

Eteläisen Päijänteen alueen harjujaksojen syntyhistoria

Maantiede

LuK-tutkielma

Anni Järvelä

16.6.2026

Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Tutkinto-ohjelma, oppiaine: Luonnontieteiden kandidaatti, maantiede

Tekijä: Anni Järvelä

Otsikko: Eteläisen Päijänteen alueen harjujaksojen syntyhistoria

Ohjaaja: Yliopistonlehtori Joni Mäkinen

Sivumäärä: 47 sivua

Päivämäärä: 16.6.2026

Nuoremman dryaskauden aikana Fennoskandian mannerjäätikön leviäminen ja sulaminen oli vaihtelevaa. Jäätikö ja sen sulamisvedet kuljettivat ja kasasivat sedimenttiä erityyppisiksi muodostumiksi. Eteläisen Päijänteen alueen muodostumien syntyolosuhteita on kuitenkin tutkittu vain vähän. Tässä tutkimuksessa selvitetään, millaisissa olosuhteissa eteläisen Päijänteen alueen harjujaksot ja muut jäätikkösyntyiset muodostumat ovat muodostuneet. Lisäksi tutkitaan, voidaanko yhtä tai useampaa alueen harjua pitää saumaharjuna.

Tutkimuksessa käytetään Geologian tutkimuskeskuksen avoimia paikkatietoaineistoja ja LiDAR-aineistoa, joiden perusteella tehdään geomorfologisia karttatulkintoja. Muodostumat, joita tutkimuksessa tarkastellaan ovat harjut, kallioperän uurteet, deltat, sandurit, lineaatiot ja kumpumoreenit. Muodostumien tarkastelussa otetaan huomioon muodostumien absoluuttinen ja suhteellinen sijainti sekä orientaatio. Tutkimuksessa tarkastellaan myös muodostumien maalajeja, joiden perusteella tulkitaan jäätikön sulamisvesien virtausdynamiikkoja.

Tutkimuksessa havaittiin, että mannerjäätikö on virrannut tutkimusalueen länsipuolella luode-kaakko-suuntaisesti, itäpuolella koillinen-lounas-suuntaisesti ja niiden välissä pohjoinen-etelä-suuntaisesti. Virtaussuunnat poikkeavat toisistaan, koska erilliset mannerjäätikön osat virtasivat itsenäisesti. Tutkimusalueen muodostumat muodostuvat jäätikkövirtojen suuntien mukaisesti. Muodostumien pohjoisosiin on kasaantunut karkearakeista sedimenttiä ja eteläosiin hienojakoista sedimenttiä, koska veden virtausvoima on suurempi lähellä virtauksen lähdeettä pohjoisessa. Tutkimusalueella olevina saumaharjuina voidaan pitää Kaukelassa sijaitsevaa harjua, Kelvennettä ja Pulkkilanharjua. Nämä harjut sijaitsevat aineistojen perusteella mahdollisesti erillisten jäätikön osien välissä, koska muodostumien suuntaukset ovat erilaiset harjun eri puolilla.

Avainsanat: Saumaharjut, harjut, jäätikkösyntyiset muodostumat, geomorfologia, deglasiaatio

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Jääkauden vaiheet ja vaikutukset	6
2.1	Nuorempi dryaskausi	6
2.2	Saumaharjut ja Salpausselät	9
2.3	Itämeren altaan vaiheet	11
3	Tutkimusalueen kuvaus	13
3.1	Aluerajaus ja topografiset ominaisuudet	13
3.2	Pohjavesialueet ja luonnonsuojelu	16
4	Aineistot ja menetelmät	17
4.1	Tutkimuksessa käytetyt aineistot	17
4.2	Aineistojen visualisointi- ja analyysimenetelmät	18
5	Tulokset	20
5.1	Harjut	20
5.2	Uurteet	24
5.3	Deltat ja sandurit	25
5.4	Lineaatiot	27
5.5	Kumpumoreenit	28
6	Keskustelu	30
6.1	Harjujaksojen muodostumisolosuhteet	30
6.2	Tutkimusalueen saumaharjut	36
7	Johtopäätökset	41
	Lähteet	42

1 Johdanto

Saumaharjut muodostuvat Fennoskandian mannerjäätikön virtauskielekkeiden välisiin saumoihin jään sulamisvesien kuljettamasta lajittuneesta sedimentistä (Palmu ym. 2026). Tavanomaiset harjut taas muodostuvat mannerjäätikön sisäisten ja alaisten jäätikköjokien tunneleissa (Banerjee & McDonald 1975). Muodostumien suuntausten ja morfologisten piirteiden perusteella voidaan tulkita jäätikön virtaussuuntia ja sulamisvesien kulkureittejä.

Suomessa on kartoitettu useita saumaharjuja, joista valtaosa sijaitsee reunamuodostumien yhteydessä (Palmu ym. 2026). Eteläisen Päijänteen alueella saumaharjuksi on ehdotettu osaa Kaukelassa sijaitsevasta harjusta sekä Kelventeen harjuja, joka jatkuu saarina Kelventeen eteläpuolelle ja mantereelle Vähä-Äiniöön (Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 2017; Palmu ym. 2026). Tutkimus aiheesta on kuitenkin vähäistä, ja suurin osa saumaharjuja käsittelevistä tutkimuksista on ilmestynyt vasta viime vuosina (Ahokangas 2019; Ahokangas ym. 2020; Palmu ym. 2026). Saumaharjun käsite ei siis ole vakiintunut, ja aiempi tutkimus on keskittynyt pääasiassa yksittäisiin tapaustutkimuksiin tai niiden sijaintien suurpiirteiseen kuvailemiseen.

Saumaharjut, kuten suurin osa Suomen jäätikkösyntyisistä maaperän muodostumista, muodostuivat Veiksel-jääkauden viimeisen viileän jakson, nuoremman dryaskauden, aikana noin 12 000 vuotta sitten (Carlson 2010; Palmu ym. 2026). Jakson aikana ilmasto viileni nopeasti, minkä vuoksi sulamisvaiheessa olleen Skandinavian mannerjäätikön sulaminen hidastui tai pysähtyi, ja paikoittain jäätikkö levisi uudelleen. Nuoremman dryaskauden aikana muodostuivat myös Etelä- ja Kaakkois-Suomessa sijaitsevat Salpausselät (Donner 2010). Kolmesta reunamuodostumasta II Salpausselkä sijaitsee eteläisen Päijänteen alueella ja on vaikuttanut alueen muiden muodostumien muodostumiseen.

Fennoskandian mannerjäätikön sulamisesta ja laajenemisesta aiheutuneiden muodostumien syntymekanismit tunnetaan yleispiirteisesti (Banerjee & McDonald 1975; Clark ym. 2009; Wright 2015). Nuoremman dryaskauden aikana muodostuneiden eteläisen Päijänteen alueen muodostumien syntyhistoriaa ei kuitenkaan olla tutkittu

tarkasti. Vaikka alueen jäätikkösyntyisiä muodostumia on kartoitettu, tarkkaa selvitystä muodostumiseen johtaneista olosuhteista ei olla tehty.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, millaiset tekijät ovat vaikuttaneet eteläisen Päijänteen harjualueen muodostumiseen. Tutkimuksessa tarkastellaan harjujen lisäksi alueen kallioperän uurteita, deltoja ja sandureita, lineaatioita sekä kumpumoreenimuodostumia. Jäätikkösyntyisten muodostumien sijaintien ja maalajien perusteella tehdään tulkintoja muodostumien muodostumisvaiheen ympäristön olosuhteista. Olosuhteiden tulkinnessa otetaan huomioon mannerjäätikön ja sen sulamisvesien liikesuunnat ja liikkeiden voimakkuus sekä sedimentaatio. Tekijöiden perusteella päätellään, missä mannerjäätikön osat ovat sijainneet.

Tutkimuksessa yhdistetään aiemman tutkimuksen tuottamaa teoretietoa ja tutkimusalueeseen liittyviä paikkatietoaineistoja. Yleinen synty-ympäristön olosuhteiden tulkinta perustuu aineistojen visuaaliseen analyysiin. Tutkimuksessa vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Millaisissa olosuhteissa eteläisen Päijänteen alueen harjut ovat syntyneet?
2. Millä perusteella jotakin eteläisen Päijänteen alueen harjua voidaan pitää saumaharjuna?

2 Jääkauden vaiheet ja vaikutukset

2.1 Nuorempi dryaskausi

Nuorempi dryaskausi oli Veiksel-jääkauden loppuvaiheen kylmä ilmastovaihe eli stadiaali noin 12 900–11 700 vuotta sitten (Carlson 2010). Ilmastotapahtuman aikana Pohjoisen Atlantin alueen ilmasto viileni äkillisesti, kun taas eteläisellä pallonpuoliskolla ilmasto lämpeni, koska lämmön kulkeutuminen pohjoiseen väheni. Jakson aikana mannerjätikkö kuitenkin jatkoi sulamista lämpimämpien, mutta lyhyiden kesien aikana (Schenk ym. 2018). Ilmastovaihe sijoittuu lämpimän Bølling–Allerød-interstadiaalin ja nykyisen holoseenin välille (Palmu ym. 2026).

Ilmastovaiheen taustalla olevista syistä on esitetty useita teorioita, eikä sen syntymekanismeja tunneta varmasti (Carlson 2010). On kuitenkin yleisesti hyväksytty, että Pohjois-Atlantin merivirtojen kiertoliikkeen (engl. *Atlantic Meridional Overturning Circulation*, AMOC) hidastuminen vaikutti ilmaston viilenemiseen. Myöskään tämän ilmiön syitä ei tunneta tarkasti, mutta todennäköisenä syynä pidetään Agassiz-jääjärven purkautumisesta johtunutta Atlantin valtameren veden tiheyden vähenemistä (Teller ym. 2002; Broecker 2006). Agassiz-jääjärvi oli Pohjois-Amerikan suurin jääjärvi ja tietävästi ainoa, joka vapautti suuria määriä varastoitunutta vettä kerrallaan.

Laurentian mannerjätikön sulaessa Agassiz-jääjärvestä purkautui vettä itään Atlantin valtamerellä sijaitsevaan Saint Lawrence -lahteen Saint Lawrence -jokea pitkin (Teller ym. 2002). Nuorempaa dryaskautta edeltävä purkaus vapautti 9 500 km³ vettä (Teller ym. 2002). Äkilliset pulssimaiset purkaukset aiheuttivat veden kulkeutumista myös Meksikonlahdelle, Pohjoiselle jäämerelle ja Hudsoninlahdelle, minkä vuoksi ilmasto viileni näillä alueilla (Broecker 2006). Suolattoman ja suolaisen veden sekoittumisesta aiheutunut meriveden tiheyden väheneminen hidasti valtameren termohaliinikiertoa (Teller ym. 2002).

Normaalissa termohaliinikierrossa pintavesi lämpenee ja virtaa kohti napa-alueita (Sun & Bleck 2001). Kun vesi saavuttaa viileämmät alueet ja jäähtyy, painavaksi muuttuva viileä suolapitoinen vesi painuu kohti meren pohjaa. Syvävesi taas jatkaa virtaamista, kunnes se kumpuaa takaisin ylös ja kierto alkaa alusta. Kierron heikkeneminen aiheutti

meren pinnan lämpötilan nopean laskun, koska kevyempi suolaton vesi ei viiletessään uppoa raskaan suolaisen veden tavalla vaan jää suolaisen kerroksen päälle (Teller ym. 2002). Tällöin Pohjois-Atlantin syvän veden (NADW) muodostuminen heikkeni tai estyi eikä vesimassan normaalisti etelään suuntautuva liike työntänyt kevyttä lämpimämpää vettä takaisin pohjoiseen.

Merivirtojen heikkeneminen vaikutti myös ilmakehän virtauksiin (Rea ym. 2020).

Polaaririntaman suihkuvirtaus siirtyi etelämmäksi, mikä voimisti matalapaineiden muodostumista ja aiheutti kylmän ilman purkauksia erityisesti Välimeren alueella.

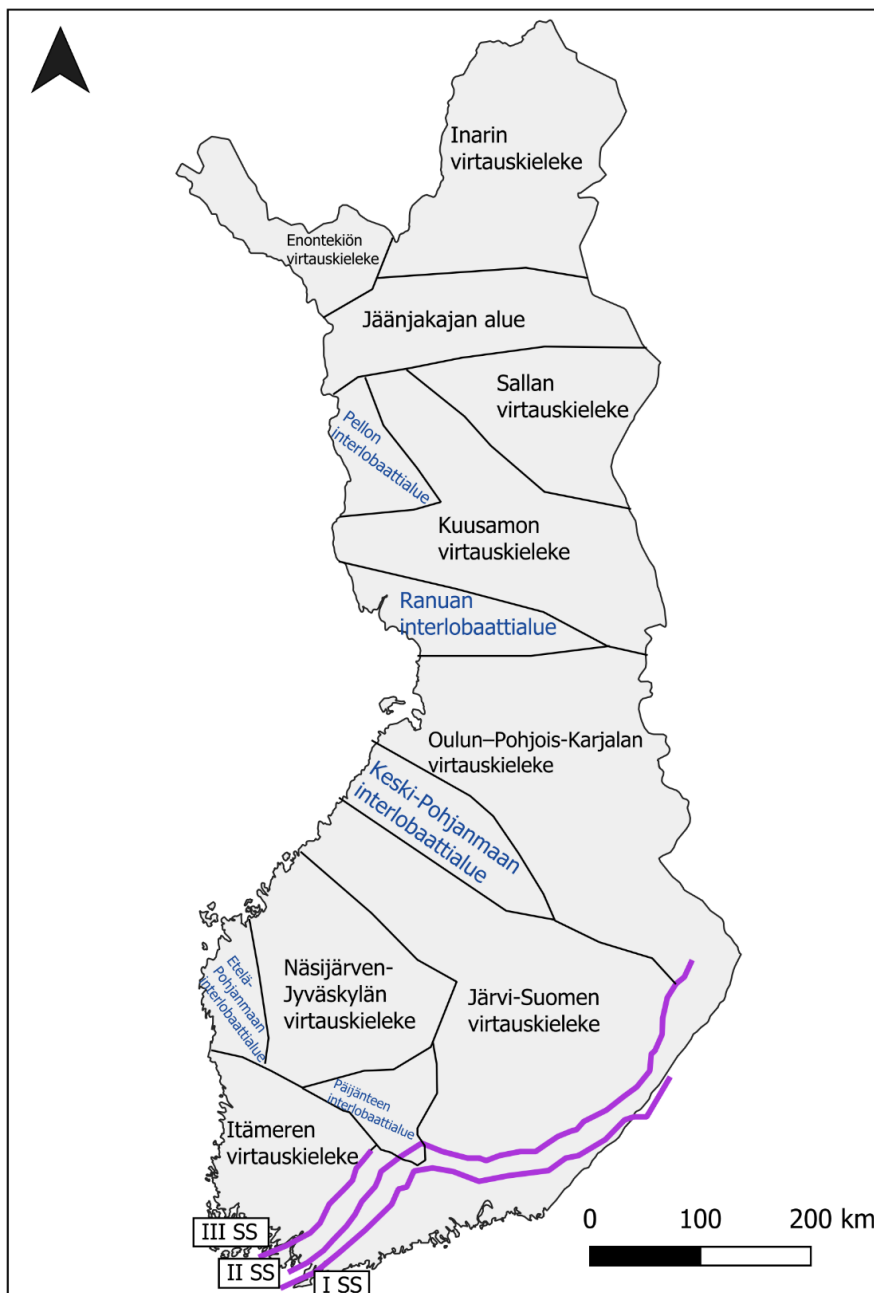
Pohjois-Atlantilla laaja merijää aiheutti myrskyjen siirtymistä kohti etelää, koska meren ja ilmakehän välinen lämmönvaihto heikkeni ja pohjoiset alueet viilenivät voimakkaasti (Hofer ym. 2012). Samaan aikaan Fennoskandian mannerjäätikö oli topografinen este ilmavirtausten kululle itään, minkä lisäksi kylmän ilman aiheuttama pysyvä korkeapaine ohjasi ilmavirtauksia poispäin (Rea ym. 2020). Tämän vuoksi myrskyt ohjautuivat Atlantin valtameren rannikkoa pitkin Länsi- ja Etelä-Eurooppaan. Pohjois-Euroopan tasangolla muutokset tekivät alueen ilmastosta kuivan ja kylmän. Lisäksi lisääntyneen jää- ja lumipeitteen aiheuttama voimakas albedo viilensi ilmastoa entisestään, koska Auringon lämpösäteily ei absorboitunut maahan (Shakun & Carlson 2010).

Bølling–Allerød-interstadiaalin aikana Fennoskandian mannerjäätikö sulii, ja Suomen etelärannikko paljastui sen alta interstadiaalin loppupuolella noin 13 000 vuotta sitten (Palmu ym. 2026). Ilmaston viilentyessä mannerjäätikön sulaminen hidastui ja lopulta pysähtyi (Mangerud ym. 2023). Mannerjäätikön on tulkittu sulaneen eri alueilla 14–35 km (Palmu ym. 2026) ja joidenkin tulkintojen mukaan jopa 40–60 km nykyisen Salpausselkävyöhykkeen pohjoispuolelle (Rainio ym. 1986). Mannerjäätikön sulamisvaihetta ennen sen uudelleenleviämistä kutsutaan Heinolan deglasiaatioksi (Rainio & Johansson 2004).

Fennoskandian mannerjäätikö jakautui sulamisvaiheessa erillisiin virtauskielekkeisiin, jotka muodostivat yhtenäisesti liikkuvia jäätikövirtoja (Palmu ym. 2026; kuva 1).

