

Saariselän paikallistason geodiversiteetti ja sen arviointi alfa, beeta ja gamma -tasoilla

Johanna Ollila

Pro gradu -tutkielma 791619S

Maantieteen tutkinto-ohjelma

Oulun yliopisto

22.8.2023

Yksikkö: Maantieteen tutkimusyksikkö	Pääaine: Maantiede	
Tekijä (Sukunimi ja etunimet, myös entinen sukunimi): Ollila Paula Johanna	Opiskelija-numero: Y43749962	Tutkielman sivumäärä: 85 s. + 1 liit.
Tutkielman nimi (suomeksi; muun kielinen nimi ilmoitetaan vain jos se on tutkielman kieli): Saariselän paikallistason geodiversiteetti ja sen arviointi alfa, beeta ja gamma -tasoilla		
Asiasanat: Paikallistason geodiversiteetti, geokohde, alfa-, beeta- ja gamma-diversiteetti, mittaaminen, pohjoisboreaalisen metsänrajametsän vaara, globaalimuutos		
Tiivistelmä (kirjoitetaan vapaamuotoisesti, selväsanaisesti ja lyhyin lauserakentein, ks. ohje seuraavalla sivulla): <p>Gloaalimuutos on merkittävä uhka luonnon monimuotoisuudelle. Geodiversiteettiin kohdistuu kielteisiä vaikutuksia, jotka ovat osin suhteellisen pysyviä. Geodiversiteettiä esiintyy eri mittakaavoilla, mutta paikallistason tutkimusta ei ole juurikaan tehty. Geodiversiteetin kvantifioinnissa voidaan hyödyntää biodiversiteetin tutkimuksessa yleisesti käytettyä alfa (α)-, beeta (β)- ja gamma (μ)-diversiteetin näkökulmaa. Mittaus kohdistuu eliölajien sijasta erilaisiin geokohteisiin, mikä on uusi tapa kvantifioida elotonta luontoa.</p> <p>Tutkielmassa tarkasteltiin, millaisista geokohteista Saariselän paikallistason geodiversiteetti muodostuu ja millaista se on alfa, beeta ja gamma -tasoilla arvioituna. Neljältä pohjoisborealiselta metsänrajametsän vaaralta kerättiin visuaalisen havainnoinnin menetelmällä geodiversiteettiaineisto elokuussa 2022. Aineisto koostui geodiversiteetin eri osa-alueisiin kuuluvista erilaisista geokohdehavainnoista. Yksittäisen tutkimusalan geokohteita mittaava alfa-geodiversiteetti kvantifioitiin keskiarvokuvaajien, niiden tilastollisen testauksen ja akkumulaatiokäyrien avulla. Tutkimusalojen välistä geokohteiden vaihtelua mittaava beeta-geodiversiteetti visualisoitiin NMDS-kuvaajalla (<i>non-metric multidimensional scaling</i>) ja kvantifioitiin Jaccardin dissimilariteetti-arvojen kautta. Alfa- ja beeta-geodiversiteettiä tarkasteltiin vaarakohtaisesti ja eri ilmansuuntiin sijoituvilta tutkimuslagraienteilta. Niiden osalta testattiin spatiaalinen autokorrelaatio. Gamma-geodiversiteetti kvantifioitiin laskemalla koko tutkimusalueelta havaittujen erilaisten geokohteiden kokonaismäärä.</p> <p>Saariselän paikallistason geodiversiteetti oli verrattain homogeenista muodostuen yleisimmin vain tietyistä geologisista ja geomorfologisista geokohteista, kuten moreenista ja fysikaalisesta rapautumisesta. Paikalliset olosuhteet huomioiden tulokset olivat odotettuja. Geodiversiteetti oli myös melko alhaista tutkimuslakohtaisen alfa-geodiversiteetin ollessa yleisimmin kaksi. Siitä huolimatta alfa, beeta ja gamma -tasojen kautta saatiin tarkempaa tietoa paikallistason geodiversiteetin vaihtelusta ja sen erityispiirteistä. Tulokset osoittivat, että alfa, beeta ja gamma -tasojen kvantifiointi soveltuu geodiversiteetin tutkimukseen ja käytettäväksi myös pienellä tutkimusalueella. Tietoa tarvitaan esimerkiksi elottoman luonnon kestokyvyn arviointiin suhteessa käyttöpaineisiin ja geosuojelun kohdentamiseen. Lisäksi alfa, beeta ja gamma -tasojen soveltaminen biodiversiteetin ja geodiversiteetin tutkimukseen voi viedä luonnon monimuotoisuuden tutkimusta yhdenmukaisempaan suuntaan.</p>		
Muita tietoja: Tutkielma on tehty osana ”Parempi ymmärrys geodiversiteetistä tukee ympäristönseurantaa ja -suojelua” -projektia (iGeoBio) Oulun yliopiston Maantieteen tutkimusyksikössä		
Päiväys: 22.8.2023		

Sisällysluettelo

1 Johdanto	5
2 Geodiversiteetti	8
2.1 Geologia ja maannokset	10
2.2 Geomorfologia	11
2.2.1 Eksogeeniset prosessit	12
2.3 Hydrologia	15
3 Geodiversiteetin merkitys.....	16
4 Geodiversiteetin tutkimus.....	19
4.1 Tutkimuksen mittakaava	20
4.2 Mittaaminen	21
4.2.1 Topografia ja geodiversiteetti.....	25
5 Diversiteetin eri tasot.....	26
5.1 Alfa-diversiteetti	28
5.2 Beeta-diversiteetti	29
5.3 Gamma-diversiteetti.....	31
6 Tutkimusalue.....	32
6.1 Geologia ja geomorfologia.....	33
6.2 Ilmasto ja hydrologia	34
7 Tutkimusaineisto ja -menetelmät	35
7.1. Paikallistason geodiversiteetin kartoitus	35
7.2. Analyysi	42
7.2.1 Alfa-geodiversiteetin kvantifiointi	43
7.2.2 Beeta-geodiversiteetin kvantifiointi	45
7.2.3 Gamma-geodiversiteetin kvantifiointi	46
8 Tulokset.....	47
8.1 Saariselän paikallistason geokohteet.....	47
8.2 Saariselän alfa-geodiversiteetti	49
8.3 Saariselän beeta-geodiversiteetti.....	55
8.4 Saariselän gamma-geodiversiteetti	58
9 Tulosten tarkastelu ja pohdinta.....	59
9.1 Paikallistason geokohteet.....	59
9.2 Alfa-geodiversiteetti.....	63
9.3 Beeta-geodiversiteetti.....	64
9.4 Gamma-geodiversiteetti	65

9.5 Alfa, beeta ja gamma -tasojen käyttö geodiversiteetin arvioinnissa	66
9.6 Virhelähteet.....	68
10 Yhteenveto ja johtopäätökset	70
Lähteet.....	72
Aineistolähteet	84
Liitteet	85

1 Johdanto

Elottoman luonnon monimuotoisuutta kuvataan geodiversiteetin käsitteellä. Se kuvastaa maapallon pintaosien materiaalien, erilaisten maanpinnan muotojen ja muodostumien kokonaisuutta (Gray 2013: 12–13). Historian valossa maapallon nykyisen, runsaan geodiversiteetin kehittymiseen ovat vaikuttaneet erityisesti laattatektoniikka sekä erilaisia maapallon pinnan prosesseja ja muodostumia synnyttäneet muutokset ilmastossa (Thomas 2012: 199; Gray 2013: 15, 28, Gray 2019: 226). Esimerkiksi erilaiset uomat kertovat jääkauden sulamisvesien toiminnasta ja moreeni jäätikön kallioperää kuluttaneesta voimasta (Johansson 2005a: 125–126; Sharma 2010: 190).

Geodiversiteetti ja elollisen luonnon monimuotoisuus eli biodiversiteetti muodostavat yhdessä luonnon monimuotoisuuden maapallon pinnalla (Brilha 2016: 120; Tukiainen & Hjort 2021: 55). Näistä kahdesta monimuotoisuuden osasta geodiversiteetti on jäänyt tieteellisessä tutkimuksessa ja suojelutoimissa pitkään biodiversiteetin varjoon (Gordon & Barron 2013; Pereira ym. 2013: 542; Gray 2013: 8, Gray 2019: 227). Ihmisen toimintaan kytkeytyvä globaalimuutos on merkittävä uhkatekijä luonnon monimuotoisuudelle (Chapin III ym. 2000: 234) ja ekosysteemien sopeutumisen kannalta olisi tärkeää ymmärtää sitä, miten geodiversiteetti ja biodiversiteetti ovat yhteydessä toisiinsa. Eloton luonto tarjoaa ympäristön, jossa eliölajit voivat menestyä, jonka lisäksi se tukee ekosysteemipalveluita (Fox ym. 2020: 151–152). Geodiversiteettiin kohdistuu kuitenkin myös uhkia, joita ei usein huomioida riittävästi (Gordon & Barron 2013: 4–5). Geodiversiteetti on osa luonnon tarjoamaa pääomaa (Gray 2019: 227), ja ihmisen toiminta vaikuttaa Kozlowskin (2004: 833) mukaan yhä kiihtyvämpään tahtiin elottoman luonnon osa-alueisiin ja prosesseihin. Monet geodiversiteetin osa-alueet ovat herkkiä ympäristössä tapahtuville muutoksille, kuten maankäytön muutoksille (Gordon & Barron 2013: 4–5). Ruban (2010: 327) muistuttaakin, että osia geodiversiteetistä on mahdollista menettää, vaikka sitä on totuttu pitämään biodiversiteettiä vakaampana (Gray 2013: 151; Beier ym. 2015: 615; Hjort ym. 2022: 1757).

Geodiversiteettiin, sen arvoihin ja merkityksiin on alettu kiinnittää yhä enemmän huomiota viime vuosikymmeninä. Sen lisäksi, että geodiversiteetti muodostaa monimuotoisia elinympäristöjä ja tukee ekosysteemien toimintaa (Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 140–142, 145; Pellitero ym. 2011: 163–164; Gordon & Barron 2013: 2–3), siihen liitetään myös kulttuurisia, esteettisiä, taloudellisia ja tieteellisiä arvoja (Gray 2005: 6–8). Geodiversiteetillä on keskeinen rooli niin luonnonympäristön, kuin yhteiskunnan toimintojen kannalta (Gordon & Barron 2013; Schrodt ym. 2019: 16156–16158). Geodiversiteetti on monien ihmisen kannalta

välttämättömien toimintojen, kuten puhtaan veden, infrastruktuurin ja ruuantuotannon ylläpitäjä (Gray 2005: 7–8). Grayn (2019: 235) sanoin, moderni yhteiskunta ei tulisi toimeen ilman geologisia resursseja, joita eloton luonto tarjoaa. Näiden lisäksi geodiversiteetillä on Sharplesin (1995: 37, 39) mukaan kuitenkin myös itseisarvoa. Globaali huoli luonnon monimuotoisuuden vähenemisestä ja erilaisten resurssien riittävyydestä on osaltaan nostanut geodiversiteetin suojelun yhä vahvemmin valokeilaan (Schrodt ym. 2019: 16156–16157). Georesurssien ekologisesti kestävä käyttö vaatii ihmiseltä tarkkaa harkintaa ja tasapainon löytämistä hyödyntämisen ja suojelun välillä (Sharples 1995: 37, 39).

