

Kallioperärakenteiden vaikutus öljyloukkuihin

Kia J. Honkala

Geologia
LuK-tutkielma
Laajuus: 7 op

14.01.2024

Turku

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

LuK-tutkielma

Pääaine: Geologia

Tekijä: Kia Honkala

Otsikko: Kallioperärakenteiden vaikutus öljyloukkuihin

Ohjaaja: Eemi Ruuska

Sivumäärä: 29 sivua

Päivämäärä: 14.01.2024

Öljy on fossiilinen polttoaine, joka syntyy miljoonien vuosien kuluessa orgaanisen aineen hajotessa ja kerrostuessa sedimenttikerrokseen. Tämä prosessi, joka tunnetaan diagenesinä ja katagenesinä muuttaa orgaanisen aineen hiilivedyiksi korkean paineen ja lämpötilan vaikutuksesta. Syntyvä öljy liikkuu kallioperän huokoisten kerroksien läpi, kohdaten lopulta esteen ja muodostaen öljyesiintymän. Näitä esteitä kutsutaan öljyloukuiksi ja ne luokitellaan kahteen pääryhmään: rakenteellisiin ja stratigrafisiin öljyloukkuihin. Kahden pääryhmän lisäksi esiintyy öljyloukkuja, jotka eivät geologisten piirteiden takia sovi kumpaankaan pääryhmään, jolloin niistä puhutaan luokittelemattomina öljyloukkuna.

Öljyloukut sisältävät loukun tyypin mukaan öljyä, maakaasua, vettä tai kaikkia edellä mainittuja elementtejä, riippuen ympäröivästä kallioperästä ja alueen geologisista olosuhteista. Kallioperän huokoisuus, läpäisevyys ja lämpötilaolosuhteet ovat keskeisiä tekijöitä öljyn muodostumisen ja säilymisen kannalta. Ne määräävät kuinka tehokkaasti öljy pystyy varastoitumaan ja liikkumaan. Olosuhteet öljyn varastoitumiselle ovat otollisimmat sedimenttikivissä, mutta öljyloukkuja esiintyy myös metamorfisissa- ja magmakivissä, mikäli alueen geologiset ominaisuudet täyttävät nesteen varastoitumiseen ja liikkumiseen tarvittavat kriteerit.

Öljytalouden kannalta öljyloukut ovat keskeisessä asemassa, sillä ne mahdollistavat öljyn kaupallisen hyödyntämisen ja määrittävät öljykenttien taloudellisen potentiaalin, vaikuttaen merkittävästi kartoitus- ja tuotantomenetelmiin. Öljyn taloudellinen merkitys on huomattava, sillä se on yksi maailmanlaajuisen energiantuotannon kulmakivistä ja sillä on laaja vaikutus globaaliin talouteen, geopolitiikkaan ja ympäristönsuojeluun. Ymmärtämällä öljyn syntyprosessia ja loukkujen geologista luonnetta voidaan parantaa öljyntuotannon tehokkuutta ja kestävyyttä, mikä on välttämätöntä nykyiselle energiataloudelle.

Avainsanat: Hiilivedyt, rakenteelliset öljyloukut, stratigrafiset öljyloukut, öljyloukut, öljyn syntyprosessi, öljytalous

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	5
2. Öljyn ominaisuudet ja esiintyminen	6
2.1 Öljyn ominaisuudet	6
2.2 Öljyn tyypilliset esiintymisympäristöt	7
3. Öljyloukut	9
3.1 Rakenteelliset loukut	9
3.1.1 Antikliiniloukut	9
3.1.2 Siirrosloukut.....	11
3.1.3 Intrusioloukut	12
3.2 Stratigrafiset loukut	14
3.2.1 Pinch-out-loukut	15
3.2.2 Lentikulaariset loukut.....	17
3.3 Luokittelemattomat öljyloukut	17
3.3.1 Hydrodynaamiset loukut.....	18
3.3.2 Yhdistelmäloukut.....	19
4. Tapaustutkimus: The Prudhoe Bay	21
4.1 Geologinen tausta.....	21
4.2 Yhteiskunnallinen vaikutus	23
5. Yhteiskunnallinen merkitys	24
5.1 Kartoitus	24
5.2 Talous ja tulevaisuus	26
5 Johtopäätökset.....	28
Lähteet.....	29

1. Johdanto

Raakaöljy on hiilivetyjen seos, joka esiintyy nestemäisessä olomuodossa luonnollisissa maanalaisissa varastoissa, pysyen nestemäisessä faasissa ilmakehän normaalipaineessa. Geologisella aikaskaalalla nykyisen raakaöljyn on päätelty syntyneen ennen holoseenikauden alkua 11,5 Ka sitten (Hedberg 2019).

Öljyesiintymät muodostuvat yleensä öljyloukkuihin, joissa öljy on varastoitunut ympäröiviin kallioperäkerrostumiin ja niiden rakenteiden väliin. Öljyesiintymät ovat yleisiä kallioperässä, jonka huokoisuus ja läpäisevyys on riittävä nesteen varastoimiseen ja siirtämiseen (Selley 1998). Öljyesiintymiä tavataan eniten sedimenttikivissä, koska ne ovat lähtökohtaisesti huokoisempia kuin useimmat magma- tai metamorfiset kivet (Selley 1998). Selley (1998) mukaan sedimenttikivet yhdistetään öljyesiintymiin myös sen takia, että sedimenttikiviä muodostuu yleisesti lämpötiloissa, joissa hiilivedyt säilyvät parhaiten. Orgaanisen aineksen pitkä ja häiriintymätön säilyminen kallioperässä pystyy muuttamaan sen hiilivedyksi myös matalammissa lämpötiloissa (Hedberg 2019).

Selley (1998) mukaan öljyloukku voi sisältää öljyä, kaasua tai molempia, riippuen ympäröivästä kallioperästä. Tavallisesti öljyä ja kaasua esiintyy samassa loukussa, jolloin tiheuserojen takia öljy varastoituu kaasun alapuolella. Öljyloukkujen koko vaihtelee 1–2 metrin (esimerkiksi Texas, USA) paksuisista esiintymistä useisiin satoihin metreihin (esimerkiksi Norjanmeri ja Lähi-Itä) (Selley 1998). Yhdellä öljykentällä voi esiintyä yksi tai useampia öljyaltaita, joista jokaisella on omat kontaktipinnat mahdollisen veden, öljyn ja kaasun välillä (Selley 1998).

Tämän tutkielman tavoitteena on tarkastella maailmanlaajuisesti öljyesiintymiä ja tarkemmin niiden geologisia rakenteita. Käyn tutkielmassani läpi öljyloukkujen karkean luokittelujärjestelmän sekä erilaisten tektonisten voimien vaikutuksen öljyloukkujen syntyyn. Lisäksi käsittelen yleisesti raakaöljyn syntyprosessin, ominaisuudet sekä esiintymisalueet ja niiden yhteyden kallioperärakenteisiin.

2. Öljyn ominaisuudet ja esiintyminen

Fyysisiltä ominaisuuksiltaan öljy on hyvin vaihtelevaa ja sen ominaisuuksiin vaikuttavat merkittävästi esiintymisympäristö, kuten ympäröivä kallioperä sekä alueella vaikuttavat tektoniset voimat (Selley 1998). Öljyä esiintyy erityisesti tektonisesti aktiivisilla alueilla, missä orgaanista ainesta on paljon saatavilla ja öljyn muodostumisprosessille tarpeeksi aikaa.

2.1 Öljyn ominaisuudet

Ennen jalostusprosesseja öljy on kemialliselta koostumukseltaan pääasiassa alkaaneja ja aromaattisia hiilivetyjä (Selley 1998). Öljy koostuu pääasiassa hiilivedyistä, mutta se sisältää myös vähäisesti typpeä ja rikkiä sekä joskus myös metalleja (Selley 1998). Öljyjen koostumusten välillä on huomattu eroavaisuuksia, jotka johtuvat pääasiassa alkaanipitoisuuksista, hiili-isotooppien koostumuksesta sekä öljyn iästä (Hedberg 2019). Lisäksi öljyn tiheydessä on huomattu eroavaisuuksia, johon usein vaikuttaa myös ympäröivien kivien ja mineraalien katalyyttinen aktiivisuus (Hedberg 2019).

Lähtökiven orgaaniset aineet voidaan jakaa kolmeen luokkaan: 1. kerogeeniin, mikäli aine on kiinteää tai liukenematonta, 2. bitumiksi, mikäli aine on nestemäistä tai liuottimilla uutettavissa tai 3. kaasuksi, jos aine on kaasumaista (Cornford 1986). Kiinteä kerogeeni hajoaa bitumiksi ja kaasuksi hautautumisprosessin aikana tapahtuneen lämpötilannousun seurauksena (Cornford 1986). Kaasut luokitellaan kuiviin ja kosteisiin kaasuihin sen mukaan, kuinka paljon ne sisältävät nestehöyryä (Selley 1998). Kuiviin kaasuihin kuuluu esimerkiksi metaani, kun taas kosteiksi kaasuiksi luokitellaan etaani, propaani ja butaani (Selley 1998). Konsentraatit puolestaan ovat hiilivetyjä, jotka ovat kaasumaisia maan alla, mutta tiivistyvät nesteeksi, kun ne jäähdytetään maan pinnalla (Selley 1998).

Öljyn väri vaihtelee vaalean keltaisesta, vihreästä ja ruskeasta aina tummanruskeaan ja mustaan (Selley 1998). Öljyn viskositeetti vaihtelee laajasti sen esiintymisympäristön mukaan, sillä ylempänä maankuoressa sijaitsevien öljyesiintymien viskositeetti on yleisesti suurempi verrattuna lämpimissä maanalaisissa varastoissa oleviin öljyesiintymiin (Selley 1998).

Orgaanisen aineen runsasta säilymistä edistää korkeat sedimentaationopeudet sekä alhainen happipitoisuus (Demaison & Moore 1980). Alhaisia happipitoisuuksia esiintyy usein kerrostuneissa järvissä, mannerjalustoilla ja valtamerien keskiselänteillä (Cornford 1986).

Näihin ympäristöihin liittyvät sedimenttikerrostumat sisältävät todennäköisesti runsaasti orgaanista ainesta, jolla on mahdollisuus hajota ja muuntua öljyksi (Cornford 1986).

2.2 Öljyn tyypilliset esiintymisympäristöt

Öljy on syntynyt sedimenttikiviin kerrostuneen orgaanisen aineen kemiallisesta muuntumisesta kallioperän puristuksessa (Hsu & Robinson 2017). Tämä on pystytty todentamaan tutkimalla raakaöljyn tarkkaa koostumusta, ympäristöjä, joissa öljy on muodostunut sekä öljyesiintymää ympäröiviä kiviä (Hsu & Robinson 2017). Öljy muodostuu useimmiten mikroskooppisista kasveista ja eliöistä, kuten levistä, bakteereista, itiöistä ja planktonista (Hsu & Robinson 2017).