Nuoremman dryaskauden aikana mannerjäätikö oli jakautunut ainakin kahdeksaan eri virtauskielekkeeseen (Punkari 1980; Ahokangas ym. 2021). Osa kielekkeistä, kuten Itämeren virtauskieleke ja Järvi-Suomen virtauskieleke muodostuivat jo edellisen

interstadiaalin aikana (Stroeven ym. 2016). Järvi-Suomen virtauskielekkeellä ja Itämeren virtauskielekkeellä esiintyi myös nopeita surge-tyyppisiä virtauksia, jotka kestivät koko nuoremman dryaskauden ajan (Palmu ym. 2026). Äkilliset virtaukset johtuivat mannerjäätikön pohjan nopeasta lämpenemisestä, joka lisäsi sulamisveden määrää ja vähensi kitkaa jäätikön ja maan välillä (Evans ym. 2006; Stroeven ym. 2016). Virtaukset päättyivät I Salpausselälle alueelle ja ovat mahdollisesti vaikuttaneet sen muodostumiseen.



Kuva 1. Suomen virtauskielekkeet ja interlobaattialueet nuoremman dryaskauden aikana. (Muotoiltu lähteistä Punkari 1980; Palmu ym. 2026)

Aktiivisesti viiranneiden virtauskielekkeiden väleissä sijaitsi passiivisempia interlobaattialueita, joilla jäätikön liikkeet olivat hitaita tai olemattomia (Palmu ym. 2021). Interlobaattialueilla jäätikön pohja oli mahdollisesti jäätynyt kiinni maahan, minkä vuoksi ne virtasivat ympäröiviä virtauskielekkeitä hitaammin. Mannerjäätikön jakautuminen aktiivisen jään ja passiivisen jään alueisiin vaikutti jäätikkösyntyisten muodostumien kehittymiseen, koska eri virtausvoimat kuljettivat ja kasasivat sedimenttiä eri tavoilla (Palmu ym. 2026).

2.2 Saumaharjut ja Salpausselät

Mannerjäätikön puskeva ja raahaava liike kuljetti ja kasasi maa-ainesta yhtenäisiksi muodostumiksi (Palmu ym. 2026). Myös jäätikön sulamisvedet kuljettivat sedimenttiä jäätikön osien välissä ja sen sisäisissä railoissa (Banerjee & McDonald 1975).

Muodostumien tyyppiin vaikuttaa myös se, muodostuvatko ne veden alle eli subakvaattisesti vai kuivalle maalle eli supra-akvaattisesti (Palmu ym. 2026).

Muodostuman tyyppin ja suunnan perusteella voidaan päätellä jään liikesuuntaa sekä sulamisen ja laajenemisen ajankohtia (Storrar ym. 2020).

Saumaharjut ovat glasifluviaalisia muodostumia eli ne muodostuvat jäätikön sulamisvesien kuljettamasta aineksesta (Banerjee & McDonald 1975; Palmu ym. 2026). Toisin kuin tavalliset mannerjäätikön sisäisten jokien virtauksien kasaamat harjut, saumaharjut muodostuvat virtauskielekkeiden tai jäätikön osien väliin. Niiden suunnasta ja pitkänomaisesta muodosta voidaan siis päätellä, missä jäätikön eri osat ja sulamisvesien kanavat ovat sijainneet (Storrar ym. 2020). Yleensä saumaharjut ovat yhdensuuntaisia jäätikön liikesuuntaan nähden. Kun useampi harju sijaitsee toistensa lähetyvillä peräkkäin, ne muodostavat laajoja kokonaisuuksia eli harjujaksoja (Palmu ym. 2026). Koska mannerjäätikkö oli jakautunut virtauskielekkeisiin ja niiden välisiin osiin myös ennen nuorempaa dryaskautta, saumaharjuja on voinut muodostua myös muina aikakausina (Punkari 1982; Hughes ym. 2015).

Harjuista on erotettavissa karkearakeisesta aineksesta koostuva harjuydin ja ydintä ympäröivä hienorakeisempi lievekerrostuma (Cummings ym. 2011). Harjuytimet koostuvat sorasta, joka on painonsa vuoksi lajittunut muodostuman alempiin kerroksiin. Karkearakeinen maa-aines kulkeutuu voimakkaiden sulamisvesivirtausten

mukana (Lewington ym. 2020). Lieveosat taas koostuvat kevyestä hiekasta, joka kulkeutuu laajemmalle alueelle pienemmällä voimalla. Sekalajitteinen moreenikerros harjun päällä tarkoittaa, että harjun muodostumisen jälkeen jäätikkö on edennyt sen päälle uudelleen (Palmu ym. 2026). Jäätikkö ei lajittele ainesta yhtä tehokkaasti kuin vesi, koska jään virtausvoima ei vaihtelee veden lailla.

Saumaharjut ovat tyypillisesti leveämpiä ja korkeampia kuin tavanomaiset harjut (Palmu ym. 2026). Niiden reunaosat voivat ulottua yli kilometrin levyisiksi vyöhykkeiksi, kuten 1,5 km leveä Jukajärven–Lehmon-saumaharjusysteemin alue. Suomessa suurin osa kartoitetuista saumaharjuista sijaitseekin Salpausselkien pohjoispuolella tai päättyy III Salpausselkään ja Pielisjärven reunamuodostumaan. Näillä alueilla jäätikkö suli ja levisi epätasaisesti (Donner 2010).

Salpausselät taas ovat mannerjäätikön pitkäaikaisen pysähdyksen seurauksena muodostuneita pitkiä reunamuodostumia (Palmu 2026). Ne muodostuivat Heinolan deglasiaation jälkeen, kun mannerjäätikön reuna pysyi paikallaan ja oskilloi. Virtaava jäätikkö kasasi maa-ainesta valleiksi sekä muotoili jo kerrostuneita sedimenttejä. Jäämassa myös kuljetti sisällään irtainta maa-ainesta, ja jäätikön reunan sulaessa etenkin kesäisin jäässä ollut aines kasaantui jään reunan edustalle (Evans ym. 2006; Schenk ym. 2018). Lisäksi jäätikön alla ja sisällä virranneet sulamisvedet kuljettivat sedimenttiä tunneleita pitkin jään reunalle. Salpausselät koostuvat pääosin sorasta ja hiekasta sekä osittain myös lajittumattomasta moreenista (Palmu ym. 2026).

Salpausselkien muodostumiseen vaikuttivat pääasiassa Itämeren virtauskieleke ja Järvi-Suomen virtauskieleke, jotka kanavoivat sulamisvesiä (Palmu ym. 2026). Lisäksi Oulun–Pohjois-Karjalan virtauskieleke vaikutti Salpausselkien jatkeena olevien reunamuodostumien muotoutumiseen. Salpausselkien muodostumisen kestoa ei tiedetä tarkkaan, mutta arvioidaan, että ne ovat kasaantuneet noin 1 200 vuoden kuluessa.

Salpausselkävyöhyke koostuu kolmesta Etelä-Suomen halki kulkevasta selänteestä, jotka ovat I Salpausselkä, II Salpausselkä ja III Salpausselkä. Ne ovat osa laajempaa koilliseen jatkuvaa reunamuodostumien ketjua (Mangerud ym. 2023). Koko vyöhykkeen pituus on noin 650 km, mukaan lukien Lounais-Suomen merialueella sijaitsevat

muodostumiin liittyvät saaret (Palmu ym. 2026). Saman muodostuman eri kohdat muotoutuivat hieman eri aikoihin (Hoek 2008; Palmu ym. 2026). Kokonaisuudessaan Salpausselistä nuorin on kuitenkin III Salpausselkä ja vanhin I Salpausselkä.

I Salpausselän ja III Salpausselän välissä sijaitsevan II Salpausselän muodostuminen alkoi noin 11 800 vuotta sitten, ja kesti noin 200 vuotta (Frydrych ym. 2025).

Muodostuminen päättyi samoihin aikoihin kuin Baltian jääjärvi purkautui ja veden pinnan taso laski (Palmu ym. 2026).

2.3 Itämeren altaan vaiheet

Mannerjäätikön muodostamat padot ja maanpinnan kallistumisesta aiheutuva epätasainen maankohoaminen säätelivät Itämeren kehitysvaiheita (Björck 1995; Palmu ym. 2026). Itämeren altaan vedenpinnan taso taas määritti, millaisia muodostumia mannerjäätikkö muodosti. Esimerkiksi deltat ja sandurit muodostuivat sulamisvesien kuljettamasta aineksesta, joka kasaantui vedenpinnan tasolle ja yläpuolelle (Lunkka ym. 2019).

Nuoremman dryaskauden päättymisen jälkeen Baltian jääjärvi purkautui ja vedenpinta laski 25–28 metriä (Lunkka ym. 2019). Jääjärvi purkautui Keski-Ruotsissa sijaitsevan Billingenin vuoren pohjoispuolen kautta noin 11 700 vuotta sitten (Palmu ym. 2026). Deltan pinnan tasosta voidaan päätellä muodostumisenaikainen veden pinna taso (Lunkka ym. 2019).

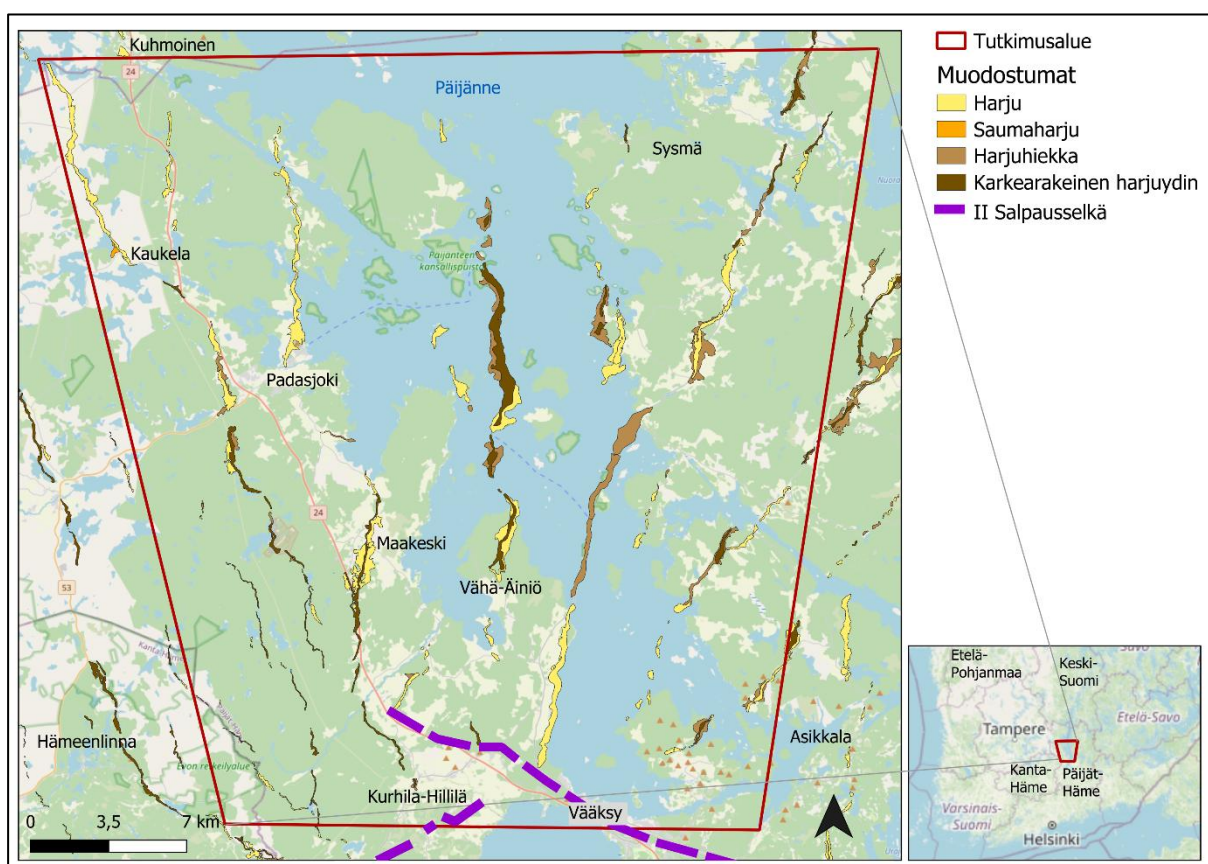
Baltian jääjärven purkauksen jälkeen alkoi Yoldiameren vaihe (Lunkka ym. 2019). Atlantin valtameren suolaista vettä kulkeutui Itämeren altaan alueelle Keski-Ruotsiin muodostuneen salmen kautta noin 11 000 vuotta sitten (Lunkka ym. 2019; Palmu ym. 2026). Veden muuttuminen suolaisemmaksi aiheutti irtaimen hienoaineksen koaguloitumista eli veden kemiallisten ominaisuuksien muuttuessa savihiukkaset tarttuivat toisiinsa ja muodostivat homogeenistä ainesta (Palmu ym. 2026). Ennen tätä savi oli vuosikerrallisesti kerrostunutta lustosavea. Sulava mannerjäätikkö kuitenkin tuotti suolatonta vettä altaaseen, joten allas pysyi murtovetenä. Myös III Salpausselkä muodostui tämän vaiheen aikana.

Yoldiameren vaiheen jälkeinen Ancylusjärven vaihe alkoi, kun Keski-Ruotsin Närken salmiyhteys kapeni maankohoamisen seurauksena ja altaan vesi alkoi patoutumaan Atlantin valtameren pinnan yläpuolelle (Palmu ym. 2026). Valtameren ja Ancylusjärven altaan korkeuseron kasvamista kutsutaan Ancylus-transgressioksi (Ristaniemi & Glückert 1987). Vaiheen aikana Ancylusjärveen kerrostui sedimenttejä, joita esiintyy pääosin suolattomassa vedessä. Vaikutukset kuitenkin rajoittuivat enimmäkseen Suomen lounaisiin osiin, jonne veden pinta ulottui (Palmu ym. 2026). Useat Salpausselkien vyöhykkeellä sijaitsevat järvet kuroutuivat omiksi altaikseen vaiheen aikana. Näihin järviin kuuluu myös Päijänne, joka muodostui omaksi altaakseen noin 9 500 vuotta sitten (Pajunen 2004). Ancylusjärven vaihetta seuraavan ja nykyisen Itämeren vaihetta edeltäneen Litorinameren vaiheen aikana meren rantaviiva ei enää ulottunut Päijänteen alueelle (Tikkanen & Oksanen 2002).

3 Tutkimusalueen kuvaus

3.1 Aluerajaus ja topografiset ominaisuudet

Suurin osa tutkimusalueesta sijaitsee Päijät-Hämeen maakunnassa, jonka lisäksi se ulottuu luoteessa Pirkanmaalle ja lounaassa Kanta-Hämeeseen (kuva 2). Alue sijaitsee Kuhmoisten, Sysmän, Padasjoen, Asikkalan ja Hämeenlinnan kuntien alueilla. Alueen päävesistö on Päijänne, jonka eteläpuoli kuuluu tutkimusalueeseen. Tutkimusalueen pinta-ala on noin 1067 km².



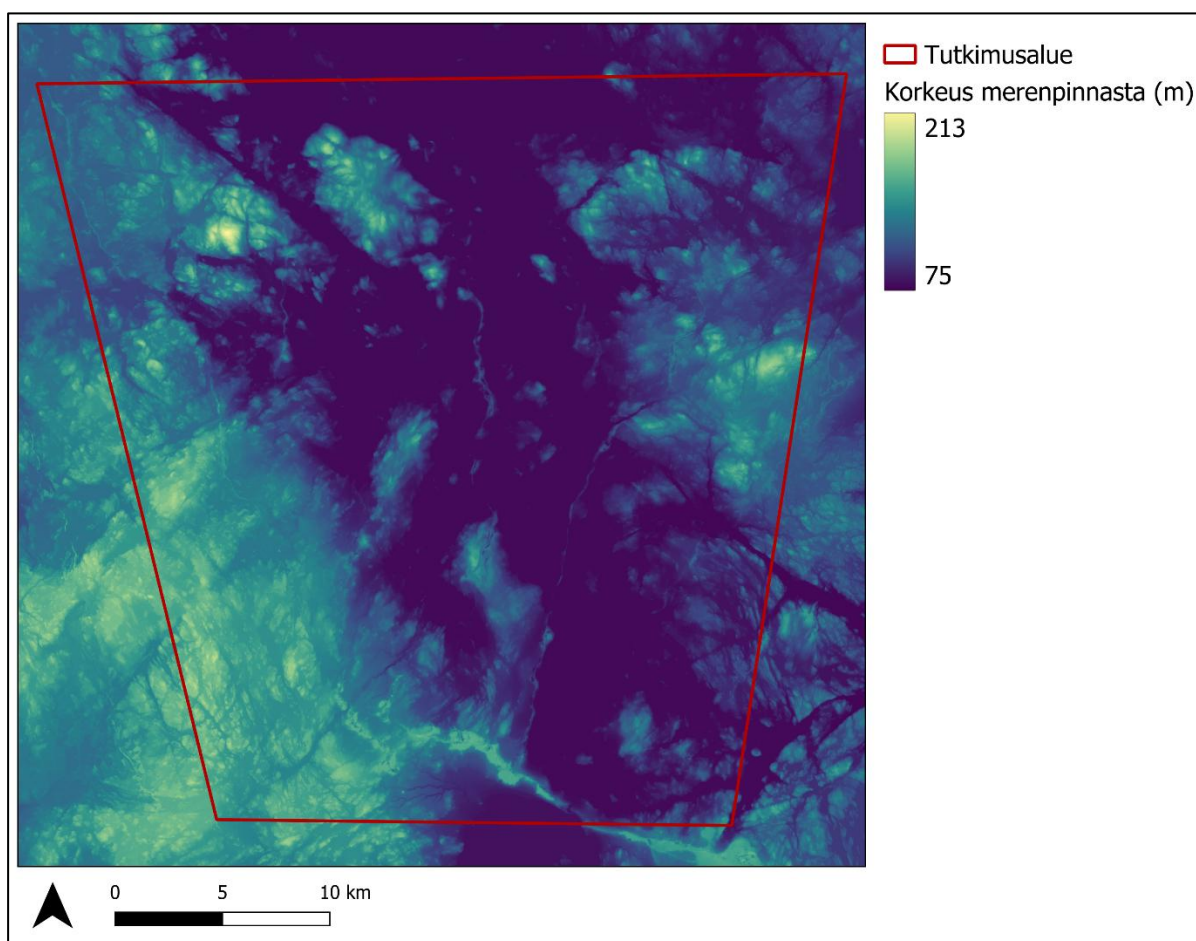
Kuva 2. Tutkimusalueen rajaus, harjujaksot ja II Salpausselkä. (Taustakartta: OpenStreetMap CC BY-SA 2.0)

Alueen harjumuodostumat ovat pitkiä. Tämän vuoksi osia tutkimusalueen sisäisistä harjujaksoista jää aluerajauksen ulkopuolelle. Koska tutkimuksessa keskitytään eteläisellä Päijänteellä ja sen välittömässä läheisyydessä sijaitsevien harjujen tutkimiseen, alueen reunaosien harjujen katkeaminen ei häiritse tutkimuksen tekemistä. Tutkimusalueen pohjoispuoli rajautuu sisältämään alueen luoteis- ja

koillisosassa sijaitsevat harjut. Etelässä tutkimusalue rajautuu Vääksyn kanavan eteläpuolelle, jonka läpi myös toinen Salpausselkä kulkee.

