



**TURUN
YLIOPISTO**

Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhykkeen tektoniikka ja hydroterminen aktiivisuus

Laura Suvanto

Geologia
LuK-tutkielma
Laajuus: 7 op

19.03.2026
Turku

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

LuK-tutkielma

Pääaine: Geologia

Tekijä: Laura Suvanto

Otsikko: Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhykkeen tektoniikka ja hydroterminen aktiivisuus

Ohjaaja: Eemi Ruuska

Sivumäärä: 22 sivua

Päivämäärä: 19.03.2026

Yksi maailman aktiivisimmista mannerreunuksista sijaitsee Etelä-Amerikan läntisellä kyljellä. Mannerreunusta hallitsee Andien vuoristo. Andit ovat topografialtaan monimuotoinen orogenia, jonka vuoksi vuoristo voidaan jakaa pohjois-, keski- ja eteläosaan. Pohjoisosissa orogenian syntyyn ovat vaikuttaneet Etelä-Amerikan, Karibian sekä Nazcan litosfäärilaattojen liikehdintä, jossa deformaatio on syntynyt käänteis- ja kulkusiiirroksista. Keski- ja Etelä-Andit ovat syntyneet Nazcan laatan alityöntyessä Etelä-Amerikan mannerreunuksen alle. Vaikka Keski- ja Etelä-Andit ovat syntyneet Chilen alueella saman prosessin tuloksena, ne ovat muodostuneet kahdeksi hyvin erilaiseksi orogeniaksi.

Keski-Andit ovat malliesimerkki alityöntön seurauksena syntyneestä orogeniasta, jolloin kuori on paksuuntunut ja lyhentynyt. Etelä-Andeilla kuori ei ole paksuuntunut merkittävästi, sillä suurin osa deformaatiosta on keskittynyt Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhykkeen vaakasuuntaiseen liikehdintään. Liquiñe-Ofqui on 1200 kilometriä pitkä oikeakätinen kulkusiiirrosvyöhyke, joka sijaitsee eteläisen Chilen alueella. Siirrosvyöhyke kulkee Etelä-Andien vulkaanisen kaaren päällä alkaen Liquiñesta ja jatkuen Chilen kolmoispiisteeseen asti.

Liquiñe-Ofqui voidaan jakaa pohjois- ja eteläosaan, joissa merkittävimmät rakenteet muodostuvat kolmesta erityyppisestä osasiirrosryhmästä. Ensimmäisessä ryhmässä on kaksi suoraa pohjoiskoillisen suuntaista osasiirrosta, jotka jatkuvat satoja kilometrejä. Toiseen ryhmään kuuluu vähintään neljä koillisen suuntaista en echelon-rakennetta, jotka yhdistävät ensimmäisen ryhmän osasiirrokset toisiinsa. Ensimmäisen ja toisen ryhmän osasiirrokset muodostavat yhdessä ekstensionaalisen dupleksin. Kolmanteen ryhmään kuuluu kolme satojen kilometrien pituisia kaarevaa osasiirrosta, joiden kulku on luoteesta lounaaseen.

Hydroterminen muuttuminen lisää kallioperän vedenläpäisevyyttä, mutta vedenläpäisevyys vaatii myös huokoisuutta ja linkittyneitä huokostiloja. Pohjoisosissa kallioperässä on nähtävissä kuumien fluidien purkautumista kuumina lähteinä, jotka muodostavat geotermisesti aktiivisia alueita. Hydrotermistä muuttumista ja vedenläpäisevyyttä mittaamalla voidaan tutkia alueen geotermisen energian hyödyntämistä.

Avainsanat: Andien vuoristo, tektoniikka, Chile, Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhyke, vulkanismi, hydroterminen muuttuminen, geotermisen aktiivisuus, geotermisen energia

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	1
2	Andien tektoninen kehitys.....	2
3	Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhyke.....	5
3.1	Pohjoisosa.....	7
3.2	Eteläosa.....	9
3.3	Liquiñe-Ofqui ja Etelä-Andien vulkaaninen kaari	11
4	Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhykkeen hydroterminen aktiivisuus	13
5	Yhteenveto.....	15
	Lähteet	17

1 Johdanto

Etelä-Amerikassa sijaitsee nuori ja geologialtaan monimuotoinen Andien vuoristo. Andien vuoristo kattaa koko Etelä-Amerikan maanosan läntisen kyljen noin 9000 kilometrin matkalta (Taboada et al. 2000) ja se on klassinen esimerkki alityönnön seurauksena syntyneestä orogeniasta (Haschke et al. 2006). Merellinen Nazcan litosfäärilaatta painuu vinossa kulmassa Etelä-Amerikan laatan mantereisen kuoren alle synnyttäen erilaisia magmaattisia ja tektonisia prosesseja (Hervé 1994).

Andit voidaan jakaa erilaisten orogenioiden perusteella kolmeen osaan; pohjoiseen, keskiseen ja eteläiseen. Pohjois-Andien orogenia koostuu pohjoisen ja koillisen suuntaisista vuoriketjuista sekä isoista käänteis- ja kulkusiiroksista (Taboada et al. 2000). Keski- ja Etelä-Andien orogeniat poikkeavat toisistaan merkittävästi, sillä Keski-Andien orogenia on paksumpi Etelä-Andeihin verrattuna (Haschke et al. 2006). Sekä Keski- että Etelä-Andien orogenioissa esiintyy kuitenkin merkkejä samanaikaisesta, ainakin 200 miljoonaa vuotta kestäneestä magmaattisesta aktiivisuudesta (Haschke et al. 2006). Etelä-Andien eteläosan kallioperää hallitsee graniittinen batoliittivyöhyke, joka ei esiinny jatkuvana vyöhykkeenä pohjoisempana (Ramos and Ghiglione 2008).

Pohjois-Patagonian Batoliittivyöhykkeen läpi kulkee 1200 kilometriä pitkä Liquiñe-Ofqui siirrosvyöhyke (Cembrano et al. 2000), joka ulottuu Liquiñesta etelään Chilen kolmoispisteeseen asti (Hervé 1994). Liquiñe-Ofqui on oikeakätinen kulkusiiros, joka on ollut aktiivinen ainakin eoseenikaudesta asti (Hervé 1994). Siirrosvyöhyke voidaan jakaa maantieteellisesti pohjois- ja eteläosaan sen erilaisten rakenteellisten piirteiden perusteella. Cembrano et al. (1996) mukaan siirrosvyöhykkeen pohjois- ja eteläosasta löytyy kolme erilaista osasiirrosryhmää. Kokonaisuudessaan Liquiñe-Ofqui sijaitsee Andeilla välillä 39°S - 47°S (Cembrano et al. 1996; Rosenau et al. 2006).

Liquiñe-Ofqui sijaitsee Etelä-Andien vulkaanisen kaaren päällä (Cembrano et al. 2000) ja siirrosvyöhykkeen läheisyydessä sijaitsee useita tulivuoria (De Pascale et al. 2021). Liquiñe-Ofqui muodostuu useista linkittyneistä osasiirroksista, jotka lisäävät kallioperän

huokoisuutta, mutta hyvä vedenläpäisevyys siirrosvyöhykkeillä riippuu linkittyneiden rakojen lisäksi kivilajin vedenläpäisevyydestä (Faulkner et al. 2010).

