeasta Zagroksesta nimitystä imbrikoitunut vyöhyke (eng. imbricated belt) alueen tyypillisten rakenteiden vuoksi. Alue sisältää kulultaan kaakkois-luoteissuuntaisia Arabian laatan reunaosien työntörakenteita, kuten voimakkaasti imbrikoituneita osioita, poimutusta ja ylityöntyneitä ofioliitteja Neotethysmeren sulkeutumisen ajalta (Motamedi & Gharabeigli 2019). Korkeassa Zagroksessa tyypillisiä ovat duplex-rakenteet, jotka esiintyvät antiklinien ydinosissa toisiinsa nojaavina siirrostuneina poimurakenteina (Tavakoli-Shirazi ym. 2013b). Osassa aluetta esiintyy syviä ja laajoja poimuja, joita leikkaavat myöhäisemmät käänteissiirrokset (Tavakoli-Shirazi ym. 2013b). Lisäksi Korkean Zagroksen alueella on useita suolapylväspaljastumia (Taghikhani ym. 2024).

3.2 Poimuttunut vyöhyke - korkeat alueet

Lurestan

Lurestan sijaitsee Korkea Zagros -siirroksen ja Vuorenedussiirroksen välissä (Sembroni ym. 2024) (kuva 4). Lurestanin eri osien antikliinit ovat aallonpituudeltaan 2 kilometristä noin 7,5 kilometriin (Casciello ym. 2009) ja niiden kylkiin on muodostunut käänteissiirroksia (Vergés ym. 2011). Alueelle tyypillisenä piirteenä ovat 17 suurta en echelon -poimua, joita kutsutaan myös valaanselkää muistuttaviksi antikliineiksi (Farzipour Saein 2009, Sembroni ym. 2024 mukaan).

Izeh

Izeh sijoittuu Dezfulin koillispuolelle rajautuen Korkea Zagros -siirroksen ja Vuorenedussiirroksen väliin (Sembroni ym. 2024) (kuva 4). Izehissä poimutus ja siirrostuminen on huomattavasti voimakkaampaa verrattuna viereiseen Dezfulin alueeseen (Sherkati & Letouzey 2004). Sherkati ym. (2005) kuvailevat Izehin poimuja paralleelipoimuiksi, joissa kerrokset muodostavat lähes pyöreitä kaaria. Alueen pohjois- ja eteläosat ovat rakenteeltaan kuitenkin erilaiset; Pohjois-Izehissä on geometrialtaan laatikko- ja chevron-poimuja, kun taas Etelä-Izehissä poimutus on laajempaa (Sepehr ym. 2006). Izehin eri osissa antikliinien aallonpituus vaihtelee 3–4 kilometristä eteläisen Izehin 10–12 kilometriin (Sherkati ym. 2006). Chevron-poimut ja lyhyen aallonpituuden rakenteet peittävät alleen syvempien kivilajikerrosten laajempia antikliineja (Sherkati ym. 2006).

Fars

Farsin alue on ZFTB:n suurin tektoninen alue, joka on leveydeltään noin 280 km ja ulottuu Kazerunin siirrosvyöhykkeen itäpuolelta ZFTB:n itäreunaan saakka. (Sembroni ym. 2024) (kuva 4). Alueen ominaispiirteitä ovat suolapylväät sekä rakenteiden itä-läntinen suunta (Motamedi & Gharabeigli 2019). Farsin alueella poimutuksen tyyllissä ja ominaisuuksissa on merkittävää vaihtelua (Motamedi & Gharabeigli 2019) ja poimutus on epäsymmetristä (Sherkati ym. 2006). Farsin keskiosa edustaa poimu- ja ylityöntövyöhykkeen etumaata, jolle tyypillisiä rakenteita ovat valaanselkää muistuttavat laatikkopoimut (Motamedi & Gharabeigli 2019). Pohjois-Farsissa pinnalliset poimut ovat aallonpituudeltaan 2–3 km ja syvemmissä kivilajikerrostumissa on laajoja antikliineja, joita leikkaavat suuret käänteissiirrokset (Sherkati ym. 2006).

3.3 Poimuttunut vyöhyke - syvänteet

Kirkuk

Kirkuk muodostaa ZFTB:n deformaation lounaisreunan (Sembroni ym. 2024), missä suurin osa alueen antikliineista on muodostunut käänteissiirroksista. Nämä käänteissiirrokset ovat alkujaan olleet normaalisiirroksia, joiden liikesuunta on kääntynyt alueen puristavan tektoniikan myötä (Kent 2010). Mahdollisesti kaakkois-luoteissuuntaisten syvien siirrostensa vuoksi alueen poimutus on iältään vanhempaa kauempana Zagroksen orogeenivyöhykkeestä, mikä poikkeaa tavanomaisesta rakenteiden muodostumisjärjestyksestä poimu- ja ylityöntövyöhykkeillä (Obaid & Allen 2017). Lisäksi alueen myöhäinen lyheneminen on vähäisempää verrattuna ZFTB:n muihin rakenteellisiin alueisiin (Obaid & Allen 2017, Koshnaw ym. 2020).

Dezful

Dezfulin syvänteen erottaa Izeihin alueesta kaakkois-luoteissuuntainen Vuorenedussiirros, joka on pintakerrosten alapuolelle sijoittuva käänteissiirros (Berberian 1995) (kuva 4). Kaakkoon Dezfulin alueesta sijaitsee Kazerunin siirrosvyöhyke ja alueen luoteisreunalla on Balarudin Yhteyssiirros (Berberian 1995) (kuva 4). Dezfulin poimutus on pääsääntöisesti kaakkois-luoteissuuntaista epäsäännöllistä poimutusta (Sherkati ym. 2006). Eteläisen Dezfulin lyhenemisen määrä on huomattavasti pienempi kuin pohjoisemman osan, jossa myös rakenteiden monimutkaisuus lisääntyy (Sherkati ym. 2006). Lyhenemisen määrän myötä myös poimutuksen aallonpituus lyhenee kohti sisämaata (Sherkati ym. 2005). Pohjois-Dezfulin deformaatio on jakautunut pystysuunnassa. Pinnallisemmissa kivilajikerroksissa on tiukempia antikliineja ja syvemmissä puolestaan epäsymmetristä laajaa poimutusta (Sherkati ym. 2006).

4 Mekaaninen stratigrafia ja deformaatio

Poimu- ja ylityöntövyöhykkeillä mekaaninen stratigrafia vaikuttaa merkittävästi alueen geometriaan, kinematiikkaan ja dynamiikkaan (Koyi & Mansurbeg 2021). Tyypillisesti ylityöntövyöhykkeiden etumaalla deformaatio kohdentuu pohjakerrosta peittäviin sedimenttikivikerrokseen, pohjakerroksen säilyessä lähes muuttumattomana (ohutkuorinen deformaatio, eng. thin-skinned deformation) (Davis & Engelder 1985). Ohutkuorisen törmäysvyöhykkeen deformaatiotyyleihin vaikuttaa oleellisesti

deformoituvien sedimenttikivien ja pohjakerroksen välillä olevan kitkan määrä (Davis & Engelder 1985). Heikkolaatuiset kivilajikerrokset voivat muodostaa stratigrafisiin kerrostumiin deformaatiota jakavia irtautumishorisontteja (Koyi & Mansurbeg 2021). Deformaatiota jakavien välikerrosten on arvioitu vaikuttaneen muodonmuutokseen kaikilla ZFTB:n rakenteellisilla alueilla (Korkea Zagros: Tavakoli-Shirazi ym. 2013b ja Poimuttunut Vyöhyke, Kirkuk: Koshnaw ym. 2020, Lurestan: Sherkati & Letouzey 2004, Alavi 2007, Casciello ym. 2009, Vergés ym. 2011, Dezful: Sherkati & Letouzey 2004, Sherkati ym. 2006, Izeh: Sherkati ym. 2005, Sepehr ym. 2006, Fars: Motamedi & Gharabeigli 2019). Muun muassa Sherkati ja Letouzey (2004) ovat tehneet yhdenmukaisen päätelmän siitä, että ZFTB:n rakenteissa vallalla ovat duktiilien kerrosten päälle kehittyneet irtautumispoimut.