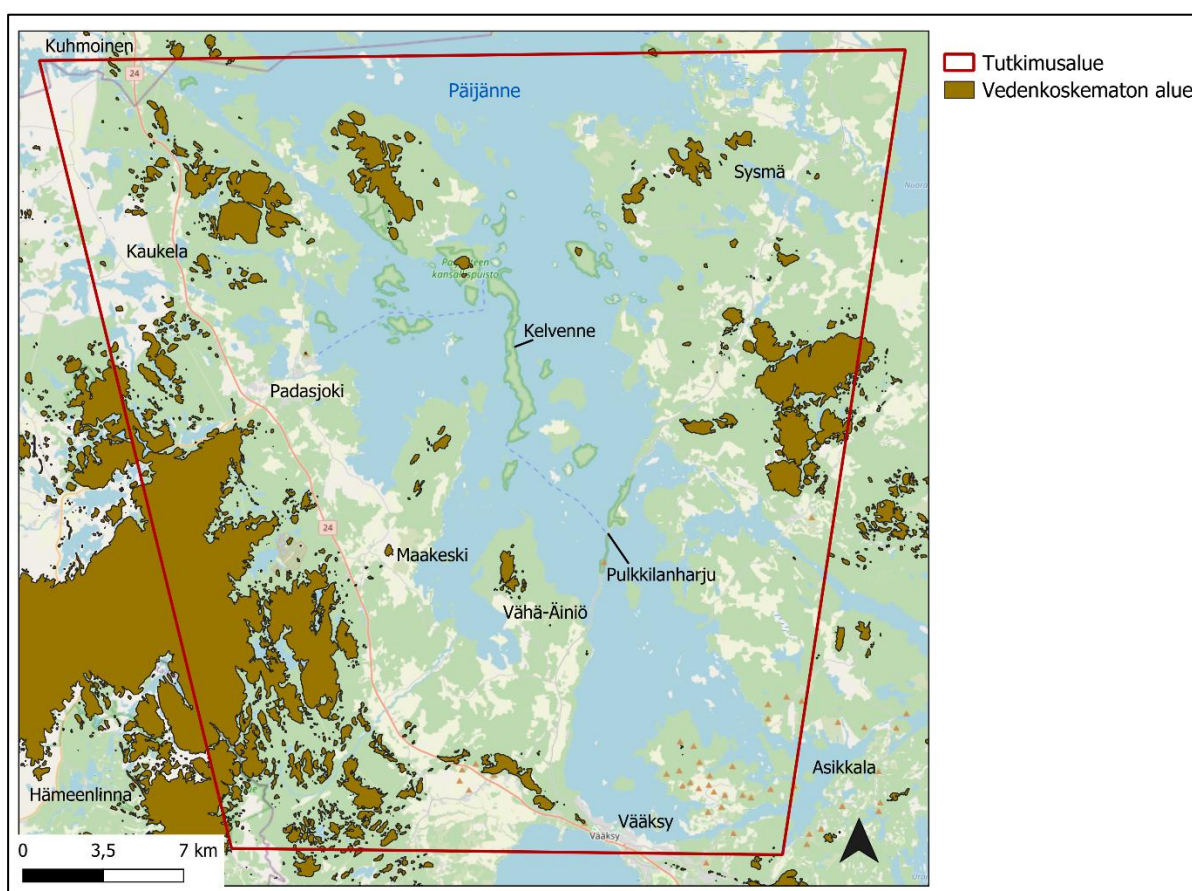
Korkeusero Päijänteen pinnan ja tutkimusalueen korkeimpien kohtien välillä on 138 metriä (kuva 3). Koska alueen maasto on melko vaihtelevaa, maanpinnan korkeudet merenpinnan tasoon nähden vaihtelevat paljon lyhyillä etäisyyksillä. Alueella on paljon saaria, joista suuri osa on pinta-alaltaan pieniä. Päijänteen pienillä saarilla ja rantaviivan läheisyydessä korkeudet merenpinnan tasosta ovat matalimmat.

Korkeimmat alueet taas sijaitsevat pääosin tutkimusalueen länsipuolella, mutta myös Päijänteen itäpuolella on paikoittain korkeita kohtia. Näillä alueilla topografian vaihtelut ovat pienipiirteisiä ja maan pinta nousee jyrkästi. Lisäksi Päijänteen veden pinnan taso on huomattavasti meren pintaa korkeammalla, vaikka se onkin tutkimusalueen matalin alue.



Kuva 3. Korkeusmalli tutkimusalueesta. (Lähde: Korkeusmalli 2 m 2019)

Suurin osa tutkimusalueesta oli veden peittämää ennen Litorinameren vaihetta (Muinaisrantojen havainnot 2013). Alueet, joiden korkeus meren pinnasta on vähintään noin 156 m taas jäivät kokonaan veden pinnan yläpuolelle (kuva 4). Esimerkiksi Asikkalan II Salpausselkään kuuluvan Aurinkovuoren korkeimmat kohdat ja Padasjokeen kuuluva Virmailansaari ovat vedenkoskemattomia alueita. Nykyisiin maanpinnan korkeuksiin vaikuttaa maankohoaminen, jonka nopeus tutkimusalueella on noin 5 mm vuodessa (Maannousu s.a.).



Kuva 4. Vedenkoskemattomat alueet tutkimusalueella. (Lähteet: Muinaisrantojen havainnot 2013; OpenStreetMap CC BY-SA 2.0)

Tutkimusalue sijaitsi Päijänteen interlobaattialueen ja Järvi-Suomen virtauskielekkeen välissä (Punkari 1980; Palmu ym. 2026). Alueen länsipuolella sijainnut Päijänteen interlobaattialue oli passiivisen jään alue Itämeren virtauskielekkeen ja Järvi-Suomen virtauskielekkeen välissä. Alueen itäpuolella sijainnut Järvi-Suomen virtauskieleke taas oli yhtenäisen jäätikkövirran muodostanut itsenäinen mannerjäätikön osa. Tutkimusalueen eteläpuolella ei enää ollut jäätikköä II Salpausselän muodostumisen

jälkeen (Pajunen 2004). II Salpausselkä on alueella melko rikkonainen eikä muodosta yhtenäistä selännettä.

3.2 Pohjavesialueet ja luonnonsuojelu

Harjualueella on useita merkittäviä pohjavesivarantoja (Pohjavesialueet 2021).

Pohjavesialueet sijoittuvat pääosin tutkimusalueen harjujen, deltojen ja sandurien sekä niiden läheisyydessä olevien hiekkakerrostumien kohdille. Huokoisuutensa vuoksi sora ja hiekka läpäisevät vettä helposti, ja pintavesi, sadevesi sekä lumien sulamisvesi pääsevät imeytymään sedimenttikerrosten läpi maahan. Pohjavettä käytetään esimerkiksi maataloudessa ja juomavetenä (Lachassagne 2020).

Tutkimusalueeseen kuuluu useita suojeltuja luontokohteita (Natura2000-alueet 2025). Euroopan unionin Natura 2000 –hanke keskittyy luonnon monimuotoisuuden tukemiseen turvaamalla lajien ja luontotyyppien elinympäristöjä. Tutkimusalueella on erityisten suojelutoimien (SAC) alueita sekä erityisiä suojelutoimia ja lintudirektiivin mukaisia erityisiä suojelutoimia (SAC/SPA) yhdistäviä alueita. Suojelutoimien vuoksi ihmistoiminta alueilla on rajoitettua, joten luontokohteet ovat säilyneet lähellä luonnonmukaista muotoaan.

Tutkimusalueen suurimmat suojellut alueet ovat Päijänteen alue ja Aurinkovuori, jotka ovat luokiteltu SAC-alueiksi (Natura2000-alueet 2025). Päijänteen suojellulla alueella sijaitsee myös Päijänteen kansallispuisto. Alueella suojellaan yhtätoista eri luontotyyppiä, kuten kasvipeitteisiä silikaattikallioita ja puustoisia soita. Asikkalassa sijaitseva II Salpausselkään kuuluva harjumuodostuma, Aurinkovuori, on suojeltu sen geologisen ja kasvistollisen merkittävyyden vuoksi. Alue kuuluu myös valtakunnalliseen harjusuojeluohjelmaan. Näiden lisäksi tutkimusalueella on useita pienempiä suojelukohteita.

4 Aineistot ja menetelmät

4.1 Tutkimuksessa käytetyt aineistot

Tutkimuksessa käytetään Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) ylläpitämiä avoimia paikkatietoaineistoja. Tutkimusalueen harjuverkoston sekä deltojen, sandurien ja kumpumoreenimuodostumien kuvaamiseen käytetään Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat -aineistoa (2017). Aineisto on vektorimuotoinen ja koostuu polygoneista, jotka kuvaavat geomorfologian ja syntyprosessien perusteella luokiteltuja maaperän muodostumia. Lisäksi aineistoon kuuluu erillinen maaperän lineaatioita kuvaava viivamuotoinen karttataso.

GTK:n Uurteet-aineisto (2015) koostuu mannerjäätikön eri virtausvaiheiden aikana muodostuneista kallion pinnan uurteista. Painava mannerjäätikkö ja sen mukana kulkeutuneet kivenlohkareet ja muu irtain sedimentti raahautuivat kallioperää pitkin ja raapivat kallioon pitkittäisiä uria (Glasser & Bennett 2004). Havainnot ovat pistemuotoisia ja sisältävät uurteiden koordinaattimuotoiset sijaintitiedot sekä uurresuunnan. Aineisto perustuu eri organisaatioiden maaperä- ja kalliokartoituksessa sekä malminetsinnässä tehtyihin havaintoihin.

Kirjauksia havainnoista on tehty eri vuosina, ja organisaatioiden kirjausmenetelmät eroavat toisistaan. Aineiston metatietojen mukaan ennen vuotta 2000 sijainti määritettiin kompassin ja kartan avulla, ja sen jälkeen GPS-laitteella, joten sijaintitietojen tarkkuus on vaihtelevaa. Lisäksi uurresuunnat esitetään viiden asteen tarkkuudella, eivätkä ne siten ole täysin täsmällisiä. Aineistossa on myös sekä erannon suhteen korjattuja, että korjaamattomia havaintoja. Tutkimuksessa ei kuitenkaan tarvita täysin täsmällisiä astelukuja, koska jään liikesuuntaa tarkastellaan yleisellä tasolla. Likimääräiset arvot siis riittävät jään liikesuunnan arviointiin. On myös mahdollista, että muita kuin jäätikön aiheuttamia kallioperän uurteita on merkitty aineistoon jääkaudenaikaisiksi uurteiksi. Myöskään yksittäisten uurteiden mahdollinen virheellisyys ei haittaa tutkimuksessa, koska jäätikön liikesuuntia voidaan päätellä laajemmin useiden uurteiden perusteella.

Geologian tutkimuskeskuksen Maaperä-aineisto (2015) kokoaa tietoa maalajien jakautumisesta Suomessa. Pohjamaan tyypiksi ilmoitetaan yhden metrin syvyydessä oleva maalaji ja pintamaan tyypiksi 0,4–0,9 metrin syvyydessä oleva maalaji. Käytetyn aineiston kartoitusmittakaava on 1:20 000, joka on kaikista GTK:n tarjoamista avoimista maaperäaineistoista tarkin mittakaava. Vaikka aineisto ei kata koko Suomea, se riittää koko tutkimusalueen maalajien määrittämiseen. On kuitenkin mahdollista, että havaintoja on yleistetty havaintokohtia laajemmille alueille, jolloin aineistoon merkitty maalaji saattaa poiketa luonnossa olevasta maalajista.

Tutkimuksessa käytetty monisuuntavarjostettu LiDAR-aineisto (2021) on saatu tutkimuskäyttöön Geologian tutkimuskeskukselta. LiDAR (engl. *light detection and ranging*) perustuu laserkeilauksella kerättyyn pisteaineistoon (Taylor 2020). Aineistoa keräävä laite lähettää nopeita lasersäteitä ympäristöön. Osuessaan kohteeseen, osa valosta palaa takaisin laitteeseen. Säteen kulkemiseen kuluneen ajan perusteella lasketaan etäisyys laitteesta kohteeseen. Kerätystä pistepilvestä koostetaan 3D-malleja, ja siten kolmiulotteinen kuvaus ympäristöstä.

Aineistoa käytetään tutkimuksessa sellaisten pienipiirteisten maanpinnan muotojen tarkastelemiseen, joita ei mallinneta muissa GTK:n paikkatietoaineistoissa. Esimerkiksi suppakuopille ei ole erillistä luokkaa jäätikkösyntyisiä muodostumia kuvaavassa aineistossa, mutta ne ovat nähtävissä LiDAR-kuvassa. Myös aaltojen aiheuttaman eroosion jäljet näkyvät rannoilla selkeästi. Maaperän muodostumia kuvaavan aineiston havaintoja voidaan myös varmentaa tunnistamalla ne LiDAR-kuvasta, koska havainnot saattavat olla yleistettyjä polygonimuotoisessa aineistossa. Lisäksi maaperän muotojen korkeuserot näkyvät LiDAR-kuvassa selkeästi, koska maanpinta on varjostettu monesta suunnasta ja kerätty pistepilvi on tiheä. Käytetyn LiDAR-aineiston horisontaalinen resoluutio on 2 m x 2 m ja vertikaalinen resoluutio 0,3 m.

4.2 Aineistojen visualisointi- ja analyysimenetelmät

Tutkimus perustuu maaperän muodostumia ja maalajeja kuvaavien paikkatietoaineistojen sekä LiDAR-aineiston järjestelmälliseen yhdistämiseen ja tulkitsemiseen. Eri aineistot visualisoidaan alueen harjuverkoston ja Il Salpausselän kanssa muodostumatyyppi kerrallaan. Visualisointien perusteella tehdään

geomorfologinen karttatulkinta muodostumien synty-ympäristöstä ja muodostumiseen johtaneista olosuhteista.

Analyysissa tarkastellaan muodostumien absoluuttista sijaintia ja orientaatiota sekä niiden kohdalla olevia maalajeja. Lisäksi tarkastelun kohteena ovat muodostumien sijainnit suhteessa muihin muodostumiin ja ympäristöön. Tutkimuksessa otetaan huomioon myös maanpinnan ja muodostumien korkeus merenpinnasta. Aineistojen käsittelemiseen käytetään QGIS 3.40.6 -paikkatieto-ohjelmistoa ja aineistot esitetään ETRS-TM35FIN-koordinaattijärjestelmässä. Ohjelmistoa käytetään myös tutkimuksessa käytettyjen kartta-asetelmien luomiseen. Tutkimusalue on rajattu ohjelmiston viivatyökalulla.