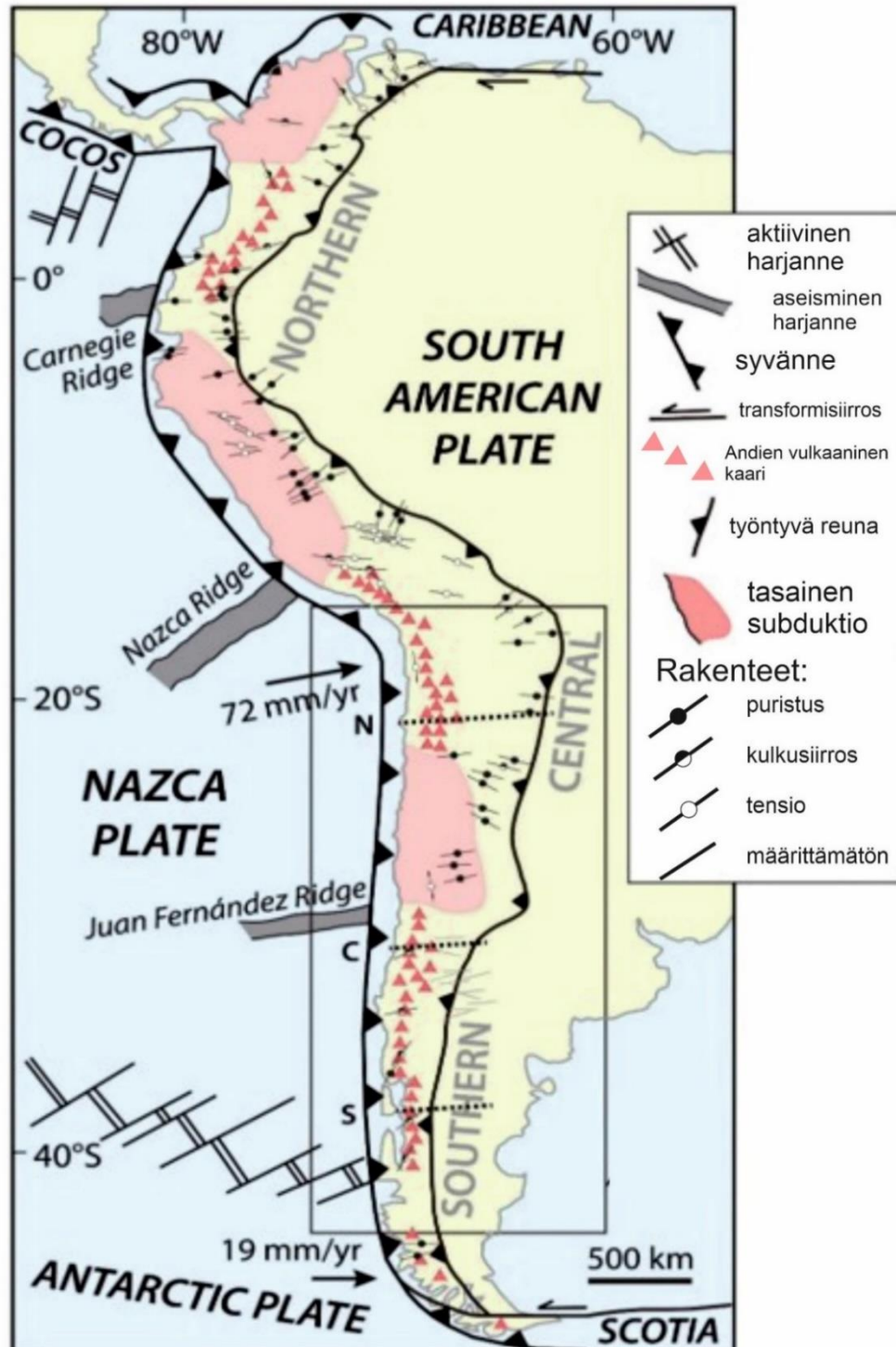
Hyvin linkittyneiden huokostilojen vuoksi Liquiñe-Ofquín siirrosvyöhyke kontrolloi Etelä-Andien vulkaanisen kaaren magmaattisen aktiivisuuden lisäksi myös sen hydrotermistä aktiivisuutta (Sanchez-Alfaro et al. 2016). Carbajal-Martinez et al. (2025) mukaan siirrosvyöhykkeiden hydrotermisesti muuttuneiden kivien huokoisuus on suurempi ja huokostilat ovat selkeästi linkittyneempiä verrattuna muuttumattomiin kiviin siirrosvyöhykkeen ulkopuolella. Linkittyneet huokostilat ja raot muodostavat syvälle kallioperään ulottuvia käytäviä, joissa vesi kuumenee konduktiolla ja reagoi kiven kanssa (Sánchez et al. 2013). Kuuma vesi purkautuu siirrosvyöhykkeen alueella maan pinnalle muodostaen geotermisesti aktiivisia alueita (Sánchez et al. 2013).

2 Andien tektoninen kehitys

Andien vuoristo (Kuva 1) on nuori orogeniavyöhyke, jonka topografia mataloituu ja kuori ohenee kohti etelää (Hervé 1994). Se on kehittynyt tektonisesti ja magmaattisesti aktiivisessa ympäristössä, jossa vuoriston muodostumiseen ovat vaikuttaneet Etelä-Amerikan mannerreunus, Karibian-laatta, subduktoituva merellinen Nazca-laatta sekä Antarktiksella laatta. Vuoristo voidaan jakaa erilaisten orogenioiden perusteella kolmeen osaan: Pohjois-, Keski- ja Etelä-Andeihin (Kuva 1).

Pohjois-Andit sijaitsevat Kolumbian, Venezuelan ja Ecuadorin alueella, jossa niiden kehitykseen ja deformaatioon ovat vaikuttaneet Etelä-Amerikan, Karibian ja Nazcan laattojen liikkeet (Taboada et al. 2000). Kokonaisuudessaan Pohjois-Andien deformaatio on käänteis- ja kulkusiirroksien aiheuttamaa (Taboada et al. 2000). Ecuadorin alueella on kaksi mannerreunan suuntaista vuorijonoa, joita rajaavat kummassakin päädyssä

käänteissiirrokset (Taboada et al. 2000). Venezuelassa sijaitsevat kulkusiirosvyöhykkeet ovat transpressiivisiä (Taboada et al. 2000), joissa hierto ja puristusliike ovat aiheuttaneet kuoren paksuuntumista. Muualla Andeilla esiintyy kulkusiirosten yhteydessä myös transtensiota, jolloin venytyksen ja hierron seurauksena kuori ohenee.



Kuva 1. Andien vuoristo ja sen tektoniset rakenteet. Muokattu Horton (2018) mukaan.

Keski- ja Etelä-Andit ovat muodostuneet, kun Nazcan laatta on subduktoitunut Etelä-Amerikan mannerreunan alle ja muodostanut kaksi hyvin erilaista orogeniaa Chilen alueelle (Haschke et al. 2006). Keski-Andit antavat esimerkillisen kuvan Andien vuoriston magmaattisesta kehityksestä, jolle tyypillistä on lyhentynyt ja paksuuntunut orogenia sekä magmaattinen kaarisysteemi (Haschke et al. 2006). Alueella on neljä pohjois-etelä suuntaista magmaattista kaarta, joista vanhin on rannikolla ja nuorin sisämaassa (Haschke et al. 2006). Vanhin magmaattinen kaari on muodostunut jurakaudella (195–130 Ma). Toiseksi vanhimmassa keskiliitukaudella muodostuneessa kaareissa on merkkejä transpression aiheuttamasta kuoren lyhenemisestä. Kolmas kaari on muodostunut liitukauden lopulla (78–37 Ma), kun taas nuorin kaari on alkanut muodostua neogeenikaudella (26 Ma). Nuorin magmaattinen kaari joutui mioseenikaudella puristukseen, jolloin jo valmiiksi paksuuntuneessa kuoressa tapahtui lisää lyhenemistä (Haschke et al. 2006). Puristus oli lähes kohtisuoraa kaareen nähden ja 49–36 Ma sitten puristus nopeutui aiheuttaen transpressiota sekä kuoren paksuuntumista (Haschke et al. 2006). Jokaista Andien transtensionaalista ja transpressionaalista jaksoa on seurannut suuri kaaren sisäinen kulkusiiroostuminen (Haschke et al. 2006).

Andien eteläosa kehittyi meso- ja kenotsooisten kausien aikana, kun Nazcan laatan merellinen kuori subduktoitui Etelä-Amerikan litosfäärilaatan alle (Hervé 1994). Subduktion seurauksena syntyi magmaattinen kaari sekä lyhytikäinen kaarentausta-allas, jotka hautasivat alleen paleotsooisen akkreetioprisman (Hervé 1994). Nazcan laatan subduktiokulma pysyi jurakaudesta mioseenikaudelle lähes samana (Hervé 1994). Etelä-Andeilla ei ole todisteita kuoren paksuuntumisesta 200–90 Ma välillä, mutta 90–70 Ma sitten hautavajoaman vetäytymisen seurauksena kaari leveni 150 kilometristä 350 kilometriin (Haschke et al. 2006). Etelä-Andit eroavat Keski-Andeista myös kivilajeiltaan, sillä eteläiset Andit ovat peittyneet koko matkaltaan Pohjois-Patagonian batoliittiin (Hervé 1994; Ramos and Ghiglione 2008). Pohjois-Patagonian batoliitti on kalkkialkalista ja sitä on syntynyt jurakaudesta alkaen aina neogeenikaudelle asti (Hervé 1994). Valtaosa batoliitin kivistä on tonaliittia ja granodioriittia, mutta kivilajit vaihtelevat gabbrosta monzograniittiin (Hervé 1994).