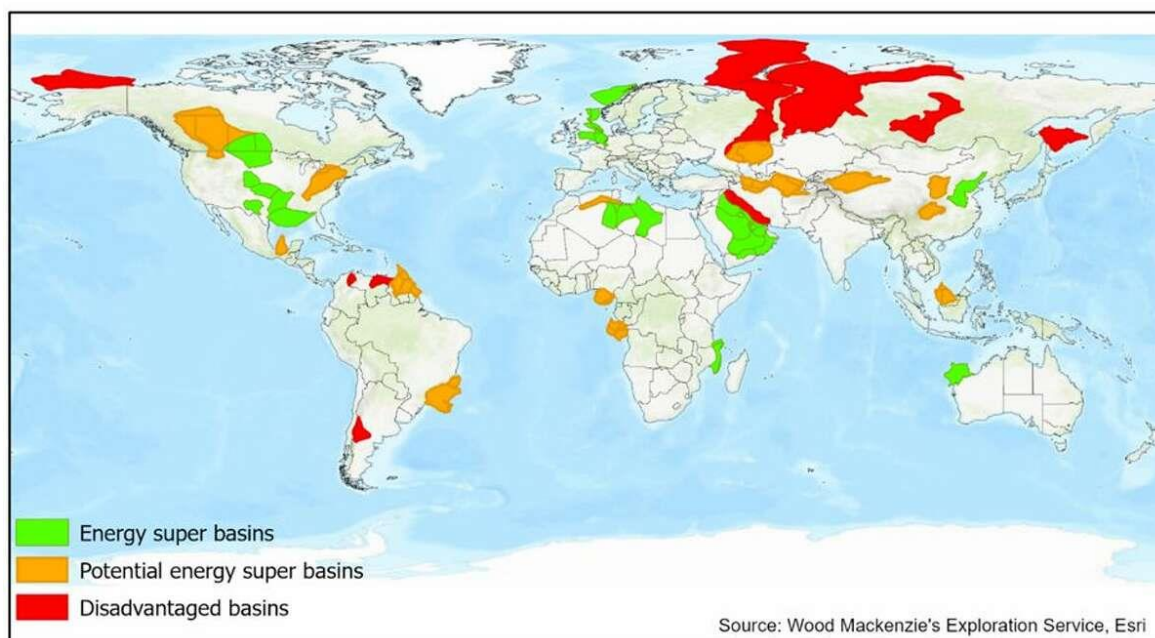
Hsun ja Robinsonin (2017) mukaan öljyn muodostumiselle on tietyt ehdot, joista tärkein on orgaanisen aineksen runsas saatavuus. Tämä ehto täyttyy yleensä suurten mikro-organismien tuhoutuessa, esimerkiksi hapenpuutteen, ravinteiden puutteen tai luonnonkatastrofien aiheuttamien massakuolemien seurauksena. Orgaanisen aineksen tulee loukuttua ja hautautua hyvin nopeasti, jotta aine ei kerkeä maata. Hautautumisen tulee tapahtua hapettomissa olosuhteissa ja tarpeeksi syvällä maaperässä, jotta happi ei pääse mukaan reaktioon (Tiratsoo 1952). Orgaanista ainesta sisältävien sedimenttikerroksien yläpuolella on oltava suhteellisen paljon sedimenttikerroksia, jotta paine ja lämpötila nousee. Tärkein ehto öljyn muodostumiselle on aika, sillä orgaanisen aineen geokemiallinen muuttuminen on hyvin hidaskäyttöprosessi (Hsu & Robinson 2017).

Hsun ja Robinsonin (2017) mukaan öljyn syntyprosessi voidaan jakaa kolmeen päävaiheeseen: diageneesiin, katageneesiin ja metageneesiin. Diageneesi on ensimmäinen vaihe, joka käsittää orgaanista ainesta sisältävien sedimenttien hautautumisen hapettomissa olosuhteissa. Sen aikana vesi haihtuu, orgaaninen aines tiivistyy sekä sementoituu ja kerogeenin muodostuminen alkaa. Katageneesi käsittää kerogeenin muuttumisen öljyksi, kaasuksi tai hiileksi. Suuret hiilivetymolekyylit syntyvät pääasiassa katageneesin alkuvaiheessa, minkä jälkeen muodostuu vain pienempiä hiilivetymolekyylejä (mukaan lukien C5 ja C12- molekyylit) sekä märkää kaasua. Kolmannessa vaiheessa, metageneesissä syntyy pääasiassa kuivaa kaasua (metaania), minkä jälkeen sedimentti alkaa metamorfoitumaan (Hsu & Robinson 2017).

Hedbergin (2019) mukaan öljy täyttää ympäröivän kiven huokoiset tai siirrosten väliset tilat. Yleisimmät öljyesiintymät linkittyvät suoraan sedimenttikiviin, mutta niitä tavataan myös

rakoilevissa magmakivissä ja metamorfisissa kivissä melko yleisesti (Hedberg 2019). Magmakivissä ja metamorfisissa kivissä olevien öljyesiintymien läheinen yhteys sedimenttikivialueisiin vahvistaa öljyn syntyprosessin yhteyttä sedimenttikiviin (Hedberg 2019).

Suurimmat öljyvarannot (eng. super basins) löytyvät Yhdysvaltojen keskilänneestä, Lähi- Idästä sekä Norjanmeren alueelta (Kuva 1). Rakenteellisia öljyloukkuja esiintyy maailmanlaajuisesti, kun taas stratigrafisia loukkuja tavataan pääasiassa alueilla, joilla on havaittavissa merkittävää tektonista aktiivisuutta. Maakaasuesiintymät liittyvät läheisesti kivihiilipitoisiin moreeniesiintymiin, joita on ajoitettu myöhäiseltä kivihiilikaudelta (299 Ma) aina paleoseenikaudelle (66 Ma) saakka (Selley 1998).



Kuva 1. Suurten öljyesiintymien jakautuminen maapallolla (Wood Mackenzie's Exploration Service, Esri, Selley 1998).

3. Öljyloukut

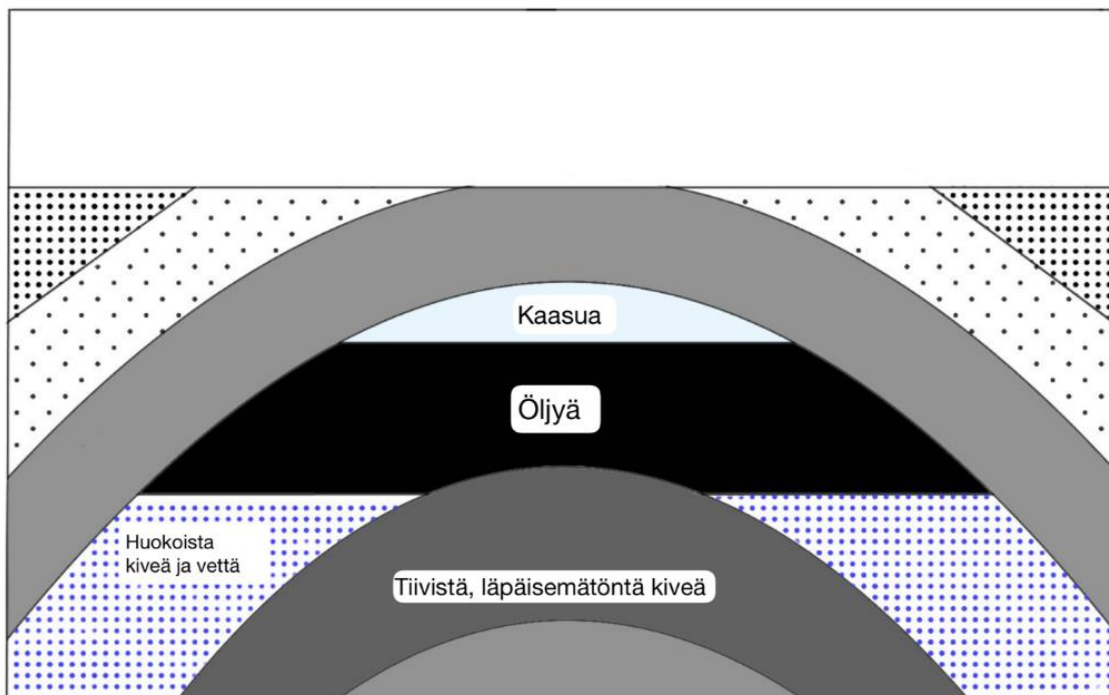
Öljyloukkuja voidaan luokitella kallioperässä niiden sijainnin sekä geologisen rakenteen perusteella (Selley 1998). Ne jaetaan tavallisimmin kahteen pääryhmään: rakenteellisiin ja stratigrafisiin loukkuihin. Luokittelemattoman ryhmän muodostavat ne öljyloukut, jotka eivät rakenteen perusteella sovi kumpaankaan edeltä mainittuun pääryhmään (Selley 1998).

3.1 Rakenteelliset loukut

Rakenteelliset loukut syntyvät tektonisten liikkeiden ja painovoiman vaikutuksesta, jotka tapahtuvat hiilivetyesiintymän muodostumisen jälkeen (Selley 1998; Kassem 2017). Rakenteellisiä loukkuja ei synny sattumanvaraisesti, vaan loukkujen tyypit ja esiintyminen liittyvät läheisesti kyseisen alueen tektoniseen historiaan (Selley 1998). Öljyloukun sijainti kallioperässä suhteessa tektonisiin laattoihin vaikuttaa syntyprosessiin (Harding & Lowell 1979). Rakenteellisiä loukkuja voidaan luokitella sen mukaan, mitkä tektoniset liikkeet ja voimat ovat vaikuttaneet loukkujen syntyprosessin aikana (Selley 1998). Tämän perusteella Selley (1998) on jakanut loukut kolmeen ryhmään: antikliini-, siirros- ja intruusioloukkuihin.

3.1.1 Antikliiniloukut

Antikliiniloukut on yleisin öljyloukkuryhmä ja ne voidaan jakaa puristuneisiin ja tiivistyneisiin antikliiniloukkuihin (Selley 1998). Antikliini on poimurakenne, jossa eri kerrosten ikä nuorenee liikuttaessa pois päin poimun akselitasosta. Tyypillisesti antikliinin sisään jää huokoinen alue, johon öljyä ja kaasua pääsee kerääntymään (Kuva 2.) (Shaymaa 2019). Selley (1998) mukaan antikliiniloukun ympärillä on oltava hienojakoista ja tiivistä kiveä, joka toimii tiivisteen tavoin loukun ympärillä. Mikäli tiivistettä ei ole, öljy ja kaasu pääsevät karkaamaan antikliiniloukusta (Selley 1998).