Vaikka geodiversiteetin merkitys ymmärretään nykypäivänä laajasti, ei konkreettisia poliittisia toimia sen säilyttämisen eteen ole tehty riittävästi. Moniulotteisten vaikutustensa vuoksi ja ilmastonmuutoksen kiihtyessä geodiversiteetti tulisi ottaa huomioon kaikessa päätöksenteossa ja suunnittelussa aiempaa systemaattisemmin, kuten Prosser ym. (2011: 337–340) sekä Gordon ja Barron (2013: 2, 4) huomauttavat. Geodiversiteetin säilyttämisen ja suojelun näkökulmasta on keskeistä löytää toimivia menetelmiä sen arviointiin ja mittaamiseen (Brilha 2016: 120–121, 125, 132). Oman haasteensa tähän tuo elottomaan ympäristöön liitettävien käsitteiden, kuten geodiversiteetin, geoperinnön ja -suojelun käytön monitulkintaisuus (Brilha 2016: 119; Gray 2018a: 13).

Kokonaiskuvan kannalta geodiversiteettiä tulisi tarkastella ja mitata eri mittakaavoilla globaalista paikalliselle tasolle. Geodiversiteetin aiempi tutkimus on kohdistunut pääasiassa maisematasoon (*landscape scale*) (esim. Tukiainen & Hjort 2021) ja jonkin verran myös alueelliseen (*regional scale*) (esim. Carrión-Mero 2022) sekä globaaliin (*global scale*) tasoon (esim. Antonelli ym. 2018). Sen sijaan paikallistason (*local scale*) vaihtelua ei juuri ole tutkittu (Hjort ym. 2022: 1757) muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Kärnä ym. (2018) tarkastelivat geodiversiteetin, kuten maa- ja kivilajien selitysvoimaa jokien biodiversiteetin vaihtelusta paikallistasolla. Crisp ym. (2022: 112, 114, 124) yhdistivät paikallistason biodiversiteetin ja geodiversiteetin arvioinnin geosuojelun strategiaan hyödyntämällä paikkatieto-ohjelma ArcGIS:n digitaalisovellusta ja kuvasivat tätä yhdistävää lähestymistapaa omnidiversiteetiksi. Paikallistason geodiversiteetin tutkimus on vielä vähäistä, koska sen mittaamiseen ja kvantifointiin eli numeeriseen määrittämiseen ei ole ollut riittävästi systemaattisia menetelmiä (Hjort ym. 2022: 1756–1758). Paikallistason tutkimuksella on kuitenkin merkitystä geodiversiteetin säilymisen kannalta, koska tiedon avulla tarvittavia suojelutoimia voidaan kohdentaa oikein (Prosser 2013: 569, 576, 578). Vaikka geodiversiteettiä on tähän mennessä harvoin määritetty paikallisella tasolla, niin erilaiset geoperintöön liittyvät geokohteiden

pääasiassa laadulliset arvioinnit ja kartoitukset tehdään yleensä paikallisella tasolla (esim. Pereira ym. 2015; Mehdioui ym. 2020).

Geodiversiteetin tutkimuksessa voidaan hyödyntää biodiversiteetin tutkimuksessa käytettyä alfa (α)-, beeta (β)- ja gamma (μ)-diversiteetin näkökulmaa. Sen kautta geodiversiteettiä voidaan tarkastella määrällisesti yksittäisillä tutkimusaloilla, eri tutkimusalojen välillä ja koko tutkimusalueella (Tukiainen ym. 2022a: 2–3). Tämä geodiversiteetin tutkimuksessa tuore menetelmä tuo uusia näkökulmia geodiversiteetin tarkasteluun. Vain riittävän tarkan tiedon avulla erilaisia intressejä voidaan sovittaa yhteen ekologisesti kestäväällä tavalla (Ruban 2010: 326) ja toisaalta kohdentaa suojelutoimia (Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 143).

Pro gradu -tutkielman tarkoituksena on selvittää, millaisista geokohteista Saariselän paikallistason geodiversiteetti muodostuu. Aineisto on kerätty maastossa hyödyntäen uutta, Hjortin ym. (2022) kehittämää paikallistason geodiversiteetin mittausmenetelmää. Kerättyä aineistoa kvantifioidaan alfa- beeta- ja gamma-diversiteetin näkökulmasta käsin, hyödyntäen erilaisia tilastollisia analyysimenetelmiä. Whittakerin (1960: 320) alkuperäisen määritelmän mukaan alfa-diversiteetti kuvaa ekologisessa tutkimuksessa erilaisten eliöläjien määrää tutkimusalalla, beeta-diversiteetti taas tarkastelee eliöyhteisössä tapahtuvaa muutosta eri tutkimusalojen välillä tai suhteessa ympäristögradienttiin ja gamma-diversiteetti kuvaa koko tutkimusalueella esiintyvien erilaisten eliöläjien määrää. Tässä tutkimuksessa mitataan geokohteiden muodostamaa alfa-, beeta- ja gamma-geodiversiteettiä, eli mittaamisen kohteena ovat eliöläjien sijasta geokohteet (Tukiainen ym. 2022a: 3).

Tutkimuskysymykset ovat:

1. Millaisista geokohteista Saariselän paikallistason geodiversiteetti muodostuu?
2. Millaista Saariselän paikallistason geodiversiteetti on alfa, beeta ja gamma -tasoilla arvioituna?

Pro gradu -tutkielma ja siihen liittyvä tutkimus tehdään osana Suomen Akatemian rahoittamaa ”Parempi ymmärrys geodiversiteetistä tukee ympäristönseurantaa ja -suojelua” -projektia (iGeoBio) Oulun yliopiston Maantieteen tutkimusyksikössä.

2 Geodiversiteetti

Geodiversiteetti -käsitteen juuret ulottuvat geotieteilijöiden tekemään havaintoon siitä, että elottoman ja elollisen luonnon monimuotoisuudessa on monia samankaltaisuuksia (Gray 2005: 5). Käsite otettiin ensimmäisen kerran käyttöön 1990-luvulla kuvaamaan elottoman luonnon vaihtelevuutta (Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 140; Gray 2013: 8–10). Geodiversiteettiin lukeutuvat erilaiset maapallon pintamateriaalit ja -muodot sekä niitä muodostavat prosessit. Käsitteen alle voidaan lukea niin maannokset, kuin geologisia, geomorfologisia ja hydrologisiakin tekijöitä sekä ominaisuuksia riippuen määritelmästä (Sharples 2002: 2, 6; Gray 2013: 10–12).

Geodiversiteetin määritelmästä ja siihen kuuluvista elementeistä on esitetty useita eri mielipiteitä ja näkökulmia. Termin määrittely onkin kehittynyt kahteen eri pääsuuntaukseen, joita ovat lähinnä geologisiin tekijöihin ja -prosesseihin rajattu määritelmä ja laajempi, eri elottoman luonnon elementtien muodostama kokonaisuus (Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 140–141; taulukko 1.). Esimerkiksi ilmaston kuuluminen geodiversiteettiin on saanut jonkin verran kannatusta (Benito-Calvo ym. 2009: 1433–1434; Zarnetske ym. 2019: 549) ja joissakin määritelmässä geodiversiteettiin sisällytetään myös ihmistoiminta. Perusteena on nähty ihmistoiminnan merkittävät globaalit vaikutukset elottoman luonnon toimintoihin ja hyvinvointiin (Kozłowski 2004: 833–834). Ruban (2010: 327) taas yhdistää geodiversiteetin erilaisiin geoperintöön liittyviin geokohdetyyppeihin (*geosite types*), jotka sisältävät elottoman luonnon eri ominaisuuksia ja ovat luokiteltavissa. Ne kertovat maapallon koostumuksesta, rakenteesta ja evoluutiokehityksestä, ja joiden lukumäärä kuvastaa tutkimusalueen geodiversiteettiä. Gray (2013: 434) näkee tämän määritelmän kuitenkin liian kapeana, koska geokohdetyypit kuvaavat vain osaa geodiversiteetistä. Geodiversiteetin rinnalla käytetään myös joitakin tarkentavia termejä, esimerkiksi pedodiversiteettiä eli maaperän monimuotoisuutta (Ibáñez ym. 1995: 216).

Taulukko 1. Geodiversiteetin yleisimmät, eri määritelmien mukaiset osa-alueet ja niiden sisällöt (mukaillen Sharples 2002; Kozłowski 2004; Gray 2013; Zarnetske ym. 2019).

GEODIVERSITEETIN OSA-ALUEET	OSA-ALUEIDEN ELEMENTIT
Geologia	Kallio- ja maaperä, kivilajit, mineraalit ja fossiilit
Maannos	Maaperän pintaosan kerroksellinen rakenne
Geomorfologia	Maanpinnan muodostumat ja prosessit, topografia
Hydrologia	Vesistöt, veden kierto
(Ilmakehä)	Ilmasto
(Ihmistoiminta)	Muun muassa maankäytön vaikutukset ympäristöön

Geotieteissä ja -suojelussa geodiversiteetin määritelmä on suurissa määrin vakiintunut (Boothroyd & McHenry 2019: 9, 14). Valtaosa geodiversiteettiin liittyvästä tutkimuksesta pohjaa Grayn (2013: 12) määritelmään, jossa geodiversiteetillä tarkoitetaan geologisten (kivet, mineraalit ja fossiilit), geomorfologisten (pinnanmuodot ja -prosessit sekä topografia) ja hydrologisten tekijöiden, maannosten sekä niiden ominaisuuksien muodostamaa monimuotoisuutta. Siihen kuuluvat myös eri tekijöiden muodostamat rakenteet ja kokonaisuudet, niiden vuorovaikutus ja vaikutus maisemaan. Boothroyd ja McHenry (2019: 2, 5–6) mukaan kyseinen määritelmä geodiversiteetistä on laajasti hyväksytty tutkijoiden keskuudessa ja myös yleisimmin käytetty joko suoraan tai pienin lisäyksin eri tutkimuksissa. Grayn (2013) määritelmä on myös tässä tutkielmassa analyysien pohjana, koska geodiversiteetin kartoittamisen menetelmänä käytetään siihen perustuvaa Hjortin ym. (2022) kehittämää visuaalista havainnointia.