Mesotsooisella kaudella alkanut ja nykyäänkin jatkuva subduktioprosessi on johtanut mannerreunuksen deformaatioon, mutta poiketen Andien keskiosista sen eteläosien kuori ei ole paksuuntunut merkittävästi (Hervé 1994). Etelä-Andeilla subduktion aiheuttama

kuoren paksuuntuminen on ollut vähäistä ja deformaatio näkyy Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhykkeen vaakasuuntaisena liikkeenä (Hervé 1994). Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhyke (Kuva 2) on yksi eteläisten Andien merkittävimpiä piirteitä sekä yksi Chilen päälineamenteista (Lavenu and Cembrano 1999).

3 Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhyke

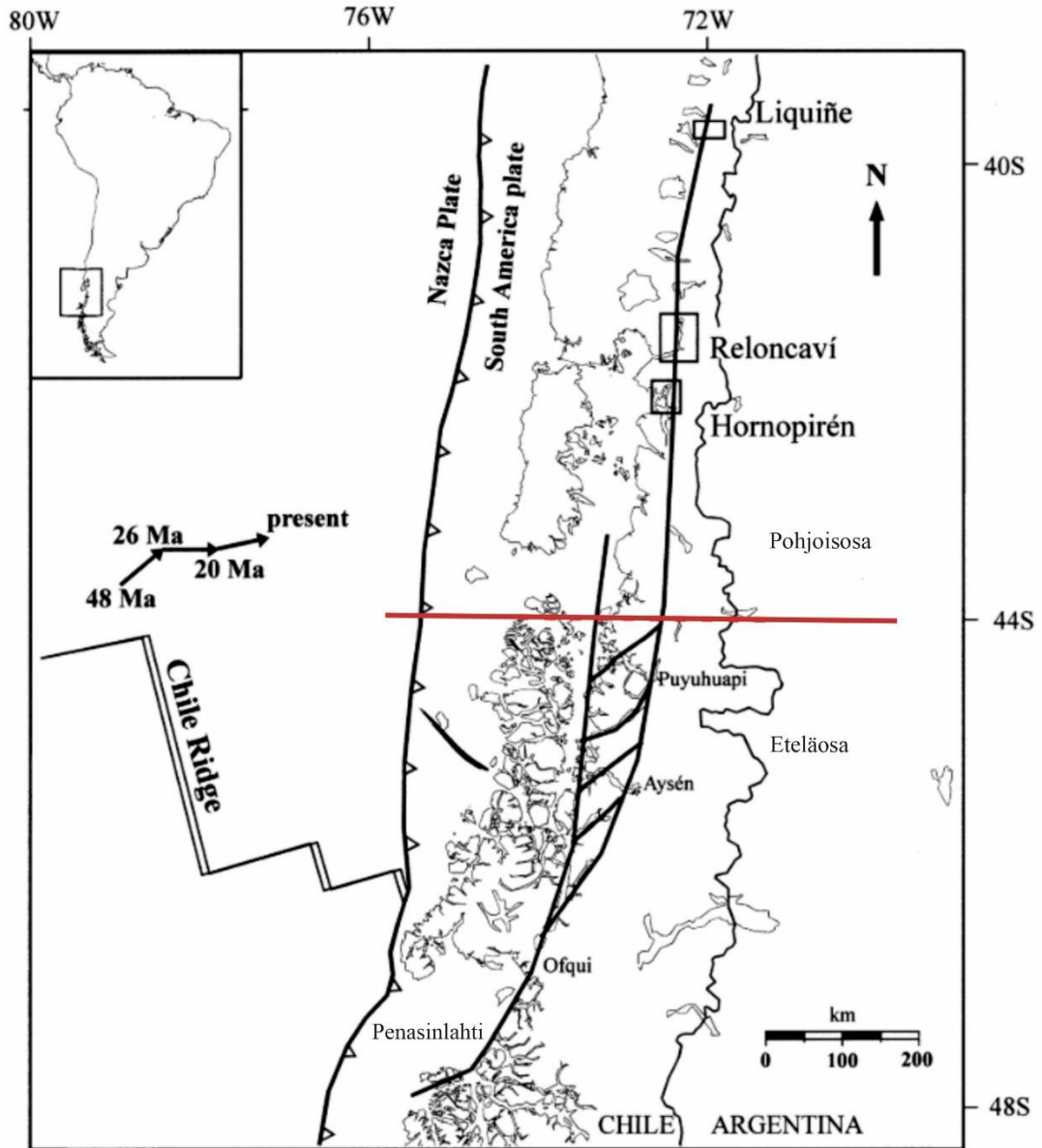
Liquiñe-Ofqui eli LOFZ on Chilen kolmoispisteestä, Ofquin kannaksesta (Kuva 2), 1200 kilometriä pitkä pohjoiseen Liquiñeen jatkuva oikeakätinen eli dekstraali kulkusirrosvyöhyke (Cembrano et al. 1996). LOFZ on syntynyt vuorottelevien transpressionaalisen ja transtensionaalisen tektonisen kulkusirrosympäristön seurauksena (Cembrano et al. 1996). LOFZ:n ajatellaan nykypäivänä olevan kuitenkin transpressionaalisen kulkusirrosvyöhykkeenä (Villalobos et al. 2020). Siirrosvyöhykkeen avulla pyritään tutkimaan Nazcan ja Etelä-Amerikan litosfäärilaattojen liikkeitä sekä vaaka- ja pystysuuntaisia siirtymiä mannerreunalla (Cembrano et al. 1996). Vaikka LOFZ:ia pidetään kulkusirroksena, suuria vaakasuuntaisia siirtymiä ei ole pystytty löytämään edes Chilen kolmoispisteen läheisyydestä (Lara et al. 2008).

Kvartäärikaudesta alkaen LOFZ:in siirrosvyöhykkeen maksimijännitys eli σ_1 on pysynyt koillisen suuntaisena, mutta pystysuora jännitys on vaihtelevasti joko σ_2 , jolloin kyseessä on kulkusirros, tai σ_3 , jolloin tektoninen ympäristö on kompressionaalinen (Lara et al. 2008). LOFZ:in pohjoisosissa minimi kompressionaalinen stressi σ_3 on pääasiassa luoteen suuntainen ja lähes vaakasuora, joka kertoo kvartäärikauden aikaisesta oikeakätisestä kulkusirrosten aiheuttamasta deformaatiosta (Cembrano and Lara 2009). Etelässä σ_3 muuttuu siirrosvyöhykkeellä pystysuoraksi, joka kertoo deformaation muuttuneen kompressionaaliseksi. LOFZ:issa kompressionaalinen tektoninen ympäristö näkyy selkeästi pääosasiirroksiin rajoittuvien, pystysuuntaisesti siirrostuneiden lohkojen välillä (Lara et al. 2008). Transtensionaalinen tektoninen ympäristö esiintyy LOFZ:in molemmissa päädyissä normaalisiirroksina.

LOFZ on kaaren sisäinen kulkusiirossysteemi, sillä se kulkee Etelä-Andien magmaattisen kaaren päällä sen suuntaisesti (Cembrano et al. 2000). Ylityöntövyöhykkeellä syntyy magmaattinen kaari, jonka mantereen puolella esiintyy ylityöntöpoimutusta jatkuvan puristuksen, muodonmuutoksen ja etenevän deformaation seurauksena. Ylityöntöpoimutuksessa syntyy aluksi uusia poimuja sekä työntösiirroksia, minkä jälkeen vanhemmat poimut alkavat kaatua toistensa päälle. LOFZ ja magmaattinen kaari eroavat Andien muista osista, sillä siirrosvyöhykkeen ja kaaren mantereiselle puolelle ei ole syntynyt ylityöntövyöhykkeelle tyypillistä magmaattisen kaaren takaista ylityöntöpoimutusta (Hervé 1994). LOFZ:in ja magmaattisen kaaren tilanteessa ylityöntöpoimutuksen puute johtuu siitä, että nämä alueet ovat ottaneet vastaan suurimman osan muodonmuutoksesta ja deformaatiosta (Hervé 1994).