4.1 Deformaation jakautuminen ja deformaatiotyylit

Deformoituvan kivilajipakan pohjakerroksen laadulla on kaksi päätejäsentä, jotka ovat kitkainen ja viskoosi (Bahroudi & Koyi 2003). Davisin ja Engelderin (1985) mukaan useilla kivilajeilla on kutakuinkin kuoren ensimmäisten 10 km:n olosuhteissa samankaltainen kitkavoima. Heidän mukaansa poikkeuksena ovat savet ja liuskeet, jotka ovat laadultaan heikkoja. Evaporiitit, ja erityisesti suolat, ovat hyvin heikkoja verrattuna mihin tahansa muuhun tavanomaiseen kivilajiin. Jo kuoren ylimmissä kilometreissä suola toimii hauras-duktilivyohtyksen alapuolella, vastaten hirttovoimiin virtaavasti (mm. Davis & Engelder 1985) ja toimien viskoosina kerroksena (Bahroudi & Koyi 2003). Evaporiiteilla on siis hyvin vähäinen kitka ja ne luovat irtautumishorisontin ylempänä muodostuvalle deformaatiolle (Davis & Engelder 1985). Laadultaan heikkojen kivilajien toimiessa irtautumishorisontteina, horisontin ala- ja yläpuolisten osien deformaatiotyylit voivat erota toisistaan (Davis & Engelder 1985) esimerkiksi poimutuksen aallonpituuksien ja symmetrian osalta (Sherkati ym. 2006). ZFTB:n noin 7–12 km:n sedimenttikivipatjassa on useita heikkoja litologioita keskisyvyydellä sekä stratigrafisen pakan pinnallisemmissä osissa (Sherkati ym. 2006, Koyi & Mansurbeg 2021).

Sherkati ym. (2006) ovat selvittäneet analogisten mallien avulla (ns. hiekkalaatikkomalleja) stratigrafisen pakan eri syvyyksillä sijaitsevien väli-irtautumishorisonttien vaikutusta poimutukseen. Mallien pohjalta väli-irtautumishorisonttien syvyyden todettiin vaikuttavan merkittävästi rakenteiden tyyliin sekä poimutuksen aallonpituuteen. Sherkatin ym. (2006) analogisissa malleissa, joissa ei ollut lainkaan väli-irtautumishorisontteja, rakenteet olivat laajoja ja yksinkertaisia.

Poimujen aallonpituudet olivat säännöllisiä ja tätä määrittelevänä tekijänä oli kompetentin kerroksen paksuus. Lisäksi lyhenemisen määrän lisääntyessä muodostui puristavalle tektoniikalle tyypillisiä käänteissiirroksia, mutta myös tavanomaisesta poikkeavia, vastakkaiseen suuntaan kaatuvia käänteissiirroksia.

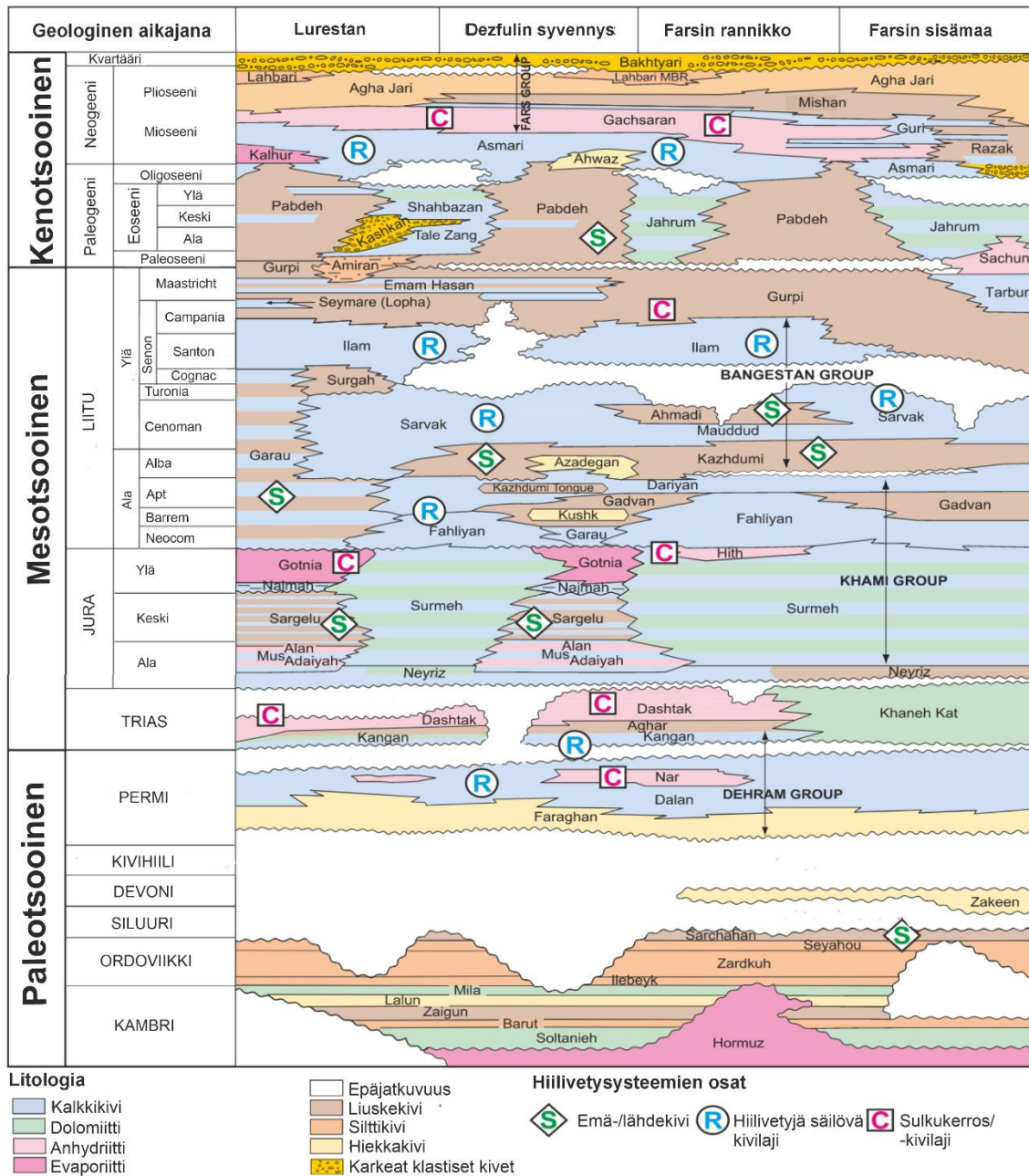
Sherkatin ym. (2006) analogisten mallien mukaan pinnallisempien väli-irtautumishorisonttien todettiin edistävän siirroksiin liittyvää laajaa poimutusta syvemmässä kompetentissa kerroksessa. Poimujen aallonpituus oli suoraan verrannollinen vallitsevan kompetentin kerroksen paksuuteen. Sherkatin ym. (2006) analogisissa malleissa, joissa oli pinnallisempia väli-irtautumishorisontteja, pinnallinen tiukempi poimutus saattoi peittää alleen syvempiä laajoja poimuja. Pinnallisemmassa kompetentissa kerroksessa antiklinien kylkiin muodostui molempiin suuntiin kaatuvia käänteissiirroksia, joiden liukupintojen välillä oli vain vähäistä liikettä. Sherkatin ym. (2006) analogisiin malleihin, joissa oli syvä väli-irtautumishorisontti, muodostui muun muassa duplex-rakenteita antiklinien ytimiin ja poimutukseen kehittyi vaihtelevia aallonpituuksia.