Geodiversiteettiä esiintyy erilaisilla mittakaavoilla, ja sitä voidaan tarkastella aina atomeista ja ioneista globaaleihin ympäristöihin, kuten valtameriin (Gray 2013: 15). Serranon ja Ruiz-Flaño (2007: 142–143) mukaan geodiversiteetti syventää ymmärrystä luonnon monimuotoisuudesta tuomalla siihen spatiaalisen ja ajallisen ulottuvuuden. Geodiversiteetin osa-alueet ovat paikkasidonnaisia, niillä on tietyt mittasuhteet ja ne kytkeytyvät eri aikaskaaloihin, ulottuen nykyhetkestä aina geologiseen historiaan saakka. Geodiversiteetin ydin muodostuu vaihtelevista geokohteista, kuten erilaisista kivi- ja maalajeista, maanpinnan muodostumisista ja hydrologisista elementeistä (Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 141; Brilha 2016: 119; Tukiainen ym. 2017: 365, Tukiainen ym. 2022a: 3), joita esiintyy yleisesti ympäri maailmaa (Tukiainen ym. 2019: 1700). Yksittäisiä geokohteita ovat esimerkiksi dyynit tai rapautunut kallioperä (Tukiainen ym. 2022a: 3).

Gray (2005: 6) arvioi, että geodiversiteetti on yhtä runsasta, kuin biodiversiteettikin. Sen luokittelu ei siis ole aivan yksinkertainen tehtävä. Geokohteiden luokittelu on kuitenkin tärkeä osa geodiversiteetin tutkimusta (Hjort ym. 2022: 1758), ja erilaisten geokohteiden tunnistaminen ja arvioiminen kuuluvat myös osaksi maankäytön suunnittelua, ympäristökasvatusta ja -suojelua (Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 142). Tästä huolimatta esimerkiksi suojelualueiden suunnittelussa elottoman luonnon huomioiminen on ollut biodiversiteettiä vähäisempää. Geokohdearviointi olisi kuitenkin mahdollista ottaa sen osaksi aiempaa monipuolisemmin (Mucivuna ym. 2022: 268)

2.1 Geologia ja maannokset

Geologiaan kuuluvia elementtejä ovat kivilajit ja niitä muodostavat mineraalit, maa- ja kallioperä, sedimentit sekä fossiilit (Gray 2013: 29). Maannoksia ja geologiaan kuuluvia elementtejä on käytetty geodiversiteetin tutkimuksessa monin tavoin. Esimerkiksi mineraaleja, kivien ominaisuuksia ja fossiileja on tarkasteltu niin osana Paranán osavaltion, kuin Xingujoen valuma-alueen laajuista geodiversiteetti-indeksiä (Pereira ym. 2013: 545–548; Silva ym. 2013: 254–255). Erilaisia kivilajeja sekä niiden syntyhistoriaa taas on käytetty muun muassa maastoluokituksen kehittämiseen Iberian niemimaalle hyödyntämällä paikkatietopohjaisia (GIS) menetelmiä (Benito-Calvo ym. 2009: 1433, 1436, 1439, 1444).

Mineraalit ovat luonnossa esiintyviä kiteisiä, epäorgaanisia ja kiinteässä muodossa olevia alkuaineita tai yhdisteitä. Niillä on kyseiselle mineraalille tyypillinen kemiallinen koostumus ja atomien muodostama kiderakenne, joista syntyy eri mineraalien muodostama monimuotoisuus. Se heijastuu myös kivilajeihin, jotka ovat yhdistelmiä eri mineraaleista (Gray 2013: 29, 32). Niiden koostumus sisältääkin pääasiassa kolmesta viiteen eri päämineraalia (Taipale & Saarnisto 1991: 43). Kivilajit jaetaan Kähkösen ja Lehtisen (1998: 33) mukaan magmakivien, sedimenttikivien ja metamorfisten kivien ryhmään syntyprosessinsa mukaisesti. Magmakivien ryhmä muodostuu sulan kiviaineksen eli magman jähmettyessä ja kiteytyessä maan pinnalla tai syvemmillä maankuoressa. Sedimenttikivet syntyvät kovettumalla kulkeutuneesta ja kasautuneesta sedimenttiaineksesta, joka on rapautunut muusta kiviaineksesta (Taipale & Saarnisto 1991: 97; Gray 2013: 35). Tätä kutsutaan diagenesiksi, joka tapahtuu maanpinnan tavanomaisissa paine- ja lämpöoloissa. (Taipale & Saarnisto 1991: 119). Metamorfiset kivet sen sijaan syntyvät kuumuuden ja kovan paineen vaikutuksesta, kun jo olemassa olevat kivet muovautuvat (Gray 2013: 38), ja niiden mineraalikoostumus ja rakenne muuttuvat (Taipale & Saarnisto 1991: 104). Geodiversiteetin määrällisessä tutkimuksessa tutkitaan yleisesti maanpinnalla runsaasti esiintyviä, eri ryhmiin kuuluvia kivilajeja. Niistä sedimenttikivet ovat eniten tutkittu geologinen elementti (Crisp ym. 2021: 530–531).

Maaperä on muodostunut maanpinnan rapautuneesta kivi- ja sedimenttiaineksesta. Sen pintaosan kerrokselliset rakenteet voidaan jakaa maannoksiin (Gray 2013: 44–46), joista podsoli on havumetsävyöhykkeelle tyypillinen maannos. Siitä voidaan erottaa eri kerroksia, kuten uuttumis- ja rikastumiskerrokset (Mokma ym. 2004: 259). Erilaisten maalajien muodostama maaperän rakenne koostuu orgaanisista- ja kivennäismaalajeista (Birkeland 1999: 2, 9). Kivennäismaalajit jaetaan raekoon perusteella eri luokkiin: lohkaraisiin, kiviin ja soraan sekä pienempää raekokoa oleviin hiekkaan, hietaan, hiesuun ja saveen. Näiden luokkien sisällä

maalajit voidaan vielä luokitella rakeiden läpimitan perusteella hienoksi ja karkeaksi ainekseksi. Jos maalaji sisältää samaa raekokoa olevaa ainesta, se katsotaan lajittuneeksi ja jos aineksen raekoko vaihtelee, kyseessä on lajittumaton maalaji, kuten moreeni (Taipale & Saarnisto 1991: 114, 116). Pohjois-Suomen maalajeista moreeni on vallitseva, Kujansuun (2005a: 26) mukaan hieman yli puolet maa-alasta. Turve kuuluu orgaanisiin eli biogeenisiin maalajeihin, jonka muodostuminen on hyvin hidasta (Taipale ja Saarnisto 1991: 117, 323). Geodiversiteetin tutkimuksessa se voidaan kuolleena orgaanisena aineksena laskea geologiseksi geokohteeksi (Hjort ym. 2022: 1760). Turve on Pohjois-Suomen toinen vallitseva maalaji, noin kolmannes maa-alasta (Kujansuu 2005a: 26). Fossiilit taas ovat kuolleiden eliölajien kivettyneitä jäännöksiä, kuten luita, kuoria ja puumaisia osia (Gray 2013: 42). Niiden kautta saadaan tietoa maapallon historiasta, kuten evoluutioista ja ympäristössä tapahtuneista muutoksista (Thomas 2012: 197). Geodiversiteetin määrällisessä tutkimuksessa paleontologiaa elementtejä, kuten fossiileja on tutkittu monia muita geologisia elementtejä vähemmän (Crisp ym. 2021: 524).

Kiinteä kallioperä muodostuu erilaisista kivilajeista ja maaperä irtaimista maalajeista, jotka yhdessä muodostavat maankamaran (Taipale & Saarnisto 1991: 11; Kähkönen & Lehtinen 1998: 30). Suomen kallioperä kuuluu Fennoskandian kilpeen ja voidaan jakaa pääasiassa vanhaan arkeeseen sekä myöhemmin syntyneeseen varhaisproterotsooiseen alueeseen. Näiden alueiden väliin jää selkeä saumavyöhyke (Korsman & Koistinen 1998: 95, 97).

2.2 Geomorfologia

Maanpinta on Gregoryn (2010: 7, 9, 19, 71) mukaan aina ollut luonnollisessa muutoksessa. Geomorfologia tieteenalana on kiinnostunut maapallolla ilmenevistä erilaisista pinnanmuodoista ja niitä muodostavista prosesseista. Myös topografia kuuluu osaksi geomorfologiaa (Gray 2013: 12). Geodiversiteetin tutkimuksessa geomorfologialla, kuten geologiallakin on keskeinen rooli ja sitä on tutkittu eri tavoin. Esimerkiksi Hjort & Luoto (2010: 110, 112) ovat tutkimuksessaan luokitelleet geomorfologiset elementit eri luokkiin syntyvän perusteella, ja kartoittaneet sekä kvantifioineet niiden osuuden subarktisen alueen kokonaisgeodiversiteetistä Pohjois-Suomessa. Tutkimuksen aineisto koostui maastohavainnoista, ortokuvista ja kartoista. Geomorfologisia elementtejä on kartoitettu myös digitaalisten korkeusmallien (*Digital Elevation Model, DEM*) ja kaukokartoitusdatan, kuten ortokuvien, yhdistelmän avulla maisematason geodiversiteetin tutkimuksessa borealisella ja subarktisella alueella Suomessa. Niiden ennustustarkkuutta geodiversiteetin vaihtelusta on

tutkittu tilastollisella mallinnuksella (Hjort & Luoto 2012: 74–75, 79). Topografisista elementeistä taas etenkin rinteiden kaltevuutta on geodiversiteetin määrällisessä tutkimuksessa tutkittu yleisesti (Crisp ym. 2021: 523).

Vaihtelevat korkeussuhteet luovat eri ympäristöihin yksilöllisen paikan tunteen (*sense of place*) ja muodostavat monimuotoisia elinympäristöjä. Maanpinnan muodostumat syventävät myös ymmärrystä sen aiemmasta kehityksestä (Gray 2019: 228–229). Topografia vaikuttaa eri mittakaavoilla alueiden ilmasto-oloihin ja on osa hydrologista kiertoa, koska se osallistuu esimerkiksi pintavesien varastointiin (Gordon & Barron 2013: 5, 7–8). Maanpinta onkin jatkuvassa vuorovaikutuksessa kivi-, eliö-, vesi- ja ilmakehän kanssa (Gregory 2010: 50). Sitä muokkaavat maan sisäsyntyiset endogeeniset prosessit, kuten tektoniikka ja eksogeeniset pintaprosessit, kuten rapautuminen (Derbyshire ym. 1979: 18, 33–34). Endogeenisten prosessien aktiivisuus on Suomessa nykypäivänä aiempaan geologiseen historiaan verraten vähäistä, esimerkiksi maankohoamiseen liittyviä heikkoja maanjäristyksiä (Korsman & Koistinen 1998: 103). Tästä syystä tässä tutkielmassa tarkastellaan tarkemmin vain eksogeenisiä prosesseja, koska ne muokkaavat maanpintaa jatkuvasti erilaisten ulkoisten voimien vaikutuksesta (Derbyshire ym. 1979: 18).