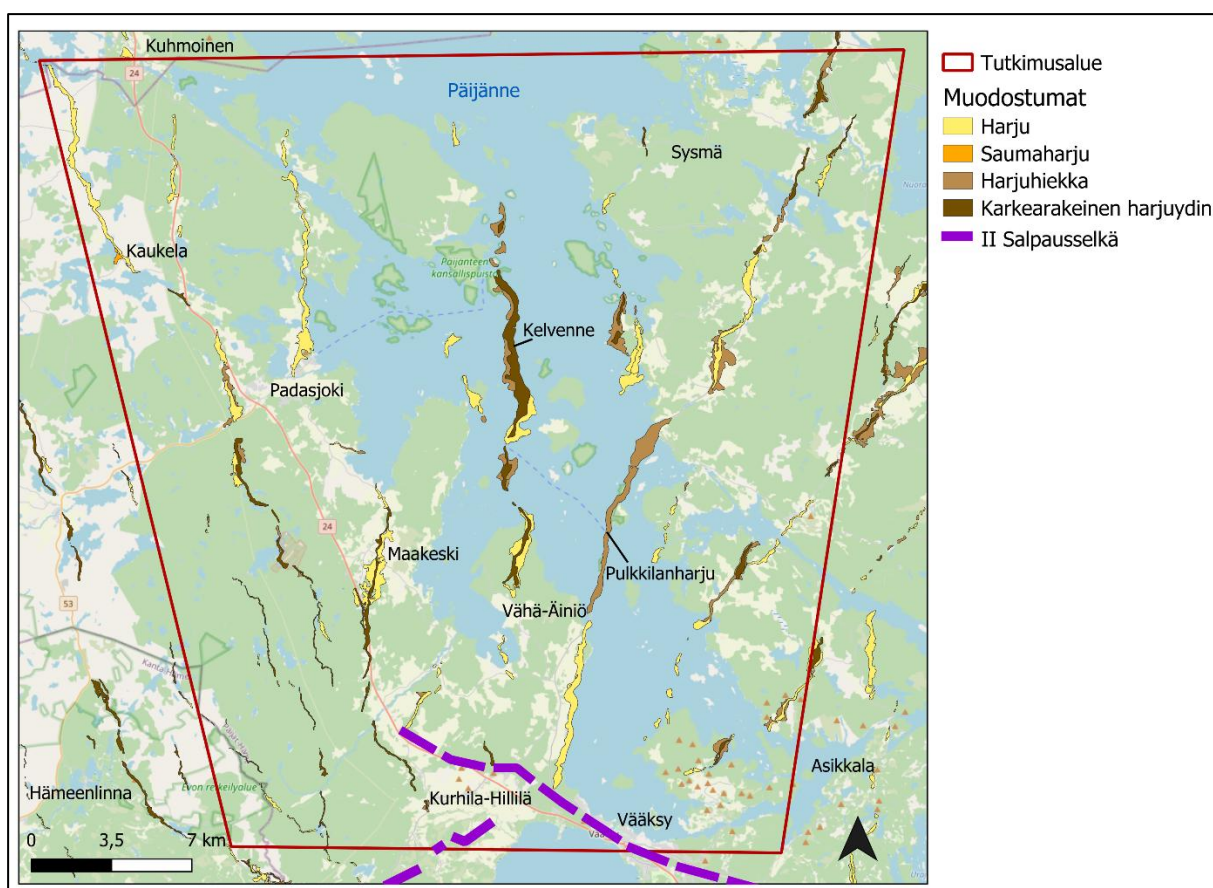
Harjuverkostojen visualisoimista varten Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat -aineisto on rajattu esittämään harjut, saumaharjut, harjuhiekat ja karkearakeiset harjuytimet. Aineisto sisältää myös muita harjuihin liittyviä muodostumia, mutta koska niitä ei ole tutkimusalueella tai sen läheisyydessä, ne on rajattu pois aineistosta ja siten myös kartta-asetelmista. Myös saman aineiston deltat ja sandurit, kumpumoreenimuodostumat sekä aineistoon kuuluva erillinen lineaatioita kuvaava viivamuotoinen karttataso visualisoidaan omina kartta-asetelmina. Lineaatiot-karttatasosta tarkastellaan vain kahta luokkaa, drumliineja ja drumlinoideja sekä glasiaalisia lineaatioita. Muiden luokkien lineaatioita ei ole tutkimusalueella tai niitä ei ole merkittävää määrää.

Uurreaineiston havaintopisteet on visualisoitu nuolina, jotka ovat säädetty osoittamaan kunkin pisteen uurresuunnan asteluvun mukaiseen suuntaan. Pistemuotoisten havaintojen uurresuunta on ilmoitettu mannerjäätikön tulosuunnan pohjoislukuna. Uurteiden sijainteja verrataan Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat -aineiston muodostumien sijainteihin.

5 Tulokset

5.1 Harjut

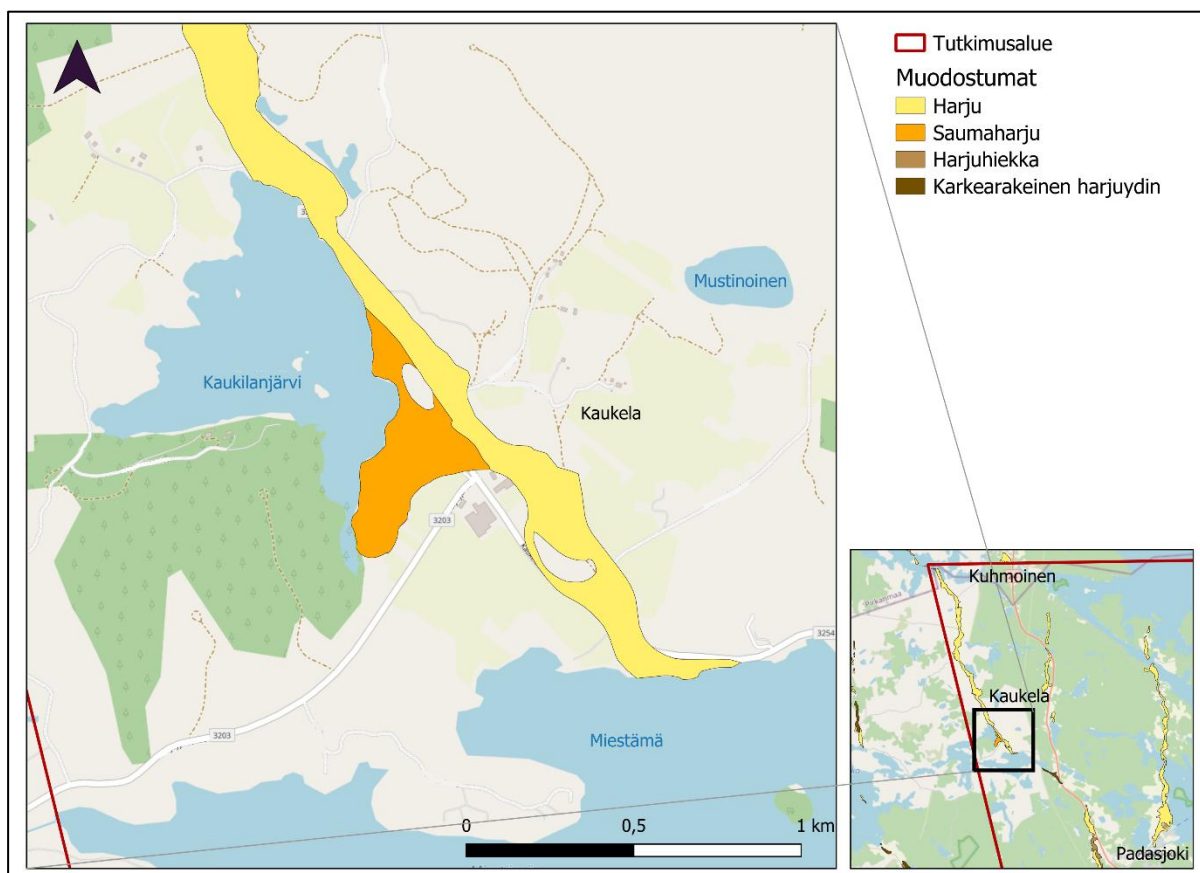
Koko tutkimusalueella on harjuja sekä kuivalla maalla että nykyisessä Päijänteen altaassa (kuva 5). Alueen harjut ovat suurimmaksi osaksi pitkiä, mutta katkonaisia. Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat -aineiston perusteella ei kuitenkaan voida aina määrittää, onko yksittäinen harju katkonainen vai onko kyseessä useampi peräkkäinen harju tai laajempi harjujakso. Aineistossa harjuihin liittyvät muodostumat luokitellaan harjuihin, saumaharjuihin, harjuhiekkoihin ja karkearakeisiin harjuytimiin.



Kuva 5. Tutkimusalueen harjuverkosto ja II Salpausselkä. (Lähteet: Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 2017; OpenStreetMap CC BY-SA 2.0)

Aineiston mukaan tutkimusalueella on yksi saumaharju (kuva 6). Saumaharju sijaitsee Padasjoen kuntaan kuuluvassa Kaukelassa, pidemmän Padasjoen lounaispuolelle jatkuvan harjujakson yhteydessä. Aineiston mukaan tutkimusalueella ei ole hautatutuneita harjuhiekkamuodostumia tai hautautuneen harjun karkearakeisia

ytimiä, joille on aineistossa omat luokat. Toisaalta näitä muodostumia on kartoitettu Suomessa vain muutamia.

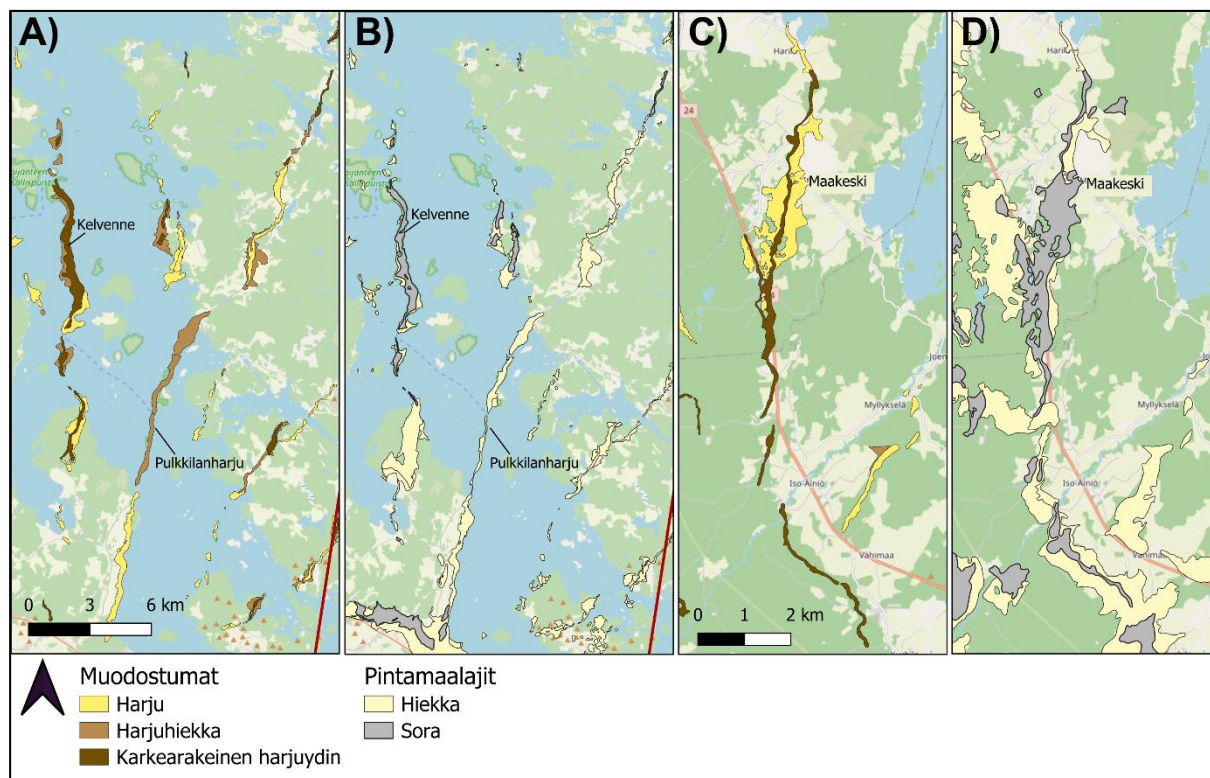


Kuva 6. Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat -aineiston saumaharju. (Lähteet: Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 2017; OpenStreetMap CC BY-SA 2.0)

Harjujen suuntaukset ovat erilaiset Päijänteen länsi- ja itäpuolilla. Järven länsipuolella harjut suuntautuvat luode–kaakko-suuntaisesti, ja sen itäpuolella koillinen–lounas-suuntaisesti. Tutkimusalueen keskellä sijaitseva Kelventeen saari taas on osa pitkää harjumuodostumaa, joka jatkuu saaren pohjoispuolelle pieninä saarina ja etelään mantereen puolelle Vähä-Äiniöön. Myös Padasjoen pohjoispuolella oleva harju ja Padasjoen kuntaan kuuluvassa Maakeskin kylässä oleva harju ovat lähes pohjois-eteläsuuntaisia. Maakeskin harjun eteläpuolinen jatke kuitenkin kaartuu itään päin ja päättyy II Salpausselän kohdalle. Sen pohjoispuolella oleva lyhyt harjuhiekkamuodostuma, joka on mahdollisesti osa samaa harjumuodostumaa, taas on lähes itä-länsisuuntainen.

Maaperäaineiston mukaan harjut koostuvat hiekasta ja sorasta (kuva 7B; kuva 7D).

Hiekka eli 0,2–2,0 mm:n lajittunut aines sijoittuu pääosin sekä harjujen että harjuhiekkan kohdalle. Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat -aineiston harjuhiekkan kohdalle on merkitty hiekkaa maaperäaineistossa.



Kuva 7. A) Kelvenne ja Pulkkilanharju. B) Kelventeen ja Pulkkilanharjun maalajit. C) Maakeskin harju. D) Maakeskin harjun maalajit. (Lähteet: Maaperä 2015; Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 2017; OpenStreetMap CC BY-SA 2.0)

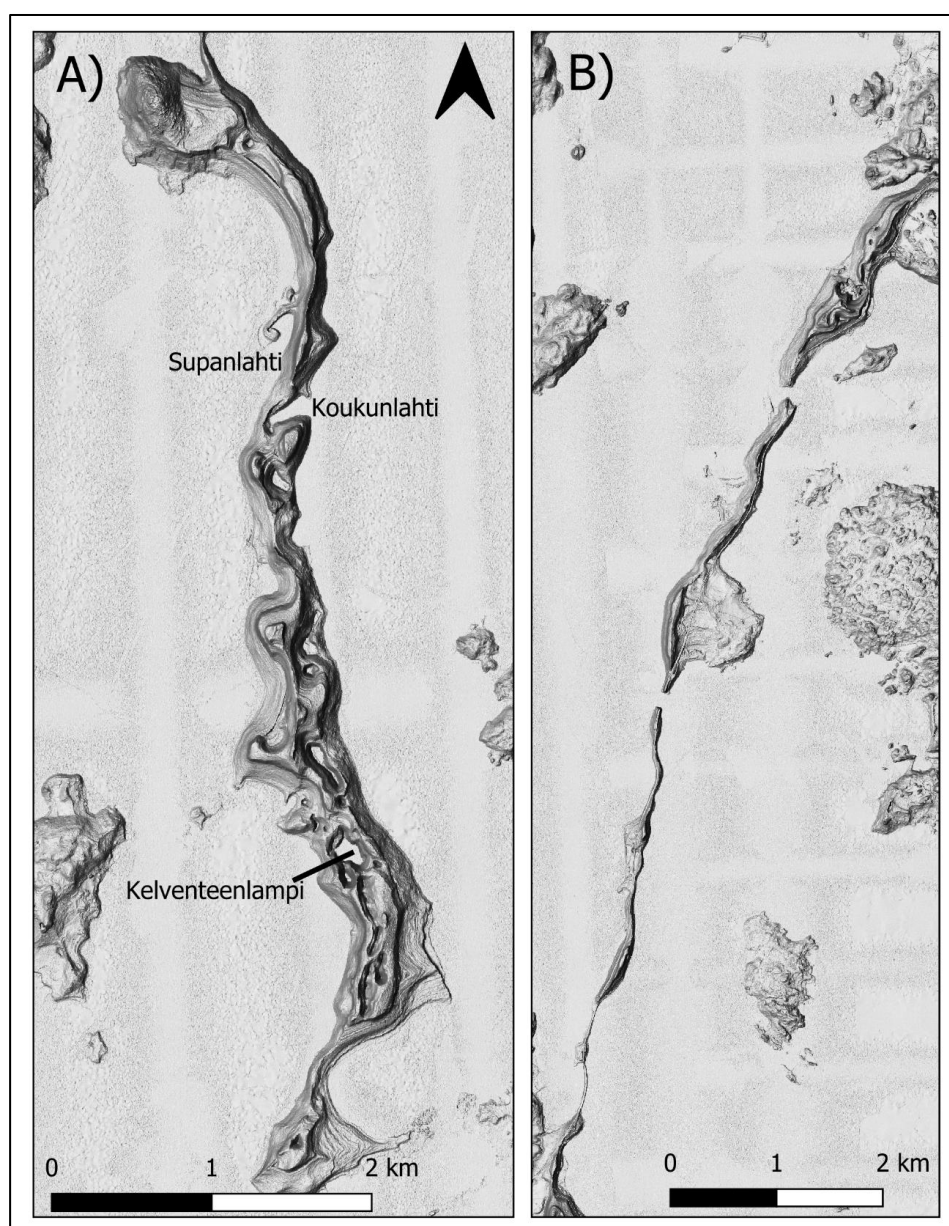
Harju-luokan kohdalle taas on merkitty vaihdellen hiekkaa ja soraa. Sora eli 2,0–20,0 mm:n lajittunut aines sijoittuu kuitenkin useimmiten karkearakeisten harjuytimien kohdalle. Soraiset alueet myös sijaitsevat usein hiekkaisten alueiden pohjoispuolella. Maalajien jakautuminen harjujen kohdilla ei kuitenkaan ole täysin täsmällistä harjuaineiston kanssa. Esimerkiksi Kelventeen eteläosassa ja Pulkkilanharjun itäpuolella harjun lisäksi karkearakeinen harjuydin on merkitty hiekaksi, eikä suuremman lajitekoon soraksi. Samanlaisia epätäsmällisyyksiä on myös muualla tutkimusalueella.

Harjujen lajittuneiden maalajien ohella muun tutkimusalueen pääasiallinen maalaji on hiekkamoreeni. Alueella on myös runsaasti kalliomaata, johon kuuluu sekä avokallio

että kohdat, joissa kallion päällä on alle 1 m kerrostunutta maalajia. Kalliomaata on tutkimusalueella eniten kohdissa, joissa korkeus meren pinnasta on suurin.

Tutkimusalueella sekä aineiston pohjamaalajit että pintamaalajit ovat samat, joten karttatasojen perusteella ei voida tarkastella eroja maaperän rakenteessa.