4.2 ZFTB:n mekaaniset stratigrafiset yksiköt ja muodonmuutos

ZFTB:n stratigrafisessa pakassa on kompetenteja kerroksia, joita erottavat toisistaan evaporiitit ja liuskeet (Sherkati ym. 2006) (kuva 5). ZFTB:n evaporiiteista merkittävin on kiteisen kallioperän päällä oleva Hormuzin suolakerrostuma (kuva 5), joka on osaltaan vaikuttanut Kaakkois-Zagroksen deformaatiotyyliin (Talbot & Alavi 1996, Bahroudi & Koyi 2003 mukaan) sekä hiilivetyloukkujen kehittymiseen (Alipour 2024). Hormuzin suolakerrostuman sijainti jakautuu Farsin, korkean Zagroksen ja Lurestanin alueille (Sherkati ym. 2006). Suolakerroksen paksuus on hyvin vaihteleva muun muassa synkliinien alapuolisista osista viereisten antiklinien ytimiin poimutuksen aikaisen kulkeutumisen seurauksena (Tavakoli-Shirazi ym. 2013b). Hormuzin suolakerrostumaa ei ole havaittu Kazerunin siirrosvyöhykkeen länsipuolella, mikä antaa viitteitä siitä, että Kazerunin siirros on ainakin osittain toiminut maankamaran pohjakerroksia rajoittavana pintana (Sepehr & Cosgrove 2004).

Toinen ZFTB:n merkittävä evaporiittikerros on mioseeniaikainen Gachsaranin muodostuma (mm. Bahroudi & Koyi 2004) (kuva 5). Hormuzin suolakerrostuman tavoin myös mioseeniaikaisten evaporiittien alueellinen jakautuminen ja paksuus vaihtelevat (Koyi & Mansurbeg 2021). Kerrostumien sijainnin mukaan nämä kaksi merkittävää

evaporiittikerrosta (Hormuz ja Gachsaran) ovat toimineet paikallisina deformaation irtautumishorisontteina (Sherkati & Letouzey 2004).



Kuva 5. ZFTB:n yleistytytty litolo-stratigrafinen poikkileikkaus sekä alueen hiilivetyksysteemien merkittävimmät jäsenet ja muodostumat (Alipour 2024, mukailen)

Korkea Zagros

Korkean Zagroksen alueella useat deformaation irtautumishorisontit selittäisivät alueelle tyypillisiä duplex-rakenteita (Tavakoli-Shirazi ym. 2013b). Korkean Zagroksen alueella on todisteita syvän Hormuzin muodostuman lisäksi toisesta syvästä deformaatiota jakavasta kerrostumasta, joka sijoittuu ordoviikki- ja siluurikauden liuskekerrokseen (Tavakoli-Shirazi ym. 2013b) (kuva 5). Sherkati ym. (2006) ovat puolestaan arvioineet,

että Hormuzin muodostuma olisi ainoa syvä irtautumishorisontti, joka vaikuttaa Korkean Zagroksen deformaatioon. Korkean Zagroksen alueelta puuttuu keskisyvä Dashtakin irtautumishorisontti (kuva 5), joka puolestaan vaikuttaa paikoitellen deformaatioon Poimuttuneella Vyöhykkeellä (Sherkati ym. 2006). Tämä lienee syynä muun muassa siihen, että poimutuksen aallonpituudet ovat pidempiä Korkean Zagroksen alueella kuin esimerkiksi Farsin keskiosissa (Sherkati ym. 2006).

Poimuttunut Vyöhyke

Gachsaranin muodostuman on katsottu olevan syynä pinnallisten ja syvempien rakenteiden erilaisuuteen Poimuttuneella Vyöhykkeellä (Kent 2010). Sherkatin ym. (2006) mukaan Gachsaranin evaporiittikerros on merkittävä deformaation irtautumishorisontti muun muassa Dezfulin alueella. Heidän julkaisemiensa ZFTB:n poikkileikkausten perusteella muodostuman deformaatiota irrottava vaikutus lisääntyy luoteis-Dezfulia kohti, minkä on arvioitu johtuvan kerrostuman paksuuntumisesta samassa suhteessa. Poimuttuneen Vyöhykkeen muita tärkeitä deformaatiota jakavia horisontteja löytyy eri aikakausien evaporiiteista, liuskeista ja kalkkiliejukivistä (Sherkati ym. 2006, Motamedi & Gharabeigli 2019) (kuva 5: Dashtak, Adalyah, Sargelu, Gotnia, Kazhdumi, Garau, Pabdehi). Poimuttuneella Vyöhykkeellä Kazerunin siirrosten länsipuolen (Dezful, Izeh) rakenteet eroavat merkittävästi siirrosten itäpuolella sijaitsevista (Fars) rakenteista (Sherkati ym. 2006). Hormuzin suolakerroksen puuttuminen siirrosvyöhykkeen länsipuolelta (Sepehr & Cosgrove 2004) lienee vaikuttanut tähän epätasaiseen deformaatioon (Sherkati ym. 2006) pohjakerrosten erilaisten kitkavoimien myötä (Letouzey ym. 2005, Sherkati ym. 2006 mukaan). Sherkatin ym. (2006) mukaan Kazerunin siirrosvyöhykkeen länsipuolella poimujen aallonpituudet ovat merkittävästi lyhyempiä sekä rakenteet tiukempia ja monimutkaisempia verrattuna itäpuoleen. Länsipuolella kuoren lyheneminen painottuu pääosin alueen pohjoisosiin (Izeh) (Sherkati ym. 2006).

Poimuttuneella Vyöhykkeellä vallitsevana piirteenä vaikuttaisi olevan mekaanisen stratigrafian vaihtelu sekä pysty- että vaakasuunnassa ja tämän myötä hyvin vaihteleva deformaatio. Esimerkiksi Farsin alueella kiteisen kallioperän massiivinen kohouma, Qatar-Fars -kaari (kuva 4), on vaikuttanut mekaanisen stratigrafian paikalliseen jakautumiseen (Motamedi & Gharabeigli 2019). Paikoitellen Farsissa ja Izeissä deformaatioon on vaikuttanut keskisyvänä irtautumishorisonttina Dashtakin muodostuma (Motamedi & Gharabeigli 2019), kun taas koilliseen mentäessä kivilaji vaihtuu dolomiittiin (Sherkati ym. 2006). Näin ollen Izehin poimutuksen eroavaisuudet ja vaihtelut johtuvat rakenteiden kehittymisestä eri irtautumishorisonttien päällä (Sepehr

ym. 2006). Heikkojen ja kompetenttien kivilajien sijainnit ja paksuudet vaikuttavat poimutuksen aallonpituuksien lisäksi myös siirrostumisiin (Casciello ym. 2009). Muun muassa Lurestanin antiklinien käännteissirroksiset ovat seurausta litofasiesten vaihteluista (Vergés ym. 2011). Poimuttuneen Vyöhykkeen tietyissä osissa merkittävien antiklinien on arvioitu muodostuneen pohjakerroksista lähtevien siirrostosten etenemisestä (Sherkati & Letouzey 2004, Kent 2010).

5 Zagroksen vyöhykkeen hiilivetyysteemit

Hiilivetyvarastojen muodostumiseen tarvitaan orgaanista materiaalia sisältäviä kivilajeja, jotka ovat päätyneet soveltuvaan lämpötilaan (Kordi 2019). Tämän lisäksi tarvitaan varastoimiseen soveltuvia huokoisia ja läpäiseviä kivilajeja sekä läpäisemättömiä tiiviitä kivilajeja estämään hiilivetyjen uudelleenkulkeutuminen (Kordi 2019). Hiilivetyjen kulkeutumisen tulee olla myös oikea-aikaista suhteessa varsinaisten hiilivetyloukkujen kehittymiseen (Kordi 2019). Zhun ym. (2022) mukaan Arabian laatan sijainti Gondwanan passiivisena mannerreunuksena lähellä päiväntasaajaa mahdollisti hyvät elinolosuhteet merellisille organismeille. Toistuvien merenpinnan korkeuden vaihteluiden myötä Arabian laatan alueelle muodostui paksuja klastisia sekä karbonaattikerrostumia (Zhu ym. 2022). Zhun ym. (2022) mukaan näistä runsaasti orgaanista materiaalia sisältävistä kerrostumista kehittyi hiilivetyjen emäkiviä, jotka ovat Zagroksen puristavassa tektoniikassa jääneet muun muassa Poimuttuneen Vyöhykkeen antiklinirakenteiden muodostamiin loukkuihin. Tärkein loukkutyyppeistä ZFTB:n alueella muodostuu epäsymmetrisistä poimuista ja suurin osa alueen todetuista hiilivetyvarastoista sijaitsee rakenteellisissa loukuissa (Alipour 2024). Stratigrafisilla loukuilla katsotaan olevan myös merkitystä hiilivetyvarastojen muodostumiselle, ja niitä pidetäänkin tärkeänä tutkimuskohteena tulevaisuudessa. (Shabani ym. 2022).