2.2.1 Eksogeeniset prosessit

Maanpinnalla tai sen läheisyydessä tapahtuvat geomorfologiset prosessit syntyvät, kun pinnalla vallitseva tasapainotila järkkyy kahden vastakkaisen, kontrolloivan ja vastustavan voiman kohdatessa. Esimerkiksi rinteessä tapahtuva massaliikunto syntyy painovoiman ylittäessä maaperän kyvyn sitoa ainesta tai kivi rapautuu lämpötilan vaihtelun seurauksena (Gregory 2010: 71–73). Eksogeenisiä geomorfologisia prosesseja tapahtuu erilaisten luonnonvoimien kuluttaessa, kuljettaessa ja kasatessa ainesta jokiuomissa ja rannikkoalueilla, rinneympäristöissä, glasiaalisilla ja periglasiaalisilla alueilla sekä kuivissa ja karuissa, tuulen vaikutukselle alttiissa ympäristöissä (Derbyshire ym. 1979: 18; Gray 2013: 50, 54, 59, 61, 67–68, 70). Geodiversiteetin määrällisessä tutkimuksessa kulutusmuodostumat ovat kasaumuodostumia selvästi yleisemmin tutkittu geomorfologinen elementti (Crisp ym. 2021: 524). Erilaisia prosesseja ja niiden luomia muodostumia voidaan luokitella syntyvän mukaisesti (Hjort & Luoto 2012: 76).

Fluviaalisissa prosesseissa virtaava vesi kuluttaa, kuljettaa, lajittelee ja kerrostaa aineista (Kähkönen & Lehtinen 1998: 52). Jokiuoman koostumus on usein pääosin karkeaa hiekkaa ja soraa, kun taas jokitormän aines on hienoa hiekkaa, silttiä ja savea (Chorley ym.

1984: 287). Fluviaalisia kasaumuodostumia syntyy jokiuomien ympäristöön esimerkiksi tulvaveden (Sharma 2010: 139, 143) tai hidastuneen virtauksen seurauksena (Kähkönen & Lehtinen 1998: 54). Virtaveden eroosivoima taas kuluttaa jokitörmiiä ja uomia eri voimakkuuksilla (Gray 2013: 56). Rantaprosessit syntyvät, kun aallokko, veden virtaus, jäätikkö ja sedimenttikierro muokkaavat rannikkoa (Gregory 2010: 94–96), ja synnyttävät erilaisia litoraalisia kulutus- ja kasaumuotoja ranta-alueille (Taipale & Saarnisto 1991: 148–149).

Tuulen synnyttämien kulutus- ja kasaumuodostumien luomia muodostumia kutsutaan eolisiksi (Kähkönen & Lehtinen 1998: 52–54). Tyypillisiä kasaumuodostumia ovat korkeilla alueilla, kuten vaaroilla sijaitsevat peitehiekat ja erilaiset lentohiekkakerrostumat eli dyynit. Suomessa suurin osa dyyneistä on fossiilisia periglasiaalisia sisämaan paraabelidynejä, kun taas deflaatiopinnat ovat eolisia kulutusmuodostumia (Taipale & Saarnisto 1991: 152–155). Ne syntyvät yleensä alueilla, jotka ovat tuulelle alttiita suojaavan kasvillisuuden puuttuessa. Tuuli toimii eroosivoimana, joka vie irtoaineksen mukanaan ja jäljelle jää karkearakeisempia, kivisiä painaumuksia (Sharma 2010: 253). Fluviaaliset prosessit ovat yleisin tutkimuskohde geodiversiteetin määrällisessä tutkimuksessa, kun taas esimerkiksi eolisia prosesseja tutkitaan satunnaisemmin (Crisp ym. 2021: 524).

Kemiallinen ja fysikaalinen rapautuminen ovat prosesseja, jotka muuttavat kivien ja mineraalien olomuotoa maanpinnalla tai lähellä sitä. Fysikaalisessa rapautumisessa kiven rakenne rikkoutuu eri tekijöiden, kuten eroosion tai jäätymisen vaikutuksesta ja kivistä irtoaa erikokoisia kappaleita ympäristöön. Kemiallinen rapautuminen syntyy, kun kivien ja mineraalien alkuperäinen kemiallinen ja mineraloginen koostumus muuttuu niiden kohdatessa maaperän pintavesien erilaisen kemiallisen koostumuksen ja lämpötilan. Fysikaalinen rapautuminen on kemiallista yleisempää viileässä ilmastossa (Birkeland 1999: 53–54, 59).

Rinneympäristössä syntyy massaliikuntoja lumen, maa- tai kiviaineksen liikkeessä rinnettä alaspäin painovoiman ja jonkin laukaisevan tekijän vaikutuksesta. Aines liikkuu eri tavoin erilaisissa massaliikunnoissa, se voi pudota alas äkillisesti, liukua tai virrata vaihtelevalla nopeudella. Massaliikunnot yhdessä muiden ympäristössä tapahtuvien prosessien kanssa synnyttävät erilaisia muodostumia (Gray 2013: 50–53). Näitä ovat esimerkiksi pakkasrapautumisen aiheuttamien kivi- ja soravyöryjen muodostamat talukset (Gregory 2010: 82) ja solifluktio eli vuotomaa, jossa jäätymisen jälkeen sulava veden kyllästämä maa-aines valuu hitaasti alaspäin (Seppälä 2005: 358). Massaliikunnot ovat monimutkaisia prosesseja, joiden syntymiseen vaikuttavat useat eri tekijät, kuten ilmasto ja topografia (Sharma 2010: 81, 85).

Suoympäristön biogeeniset prosessit muodostavat orgaanisesta aineksesta turvetta, joka sisältää pääosin eri maatumisvaiheissa olevia kasvin osia (Gregory 2010: 66). Turvetta muodostuu tyypillisesti alueilla, joissa sadanta ylittää haihdunnan tai valunnan kautta poistuvan veden määrän. Suomessa suoyhdistymätyypit jaetaan pääasiassa kahteen, aapasuohon ja keidassuohon, joiden lisäksi tietyillä, pohjoisilla alueilla esiintyy palsa- ja paljakkasoita (Maunu & Virtanen 2005: 80).

Kylmässä ilmastossa pakkasen toiminta aiheuttaa merkittäviä geomorfologisia prosesseja, joihin vaikuttavat voimakkaasti paikalliset tekijät, kuten kosteusolosuhteet ja lumen määrä (Seppälä 2005: 349). Suomessa ikirouta rajoittuu vain kaikkein pohjoisimpiin osiin, joissa esiintyy palsasoita. Satunnaisia ikiroudan esiintymiä voi kuitenkin löytyä myös muualta Pohjois-Suomesta esimerkiksi kallioperästä (Seppälä 1997: 89–90). Ikiroudalla viitataan maaperään, jonka lämpötila pysyy vähintään kahden vuoden ajan kerrallaan 0 °C tai sen alla (Gregory 2010: 103; Gray 2013: 67). Kryoturbaatio on maaperässä tapahtuvaa jäätymis-sulamissyklin synnyttämää aineksen liikehdintää ylöspäin ja sivusuuntaisesti (French 1988: 169). Nivaatiolla taas viitataan lumenviipymiin, jotka syntyvät lumen kerrostuessa maaston painauma-kohtiin. Lumenviipymä itsessään ja siihen liittyvä sulamisvesi voimistavat monia muita yleisesti tapahtuvia rapautumis- ja kuljetusprosesseja (Thorn 1988: 3, 5, 10–11). Sohjuvirta koostuu vetisen lumen lisäksi kiviaineksesta ja mudasta. Sen synty on riippuvainen lumen sisältämästä vesipitoisuudesta (Decaulne & Sæmundsson 2006: 187), ja se toimii eroosiovoimana, joka muodostaa ympäristöön vyörysorakeiloja (Seppälä 2005: 361).

Glasigeeniset ja glasifluvialiset muodostumat ovat jäätikön ja sen sulamisvesien kasaus- ja eroosio-prosessien aikaansaannosta (Sharma 2010: 175, 189; Gray 2013: 64, 66). Viimeisin jääkausivaihe alkoi reilu 110 000 vuotta sitten (Gregory 2010: 138) ja muokkasi maanpintaa voimakkaasti vaikuttaen monin tavoin nykyisin nähtävään maanpinnan geomorfologiaan (Gregory 2010: 138; Gray 2013: 62). Mannerjäätikön virtaukset ovat ulottuneet Pohjois-Suomen alueella useisiin suuntiin eri jäätiköitymisvaiheiden aikana, mutta niiden suuntaukset ja voima ovat vaihdelleet alueittain. Etenkin viimeisimmän Myöhäis-Veikselkautisen jäätikön virtaussuunnat ovat havaittavissa alueellisen geomorfologian suuntauksissa (Johansson 2005b: 95, 97). Deglasiaation vaiheessa alkoi vaiheittain etenevä maan vapautuminen jäätikön alta (Taipale & Saarnisto 1991: 243; Johansson 1995: 65–66). Jäätikön painosta maanpinta painui merkittävästi ja sen vetäytyttyä alkoi maankohoaminen, jota kutsutaan glasiaaliseksi isostasiaksi (Gregory 2010: 138–139).

Glasigeenisessä eroosiossa jäätikkö kulutti maa- ja kallioperää irrottaen siitä ainesta ja kuluttaen kallioperään uurteita. Jäätikkö kuljetti irtoainesta mukanaan ja sen eri vaiheissa

vapautuneesta aineksesta syntyi ympäristöön niin lajittumatonta maalajia moreenia, kuin glasigeenisia muodostumiakin. Näitä ovat erilaiset moreenimuodostumat, kuten kumpumoreenit, reunamuodostumat ja drumliinit (Sharma 2010: 180, 187–190, 194). Moreenia jäätikkö kasasi pintamoreeniksi ja tiiviiksi pohjamoreeniksi (Chorley ym. 1984: 449–450, 453). Deglasiaation vaiheessa jäätikön sulamisvesien voima lajitteli ainesta, kasasi siitä muodostumia ja kulutti ympäristöä (Johansson 2005a: 116–117). Sulamisvedet syntyivät sekä jäätikön sisällä että pinnalla tapahtuvan sulamisen seurauksena (Chorley ym. 1984: 457). Glasifluviaalisia, lajittuneesta aineksesta, kuten hiekasta ja sorasta syntyneitä kasaumuodostumia ovat esimerkiksi harjut ja kamemaasto (Gray 2019: 229), kun taas eroosiomuodostumia ovat rinteiden lieveuomat, jäätikköjoen vesipyörteen ja irtokivien kallioperään kuluttamat hiidenkirnut sekä erilaiset sulavesiuomat (Johansson 2005a: 119, 122, 124–126).

