



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Denalin siirrossysteemi

Essi I. E. Olenius

Geologia
LuK-tutkielma
Laajuus: 7 op

03.05.2024

Turku

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

Pääaine: Geologia
Tekijä: Essi Olenius
Otsikko: Denalin siirrossysteemi
Ohjaaja: Eemi Ruuska
Sivumäärä: 27 sivua
Päivämäärä: 03.05.2024

Denalin siirrossysteemi on Alaskassa, Yhdysvalloissa, sijaitseva oikeakätinen osittain kaareva kulkuliukusiirrossysteemi. Se on Alaskan siirrossysteemeistä eteläisin ja linkittyy kaakossa muihin Pohjois-Amerikan länsirannikon kulkuliukusiirrossysteemeihin. Denalin siirrossysteemi on yhteensä noin 2000 km pitkä ja sen kulku vaihtelee itäpuolen luode-kaakosta länsipuolen luode-koilliseen. Denalin siirrossysteemin alueellinen litologia jakautuu pitkälti alueen siirrostensa mukaan; Denalin siirrossysteemin pohjoispuolella Yukonin alue, eteläpuolella Wrangellia ja näiden välissä Alaskan sutuurivyöhyke. Kaikki litologiset alueet ovat pääasiassa entisiä merellisiä sedimenttejä ja vulkaanista ainesta, mutta koostumus sekä metamorfoosi- ja deformaatioaste vaihtelevat alueiden välillä.

Denalin siirrossysteemi jaetaan viiteen eri pääsiirrokseen: itäinen Denalin siirros, Totschunda-siirros, Hines Creek -siirros, Denalin siirros ja läntinen Denalin siirros. Itäinen Denalin siirros on siirrossysteemin suora osa idässä, joka alkaa Totschunda-siirroksen risteyksestä. Totschunda-siirros on siirrossysteemin nuorin osa, joka erkanelee siirrossysteemin päälinjasta kohti kaakkoa. Hines Creek -siirros on siirrossysteemin kaarevan osan pohjoisempi siirros, joka seuraa tarkemmin litologisia rajoja. Denalin siirros on Hines Creek -siirrosta nuorempi ja muodostaa siirrossysteemin kaarevan osan etelässä. Läntinen Denalin siirros on Denali-vuoren kohdalta alkava siirrossysteemin länsiosa.

Tektonisesti Denalin siirrossysteemi sijaitsee mielenkiintoisella paikalla, sillä siihen vaikuttaa kolme litosfäärilaattaa: Tyynenmeren laatta, Pohjois-Amerikan laatta ja Yakutat-mikrolaatta. Tyynenmeren laatta ja Yakutat-mikrolaattaa liikkuvat luoteeseen suhteessa Pohjois-Amerikan laattaan hieman yli 5 cm/a nopeudella. Litosfäärilaattojen liikesuuntien ja -nopeuksien muutokset historiassa ovat aiheuttaneet siirrossysteemin siirtymänopeuden vaihtelua, uusien siirroksien muodostumista ja vanhempien siirrostensa rauhoittumista. Laattojen liikkeet vaikuttavat siirrossysteemin lisäksi siirrossysteemin eteläpuolella sijaitsevaan Etelä-Alaskan blokkiin, jonka kinematiikasta on neljä eri teoriaa: puhdas kierto, puhdas painauma, puhdas puristus ja näiden yhdistelmäteoria.

Denalin siirrossysteemi on seismisesti suhteellisen rauhallinen, mutta ajoittain sen siirtymistä aiheutuneet maanjäristykset ovat olleet magnitudoiltaan suuria. Vaikka siirrossysteemi sijaitsee kaukana asutuskeskuksista, on sen vaikutusalue suuri ja sisältää yhteiskunnalle tärkeää infrastruktuuria. Denalin siirrossysteemiin liittyvien tutkimusten avulla voidaan myös oppia tulkitsemaan muiden yhteiskunnallisesti merkittävien kulkuliukusiirrossysteemien liikkumista.

Avainsanat: Alaska, Denalin siirrossysteemi, kulkuliukusiirros, siirrossysteemi

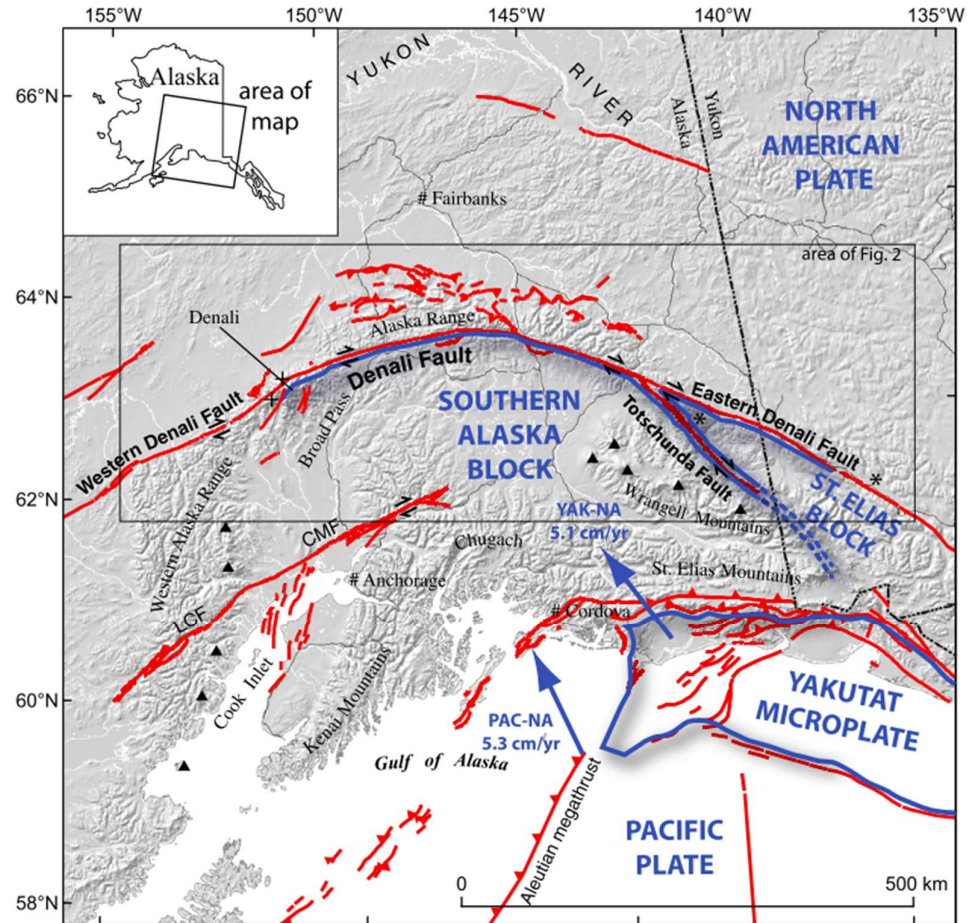
Sisällys

1	Johdanto	5
2	Geologinen tausta ja ympäristö	7
2.1	Tektoniikka	7
2.2	Litologia	8
3	Denalin siirrossysteemi	10
3.1	Itäinen Denalin siirros	10
3.2	Totschunda-siirros	11
3.3	Denalin siirros	12
3.4	Hines Creek -siirros	13
3.5	Läntinen Denalin siirros	14
4	Siirrossysteemin tektoninen kehitys ja kinematiikka	14
5	Yhteiskunnalliset vaikutukset	20
6	Johtopäätökset	23
	Lähteet	25

1 Johdanto

Yhdysvalloissa Alaskassa sijaitsevan Denalin (entiseltä nimeltään McKinley) siirrossysteemin muodostaa joukko siirroksia lähellä Pohjois-Amerikan ja Tyynenmeren laatan saumaa (Kuva 1; Hickman *et al.* 1978). Denalin siirrossysteemi on eteläisin siirrossysteemi Alaskassa (Grantz 1966; Hickman *et al.* 1978). Sen pohjoispuolella sijaitsee useita samankaltaisia kaarevia siirrossysteemeitä, kuten Tintinan siirrossysteemi (Grantz 1966, Hickman *et al.* 1978; Waldien *et al.* 2023). Denalin siirrossysteemi linkittyy etelässä Fairweatherin ja Queen Charlotten siirrossysteemeihin, jotka seuraavat myös Tyynenmeren ja Pohjois-Amerikan laattojen rajaa Pohjois-Amerikan länsirannikolla (Hickman *et al.* 1978). Denalin siirrossysteemi ei ole Pohjois-Amerikan Kordillieereissa ainut oikeakätinen kulkuliukusiirros (*engl. strike-slip-fault*), vaan Pohjois-Amerikan länsirannikolla on useita pitkäikäisiä siirroksia, kuten edellä mainitut Fairweather ja Queen Charlotte sekä tunnetuin San Andreas, Kaliforniassa (McCalpin *et al.* 2009; Waldien *et al.* 2023). Denalin siirrossysteemiä ympäröivä litologia voidaan jakaa karkeasti kolmeen pääryhmään: Yukonin alue pohjoisessa, Wrangellian alue etelässä sekä Alaskan suutuurivyöhyke Yukonin ja Wrangellian välissä (Kuva 2; Fitzgerald *et al.* 2014). Alueet koostuvat pääasiassa törmänneistä saarikaarista, merellisistä sedimenteistä ja vulkaanisista kivistä (Fitzgerald *et al.* 2014).

Kokonaisuudessaan Denalin siirrossysteemi on yli 2000 km pitkä, ja se ulottuu Kaakkois-Alaskasta aina länsirannikolle asti (Kuva 1; Hickman *et al.* 1978). Denalin siirrossysteemi on geometrialtaan kaareva, sillä sen kulun suunta vaihtelee siirrossysteemin matkalla jopa 50 astetta (Benowitz *et al.* 2022).