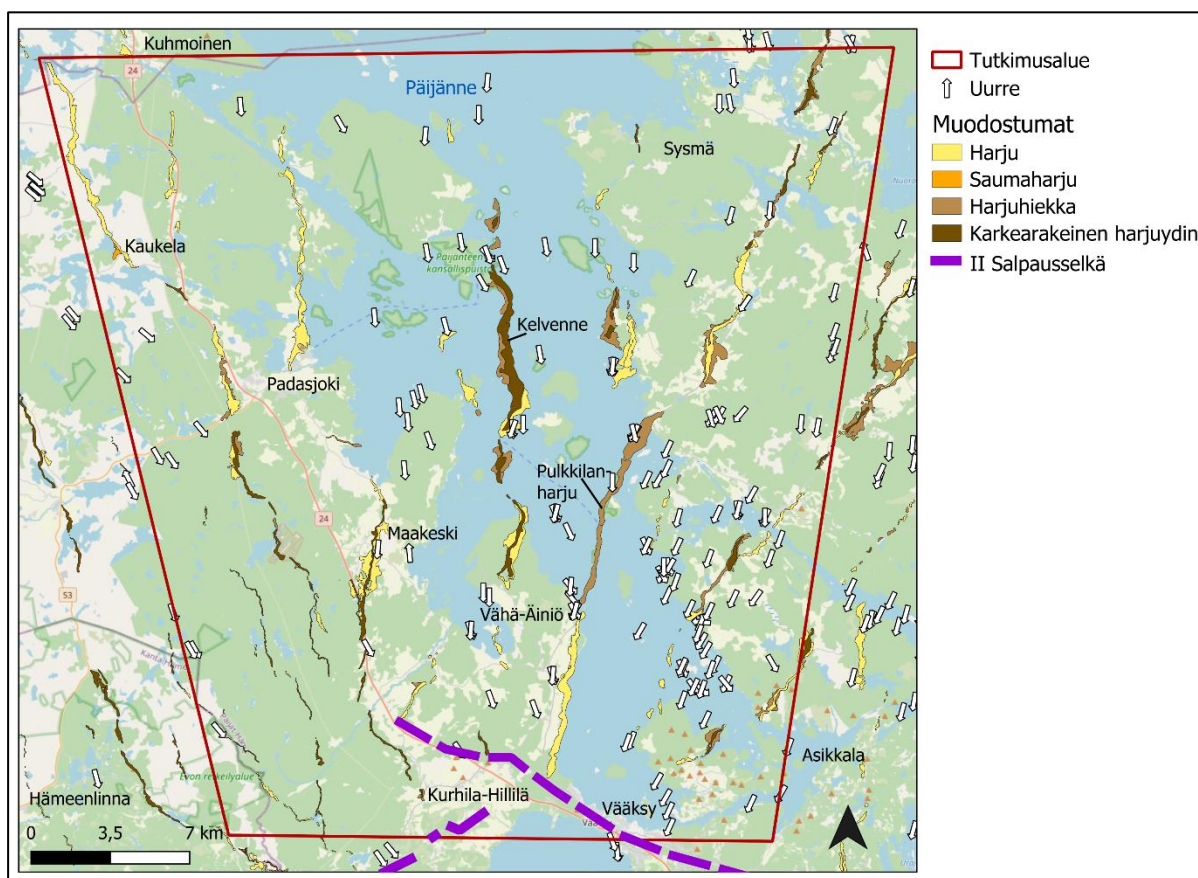
Kelventeen harjussa on useita suppia, kuten lahtia muodostavat Koukunlahti ja Supanlahti (kuva 8). Myös saaren keskiosissa on suppia, jotka ovat täyttyneet vedellä ja muodostavat suppalamia. Tutkimusalueen muilla harjuilla, kuten Pulkkilanharjulla taas on huomattavasti vähemmän suppia.



Kuva 8. A) LiDAR-kuva Kelventeestä, jossa on useita suppia. B) LiDAR-kuva Pulkkilanharjusta, jossa ei näy huomattavaa määrää suppia. (Taustakartta: LiDAR 2021)

5.2 Uurteet

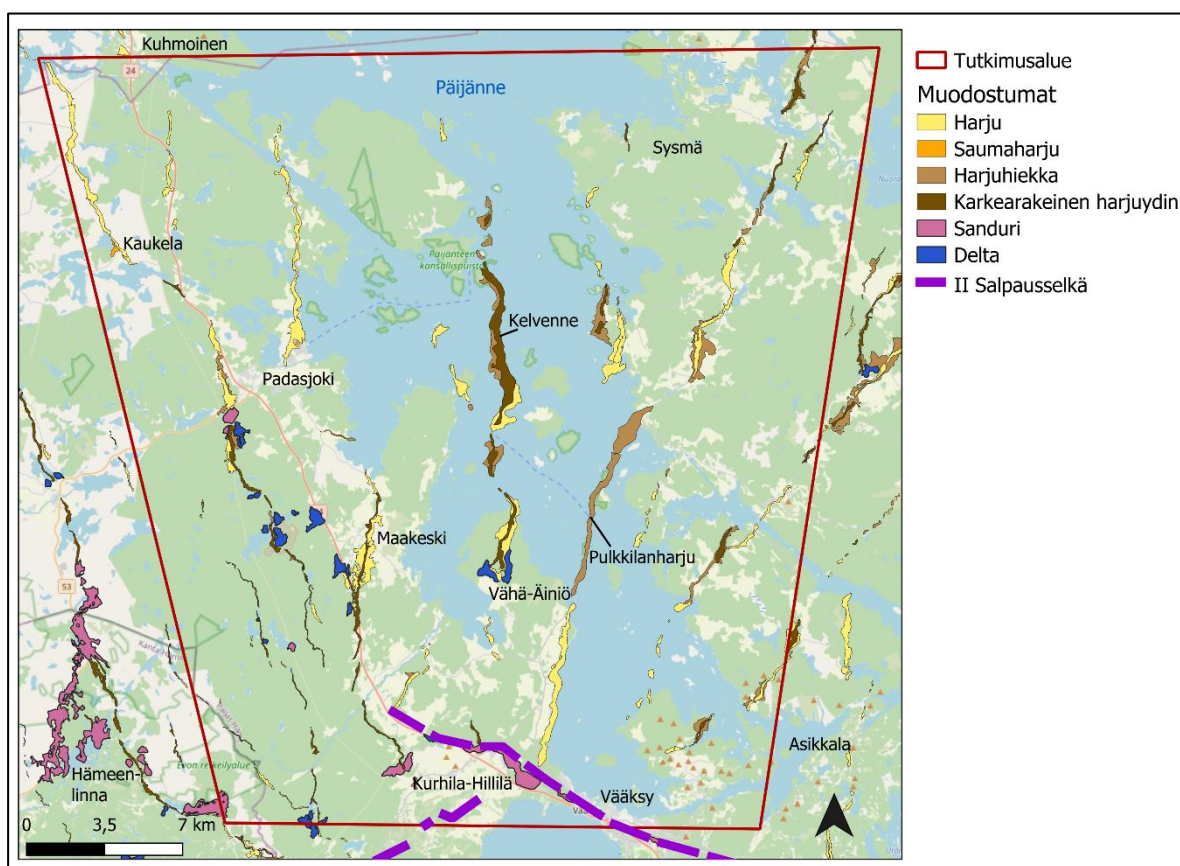
Tutkimusalueella on kartoitettu runsaasti kallioperän uurteita (kuva 9). Eniten uurrehavaintoja on tutkimusalueen kaakkoisosissa, kun taas alueen lounais- ja luoteisosissa uurteita on kartoitettu vähemmän. Tutkimusalueella kallion pinnan uurteet ovat pohjoinen–etelä-suuntaisia ja muodostavat osittain yhtenäisiä kokonaisuuksia. Etenkin Kelventeen kohdalla tutkimusalueen uurteet kuitenkin jakautuvat hieman eri suuntiin. Päijänteen länsipuolella uurteiden suuntaus on luoteesta kaakkoon, kun taas itäpuolella suuntaus on koillisesta lounaaseen. Uurteet ovat siis samansuuntaisia alueen harjujen kanssa. Tutkimusalueella on kuitenkin useita uurteita, jotka risteävät toisiaan. Risteävät uurresuunnat sijaitsevat pääosin tutkimusalueen kaakkoisosassa. On kuitenkin mahdollista, että osa uurteista on muodostunut ennen nuorempaa dryaskautta tai muun jääkauden, kuin Veiksel-jääkauden aikana.



Kuva 9. Tutkimusalueen uurteet harjuverkoston kanssa. (Lähteet: Uurteet 2015; Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 2017; OpenStreetMap CC BY-SA 2.0)

5.3 Deltat ja sandurit

Tutkimusalueen deltat sijaitsevat sen länsi- ja eteläpuolilla alueen harjujen läheisyydessä (kuva 10). Kelventeen harjun Vähä-Äiniöön ulottuvan osan itä- ja länsipuolilla on delta. On kuitenkin todennäköistä, että deltat ovat muodostuneet samaan aikaan, mutta harju on ohjannut vettä ja sedimenttiä sen eri puolille. Myös Padasjoen eteläpuolella ja Maakeskin länsipuolella sijaitsevien harjujaksojen välissä on useita deltoja. Tämän lisäksi Padasjoen eteläpuolen harjujakson länsipuolella on deltoja. Tutkimusalueella on myös muita pieniä deltamuodostumia harjujen yhteydessä. Padasjoen, Maakeskin ja Vähä-Äiniön deltojen tasot ovat noin 126–138 m mpy. Niiden eteläpuolisten deltojen tasot taas ovat noin 151–162 m mpy.



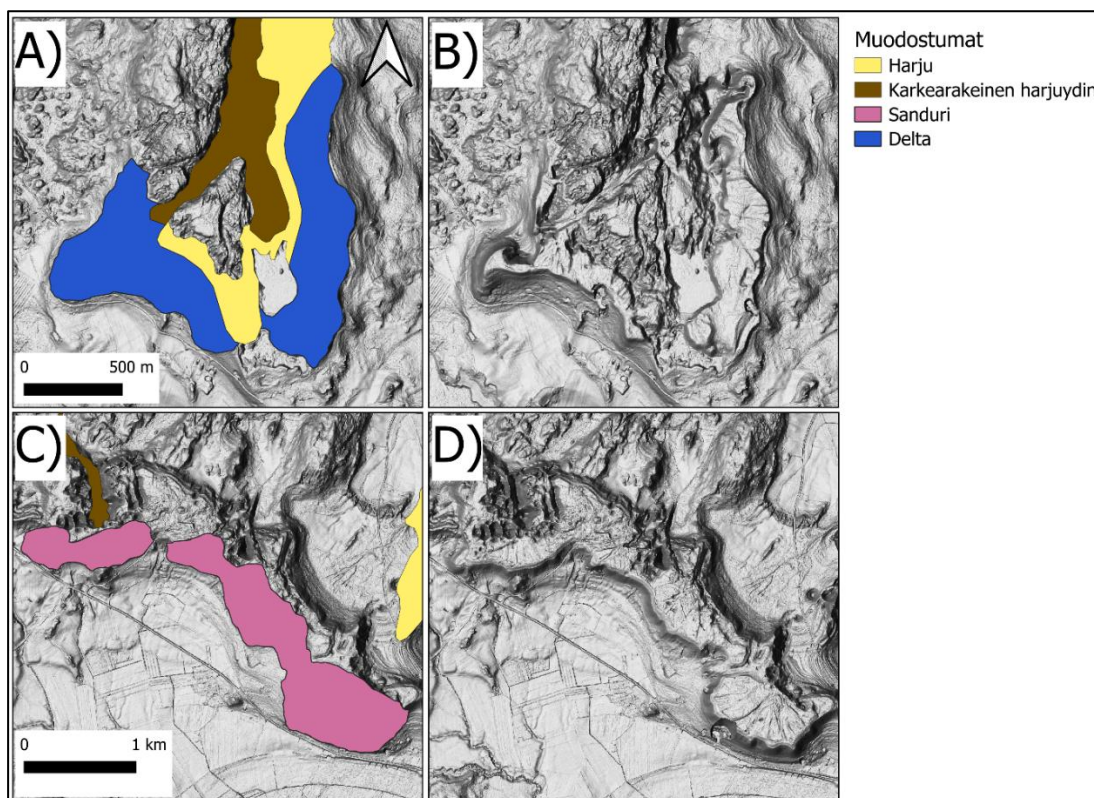
Kuva 10. Tutkimusalueen deltat ja sandurit harjuverkoston kanssa. (Lähteet: Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 2017; OpenStreetMap CC BY-SA 2.0)

Lähes kaikkien alueen deltojen kohdilla yleisin maalaji on hiekka. Osa deltoista, kuten tutkimusalueen etelärajalla oleva delta ja Maakeskin eteläpuolella oleva delta kuitenkin koostuvat osittain myös sorasta. Vain Asikkalan Kurhila-Hillilän pohjoisella puolella

olevan deltan kohdalla vallitseva maalaji on karkea hieta. Sama delta ei myöskään sijaitse yhdenkään harjun välittömässä läheisyydessä.

Myös tutkimusalueen sandurit sijaitsevat alueen länsi- ja eteläpuolilla harjujen yhteydessä, kuten alueen deltat. Sandurien muoto on kuitenkin yleisesti vähemmän säännöllinen kuin deltojen muoto. Asikkalaan kuuluvan Kurhila-Hillilän kylän alueella on neljä sanduria. Myös Äinäjärven vieressä ja Padasjoen länsipuolella sijaitsevan harjujakson keskellä on sandureita. Sandureiden kohdalla vallitsevat maalajit ovat vaihtelevasti hiekka ja sora.

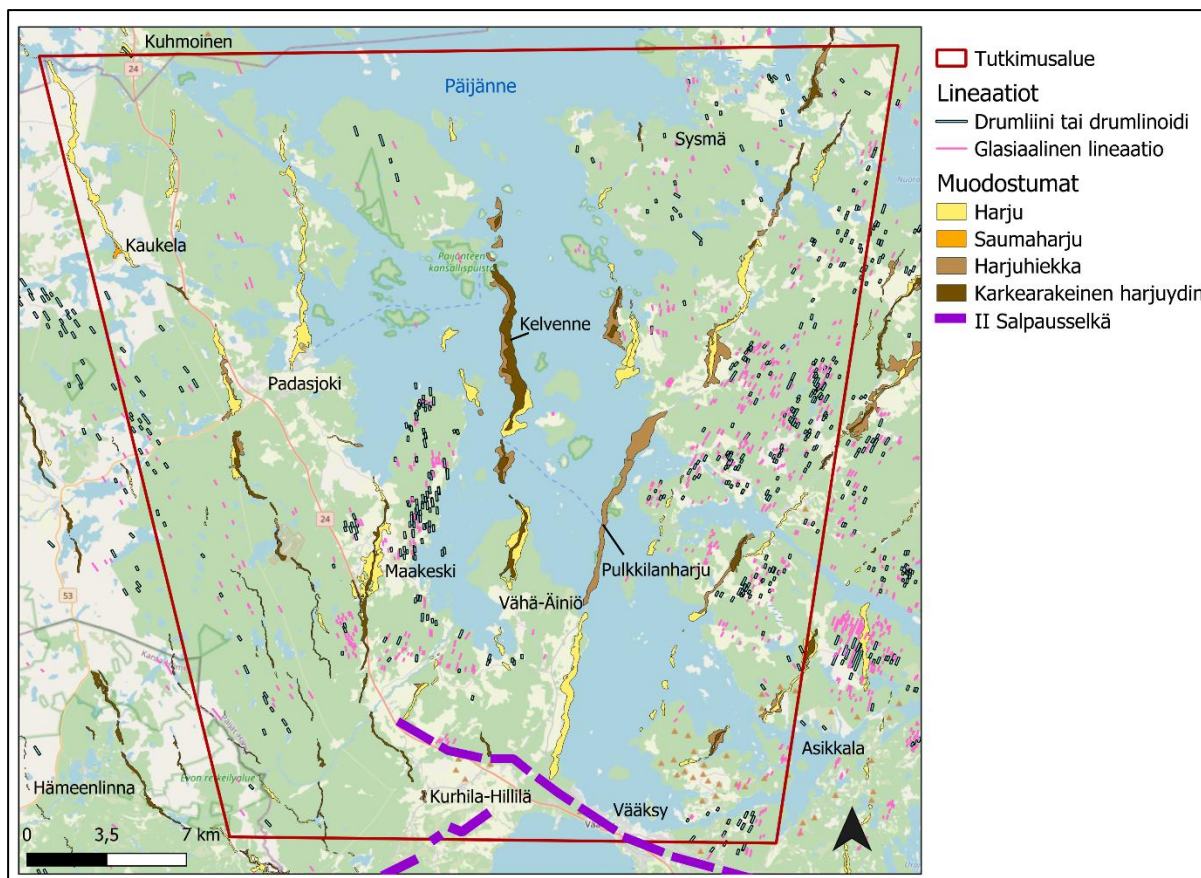
LiDAR-aineistossa deltojen topografia on usein hieman tasaisempi kuin sandurien (kuva 11B; kuva 11D). Kelventeen harjun Vähä-Äiniöön ulottuvan osan päässä olevan delta on kuitenkin muodostunut melko epätasaisesti, ja muodostuman keskellä on kalliomaata. Deltan törmät ovat terassimaiset ja muodostuman kerrostumisen eri vaiheet ovat näkyvissä. LiDAR-kuvassa sandurien päällä olevat uomat näkyvät selkeästi (kuva 10D). Uomaverkosto haarautuu viuhkamaisesti ja avautuu etelään päin. Lisäksi useisiin tutkimusalueen sandureihin liittyy suppakuoppia.