LOFZ:in on tulkittu syntyneen jo mesotsooisella maailmankaudella samaan aikaan magmaattisen kaaren kanssa ja LOFZ:in pohjoisosien varhaisoligoseenikauden myloniiteissa liike näyttäisi silloin olleen vasenkätistä, kuten muissakin Andien siirrosvyöhykkeissä (Cembrano et al. 1996). Sedimenttikivet LOFZ:in länsipuolella olevassa erkanemisen synnyttämässä altaassa todistavat kuitenkin, että LOFZ on varmasti ollut aktiivinen ainakin eoseenikaudesta asti (Hervé 1994). LOFZ toimii myös rajana Pohjois-Patagonian batoliitin granitoidien ja Liquiñen metamorfisen kompleksin gneissien välillä (Daniele et al. 2020).

Kokonaisuudessaan LOFZ muodostuu kolmesta erityyppisestä ryhmästä linkittyneitä osasiirroksia, joista merkittävimpinä pidetään kahta oikeakätistä, satoja kilometrejä pitkää pohjoiskoillisen suuntaista osasiirrosta (Cembrano et al. 1996; Cembrano et al. 2000; Hernandez-Moreno et al. 2014; Pérez-Flores et al. 2016). LOFZ voidaan jakaa erilaisten rakenteiden perusteella pohjois- ja eteläosaan (Kuva 2).



Kuva 2. Liquiñe-Ofquiin siirrosvyöhyke. Muokattu Cembrano et al. (2000) mukaan.

3.1 Pohjoisosa

LOFZ:in merkittävimmät osasiirrokset alkavat 39°S kohdalta ja jatkuvat 42°S asti, kunnes 44°S ne ovat siirrostuneet oikealle ja jatkuvat siitä vielä etelään 47°S asti (Kuva 2) (Cembrano et al. 1996). Liquiñen alueella (Kuva 2) koillisen suuntaisista osasiirroksista on löydetty hevosenhäntärakenne, joka haarautuu itää kohti (Roquer et al. 2017). Liquiñessa aivan LOFZ:in pohjoispäädyssä hauras ja deformatunut Liquiñen

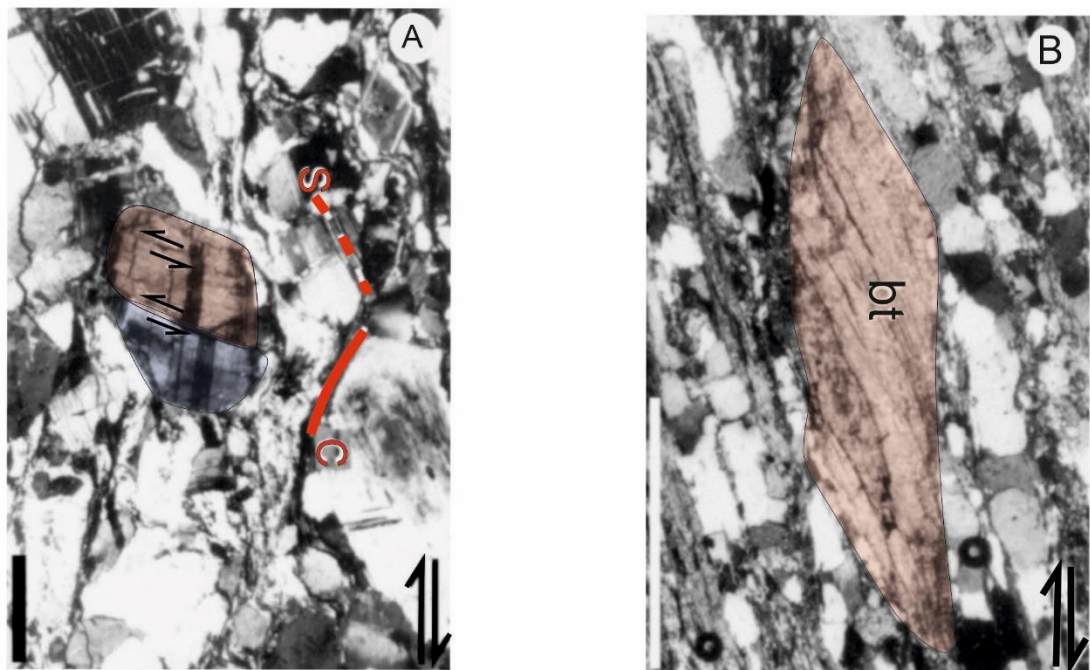
granitoidi on terävässä kontaktissa korkean asteen muodonmuutoksen läpikäyneiden myloniittien kanssa (Cembrano et al. 2000). Liquiänen alueella kallioperästä löytyneitä kinemaattisia indikaattoreita ovat esimerkiksi sigmaklastit, deltaklastit ja S/C rakenteet, joilla on kaikilla vasenkätinen geometria. (Cembrano et al. 2000).

Liquiänen granitoidissa hauras deformaatio näkyy pohjoiskoillisen suuntaisina rakoina ja siirroksina (Cembrano et al. 2000). Osa siirroksista on korkean kulman käännteissirroksia ja osassa on nähtävissä pieniä Riedel-rakoja, jotka indikoivat vasen- ja oikeakätistä liikettä. Cembrano et al. (2000), mukaan Liquiänen alueelta on vaikea tehdä tarkkaa kinemaattista analyysia keskikokoisten siirrostien rajallisuuden ja siirrostien epäsäännöllisyyden vuoksi.

Reloncavin alueella (Kuva 2) duktiilia deformaatiota on vain vähän, mutta hauras deformaatio on merkittävää (Cembrano et al. 2000). Reloncavin alueelta on löydetty kaksi siirrosryhmää. (Cembrano et al. 2000). Ensimmäisessä ryhmässä on siirroksia, joiden pääkomponenttina on kulkusiirros, mutta joukossa on myös muutama vinosiirros. Siirroksilla, joiden kulkusuunta on luoteen ja koillisen välillä, on oikeakätinen siirrossuunta ja noin idän suuntaisilla kulkusiirroksilla vasenkätinen siirrossuunta (Cembrano et al. 2000). Lisäksi ryhmään kuuluu luoteen suuntaisia vinoja käännteissirroksia. Kokonaisuudessaan ryhmää hallitsee pohjoiskoillisen suuntainen, oikeakätinen kulkusiirrosympäristö sekä deformaatiovyöhyke (Cembrano et al. 2000). Toista Reloncavin alueen siirrosryhmää hallitsee itä-länsisuuntainen kompressio (Cembrano et al. 2000). Ryhmän siirrokset ovat kulkusiirroksia, joilla on myös käännteissirroksen komponentti. Koillisen suuntaiset kulkusiirrokset ovat oikeakätisiä ja kaakon suuntaiset vasenkätisiä.

LOFZ näkyy Hornopirénin alueella (Kuva 2) 4–5 kilometriä leveänä vyöhykkeenä, jossa esiintyy heterogeenisesti deformatuneita granitoideja sekä alhaisen ja keskiasteen metamorfoosin läpikäyneitä, mutta deformatumattomia kiviä (Cembrano et al. 2000). Alueella on selkeästi havaittavissa sekä duktiilia että haurasta deformaatiota (Cembrano et al. 2000). Hornopirénin plutonisissa kivissä esiintyy selkeästi kehittyntä pohjoiskoillisen suuntaista lähes pystysuoraa liuskeisuutta. Alueella on kaksi homogeenista siirrosryhmää, joista toisessa siirrostien kulkusuunnat ovat välillä 000–030, eli pohjoiskoilliseen, ja toisessa puolestaan välillä 060 - 080, eli itäkoilliseen (Cembrano

et al. 2000). Kinemaattiset indikaattorit todistavat, että Hornopirénin pohjoiskoilliset siirrokset ovat oikeakätisiä ja puolestaan itäkoilliset siirrokset vasenkätisiä (Cembrano et al. 2000). Kinemaattisia indikaattoreita alueen kallioperässä ovat esimerkiksi dominorakenteet (Kuva 3) sekä epäsymmetriset hännät, jotka molemmat indikoivat oikeakätistä hiertoa. Hornopirénin alueella LOFZ on oikeakätinen kulkusiirosvyöhyke, jossa osasiirrosten suunta on suunnilleen pohjoiseen ja σ_1 jännitys on koillisen suuntainen (Cembrano et al. 2000).