ZFTB:n hiilivedyt, jotka kehittyivät ennen Zagroksen poimutusta, kulkeutuivat loivien ramppirakenteiden kautta alueen kohoumiin tai suolapylväisiin liittyviin rakenteisiin (Bordenave 2008). Poimutuksenaikaisten tai poimutuksen jälkeen muodostuneiden hiilivetyjen on arvioitu kulkeutuneen rakosysteemejä pitkin lähimpiin antikliineihin (Bordenave 2008). Nämä antikliinit ovat muodostaneet rakenteellisen loukun hiilivedyille tiiviin kivilajikerroksen vaikutuksesta (Bordenave 2008).

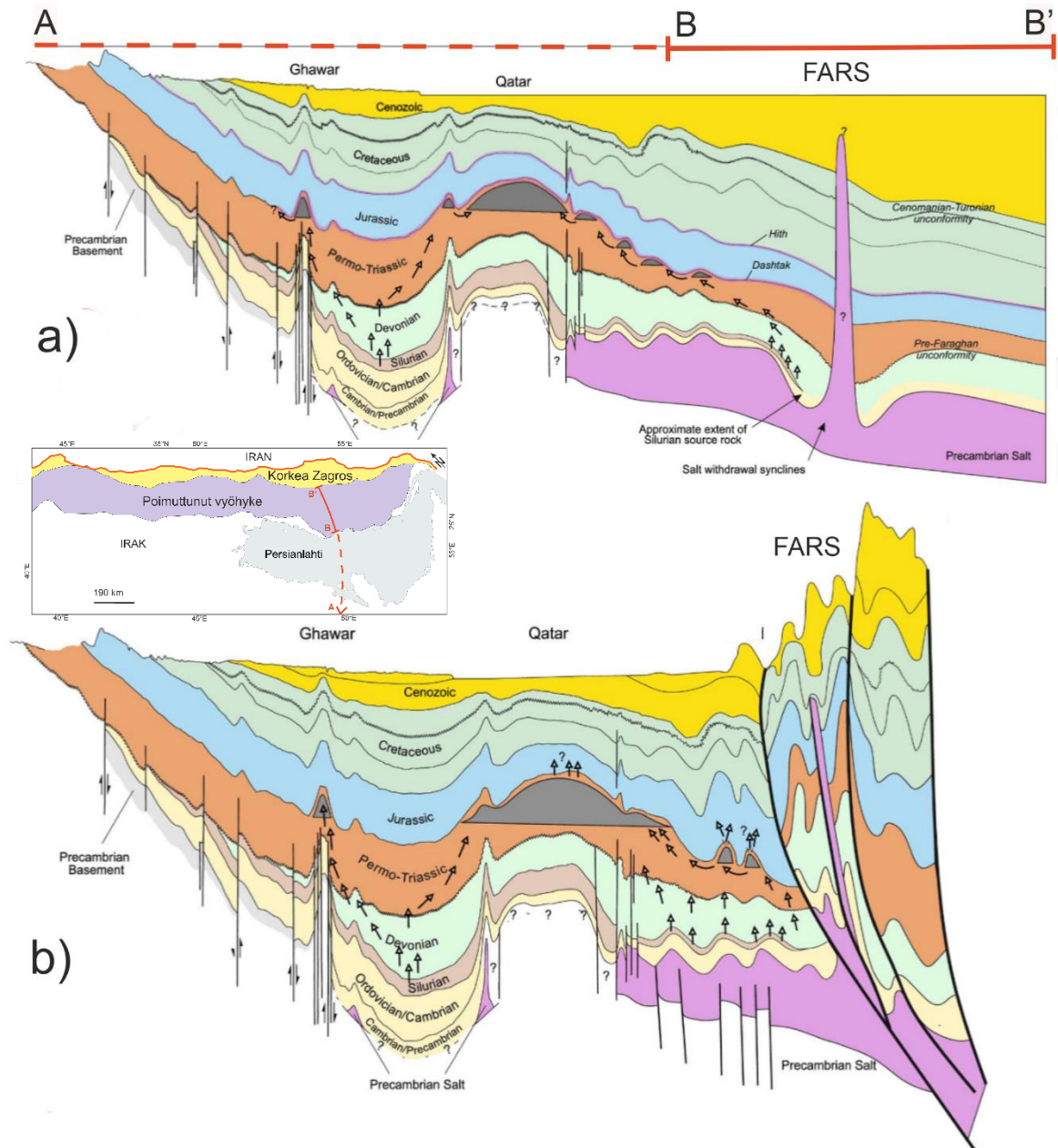
Alipourin (2024) mukaan ZFTB:n hiilivetyjen lähdekivinä ovat liuskeet ja karbonaatit, mutta hiilivetyjen varastoina toimivat pitkälti karbonaattikivilajit. Läpäisemättömiä sulkukerroksia muodostavat pääsääntöisesti evaporiitit, joskin myös paksuilla liuskerrostumilla on oma roolinsa hiilivetyjä läpäisemättöminä kerroksina alueella. Alipour (2024) on stratigrafian perusteella jakanut ZFTB:n hiilivetyysteemit kolmeen pääryhmään, jotka ovat paleotsooinen sarja, mesotsooinen sarja ja kenotsooinen sarja (kuva 5).

5.1 Paleotsooinen sarja

Zagroksen vyöhykkeen syvimät ja kypsimmät hiilivetyysteemit löytyvät paleotsooisesta sarjasta ja sarjan hiilivedyt esiintyvät maakaasun muodossa (Alipour 2024). Paleotsooisesta sarjan hiilivetyjen lähdekivilajin on arvioitu olevan siluurikautista liusketta (kuva 5) perustuen muun muassa maakaasun geokemiallisiin tutkimuksiin (Saber & Rabbani 2015) sekä viereisten valtioiden paleotsooiisiin hiilivetyysteemeihin (Bordenave 2014, Alipour 2024 mukaan). Paleotsooisessa sarjassa pakkautuneiden liuskekerrosten päällä on klastisia kerroksia sekä läpäisemättömillä kerroksilla rajattuja karbonaattikivilajeja (Alipour 2024) (kuva 5). Nämä karbonaattikivilajit muodostavat sarjan tärkeimmän hiilivetyjä varastoivan yksikön (Alipour 2024) (kuva 5). Permikautisessa kalkkikivimuodostumassa on todettu olevan evaporiittivälikerroksina anhydriittejä (kidevedetöntä kipsiä) (Insalaco ym. 2006) (kuva 5: Nar). Alipourin (2024) mukaan nämä evaporiitit toimivat paikoitellen läpäisemättöminä kerroksina paleotsooisesta sarjan hiilivetyjen yläpuolella. Triaskautiset anhydriitit ja liuskeet ovat kuitenkin tärkeimmät kerrokset, jotka estävät paleotsooisten hiilivetyjen kulkeutumista ylöspäin (Alipour 2024) (kuva 5: Dashtakin evaporiitit ja Agharin liuskeet).

Alipourin (2024) mukaan ZFTB:n alueella oli kolmenlaisia loukkuja jo ennen paleotsooisesta sarjan hiilivetyjen kehittymistä, jotka ovat varastoineet sarjan hiilivetyjä vaakasuuntaisen kulkeutumisen kautta (Alipour 2024) (kuva 6). Yksi näistä loukkutyypeistä on iältään prekambriininen (n. 640–620 Ma) ja muodostui kallioperän huomattavien kohoumien yhteyteen (esim. Qatar-Fars -kaari) (Sharland ym. 2004). Toisen loukkutyypin muodostavat suolatektoniset loukut, jotka liittyivät myöhäispaleotsooiseen Hormuzin suolan mobilisaatioon (Motamedi & Gharabeigli 2019). Kolmas loukkutyyppi sisältää rakenteita, jotka muodostuivat myöhäisdevoni- ja kivihiihikaudella puristavassa tektoniikassa (Tavakoli-Shirazi ym. 2013a). Zagroksen manner-mannertörmäyksen vuoksi hiilivedyt hautautuivat syvemmälle, mutta

kulkeutuivat merkittävän poimuttumisen ja siirrostumisten myötä kivilajikerrosten läpi ylöspäin stratigrafisesti korkeampiin loukkuihin (Alipour 2024) (kuva 6). Muun muassa Farsin alueella hiilivetyjä alleen sulkevat Dashtakin evaporiitit ovat loukussa valtavissa antikliineissa (Motamedi & Gharabegli 2019). Lisäksi Qatar-Fars -kaari on yhdistetty suuriin paleotsooisien sarjan kaasuväistöihin (Motamedi & Gharabegli 2019).