2.3 Hydrologia

Hydrologia sisältää maapallon pintavedet eri muodoissaan, esimerkiksi vetenä, jäänä ja lumena sekä niiden hydrologiset ominaisuudet. Pintavesiin lukeutuvat erilaiset vesistöt, kuten meret, järvet, kosteikot ja lähteet (Kozłowski 2004: 834; Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 141), joiden lisäksi hydrologiaan kuuluvat pohjavesivarannot (Gray 2013: 81). Vedenkierto perustuu näiden eri vesivarastojen sisällä ja välillä tapahtuvaan liikkeeseen (Gregory 2010: 66). Geodiversiteetin määritelmään kuuluvista hydrologisista elementeistä on esitetty eri näkökulmia tutkijoiden kesken (Crisp ym. 2021: 517). Rajatumman määritelmän mukaan niihin lukeutuvat vain pintavedet (esim. Kozłowski 2004: 834), kun taas laajemmasta näkökulmasta ne sisältävät myös pohjavesivarannot (esim. Gray 2013: 56, 81).

Vedenkierron eri vaiheet ovat vuorovaikutuksessa muiden geodiversiteetin osa-alueiden kanssa. Tätä yhteyttä on kuitenkin tutkittu pääosin kapeasti, lähinnä joidenkin vedenkierron vaiheiden ja geodiversiteetin muiden yksittäisten osa-alueiden, kuten geologisten elementtien välillä. Siitä, mitkä hydrologiset elementit ovat geodiversiteetin tutkimuksessa keskeisimpiä, ei ole tutkimuskentällä päästy yhteisymmärrykseen (Perotti ym. 2019: 2–3). Yleisesti hydrologisista elementeistä joet, järvet ja lähteet ovat geodiversiteetin määrällisessä tutkimuksessa käytetyimpiä, kun taas esimerkiksi puroja, lampia, tekoaltaita tai vesiputouksia ei juuri tutkimuksissa ole huomioitu. Meri, pohjavesivarannot ja kosteikot ovat olleet niitä hieman yleisemmässä roolissa, mutta silti huomattavan vähän huomioituja (Crisp ym. 2021: 524, 530).

Geodiversiteetin tutkimuksessa hydrologisia elementtejä on tutkittu eri näkökulmista ja monin menetelmin. Esimerkiksi Perotti ym. (2019: 1, 7) ovat kehittäneet määrällislaadullisessa tutkimuksessaan hydro-geodiversiteetin arviointimenetelmän vesivarantojen ja geodiversiteetin yhteydestä, joka perustuu käsitteelliseen malliin ja GIS-analysointiin. Ilic ym. (2016: 325, 329–332) ovat kartoittaneet hydrologisista elementeistä tutkimusalueen joet ja lähteet tutkiessaan kaupunkialueen geodiversiteettiä geodiversiteetti-indeksin avulla. Manosso & de Nobrega (2016: 191, 193–194, 197–198) taas ovat laskeneet ja luokitelleet hydrologisia elementtejä, kuten jokityyppejä tutkiessaan maisematason näytekysiköiden geodiversiteettiä Cadeadon alueella Brasiliassa. Scarsi ym. (2019: 1–2, 9) ovat tehneet Italiassa sijaitsevaan luonnonpuistoon georeferoidun geologisen kartan, jossa huomioitiin pH-arvoltaan emäksiset lähteet hydrologisena elementtinä.

3 Geodiversiteetin merkitys

Sharplesin (2002: 9–11) mukaan geodiversiteetin arvot voidaan jakaa ihmiskeskeisiin ja ekologisiin arvoihin sekä itseisarvoon. Geodiversiteettiin kytkeytyviä ihmiskeskeisiä hyötyjä voidaan tarkastella myös elottoman ja elollisen luonnon tarjoamien ekosysteemipalveluiden näkökulmasta. Geodiversiteetti muun muassa luo monimuotoisia elinympäristöjä, osallistuu orgaanisen aineksen kierrätykseen ja säännöstelee vedenkiertoa. Näkökulma ei kuitenkaan ota geodiversiteettiä kokonaisvaltaisesti huomioon (Gray 2013: 83, 149), ja monet geodiversiteetin tarjoamista resursseista jäävät ekosysteemipalvelu -käsitteen ulkopuolelle, vaikka geodiversiteetti on osa luonnon tarjoamaa pääomaa (Gray 2018b: 227). Vastineeksi varsinaiselle ekosysteemipalveluiden määritelmälle onkin nimetty geosysteemipalvelut (Gray 2019: 227–228). Ne voidaan jakaa viiteen eri luokkaan: (1) sääntelevät palvelut (esimerkiksi maaperän kyky suodattaa vettä), (2) ylläpitävät palvelut (esimerkiksi vesistöihin ja jäätiköihin varastoituva vesi), (3) tuotantopalvelut (esimerkiksi makea vesi ja energialähteet), (4) kulttuuripalvelut, kuten geomatkailu ja (5) tietopalvelut, jotka ylläpitävät tietoa maapallon historiasta (Gray 2018b: 108).

Geoperintö (*geoheritage*) ja geosuojelu (*geoconservation*) ovat kiinteästi kytköksissä toisiinsa, ja ovat osa geodiversiteetin määrittämistä ihmiskeskeisistä arvoista käsin. Geoperintö -käsitteellä on pitkät historialliset juuret (Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 140). Siihen lukeutuvat esimerkiksi tieteellisesti arvokkaat geokohteet (*geosites*) ja erilaiset geoelementit (*geodiversity elements*), kuten mineraalit ja fossiilit riippumatta siitä, onko ne siirretty pois alkuperäiseltä

sijainniltaan. Tieteellinen arvo on geoperinnöltään arvokkaiden kohteiden yhteinen keskeinen nimittäjä, mutta niillä voi lisäksi olla myös opetuksellista, esteettistä tai kulttuurista arvoa. Yksittäisten geokohteiden tieteellinen merkittävyys voi myös muuttua ajan myötä. Tällöin kohde voi yhä olla monin tavoin arvokas osa geodiversiteettiä, mutta ei enää täytä esimerkiksi geoperinnön kriteereitä (Brilha 2016: 120). Geosuojelulla tarkoitetaan toimia, joiden tavoitteena on säilyttää ja suojella elotonta ympäristöä. Suojelun keskiössä ovat esimerkiksi kallio- ja maaperä sekä erilaiset geomorfologiset muodostumat ja ympäristöä muokkaavat prosessit (Sharples 2002: 1–2, 6–7, 10).

Geodiversiteetin ja geoperinnön säilymisellä on suuri merkitys luonnonsuojelullisesta näkökulmasta (Gordon ym. 2018: 192, 199), mutta ne on kuitenkin yhä liian vähäisesti huomioitu poliittisella tasolla tai edes suojelualueiden osalta. Näin siitäkin huolimatta, että geosuojelun avulla on mahdollista vaikuttaa esimerkiksi ilmastonmuutokseen sopeutumiseen (Beier ym. 2015; Gordon ym. 2018: 192, 195–196). Conserving Nature’s Stage -näkemys perustuu teoreettiseen ajatukseen, että eloton luonto toimisi biodiversiteettiä suojaavana tekijänä muuttuvassa ilmastossa. Näkemyksen mukaan suojelua tulisi kohdentaa elottoman luonnon muodostamaan monimuotoiseen ympäristöön, joka sitä kautta vaikuttaisi biodiversiteetin säilymiseen (Anderson & Ferree 2010: 1, 5, 9; Lawler 2015: 619, 625; Beier ym. 2015: 614–615).

Eloton luonto luo monimuotoisia elinympäristöjä, joka on perustana ekologisille prosesseille ja niiden vuorovaikutukselle (Anderson & Ferree 2010: 1–2; Lawler ym. 2015: 619–620). Geodiversiteetin yksittäisten osa-alueiden, kuten maaperän tai vesistöjen vaikutusta ja suhdetta biodiversiteettiin on tutkittu useista eri näkökulmista (esim. Anderson & Ferree 2010; Antonelli ym. 2018; Tukiainen ym. 2019). Esimerkiksi maaperän ja vesistöjen kemialliset ominaisuudet tai geomorfologisten muodostumien rakenne ja aines ovat tärkeitä tekijöitä eliölajien sopeutumiselle tiettyyn elinympäristöön (Anderson & Ferree 2010: 6; Lawler ym. 2015: 620). Geologia ja topografia vaikuttavat myös eliölajien levinneisyyteen ja monimuotoisuuteen (Lawler ym. 2015: 620, 622). Koko geodiversiteetin, eli kaikkien osa-alueiden yhteistä yhteyttä biodiversiteettiin ei sen sijaan ole vielä tutkittu kattavasti (Tukiainen ym. 2022b: 3–4). Geodiversiteetin käsitteelliset haasteet ja määritelmien epäselvyydet ovat Boothroydin ja McHenryn (2019: 9, 12) mukaan yksi keskeinen tekijä, joka on hidastanut sen sisällyttämistä osaksi biodiversiteettitutkimusta. Riittävän empiirisen tutkimuksen puuttuessa ei toistaiseksi tiedetä tarpeeksi siitä, mitä kaikkea geodiversiteetin suojele voisi merkitä biodiversiteetin suojelelle, ja luonnonsuojelulle ylipäätään (Lawler ym. 2015: 620, 622, 625; Beier 2015: 613, 615–616).

Vaikka geodiversiteetin suojelua pidetään tärkeänä erityisesti biodiversiteetin vuoksi, ja koska se tarjoaa lukuisia hyötyjä ihmiskunnalle ja erilaisille maapallon toiminnolle, on sillä näiden välineellisten arvojen lisäksi myös itseisarvoa (Sharples 2002: 2, 6; Hjort ym. 2015: 631). Tietoa tarvitaan eri mittakaavoilta, koska se syventää ymmärrystä geodiversiteetistä ja siihen liittyvistä erilaisista arvoista (Serrano ja Ruiz-Flaño 2007: 140, 142–143; Prosser 2013: 579). Nykypäivänä merkittävimmät geodiversiteettiin kohdistuvat uhat liittyvät maankäyttöön, kuten kaivostoimintaan ja turvetuotantoon, jätteiden käsittelyyn ja kaupunkialueiden laajentuminen sekä ilmastonmuutokseen (Gray 2013: 152–154, 163, 183–184). Nämä ovat osa laajempaa, ihmisen toimintaan kytkeytyvää globaalimuutosta (Chapin III ym. 2000: 234). Geologiset luonnonvarat ovat usein haavoittuvaisia erilaisten tekijöiden vaikutuksille, kuten pohjaveden saastumiselle tai maanpinnan eroosiolle, ja syntyneet vahingot, esimerkiksi geodiversiteetin vähentyminen, ovat suhteellisen pysyviä (Sharples 2002: 2, 6). Geodiversiteetin tutkimus keskittyykin Grayn (2005: 5) mukaan usein suojelunäkökulmaan ja sen sovelluksiin. Tämän vuoksi on tärkeää, että geosuojelu ulottuu eri mittakaavoille (Serrano ja Ruiz-Flaño 2007: 142–143; Prosser 2013: 569, 579).