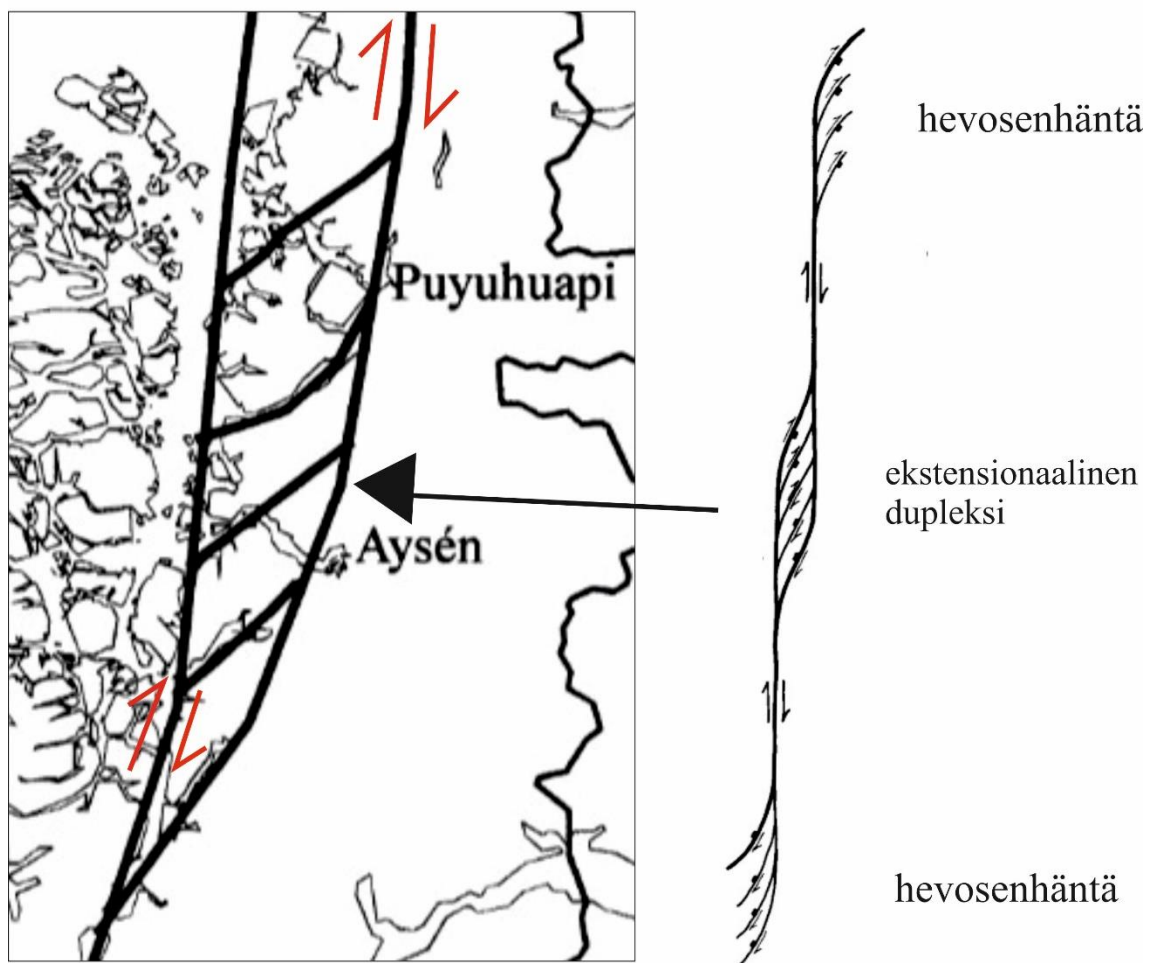
Kuva 3. Mikroskooppikuvia Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhykkeen Hornopirénin alueen deformoituneista kivistä, joissa on nähtävissä kinemaattisia indikaattoreita. (A) Sinisellä ja punaisella on merkitty toisistaan mikrosiirrostuneet plagioklaasit. Dominorakenne ja S/C rakenteet indikoivat oikeakätistä hiertoa. (B) Punaisella merkitty kiillekala indikoi oikeakätistä hiertoa. Muokattu Cembrano et al. (2000) mukaan.

3.2 Eteläosa

Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhykkeen pohjoisosa on suhteellisen hyvin kartoitettu verrattuna sen eteläosaan (Kuva 2). Vain noin neljännes LOFZ:in pääosasiirrosten eteläisistä 400 kilometristä on pystytty kartoittamaan tarkasti (De Pascale et al. 2021). Alue on kärsinyt merkittävästi eroosiosta sekä sedimenttien kerrostumisesta, eikä

LOFZ:in olemassaoloa Penasinlahdella (Kuva 2) ole kiistattomasti voitu todistaa kartoituksesta ja geofysikaalisen datan keruusta huolimatta (De Pascale et al. 2021).

Siirryttäessä pohjoisosasta eteläosaan n. 44°S merkittävimpiä osasiirroksia yhdistää vähintään neljä oikeakätistä ja suoraa koillisen suuntaista en échelon-rakennetta (Cembrano et al. 1996; Cembrano et al. 2000; Hernandez-Moreno et al. 2014), jotka ovat kymmeniä kilometrejä pitkiä (Cembrano et al. 1996). Pitkät pääosasiirroksset ja en échelon-rakenteet muodostavat yhdessä ekstensionaalisen dupleksirakenteen (Cembrano et al. 1996). Dupleksirakenne (Kuva 4) muodostuu usein kahden suuren, toisistaan siirrostuneen osasiirroksen välille (Woodcock and Fischer 1986). Osasiirroksia yhdistävät pienemmät en échelon-rakenteet, ja siirroksissa on kulkusiirroksen lisäksi myös normaalin tai käännteissiirroksen komponentti (Woodcock and Fischer 1986).



Kuva 4. Vasemmalla ekstensionaalinen hevosenhäntärakenne nähtävissä Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhykkeellä. Muokattu Cembrano et al. (2000) mukaan. Oikealla ekstensionaalinen dupleksi, jonka molemmissa päädyissä on hevosenhäntärakenteet. Muokattu Woodcock and Fischer (1986) mukaan