Kuva 11. A) Vähä-Äiniön delta. B) LiDAR-kuva Vähä-Äiniön deltasta. C) Kurhila-Hillilän sanduri. D) LiDAR-kuva Kurhila-Hillilän sandurista. (Lähteet: Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 2017; LiDAR 2021)

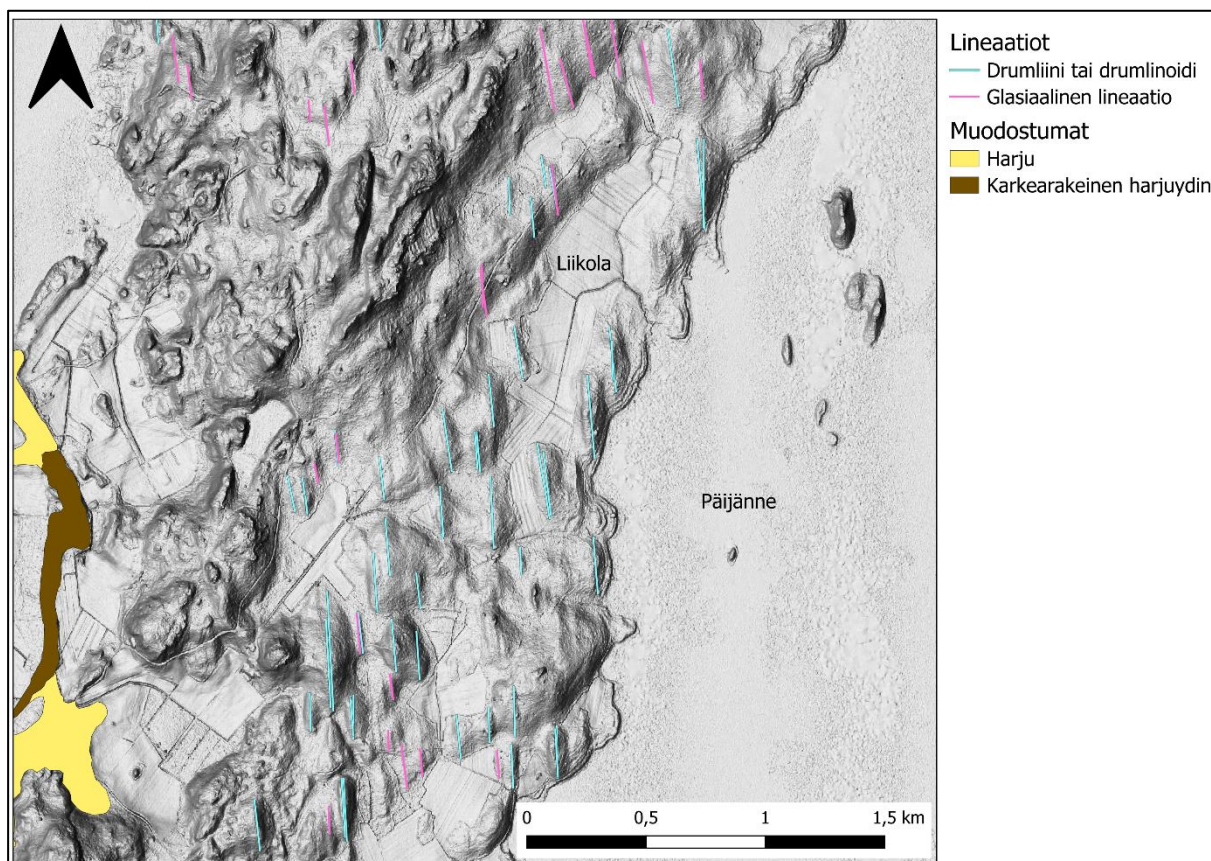
5.4 Lineaatiot

Tutkimusalueella on useita mannerjäätikön muodostamia lineaatioita, joista tutkimuksessa käsitellään drumliineja ja drumlinoideja sekä glasiaalisia lineaatioita (kuva 12). Aineistossa drumliinit ja drumlinoidit on luokiteltu samaan luokkaan. Glasiaaliset lineaatiot taas on yleisnimitys lineaatioille, joita ei olla luokiteltu muihin luokkiin.



Kuva 12. Lineaatiot harjuverkoston kanssa. (Lähteet: Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 2017; OpenStreetMap CC BY-SA 2.0)

Lineaatioiden sijainnit tutkimusalueella eivät keskity vain harjujen läheisyyteen, vaan niitä on laajemmin koko alueen eri osissa. Eniten lineaatioita on tutkimusalueen itäpuolella, mutta laajoja drumliinikenttiä on myös Maakeskissä ja Kaukelan eteläpuolelle jatkuvan harjun länsipuolella (kuva 13). Alueen kartoitetut uurteet sen sijaan sijaitsevat suurimmaksi osaksi samoilla alueilla kuin lineaatiot. Lineaatiohavaintoja ei ole II Salpauselän eteläpuolella ollenkaan.



Kuva 13. Lineaatioita LiDAR-kuvassa. (Lähteet: Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 2017; LiDAR 2021)

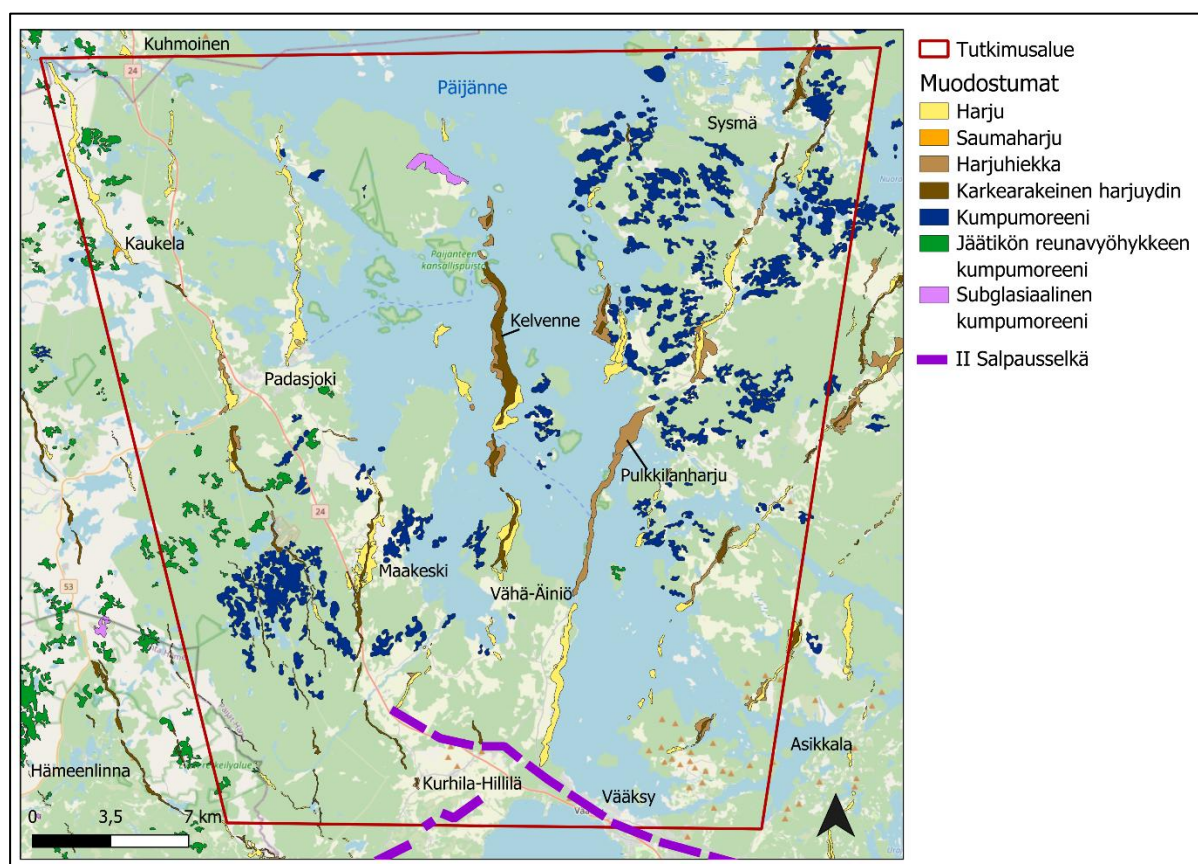
Suurimmalla osalla tutkimusalueen lineaatiosta on myös sama suurpiirteinen suunta kuin alueen uurteilla ja harjuilla. Poikkeuksena tälle ovat kuitenkin alueen koillisosassa sijaitsevat drumliinit ja drumlinoidit sekä glasiaaliset lineaatiot, joista monet ovat luode-kaakko- tai pohjois-eteläsuuntaisia. Myös Maakeskin ja Vähä-Äiniön välissä olevat lineaatiot poikkeavat lähimpien uurteiden suunnista. Vaikka uurteet ovat alueella lähes pohjois-eteläsuuntaisia tai luode-kaakkosuuntaisia, useat lineaatiot ovat koillis-lounassuuntaisia. Toisin kuin uurteet, alueen lineaatiot eivät risteä toisiaan missään.

5.5 Kumpumoreenit

Tutkimusalueen kumpumoreenikerrostumat ovat keskittyneet alueen koillisiin Pulkkilanharjun molemmille puolille ja alueen lounaisosiin Maakeskissa sijaitsevan harjun molemmille puolille (kuva 14). Lisäksi kumpumoreenimuodostumia on Kelventeen itäpuolella ja Kelventeen harjun Vähä-Äiniössä olevan osan länsipuolella.

Tutkimusalueella on vain yksi subglasiaalinen kumpumoreenimuodostuma.

Muodostuma sijaitsee Virmailansaarella Kelventeen pohjoispuolella.



Kuva 14. Tutkimusalueen moreenimuodostumat harjuverkoston kanssa. (Lähteet: Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 2017; OpenStreetMap CC BY-SA 2.0)

Jäätikön reunavyöhykkeen kumpumoreenia on taas vain tutkimusalueen länsipuolella.

Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat -aineistoon merkitty saumaharju on lähellä jäätikön reunavyöhykkeen kumpumoreenikerrostumia, jotka jatkuvat harjujakson läheisyydessä etelään. Alueen itäpuolen ainoa jäätikön reunavyöhykkeen kumpumoreeni on saarella Pulkkilanharjun itäpuolella.

6 Keskustelu

6.1 Harjujaksojen muodostumisolosuhteet

Koska harjut muodostuvat tyypillisesti samansuuntaisesti jäätikön virtaussuunnan kanssa (Banerjee & McDonald 1975), tutkimusalueen harjujen suuntauksista voidaan päätellä, että mannerjäätikön sulamisvedet ovat virranneet suurpiirteisesti pohjoisesta etelään. Tarkemmin Päijänteen länsipuolella sulamisvedet ovat virranneet luoteesta kaakkoon ja järven itäpuolella koillisesta lounaaseen. Koska harjujen suuntaukset ovat jakautuneet melko yhtenäisesti eri suuntiin tutkimusalueen eri osissa, alueella on todennäköisesti ollut erisuuntaisia jäätikkövirtauksia (Storrar ym. 2020).

Mannerjäätikkö on siis hajonnut virtauskielekkeitä ja interlobaattialueita pienempiin osiin, ja osat ovat virranneet itsenäisesti (Palmu ym. 2026). Harjujen orientaatioiden mukaan tutkimusalueella on ollut läntinen virtaus, itäinen virtaus ja niiden väliin jäänyt Päijänteen kohdalla ollut virtaus. Sijainnin perusteella (Punkari 1980; Palmu ym. 2026) tutkimusalueen länsipuolella jäätikön osa on todennäköisesti irronnut Päijänteen interlobaattialueen kielekkeestä ja alueen keski- ja itäosissa virranneet jäätikön osat Järvi-Suomen virtauskielekkeestä.

Tutkimusalueen harjuista Pulkkilanharju ja Maakeskin länsipuolella oleva harju päättyvät II Salpausselkään. On mahdollista, että harjut muodostaneiden tunnelien kautta kulkeutui sedimenttiä myös II Salpausselälle, minkä vuoksi reunamuodostuma kasvoi harjujen kohdilla (Palmu ym. 2026). Harjujen ja II Salpausselän yhtymäkohdissa on myös suppia. Harjut olisivat todennäköisesti reunamuodostumaa vanhempia, mikäli ne jatkuisivat Salpausselän toiselle puolelle.

Harjualueilla supat ovat usein merkki epävakaasta sulamisympäristöstä ja epätasaisesta jäätikön reunasta (Maizels 2017). Supat ovat muodostuneet, kun jäätikön reunasta irtosi lohkarkeitä, jotka peittyivät irtaimen hiekan ja soran alle. Kun jäälohkareet sulavat, ne muodostavat painanteen, jonne lohkareen päällä ollut sedimentti romahtaa. Jäätikön sulamisvesi ja sadevesi ovat tehneet maan ympäröimistä painanteista lampia (Palmu ym. 2026). Saaren reunoilla ne taas ohentavat saarta ja muodostavat lahtia. Jäätikön reuna ei siis ole sulanut tasaisesti, vaan siitä on irronnut osia.

Mikään tutkimusalueen harjuista ei ole suuntautunut suoraan kohti Päijännettä. Alueen jääkerros on siis todennäköisesti ollut paksu, minkä vuoksi sen painon aiheuttama paine on ohjannut sulamisvesien liikesuuntia (Benn & Evans 2010). Usein sulamisvedet virtaavat topografian mukaisesti painovoiman kuljettamana kohti matalia alueita, joka tutkimusalueella on Päijänteen allas. Paksun jäätikön aiheuttaman paineen vuoksi vesi ei kuitenkaan välttämättä virtaa vain alamäkeen, vaan muodostuu topografiasta poikkeavia reittejä. Tämän vuoksi harjut suuntautuvat tutkimusalueella myös Päijänteen ohi.

Tutkimusalueen harjut ovat pitkiä ja muodostavat laajoja harjujaksoja. Sulamisvesien virtaus on siis ollut yhtenäistä ja sulamisvesitunnelit ovat olleet pitkiä, jolloin vesi on kuljettanut suuren määrän sedimenttiä pitkiä matkoja (Banerjee & McDonald 1975). Harjut ovat kuitenkin katkonaisia, mikä saattaa johtua jäätikön reunan vähittäisestä sulamisesta. Asteittaisen sulamisen vuoksi sulamisvesien reitit muuttuivat ja sedimentti ohjautui eri suuntaan (Frydrych ym. 2025). Tämä vaikutti myös harjujen mutkittelevaan muotoon. Harjujen katkonaisuus voi kuitenkin johtua myös esimerkiksi eroosiosta tai harjuaineksen peittymisestä muulla sedimentillä (Polishchuk ym. 2018). Myös aineiston resoluution rajoitteiden vuoksi kaikkia harjuihin liittyviä muodostumia ei välttämättä ole näkyvillä.

Kuten tyypillistä, tutkimusalueen harjut koostuvat lajittuneista maalajeista, hiekasta ja sorasta (Cummings ym. 2011). Maalajeista karkearakeisempi ja siten painavampi sora sijoittuu harjujen ytimien kohdalle. Jäätikön sulamisvedet ovat siis kasanneet painavaa ainesta muodostuman keskelle (Lewington ym. 2020). Hienompijakoinen hiekka taas on kerrostunut harjujen lieveosiin ytimen ympärille. Koska hiekka on kevyempää kuin sora, se on kulkeutunut laajemmalle alueelle vähemmällä voimalla. Alueen harjuista kaikista selkein karkea ydin on Kelventeen harjulla.

Maalajien pohjois-eteläsuuntaisesta sijoittumisesta voidaan myös päätellä jäätikön sulamisvesien virtaussuuntia ja -voimaa (Banerjee & McDonald 1975; Cummings ym. 2011). Koska painavampi aines eli sora sijaitsee usein erityisesti harjujen pohjoispäässä, voidaan aineksen tulkita kulkeneen juuri pohjoisesta etelään. Veden virtausvoima ei ole riittänyt kuljettamaan soraa pidemmälle etelään, vaan sitä on

kasautunut eniten lähemmäs harjun muodostaneen tunnelin alkupäätä (Lewington ym. 2020). Kun veden virtaus hidastui kauempana sen lähteestä, vain kevyt hiekka on kulkeutunut veden mukana pidemmälle etelään ja kerrostunut virtauksen päätealueelle. Tämä on havaittavissa lähes kaikissa tutkimusalueen harjuissa.

Koska maaperäaineisto mallintaa vain yhtä maalajia sekä pohjamaalajina että pintamaalajina, sen perusteella ei voida varmentaa, onko lajittuneen maalajin päällä lajittumatonta moreenikerrosta. Pelkän maaperäaineiston perusteella ei siis voida määrittää, onko mannerjäätikkö laajentunut alueella uudelleen sulamisen jälkeen (Palmu ym. 2026). Hiekkamoreeni on kuitenkin harjujen maalajien ohella tutkimusalueen yleisin maalaji.

Sulavan jäätikön alla oleva vesikerros muodosti liukkaan alustan, jonka päällä jää liukui (Evans ym. 2006; Stroeve ym. 2016). Toisin kuin vesi, jää ei lajittele sedimenttiä yhtä tehokkaasti (Cummings ym. 2011). Jäätikkö liikkuu yhtenäisenä massana, jonka viskositeetti on suuri, joten myös karkeat maalajit kulkeutuvat sen mukana yhtä pitkälle kuin hienolajitteiset maalajit. Tämän vuoksi alueella on laajalti juuri lajittumatonta moreenia, eikä lajittuneita maalajeja. Moreenin laaja esiintyminen osoittaa, että mannerjäätikkö on vaikuttanut koko tutkimusalueella. Alueen kalliomailla jäätikkö on taas vienyt mukanaan kaiken tai suurimman osan kallion pinnalla olleesta sedimentistä (Patton ym. 2022). Koska kalliomaata on pääasiassa tutkimusalueen korkeimmissa kohdissa, jäätikön aiheuttama eroosio on ollut voimakkainta näillä alueilla. Myös alueen peittänyt vesi aiheutti sedimentin laskeutumista matalille alueille painovoiman vuoksi (Ristaniemi & Glückert 1987; Patton ym. 2022).