Kuva 1. Yleiskuva tutkimusalueesta. Aktiiviset siirrokset on merkitty punaisella, litosfääri-laattojen rajat sinisellä, aktiiviset tulivuoret ovat mustina kolmioina; laattojen liikesuunnat: YAK-NA- Yakutat–Pohjois-Amerikka; PAC-NA- Tyynimeri–Pohjois-Amerikka; CMF- Castle Mountain -siirros; LCF-Lake Clark -siirros (Haeussler *et al.* 2017).

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella Denalin siirrossysteemin rakennegeologiaa sekä siirrossysteemiin vaikuttavia tektonisia tekijöitä ja niiden vaikutuksia siirrossysteemin kinematiikkaan. Siirrossysteemi voidaan jakaa viiteen pääsiirrokseen: läntinen Denali, Denali, Hines Creek, itäinen Denali ja Totschunda (Kuva 1), mitkä jakautuvat edelleen pienempiin ja samansuuntaisiin siirroksiin (Hickman *et al.* 1978; Haeussler *et al.* 2017; Waldien *et al.* 2023).

2 Geologinen tausta ja ympäristö

Tässä kappaleessa tutustutaan tarkemmin Denalin siirrossysteemiin vaikuttaviin taustatekijöihin. Kappaleessa 2.1 käsitellään siirrossysteemiin vaikuttavia tektonisia tekijöitä, kuten litosfäärilaattoja ja niiden liikesuuntien muutoksia historian aikana. Kappale 2.2 kertoo Denalin siirrossysteemiä ympäröiviä litologisista yksiköistä.

2.1 Tektoniikka

Alaskan sijainti on laattatektonisesti mielenkiintoinen, sillä siihen vaikuttaa kolme eri litosfäärilaattaa: Tyynenmeren laatta, Pohjois-Amerikan laatta ja Yakutat-mikrolaatta (Haeussler *et al.* 2017; Waldien *et al.* 2023). Laattojen suhteelliset liikesuunnat ja -nopeudet ovat vaihdelleet useasti, ja alueella onkin merkkejä ainakin kahdesta eri puristusvaiheesta paleotsooiselta mesotsooiselle kaudelle (Hickman *et al.* 1978). Paleotsooisen ja mesotsooisen kausien aikainen puristus on ollut lähes vaakatasoista ja pohjois-eteläsuuntaista (Hickman *et al.* 1978). Mesotsooiset puristusjaksot muodostivat myös osittain Pohjois-Amerikan Kordillieerit (Dickinson 2004). Kenotsooisen ajan alussa paleoseeni- ja eoseeniaikana Tyynenmeren laatta liikkui nopeammin pohjoiseen suhteessa Pohjois-Amerikan laattaan (Hickman *et al.* 1978). Tyynenmeren laatan liikkeet kenotsooisella kaudella edistivät kulkuliukusiirrosten syntymistä Kordillieerien alueella (Dickinson 2004). Tyynenmeren laatan liike hidastui varhaisoligoseenina ja liikkeensuunta vaihtui luoteeseen (Hickman *et al.* 1978). Tämä hidaslilikeinen vaihe kesti noin 40–25 Ma, jonka jälkeen liike on ollut jälleen nopeampaa (Hickman *et al.* 1978). Nykyisin Tyynenmeren laatta liikkuu luoteeseen noin 5,3 cm/a suhteessa Pohjois-Amerikan laattaan (Haeussler *et al.* 2017).

Denalin siirrossysteemin eteläpuolelle jäävää manneraluetta kutsutaan Etelä-Alaskan lohkoksi (Kuva 1; Waldien *et al.* 2023). Yakutat-mikrolaatta subduktoituu Etelä-Alaskan lohkon alle Pohjois-Amerikan ja Tyynenmeren litosfäärilaattojen välistä (Kuva 1; Waldien *et al.* 2023). Etelä-Alaskan lohkon kinematiikkaa on tutkittu pitkään ja sen liikeradoista on kehitelty monia teorioita, joista kerrotaan lisää kappaleessa 4.

2.2 Litologia

Merellisen ja mantereisen kerrostumisympäristön kohtaamisen takia Denalin siirrossysteemiä ympäröivän alueen kivilajit koostuvat lähinnä erilaisista sedimentti- ja kalkkikivistä, jotka ovat deformatuneet ja/tai metamorfoituneet (Hickman *et al.* 1978, Fitzgerald *et al.* 2014). Alueella on myös merellisen ja mantereisen kerrostumisympäristön kontaktin takia vulkaanista ainesta (Hickman *et al.* 1978). Denalin siirrossysteemin pohjoispuolella kivet luokitellaan vihreäliuske- ja amfiboliittifasiukseen, jotka vaihtelevat felsisistä intermediärisiin (Hickman *et al.* 1978, Fitzgerald *et al.* 2014). Fitzgerald *et al.* (2014) viittaa tähän siirrossysteemin pohjoispuoliseen alueeseen Yukonin alueena (engl. *Yukon Composite Terraine*) (Kuva 2). Vanhimmat kivet ovat kvartsiserisiittiliuskeita, jotka on ajoitettu prekambrielle tai varhaispaleotsooiselle ajalle (Hickman *et al.* 1978). Näiden liuskeiden päälle on ylitöntynyt varhais–keskipaleotsooisia metavulkaniitti- ja metasedimenttiliuskeita, joissa esiintyy stilpnomelaanimineraalia merkinä metamorfoitumisesta kohtalaisessa paineessa (Hickman *et al.* 1978). Kivien päätellään olevan Yukonin alueella vanhan vulkaanisen kaaren jäänteitä (Fitzgerald *et al.* 2014).

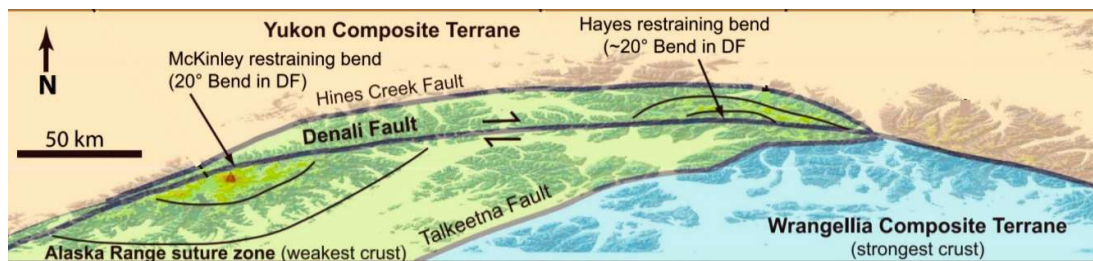
Denalin siirroksen ja sen pohjoispuolella sijaitsevan Hines Creekin siirroksen väliin jäävän alueen vanhimmat kivet ovat fyliittejä, sertejä ja kalkkikiviä, jotka on ajoitettu ordoviikki sekä siluurikaudelle (Hickman *et al.* 1978). Näiden ordoviikki- ja siluurikautisten kerrostumien päälle on kasautunut siluuri- ja devonikaudella kalkkikiveä, grauvakkoja ja hieman vulkaanista ainesta (Hickman *et al.* 1978). Tämän jälkeen permikaudella on kerrostunut grauvakkoja ja tyynylaavoja, joiden päällä ovat ainoat mesotsooiset kerrokset, kuten triaskautiset kalkki- ja hiekkakivet sekä argilliitit ja basaltit (Hickman *et al.* 1978). Kaikki nämä kivet ovat vahvasti deformatuneet ja metamorfoituneet alhaisessa siniliuskefasieksessa (Hickman *et al.* 1978). Alueella on myös paljon trias- ja jurakautisia gabroja (Hickman *et al.* 1978).

Denali- ja Hines Creek -siirroksien välissä sekä Hines Creek -siirroksen pohjoispuolen päällä on paleoseeninen Cantwell-muodostuma, joka koostuu mantereisista sedimenteistä sekä oliviini- ja andesiittibasalteista (Hickman *et al.* 1978). Cantwell-muodostuman sedimenttikerrostumat ovat paksuudeltaan jopa 4 km ja niiden päällä ovat laavavirtakerrostumat yhteensä 1,9 km (Hickman *et al.* 1978). Cantwell-muodostuma on

paikoittain metamorfoitunut alhaisissa paine- ja lämpötilaolosuhteissa zeoliittifasieksessa (Hickman *et al.* 1978). Muodostuman päälle on kerrostunut katkonaisesti paleogeeninen hiilipitoinen kerros, jonka päällä on nuorempia sora- ja hiekkakerroksia (Hickman *et al.* 1978).

Denalin siirrossysteemin eteläpuoliset kivet ovat mereen kerrostuneita sedimenttejä, kuten vanhimmat devoni- ja/tai siluurikautiset kalkkikivet, saviliuskeet, argilliittit ja konglomeraatit (Hickman *et al.* 1978). Devoni- ja siluurikautisten kerrosten päälle on kerrostunut paleotsooisia tai varhaismesotsooisia mustia ja vihreitä sertejä ja tummia argilliitteja, mitkä ovat luultavasti kerrostuneet merenpohjaympäristössä (Hickman *et al.* 1978). Nuorempia kerroksia ovat muuttuneet triaskautiset basalttivirrat, jura- ja liitukautiset argilliittit, grauvakat ja konglomeraatit (Hickman *et al.* 1978). Denalin siirrossysteemin ja Talkeetna-siirroksen väliin rajautuvaa aluetta kutsutaan Alaskan sutuurivyöhykkeeksi (engl. *Alaska Range Suture Zone*), joka luultavasti ulottuu myös Hines Creek- ja Denali-siirroksien väliin jäävälle alueelle (Kuva 2; Fitzgerald *et al.* 2014).