Kuva 6. Esimerkki paleotsooisien sarjan a) hiilivetyjen vaakasuuntaisesta kulkeutumisesta rakenteellisesti korkeampia loukkuja kohti ennen vuorijonomuodostusta sekä b) hiilivetyjen pystysuuntaisesta kulkeutumisesta vuorijonomuodostuksen jälkeen stratigrafisesti korkeampiin loukkuihin (Poikkileikkauksen oikea reuna on ZFTB:n aluetta.) (Alipour 2024, mukaillen)

5.2 Mesotsooinen sarja

Alipour (2024) toteaa ZFTB:n mesotsooisessa sarjassa olevan useita tärkeitä hiilivetyysteemejä. Näitä ovat Sargelu-Surmehin, Garau-Fahliyanin sekä Kazhdumi-Sarvak/Illamin hiilivetyysteemit. Mesotsooisen sarjan hiilivetyysteemeistä löytyvät alueen suurimmat nestemäisen hiilivedyn varastot, sisältäen myös maakaasua (Alipour 2024). Alipourin (2024) mukaan mesotsooisten hiilivetyjen lähdekivet ovat syntyneet mannerjalustan rajatuissa syvänteissä, jotka tarjosivat suotuisan kerrostumispaikan runsaasti orgaanista materiaalia sisältäville bitumipitoisille karbonaateille. Alipourin (2024) mukaan syvänteiden reunamille kerrostuneet rakeiset karbonaatit muodostivat hiilivetyjen varastoimiseen soveltuvan fasioksen. Näiden sedimenttien päälle kerrostui myöhemmin sulkukerroksena toimivia evaporiitteja merenpinnan laskiessa (Alipour 2024).

Myöhäisliitukauden puristava tektoniikka edesauttoi rakenteellisten loukkujen kehittymistä Sargelu-Surmehin hiilivetyysteemin lähdekivistä kulkeutuville hiilivedyille (Alipour 2024). Paikoitellen Sargelu-Surmehin hiilivetyysteemin lähdekiviä peittävät anhydriitit, jolloin hiilivetyjen ylöspäin kulkeutuminen kerrostumien läpi estyy (Goff 2005, Alipour 2024 mukaan). Hiilivedyt ovat päätyneet huokosiin karbonaattikiviin siellä, missä ylöspäin kulkeutuminen on ollut mahdollista (Fox & Ahlbrandt 2002 ja Wilson 2020, Alipour 2024 mukaan). Alipourin (2024) mukaan huokoisessa karbonaattikivessä hiilivedyt ovat päässeet kulkeutumaan pitkiäkin matkoja vaakasuuntaisesti kohti loukkuja. Voimakas törmäyksenaikainen kohoaminen ja eroosio ovat johtaneet hiilivetyjen kulkeutumiseen edelleen uusiin loukkuihin (Alipour 2024). Sulkukerroksina toimivien evaporiittikerrosten reunamilla siirrokset ja raot ovat mahdollistaneet hiilivetyjen kulkeutumista ylöspäin (Goff ym. 2005 ja Aqrawi ym. 2010, Alipour 2024 mukaan). Eroosio on paikoitellen poistanut sulkukerroksia Sargelu-Surmehin hiilivetyjen yläpuolelta, jolloin hiilivetyjä on kulkeutunut maanpintaan saakka (Goff ym. 1995 ja Goff 2005, Alipour 2024 mukaan).

Mesotsooisen sarjan Garau-Fahliyanin hiilivetyysteemissä hiilivetyjen kulkeutuminen on ollut hyvin vähäistä ylöspäin (Aqrawi & Badics 2015) sekä vaakasuunnassa (Alipour 2024). Tämä johtuu muun muassa lähdekiveä peittävästä paksusta kalkkilejukturkerroksesta (Aqrawi & Badics 2015). Systemin hiilivedyt ovat jääneet loukkuihin, jotka liittyvät manner-mannertörmäystä edeltäneisiin peruskallion kohoumiin (Bordenave & Hedge 2010, Alipour 2024 mukaan). Fahliyanin karbonaattipitoinen muodostuma toimii Garau-Fahliyanin systemin varastoivana kivilajina (Alipour 2024), ja

saman muodostuman ylemmät ylipaineistetut ja tiiviit kerrokset puolestaan sulkukerroksena (Soleimani ym. 2017). Myös liuskeiden ja ylipaineistettujen kalkkiliejukivien on arvioitu toimivan sulkukerroksena (Alipour 2024).

Mesotsooisessa sarjassa Kazhdumi-Sarvak/Ilamin hiilivetyysteemiin kuuluva Kazhdumin muodostuma (kuva 5) on Alipourin (2024) mukaan varastoivien ja sulkukerrosomaisuuksiensa lisäksi erittäin merkittävä lähde hiilivedyille. Se kattaa suurimman osan muun muassa Dezfulin alueen hiilivetyvarastoista. Hiilivetyjen muodostuminen Kazhdumi-Sarvak/Ilamin hiilivetyysteemin lähdekivissä alkoi jo ennen rakenteellisten loukkujen muodostumista (Bordenave & Hegre 2010, Alipour 2024 mukaan). Hiilivetyjä varastoivina kerroksina toimivat karbonaattkivet (Alipour 2024), jotka Dezfulin alueella muodostavat hyvin paksun kivilajikonaisuuden (Bordenave 2014, Alipour 2024 mukaan). Lurestanin ja Izehin alueilla Kazhdumi-Sarvak/Ilamin hiilivetyysteemin varastoina toimivat karbonaatit ovat jakautuneet useisiin antikliineihin (Bordenave 2014, Alipour 2024 mukaan). Systeemin sulkukerroksina toimivat paksut kalkkiliejukivet (kuva 5: Gurpi ja Pabdeh) (Alipour 2024), joiden merkittävä rakoilu kuitenkin edesauttaa hiilivetyjen kulkeutumista ylöspäin (Bordenave 2014, Alipour 2024 mukaan).

5.3 Kenotsooinen sarja

Lähdekivinä kenotsooisen sarjan hiilivetyysteemissä toimivat liuskeita ja karbonaatteja sisältävän Pabdehin muodostuman keskiosat (Alipour 2024) (kuva 5). Hiilivetyysteemin lähdekivi on vain osittain riittävän kypsä hiilivetyjen muodostamiseen, jonka myötä sarjan hiilivetysteemikin on vain osin aktiivinen (Bordenave & Burwood 1990). Kenotsooisen hiilivetyysteemin öljytuotto tulee pitkälti Asmarin rakoilleesta muodostumasta (Esrafilidzaji & Rahimpour-Bonab 2019). Muodostumaa peittävät paikallisesti laajat evaporiittikerrokset (Motiei 1995, Alipour 2024 mukaan), jotka toimivat sulkukerroksena hiilivedyille (kuva 5). Alipourin (2024) mukaan suurin osa Asmarin muodostuman hiilivetyvarastoista on kulkeutunut alempien sarjojen hiilivetysteemeistä. Vanhemmat mesotsooisen sarjan öljyt ovat päässeet kulkeutumaan ylöspäin muun muassa epäsymmetristen ja siirrostuneiden antikliinien vaikutettua kerrostumien sijaintiin (Tavakolian ym. 2022). Mesotsooisen sarjan sulkukerrosten merkittävä rakoilu on mahdollistanut öljyjen uudelleenkulkeutumista (Bordenave & Hegre 2010, Alipour 2024 mukaan). Tämän myötä on muodostunut yhteys stratigrafisesti syvempien hiilivetyjä varastoivien kivilajien ja Asmarin muodostuman välille (Tavakolian ym. 2022).