Kuva 2. Antikliiniloukun poikkileikkaus. Poimun sisällä on varastoituneena öljyä ja kaasua, joita ympäröi tiivis kivi, estäen hiilivetyjen leviämisen (Mukaiillen Selley 1998).

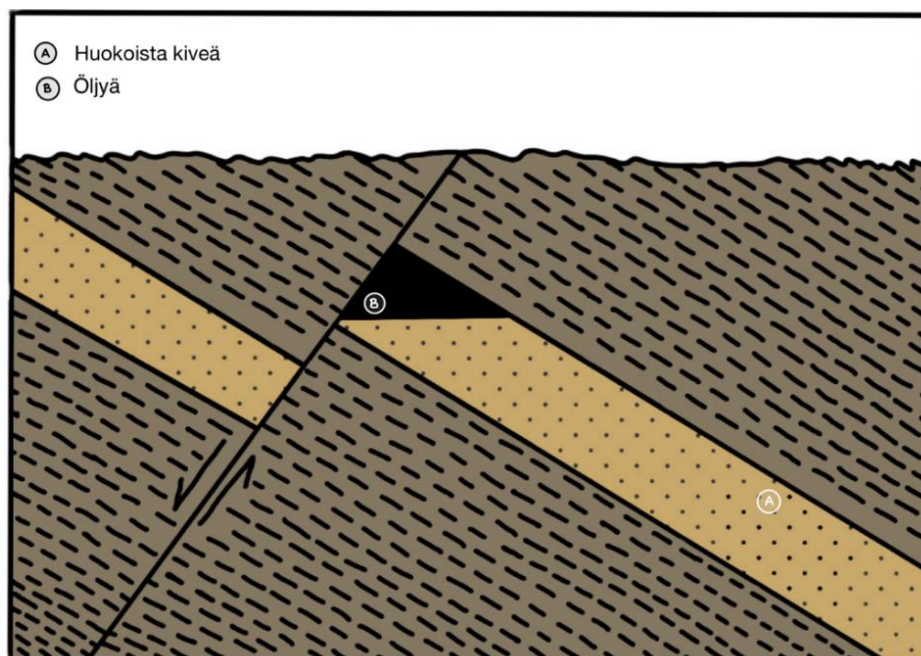
Puristuneet antikliiniloukut syntyvät kallioperään kohdistuvan puristuksen seurauksena (Selley 1998). Niitä esiintyy useimmiten subduktiosysteemien rakenteellisissa painanteissa, ylityöntövyöhykkeiden yläpuolella olevissa antikliineissä tai ylityöntövyöhykkeiden alapuolella olevissa suljetuissa tiloissa (Selley 1998).

Tiivistyneet antikliiniloukut ovat syntyneet maankuoreen kohdistuvan ekstension seurauksena (Selley 1998). Kun maankuoren ekstensio saa aikaan sedimenttialtaan muodostumisen, altaan pohja jakaantuu yleensä horsteihin ja hautavajoamiin (Selley 1998). Sedimenttien kerrostumisen alkuvaihe täyttää edellä mainitut epätasaiset pinnanmuodot (Selley 1998). Alkuperäinen rakenne säilyy yleensä koko sedimenttialtaan historian ajan ja ohjaa myöhempää sedimentaatiota, jolloin syvälle ulottuvien horstien yläpuolella olevassa sedimenttipeitteessä voi esiintyä antikliineja (Selley 1998). Selley (1998) mukaan sulkeutumista voi edistää sekä tiivistyminen että sedimentaatio. Puristuneet ja tiivistyneet antikliiniloukut näyttävät ulkoisesti samalta, vaikka syntyprosessit eroavat toisistaan (Selley 1998).

3.1.2 Siirrosloukut

Selleyn (1998) mukaan siirroksilla on epäsuora, mutta olennainen rooli monien öljykenttien muodostumisessa, vaikka suhteellisen harvat öljykentät ovat syntyneet pelkästään siirroksien vaikutuksesta (Selley 1998). Siirrosten yhteydessä esiintyvät öljyvarastot syntyvät, kun tiivis kivi siirrostuu öljyä sisältävää huokoisempaa kiveä vasten (Kuva 3.) (Hussein et al. 2015) Tällöin tiivis kivi synnyttää esteen, jolloin hiilivedyt eivät pääse karkaamaan loukusta (Hussein et al. 2015).

Öljyloukkuja voi syntyä vain tarpeeksi tiiviiden siirrosten yhteyteen, sillä siirroksen tulee estää nesteiden liikkeet (Selley 1998). Plastisissa eli muovautuvasti deformatuneissa kivissä olevat siirrokset toimivat öljyn ja veden esteenä todennäköisemmin kuin hauraasti deformatuneissa kivissä, joissa esiintyy tyypillisesti laaja-alaista rakoilua, joka edesauttaa nesteen liikettä (Selley 1998). Toisaalta hauras deformaatio aiheuttaa kiveen myös tarvittavaa huokoisuutta. Jotkin öljykentät ovat syntyneet pelkästään rikkonaisuuksien aiheuttamille huokoisemmille alueille siirroksien läheisyyteen (Selley 1998). Siirrosloukkuja luokitellaan sen perusteella, esiintyykö loukku normaalisiirroksen vai kulkuliukusiirroksen (eng. strike-slip-fault) yhteydessä (Selley 1998).



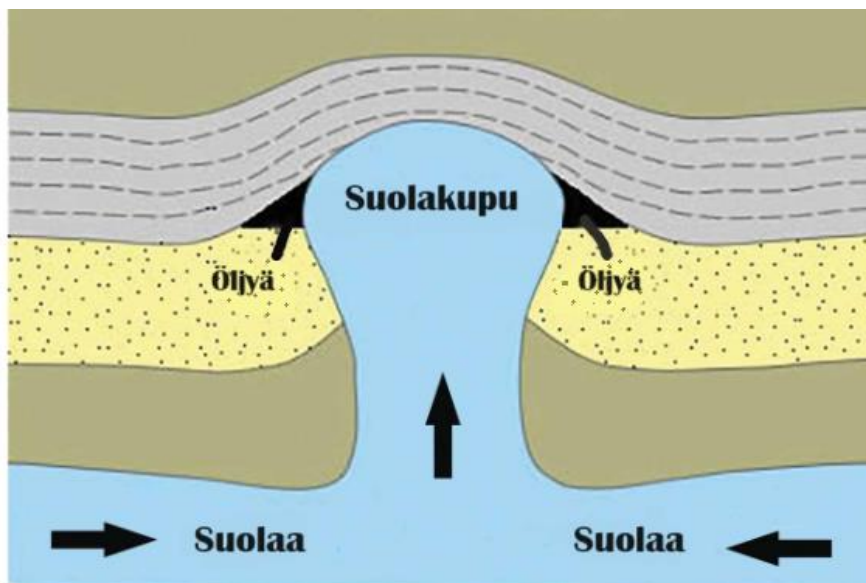
Kuva 3. Normaalisiirroksen yhteydessä esiintyvän siirrosloukun perusrakenne. Kuva havainnollistaa että huokoisen kiven muodostamat varastot olisivat yhteydessä siirroksen molemmiin puolin, mikäli siirros ei erottaisi niitä toisistaan (Mukaiillen Aminzadeh & Dasgupta 2013).

Normaalisiirrosten yhteydessä siirrostaso estää öljyn liikkeen, jolloin se muodostaa tiivisteiden öljyesiintymän yläpuolella olevan läpäisemättömän kerroksen kanssa (Selley 1998). Selley (1998) mukaan kulkuliukusiirrosten yhteydessä esiintyvät öljyloukut ovat monimutkaisempia systeemejä. Sivuttaisliike tapahtuu kulkuliukusiirroksia pitkin, jolloin nämä liikkeet ilmenevät yläpuolisessa sedimenttikerroksessa en echelon- rakenteina eli mineraalitäytteisten sulkurakojen muodossa (Selley 1998).

3.1.3 Intruusioloukut

Selley (1998) mukaan intruusioloukut ovat syntyneet sedimenttien ylöspäin suuntautuvan liikkeen seurauksena. Liikkuvampi ja sitkeämpi materiaali, kuten suola tai savi, tunkeutuu hauraaseen yläpuoliseen kallioon, joka aiheuttaa sedimenttien liikkumisen ylöspäin ja hiilivetyloukkujen muodostumisen. Diapiirisiä öljyloukkuja ei voida luokitella suoraan rakenteellisiin loukkuihin, koska tektoniset voimat eivät ole välttämättömiä loukkujen syntymisen kannalta (Selley 1998). Intruusio(öljy)loukkuja esiintyy kahta tyyppiä, suolakupuloukkuja ja vähemmän tunnettuja saviloukkuja (Selley 1998).

Suola on tiheydeltään noin 2.03 g/cm^3 , kun taas hiljattain kerrostuneen hiekan ja saven tiheys on pienempi kuin suolalla (Selley 1998). Hiekka ja savi tiivistyvät hautautuessaan, jolloin huokoisuus vähenee ja tiheys kasvaa (Selley 1998). Sedimentaatioprosessin edetessä voidaan saavuttaa syvyys (noin 800–1200 m), jossa saven ja hiekan tiheys on suurempi kuin suolalla (Selley 1998). Syvyyden saavuttamisen jälkeen suolalla on taipumus virrata ylöspäin tiheimmän pintakerroksen läpi (Kuva 4.) (Selley 1998). Suolan liike voi aiheutua tektonisesti ja sen tuloksena syntyneissä rakenteissa voi olla samansuuntaisuutta kallioperärakenteiden kanssa (Selley 1998). Joissain suolarakenteissa päällä olevat kerrokset taipuvat ylöspäin, kun taas osassa suolarakenteista suola tunkeutuu yllä olevien kerrosten läpi muodostaen lävistysrakenteen (Selley 1998). Osassa tapauksista suola voi nousta aina maan pinnalle asti, muodostaen esimerkiksi suolajäätiköitä (Selley 1998).