Denalin siirrossysteemin etelä- ja pohjoispuolilla sekä Denali- ja Hines Creek -siirroksien välissä esiintyy paleogeenikautisia graniittisia intrusioita (Hickman *et al.* 1978). Fitzgerald *et al.* (2014) puhuvat Talkeetna-vuoriston itä- ja eteläpuoleisista alueista Wrangelliana, jossa esiintyy paljon vulkaanisia ja vulkanoklastisia kerrostumia (Kuva 2; Hickman *et al.* 1978). Vulkaanisten kerrostumien on arveltu olevan vanhaa merenpohjaa saarikaarisysteemistä, joka olisi puristunut nykyiselle paikalleen litosfäärilaattojen puristusvaiheessa (Hickman *et al.* 1978). Eteläisimmässä Alaskassa on mesotsooisia merenpohjassa kerrostuneita sedimenttejä ja vulkaanisia kerrostumia (Hickman *et al.* 1978). Wrangellian alue on muita pääyksikköjä reologisesti vahvempi, jolloin puristukseen joutunut Alaskan sutuurivyöhyke ja Yukonin alue on poimuttunut (Kuva 2; Fitzgerald *et al.* 2014).



Kuva 2. Denalin siirrossysteemin ympäristön litogia. Siirrossysteemin pohjoispuolella Yukonin alue keltaisella, vihreällä Alaskan sutuurivyöhyke ja sinisellä Wrangellian alue. Mukailleen Fitzgerald *et al.* 2014.

3 Denalin siirrossysteemi

Denalin siirrossysteemi jakautuu viiteen siirrokseen maantieteellisen sijainnin ja haaraumien perusteella. Maantieteellisen sijainnin perusteella siirrossysteemin päälinja jaetaan itäiseen Denaliin, Denaliin ja läntiseen Denaliin ja haarautumien avulla Hines Creek- ja Totschunda-siirroksiin (Haeussler *et al.* 2017). Pääsiirrokset ovat kulkuliukusiirroksia, joissa paikoitellen esiintyy myös pystyliikettä (Fitzgerald *et al.* 2014). Siirrossysteemin keskiosissa esiintyy sekä pohjois- että eteläpuolella paljon ylityöntösiirroksia, kuten Sutsina Glasier -siirros ja Broad Pass -siirros (Kuva 4; Fitzgerald *et al.* 2014).

Siirrossysteemin sijainnin määrittää kallioperän heikkousvyöhykkeet eli Alaskan sutuurivyöhyke sekä Yukonin ja Wrangellian alueiden kontaktit (Fitzgerald *et al.* 2014). 3D-mallinnuksissa on todettu Tyynenmeren laatan ja Yakutat-mikrolaatan aiheuttaman stressin muodostavan vuoriston Etelä- ja Keski-Alaskaan vain, jos siellä on heikkousvyöhyke (Fitzgerald *et al.* 2014). Deformaatio keskittyy Alaskan alueella siirrokseen, joka voidaan huomata geodeettisesta nopeudesta ja seismisestä aktiivisuudesta (Ruppert *et al.* 2008).

3.1 Itäinen Denalin siirros

Itäinen Denalin siirros (myös Shalwak Valley -siirros) on 600 km pitkä siirros, joka määritellään alkavaksi Totschunda-siirroksen erkautuessa Denalin siirroksesta (Kuva 1

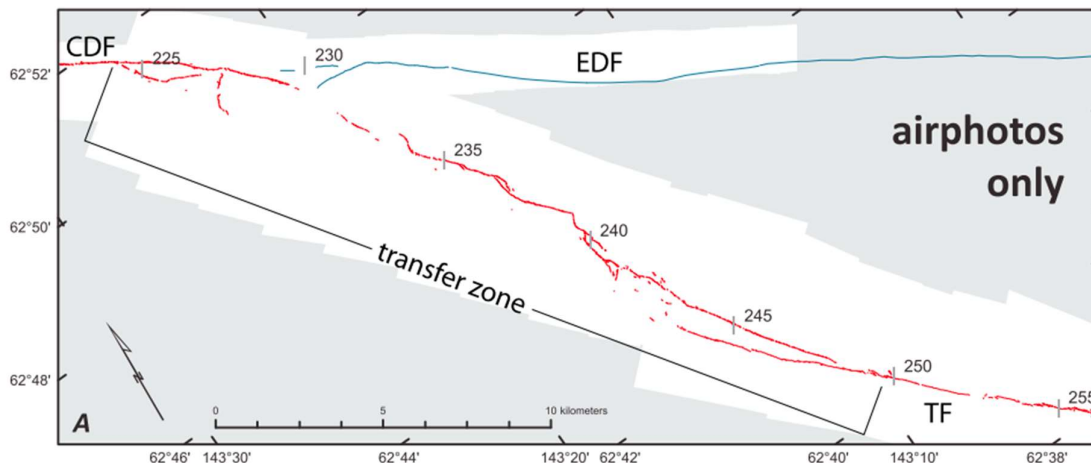
& 3; Grantz 1966; Haeussler *et al.* 2017). Siirros jatkuu Kanadan puolelle ja yhdistyy siellä Chatham Strait -siirrokseen (Schwartz *et al.* 2012; Choi *et al.* 2021). Itäinen Denali yhdistyy kaakossa Queen Charlotten siirrokseen Chatham Strait -siirroksen kautta (Choi *et al.* 2021). Itäinen Denalin siirros on pääasiassa oikeakätinen kulkuliukusiirros, mutta se koostuu vanhemmista ylityöntösiirroksista sekä nuoremista kulkuliukusiirroksista (Grantz 1966; Haeussler *et al.* 2017). Siirros on koko matkalta suhteellisen suora, ja sen kulku on noin 124° ja kaade lähes pysty (Grantz 1966; Schwartz *et al.* 2012). Siirroksen tarkkaa siirtymää ei tiedetä, mutta Allenin *et al.* (2022) arvio siirtymästä on 370–450 km.

3.2 Totschunda-siirros

Totschunda-siirros erkautuu itäisen Denalin siirroksen kulusta 17–19° kulmassa kohti kaakkoa ja yhdistyy itäiseen Denalin siirrokseen Duke River -ylityöntösiirroksella (Haeussler *et al.* 2004; Schwartz *et al.* 2012; Choi *et al.* 2021). Totschunda-siirroksen ja Fairweather-siirroksen yhteyttä on tutkittu niiden samansuuntaisuuden takia, mutta alueen jäätikköpeitteisyyden vuoksi mahdollista yhteyssiirrosta ei ole pystytty todistamaan (Haeussler *et al.* 2017).

Totschunda-siirros on 200 km pitkä oikeakätinen kulkuliukusiirros, jonka pääasiallinen kulun suunta on 136° (Haeussler *et al.* 2004; Schwartz *et al.* 2012; Choi *et al.* 2021). Itäisen Denalin siirroksen ja Totschunda-siirroksen risteyksestä alkaa 22–25 km pitkä siirtymävyöhyke, jossa Totschunda-siirroksen kulku on 152° (Kuva 3; Schwartz *et al.* 2012; Haeussler *et al.* 2004). Tällä matkalla esiintyy oikeakätisten kulkuliukusiirrosten lisäksi normaalisiirroksia (Schwartz *et al.* 2012).

Haeussler *et al.* (2017) arvioivat Totschunda-siirroksen siirtymän olevan 17–27 km välillä. Geokronologian ja termokronologian perusteella Totschunda-siirros on ollut aktiivinen ainakin viimeiset 25 Ma, mutta siirroksen alkuperäisestä muodostumisajasta ei kuitenkaan ole tarkkaa tietoa (Milde *et al.* 2013; Milde 2014; Haeussler *et al.* 2017). Tyynenmeren laatan kääntyminen 25,3 Ma sitten, ja siitä aiheutunut stressin suuntien vaihtuminen, on voinut olla osasy Totschunda-siirroksen syntyyn (Milde 2014).



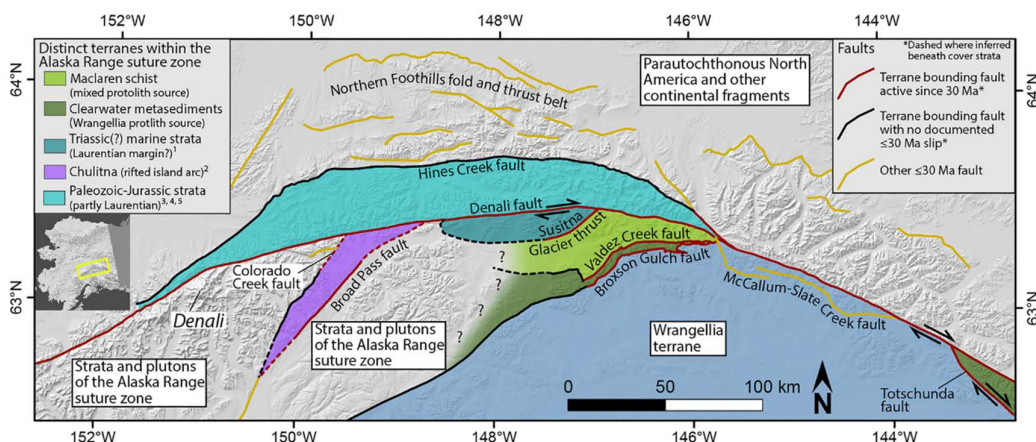
Kuva 3. Totschunda-siirroksen siirtymävyöhyke vuoden 2002 M_w 7,9 maanjäristyksen repeämästä (punaisella) kartoitettuna; CDF- Denalin siirros, EDF- Itäinen Denalin siirros, TF- Totschunda-siirros (Schwartz *et al.* 2012).