Myös kallioperään jääneiden uurteiden perusteella voidaan päätellä jäätikön liikesuuntia tutkimusalueella (Wright 2015). Uurteet ovat muodostuneet kallioperään, kun mannerjäätikkö ja sen mukana kulkeutunut aines kulutti kallion pintaa (Glasser & Bennett 2004). Urat siis muodostuvat samansuuntaisesti jäätikön laajenemissuunnan kanssa (Wright 2015). Uurteet eivät tyypillisesti muodostu eri suuntiin saman jäätikön osan alla, joten erisuuntaiset uurteet ovat todennäköisesti muodostuneet erillisten jäätikön osien alla. Koska uurteet ovat erisuuntaisia Päijänteen länsi- ja itäpuolilla,

myös uurteiden perusteella mannerjäätikkö on virrannut tutkimusalueella lännessä luoteesta kaakkoon ja idässä koillisesta lounaaseen.

Tutkimusalueen harjujen orientaatiot ovat siis samat kuin alueen uurteiden suunnat. Jäätikön suurpiirteinen liikesuunta ei todennäköisesti ole muuttunut merkittävästi uurteiden ja harjujen muodostumisen välissä, joten ne ovat mahdollisesti muodostuneet saman jäätikön osan alla (Banerjee & McDonald 1975; Wright 2015). Mannerjäätikön sulaessa ja hajotessa pienempiin osiin pienipiirteiset jäätikön liikkeet taas lisääntyivät. Tutkimusalueen kaakkoisosissa olevat uurteet ovat risteäviä, koska uurteet ovat muodostuneet eri deglasiaation vaiheissa (Palmu ym. 2026). Salpausselkien muodostumisen aikana jäätikkö on edennyt koillisesta. Luode–kaakko-suuntaiset uurteet taas ovat vanhempia.

II Salpausselän eteläpuolella sen välittömässä läheisyydessä ei ole kartoitettuja uurrehavaintoja uurreaineistossa. On kuitenkin todennäköistä, että alueen kallioperässä on uurteita, mutta ne eivät ole helposti havaittavissa, koska II Salpausselkä on kerrostunut niiden päälle (Wright 2015; Palmu ym. 2026). Lisäksi nykyinen Vesijärven allas vaikeuttaa uurteiden kartoittamista. Kallioperän uurteet kuuluvat tutkimusalueen vanhimpiin jääkaudenaikaisiin muodostumiin, joten alueen muut muodostuvat saattavat peittää niitä alleen (Wright 2015; Palmu ym. 2026).

Tutkimusalueella on useita deltoja, joista osa on hyvin lähellä toisiaan. Koska deltat muodostuvat subakvaattisesti, niiden korkeustasoista voidaan päätellä muodostumishetken vedenpinnan taso (Palmu ym. 2026). Havaintoja Baltian jääjärven aikaisista muinaisrannoista on 141–159 m:n korkeuksilta ja Yoldiameren aikaisista muinaisrannoista 129–139 m:n korkeuksilta (Muinaisrantojen havainnot 2013). Deltojen pintojen korkeuksien perusteella tutkimusalueen eteläpuolisimmat deltat muodostuivat Baltian jääjärven tasolle (Lunkka ym. 2019). Padasjoen, Maakeskin ja Vähä-Äiniön deltat taas muodostuivat Yoldiameren pinnan tasolle, joka oli Baltian jääjärven tasoa matalampi (Lunkka ym. 2019; Palmu ym. 2026). Toisaalta lännessä sijaitsevat deltat ovat korkeammalla kuin idässä sijaitsevat deltat myös maankohoamisen vuoksi (Maannousu s.a.).

Koska kaikki tutkimusalueen deltat sijaitsevat harjujen yhteydessä, ne ovat todennäköisesti muodostuneet harjuja muodostaneiden tunnelien purkautumisaukoille (Palmu ym. 2026). Koska deltojen yleisin maalaji on hiekka, veden virtausvoima on ollut kohtalainen tai melko heikko, kun virtaus on ulottunut purkausaukolle (Cummings ym. 2011). Lisäksi deltojen sijainti tutkimusalueen keskiosissa on myös jäätikön reunan sijainti muodostumisen aikana (Lunkka ym. 2019). Näkyvissä olevat terassimaiset törmät viittaavat veden pinnan tason vaihteluihin (Trenhaile 2002).

Korkeusmallin mukaan II Salpausselän kohdalla olevat sandurit ovat noin 151–160 metriä meren pinnan yläpuolella. Koska sandurit muodostuvat kuivalle maalle, vesiallas ei ole sandurien muodostumisen aikaan yltänyt tälle tasolle (Palmu ym. 2026). Suurin osa sandureista myös sijaitsee deltojen eteläpuolella. Koska myös sandurit muodostuvat jäätikön reunalle, ne ovat muodostuneet ennen alueen deltoja (Lunkka ym. 2019; Palmu ym. 2026). Sandurien pääasiallinen maalaji on sora eli vesi on virrannut muodostumisalueelle voimakkaasti (Cummings ym. 2011). Etelään avautuvat viuhkamaiset uomat sandurien päällä viittaavat siihen, että sandurit muodostanut vesi on virrannut kohti etelää ja jäätikön reuna on sijainnut sandurien pohjoispuolella (Palmu ym. 2026).

Padasjoen lähellä olevan harjun keskellä sijaitseva sanduri on korkeammalla maan pinnan tasolla, kuin sen viereinen delta. Sanduri ja delta ovat todennäköisesti muodostuneet saman tunnelin aukolle, mutta korkeuserojen vuoksi osa veden mukana virranneesta sedimentistä on jäänyt kuivalle maalle harjun päälle. Sandureihin liittyvät suppakuopat ovat muodostuneet, kun muodostuman kohdalle irtosi palasia jään reunasta sen sulaessa epätasaisesti (Maizels 2017). Supat sandurin proksimaalipuolella eli jäätikön reunan puolella tarkoittavat, että sedimentti on kerrostunut osittain jään päälle (Deltat ja sandurit 2005).

Drumliinit ja drumlinoidit sekä glasiaaliset lineaatiot koostuvat moreenista ja sijaitsevat laajemmin moreenipeitteisellä maalla (Evans ym. 2006; Clark ym. 2009). Tutkimusalueen itäpuolella aktiivisen virtauskielekkeen alueella on enemmän lineaatioita, koska lineaatiot muodostuvat, kun jäätikkö laajentuu melko nopeasti. Myös tutkimusalueen keskiosissa Maakeskissä on tiheästi lineaatioita, jotka ovat

todennäköisesti muodostuneet aktiivisen virtauskielekkeen osan alla (Palmu ym. 2026). Koska Maakeskin läheisyydessä sijaitsevat lineaatiot ovat erisuuntaisia kuin Pulkkilanharjun itäpuoleiset lineaatiot, ne ovat todennäköisesti muodostuneet eri jäätikön osien alla.

Tutkimusalueen länsipuolella lineaatioiden suuntaukset taas ovat hyvin yhtenäiset, joten ne ovat todennäköisesti muodostuneet saman jäätikön osan alla (Clark ym. 2009). On mahdollista, että lineaatiot ovat muodostuneet ennen interlobaattialueen passiivisen jään vaihetta (Clark ym. 2009; Palmu ym. 2026). Toisaalta myös passiivisena pidetty jää voi silti laajentua, ja siten muodostaa lineaatioita. Il Salpausselän läheisyydessä sen eteläpuolella ei ole kartoitettuja lineaatioita. Koska lineaatiot muodostuvat aktiivisen jään leviämisen aikana ja Salpausselät jäätikön pysähtymisen aikana, lineaatiot ovat todennäköisesti muodostuneet ennen Il Salpausselkää (Clark ym. 2009; Palmu ym. 2026). Reunamuodostuma voi myös peittää sitä aiemmin muodostuneita lineaatioita alleen.

Kumpumoreenikerrostumista voidaan päätellä, millaisia erityisesti nuoremman dryaskauden loppuvaiheen olosuhteet olivat (Eyles ym. 1999). Kerrostumat muodostuivat, kun jäätikkö ei enää liikkunut yhtenäisesti ja voimakkaasti, vaan hajosi paikalleen. Kumpumoreenien runsaus saattaa tarkoittaa, että jäätikön sulaminen oli epätasaista laajoilla alueilla, eikä vain sen reunoilla (Benn 1992; Eyles ym. 1999). Tutkimusalueen lounais-, keski- ja koillisosissa sijaitsevat kumpumoreenit ovat siis todennäköisesti muodostuneet, kun aktiivisesta Järvi-Suomen virtauskielekkeestä irtosi osia (Eyles ym. 1999; Palmu ym. 2026). Itsenäiset jäätikön osat sulivat tutkimusalueen eri osiin ja muodostivat kumpumoreeneja.

Jäätikön reunavyöhykkeen kumpumoreenit muodostuvat jäätikön reunan läheisyyteen (Benn 1992). Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat -aineistossa moreenikerrostumat, jotka ovat muodostuneet passiivisen tai osittain aktiivisen jäätikön etureunalle merkitään jäätikön reunavyöhykkeen kumpumoreeneiksi. Koska reunavyöhykkeen kumpumoreenikerrostumia on tutkimusalueen itäosassa, jäätikön reuna on sijainnut alueella sen sulamisvaiheessa. Itäosassa ollut jäätikön osa on siis ollut pysähtyneenä tutkimusalueen itäosissa (Eyles ym. 1999). Toisaalta on

mahdollista, että myös alueen muut moreenikerrostumat ovat muodostuneet lähellä jäätikön osien reunoja, mutta niitä ei olla luokiteltu jäätikön reunavyöhykkeen kumpumoreeneiksi tutkimuksen vähyyden vuoksi.

Tutkimusalueen ainoa subglasiaalinen kumpumoreeni sijaitsee Virmailansaarella Kelventeen pohjoispuolella. Aineistossa subglasiaaliset kumpumoreenit merkitsevät aktiivisen jään alla muodostuneita moreenikerrostumia. Jäätikkö tai sen osa siis virtasi edelleen eikä vain sulanut paikalleen (Benn 1992). Kumpumoreenin muodostuessa jää oli silti sulamisvaiheessa, koska kumpumoreenien muodostumiseen tarvitaan sulamisvettä, joka pehmentää ja muovaa sedimenttiä. Lisäksi jäätikön aiheuttama paine deformoi sedimenttiä ja aiheutti kumpumoreenin epätasaisen rakenteen. Muodostuminen aktiivisen, mutta sulavan jään alla viittaa mahdollisesti siihen, että muodostuminen on tapahtunut hieman ennen jäätikön virtaamisen pysähtymistä (Eyles ym. 1999; Palmu ym. 2026). Virmailansaaren moreenimuodostuma on todennäköisesti muodostunut saman jäätikön osan alla, jonka yhteydessä Kelventeen harjun muodostanut joki kulki. Kumpumoreenien yhteydessä on usein muitakin sulamisvesimuodostumia (Palmu ym. 2026).

6.2 Tutkimusalueen saumaharjut

Suomessa aiemmin kartoitetut saumaharjut sijaitsevat Salpausselkien pohjoispuolella alueilla, jotka ovat sijainneet kahden virtauskielekkeen tai virtauskielekkeen ja interlobaattialueen välissä (Punkari 1980; Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 2017; Palmu ym. 2026). Myös tutkimusalue sijaitsee Salpausselkävyöhykkeen pohjoispuolella, passiivisen Päijänteen interlobaattialueen ja aktiivisen Järvi-Suomen virtauskielekkeen välissä. On siis mahdollista, että yksi tai useampi alueen harjuista on saumaharju.

Saumaharjut ovat tyypillisesti tavallisia harjuja leveämpiä, koska jäätikön osien välit ovat laajempia kuin jäätikköjokien tunnelit (Palmu ym. 2026). Lisäksi jäätikön sulaminen alkaa ensimmäisenä sen reunoilta, minkä vuoksi jään osien välit kasvavat. Jäätikön saumoissa siis virtaa enemmän vettä ja sen kuljettamaa sedimenttiä (Cummings ym. 2011; Palmu ym. 2026). Jäätikön saumat kuitenkin liikkuvat samalla, kun jäätikön osat

liikkuvat. Sama sauma voi siis muodostaa saumaharjuja eri sijainteihin, ja samalla alueella voi olla useita eri aikaan muodostuneita saumaharjuja.

Osassa tutkimusalueen harjuista on jyrkkiä mutkia, mikä saattaa viitata harjujen muodostumiseen jäätikön osien välissä tavanomaisten jäätikön sisällä ja alla virranneiden jäätikköjokien tunneleiden sijaan (Banerjee & McDonald 1975; Palmu ym. 2026). Koska suuri jäämassa ei sula täysin tasaisesti, virtauskielekkeiden ja kielekkeistä irronneiden osien reunat eivät todennäköisesti olleet tasaisia. Siksi myös niiden väleihin muodostuneet harjut ovat mutkikkaita. Tutkimusalueella on kuitenkin vaihtelevia korkeuseroja, jotka ovat osittain ohjanneet sedimentin asettumista (Cummings ym. 2011). On myös mahdollista, että harjujen muoto on muuttunut eroosion vuoksi jääkauden jälkeen (Poleshchuk ym. 2018). Päijänteen ja alueen muiden vesistöjen aallot ovat voineet kuluttaa muodostumia, ja kuljettaa sedimenttiä muualle. Harjut eivät siis todennäköisesti ole täysin alkuperäisen muotoisia.

Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat -aineiston Kaukelassa sijaitsevan harjun länsipuolella uurteet ovat suuntautuneet luoteesta kaakkoon. Harjun läheisyydessä sen itäpuolella taas ei ole uurreaineistoon merkittyjä uurrehavaintoja, vaan lähin itäpuolella oleva uurrehavainto sijaitsee Padasjoen harjun kaakkoispuolella. Toisin kuin Kaukelan harjun länsipuolella olevat uurteet, itäpuolella uurre on lähes pohjois-eteläsuuntainen. Tämä voi tarkoittaa, että harjun eri puolilla on ollut toisistaan poikkeavia jään virtaussuuntia (Wright 2015). Lisäksi Kaukelan harjun ja Padasjoen harjun välinen harjumuodostuma on samansuuntainen uurteen kanssa. On siis mahdollista, että Kaukelan harju on sen länsi- ja itäpuolisten jäätikön osien väliin muodostunut saumaharju (Palmu ym. 2026).

Harjun länsipuolella lineaatioiden suurpiirteinen suunta on sama kuin alueen uurteiden. Sen itäpuolella taas lineaatiotkin ovat suuntautuneet luoteesta kaakkoon, toisin kuin uurre tai toinen harjumuodostuma. Ero lineaatioiden ja uurteiden suunnissa viittaa siihen, että alueella on ollut useita erisuuntaisia virtausvaihteita (Evans ym. 2006; Wright 2015). On mahdollista, että Kaukelaan merkitty saumaharju on muodostunut aiemmassa deglasiaation vaiheessa, kuin tutkimusalueen muut harjut (Rainio & Johansson 2004). Tätä tukee myös se, että harju päättyy II Salpausselkään, jonne

jäätikkö on ulottunut harjun muodostumisen aikaan (Palmu ym. 2026). Jäätikön osat ovat siis siirtyneet myöhemmin sulamisvaiheen aikana, jolloin myös niiden väliset saumat ovat liikkuneet muualle.

Saumaharjumerkintä on kuitenkin pieni verrattuna koko harjun pituuteen. Lisäksi merkintä koskee vain harjun ulokemaista osaa harjun länsipuolella. On mahdollista, että aineisto kuvaa vain osaa, joka on tutkimuksessa tulkittu olevan selvimmin saumaharju. Lisää tutkimusta aiheesta on julkaistu vasta aineiston viimeisimmän päivityksen jälkeen (Ahokangas 2019; Ahokangas ym. 2020; Palmu ym. 2026).

Todellisuudessa koko harjumuodostuma voi olla muodostunut jäätikön osien väliin. Toisaalta harju on saattanut muodostua osittain jäätikön sisäisessä tai alaisessa tunnelissa ja osittain jäätikön osien välissä (Banerjee & McDonald 1975; Palmu ym. 2026).

Kelventeen harjua on ehdotettu Päijänteen alueen saumaharjuksi myös aiemmassa tutkimuksessa (Palmu ym. 2026). Harjun kohdalla tutkimusalueen uurteet jakautuvat selkeimmin eri suuntiin, paitsi Kelventeen pohjoisosissa, joissa uurresuunnat ovat yhtenäisiä. Koska Kelventeen harju sijaitsee suurimmaksi osaksi vedessä, sen välittömässä läheisyydessä olevia lineaatioita on vain vähän. Harjua lähimmät kuivalla maalla olevat lineaatiot kuitenkin ovat saman suuntaisia kuin lähimmät uurteet. On siis todennäköistä, että Kelventeen länsi- ja itäpuolilla on ollut itsenäisesti virranneet jäätikön osat ainakin saaren keskiosan eteläpuolella (Wright 2015).

Koska Kelventeen eteläpäässä on delta, harjun muodostuminen on päättynyt veteen (Lunkka ym. 2019). Vesi on ulottunut Vähä-Äiniöön Yoldiameren aikana, kun jäätikkö oli jo sulanut tutkimusalueen eteläosista. Koska jäätikkö oli sulanut huomattavasti, on myös mahdollista, että siitä lohkesi osia, joiden väliin Kelvenne muodostui (Maizels 2017). On myös mahdollista, että sulamisen vuoksi jo olemassa olleet saumat siirtyivät alueelle tai laajentuivat.