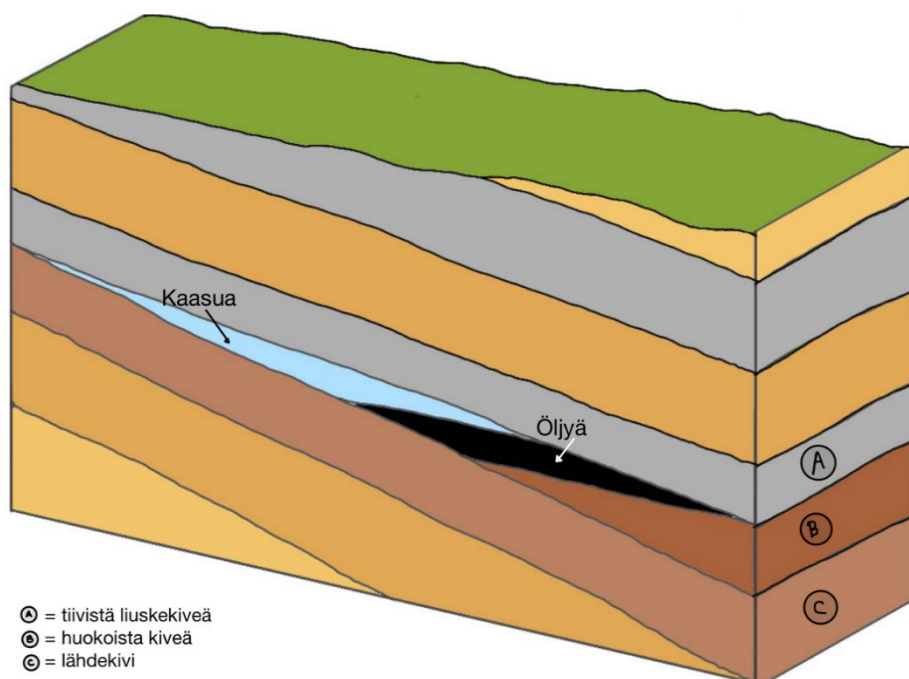
Kuva 4. Suolakupuloukun rakenne. Keskellä suolakupoli, jota ympäröi sedimenttikerrokset. Öljyesiintymä kupolin alareunan ympärillä (Mukaillen Hussein et al. 2015).

Suolan liikkeet vaikuttavat öljyn ja kaasun loukkuuntumiseen esimerkiksi Persianlahdella, Iranissa ja Pohjanmerellä (Selley 1998). Öljyä ja kaasua jää loukkuun suolakupolin kyljissä oleviin rikkonaisuuksiin, kuten stratigrafisiin rakoihin sekä ympäröivän sedimentin, sekä sedimentin ja suolan välisiin rikkonaisuuksiin (Selley 1998). Suolakupuloukut ovat poikkileikkaukseltaan usein päärynän tai sienien muotoisia, jolloin raakaöljy loukuttuu reuna-alueen ylitysvyöhykkeen alapuolelle (Selley 1998). Öljyn loukuttumiseen voi vaikuttaa tektoniset voimat, jolloin syntyneissä rakenteissa voi olla jonkin verran rakenteellista samansuuntaisuutta (Selley 1998).

Selleyn (1998) mukaan saviset intrusiorakenteet ovat huomattavasti harvinaisempia kuin suolaintruusiot. Myös savi-intruusiot voivat luoda öljyloukkuja ja niiden syntyprosessi on suhteellisen samankaltainen kuin suolakupuloukuilla (Selley 1998). Ylipaineistetun liuskekiven huokoisuus on luonnostaan suurempi ja tiheys siten pienempi kuin normaalisti tiivistetyn liuskekiven (Selley 1998). Savi-intruusiot muodostuvat ylipaineistetun saven tunkeutuessa nuorempaan ja tiiviimpään kerrokseen (Selley 1998). Monissa savi-intruusioissa esiintyy hiilivetyjä, jotka ovat jääneet loukkuun vastaavalla tavalla kuin aiemmin kuvatuissa suolakupuloukuissa (Selley 1998).

3.2 Stratigrafiset loukut

Toinen merkittävä öljyloukkujen luokitteluryhmä on stratigrafiset loukut, joiden geometria johtuu kivilajimuutoksista, jotka tapahtuvat samanaikaisesti hiilivetykerrostumien muodostumisen kanssa (Kuva 5.) (Selley 1998; Kassem 2017). Tällaiset muutokset johtuvat yleisesti kivien alkuperäisestä kerrostumisesta, mutta joissain tilanteissa kivilajimuutos voi tapahtua jälkikäteen, esimerkiksi diogeneettisten loukkujen yhteydessä (Selley 1998). Yleinen määritelmä stratigrafiselle loukulle perustuu siihen, että pääasiallinen loukun muodostava elementti on jokin vaihtelu kiven stratigrafiaan ja/tai kivilajiin liittyen (Selley 1998). Faasimuutokset, paikallisesti vaihtelevat huokoisuusasteet ja läpäisevyys sekä esiintymän ylös- ja alaspäin suuntautuvat kiviaineksen liikkeet ovat esimerkkejä tällaisista vaihteluista (Levorsen, 1967). Joidenkin stratigrafisten loukkujen syntyyn liittyy vahvasti meren pinnan suhteellinen nousu ja lasku eli transgressio- ja regressiotapahtumat, kuten pinch-out-loukkujen kohdalla (Aminazadeh & Dasgupta 2013). Stratigrafiset loukut ovat rakenteellisiin loukkuihin verrattuna vähemmän tunnettuja ja myös niiden syntyprosessia pidetään myös huomattavasti monimutkaisempina (Selley 1998).



Kuva 5. Stratigrafinen loukku, alapuolella huokoista kiveä, loukun yläpuolella tiivis kansi (Mukaiillen Kassem 2017).

Sedimentoituminen tapahtuu miljoonien vuosien aikana vesiympäristössä, jolloin syntyy vaakasuoria, samansuuntaisia sedimenttikerrostumia (Hussein *et al.* 2015). Sedimenttikerrostumia kuitenkin häviää eroosion seurauksena, jonka jälkeen alkaa uusi

sedimentaatioprosessi (Hussein *et al.* 2015). Eroosion seurauksena sedimenttikerrostumaan muodostuu epäjatkuvuuspinta, jonka ylä- ja alapuolella olevien sedimenttien välillä on geologinen aikajakso, joka on erodoitunut pois (Hussein *et al.* 2015). Epäjatkuvuuspinnan yläpuolisen sedimenttikerroksen kivettyminen esimerkiksi liuskekiveksi muodostaa läpäisemättömän kerroksen, jonka alapuolisiin huokoisempiin kiviin öljyn on mahdollista loukuttua (Hussein *et al.* 2015). Öljyloukku syntyy epäjatkuvuuspinnan alapuolella olevaan huokoiseen kiveen (Kuva 5.), kun kerroksissa sijaitsevat hiilivedyt pakotetaan kontaktiin vedellä kyllästetyn hiekkakiven kanssa (Hussein *et al.* 2015). Pienemmän tiheydensä vuoksi öljy kulkeutuu ylöspäin, jonka jälkeen lopulta hiekkakiven läpi samalla pakottaen painavamman veden alaspäin. Kun hiilivedyt saavuttavat epäjatkuvuuspinnan, ne loukuttuvat ja muodostavat esiintymän (Hussein *et al.* 2015).

Stratigrafisten loukkujen määrittely on tehty jo vuonna 1880, jolloin tavattiin Yhdysvaltojen Pennsylvaniassa öljyesiintymä, jonka syntyä ei kyetty perustelemaan aikaisemmalla teorialla antikliiniloukuista (Selley 1998). Stratigrafiset loukut luokitellaan sen perusteella, liittyykö niihin epäjatkuvuuspinta vai ovatko kivilajikontaktit diskordanttisia tai konkordanttisia (Selley 1998).

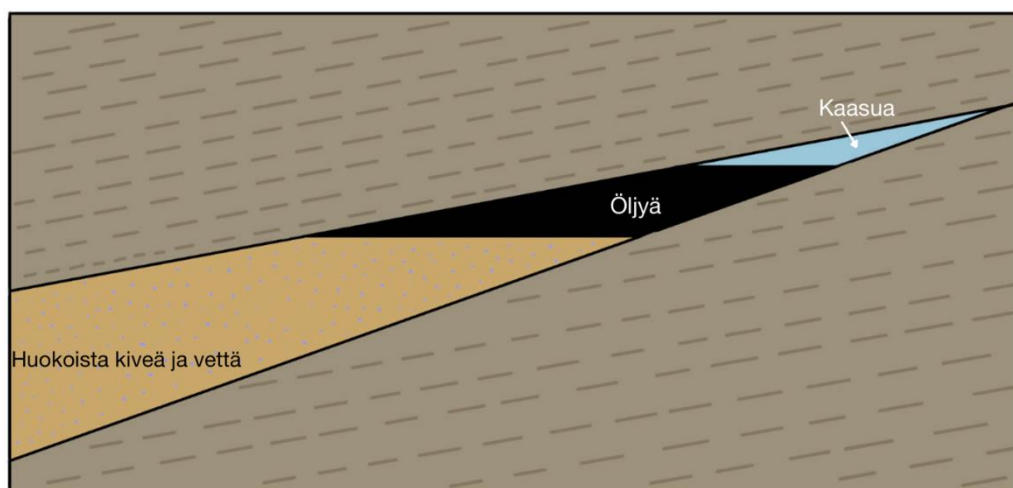
Kivilajikontakti on diskordantti, kun toisen kivilajin rakenteet ovat erisuuntaiset viereisen kivilajin rakenteiden kanssa. Yleisempiä ovat kuitenkin loukut, joiden kivilajien rakenteet ovat keskenään samansuuntaiset eli konkordanttiset. Pinch-out-loukut ovat esimerkki konkordanttisista loukuista, kun taas lentikulaariset loukut ovat tyypiesimerkki diskordanttisista loukuista (Selley 1998).

3.2.1 Pinch-out-loukut

Pinch-out-öljyloukut muodostuvat paikkoihin, missä litologisesti eriävä kallioperäkerros ohenee lopulta sulkeutuen (Selley 1998). Pinch-out-loukkuja syntyy sekä maalla että merenalaisissa ympäristöissä (Hussein *et al.* 2015). Merellisessä ympäristössä rantasedimentit peittyvät yleisesti läpäisemättömällä savella, joka laskeutuu sedimenttikerrosten päälle (Hussein *et al.* 2015). Pinch-out-loukkujen syntyyn liitetään usein merenpinnan transgressiiviset ja regressiiviset kiertokulut (Aminzadeh & Dasgupta 2013). Etenkin transgressiivinen vaihe aiheuttaa syvemmän veden sedimenttien kerrostumista matalamman veden kerrostumien päälle. Loukkujen syntyyn vaikuttaa sijainnin ja progradatiotapahtumien

lisäksi sedimentaatioympäristön muutokset, eroosio ja ympäristön faasimuutokset (Selley 1998).