6 Zagroksen vyöhykkeen yhteiskunnallinen ja taloudellinen merkitys

Seisminen aktiivisuus

ZFTB on yksi maailman nuorimmista ja seismisesti aktiivisimmista orogeniavyöhykkeistä (Kalaneh & Agh-Atabai 2016), jossa 5,5–6 magnitudin järjestykset ovat tavallisia (Berberian 1995). Berberianin (1995) mukaan syvät, maanpintaan näkymättömät, siirrokset aiheuttavat mahdollisia maanjäristysuhkia Zagroksen vyöhykkeellä. ZFTB:n aktiivinen deformaatio muodostuu osittain syvien pintaan näkymättömien ylityöntösiirrosten liikehdinnästä ja satunnaisista pinnallisten kulkuliukusiirrosten liikkeistä (Berberian 1995). Berberianin (1995) mukaan Zagroksen vyöhykkeen deformaatio koostuu lisäksi seismiseen aktiviteettiin liittyvästä epäsymmetrisestä poimutuksesta. Pinnallisemmasta ja syvemmästä irtautumishorisontista lähtevien ylityöntösiirrosten muodostuminen on myös osa ZFTB:n aktiivista deformaatiota (Berberian 1995).

Korkean Zagroksen on todettu olevan seismisesti passiivisempi alue verrattuna ZFTB:n muihin alueisiin (Tavakoli-Shirazi ym. 2013b). Madahizadehin ym. (2016) mukaan ZFTB:n seisminen aktiivisuus jakaantuu lisäksi eri tavoin Kazerunin siirrosvyöhykkeen (kuva 4) eri puolilla. Siirrosvyöhykkeen kaakkoispuolella järjitysten voimakkuudet ovat keskimäärin voimakkaampia, mutta järjitykset sijoittuvat laajemmalle alueelle kuin luoteessa. Kazerunin siirrosvyöhykkeen luoteispuolella järjitysten voimakkuudet ovat olleet keskimäärin pienempiä, mutta seisminen aktiivisuus kohdentuu alueellisesti tiettyihin kohteisiin (Madahizadeh ym. 2016).

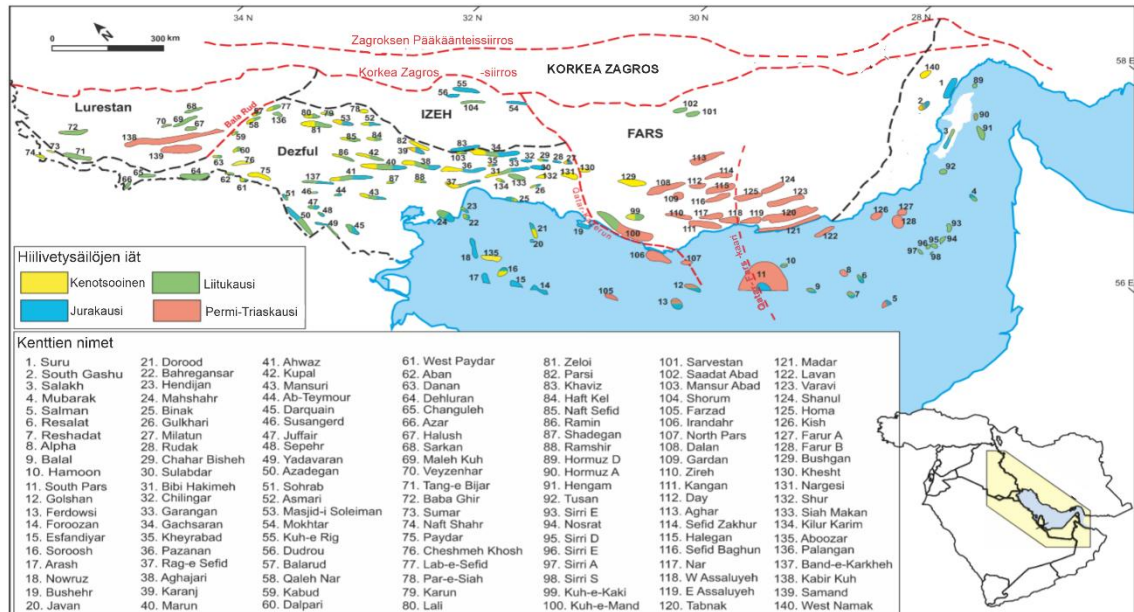
Kalanehin ja Agh-Atabain (2016) mukaan ZFTB:n alueelta voidaan havaita seismiseltä aktiivisuudeltaan kaksi ympäristöstään poikkeavaa aluetta. Nämä ovat Kazerunin siirrosvyöhyke sekä Omanin linjan ympäristö (kuva 4). Kalanehin ja Agh-Atabain (2016) mukaan Omanin linja on seismisesti ZFTB:n aktiivisin alue; linjalla on ollut toistuvia, voimakkuudeltaan tuhoisiakin maanjäristyksiä. Omanin linjan seismiseen aktiivisuuteen vaikuttanee se, että linja toimii siirtymäalueena Zagroksen törmäysvyöhykkeen ja tämän kaakkoispuolella sijaitsevan Makranin subduktiovyöhykkeen välillä (Kalaneh & Agh-Atabai 2016). Omanin linjan aktiivisuuteen vaikuttaa lisäksi ZFTB:n puristavan tektoniikan etenemisnopeus, joka on ZFTB:n kaakkoispäässä korkeampi kuin luoteispäässä (Kalaneh & Agh-Atabai 2016). Kalanehin ja Agh-Atabain (2016) mukaan Kazerunin siirrosvyöhykkeen järjitysten maksimivoimakkuudet ovat ZFTB:n alueen pienimpiä, mutta järjitykset toistuvat usein. Kazerunin siirrosten onkin todettu olevan

aktiivisia oikeakätisiä kulkusiiroksia, jotka siirtävät deformaatiota Zagroksen Pääkäännteissiiroksesta Farsin aktiiviseen poimutukseen ja ylityöntöihin (Sherkati ym. 2006).

Kalanehin ja Agh-Atabain (2016) mukaan ZFTB:n maanjäristysten korkeimmat maksimivoimakkuudet kohdentuvat Viimeisimmän Pääsiiroksen ympäristöön (kuva 4). Järitykset kuitenkin toistuvat vain harvoin. Tämä viittaa jännityksen kerääntymiseen, ja tämän myötä lopulta voimakkaaseen energian vapautumiseen (Kalaneh & Agh-Atabai 2016). Myös Korkea Zagros -siiroksen sekä Vuorenedussiiroksen (kuva 4) on todettu olevan aktiivisia siiroksia useassa 2000-luvun alun julkaisussa (Sherkati & Letouzey 2004, Molinaro ym. 2005, Sherkati ym. 2005).

Taloudelliset mahdollisuudet

ZFTB:n öljyvarastot kattavat noin 12 % globaaleista öljyvarastoista (Bordenave & Burwood 1990, Alipour 2024). Irakissa Kirkukin alue sisältää suuren osan valtion hiilivetyvarastoista (Sembroni ym. 2024). Iranin puolella sen sijaan Dezfulin aluetta pidetään rikkaana hiilivetyprovinssina (Bordenave & Huc 1995), missä Asmarin öljyesiintymä on erityisen tuottoisa (kuva 7) (Alipour 2024). Alipourin (2024) mukaan ZFTB:n alueelta on löydetty kaiken kaikkiaan 125 öljykenttää ja 57 maakaasukenttää (kuva 7).



Kuva 7. Iranin valtion alueelta ZFTB:n merkittävimpien hiilivetyvarastojen sijainnit ja iät (Alipour 2024, mukaillen)

Mesotsooisessa sarjassa Sargelu-Surmehin (Khani ym. 2018) ja Garau-Fahliyanin (Hosseiny & Mohseni 2023) hiilivetyysteemien lähdekivet ovat lämpötilaolosuhteitten mukaan potentiaalisia liuskeöljyn sekä liuskekaasun lähteitä. Mesotsooisen sarjan jura- ja liitukautiset kerrostumat sisältävät hyvin tuottoisia hiilivetyysteemejä rikkaiden lähdekivilajien ja hiilivetyjen tuottoon soveltuvan lämpötilan myötä (Alipour 2024). Liitukautisten hiilivetyysteemien katsotaankin kattavan yli 90 % Iranin öljyvarastoista (Bordenave & Huc 1995). Yksistään Kazhdumi-Sarvak/Illamin hiilivetyysteemi kattaa noin 8 % maailman öljyvarastoista (Bordenave 2014, Alipour 2024 mukaan). Mesotsooisessa sarjassa jurakautisiin hiilivetyjen lähdekiviin muodostuneet rakoverkostot saattavat lisäksi sisältää vielä potentiaalisia hiilivetyvarastoja (Alipour 2024).