Geodiversiteetin suojeluun on pyritty löytämään sekä kansallisia, että kansainvälisiä keinoja luomalla erilaisia sopimuksia ja suojeluverkostoja (Gray 2013: 201–204). Keskeinen esimerkki on Yhdistyneiden kansakuntien kasvatus-, tiede- ja kulttuurijärjestön eli UNESCO:n Global Geopark -verkosto (*GGN, Global Geopark Network*), johon kuuluu 195 kohdetta (lukumäärä 19.8.2023) ympäri maailmaa. Geopark kuvaa maantieteellistä aluetta, joka on geologisilta arvoiltaan merkittävä (UNESCO global...). Geopark-alueiden keskeisimmät tavoitteet ovat Grayn (2013: 239–240) mukaan geoperinnön suojelu, yleisen tiedon lisääminen ja kestävä kehitys, joka tarjoaa myös paikallista taloudellista hyötyä geomatkailun kautta. Toinen yleisesti tunnettu geodiversiteetin suojeluinstrumentti on UNESCO:n maailmanperintöluettelo, johon on koottu arvokkaita luonto- ja kulttuuriperintökohteita. Tavoitteena on tunnistaa, suojella ja säilyttää tätä perintöä myös tuleville sukupolville (World Heritage). Listalle päästäkseen ehdotetun kohteen on täytettävä useita kriteereitä ja ehdotuksen tehneen valtion on sitouduttava suojeluun myös lainsäädännöllisesti (Gray 2013: 220–222). UNESCO on julistanut geodiversiteetille oman kansainvälisen päivän, jota vietetään vuosittain 6. lokakuuta. Sen tarkoituksena on lisätä ymmärrystä geotieteiden merkittävästä roolista ihmiskuntaan kohdistuvien globaalien haasteiden ratkaisemisessa ja pyrkiä vahvistamaan yleistä tietoisuutta geodiversiteetin tärkeydestä (International...). Tämän lisäksi Kansainvälinen geologisten tieteiden unioni (*IUGS, International Union of Geological*

Sciences) on perustanut Global Geosites -projektin, jonka tavoitteena on kartoittaa kansainvälisesti merkittäviä geoperintökohteita globaalilla mittakaavalla (IUGS Geological...).

4 Geodiversiteetin tutkimus

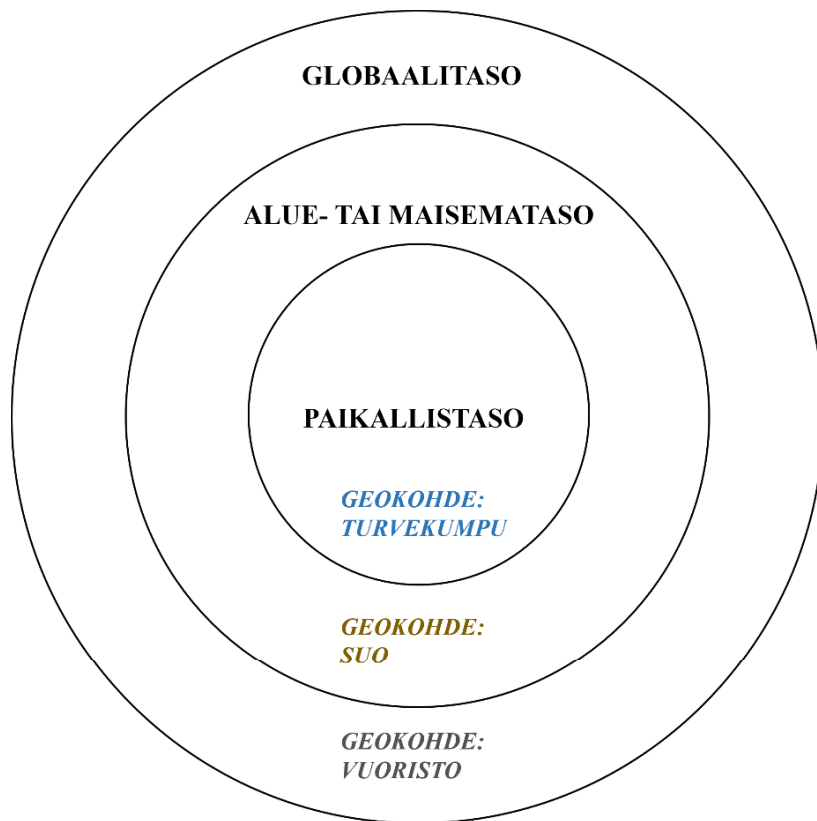
Geodiversiteetin tutkimus on painottunut määrälliseen eli kvantitatiiviseen tutkimukseen, jonka perustana voivat olla maastossa tehdyt mittaukset, laskutoimitukset tai raakadatan analysointi paikkatiedon avulla. Geodiversiteetin ja sen vaihtelun tarkastelussa hyödynnetään yleisesti erilaisia parametreja eli tunnuslukuja ja indikaattoreita (Zwoliński ym. 2018: 32, 36). Noin puolet tehdyistä geodiversiteetin määrällisistä tutkimuksista on Crispin ym. (2021: 514, 525–526) tekemän kartoituksen mukaan keskittynyt pelkästään geodiversiteetin arvioimiseen ilman kytköstä biodiversiteettiin. Loppuosa taas on kohdistunut biodiversiteetin ja geodiversiteetin väliseen yhteyteen (esim. Alahuhta ym. 2018; Bailey ym. 2018; Tukiainen ym. 2019) joko jossain määrin tai vahvasti. Maantieteellisesti geodiversiteetin määrällistä tutkimusta on tehty eniten Euroopassa ja Etelä-Amerikassa, erityisesti Brasiliassa. Määrällisen tutkimuksen lisäksi geodiversiteettiä voidaan arvioida laadullisin eli kvalitatiivisin tutkimusmenetelmin, jolloin se on kuvailevaa ja perustuu pääasiassa asiantuntijatietoon ja -kokemukseen. Myös laadullisissa tutkimuksissa painotukset voivat vaihdella. Lisäksi tutkimussuuntauksena voi olla määrällisen ja laadullisen tutkimuksen yhdistelmä (Zwoliński ym. 2018: 32, 34–36, 39).

Geodiversiteetin arviointiin liittyvään tutkimusprosessiin ja -menetelmien valintaan vaikuttavat tutkimuksen tarkoitus, tutkimusalueen ominaispiirteet ja mittasuhteet sekä sopivassa mittakaavassa saatavilla oleva paikkatieto. Tärkeää onkin etukäteen perehtyä, millaisia vaatimuksia valittu tutkimusaihe ja sen laajuus tutkimusprosessille asettavat (Zwoliński ym. 2018: 30). Geodiversiteettiä on tutkittu monenlaisissa ympäristöissä, joista maaseutumaiset ja vuoristoiset alueet ovat Ilićin ym. (2016: 325) mukaan olleet suosituimpia tutkimuskohteita. Näillä alueilla ihmistoiminnan vaikutus geodiversiteettiin on ollut verrattain vähäistä ja alueet ovat olleet harvaanasuttuja tai asuttamattomia. Esimerkiksi Hjort & Luoto (2010) ovat tehneet tutkimusta Pohjois-Suomessa, subarktisella alueella ja Pellitero ym. (2011) topografisesti vaihtelevassa luonnonpuistossa Espanjassa. Kaupunkialueiden geodiversiteetin tutkimus taas on perusteltua väestötiheyden ja kaupunkisuunnittelun asettaessa geodiversiteetille monenlaisia vaatimuksia (Ilić ym. 2016: 325). Meri-, jäätikkö-, luola- ja laaksoympäristöihin liittyvää geodiversiteetin tutkimusta sen sijaan on tehty vain vähän (Crisp ym. 2021: 524–525, 534).

4.1 Tutkimuksen mittakaava

Geodiversiteetti on spatiaalinen käsite. Se kytkeytyy maantieteelliseen mittakaavaan, koska sen osa-alueet ovat sidoksissa paikkaan ja sijaintiin (Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 143). Grayn (2013: 15) mukaan geodiversiteettiä esiintyy kaikenlaisissa ympäristöissä, paikallisesta aina globaaliin mittakaavaan. Tutkimuksissa onkin käytetty erilaisia mittakaavoja, esimerkiksi Hjort ym. (2022) ovat tehneet paikallistason (*local scale*), Tukiainen & Hjort (2021) maisematason (*landscape scale*), Carrión-Mero (2022) aluetason (*regional scale*) ja Wolniewicz (2023) globaalitason (*global scale*) tutkimusta. Geodiversiteetin tutkiminen erilaisista mittakaavoista käsin on tärkeää, koska geodiversiteettiin kohdistuu monenlaisia paineita muun muassa ympäristössä tapahtuvista muutoksista ja maankäytöstä johtuen. Nämä vaikutukset myös näkyvät eri mittakaavoilla (Gordon & Barron 2013: 5). Geodiversiteettiin liittyvä ymmärrys syventyy, kun geodiversiteettiä tarkastellaan moniulotteisesti eri mittakaavoilta tehtyjen tutkimusten kautta (Serrano ja Ruiz-Flaño 2007: 143).

Geodiversiteetin tutkimuksessa mittakaavan valinta on keskeinen osa prosessia (Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 143). Valittu mittakaava vaikuttaa siihen, millaisia asioita tutkimuksessa otetaan huomioon ja mihin geodiversiteetin ominaisuuksiin keskitytään (Gray 2013: 433; kuva 1). Maisematasolla tutkimus kohdentuu laajalle alueelle, kuten koko Suomen geodiversiteetin vaihteluun, eikä huomio tällöin ole yksittäisissä geokohteissa (Tukiainen & Hjort 2021: 58). Paikallistason tutkimuksessa on sen sijaan mahdollisuus keskittyä pienialaisiin, yksittäisiin geokohteisiin, kuten esimerkiksi jokien virtaustyyppien määrään tutkimusalalla, joka muodostaa osan tutkimusalueen paikallisesta geodiversiteetistä (Kärnä ym. 2018: 7, 10–11).