Pinch-out-loukuissa lähdekivi on läpäisevää sedimenttikiveä, yleensä hiekkakiveä, joka sisältää vettä, öljyä ja kaasua (Kuva 6.) Tämän yläpuolella on läpäisemätön kerros tiivistä sedimenttiä, kuten savikiveä, joka estää hiilivetyjen liikkeen. Hiilivetyjä sisältävä läpäisevä kerros ohenee vähitellen, kunnes se häviää kokonaan läpäisemättömään kerrokseen (Selley 1998). Ohentuvan kerroksen tulee olla tiivistä, jolloin hiilivedyt loukuttuvat sen sisään (Selley 1998). Pinch-out-loukkujen syntyyn vaikuttavat monet geologiset prosessit, kuten epäjatkuvuuspinnat, sillä loukut muodostuvat sedimenttien kerrostumisprosessin aikana (Hussein *et al.* 2015).

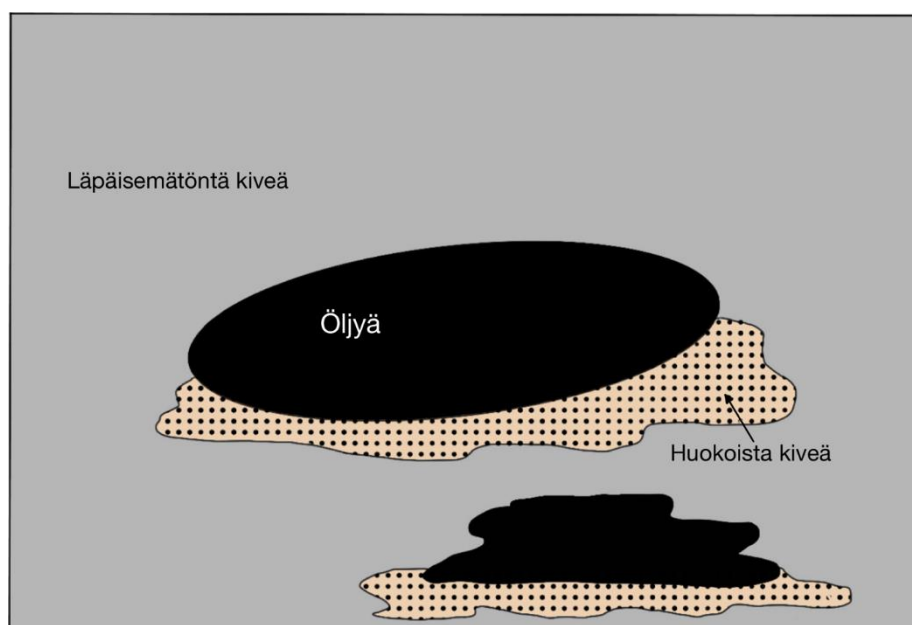


Kuva 6. Pinch-out-loukun perusrakenne, lähdekivi on huokoista ja sisältää vettä. Ympärillä tiivistä kiveä, joka sulkee louku sekä ylä- että alapuolelta (Mukaiillen Levorsen 1967).

Hiekka on paksuimmillaan regressiovaiheessa. Transgressioiden aikana ne esiintyvät yleensä vain erillisinä shoestring-levyinä (Selley 1998). Esimerkiksi Kalliovuoren kalkkialtaita tutkittaessa huomattiin, että transgressiivisen vaiheen hiekat muodostavat yleensä parhaat öljyloukut (Selley 1998). Regressiivistä hiekoista puuttuvat yleensä ylöspäin suuntautuvat (eng. up-dip) tiivisteet, kun ne siirtyvät kohti rantaa. Transgressiivinen hiekka kulkeutuu vuorostaan ylöspäin laguunien ja vuorovesialueiden liuskeisiin (Selley 1998). Kun hiekat kulkeutuvat ylöspäin, ne synnyttävät usein pinch-out-loukkuja, jos muut ympäristön olosuhteet ovat otollisia öljyn varastoitumiselle (Selley 1998).

3.2.2 Lentikulaariset loukut

Lentikulaariset loukut muodostuvat huokoiseen kivilajiin linssimäiseen muotoon, jonka ympärillä on tiivistä massiivista kiveä, joka estää hiilivetyjen karkaamisen (Kuva 7.) (Hussein et al. 2015) Ympäröivä kivi on läpäisemätöntä sedimenttikiveä, kuten savikiveä, joissain tilanteissa myös suolaa (Hussein et al. 2015). Lentikulaariset loukut syntyvät sedimentaatioprosessien aikana, jolloin sedimentit kerrostuvat epäsäännöllisiin muotoihin esimerkiksi eroosion seurauksena (Hussein et al. 2015).



Kuva 7. Lentikulaarisen loukun rakenne. Hiilivetyesiintymän alapuolella esiintyy huokoisempaa kiveä, josta öljy on kohonnut, kohdaten tiiviin, läpäisemättömän kiven (Mukaiillen Hussein et al. 2015).

Lentikulaarisia loukkuja tavataan usein tulva-aldaiden mutakiviin uponneissa jokihiekkasedimenteissä ja suistoalueilla hiekkakivikiiloissa. Samankaltaisia loukkuja esiintyy laajalti myös erilaisissa kalkkikivissä (Hussein et al. 2015).

3.3 Luokittelemattomat öljyloukut

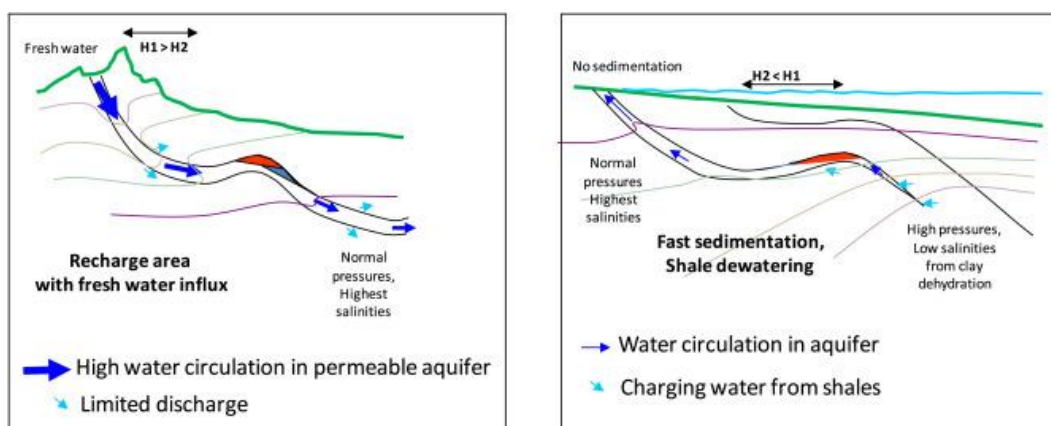
Luokittelemattomat öljyloukut ovat erillinen ryhmä loukkuja, joiden synty ja rakenne ei ole suoraan yhteydessä vain stratigrafisiin tai rakenteellisiin muutoksiin (Selley 1998).

Luokittelemattomista loukkutyypeistä tutkituimpia ovat hydrodynaamiset- ja yhdistelmäloukut (Selley 1998).

3.3.1 Hydrodynaamiset loukut

Hydrodynaamiset öljyloukut ovat merkittävä ryhmä rakenteellisten ja stratigrafisten loukkujen rinnalla, vaikka ne kuuluvatkin luokittelemattomiin loukkuihin. Näissä öljyloukuissa veden liikehdintä on välttämätöntä, sillä se toimii tiivisteinä ja täten estää öljyn sekä kaasun ylöspäin suuntautuvan liikkeen (Selley 1998). Öljy ja kaasu liikkuvat kapillaaripaineen puuttuessa ylöspäin nosteen ohjaamina pitkin kantavia ja läpäiseviä kerroksia (Wendebourg *et al.* 2018). Hydrodynaamisissa loukuissa vesi liikkuu läpäisevissä kerroksissa alaspäin ja näin ollen voi törmätä ylöspäin liikkuvaan öljyyn (Selley 1998). Öljy loukuttuu veden alle muodostaen öljyesiintymän, sillä veden hydrodynaaminen voima on suurempi kuin öljypisaroiden nostevoima (Selley 1998). Selley (1998) mukaan hydrodynaamisissa loukuissa ei esiinny kallioperän stratigrafisista tai rakenteellisista muutoksista aiheutuneita tiivisteitä, jotka vaikuttaisivat öljyn liikkeeseen.

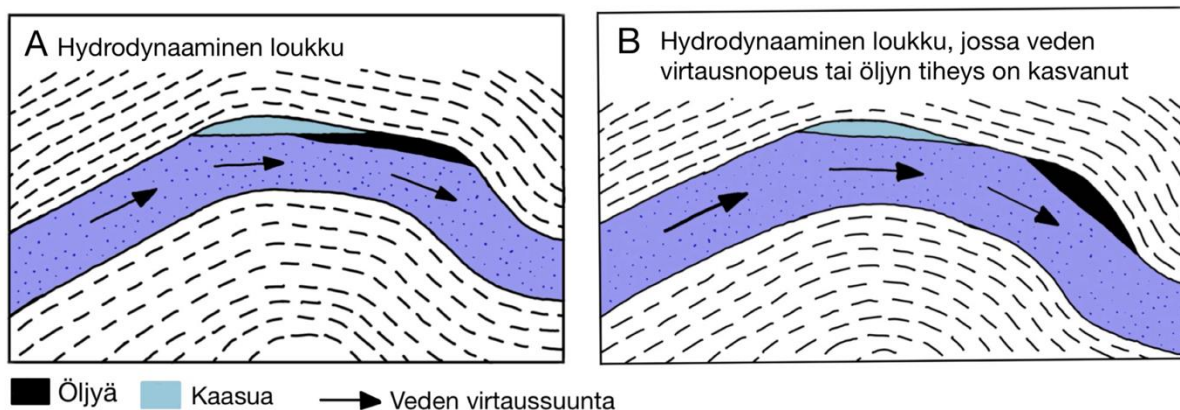
Hydrodynaamisten loukkujen syntyperä määrittyy veden virtausten mukaan (Wendebourg *et al.* 2018). Virtaus on joko sentripetaalista eli painovoiman aiheuttamaa tai sentrifugaalista eli keskipakoisvoimaista (Kuva 8.). Gravitaatioperäiset ja keskipakoisvoimaiset ilmiöt voivat esiintyä samanaikaisesti saman loukun yhteydessä, esimerkiksi Mahakamin suistoalueella Indonesiassa (Wendebourg *et al.* 2018).