3.3 Denalin siirros

Denalin siirros on Denalin siirrossysteemin kaarevan osan eteläisempi siirros (Kuva 4; Hickman *et al.* 1978; Haeussler *et al.* 2017). Denalin siirros rajautuu idässä Totschunda-siirroksen ja itäisen Denalin siirroksen risteykseen ja lännessä suunnilleen Denali-vuoren kohdalle (Hickman *et al.* 1978; Haeussler *et al.* 2017; Choi *et al.* 2021).

Denalin siirros kulkee yksittäisenä oikeakätisenä kulkuliukusiirroksena, jonka pituus on noin 375 km (Grantz 1966; Hickman *et al.* 1978). Denalin siirroksen itäistä suoraa osaa kutsutaan Kimball-osioksi, jonka kulku on noin 120° (Haeussler *et al.* 2004; Schwatz *et al.* 2012; Allen *et al.* 2022). Siirroksessa on myös pystysuuntaista liikettä, sillä siirroksen matkalta on useita havaintoja pystysuorasta liikkeestä, joiden siirtymä on 3–5 m (Hickman *et al.* 1978).

Denalin siirros on siirrossysteemin nopeimmin liikkuva osa (Haeussler *et al.* 2017; Hickman *et al.* 1978). Viimeisimmän 11 ka sitten tapahtuneen jäätiköitymisen aikaisissa sedimenteissä horisontaalinen siirtymä vaihtelee 15–150 m välillä, mutta pisimmät siirtymät ovat 220–230 m (Hickman *et al.* 1978). Kokonaisuudessaan siirroksen siirtymä vaihtelee 370–450 km välillä (Haeussler *et al.* 2017; Allen *et al.* 2022).



Kuva 4. Denalin siirrossysteemin keskiosa, jossa pohjoisimpana mustalla Hines Creek -siirros ja keskellä punaisella Denalin siirros. Lisäksi Denalin siirroksen eteläpuolella näkyvissä ylityöntösiirroksat; Sutsina Glasier- ja Broad Pass -siirroksat (Waldien *et al.* 2023).

3.4 Hines Creek -siirros

Hines Creek -siirros sijaitsee Denalin siirrokselta noin 30 km pohjoiseen (Kuva 4; Hickman *et al.* 1978). Hines Creek -siirros eroaa Denalin siirrokselta idässä ja joko loppuu tai yhdistyy takaisin Denalin siirrokseseen Denali-vuoren kohdalla (Hickman *et al.* 1978; Haeussler *et al.* 2017; Benowitz *et al.* 2022). Hines Creek -siirros seuraa alueen litologista kontaktia Yukonin alueen ja Alaskan sutuurivyöhykkeen välillä (Grantz *et al.* 1966; Hickman *et al.* 1978). Tämän takia Hines Creek -siirroksen on tulkittu olevan alueen alkuperäinen siirros (Grantz *et al.* 1966).

Hines Creek -siirroksella on pituutta noin 300 km, ja se on kaateeltaan pysty oikeakätinen kulkuliukusiirros (Federschmidt 2014; Benowitz *et al.* 2022). Siirrokselta on havaittu kulkuliukusiirtymän lisäksi normaali- ja käänteissiirroksia kvartaariajalta (Federschmidt 2014). Seismisistä 2D-mittauksista on tulkittu, että Nenana-joen alueella Hines Creek -siirroksen kaade on 84–87° pohjoiseen (Federschmidt 2014).

Hines Creek -siirroksen siirtymä on muiden siirrossysteemin osien tapaan useita satoja kilometrejä (Grantz 1966). Hines Creek -siirroksen on tulkittu muodostuneen jurakaudella ennen liitukautista Cantwell-muodostumaa (Grantz 1966). Aktiivisimmillaan Hines Creek -siirros on ollut luultavasti keskipaleoseenina, sillä

alueelta on löytnyt paljon sen aikaisia vulkaniitteja (Hickman *et al.* 1978). Termokronologian perusteella Hines Creek -siirros on viimeksi ollut aktiivinen noin 80 Ma sitten (Benowitz *et al.* 2022). Myös siirroksen päällä oleva Cantwell-muodostuma viittaa siihen, että liike siirroksessa on pääosin pysähtynyt keskiliitukaudella (Hickman *et al.* 1978). Kenotsooisella ajalla on ollut pienempiä liikuntoja keskiplioseenista lähtien. Hines Creek -siirroksen alueen poimuakseleissa on havaittu taipumia sekä Cantwell-muodostumassa breksiotumista ja hierontaa (Grantz 1966; Hickman *et al.* 1978). Denali- ja Hines Creek -siirroksien välissä on havaittu vain muutamia aktiivisia tai äskettäin aktiivisia ylityöntösiirroksia, mutta alueen jäätikön laajuudesta johtuen havaintojen määrä on kuitenkin vähäinen (Fitzgerald *et al.* 2014).

3.5 Läntinen Denalin siirros

Läntinen Denalin siirros (myös Farewell-siirros) on jatkoa Denalin siirrokselle lännessä, missä se alkaa Denali-vuoren kohdalta ja yhdistyy lännessä Holitna-siirrokseen (Kuva 1; Grantz 1966; Redfield *et al.* 1993). Läntinen Denalin siirros on noin 350 km pitkä ja kulultaan lounaiskoillinen kaatuen kohti luodetta (Grantz 1966; Fitzgerald *et al.* 2014). Tarkkaa siirtymää läntisessä Denalin siirroksessa ei tiedetä, mutta sen oletetaan olevan useita satoja kilometrejä muiden siirrossysteemin kuuluvien siirrostensa tapaan (Grantz 1966).

4 Siirrossysteemin tektoninen kehitys ja kinematiikka

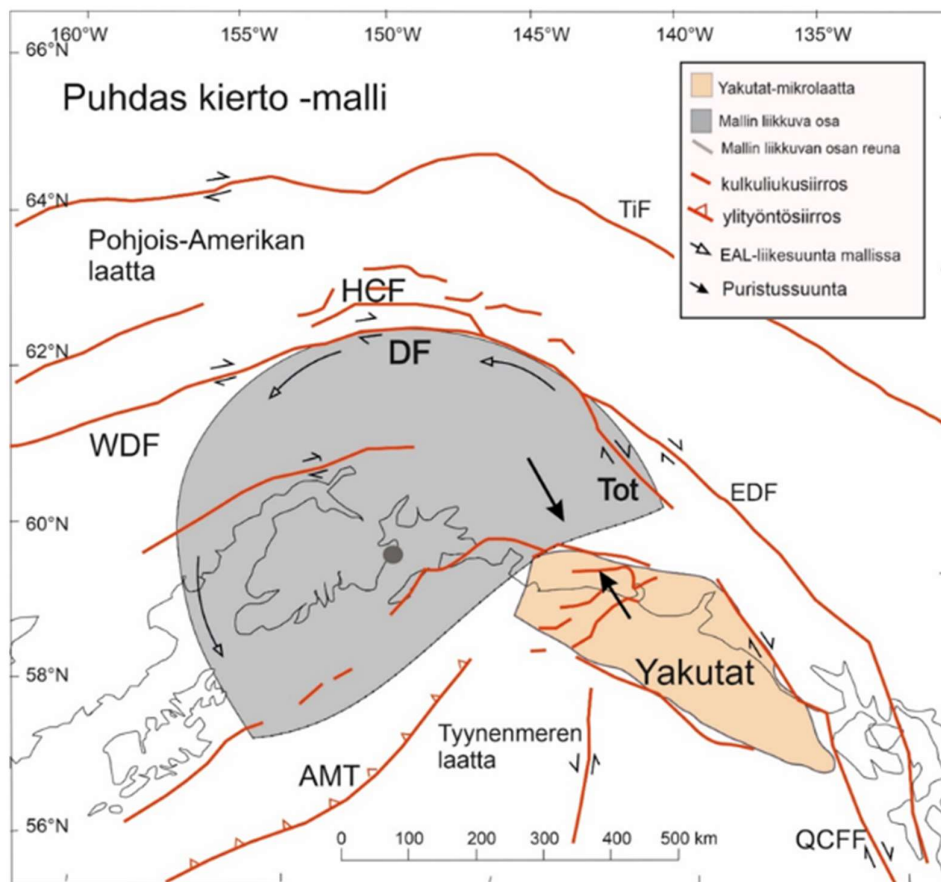
Denalin siirrossysteemiin vaikuttaa kolme litosfäärilaatta, joiden suhteellinen liike toisiinsa nähden aiheuttaa vaihtelevat kinemaattiset olosuhteet siirrossysteemin eri osissa. Useiden komponenttien takia Denalin siirrossysteemin eri siirroksilla on vaihtelevat siirtymänopeudet (Haeussler *et al.* 2017). Yleisesti tarkastellen Denalin siirrossysteemin siirtymänopeus hidastuu idästä länteen (Haeussler *et al.* 2017). Siirrossysteemin siirtymänopeus on pääasiallisesti vaihdellut 4–7 mm/a välillä kiihtyen kuitenkin kvartääriaikana (Haeussler *et al.* 2017). Itäisen Denalin siirtymänopeus on nykyisin ~5,3 mm/a ja Totschunda-siirroksen ~6–9 mm/a (Haeussler *et al.* 2017). Denalin siirroksen suoran Kimball-osion ~12,9 mm/a nopeus on siirrossysteemin suurin, mutta

siirtymänopeus hidastuu siirroksen kaarevalla osiolla nopeuteen $\sim 8\text{--}12$ mm/a (Haeussler *et al.* 2017). Läntinen Denalin siirros on siirrossysteemin hitaimmin liikkuva osa ja siellä siirtymänopeus on vain $\sim 3\text{--}5$ mm/a (Haeussler *et al.* 2017).