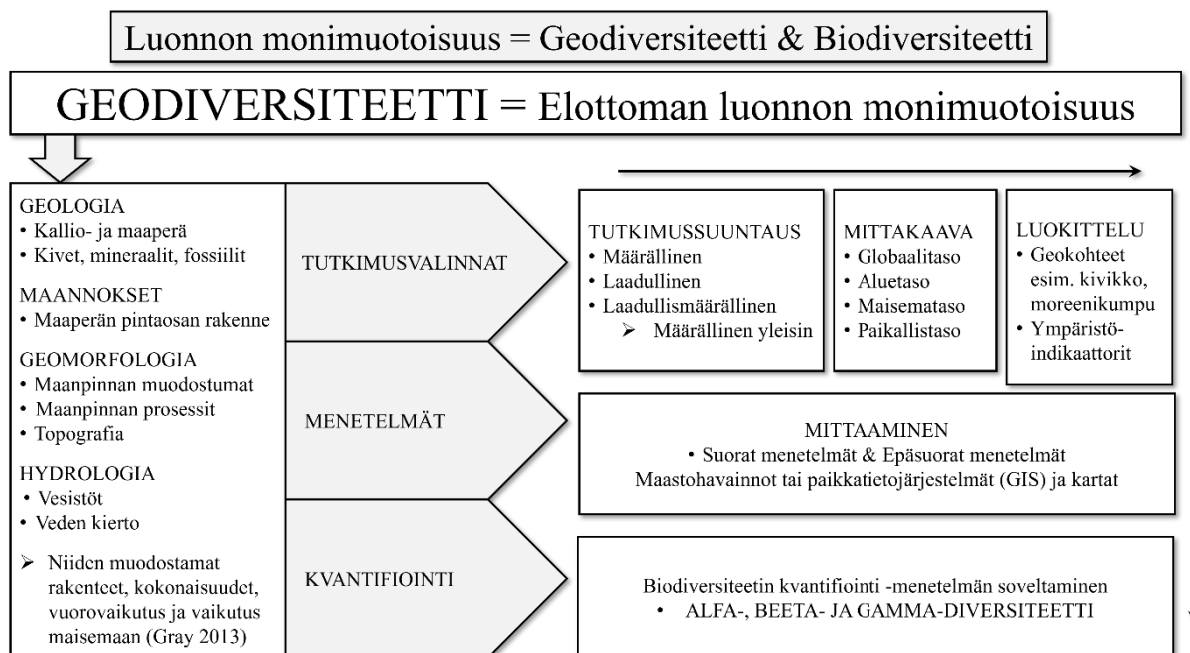
Kuva 1. Geodiversiteettiä esiintyy eri mittakaavoilla, joten sitä on tärkeä tutkia aina globaalitasolta paikallistasolle. Mittakaava vaikuttaa siihen, millä resoluutiolla geokohteita tutkimuksessa tarkastellaan, kuten kuvassa on esitetty esimerkein (mukaiillen Gray 2013; Antonelli ym. 2018; Tukiainen & Hjort 2021; Hjort ym. 2022).

Geodiversiteettiä on maantieteellisestä näkökulmasta tutkittu pääosin maisematasolla (esim. Tukiainen & Hjort 2021), kun taas paikallistason geodiversiteetin kartoittaminen ja mittaaminen vaativat kehittämistä. On tärkeä saada tietoa geodiversiteetin pienipiirteisestä vaihtelusta ja siksi tarvitaan uusia, juuri paikallista vaihtelua mittaavia menetelmiä (Hjort ym. 2022: 1757). Tähän tarpeeseen ovat pyrkineet vastaamaan Kärnä ym. (2018: 7) valokuvatarkasteluun perustuvalla menetelmällä, Hjort ym. (2022: 1758) luomalla geokohteiden visuaalisen havainnointimenetelmän ja Crisp ym. (2022: 124) biodiversiteettiä ja geodiversiteettiä yhdistävällä lähestymistavalla, omnidiversiteetillä.

4.2 Mittaaminen

Geodiversiteetin kartoittamiseen, arviointiin ja mittaamiseen on panostettu vielä verrattain vähän, vaikka sitä kirjallisuudessa pidetään yleisesti tärkeänä tavoitteena (Soms 2017: 272; Zwoliński ym. 2018: 27). Toisaalta uutta tutkimusta geodiversiteetin mittaamisesta tehdään koko ajan enemmän (esim. Tukiainen & Hjort 2021; Zakharovskyi & Németh 2021; Tukiainen

ym. 2022a; Hjort ym. 2022). Tähän mennessä geodiversiteetin mittaamisessa on hyödynnetty eniten määrällisiä menetelmiä (Zwoliński ym. 2018: 36), ja keskeisimmät tutkimukselliset valinnat koskevat geodiversiteetin osa-alueiden luokittelua, siihen sopivia laskukaavoja ja mittakaavaa (Pellitero ym. 2015: 221; kuva 2). Hjort ym. (2022: 1758) korostavat, että aineistonkeruussa käytettävä geokohteiden luokittelu on tasapainoilua sopivan luokittelutarkkuuden suhteen. Luokittelua voidaan tehdä eri tavoin, ja siinä on mahdollista keskittyä esimerkiksi yksittäisiin geokohteisiin tai laajempiin geodiversiteetin osa-alueisiin, kuten hydrologisiin tai geomorfologisiin elementteihin (Crisp ym. 2021: 524). Yhtenä vaihtoehtona luokittelussa voidaan käyttää myös ympäristöindikaattoreita erityisesti laajoille mittakaavoille. Ne ovat tietyille geokohteille tyypillisiä ympäristöjä tai ympäristön ominaisuuksia, kuten vaihtelevia korkeussuhteita (Pellitero ym. 2015: 221).



Kuva 2. Geodiversiteetin tutkimusprosessi koostuu useasta toisiinsa vaikuttavasta vaiheesta. Geodiversiteetin tutkimuksessa voidaan soveltaa biodiversiteetin tutkimuksessa käytettyä alfa-, beeta- ja gamma-diversiteettiä (kuva mukailen Gray 2013; Pellitero ym. 2015; Zwoliński 2018; Tukiainen ym. 2022a).

Millaisia välineitä geodiversiteetin mittaamiseen sitten on olemassa? Kirjo on moninainen, mutta menetelmät eivät ole vielä vakiintuneita (Pellitero ym. 2015: 220; Crisp ym. 2021: 523, 529–530; Tukiainen ym. 2022a: 2). Geodiversiteetin mittaamisen tavat pohjautuvat usein spatiaaliseen analytiikkaan ja paikkatietoon, mikä tukee niiden yleistä vertailtavuutta (Crisp ym. 2021: 529). Määrällisessä tutkimuksessa käytettyjä mittareita ovat Zwoliński ym. (2018: 34–37) mukaan erilaiset indeksit, kuten geodiversiteetti-indeksit ja maiseman rakennetta

kuvaavat mittaluvut (*landscape metrics*). Niiden avulla mitataan valittujen ympäristön ominaisuuksien ja elementtien voimakkuutta tutkimusalueella. Varsinaisia geodiversiteetti-indeksejä on erilaisia ja niitä käytetään yleisesti geodiversiteetin mittaamisen menetelmänä (Tukiainen & Hjort 2021: 57). Niistä suosiota on saanut etenkin Serrano ja Ruiz-Flaño (2007) kehittämä indeksi, jota muut tutkijat ovat myöhemmin kehittäneet eteenpäin (Pellitero ym. 2015: 220; Zwoliński ym. 2018: 36–37). Siinä yhdistyvät erilaisten geomorfologisten, geologisten ja hydrologisten tekijöiden sekä maaperän lisäksi karkeuskerroin (*coefficient of roughness*) ja yksikön pinta neliökilometreinä (Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 144).

Zwolińskin ym. (2018: 34, 37) mukaan spatiaalinen yhdistäminen (*spatial aggregation*) (esim. Pellitero ym. 2011) ja kolmiulotteinen visualisointi (esim. Martinez-Granã ym. 2015) ovat sopivia menetelmiä geodiversiteetti-indeksien jatkokäsittelyyn. Niiden avulla voidaan esimerkiksi tehdä karttoja, jotka kuvaavat geodiversiteetiltään runsaita alueita ja ympäristön erityispiirteitä samanaikaisesti (Martinez-Granã ym. 2015: 8031). Ruudukkopohjaisesta aineistosta (*grid-based*) lasketun geodiversiteetti-indeksin visualisointi geodiversiteettikartaksi taas havainnollistaa tutkimusalueen geodiversiteetin eri osa-alueiden alaindeksien tulokset yhteen (Pereira ym. 2013: 545–548).

Hjortin ja Luodon (2010: 115) mukaan tutkimusalueen peittävä ruudukko sopii spatiaalisena tutkimusmenetelmänä geodiversiteetin kartoittamiseen ja mittaamiseen. Sitä on mahdollista hyödyntää myös laajemmin geodiversiteetin ja muun ympäristön välisten suhteiden tarkastelussa. Ruudukkopohjaisen menetelmän etuna on mahdollisuus tarkastella samankokoisia tutkimusyksiköitä, joka lisää tutkimuksen objektiivisuutta. Siitä onkin Pereiran ym. (2013: 544) mukaan tullut yleinen tutkimusmenetelmä geodiversiteetin tutkimuksessa, jota käytetään erityisesti maisema- ja aluetasolla (esim. Pereira ym. 2013; Silva ym. 2013; Tukiainen ym. 2022a). Siinä jokaiselta ruudukon muodostamalta neliöltä lasketaan sillä esiintyvien erilaisten tutkimuskohteiden eli geodiversiteetin eri osa-alueiden lukumäärä. Näiden geokohteiden yhteenlasketusta summasta saadaan selville tutkimusalueen georunsaus (Tukiainen & Hjort 2021: 57). Se voidaan tehdä yksinkertaisimmillaan laskemalla, esiintyykö geokohde tutkimusalalla vai ei (Hjort ym. 2022: 1758).

Keskeisiä menetelmiä geodiversiteetin mittaamisessa ovat myös tilastollinen mallintaminen ja kartta-algebra, joka perustuu matemaattisten lausekkeiden käyttöön pääsääntöisesti rasterimuotoisen aineiston kanssa (Zwolińskin ym. 2018: 35, 38). Tosin Crispin ym. (2021: 529, 535) mukaan tilastollisen analyysin työkaluja, kuten korrelaatiokerrointa tai lineaarista regressiomallia on hyödynnetty pääsääntöisesti geodiversiteetin ja biodiversiteetin välisen suhteen tutkimuksessa, eikä niinkään pelkästään geodiversiteetin mittaamiseen.

Paikkatietojärjestelmät tarjoavat nykyisin lukuisia mahdollisuuksia datan käsittelyyn, analysointiin ja visualisointiin eri mittakaavoissa (Zwoliński ym. 2018: 28). GIS-pohjaista spatiaalista analyysia ja sen erilaisia työkaluja hyödynnetään yleisesti geodiversiteetin tutkimuksessa. Esimerkiksi rasterointia, interpolointia, skaala-analyysia, solutilastointia sekä sentroidianalyysia on käytetty geodiversiteetin mittaamiseen (Crips ym. 2021: 529). Kaukokartoituksen ja DEM:n avulla voidaan Hjortin ja Luodon (2012: 79) mukaan mitata geodiversiteettiä alue- ja maisematasolla kustannustehokkaasti. Ne sopivat erityisesti laajojen ja logistisesti vaikeakulkuisten tutkimusalueiden kartoitukseen. Esimerkiksi DEM:in pohjatuuvasta valotutka (*light detection and ranging, LiDAR*) -aineistosta voidaan saada tietoa geomorfologisista muodostumista (Tukiainen 2019: 13–14). Pienemmän mittakaavan, kuten paikallistason geodiversiteetin mittaaminen vaatii kuitenkin välineiltä erilaista tarkkuutta (Gray 2013: 433).