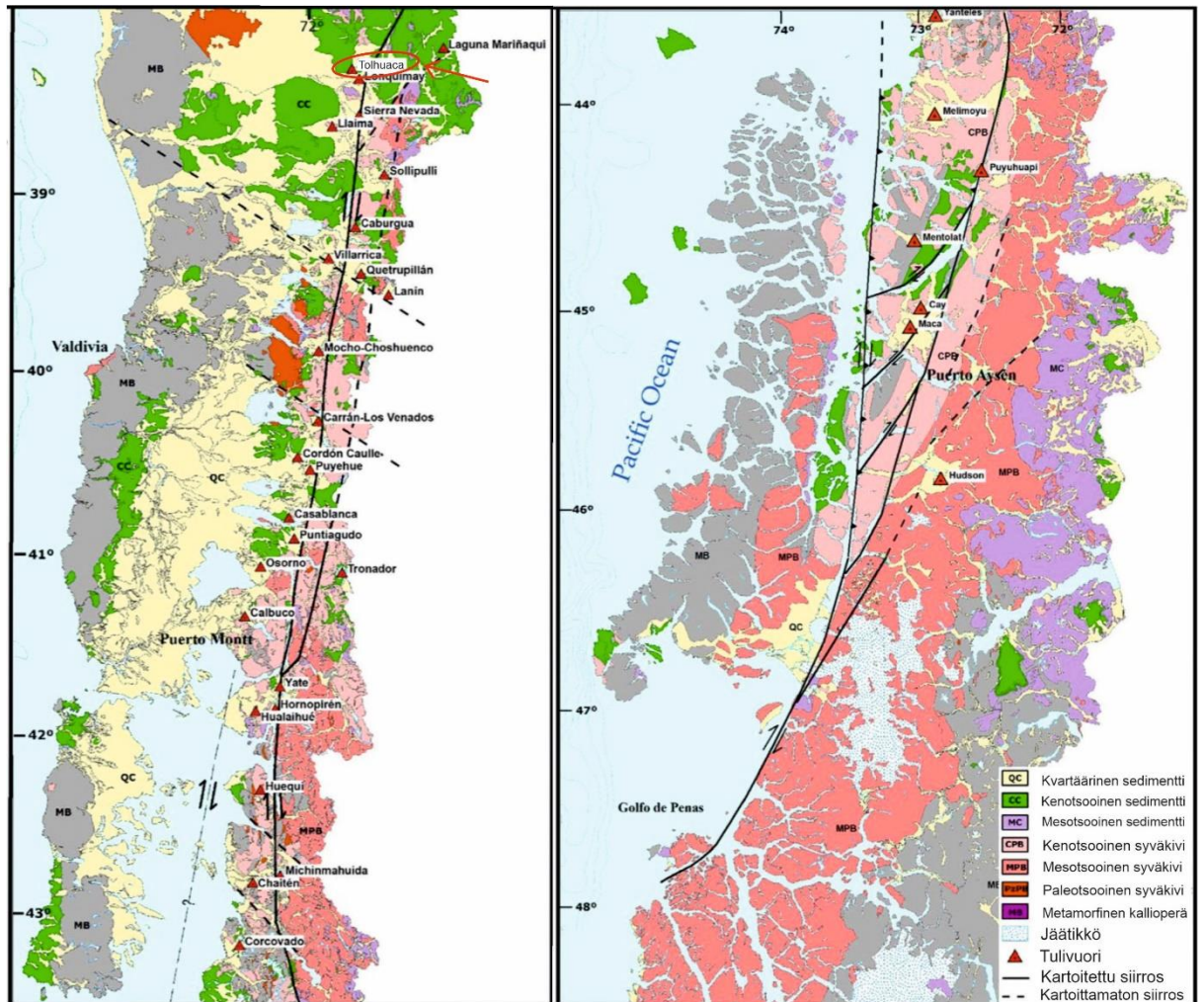
Liquiñe-Ofqui-siirrosvyöhykkeen eteläosissa sijaitsevat Puyuhuapin ja Aysenin alueet (Kuva 2). Puyuhuapin alueella Pohjois-Patagonian batoliittiin kuuluvat kivet ovat heterogeenisesti deformatuneita LOFZ:in itäisen pääosasiirroksen kohdalla (Cembrano et al. 2002). Puyuhuapin alueella esiintyy koillissuuntaisia, senttimetreistä satoihin metreihin leveitä hiertovyöhykkeitä (Cembrano et al. 2002). Kivistä löytyneet toistuvat kinemaattiset indikaattorit kuten S/C rakenteet sekä epäsymmetriset porfyroklastit viittaavat oikeakätiseen ja vinoon liikkeeseen. Aysenin alueella (Kuva 2) esiintyy koillisen suuntaisia duktiileja, korkean muodonmuutosasteen oikeakätisiä hiertovyöhykkeitä (Cembrano et al. 2002). Lisäksi LOFZ:in kuuluu pääosasiirrosten länsipuolella kolme luoteesta lounaaseen kaarevaa osasiirrosta, jotka ovat satoja kilometrejä pitkiä (Cembrano et al. 1996).

3.3 Liquiñe-Ofqui ja Etelä-Andien vulkaaninen kaari

Chilen alueella Andien vuoristo tarjoaa erinomaiset puitteet tutkia tektoniikan ja vulkanismin yhteisvaikutusta (Cembrano and Lara 2009). Merellisen Nazca-laatan subduktio vinossa kulmassa Etelä-Amerikan laatan alle on aiheuttanut sen, että Chilen mannerreunus on edelleen yksi aktiivisimpia siirrosvyöhykkeitä maailmassa (Hernandez-Moreno et al. 2014). Tämä on myös syy pitkään jatkuneelle oikeakätiselle liikesuunnalle Liquiñe-Ofqui-siirrosvyöhykkeellä (Cembrano et al. 1996).

LOFZ leikkaa Etelä-Andien vulkaanista kaarta (Cembrano et al. 2000), ja vähintään 30 tulivuorta sijaitsee joko LOFZ:in päällä tai sen läheisyydessä (Kuva 5) (De Pascale et al. 2021). Suurimmat LOFZ:in päällä sijaitsevat tulivuoret ovat Villarica, El Macho, Quetrupillan ja Osorno, jotka sijaitsevat noin 1000 metrin korkeudella merenpinnasta (Lavenu and Cembrano 1999). LOFZ:in alueella sijaitsevat tulivuoret ovat kerrostulivuoria, ja niiden koostumukset vaihtelevat basalttisista andesiittisiin (Hervé 1994). Suurin osa LOFZ:n päällä sijaitsevista tulivuorista koostuu kuitenkin basaltista (Lara et al. 2008) ja basaltista sekä pyroklastisesta tuhkasta muodostuneet kerrostulivuoret – kuten Puyuhuapi ja Aysén – ovat syntyneet suoraan LOFZ:in pääosasiirroksien päälle (Cembrano and Lara 2009). LOFZ:in päällä purkautuneissa

basalteissa on korkeammat LREE/HREE pitoisuudet ja ne ovat primitiivisempiä verrattuna perinteisiin kerrostulivuorista purkautuneisiin basalttisiin laavoihin (Lara et al. 2008).



Kuva 5. Karttaan on merkitty suurimmat LOFZ:n alueella sijaitsevat tulivuoret. Lisäksi karttaan on merkitty siirrosvyöhykkeen litologiaa sekä sedimentteiteitä. Muokattu Cembrano and Lara (2009) mukaan.

On hyvin todennäköistä, että LOFZ:in päällä olevat tulivuoret syntyivät saman geologisen tapahtumana aikana, sillä suurimmalla osalla tulivuorista on sama koostumus (Cembrano and Lara 2009). Cembrano and Lara (2009) mukaan Etelä-Andeilla tärkeä magman koostumukseen ja erilaisten vulkaanien kehittymiseen vaikuttava tekijä on siirrosvyöhykkeellä vaihteleva kinematiikka. Kinematiikka vaikuttaa magman

differentioitumiseen eli kehittymiseen, sillä transpressionaalisessa ja puristuksellisessa ympäristössä magma ehtii differentioitumaan kauemmin kuin transtensionaalisessa ja venytystä sisältävässä ympäristössä. Lara, Cembrano and Lavenu (2008) mukaan mahdollinen syy LOFZ:in päällä sijaitsevien tulivuorien monogeneettisyydelle onkin magman purkautuminen suoraan vaipasta pinnalle ilman aikaa differentioitumiselle

4 Liquiñe-Ofquin siirrosvyöhykkeen hydroterminen aktiivisuus

Siirrosvyöhykkeet muodostuvat monimutkaisista, linkittyneistä osasiirroksista, jotka kontrolloivat myös kuoren fluidien liikkeitä lisäämällä huokostiloja (Pérez-Flores et al. 2016). Esimerkiksi malmiesiintymät keskittyvät usein siirrosvyöhykkeisiin paikallisen ja jaksoittaisen hydrotermisen aktiivisuuden seurauksena (Faulkner et al. 2010). Faulkner et al. (2010) mukaan siirrosvyöhykkeiden vedenläpäisevyydessä voi esiintyä isojakin eroja eri ominaisuuksien vuoksi, eli vedenläpäisevyys on siis hyvin heterogeenistä sekä ajallisesti että sijainnillisesti. Raot ja siirrosinnat siirroksen ytimessä sekä sen tuhovyöhykkeellä (Kuva 6) voivat usein olla hyvinkin vedenläpäiseviä. Tuhovyöhyke on syntynyt ytimen ympärille siirrostumisen seurauksena ja on usein sen vuoksi erittäin rakoillutta.