Tyynenmeren laatan liikesuunnassa on tapahtunut kenotsooisella ajalla kaksi merkittävää kiertymistä. Myöhäispaleogeenina 25,3 Ma sitten Tyynenmeren laatta kiertyi $8\text{--}15^\circ$ vastapäivään, joka aiheutti muutoksen Tyynenmeren laatan subduktiossa Pohjois-Amerikan laatan alle (Jicha *et al.* 2018). Muuttunut subduktiosuunta hidasti Tyynenmeren laatan työntymistä vaippaan ja siten hidasti magman tuotantoa subduktiovyöhykkeellä. Tämän seurauksena pohjoiselta Tyyneltämereltä Pohjois-Amerikan ja Tyynenmerenlaattojen saumasta ei löydy vulkaanisia tai plutonisia kiviä 26–18 Ma väliseltä ajalta (Jicha *et al.* 2018). 25,3 Ma sitten tapahtuneen kierron jälkeen Tyynenmeren laatan liikenopeus nousi 8,7 cm/a, kun se oli ennen kiertoa 5,7 cm/a (Jicha *et al.* 2018). Toinen merkittävä muutos Tyynenmeren laatan liikesuunnassa tapahtui 6 Ma sitten (Benowitz *et al.* 2022). Tämän muutoksen aikana Yakutat ja Tyynenmeren laattojen törmäyskulma suhteessa Pohjois-Amerikan laattaan kiertyi 18° vastapäivään (Benowitz *et al.* 2022).

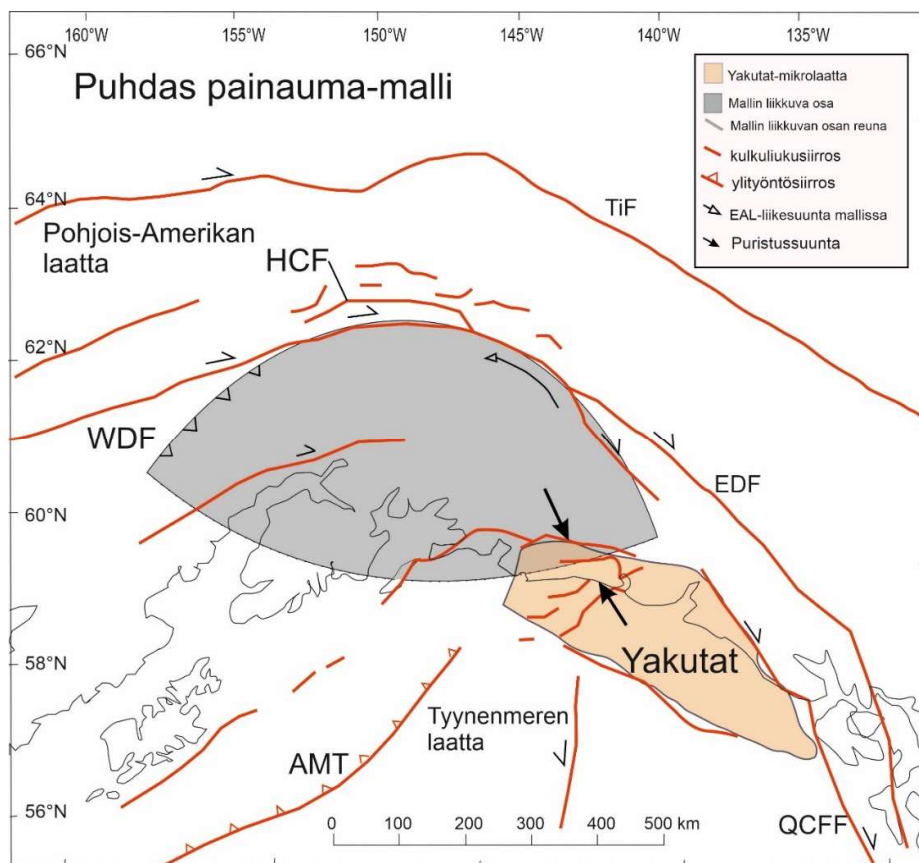
Yakutat-mikrolaatta on muodoltaan kiilamainen, ja sen paksuus vaihtelee luoteiskulman 15 km kaakkoiskulman 30 km (Enkelmann *et al.* 2015; Benowitz *et al.* 2022). Yakutat-mikrolaatta liikkuu luoteeseen Fairweather-siirrosta pitkin, kunnes subduktoituu Pohjois-Amerikan laatan alle Totschunda-siirroksen kohdalla (Haeussler *et al.* 2017). Yakutat matalan kulman subduktion on laskettu alkaneen noin 30 Ma sitten, ja sen keskimääräinen nopeus on 5,1 cm/a, mikä on hieman hitaampi kuin Tyynenmeren laatalle (Haeussler *et al.* 2017; Brueseke *et al.* 2019). Yakutat sanotaan subduktoituvan vinosti 6° kulmassa ensimmäiset noin 250 km (engl. *oblique flat slab subduction*), jonka jälkeen subduktiokulma kasvaa 20° ja laatta saavuttaa 150 km syvyyden Alaskan vuoriston alla (Enkelmann *et al.* 2015; Brueseke *et al.* 2019, Benowitz *et al.* 2022). Matalan subduktiokulman on tutkittu aiheuttavan orogeniaa Etelä- ja Keski-Alaskassa kaukana subduktiokontaktista (Haeussler *et al.* 2017; Waldien *et al.* 2022). Lisäksi Yakutat-mikrolaatan luoteinen subduktiosuunta synnyttää orogeniaa Luoteis-Alaskan rannikolla (Enkelmann *et al.* 2015; Waldien *et al.* 2022).

Etelä-Alaskan lohkon kinematiikasta on neljä erilaista teoriaa, joista vanhin on St. Amadin (1957) esittämä puhdas kierto -malli (engl. *pure rotation*). Tämä malli esittää lohkon vain kiertyvän vastapäivään Totschunda- ja Denalin siirrosta pitkin (Kuva 5; Hauessler *et al.* 2017). Kiertomalli sopii Totschunda- ja Denalin siirroksien siirtymänopeuksiin ja alueella tehtyihin maanmittausopillisiin mittauksiin (Haeussler *et al.* 2017). Tämä malli kuitenkin olettaa lohkon olevan ympyrän mallinen, joka aiheuttaa ongelmia todellisuudessa, sillä läntinen Denalin siirros ei mahdu mallissa oletettuun ympyrään (Haeussler *et al.* 2017).



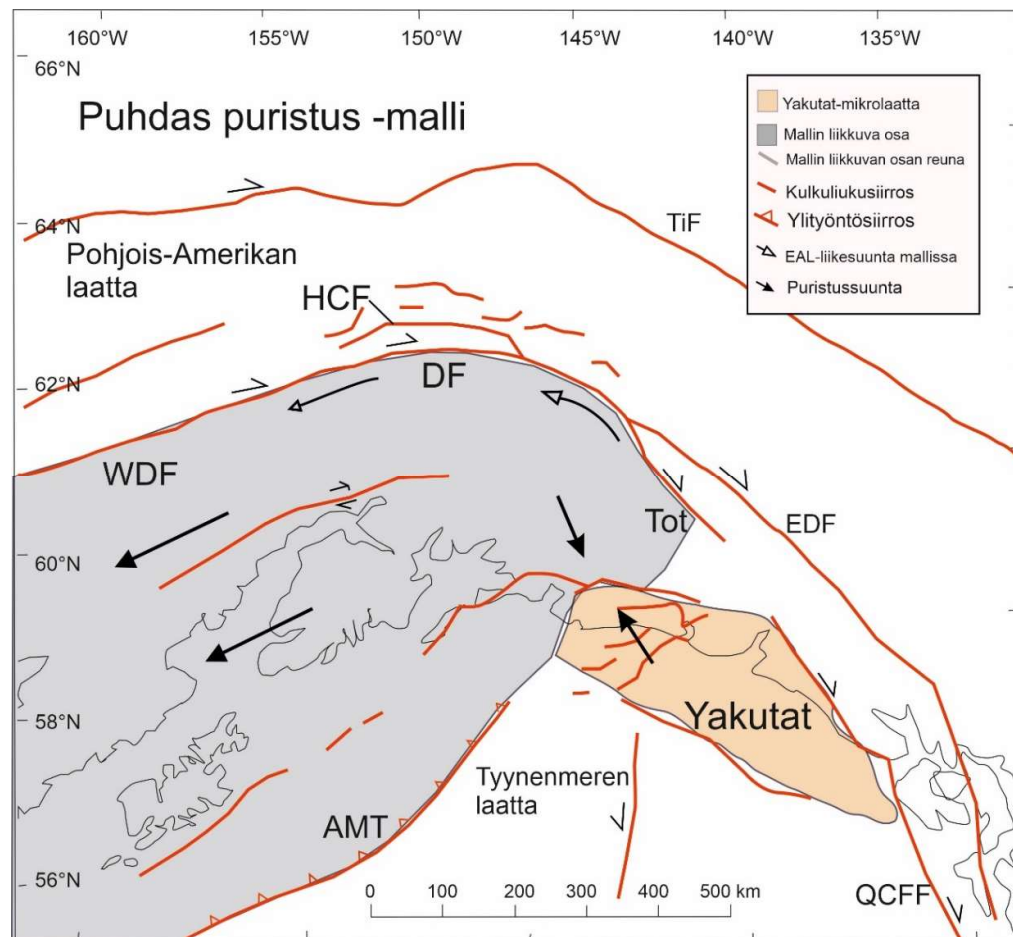
Kuva 5. Etelä-Alaskan lohkon kinematiikan puhdas kierto -malli. WDF- Läntinen Denalin siirros, DF- Denalin siirros, HCF- Hines Creek –siirros, Tot- Totschunda-siirros, EDF- Itäinen Denalin siirros, TiF- Tintinan siirrossysteemi, QCFF- Queen Charlotten & Fairweatherin siirrossysteemit, AMT- Aleutin syvänmerenhauta. Mukailten Haeussler *et al.* (2017).