Kuva 8. Yksinkertaistettu havainnekuva kahdesta tärkeimmästä hydrodynaamisesta altaasta (punaisella). Hydrodynaaminen loukku, joka on syntynyt alaspäin virtaavan veden vaikutuksesta (vas.) sekä ylöspäin virtaavan veden vaikutuksesta korkean paineen akviferissa (oik.). (Wendebourg *et al.* 2018).

Mikäli merkittäviä kapillaarisia tulopaineita ei ole, painovoima on ainoa nesteiden siirtymistä edistävä voima, jolloin öljy ja kaasu liikkuvat nosteen voimasta ylöspäin (Wendebourg *et al.* 2018). Nostevoima on verrannollinen hiilivetyjen ja veden väliseen tiheyseroon (Wendebourg *et al.* 2018).

Öljyn ja veden kontaktit monissa hydrodynaamisissa öljyloukuissa ovat kallellaan (Kuva 9A.) (Biddle & Wielchowsky 1994). Kontaktipintojen kaltevuus on harvoin yli muutaman asteen,



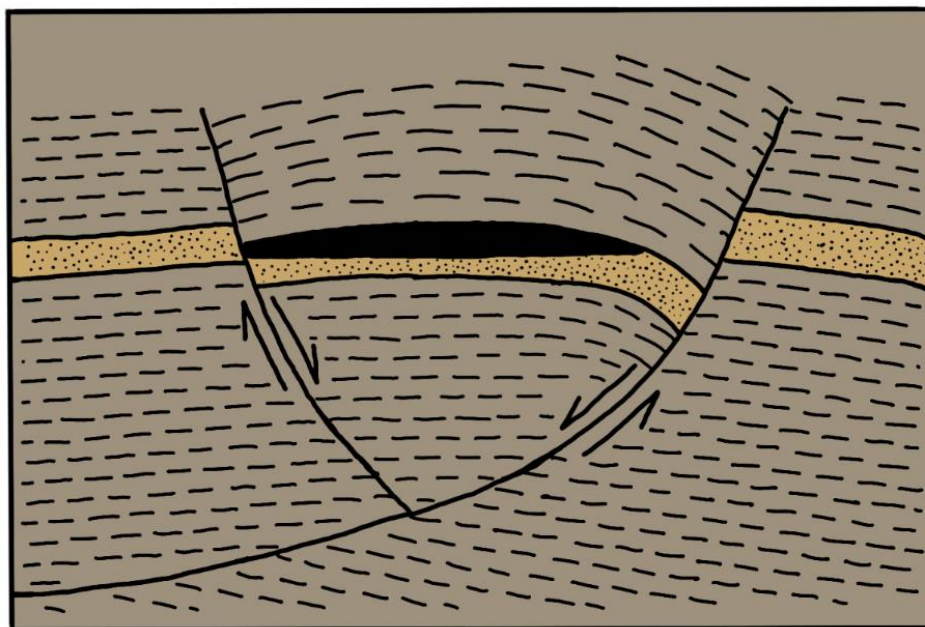
Kuva 9. Hydrodynaaminen loukku kuvassa 9A. Kuvasta 9B nähdään, mitä tapahtuu, kun veden virtausnopeus tai öljyn tiheys kasvaa (Mukaillen Biddle & Wielchowsky 1994).

mutta suurempiakin kaltevuuksia on raportoitu, jopa 10°. Mikäli veden ja öljyn välisen kontaktipinnan kaltevuus ylittää akviferin kyljen kaltevuuden, akviferi huuhtoutuu. Yleisesti mikäli kyljen kaltevuus on yli 5° huuhtoutumisen riski kasvaa (Biddle & Wielchowsky 1994). Mitä pienempi öljyn tiheys ja mitä suurempi veden virtausvoima, sitä helpommin öljy siirtyy pois loukusta. Jos veden virtausnopeus kasvaa öljyn tiheyden pysyessä vakiona tai öljyn tiheys kasvaa veden virtausnopeuden pysyessä vakiona, syntyy kuvan 9B kaltainen tilanne.

3.3.2 Yhdistelmäloukut

Selleyn (1998) mukaan yhdistelmäloukkujen synty ei ole puhtaasti aiheutunut rakenteellista muutoksista, stratigrafiasta tai hydrodynaamisista virtauksista, vaan kahden tai useamman edellä mainitun tekijän yhdistelmästä. Levorsen (1967) rajoitti termin 'yhdistelmäloukku' käyttöä piirteisiin, joissa rakenteellinen tai stratigrafinen elementti ei yksin muodosta loukkuja, mutta molemmat elementit ovat loukun muodostumisen kannalta olennaisia. Käytännössä esimerkiksi rakenteellisessa loukussa voi esiintyä stratigrafisia komponentteja, jotka ovat vaikuttaneet loukun kehitykseen, tai päinvastoin (Vincelette *et al.* 1999). Rakenteellisten ja stratigrafisten muutoksien aiheuttamat loukut ovat yleisin asetelma yhdistelmäloukuissa (Kuva 10.) (Selley 1998). Selleyn (1998) mukaan yhdistelmäloukut, joissa on havaittavissa

hydrodynaamisia vaikutuksia, ovat suhteellisen harvinaisia. Yhdistelmäloukkujen muodostuminen alkaa hiilivetykerrostumien laskeutumisella (Kassem 2017). Loukun rakenteen kehittyminen jatkuu myöhemmin, riippuen geologisesta ympäristöstä, joko tektonisten ja/tai hydrodynaamisten virtauksien vaikutuksesta (Kassem 2017).



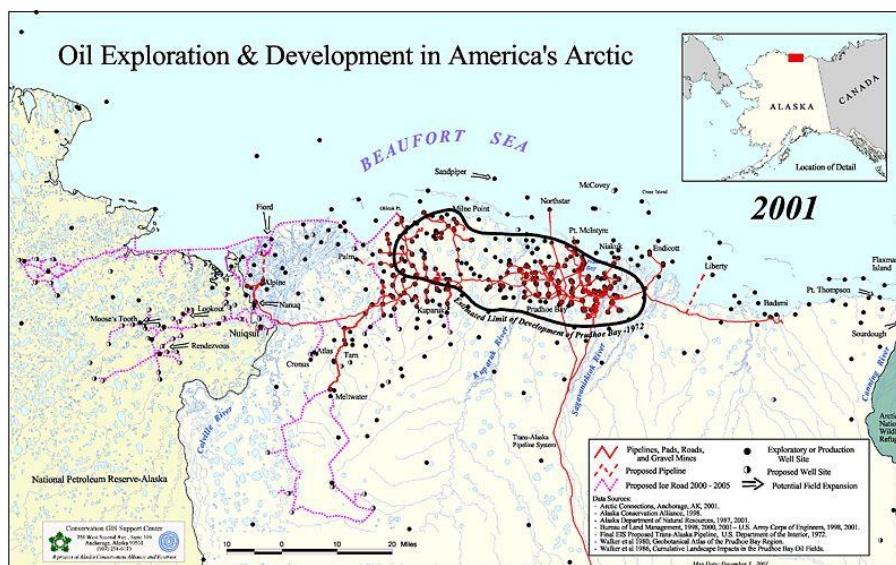
Kuva 10. Mallikuva yhdistelmäloukusta, jossa loukku on muodostunut sekä poimuttumisen että siirrostumisen seurauksesta (Mukaiilen Biddle & Wielchowsky 1994).

4. Tapaustutkimus: The Prudhoe Bay

Prudhoe Bay -öljykenttä on suurin Pohjois-Amerikasta löydetty öljyesiintymä (Morgridge & Smith 1972). Prudhoe Bay -öljykenttä on noin 52 km pitkä ja 19 km leveä alue 2500–2800 m syvyydessä sisältäen noin 2 miljardia barreilia öljyä (Mason et al. 2003). Alkuperäisen öljypatsaan paksuuden arvioitiin olevan 142 m, jonka päällä maakaasua oli noin 122 m (Mason et al. 2003). Prudhoe Bay -öljykenttä on moniulotteinen systeemi, joka on syntynyt poimuttumisen ja siirrostumisen yhteisvaikutuksesta, jolloin se on mainio esimerkki yhdistelmäloukuista (Selley 1998).

4.1 Geologinen tausta

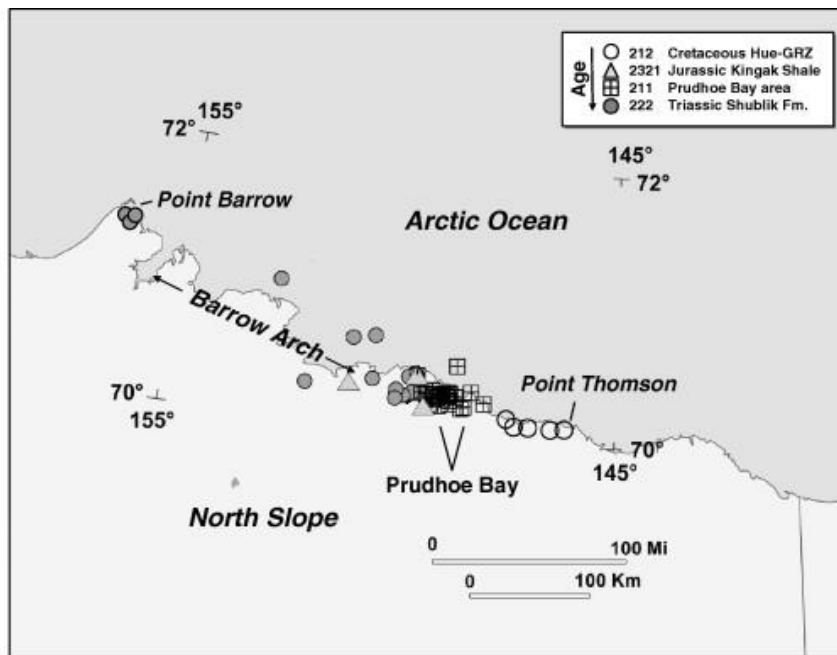
Prudhoe Bay- öljykenttä sijaitsee Alaskan pohjoisrinteillä Barrowin kaarella (Kuva 11.). Barrowin kaari on itä-länsi-suuntainen, liitukauden aikainen antikliini, joka on muodostunut Brooks Range -vuorijonon työntymisestä pohjoiseen (Kuva 12.) (Mason *et al.* 2003). Barrowin kaaren eteläsivu kallistuu loivasti (noin 2°), kun taas pohjoissivu on jyrkempi (Mason *et al.* 2003). Öljykentällä esiintyvät sedimenttisarjat on ajoitettu myöhäiseltä hiilikaudelta varhaiselle liitukaudelle eli 299 Ma- 140 Ma välille (Selley 1998).