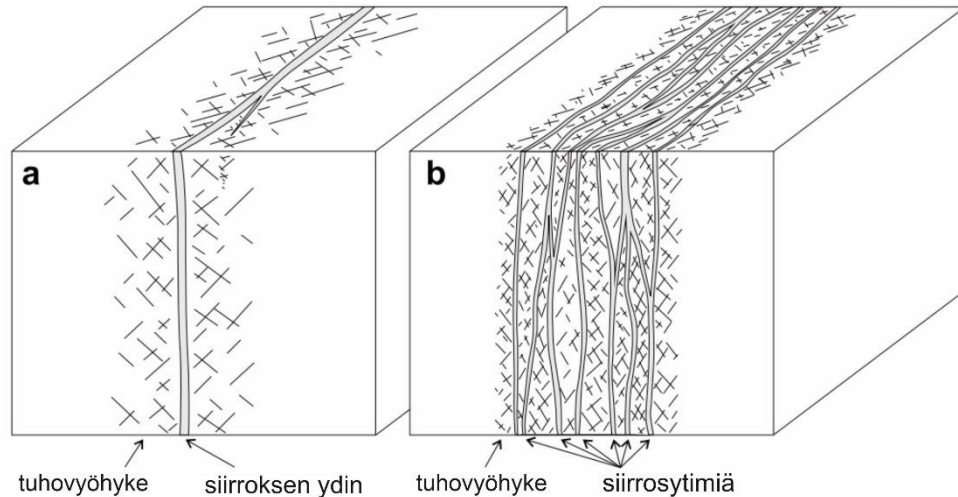
Hyvä permeabiliteetti siirrosvyöhykkeillä riippuu linkittyneiden rakojen lisäksi kuitenkin myös kivilajin vedenläpäisevyydestä (Faulkner et al. 2010). Jos kivilajilla on vain vähän huokostilaa, vedenläpäisevyyttä kontrolloi pääasiassa rakoverkosto. Huokoiset kivilajit ja linkittyneet huokostilat sekä rakoverkostot puolestaan lisäävät vedenläpäisevyyttä huomattavasti (Faulkner et al. 2010). Vedenläpäisevyys riippuu siis eri siirrosintojen ja huokostilojen linkittymisestä muihin, heikomman permeabiliteetin kerroksiin ja varsinkin syvällä kuoressa pienetkin raot vaikuttavat fluidien virtaukseen (Faulkner et al. 2010). Kokonaisuudessaan kallioperän vedenläpäisevyyteen vaikuttaa huokostilojen ja linkittyneiden rakojen lisäksi myös kivilajien hydroterminen muuttuminen.

Hydroterminen muuttuminen tarkoittaa kivessä tapahtuvia kemiallisia ja mineralogisia muutoksia, jotka syntyvät kuuman fluidin vaikutuksesta. Esimerkiksi kloriitti on

tyypillinen hydrotermisen muuttumisen seurauksena syntyvä mineraali. Carbajal-Martinez et al. (2025) mukaan siirrosvyöhykkeiden hydrotermisesti muuttuneiden kivien huokoisuus on suurempi ja huokostilat ovat selkeästi linkittyneempiä verrattuna muuttumattomiin kiviin siirrosvyöhykkeen ulkopuolella.

Siirrosvyöhykkeen pohjoispäädyssä sijaitsee Tolhuaca-tulivuori (Kuva 5), jonka luoteisella kyljellä on geotermisesti aktiivinen alue (Sanchez-Alfaro et al. 2016). Huippua kohti Tolhuacan rinteessä on laajalla alueella todisteita hydrotermisestä muuttumisesta. Tolhuacan rinteellä hydroterminen muuttuminen esiintyy rapautumispinnalla happamina sulfaattimineralisaatioina (Sanchez-Alfaro et al. 2016). Sanchez-Alfaro et al. (2016) mukaan Tolhuacalta on löydetty kolme erilaista hydrotermisesti muuttunutta aluetta. Ensimmäinen alue on savimineraalirikas muuttumisvyöhyke, joka jatkuu rinteiden pinnalta 300 metrin syvyyteen. Vyöhykkeen yleisiä mineraaleja ovat esimerkiksi smektiitti ja rautaoksidit. Muuttumisvyöhykkeessä hydroterminen muuttuminen on ollut intensiivisintä noin 100 metrin syvyydessä (Sanchez-Alfaro et al. 2016). Toinen vyöhyke sijaitsee 300–670 metrin syvyydessä, ja siellä on havaittavissa illiittiä ja kloriittipitoista smektiittiä. Kolmas vyöhyke on 670–1073 metrin syvyydessä, missä yleisimpiä mineraaleja ovat epidootti ja kloriitti (Sanchez-Alfaro et al. 2016).

LOFZ:in siirrosvyöhykkeen pohjoiskoillisen suuntaisten, syvien pääosasiirrosten rakosysteemit lisäävät kallioperän pystysuuntaista vedenläpäisevyyttä (Sánchez et al. 2013). Daniele et al. (2020) mukaan hydrogeokemiallisia prosesseja tapahtuu LOFZ:issa enemmän tuhovyöhykkeissä (Kuva 6) kuin siirrosten ytimissä, sillä tuhovyöhykkeissä kuuma pohjavesi pääsee virtaamaan raoissa tehokkaasti ja kuuma vesihöyry tehostaa pohjaveden ja kallioperän välisiä hydrogeokemiallisia reaktioita (Daniele et al. 2020). LOFZ:in ytimessä tapahtuu lähinnä matalan lämpötilan prosesseja, sillä se on tiiviimpi kuin tuhovyöhyke eikä pohjavesi pääse virtaamaan yhtä tehokkaasti (Daniele et al. 2020).



Kuva 6. Siirrosvyöhykkeen tyypilliset rakenteet. (a) yksi ydin ja sitä ympäröivä tuhovyöhyke. (b) useita ytimiä ja niiden tuhovyöhyke. Muokattu (Faulkner et al. 2010) mukaan.

Fluidit purkautuvat rakoilevasta kallioperästä kuumina lähteinä ja siirrosvyöhykkeen pohjoisessa päädyssä on useita geotermisiä alueita, jotka sijaitsevat siirrosvyöhykkeen pääosasiirrosten varrella (Sánchez et al. 2013). LOFZ:n alueella sijaitsevat geotermiset systeemit saavat lämpönsä syvällä virtaavista fluideista, jotka lämpenevät konduktion seurauksena (Sánchez et al. 2013) ja LOFZ:n tuhovyöhykkeet ovatkin hyviä kohteita geotermisen energian hyödyntämiseen (Daniele et al. 2020).

Liquiñen alueen (Kuva 2) kuumat lähteet ja geotermiset vyöhykkeet edustavat koko Etelä-Andien vulkaanisen kaaren geotermisesti aktiivisia alueita, sillä Liquiñessa kaikki kaaren sisältämät rakenteelliset ja geologiset piirteet ovat edustettuina (Daniele et al. 2020). Alue tarjoaa erinomaiset mahdollisuudet tutkia geotermisesti aktiivisten vyöhykkeiden käyttöä energiakriisin ratkomiseen Keski- ja Etelä-Chilen alueella hyödyntämällä kuumia lähteitä geotermisen energian tuotantoon (Daniele et al. 2020).

5 Yhteenveto

Etelä-Amerikassa sijaitseva Andien vuoristo voidaan jakaa erilaisten orogenioiden mukaan kolmeen osaan; Pohjois-, Keski- ja Etelä-Andeihin. Yksi Etelä-Andien merkittävimpiä piirteitä on Liquiñe-Ofqui (Kuva 2), joka on 1200 kilometriä pitkä

siirrosvyöhyke eteläisessä Chilessä. (Cembrano et al. 1996; Lavenu and Cembrano 1999). Eteläisiä Andeja, ja samalla myös Liquiñe-Ofquita, peittää lähestulkoon koko matkaltaan Pohjois-Patagonian batoliitti (Hervé 1994).

Liquiñe-Ofqui eli LOFZ on pohjois-etelä suuntainen oikeakätinen kulkusiiirrosvyöhyke (Hervé 1994). Se on Chilen mannerreunuksen suuntainen, Etelä-Andien magmaattisen kaaren sisäinen kulkusiirossysteemi (Cembrano et al. 2000). LOFZ:in pohjoisosissa kaksi merkittävintä osasiirrosta ovat oikeakätiset, satojen kilometrien pituiset pohjoiskoillisen suuntaiset siirrosvyöhykkeet (Cembrano, Hervé and Lavenu, 1996; Cembrano et al. 2000; Hernandez-Moreno, Speranza and Di Chiara, 2014; Pérez-Flores et al. 2016). Ne alkavat 39°S kohdalta ja jatkuvat etelään 47°S asti (Cembrano et al. 1996). Pohjoisosaan kuuluvat Liquiñen, Reloncavín ja Hornopirénin alueet (Kuva 2) ja Liquiñen alueella koillisen suuntaisista osasiirroksista on löydetty itään haarautuva hevosenhätärakenne (Roquer et al. 2017).