Toinen malli on Meriaux *et al.* (2009) ehdottama puhdas painauma -malli (engl. *pure indentation*). Tässä mallissa lohkon liike muuttuu Totschunda-siirroksen kulkuliukusiirroksesta Denalin siirroksen kohdalla eriakseliseksi ja läntisen Denalin siirroksessa ylityöntösiirroksi (Kuva 6; Hauessler *et al.* 2017). Tämä malli selittää parhaiten siirtymänopeuden hidastumisen liikuttaessa siirrossysteemissä länteen (Meriaux *et al.* 2009; Hauessler *et al.* 2017). Mallissa on kuitenkin myös ongelmia, sillä Alaskan vuoriston tulisi mallin mukaan olla korkeimmillaan Denalin siirroksen kohdalla ja jatkuu lännessä läntisen Denalin siirroksen pohjoispuolella (Hauessler *et al.* 2017). Alaskan vuoristo ei kuitenkaan jatku läntisen Denalin siirroksen alueella, eivätkä siirrossysteemin eteläisten ylityöntösiirroksien siirtymänopeus vastaa puhdas painauma -mallissa vaadittua orogeniaa (Hauessler *et al.* 2017).



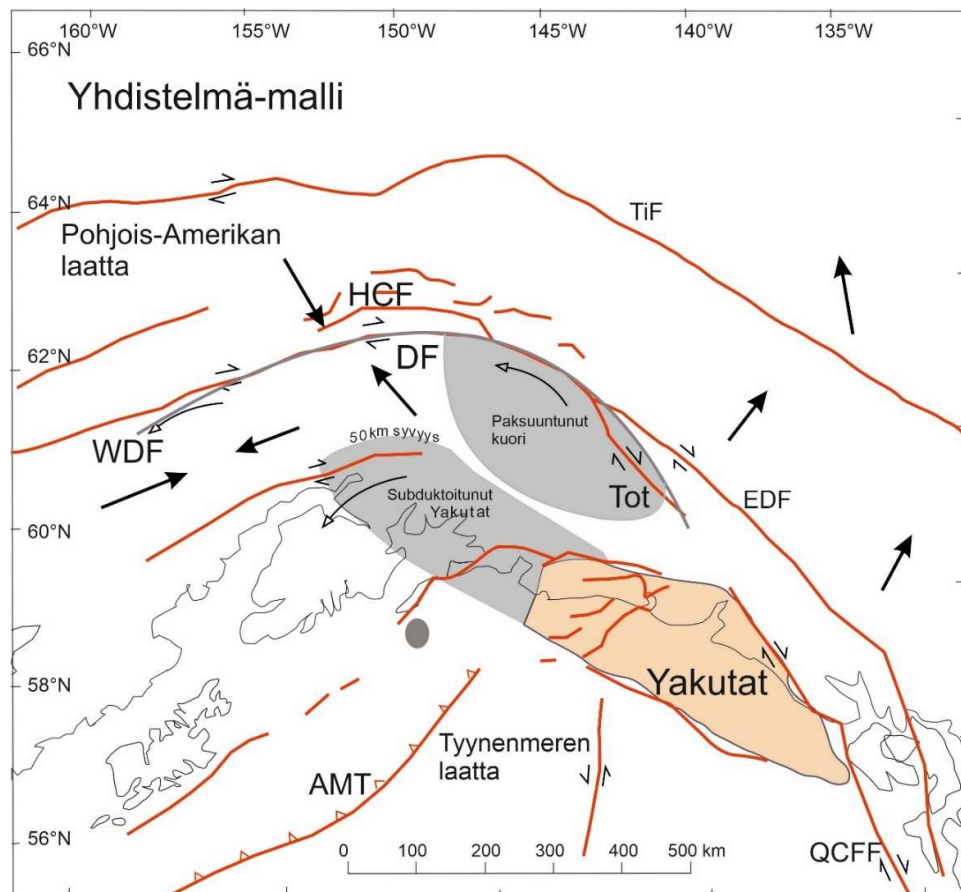
Kuva 6. Etelä-Alaskan lohkon kinematiikan puhdas painauma -malli. WDF- Läntinen Denalin siirros, DF- Denalin siirros, HCF- Hines Creek -siirros, Tot- Totschunda-siirros, EDF- Itäinen Denalin siirros, TiF- Tintinan siirrossysteemi, QCFF- Queen Charlotte & Fairweather siirrossysteemit, AMT- Aleutin syvänmerenhauta. Mukailten Hauessler *et al.* (2017).

Kolmas malli on Redfield *et al.* (2007) esittämä puhdas puristus -malli (engl. *pure extrusion*) (Kuva 7). Puhdas puristus -mallissa yhdistyneet alueet Länsi-Kanadassa ja Alaskassa liikkuvat ensin pohjoiseen ja sitten länteen (Redfield *et al.* 2007). Alueet liikkuvat litosfäärilaattojen suhteellisen liikkeen takia pitkin kulkuliukusiirroksia Beringinmerelle pois Alaskan mantereisilta alueilta (Hauessler *et al.* 2017). Tämän mallin ongelmaksi muodostuu lohkon liike Beringinmerelle, mistä ei ole havaintoja (Hauessler *et al.* 2017). Malli selittää parhaiten läntisen Denalin siirroksen kinematiikan, mutta siirtymänopeuden pitäisi mallin mukaan olla suurempi kuin se nykyisellään on havaittu (Hauessler *et al.* 2017).



Kuva 7. Etelä-Alaskan lohkon kinematiikan puhdas puristus -malli. WDF- Läntinen Denalin siirros, DF- Denalin siirros, HCF- Hines Creek -siirros, Tot- Totschunda-siirros, EDF- Itäinen Denalin siirros, TiF- Tintinan siirrossysteemi, QCF- Queen Charlotten & Fairweatherin siirrossysteemit, AMT- Aleutin syvänmerenhauta. Mukailten Hauessler *et al.* (2017).

Neljännessä ja uusimmassa teoriassa Hauessler *et al.* (2017) esittää yhdistelmämallia, jossa on puhdas puristus-, puhdas painauma- ja puhdas kierto -mallien komponentteja (Kuva 8). Tässä mallissa puhdas painauma -malli selittää siirrossysteemin siirtymänopeuksien hidastumisen länteen päin ja puhdas puristus -malli selittää läntisen Denalin siirroksen kinematiikan (Hauessler *et al.* 2017). Hauessler *et al.* (2017) esittävät, että Etelä-Alaskan lohkoissa täytyy olla pohjoiseen suuntautuvaa liikettä, joka muodostaa Northern Alaska Range -ylityöntösystemiä (myös Northern Foothills -ylityöntövyöhyke, kuva 4) Hines Creek -siirroksen pohjoispuolella. Lisäksi puhdas kierto -malli on paras oikeakätisten kulkuliukusiirroksien selittämiseen (Hauessler *et al.* 2017).

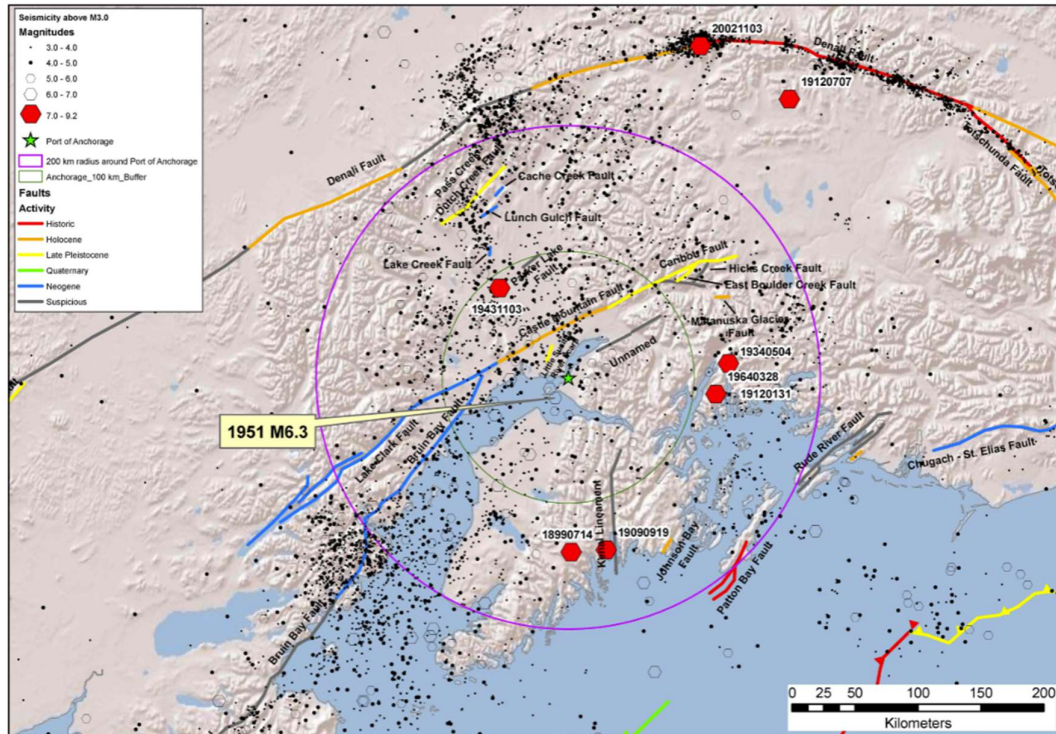


Kuva 8. Etelä-Alaskan lohkon kinematiikan yhdistelmämalli. WDF- Läntinen Denalin siirros, DF- Denalin siirros, HCF- Hines Creek -siirros, Tot- Totschunda-siirros, EDF- Itäinen Denalin siirros, TiF-Tintinan siirrossysteemi, QCFF- Queen Charlotten & Fairweatherin siirrossysteemit, AMT- Aleutin syvänmerenhauta. Mukailleen Hauessler *et al.* (2017).