Suppien perusteella on mahdollista, että Kelventeen harju on sijainnut jäätikön osien välissä (Maizels 2017). Koska jäätikkö alkaa sulamaan ensimmäisenä sen reunoilta, myös lohkat ovat todennäköisesti irronneet reunoilta. Alueen muilla harjuilla ei taas ole yhtä merkittävää määrää suppia. Muut harjut ovat siis mahdollisesti muodostuneet

olosuhteissa, joissa jäätikön virtaaminen oli aktiivisempaa kuin Kelventeen kohdalla (Palmu ym. 2026). Jos nämä harjut ovat silti muodostuneet jäätikön osien väliin, jäätikkö on todennäköisesti edelleen virrannut aktiivisesti eikä jäätiköstä ole irronnut lohkareita keskelle harjua.

Pulkkilanharju ja sen pohjois- ja eteläpuoliset jatkeet muodostavat tutkimusalueen pisimmän harjujakson. Kuten Kelventeen harjun läheisyydessä, myös Pulkkilanharjun länsi- ja itäpuolilla uurteiden suuntaukset poikkeavat toisistaan, ja useat uurteet kaartuvat harjua kohti kummallakin puolella. Myös Pulkkilanharjun läheisyydessä olevat drumliinit, drumlinoidit ja glasiaaliset lineaatit ovat suuntautuneet harjua kohti, osittain uurteita voimakkaammin. Etenkin Sysmässä harjun länsipuolella sijaitsevat lineaatit ovat suuntautuneet harjua kohti uurteita enemmän. On siis mahdollista, että Pulkkilanharju on muodostunut erillisten jäätikön osien väliin (Palmu ym. 2026).

On mahdollista, että jotkin uurteista ovat muodostuneet jonkin aiemman jääkauden aikana tai viimeisimmän jääkauden aikana, mutta ennen nuorempaa dryaskautta (Rainio & Johansson 2004; Wright ym. 2015). Drumliinit ja drumlinoidit sekä glasiaaliset lineaatit ovat kuitenkin muodostuneet nuoremman dryaskauden loppuvaiheilla, joten niiden perusteella viimeisimmän deglasiaation vaiheita näkee selvimmin (Evans ym. 2006). Toisistaan poikkeavien lineaatioiden suuntausten perusteella Pulkkilanharjun eri puolilla on ollut eroavia jäätikön virtaussuuntia. Koska Pulkkilanharju päättyy II Salpausselkään, se on todennäköisesti muodostunut hieman reunamuodostuman muodostumisen jälkeen, ja voi siten olla aikaisemman ajan sauma kuin Kelvenne (Palmu ym. 2026).

Tutkimusalueen lyhyemmät harjut taas todennäköisesti eivät ole saumaharjuja, vaan jäätikön sisäisissä ja alaisissa tunneleissa muodostuneita harjuja (Banerjee & McDonald 1975). Koska jäätikön osien väliset saumat laajenevat, kun jäätikkö sulaa, saumoissa kulkee suurempia määriä sedimenttiä kuin tunneleissa (Cummings ym. 2011). Saumoihin ei siis todennäköisesti muodostu yksittäisiä pieniä harjumuodostumia. Alueen pienien harjujen ympärillä uurteiden tai lineaatioiden suunnat eivät myöskään eroa toisistaan merkittävästi.

Koska tutkimus perustuu geomorfologiseen karttatulkintaan, tuloksia ei olla varmennettu kenttätutkimuksilla. On siis mahdollista, että aineistot ovat epätarkkoja tai sisältävät virheitä. Tutkimuksessa ei myöskään tarkasteltu kaikkia jääkauden aikana muodostuneita muodostumatyyppejä. Tulokset siis kuvailevat tutkimusalueen jääkaudenaikaisia olosuhteita tehtyjen rajausten puitteissa. Lisäksi saumaharjun sijaan mannerjäätikön osien väleihin voi myös muodostua muita muodostumia, kuten moreeniselänteitä (Palmu ym. 2026).

Koska saumaharjuja ja niiden muodostumiseen liittyviä olosuhteita on toistaiseksi tutkittu vähän, niihin kohdistuva lisätutkimus on tarpeen. Tämä edistäisi myös saumaharjun käsitteen vakiinnuttamista, mikä puolestaan parantaisi tutkimustyön yhtenäisyyttä sekä helpottaisi saumaharjujen erottamista tavallisista harjuista ja reunamuodostumista. Mannerjäätikön ja sen sulamisvesien muodostamien muodostumien maalajien kulkeutumista ei myöskään olla tutkittu tarkasti. Tutkimuksissa voitaisiin selvittää, mistä muodostumien maalajit ovat alun perin peräisin. Näin saataisiin mahdollisesti selville, kuinka pitkälle aines on kulkeutunut ennen sen kerrostumista. Tämän perusteella voitaisiin arvioida jäätikön ja sen sulamisvesien liikkeiden nopeutta.

7 Johtopäätökset

- Tutkimusalueen muodostumat ovat muodostuneet suurimmaksi osaksi nuoremman dryaskauden loppupuolen aikana.
- Tutkimusalueella mannerjäätikkö oli jakautunut virtauskielekkeeseen ja interlobaattialueeseen sekä näistä lohjenneisiin pienempiin jäätikön osiin. Virtojen pääsuuntaukset olivat tutkimusalueen länsipuolella luode–kaakko, itäpuolella koillinen–lounas ja niiden välissä pohjoinen–etelä.
- Itsenäisesti virtaavat jäätikön osat muodostivat virtaussuunnan mukaan suuntautuneita jäätikkösyntyisiä muodostumia.
- Kelvenne on mahdollisesti eteläisen Päijänteen alueella oleva saumaharju, joka on muodostunut mannerjäätikön osien väliin jäätikön sulamisen aikana.
- Kaukelassa sijaitseva harju ja Pulkkilanharju ovat mahdollisesti Kelventeen muodostumista aiemman jääkauden vaiheen aikana muodostuneita saumaharjuja.

Lähteet

- Ahokangas, E. (2019) *New insights into the sedimentological-geophysical research of interlobate glaciofluvial complexes in western Finland*. Turun yliopiston julkaisuja. Sarja A II: Biologica – Geographica 356. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-29-7678-2>
- Ahokangas, E., Mäkinen, J., Artimo, A., Pasanen, A. & Vanhala, H. (2020) Interlobate esker aquifer characterization by high resolution seismic reflection method with landstreamer in SW Finland. *Journal of Applied Geophysics* 177(6) 104014. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104014>
- Ahokangas, E., Ojala, A., Tuunainen, A., Valkama, M., Palmu, J.-P., Kajuutti, K. & Mäkinen, J. (2021) The distribution of glacial meltwater routes and associated murtoo fields in Finland. *Geomorphology* 389(18) 107854. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107854>
- Arnold, N. (2019) A new model for esker formation sheds light on the processes within subglacial tunnels. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 124(3) 700–704. <https://doi.org/10.1029/2019JF005001>
- Banerjee, I & McDonald, B. (1975) Nature of esker sedimentation. *Glaciofluvial and Glaciolacustrine Sedimentation* 23 132–154. <https://doi.org/10.2110/pec.75.23.0132>
- Benn, D & Evans, D. (2010) *Glaciers and Glaciation*. 2. p. Routledge, London.
- Benn, D. (1992) The genesis and significance of ‘hummocky moraine’: Evidence from the Isle of Skye, Scotland. *Quaternary Science Reviews* 11(7–8) 781–799. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(92\)90083-K](https://doi.org/10.1016/0277-3791(92)90083-K)
- Björck, S. (1995) A review of the history of the Baltic Sea, 13.0–8.0 ka BP. *Quaternary International* 27(3) 19–40. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(94\)00057-C](https://doi.org/10.1016/1040-6182(94)00057-C)
- Bleck, R. & Sun, S. (2001) Thermohaline circulation studies with an isopycnic coordinate ocean model. *Journal of Physical Oceanography* 31(9) 2761–2782. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031%3C2761:TCSWAI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031%3C2761:TCSWAI%3E2.0.CO;2)
- Broecker, W. (2006) Was the Younger Dryas triggered by a flood? *Science* 312(5777) 1146–1148. <https://doi.org/10.1126/science.1123253>

- Carlson, A. (2010) What caused the Younger Dryas cold event? *Geology* 38(4) 383–384.
<https://doi.org/10.1130/focus042010.1>
- Clark, C., Hughes, A., Greenwood, S., Spagnolo, M. & Ng, F. (2009) Size and shape characteristics of drumlins, derived from a large sample, and associated scaling laws. *Quaternary Science Reviews* 28(7–8) 688–692.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.035>
- Cummings, D., Kjarsgaard, B., Russel, H. & Sharpe, D. (2011) Eskers as mineral exploration tools. *Earth-Science Reviews* 109(1–2) 32–43.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.08.001>
- Deltat ja sandurit (2005) Maaperäkartan käyttöopas, Geologian tutkimuskeskus. 5.6.2026. http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/jaatikkojoki_deltat.htm
- Donner, J. (2010) The Younger Dryas age of the Salpausselkä moraines in Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 82(2) 69–80.
<https://doi.org/10.17741/bgsf/82.2.001>
- Evans, D., Phillips, E., Hiemstra, J. & Auton, C. (2006) Subglacial till: Formation, sedimentary characteristics and classification. *Earth-Science Reviews* 78(1–2) 115–176. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.04.001>
- Eyles, N., Boyce, J. & Barendregt, R. (1999) Hummocky moraine: sedimentary record of stagnant Laurentide ice sheet lobes resting on soft beds. *Sedimentary Geology* 123(3–4) 163–174. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00129-8](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00129-8)
- Frydrych, M., Ahokangas, E., Mäkinen, J. & Lejzerowicz, A. (2025) Morphological characteristics of eskers in areas with soft and hard bed: Examples from Poland and Finland. *Quaternary International* 717(3) 109649.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2024.109649>
- Glasser, N. & Bennett, M. (2004) Glacial erosional landforms: Origins and significance for palaeoglaciology. *Progress in Physical Geography Earth and Environment* 28(1) 43–75. <https://doi.org/10.1191/0309133304pp401ra>
- Hoek, W. (2008) The last glacial-interglacial transition. *Episodes* 31(2) 226–229
<https://doi.org/10.18814/epiiugs/2008/v31i2/007>
- Hofer, D., Raible, C., Dehnert, A & Kuhlemann, J. (2012) The impact of different glacial boundary conditions on atmospheric dynamics and precipitation in the North

- Atlantic region. *Climate of the Past* 8(3) 935–949. <https://doi.org/10.5194/cp-8-935-2012>
- Hughes, A., Gyllencreutz, R., Lohne, Ø., Mangerud, J. & Svendsen, J. (2015) The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1. *Boreas* 45(1) 1–45. <https://doi.org/10.1111/bor.12142>
- Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat (12/2017) Geologian tutkimuskeskus. <https://hakku.gtk.fi/fi/locations?id=186>
- Korkeusmalli 2 m (2019) Maanmittauslaitos. <https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/tiedostopalvelu/korkeusmalli>
- Lachassagne, P. (2021) What is groundwater? How to manage and protect groundwater resources. *Annals of Nutrition and Metabolism* 76(Suppl. 1). <https://doi.org/10.1159/000515024>
- Lewington, E., Livingstone, S., Clark, C., Sole, A. & Storrar, R. (2020) A model for interaction between conduits and surrounding hydraulically connected distributed drainage based on geomorphological evidence from Keewatin, Canada. *The Cryosphere* 14(9) 2949–2976. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2949-2020>
- LiDAR (2021) Geologian tutkimuskeskus.
- Lunkka, J.-P., Nikarmaa, T. & Putkinen, N. (2019) Baltic Ice Lake levels and a LiDAR/DEM-based estimate of the glacio-isostatic uplift gradient of the Salpausselkä zone, SE Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 91(1–2) 119–137. <https://doi.org/10.17741/bgsf/91.1.005>
- Maannousu (s.a.) Maanmittauslaitos.fi. 4.5.2026. <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/maannousu>
- Maaperä 1:20 000 (01/2015) Geologian tutkimuskeskus <https://hakku.gtk.fi/fi/locations?id=1>
- Maizels, J. (2017) Experiments on the origin of kettle-holes. *Journal of Glaciology* 18(79) 291–303. <https://doi.org/10.3189/S0022143000021365>
- Mangerud, J., Hughes, A., Johnson, M & Lunkka, J. (2023) The Fennoscandian ice sheet during the Younger Dryas stadial. Teoksessa Palacios, D., Hughes, P., García-Ruiz, J. & Andrés, N. (toim.) *European glacial landscapes - The last deglaciation*, 437–452. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91899-2.00060-7>

Muinaisrantojen havainnot (09/2013) Geologian tutkimuskeskus.

<https://hakku.gtk.fi/fi/locations?id=78>

Natura2000-alueet (2025) Suomen ympäristökeskus. 13.4.2026.

<https://experience.arcgis.com/experience/3b9dbcd2e5f940fd822c7fd48be9f8cd>

Pajunen, H. (2004) Järvisedimentit kuiva-aineen ja hiilen varastona. Geologian tutkimuskeskus, tutkimusraportti 160.

Palmu, J.-P., Ojala, A., Virtasalo, J., Putkinen, N., Kohonen, J. & Sarala, P. (2021) Classification system for superficial (quaternary) geological units in Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 412 115–169.

<https://doi.org/10.30440/bt412.4>

Palmu, J.-P., Pitkäranta, R., Hovikoski, J., Ojala, A., Valkama, M. & Väänänen, T. (2026) Salpausselkien alueen yhteenvetoraportti. Geologian tutkimuskeskus, GTK:n tutkimustyöraportti 1/2026. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/1_2026.pdf

Patton, H., Hubbard, A., Heyman, J., Alexandropoulou, N., Lasabuda, A., Stroeven, A., Hall, A., Sugden, D., Kleman, J. & Andreassen, K. (2022) The extreme yet transient nature of glacial erosion. *Nature Communications* 13 7377.

<https://doi.org/10.1038/s41467-022-35072-0>

Pohjavesialueet (2021) Suomen ympäristökeskus.

<https://ckan.ymparisto.fi/dataset/pohjavesialueet>

Poleshchuk, A., Zykov, D. & Shvarev, S. (2018) Some features of deformation structures in an esker on the southern margin of the Fennoscandian shield. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 90(1–2) 291–300.

<https://doi.org/10.17741/bgsf/90.2.011>

Punkari, M. (1980) The ice lobes of the Scandinavian ice sheet during the deglaciation in Finland. *Boreas* 9(4) 307–310. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1980.tb00710.x>

Punkari, M. (1982) Glacial geomorphology and dynamics in the eastern parts of the Baltic shield interpreted using Landsat imagery. *The photogrammetric journal of Finland* 9(1) 77–93.

Rainio, H. & Johansson, P. (2004) Jäätikkö sulaa. Teoksessa Koivisto, M. (toim.) *Jääkaudet*, WS Bookwell Oy Porvoo, 69–87.

- Rainio, H., Kejonen, A., Kielosto, S. & Lahermo P. (1986) Avancerade inlandsisen på nytt också till Mellanfinnska randformationen? *Geologi* 38(4–5) 95–109.
- Rea, B., Pellitero, R., Spagnolo, M., Hughes, P., Ivy-Ochs, S., Renssen, H., Ribolini, A., Bakke, J., Lukas, S. & Braithwaite, R. (2020) Atmospheric circulation over Europe during the Younger Dryas. *Science Advances* 6(50).
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aba4844>
- Ristaniemi, O. & Glückert, G. (1987) The Ancylus transgression in the area of Espoo – the first Salpausselkä, southern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 59(1–2) 45–69. <https://doi.org/10.17741/bgsf/59.1.004>
- Schenk, F., Väiliranta, M., Muschitiello, F., Tarasov, L., Heikkilä, M., Björck, S., Brandefelt, J., Johansson, A., Näslund, J.-O. & Wohlfarth, B. (2018) Warm summers during the Younger Dryas cold reversal. *Nature Communications* 9 1634. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04071-5>
- Shakun, J. & Carlson, A. (2010) A global perspective on Last glacial maximum to Holocene climate change. *Quaternary Science Reviews* 29(15–16) 1801–1816.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.03.016>
- Storarr, R., Ewertowski, M., Tomczyk, A., Barr, I., Livingstone, S., Ruffell, A., Stoker, B. & Evans, D. (2020) Equifinality and preservation potential of complex eskers. *Boreas* 49(1) 211–213. <https://doi.org/10.1111/bor.12414>
- Storarr, R., Stokes, C. & Evans, D. (2014) Morphometry and pattern of a large sample (>20,000) of Canadian eskers and implications for subglacial drainage beneath ice sheets. *Quaternary Science Reviews* 105(23) 1–25.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.013>
- Stroeven, A., Hätterstrand, C., Kleman, J., Heyman, J., Fabel, D., Fredin, O., Goodfellow, B., Harbor, J., Jansen, J., Olsen, L., Caffee, M., Fink, D., Lundqvist, J., Rosqvist, G., Strömberg, B. & Jansson, K. (2016) Deglaciation of Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews* 147(17) 91–121.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.09.016>
- Taylor, T. (2020) *Introduction to Laser Science and Engineering*. CRC Press, Boca Raton.
- Teller, J., Leverington, D. & Mann, J. (2002) Freshwater outbursts to the oceans from glacial Lake Agassiz and their role in climate change during the last deglaciation.

Quaternary Science Reviews 21(8–9) 879–887. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00145-7](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00145-7)

Tikkanen, M. & Oksanen, J. (2002) Late Weichselian and Holocene shore displacement history of the Baltic Sea in Finland. *Fennia* 180(1–2) 9–20.

<https://fennia.journal.fi/article/view/3760>

Trenhaile, A. (2002) Modeling the development of marine terraces on tectonically mobile rock coasts. *Marine Geology* 185(3–4) 341–361.

[https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00187-1](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00187-1)

Uurteet (06/2015) Geologian tutkimuskeskus. <https://hakku.gtk.fi/fi/locations?id=106>

Wright, S. (2015) Late Wisconsin ice sheet flow across northern and central Vermont, USA. *Quaternary Science Reviews* 129(23) 216–228.

<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.10.018>