Kuva 11. Yleiskuva Prudhoe Bayn alueesta.

Öljyesiintymän päävarasto on fluviaalisessa eli jokisyntyisessä Sadlerochit-hiekkakivessä, joka on ajoitettu triaskaudelle (251–208 Ma) (Selley 1998). Sadlerochit-hiekkakivi on hyvin huokoista, sillä sedimentit ovat kerrostuneet veden virtausten aiheuttamina (Morgridge & Smith 1972; Sweet 2008). Rakenteeltaan Prudhoe Bay on itä-länsi-suuntainen antiklinipoimu, joka

on pohjois-lounaissuunnassa rikkonainen ja idässä epäjatkuvuuspinnan leikkaama (Morgridge & Smith 1972). Alueen sedimenttikerrostumat ovat poimuttuneet antikliinin kärkeen (Selley 1998). Tämä rakenne on myöhemmin siirrostunut koillis-lounais-suuntaisesti, ja sen päälle on kerrostunut liitukautisia liuskeita, jotka toimivat öljyloukun tiivisteinä (Selley 1998). Lisätiivistettä tarjoaa liitukauden siirroksen rinnalla suuret rakoilut rakenteen pohjois- ja lounaispuolella (Selley 1998). Prudhoe Bayn alueella on myös ikerouta-alueita, jotka osaltaan hankaloittavat hiilivetyjen liikkumista (Sweet 2008). Öljyä ja kaasua esiintyy myös esiintymän vanhemmissa kerrostumissa, jotka ovat sijoittuneena idässä olevien epäjatkuvuuspintojen alapuolelle (Selley 1998).



Kuva 12. Barrow'n kaaren varrella, Alaskan pohjoisrinteellä olevat öljyhaarat (4kpl). Nimetty lähdekiven perusteella, lähdekivi on verrannollinen öljyn ikään (Mukaiillen Peters et al. 2008).

Prudhoe Bay -öljykentän todennäköisiä lähdekiviä sisältävät liitukauden klastiset kivet ovat peräisin etelässä sijaitsevan Brooks Range -vuoriston kohoumista. Liitukauden lähdekivien alapuolella oleva epäjatkuvuuspinta katkaisee liitukauden aikaisten varastojen esiintymisalueet Barrowin kaarella (Morgridge & Smith 1972).

Poimuttumisen ja siirrostumisen tuloksena syntyneet loukut ovat siis kaikki yhdistelmäloukkuja, joissa on havaittavissa myös epäjatkuvuuspintoja (Selley 1998). Tällaiset yhdistelmäloukut voidaan tavallisesti löytää seismisten tutkimuksien kautta, sillä etenkin epäjatkuvuuspinnat ovat tavallisesti helposti havaittavissa (Selley 1998).

4.2 Yhteiskunnallinen vaikutus

Prudhoe Bay -öljykentältä kulkee Trans- Alaska öljyputki Alaskan läpi, päättyen sen etelärannikolle. Putken öljy tulee Prudhoe Bay -alueen lisäksi Kuparikin, Alpinen, Endicottin ja Libertyn öljykentiltä. Trans-Alaskan öljyputki on keskeinen energiaverkosto USA:n energiataloudelle, se kuljetti vuonna 2008 noin 110 000 kuutiometriä raakaöljyä päivässä. Vuonna 1972 arvioitiin talteenotettavien varantojen olevan 9.6 miljardia barreilia öljyä ja 26 biljoonaa kuutiometriä kaasua (Mirgrdge & Smith 1972).

Prudhoe Bay -öljykenttä on erittäin tärkeä voimavara Yhdysvalloille ja Alaskan osavaltiolle, sillä se sisältää 16 % Yhdysvaltojen todistetuista öljy- ja kaasuvarannoista. (Raynolds *et al.* 2013). Vuonna 2012 Pohjois-Alaskan öljykenttien öljystä maksetut verot muodostivat yli 90 % Alaskan osavaltion talousarvioista (Raynolds *et al.* 2013). Vuoden 1968 öljylöydön jälkeen syntyi nopeasti laaja infrastruktuuriverkko aiemmin syrjäiselle alueelle, joka johti kehitykseen 2600 neliökilometrin alueella (Raynolds *et al.* 2013).

Öljykentän toiminnan kumulatiivisia vaikutuksia tutkittiin ensimmäisen kerran Prudhoe Bayn alueella 1980- luvulla kartoituksilla, joissa määriteltiin öljykenttien infrastruktuurin suorien ja epäsuorien maisemavaikutusten laajuus (Raynolds *et al.* 2013). Suunnittelemattomia epäsuoria vaikutuksia havaittiin infrastruktuurin lähialueilla, niihin kuuluivat muun muassa tienvarsipöly, infraan liittyvät tulvat ja pinnanläheisen ikiroudan sulaminen (Raynolds *et al.* 2013).

5. Yhteiskunnallinen merkitys

Öljyesiintymien kartoitus ja öljyjalous ovat keskeisiä tekijöitä maailman taloudessa ja politiikassa. Maailman öljy- ja kaasuvarojen kartoitukseen käytettävät menetelmät jaetaan geofysikaalisiin, geokemiallisiin, geologisiin sekä kaukokartoitusmenetelmiin. Öljyn yhteiskunnallinen merkitys on kasvanut 1800-luvulta alkaen, ollen nykypäivänä yksi tärkeimmistä energiantuotantomuodoista (Hsu & Robinson 2017).

5.1 Kartoitus

Tutkimusmenetelmiä öljyn ja kaasun etsintään on useita ja ne voidaan jakaa eri luokkiin käytettyjen tekniikoiden perusteella. Tutkimusmenetelmät luokitellaan geofysikaalisiin, geokemiallisiin ja geologisiin menetelmiin, kaukokartoitukseen, satelliittikuvantamiseen sekä perinteisiin porausmenetelmiin (Hsu & Robinson 2017). Usein öljykenttien kartoituksessa ja tutkimisessa hyödynnetään useampaa menetelmää samanaikaisesti (Hsu & Robinson 2017). Geologisiin ja geokemiallisiin menetelmiin kuuluu näytteiden keruu, kartoitus ja tietojen analysointi (kentältä ja kentällä) (Hsu & Robinson 2017). Niihin sisältyy muun muassa näytteiden käsittelyä ja prosessointia, joiden tavoitteena on tunnistaa kivilajit, mineraalit, rakenteet ja koostumus (Hsu & Robinson 2017). Lopullisena tavoitteena on tuottaa kallioperäkartoja, joista käy ilmi kivilajiyksiköt, niiden alkuperäinen sijainti ja myöhempi muodonmuutos siirrostumisen tai poimuttumisen jälkeen sekä maanpinnan alapuolisten geologisten ominaisuuksien tai piirteiden vaihtelut, kuten sedimenttikerroksien ja kallioperän paksuus (Hsu & Robinson 2017).

Seismiset tutkimukset ovat geofysiikan menetelmä, jossa käytetään räjähteitä tai täristimiä, jonka seurauksena syntyy ääniaaltoja, jotka liikkuvat maan kuorta pitkin (Hsu & Robinson 2017). Takaisin heijastuneet ääniaallot mitataan hydrofoneilla (vedessä) ja geofoneilla (maalla) (Hsu & Robinson 2017). Eri kerrokset erilaisissa geologisissa rakenteissa heijastavat ääntä eri tavalla, jolloin saatu äänidata voidaan muuntaa 2D- tai 3D-muotoon (Onajite 2014). Tyypillisesti seismiset mittaukset tehdään linjoittain, jolloin yhden mittauslinjan tuloksena syntyy poikkileikkaus eli kaksiulotteinen malli (Posamentier *et al.* 2022). Usea vierekkäin toteutettu mittauslinja tuottaa monta vierekkäistä poikkileikkausta, jotka voidaan yhdistää yhdeksi kolmiulotteiseksi malliksi (Posamentier *et al.* 2022). Mallien avulla esitetään

kallioperän rakenteet, joiden kautta voidaan havaita myös mahdolliset öljy- ja kaasuesiintymät (Hsu & Robinson 2017).

Kaukokartoitus käsittää tutkimusmenetelmät, joissa tutkittavasta kohteesta saadaan tietoa ilman, että ollaan fyysisessä kontaktissa itse kohteeseen (Gupta 2018) Mittausanturin etäisyys kohteeseen on yleensä kilometreistä satoihin kilometreihin (Gupta 2018) Välitila on pääasiassa ilmaa, joissain tilanteissa myös osittain tyhjiö, jolloin vain sähkömagneettista säteilyä pystytään hyödyntämään informaation keräämiseen mittauskohteen ja anturin välillä (Gupta 2018). Kaukokartoitus jakautuu kahteen osa-alueeseen, jotka linkittyvät tiiviisti toisiinsa: tekniikkaan, jossa informaatiota kerätään kaukana kohteesta sijaitsevan laitteen avulla ja tietojen analysointiin kohteen fyysisistä ominaisuuksista (Gupta 2018). Satelliittikuvantaminen toimii samalla periaatteella kuin kaukokartoitusmenetelmät, kuitenkin painottuen maan magneettikentän mittaamiseen eri aallonpituuksilla (Gupta 2018).

Öljyesiintymien kartoituksessa ja tutkimisessa hyödynnetään nykypäivänä eniten kiertoporausmenetelmää (eng. rotary drilling) (Selley 1998). Tässä tekniikassa poranterää pyöritetään porajohdoksi kutsutun ontton teräsputken päässä (Selley 1998). Käytössä on monenlaisia poranteriä, yleisin niistä koostuu kolmesta pyörivästä kartiosta, jotka ovat varustettu teräksisillä hampailla (Kuva 13.) (Selley 1998). Kun poraus on edennyt tarpeeksi syvälle, porausreikä vuorataan teräksellä ja teräksen ja porausreiän seinämän väliin asetetaan sementtiä. Öljynporauskaivon keskimääräinen syvyys on noin 1–3 km, mutta poraus voi ulottua jopa 11.5 km syvyyteen.



Kuva 13. Kiertoporausmenetelmässä käytettävä poranterä, joka koostuu kolmesta pyörivästä kartiosta (King 2023).

Porauksen jälkeen loggaajat tallentavat kairasydämistä saatuja tietoja, kuten mudan lämpötilan, huokospaineen ja tiheyden (Selley 1998). Kaasukromatografit seuraavat hiilivetykaasujen esiintymistä mudassa. Tietyin syvyysvälein kerätyt porausjätenäytteet tarkastetaan ultravioletivalolla öljyn esiintymisen varalta, tunnistetaan ja kuvataan (Selley 1998). Yhdellä alueella porataan useasta eri kohdasta ja saadun loggausdatan perusteella voidaan muodostaa kaavioita, joista näkyy millä syvyyksillä hiilivetykaasuja ja öljyä esiintyy (Selley 1998).