5 Yhteiskunnalliset vaikutukset

Denalin siirrossysteemin siirrokset ovat olleet pitkään pääasiassa rauhallisia, eikä suuria maanjäristyksiä aiheuttavia liikuntoja ole tapahtunut säännöllisesti (Federschmidt 2014). Lähihistorian voimakkain maanjäristys siirrossysteemissä tapahtui 3.11.2002 ja oli magnitudiltaan (M_w 7,9) suurin Pohjois-Amerikassa tapahtunut maanjäristys yli 150 vuoteen (Kuva 9; Haeussler *et al.* 2004). Järistyksen aiheuttama repeämä siirrossysteemiä pitkin oli yli 340 km pitkä, vaakasuuntaisuuntainen siirtymä paikoin jopa 8,8 m ja pystysuuntainen siirtymä 4 m (Eberhart-Phillips *et al.* 2003). Järistystä edelsi useat pienemmät järistykset sekä yksi suurempi M_w 6,7 magnitudin järistys, joka tapahtui pääjäristyksen episentrumista 45 km länteen (Eberhart-Phillips *et al.* 2003). Jälkijäristyksiä M_w 6,7 ja M_w 7,9 järistyksille havaittiin yhteensä 16 000 kappaletta, joista useimmat sijaitsivat alle 10 km syvyydessä (Eberhart-Phillips *et al.* 2003).

2002 vuoden M_w 7,9 järistyksen episentrumi sijaitsi 283 km päässä Anchoragesta ja 135 km päässä Fairbanksin kaupungista (Hansen & Ratchkovski 2004). Järistyksestä ei aiheutunut kuolonuhreja, mutta siirroksen repeämän matkalla ja läheisyydessä sijaitsee useita teitä ja muuta tärkeää infrastruktuuria, kuten Trans Alaska -raakaöljyputki, jotka kärsivät pieniä vahinkoja (Hansen & Ratchkovski 2004). Toisaalta maanjäristyksiin on osattu Alaskassa jo varautua, sillä esimerkiksi Trans Alaska -raakaöljyputki on suunniteltu kestäämään yli 6 m vaakasuuntaisen liikkeen ja 1,5 m pystysuuntaisen liikkeen (Eberhart-Phillips *et al.* 2003).

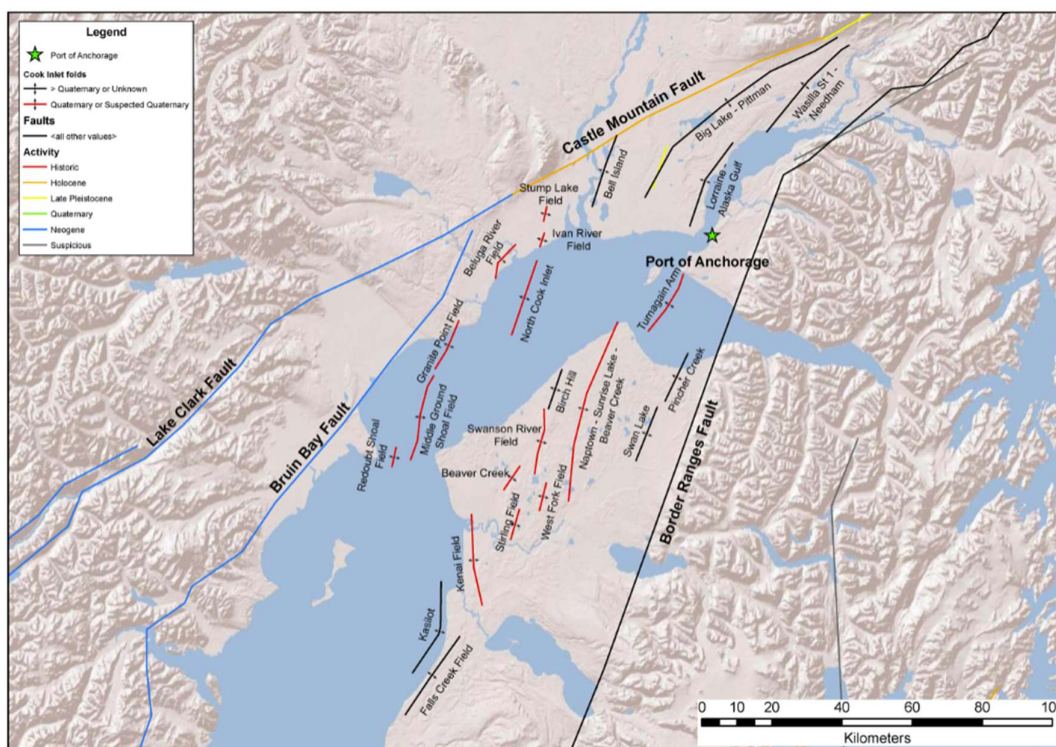


Kuva 9. Seisminen aktiivisuus ja merkittävät (yli M_w 3,0) järitykset vuosina 1898–2007 (Wong *et al.* 2010).

Totschunda-siirros oli osa repeämää vuoden 2002 maanjäristyksessä, vaikka episentrumi sijaitsi 225 km päässä Totschunda-siirroksen risteyksestä (Schwartz *et al.* 2012). Maanjäristyksen aiheuttaman repeämän on todettu jatkuneen Totschunda-siirrokseen, koska sen kulku on suotuisampi suhteessa stressin suuntaan verrattuna itäiseen Denalin siirrokseen (Dreger *et al.* 2004). Itäisen Denalin on tulkittu olleen viimeksi aktiivinen varhaismioseenina (Haeussler *et al.* 2017). Choi *et al.* (2021) mukaan itäiseen Denalin siirrokseen kohdistuva stressi ei ole oikean suuntaista, jotta siirros enää aktivoituisi. Lähellä itäistä Denalin siirrosta tapahtui 1.5.2017 kaksi suurta 6,2 ja 6,3 magnitudin maanjäristystä (Choi *et al.* 2021). Näiden kuitenkin tulkittiin lopulta olleen vain itäisen Denalin siirroksen vieressä samansuuntaisesti kulkevan Duke River-siirroksen uudelleen aktivoitumisesta johtuvia (Choi *et al.* 2021).

Denalin siirrossysteemin vaikutusalue on laaja ja sen alueella on yhteiskunnalle tärkeää infrastruktuuria, kuten moottoriteitä, junaratoja ja energialaitoksia sekä suunnitteilla oleva maakaasuputkihanke (Federschmidt 2014). Denalin siirrossysteemi ei kuitenkaan

ole Alaskan alueen ainut seismisiä hasardeja aiheuttava siirrossysteemi tai siirros (Wong *et al.* 2010). Etenkin osavaltion suurimman kaupungin Anchoragen sijainti on kriittinen Tyynenmeren laatan subduktion Wadati–Benioff -vyöhykkeen ja välittömässä läheisyydessä sijaitsevien Castle Mountain- ja Border Ranges -kulkuliukusiirroksien takia (Kuva 10; Wong *et al.* 2010). Wong *et al.* (2010) ovat ottaneet Denalin siirrossysteemin mukaan Anchoragen sataman seismisten riskien arviointiin, huolimatta sen sijainnista yli 200 km säteen ulkopuolella, koska siirrossysteemi pystyy tuottamaan yli M_w 7,5 maanjäristyksiä suhteellisen usein. Lisäksi Denalin siirrossysteemin avulla on mahdollista ymmärtää muita lähempänä asustusta sijaitsevia kulkuliukusiirroksia ja niissä tapahtuvia maanjäristyksiä aiheuttavia liikuntoja (Haeussler *et al.* 2004).



Kuva 10. Neogeneeni- ja kvartaariajan siirrokset Alaskan osavaltion Anchoragen lähellä (Wong *et al.* 2010).

6 Johtopäätökset

Denalin siirrossysteemi on monimutkainen järjestelmä siirroksia Tyynenmeren ja Pohjois-Amerikan laattojen sauman tuntumassa. Litologia siirrossysteemin ympäristössä koostuu vanhoista saarikaarista, jotka ovat Kordillieerien eri orogenioiden aikana puristettu nykyiseen muotoonsa. Alueelta voidaan määritellä kolme pääaluetta: Yukonin alue siirrossysteemin pohjoispuolella, Wrangellian alue eteläpuolella ja Alaskan sutuurivyöhyke näiden välissä.

Itäinen Denalin siirros on siirrossysteemin suora itäinen osa alkaen Totschundan risteyksestä. Itäinen Denalin siirros on oikeakätinen kulkuliukusiirros, mutta siinä on myös paikoittain ylityöntösiirroskomponentteja. Totschunda-siirros eroaa Denalin siirrossysteemin päälinjasta hieman alle 20° kulmalla kohti kaakkoa. Totschunda-siirros on nuorempi kuin itäinen Denalin siirros ja muodostunut noin 25,3 Ma sitten Tyynenmeren laatan kiertymisen seurauksena. Itäinen Denalin siirros yhdistyy Queen Charlotten siirrossysteemiin Chatham Strait -siirroksen kautta ja Totschunda-siirros mahdollisesti yhteysiirroksen kautta Fairweather-siirrokseen.

Siirrossysteemin keskiosassa on kaksi siirrosta, joista pohjoisempi on Hines Creekin siirros ja eteläisempi Denalin siirros. Hines Creek -siirros seuraa alueella olevia litologisia rajoja tarkemmin ja on sen seurauksena siirrossysteemin kaarevin osa. Stressisuuntien muuttumisen jälkeen Hines Creek-siirroksen liike hidastunut merkittävästi. Denalin siirros on Hines Creek -siirrosta nuorempi ja kulkee noin 30 km sen eteläpuolella. Denalin siirros on siirrossysteemin nopeimmin liikkuva osa.