Eteläosissa 44°S pääosasiirroksiset ovat siirrostuneet oikealle ja osasiirroksia yhdistää vähintään neljä oikeakätistä ja suoraa koillisen suuntaista en échelon-rakennetta, jotka yhdessä muodostavat ekstensionaalisen dupleksirakenteen (Cembrano et al. 1996). LOFZ kontrolloikin suurta osaa Etelä-Andien vulkaanisen kaaren magmaattisesta ja hydrotermisestä aktiivisuudesta (Sanchez-Alfaro et al. 2016), sillä Etelä-Andien vulkaaninen kaari sijaitsee LOFZ:n alla mannerreunan suuntaisesti (Cembrano et al. 2000).

Etelä-Andien vulkaanisella kaarella sijaitsee myös useita LOFZ:in linkittyviä kuumia lähteitä (Daniele et al. 2020), joissa fluidit purkautuvat rakoilleesta kallioperästä pinnalle muodostaen geotermisiä alueita (Sánchez et al. 2013). Useita geotermisesti aktiivisia alueita sijaitsee LOFZ:n pohjoisosissa, jossa kallioperä on myös hydrotermisesti muuttunut (Sanchez-Alfaro et al. 2016). Geotermisesti aktiiviset alueet antavat hyvän mahdollisuuden tutkia niiden käyttöä geotermisenä energiana.

Lähteet

- Carbajal-Martinez, D., Bischoff, A., Heap, J., Jolis, E., Reuschlé, T., Luoto, T., Kuva, J., Vuoriainen, S., Engström, J., Kortunov, E. and Nordbäck, N. 2025. From Faults to Flow: How Fracturing and Hydrothermal Alteration Shape Geothermal Reservoirs in Crystalline Rocks. *European Geothermal Congress, 2025*, pp. 1-10. Available at: https://media.voog.com/0000/0050/7355/files/EGC2025_Carbajal-Martinez_Kivetty_Paper.pdf [Accessed: 15 February 2026].
- Cembrano, J., Hervé, F. and Lavenu, A. 1996. The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics* 259(1–3), pp. 55–66. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0040195195000666>.
- Cembrano, J. and Lara, L. 2009. The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics* 471(1–2), pp. 96–113. doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.038.
- Cembrano, J., Lavenu, A., Reynolds, P., Arancibia, G., López, G. and Sanhueza, A. 2002. Late Cenozoic transpressional ductile deformation north of the Nazca–South America–Antarctica triple junction. *Tectonophysics* 354(3–4), pp. 289–314. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040195102003888>.
- Cembrano, J., Schermer, E., Lavenu, A. and Sanhueza, A. 2000. Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, the Liquiñe–Ofqui fault zone, southern Chilean Andes. *Tectonophysics* 319(2), pp. 129–149. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040195199003212>.
- Daniele, L., Taucare, M., Viguié, B., Arancibia, G., Aravena, D., Roquer, T., Sepúlveda, J., Molina, E., Delgado, A., Muñoz, M. and Morata, D. 2020. Exploring the shallow geothermal resources in the Chilean Southern Volcanic Zone: Insight from the Liquiñe thermal springs. *Journal of Geochemical Exploration* 218, p. 106611. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0375674220302491>.
- Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J. and Withjack, M.O. 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology* 32(11), pp. 1557–1575. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2010.06.009>.

- Haschke, M., Günther, A., Melnick, D., Echtler, H., Reutter, K.-J., Scheuber, E. and Oncken, O. 2006. Central and Southern Andean Tectonic Evolution Inferred from Arc Magmatism. In: *The Andes*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 337–353. Available at: http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-48684-8_16.
- Hernandez-Moreno, C., Speranza, F. and Di Chiara, A. 2014. Understanding kinematics of intra-arc transcurrent deformation: Paleomagnetic evidence from the Liquiñe-Ofqui fault zone (Chile, 38–41S). *Tectonics* 33(10), pp. 1964–1988. doi: 10.1002/2014TC003622.
- Hervé, F. 1994. The Southern Andes Between 39° and 44°S Latitude: The Geological Signature of a Transpressive Tectonic Regime Related to a Magmatic Arc. In: *Tectonics of the Southern Central Andes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 243–248. Available at: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-77353-2_17.
- Horton, B.K. 2018. Tectonic Regimes of the Central and Southern Andes: Responses to Variations in Plate Coupling During Subduction. *Tectonics* 37(2), pp. 402–429. doi: 10.1002/2017TC004624.
- Lara, L.E., Cembrano, J. and Lavenu, A. 2008. Quaternary vertical displacement along the liquiñe-Ofqui fault zone: Differential uplift and coeval volcanism in the Southern Andes? *International Geology Review* 50(11), pp. 975–993. doi: 10.2747/0020-6814.50.11.975.
- Lavenu, A. and Cembrano, J. 1999. Compressional- and transpressional-stress pattern for Pliocene and Quaternary brittle deformation in fore arc and intra-arc zones (Andes of Central and Southern Chile). *Journal of Structural Geology* 21(12), pp. 1669–1691. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019181419900111X>.
- De Pascale, G.P., Froude, M., Penna, I., Hermanns, R.L., Sepúlveda, S.A., Moncada, D., Persico, M., Easton, G., Villalobos, A. and Gutiérrez, F. 2021. Liquiñe-Ofqui's fast slipping intra-volcanic arc crustal faulting above the subducted Chile Ridge. *Scientific Reports* 11(1), p. 7069. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-86413-w>.
- Pérez-Flores, P., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro, P., Veloso, E., Arancibia, G. and Roquer, T. 2016. Tectonics, magmatism and paleo-fluid distribution in a strike-slip setting: Insights from the northern termination of the Liquiñe-Ofqui fault System, Chile. *Tectonophysics* 680, pp. 192–210. doi: 10.1016/j.tecto.2016.05.016.
- Ramos, V.A. and Ghiglione, M.C. 2008. Tectonic Evolution of the Patagonian Andes. *Developments in Quaternary Science* 11, pp. 57–71. doi: 10.1016/S1571-0866(07)10004-X.

- Roquer, T., Arancibia, G., Rowland, J., Iturrieta, P., Morata, D. and Cembrano, J. 2017. Fault-controlled development of shallow hydrothermal systems: Structural and mineralogical insights from the Southern Andes. *Geothermics* 66, pp. 156–173. doi: 10.1016/j.geothermics.2016.12.003.
- Rosenau, M., Melnick, D. and Echtler, H. 2006. Kinematic constraints on intra-arc shear and strain partitioning in the southern Andes between 38°S and 42°S latitude. *Tectonics* 25(4), pp. 1–16. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005TC001943>.
- Sánchez, P., Pérez-Flores, P., Arancibia, G., Cembrano, J. and Reich, M. 2013. Crustal deformation effects on the chemical evolution of geothermal systems: The intra-arc Liquiñe-Ofqui fault system, Southern Andes. *International Geology Review* 55(11), pp. 1384–1400. doi: 10.1080/00206814.2013.775731.
- Sanchez-Alfaro, P., Reich, M., Arancibia, G., Pérez-Flores, P., Cembrano, J., Driesner, T., Lizama, M., Rowland, J., Morata, D., Heinrich, C.A., Tardani, D. and Campos, E. 2016. Physical, chemical and mineralogical evolution of the Tolhuaca geothermal system, southern Andes, Chile: Insights into the interplay between hydrothermal alteration and brittle deformation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 324, pp. 88–104. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2016.05.009.
- Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J. and Rivera, C. 2000. Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics* 19(5), pp. 787–813. doi: 10.1029/2000TC900004.
- Villalobos, A., Easton, G., Maksymowicz, A., Ruiz, S., Lastras, G., De Pascale, G.P. and Agurto-Detzel, H. 2020. Active Faulting, Submarine Surface Rupture, and Seismic Migration Along the Liquiñe-Ofqui Fault System, Patagonian Andes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125(9), pp. 1–26. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020JB019946>.
- Woodcock, N.H. and Fischer, M. 1986. Strike-slip duplexes. *Journal of Structural Geology* 8(7), pp. 725–735. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0191814186900210>.