5.2 Talous ja tulevaisuus

Öljyä ja maakaasua käytetään yleisimmin fossiilisissa polttoaineissa, joiden kulutus on noussut kiihtyvällä tahdilla aina 1820-luvulta lähtien (Hsu & Robinson 2017). Ihmisten energiankäyttö on kasvanut toisen maailmansodan jälkeen yli 500 %, josta suurin osa on aiheutunut öljyn, kivihiilen ja maakaasun käytöstä (Hsu & Robinson 2017).

Öljyä käytetään raaka-aineena tuhansille kuluttajatuotteille, joilla on hyvin erilaisia käyttötarkoituksia ja fyysisiä olomuotoja, lähtien lääkeaineista ja PVC-putkista päätyen vauvaöljyihin ja liimoihin (Hsu & Robinson 2017). Ilmastomuutoksen jatkuessa öljyteollisuus tulee kohtaamaan haasteita varsinkin, jos öljylle ei pystytä kehittämään käyttökelpoista korviketta (Huang *et al.* 2005). Öljyn tuotanto jakautuu prosesseihin, joista jokainen on altis ilmastonmuutoksen seurauksille (Huang *et al.* 2005).

Öljy mitataan barreleissa, yksi barreli vastaa noin 159 litraa. Vuonna 2017 Yhdysvalloissa 83 % kaikesta käytetystä öljystä kului polttoaineisiin (Hsu & Robinson 2017). Raakaöljyn tuotannolla on valtavat liiketoiminta-alat maailmanlaajuisesti, vuonna 2017 markkina-arvoltaan yhdeksän maailman 30. suurimmasta julkisesta suuryrityksestä olivat öljy- ja kaasuyhtiöitä (Hsu & Robinson 2017). Öljy-yhtiö BP:n (2016) tutkimusten mukaan raakaöljyä on käytettävissä vielä seuraavat 52 vuotta, maakaasua 54 vuotta ja kivihiiltä 110 vuotta. Fenton *et al.* (1981) arvioi, että kerogeenipitoisten liuskekivien tunnetuista varastoista voitaisiin saada talteen 1.3 biljoonaa barreliä öljyä, jota voitaisiin hyödyntää energianlähteenä. Tämä toisi arvoilta 40 vuotta lisää käyttöaikaa, jolloin raakaöljy loppuisi 92 vuoden kuluttua.

Selleyn (1998) mukaan loukkujen kehittymisen ajankohta ja öljyn siirtyminen loukkuun vaikuttaa öljyn hyödyntämismahdollisuuksiin. Mikäli loukku on syntynyt ennen öljyn siirtymistä, loukuista pystyy helposti pumppaamaan öljyä energiankäyttöön. Vastaavasti, jos

loukku on syntynyt öljyesiintymän ympärille vasta öljyn siirtymän jälkeen, öljyä ei voida hyödyntää yhtä tehokkaasti energiankäytössä nykyisillä menetelmillä.

5 Johtopäätökset

Öljyloukut ovat geologisia muodostumia, joissa öljy ja kaasu kerääntyvät maanalaisiin varastoihin, joista se pystytään keräämään ja hyödyntämään kaupallisesti. Öljyloukkujen ymmärtäminen ja niiden luokittelu on keskeistä öljyteollisuudessa, sillä se auttaa löytämään ja hyödyntämään hiilivetyvarastoja tehokkaasti. Öljyloukut voidaan jakaa useaan luokkaan perustuen niiden geologisiin ominaisuuksiin ja muodostumisprosesseihin. Teollinen luokittelu jakaa öljyloukut rakenteellisiin ja stratigrafisiin loukkuihin.

Rakenteelliset loukut ovat tunnetuin pääryhmä, jotka muodostuvat tektonisten liikkeiden ja painovoiman vaikutuksesta. Antikliiniloukku on tyypillisin rakenteellinen loukku, jossa hiilivedyt ovat varastoituneena poimun (antikliinin) sisälle. Myös siirroksien yhteydessä esiintyvät loukut sekä diapiiriloukut kuuluvat tähän rakenteellisten loukkujen ryhmään.

Stratigrafiset loukut syntyvät hiilivetyesiintymien muodostumisen kanssa samanaikaisesti. Stratigrafisiin loukkuihin luetaan pinch-out-loukut sekä lentikulaariset loukut. Loukun muodostuminen liittyy kiven stratigrafian ja/tai kivilajin vaihteluun.

Rakenteellisten ja stratigrafisten loukkujen lisäksi on olemassa öljyloukkuja, joita ei voida suoraan lukea kumpaankaan ryhmään ominaisuuksien tai syntyvän perusteella. Näihin luokittelemattomiin loukkuihin kuuluu hydrodynaamiset- sekä yhdistelmäloukut. Hydrodynaamisissa loukuissa vesi toimii öljyä loukuttavana tiivisteenä. Yhdistelmäloukuissa öljyloukun muodostumiseen on vaikuttanut useampi voima, kuten stratigrafiset tai rakenteelliset muutokset ja hydrodynaamiset virtaukset.

Öljyloukkujen luokittelu ja niiden geologisten ominaisuuksien ymmärtäminen on kriittistä uusien öljy- ja kaasukenttien kartoittamisessa ja kehittämisessä. Erityyppisten öljyloukkujen tunnistaminen auttaa arvioimaan öljykenttien taloudellista potentiaalia ja suunnittelemaan tehokkaita tuotantostrategioita. Tietämys öljyloukkujen rakenteesta ja sijainnista on tärkeää myös ympäristöriskien hallinnassa ja minimoimisessa öljynporaustoiminnan aikana.

Lähteet

- Aminzadeh, F., Dasgupta, S.N. (2013) ‘Fundamentals of Petroleum Geology’, *Developments in Petroleum Science*, 60, pp. 15–36. doi:10.1016/b978-0-444-50662-7.00002-0.
- Biddle, K.T., Wielchowsky, C.C. (1994) ‘Hydrocarbon traps’, *The Petroleum System—From Source to Trap*, pp. 219–236. doi:10.1306/m60585c13.
- Dickens, C.R., O’Neil, J.R., Rea, D.K., Owen; R.M. (1995) *Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of Paleocene*. *Paleoceanography* 10, 965- 971.
- Fenton, D.M., Hennig, H., Richardson, R.L. (1981) *The chemistry of shale oil and its refined products*. ACS Symposium series, s. 102-109
- Gupta, R.P. (2018) *Remote Sensing Geology*. 3rd edn. Berlin, Germany: Springer.
- Harding, T.P., Lowell, J.D. (1979) *Structural styles, their plate-tectonic habitats, and hydrocarbon traps in petroleum provinces*. AAPG Bull. 63, s. 1016-1058
- Hedberg, H.D. (2019) *Geologic Aspects of Origin of Petroleum*. AAPG Bulletin 48: 1755-1803. Linkki <https://doi.org/10.1306/BC743DB7-16BE-11D7-8645000102C1865D>
- Hsu, C. S. & Robinson, P. R. (2017) *Springer handbook of petroleum technology*. Cham, Switzerland: Springer.
- Huang, Y.F., Huang, G.H., Hu, Z.Y., Maqsood, I., Chakma, A. (2005) *Development of an expert system for tackling the public’s perception to climate-change impacts on petroleum industry*. *Expert Systems with Applications*, Volume 29, Issue 4, s. 817-829
- Hussein, A.-A., Mohamed, A. and Mohamed, F. (2015) *Petroleum and Gas Field Processing* [Preprint]. 2nd edition doi:10.1201/9780429021350
- Kassem, Y. (2017) *Petroleum traps part 2, AONG website*. Edited by R. Al-Obaidi. Available at: <https://www.arab-oil-naturalgas.com/> (Katsottu: 30 March 2024).
- King, G. (2023) *The Rotary System, Introduction to Petroleum and Natural Gas Engineering*. The Pennsylvania State University.
- Levorsen, A.I. (1967) *Geology of petroleum*. San Francisco: W.H. Freeman.
- Mason, E. P., Bastian M. J., Detomo R., Hashem M N., Hildebradt, A. J. (2003) *Horizontal Wells: Focus on the Reservoir, Methods in Exploration* No. 14, Results and conclusions of a horizontal-drilling program at South Pass 62 salt-dome field
- Morgridge, D.L., Smith, W.B. (1972) ‘*Geology and discovery of Prudhoe Bay Field, Eastern Arctic Slope, Alaska*’, *Stratigraphic Oil and Gas Fields—Classification, Exploration Methods, and Case Histories* [Preprint]. doi:10.1306/m16371c36.

- Onajite, E. (2014) *Seismic data analysis techniques in hydrocarbon exploration*. Amsterdam: Elsevier.
- Posamentier, H. W., Victorien P., and Lang, S. C. (2022), “*Principles of Seismic Stratigraphy and Seismic Geomorphology I: Extracting Geologic Insights from Seismic Data.*” *Earthscience reviews* 228: 103963-. Web.
- Raynolds, M. K., Walker, D. A., Ambrosius, K. J., Brown, J., Everett, K. R., Kanevskiy, M., Kofinas, G. P., Romanovsky, V. E., Shur, Y., Webber, P. J. (2013), “*Cumulative geoecological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska*” *Global Change Biology*, Volume 20, Issue 4
<https://doi.org/10.1111/gcb.12500>
- Selley, R.C. (1998) *Elements of petroleum geology*. Second. San Diego etc.: Academic Press.
- Shaymaa, M.J., Handhal, A.M. (2019) *Vol 5, Identification of Heavy Oil (Tar Mats) Deposits and Forming Mechanism in the Main Pay of the Zubair Formation in North Rumaila Oil Field, Southern Iraq*. publication. Basrah: IJMS, pp. 1–10.
<https://www.arcjournals.org/pdfs/ijms/v5-i1/1.pdf>
- Sweet, J. M. (2008) *Discovery at Prudhoe Bay: Oil*. Blaine, Hancock House, Surrey
- Tiratsoo, E. N. (1952). *Petroleum Geology*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Tissot, B.P., Welte, D.H. (1978) *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer- Verlag, Berlin
- Vincelette, R. R., Beaumont, E. A., Foster, N. H. (1999). *Treatise in Petroleum Geology, Classification of exploration traps*, AAPG Special Volumes
- Wendebourg, J., Biteau, J.-J., Grosjean, Y. (2018) ‘*Hydrodynamics and hydrocarbon trapping: Concepts, pitfalls and insights from case studies*’, *Marine and Petroleum Geology*, 96, pp. 190–201. doi:10.1016/j.marpetgeo.2018.05.015.