Läntinen Denalin siirros on läntisin osa siirrossysteemiä ja sen kulku on koillislounainen ja siirros on koko matkalta suhteellisen suora. Liikenopeus on läntisessä Denalin siirroksessa koko siirrossysteemin hitain. Siirrossysteemin länsipäädystä läntinen Denalin siirros yhdistyy Holitna-siirrokseen.

Tyynenmeren ja Pohjois-Amerikan laattojen lisäksi myös Yakutat-mikrolaatta vaikuttaa Denalin siirrossysteemin ja sen ympäristön kinematiikkaan. Tyynenmeren laatan liikesuunta on muuttunut historiassa ainakin kahdesti, joka on vaikuttanut siirrossysteemiin kohdistuvan stressin suuntiin. Kolmen litosfäärilaatan suhteellisen

liikkeen vaikutus Etelä-Alaskan lohkon on aiheuttanut tutkijoissa erimielisyyksiä. Tämän takia Etelä-Alaskan lohkon kinematiikasta on muodostettu neljä eri teoriaa, joista mikään ei ole toistaiseksi aukottomasti pystynyt selittämään lohkon kinematiikkaa.

Denalin siirrossysteemi on historiansa aikana tuottanut lukuisia pieniä ja isoja maanjäristyksiä. Viimeisin suurin maanjäristys Denalin siirrossysteemissä tapahtui 3.11.2002, jolloin maanjäristyksen magnitudiksi mitattiin M_w 7,9. Vaikka siirrokset sijaitsevat kaukana asutuskeskuksista, niiden liikkeistä aiheutuvat maanjäristykset ovat olleet magnitudiltaan niin voimakkaita, että ne voivat tapahtuessaan aiheuttaa merkittävää vahinkoa yhteiskunnalle.

Lähteet

- Allen, W.K., Ridgway, K.D., Benowitz, J.A., Waldien, T.S., Roeske, S.M., Fitzgerald, P.G. and Gillis, R.J. (2022), “Neogene sedimentary record of the evolution of a translated strike-slip basin along the Denali fault system: Implications for timing of displacement, composite basin development, and regional tectonics of southern Alaska”, *Geosphere*, Vol. 18 No. 2, pp. 585–615, doi: 10.1130/GES02435.1.
- Amand, P.S. (1957), “Geological and geophysical synthesis of the tectonics of portions of British Columbia, the Yukon Territory, and Alaska”, *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 68 No. 10, pp. 1343–1370, doi: 10.1130/0016-7606(1957)68[1343:GAGSOT]2.0.CO;2.
- Benowitz, J.A., Roeske, S.M., Regan, S.P., Waldien, T.S., Elliott, J.L. and O’Sullivan, P.B. (2022), “Large-scale, crustal-block vertical extrusion between the Hines Creek and Denali faults coeval with slip localization on the Denali fault since ca. 45 Ma, Hayes Range, Alaska, USA”, *Geosphere*, Geological Society of America, Vol. 18 No. 3, pp. 1030–1054, doi: 10.1130/GES02466.1.
- Brueseke, M.E., Benowitz, J.A., Trop, J.M., Davis, K.N., Berkelhammer, S.E., Layer, P.W. and Morter, B.K. (2019), “The Alaska Wrangell Arc: ~30 Ma of subduction-related magmatism along a still active arc-transform junction”, *Terra Nova*, Blackwell Publishing Ltd, Vol. 31 No. 1, pp. 59–66, doi: 10.1111/ter.12369.
- Choi, M., Eaton, D.W. and Enkelmann, E. (2021), “Is the Eastern Denali fault still active?”, *Geology*, Geological Society of America, Vol. 49 No. 6, pp. 662–666, doi: 10.1130/G48461.1.
- Dickinson, W.R. (2004), “Evolution of the North American Cordillera”, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 32, pp. 13–45, doi: 10.1146/annurev.earth.32.101802.120257.
- Dreger, D.S., Oglesby, D.D., Harris, R., Ratchkovski, N. and Hansen, R. (2004), “Kinematic and dynamic rupture models of the November 3, 2002 Mw7.9 Denali, Alaska, earthquake”, *Geophysical Research Letters*, American Geophysical Union, Vol. 31 No. 4, pp. 1–4 doi: 10.1029/2003GL018333.
- Eberhart-Phillips, D., Haeussler, P.J., Freymueller, J.T., Frankel, A.D., Rubin, C.M., Craw, P., Ratchkovski, N.A., *et al.* (2003), “The 2002 Denali fault earthquake, Alaska: A large magnitude, slip-partitioned event”, *Science*, Vol. 300 No. 5622, pp. 1113–1118, doi: 10.1126/science.1082703.
- Federschmidt, Sara E. (2014), "PALEOSEISMIC AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF THE HINES CREEK FAULT: DENALI NATIONAL PARK

- AND PRESERVE, ALASKA", Theses and Dissertations--Earth and Environmental Sciences. Paper 22. http://uknowledge.uky.edu/ees_etds/22
- Fitzgerald, P.G., Roeske, S.M., Benowitz, J.A., Riccio, S.J., Perry, S.E. and Armstrong, P.A. (2014), "Alternating asymmetric topography of the Alaska range along the strike-slip Denali fault: Strain partitioning and lithospheric control across a terrane suture zone", *Tectonics*, Vol. 33 No. 8, pp. 1519–1533, doi: 10.1002/2013TC003432.
- Grantz, A. (1966), "Strike-Slip Faults in Alaska", *U.S. Geological Survey Open-File Report*, pp. 88.
- Haeussler, P.J., Matmon, A., Schwartz, D.P. and Seitz, G.G. (2017), "Neotectonics of interior Alaska and the late Quaternary slip rate along the Denali fault system", *Geosphere*, Geological Society of America, Vol. 13 No. 5, pp. 1445–1463, doi: 10.1130/GES01447.1.
- Haeussler, P.J., Schwartz, D.P., Dawson, T.E., Stenner, H.D., Lienkaemper, J.J., Sherrod, B., Cinti, F.R., *et al.* (2004), "Surface Rupture and Slip Distribution of the Denali and Totschunda Faults in the 3 November 2002 M 7.9 Earthquake, Alaska", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 6B, pp. 30
- Hansen, R.A. and Ratchkovski, N.A. (2004), "Seismological aspects of the 2002 Denali fault, Alaska, earthquake", *Earthquake Spectra*, Vol. 20 No. 3, pp. 555–563, doi: 10.1193/1.1777236.
- Hickman, R.G., Craddock, C. and Sherwood, K.W. (1978), "The Denali fault system and the tectonic development of Southern Alaska", *Tectonophysics*, Vol. 47 No. 3–4, pp. 247–273, doi: 10.1016/0040-1951(78)90033-1.
- Mériaux, A. -S., Sieh, K., Finkel, R.C., Rubin, C.M., Taylor, M.H., Meltzner, A.J. and Ryerson, F.J. (2009), "Kinematic behavior of southern Alaska constrained by westward decreasing postglacial slip rates on the Denali Fault, Alaska", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 114 No. B3, pp. 1–19, doi: 10.1029/2007jb005053.
- Milde, E.R. (2014), "Using low-temperature thermochronology to constrain the role of the Totschunda fault in southeastern Alaskan tectonics" [M.S. thesis]: Syracuse, New York, Syracuse University, pp.127
- Milde, E., Fitzgerald, P., and Benowitz, J. (2013), "Applying low-temperature thermochronology to constrain the tectonic history of the strike-slip Totschunda fault system, southeastern Alaska", *Geological Society of America Abstracts with Programs*, Vol. 45, No. 7, pp. 163.
- Redfield, T.F., Scholl, D.W., Fitzgerald, P.G. and Beck, M.E. (2007), "Escape tectonics and the extrusion of Alaska: Past, present, and future", *Geology*, Vol. 35 No. 11, pp. 1039–1042, doi: 10.1130/G23799A.1.
- Ruppert, N.A., Ridgway, K.D., Freymueller, J.T., Cross, R.S., Hansen, R.A. (2008), "Active tectonics of interior Alaska: seismicity, GPS geodesy, and local geomorphology. Active

- Tectonics and Seismic Potential in Alaska”, *Geophysical Monograph Series*, vol. 179. pp. 109–133.
- Schwartz, D.P., Haeussler, P.J., Seitz, G.G. and Dawson, T.E. (2012), “Why the 2002 Denali fault rupture propagated onto the Totschunda fault: Implications for fault branching and seismic hazards”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 117 No. 11, pp. 25, doi: 10.1029/2011JB008918.
- Waldien, T.S., Lease, R.O., Roeske, S.M., Benowitz, J.A. and O’Sullivan, P.B. (2022), “The role of preexisting upper plate strike-slip faults during long-lived (ca. 30 Myr) oblique flat slab subduction, southern Alaska”, *Earth and Planetary Science Letters*, Elsevier B.V., Vol. 577, pp. 12, doi: 10.1016/j.epsl.2021.117242.
- Waldien, T.S., Roeske, S.M., Chatterjee, R., O’Sullivan, P.B. and Stockli, D.F. (2023), “Suture Reactivation, Slip Partitioning, and a Protracted Strike-Slip Rate Gradient in the Denali Fault System, Southern Alaska, USA”, *Tectonics*, John Wiley and Sons Inc, Vol. 42 No. 9, pp. 27 doi: 10.1029/2022TC007654.
- Wong, I., Dawson, T., Dober, M. and Hashash, Y. (2010), “Evaluating the Seismic Hazard in Anchorage, Alaska”, Conference paper, pp. 11.