Paleotsooisen sarjan hiilivetyysteemin taloudellinen merkitys on huomattava suurten maakaasuvarastojensa vuoksi (Alipour 2024). Farsin permikautiset muodostumat (kuva 7) sisältävät noin 15 % maailman todetuista maakaasuvarastoista, jonka vuoksi alue onkin ollut maakaasun suhteen päätutkimuskohteena ZFTB:n alueella (Motamedi ym. 2012). Paleotsooinen hiilivetyysteemi on kuitenkin Alipourin (2024) mukaan heikoimmin ymmärretty ZFTB:n hiilivetyysteemeistä. Systeemin lähdekivien sijainnit ovat edelleen heikosti rajatut ja tieto hiilivetyjen kulkeutumisen dynamiikasta on hyvin epävarmaa (Alipour 2024). Alipourin (2024) mukaan paleotsooisessa hiilivetyysteemissä on suuri potentiaali, sillä se saattaa edelleen sisältää suuria ja vielä löytämättömiä hiilivetyvarastoja. Lurestanin alueen varastoivissa kivilajeissa on lisäksi todettu korkeita heliumpitoisuuksia, joita ei myöskään ole osattu vielä selittää (Alipour 2024).

7 Yhteenveto

Zagroksen poimu- ja ylityöntövyöhykkeen rakennegeologiset piirteet vaihtelevat suuresti monimuotoisen tektonisen kehityksen myötä. Vyöhyke voidaan jakaa Korkeaan Zagrokseen ja Poimuttuneeseen Vyöhykkeeseen, joiden rajana toimii Korkea Zagros -siirros. Voimakas deformaatio ja imbrikoituneet rakenteet luonnehtivat Korkean Zagroksen aluetta. Vastaavasti Poimuttunut Vyöhyke sisältää merkittäviä antikliineja ja rakenteellisesti vaihtelevia alueita, joita rajaavat Zagroksen useat kulkuliuku- ja käänteissiirrokset.

Tärkein ZFTB:n deformaatioon vaikuttava tekijä lienee alueen mekaaninen stratigrafia ja sen alueellinen vaihtelevuus. Nykyiseen deformaatioon vaikuttaa tämän lisäksi vanhojen ekstensionaalisten siirrostensa uudelleenaktivoituminen puristavassa tektoniikassa sekä puristavan tektoniikan etenemisnopeuden vaihtelu vyöhykkeen kulun suuntaisesti. Näiden tekijöiden aiheuttama ZFTB:n monimutkainen deformaatio vaikuttaa myös hiilivetyjärjestelmien muodostumiseen.

ZFTB:n hiilivetyjärjestelmien muodostumiseen liittyvä tieto on monin paikoin vielä epävarmaa. Epätietoisuus vyöhykkeen rakenteista ja deformaatiomekanismeista vaikuttaa osaltaan uusien potentiaalisten hiilivetyjärjestelmien löytämiseen. Zagroksen vyöhykkeen sedimenttikivipeite on keskimäärin hyvin paksu, mikä vaikeuttaa tarkan tutkimustiedon saatavuutta. ZFTB:n monimutkaiset rakenteet saattavat kuljettaa hiilivetyjä pitkiäkin matkoja lähteestään kohti loukkuja. Tämän myötä hiilivetyjärjestelmien ymmärtäminen ja päätelmien tekeminen potentiaalisista hiilivetykentistä vaikeutuu. Vaikka fossiilisten energialähteiden vähentäminen on ollut globaalisti merkittävä tavoite, ZFTB:n nykyisille luonnonvaroille lienee vielä pitkään kysyntää, tarjoten alueen valtioille taloudellista vaurautta. Tulevaisuuden teknologioita ajatellen nämä Zagroksen vyöhykkeen rakenneloukut saattavat jonain päivänä vielä tarjota valmiita varastoja ympäristöystävällisemmille energiantuottomenetelmille.

Zagroksen poimu- ja ylityöntövyöhykkeestä löytyy erittäin paljon tieteellisiä julkaisuja, monista eri näkökulmista. Vyöhykkeen mittavat hiilivetyjärjestelmät lienevät osasyynä alueen kiinnostavuuteen. Huolimatta tutkimusten suuresta määrästä, vyöhykkeen tarkemman laattatektoniikan tai deformaatorakenteiden muodostumisen yksityiskohtia ei edelleenkään tunneta tarkasti. Vyöhykkeen rakenteiden kehittymiseen ovat lukuisten lähteiden perusteella vaikuttaneet, ja edelleen vaikuttavat, hyvin moninaiset tekijät.

ZFTB:n seismisellä aktiivisuudella tulee jatkossakin olemaan vaikutuksia alueen väestöön sekä rakennettuun ympäristöön. Tämän lisäksi vaikutukset saattaisivat ulottua myös rakenteellisiin hiilivetyjärjestelmiin, mahdollistaen muun muassa hiilivetyjärjestelmien uudelleenkulkeutumista. Lisääntyvä tieto vyöhykkeen aktiivisesta deformaatiosta ja siirroksista saattaa tulevaisuudessa lisätä ymmärrystä niin potentiaalisista hiilivetyjärjestelmistä kuin myös odotettavissa olevista maanjäristyksistä.

8 Lähteet

- Alavi, M. (2007). Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of Science* 307:9, 1064–1095.
- Alipour, M. (2023). Collision along irregular plate margin controlled the tectono-stratigraphic evolution of the Iranian Zagros fold and thrust belt. *Marine and Petroleum Geology* 154, 106311, 10 s.
- Alipour, M. (2024). Petroleum systems of the Iranian Zagros Fold and Thrust Belt. *Results in Earth Sciences* 2, 100027, 33 s.
- Aqrawi, A. & Badics, B. (2015). Geochemical characterisation, volumetric assessment and shale-oil/gas potential of the Middle Jurassic–Lower Cretaceous source rocks of NE Arabian Plate. *GeoArabia* 20:3, 99–140.
- Bahroudi, A. & Koyi, H. (2003). Effect of spatial distribution of Hormuz salt on deformation style in the Zagros fold and thrust belt: An analogue modelling approach. *Journal of the Geological Society* 160:5, 719–733.
- Bahroudi, A. & Koyi, H. (2004). Tectono-sedimentary framework of the Gachsaran formation in the Zagros foreland basin. *Marine and Petroleum Geology* 21:10, 1295–1310.
- Berberian, M. (1995). Master “blind” thrust faults hidden under the Zagros folds: Active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics* 241:3–4, 193–224.
- Berberian, M. & King, G. (1981). Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18:2, 210–265.
- Bordenave, M. (2008). The origin of the permo-triassic gas accumulations in the Iranian Zagros foldbelt and contiguous offshore areas: A review of the palaeozoic petroleum system. *Journal of Petroleum Geology* 31:1, 3–42.
- Bordenave, M. & Burwood, R. (1990). Source rock distribution and maturation in the Zagros orogenic belt: Provenance of the Asmari and Bangestan reservoir oil accumulations. *Organic Geochemistry* 16:1, 369–387.
- Bordenave, M. & Huc, A. (1995). The cretaceous source rocks in the Zagros foothills of Iran. *Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'IFP* 50:6, 727–752.
- Casciello, E., Vergés, J., Saura, E., Casini, G., Fernández, N., Blanc, E., Homke, S. & Hunt, D. (2009). Fold patterns and multilayer rheology of the Lurestan Province, Zagros Simply Folded Belt (Iran). *Journal of the Geological Society* 166:5, 947–959.
- Davis, D. M. & Engelder, T. (1985). The role of salt in fold-and-thrust belts. *Tectonophysics* 119:1–4, 67–88.
- Esrafil-Dizaji, B. & Rahimpour-Bonab, H. (2019). Carbonate reservoir rocks at giant oil and gas fields in SW Iran and the adjacent offshore: A review of stratigraphic occurrence and poro-perm characteristics. *Journal of Petroleum Geology* 42:4, 343–370.
- Ghanadian, M., Faghih, A., Abdollahie Fard, I., Kusky, T. & Maleki, M. (2017). On the role of incompetent strata in the structural evolution of the Zagros fold-thrust belt, Dezful embayment, Iran. *Marine and Petroleum Geology* 81, 320–333.
- Hosseiny, E. & Mohseni, A. (2023). Garau Formation as an unconventional hydrocarbon resource in southwestern Iran: A geochemical investigation. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 13:7, 1535–1549.
- Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillot, J., Kamali, M., Moallemi, A., Lotfpour, M. & Monibi, S. (2006). Upper Dalan member and Kangan formation between the Zagros mountains and offshore Fars, Iran: Depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. *GeoArabia* 11:2, 75–176.
- Kalaneh, S. & Agh-Atabai, M. (2016). Spatial variation of earthquake hazard parameters in the Zagros fold and thrust belt, SW Iran. *Natural Hazards* 82:2, 933–946.
- Kent, W. (2010). Structures of the Kirkuk Embayment, northern Iraq: Foreland structures or Zagros fold belt structures? *GeoArabia* 15:4, 147–188.
- Khani, B., Kamali, M., Mirshahani, M., Memariani, M. & Bargrizan, M. (2018). Maturity modeling and burial history reconstruction for Garau and Sargelu formations in Lurestan basin, south Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 11:39, 13 s.
- Kordi, M. (2019). Sedimentary basin analysis of the Neo-Tethys and its hydrocarbon systems in the southern Zagros fold-thrust belt and foreland basin. *Earth-Science Reviews* 191, 1–11.
- Koshnaw, R., Stockli, D., Horton, B., Teixell, A., Barber, D. & Kendall, J. (2020). Late miocene deformation kinematics along the NW Zagros fold-thrust belt, Kurdistan region of Iraq:

- constraints from apatite (U-Th)/He thermochronometry and balanced cross sections. *Tectonics* 39, 37 s.
- Koyi, H. & Mansurbeg, H. (2021). The role of multiple weak lithologies in the deformation of cover units in the northwestern segment of the Zagros fold-and-thrust belt. *Journal of Petroleum Geology* 44:2, 145–166.
- Lawa, F., Koyi, H. & Ibrahim, A. (2013). Tectono-stratigraphic evolution of the NW segment of the Zagros fold-thrust belt, Kurdistan, NE Iraq. *Journal of Petroleum Geology* 36:1, 75–96.
- Madahizadeh, R., Mostafazadeh, M. & Ansari, A. (2016). Long-Term seismicity behavior of the Zagros region in Iran. *Pure and Applied Geophysics* 173:8, 2637–2652.
- McQuarrie, N. & Van Hinsbergen, D. (2013). Retrodeforming the Arabia-Eurasia collision zone: Age of collision versus magnitude of continental subduction. *Geology* 41:3, 315–318.
- Molinaro, M., Leturmy, P., Guezou, J. -C., Frizon De Lamotte, D. & Eshraghi, S. (2005). The structure and kinematics of the southeastern Zagros fold-thrust belt, Iran: From thin-skinned to thick-skinned tectonics. *Tectonics* 24:3, 19 s.
- Motamedi, H. & Gharabeigli, G. (2019). Chapter 9 - Structural style in the Fars geological province: Interaction of diapirism and multidetachment folding. *Teoksessa Saein A. F. (toim.): Developments in Structural Geology and Tectonics (vsk. 3)*, 145–160. Elsevier.
- Motamedi, H., Sherkati, S. & Sepehr, M. (2012). Structural style variation and its impact on hydrocarbon traps in central Fars, southern Zagros folded belt, Iran. *Journal of Structural Geology* 37, 124–133.
- Obaid, A. & Allen, M. (2017). Landscape maturity, fold growth sequence and structural style in the Kirkuk Embayment of the Zagros, northern Iraq. *Tectonophysics* 717, 27–40.
- Saberi, M. & Rabbani, A. (2015). Origin of natural gases in the permo-triassic reservoirs of the coastal Fars and Iranian sector of the Persian Gulf. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 26, 558–569.
- Sembroni, A., Reitano, R., Faccenna, C. & Callieri, P. (2024). The geologic configuration of the Zagros fold and thrust belt: An overview. *Mediterranean Geoscience Reviews* 6:2, 61–86.
- Sepehr, M. & Cosgrove, J. (2004). Structural framework of the Zagros fold–thrust belt, Iran. *Marine and Petroleum Geology* 21:7, 829–843.
- Sepehr, M., Cosgrove, J. & Moieni, M. (2006). The impact of cover rock rheology on the style of folding in the Zagros fold-thrust belt. *Tectonophysics* 427:1, 265–281.
- Shabani, F., Amini, A., Tavakoli, V., Honarmand, J. & Gong, C. (2022). 3D forward stratigraphic modeling of the Albian succession in a part of the northeastern margin of the Arabian plate and its implications for exploration of subtle traps. *Marine and Petroleum Geology* 145, 105880, 17 s.
- Sharland, P., Casey, D., Davies, R., Simmons, M. & Sutcliffe, O. (2004). Arabian plate sequence stratigraphy – revisions to SP2. *GeoArabia* 9:1, 199–214.
- Sherkati, S. & Letouzey, J. (2004). Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful embayment), Iran. *Marine and Petroleum Geology* 21, 535–554.
- Sherkati, S., Letouzey, J. & Frizon de Lamotte, D. (2006). Central Zagros fold-thrust belt (Iran): New insights from seismic data, field observation, and sandbox modeling. *Tectonics* 25:4, 27 s.
- Sherkati, S., Molinaro, M., Frizon De Lamotte, D. & Letouzey, J. (2005). Detachment folding in the central and eastern Zagros fold-belt (Iran): Salt mobility, multiple detachments and late basement control. *Journal of Structural Geology* 27:9, 1680–1696.
- Soleimani, B., Hassani-Giv, M. & Abdollahi fard, I. (2017). Formation pore pressure variation of the neocomian sedimentary succession (the Fahliyan formation) in the Abadan plain basin, SW of Iran. *Geofluids* 2017:1, 6265341, 13 s.
- Stern, R., Moghadam, H., Pirouz, M. & Mooney, W. (2021). The geodynamic evolution of Iran. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 49:1, 9–36.
- Taghikhani, H., Yassaghi, A., Madanipour, S. & Najafi, M. (2024). Salt tectonics along the High Zagros Fault in Iran, faulting through welded salt walls. *Journal of Asian Earth Sciences* 259, 105928, 19 s.
- Tavakolian, I., Yassaghi, A. & Najafi, M. (2022). Structural style in the south Dezful embayment, SW Iran: Combined influence of the Zagros frontal fault system and the detachment in the miocene Gachsaran formation. *Journal of Petroleum Geology* 45:3, 303–323.
- Tavakoli-Shirazi, S., Frizon de Lamotte, D., Wrobel-Daveau, J.-C. & Ringenbach, J.-C. (2013a). Pre-Permian uplift and diffuse extensional deformation in the High Zagros belt (Iran):

- Integration in the geodynamic evolution of the Arabian plate. *Arabian Journal of Geosciences* 6:7, 2329–2342.
- Tavakoli-Shirazi, S., Leturmy, P., Frizon de Lamotte, D. & Ringenbach, J.-C. (2013b). Structural style and kinematic evolution of the High Zagros, Iran. *Journal of Petroleum Geology* 36:4, 309–334.
- Vergés, J., Saura, E., Casciello, E., Fernández, M., Villasenor, A., Jiménez-Munt, I. & Garcia-Castellanos, D. (2011). Crustal-scale cross-sections across the NW Zagros belt: Implications for the Arabian margin reconstruction. *Geological Magazine* 148:5–6, 739–761.
- Wensink, H., Zijdeveld, J. & Varekamp, J. (1978). Paleomagnetism and ore mineralogy of some basalts of the Geirud formation of late devonian—early carboniferous age from the southern Alborz, Iran. *Earth and Planetary Science Letters* 41:4, 441–450.
- Zhu, R., Zhao, P. & Zhao, L. (2022). Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean. *Science China Earth Sciences* 65:1, 1–24.