Vaikka geodiversiteetin mittaamiseen on olemassa useita erilaisia menetelmiä, on niiden käyttäminen tutkimuksissa vielä kokonaisuudessaan hajanaista (Crisp ym. 2021: 535). Geodiversiteetin mittaukseen keskittyvä tutkimus ei aina onnistu viemään tutkimusmetodologian kehitystä eteenpäin toivotunlaisesti, kuten esimerkiksi kehittämään uusia tai jo olemassa olevia tutkimusmenetelmiä (Soms 2017: 272; Crisp 2021: 527–528). Keskeisimpänä kehittämisen kohteina geodiversiteetin määrällisessä tutkimuksessa Crisp ym. (2021: 530, 535) pitävätkin erityisesti tutkimuksissa käytettävien tilastollisten ja spatiaalisen analyysin tutkimusmenetelmien vertailua ja valintaa sekä geodiversiteettiin liittyvien käsitteiden ja määritelmien yhdenmukaistamista tutkimuskentällä. Myös geodiversiteetin osa-alueiden yleisesti hyväksytty luokittelu vaatii vielä monilta osin kehittämistä ja tutkimusalan teoreettisen viitekehysten kehittyminen vaikuttaa väistämättä myös mittausmenetelmiin, jonka vuoksi sitä on tärkeä seurata (Gray 2013: 432–433). Toisaalta muutamista heikkouksistaan huolimatta olemassa olevat määrällisen tutkimuksen menetelmät kuitenkin tuottavat pääsääntöisesti tarkkoja tuloksia (Zwoliński ym. 2018: 38).

Yhtenä haasteena geodiversiteetin tutkimuksessa ovat myös aineistonkeruun kustannukset, jotka ovat riippuvaisia vapaasti käytettävän aineiston saatavuudesta ja tutkimusalueesta (Hjort ym. 2012: 3493). Geodiversiteetin tutkimuksessa keskitytään usein tiettyihin geodiversiteetin osa-alueisiin eri mittakaavoilla, kuten geomorfologiaan (esim. Ferrer-Valero ym. 2019; Tukiainen ym. 2019), mutta sen kartoittaminen vaatii erityistä asiantuntemusta ja on siksi aikaa vievää (Räsänen ym. 2016: 63). Varsinaista geomorfologista aineistoa onkin saatavilla varsin vähän (Tukiainen ym. 2022b: 8), kun taas maaperästä, kallioperästä, hydrologiasta ja topografiasta on olemassa kattavasti suuren mittakaavan

paikkatietoaineistoja, joista voi tehdä geodiversiteetilaskentoja (Räsänen ym. 2016: 63). Yhdeksi ratkaisuksi kustannuskysymykseen alue- ja maisematason tutkimuksessa voidaan käyttää kaukokartoitusta ja DEM:a, jotka täydentävät muita yleisesti geodiversiteetin tutkimuksessa käytettyjä menetelmiä (Hjort & Luoto 2012: 79). Myös laadulliseen tutkimukseen liittyy heikkouksia, joista keskeisenä voidaan pitää tutkimuksen subjektiivisuutta, koska se perustuu henkilöityvään asiantuntijatietoon. Haasteiksi nousevat eri tutkimusalueilta saatujen tulosten vertailtavuus ja tulosten arviointi (Zwoliński ym. 2018: 36).

4.2.1 Topografia ja geodiversiteetti

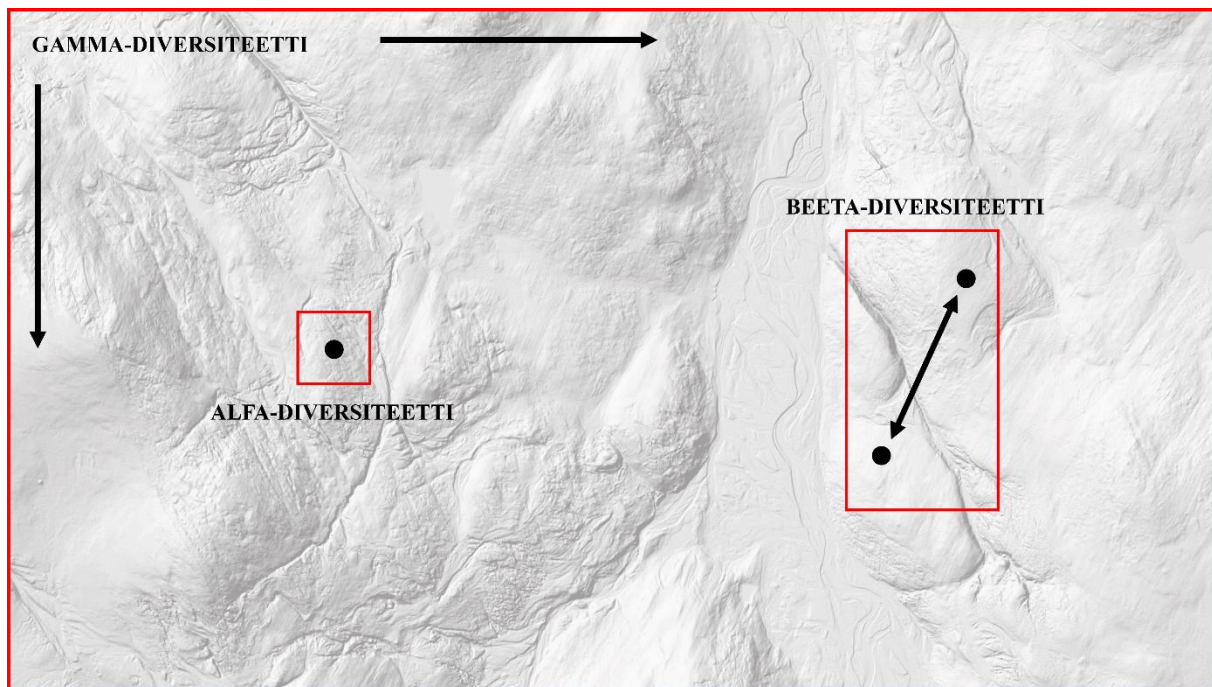
Topografinen heterogenia kuvaa maapallon pinnan vaihtelevuutta, ja on Grayn (2013) geodiversiteetin määritelmän mukaan osa geomorfologista vaihtelua. Topografista heterogeniaa on yleisesti kuvattu esimerkiksi rinteiden kaltevuuden, korkeuden ja sen vaihtelun sekä rinteiden suunnan avulla. Näiden muuttujien laskennassa voidaan käyttää hyödyksi DEM:a (Amatulli 2018: 1). Maaston jyrkkyyksiä (*terrain ruggedness index, TRI*) voidaan käyttää topografisen heterogenian määrällisenä mittarina. Se laskee, miten DEM:n ruudukon solujen korkeuseron määrä muuttuu verrattuna viereisiin kahdeksaan soluun (Riley ym. 1999: 23–24), mutta on olemassa myös muita menetelmiä topografisen heterogenian laskemiseen (Amatulli 2018: 5).

Korkean resoluution topografista korkeusaineistoa tuotetaan etenkin valotutkan ja fotogrammetrisen kuvantamistekniikan avulla (*structure-from-motion, SfM*). Valmiiden aineistojen saatavuus korkealla resoluutiolla on karkeaa resoluutiota rajatumpaa, mutta topografisia muuttujia, kuten kaltevuutta voidaan kuitenkin laskea muun muassa DEM:n avulla (Doherty ym. 2021: 2–3). Rinteiden suunnan laskemisessa sini- ja kosinimuunnokset ovat tärkeässä roolissa. Ne kuvastavat rinteiden pohjoiseteläsuuntaisia ja itälänsisuuntaisia eroavaisuuksia (Amatulli 2018: 5).

Korkeuden vaihtelu on hyvin yleisesti ekologisissa tutkimuksissa käytetty topografinen muuttuja (Tukiainen ym. 2017: 365, 370). Korkeus sekä kaltevuuskulma ovat sen sijaan sopivia muuttujia geomorfologiseen tutkimukseen (Hjort & Luoto 2010: 111). Kaiken kaikkiaan erilaisten topografisten muuttujien valinta ja käyttö geodiversiteetin tutkimuksessa on kokonaisuudessaan ollut melko vaihtelevaa (Crisp ym. 2021: 530).

5 Diversiteetin eri tasot

Luonnon monimuotoisuus eli diversiteetti voidaan jakaa erilaisiin tasoihin ja osatekijöihin. Biodiversiteettiä on perinteisesti tutkittu hierarkkisesta näkökulmasta, jossa erotellaan paikallinen eli alfa-diversiteetti (α), alueiden välinen eli beeta-diversiteetti (β) ja koko alueen eli gamma-diversiteetti (γ) (Whittaker 1960: 320, Whittaker 1972; Anderson ym. 2011; Farahi ym. 2016; Tukiainen ym. 2019; kuva 3). Erityisesti beeta-diversiteettiin on kiinnitetty viime vuosina paljon huomiota ekologisessa tutkimuksessa (Anderson ym. 2011: 19).



Kuva 3. Alfa-diversiteetti (α) kuvaa paikallista, beeta-diversiteetti (β) alueiden välistä ja gamma-diversiteetti (μ) koko alueen monimuotoisuutta (tehty Whittakeria 1960 mukailleen; kuvan taustaineistona on 12/2022 ladattu Maanmittauslaitoksen rinnevarjostus 2 m, mutta kuva ei perustu tutkimusaineistoon).

Tukiainen ym. (2022a: 2–4, 9) osoittavat, että alfa, beeta ja gamma -näkökulmaa on mahdollista soveltaa myös tarkasteltaessa geodiversiteettiä. Samalla tavalla kuin biodiversiteetin tutkimuksessa voidaan tarkastella eliölajien määrää (*species richness*), ja runsautta (*species abundance*) alfa-, beeta- ja gamma-diversiteetin tasoilla, voidaan geodiversiteettiä tarkastella geokohteisiin pohjautuvana alfa-, beeta- ja gamma-geodiversiteettinä. Tämä näkökulma tarjoaa geodiversiteetin tutkimukseen tuoreen lähestymistavan, jossa voidaan uudella tavalla hyödyntää erilaisia maastossa kerättyjä, tai muista lähteistä, kuten GIS-aineistoista koottuja geokohdetietoja. Yhtenevän viitekehyksen, ja samojen menetelmien käyttäminen sekä

biodiversiteetin että geodiversiteetin määrittämisessä tarjoaa mahdollisuuden myös yhdenmukaiseen luonnon monimuotoisuuden mittaamiseen.

Jotta voidaan mitata diversiteettiä, on aineisto ensin luokiteltava sopiviin alatyyppeihin, esimerkiksi erilaisiin eliölajeihin tarkasteltaessa biodiversiteettiä, tai geokohteisiin tarkasteltaessa geodiversiteettiä. On myös tehtävä valintoja sopivista mittaustavoista ja tarvittavista laskukaavoista. Diversiteetti sinänsä on käsitteenä yleinen ja joustaa eri tarkoituksiin (Tuomisto 2010: 4, 17–18). Mittaaminen perustuu yksinkertaistetusti oletuksiin sekä lajien että niihin kuuluvien yksilöiden keskinäisestä tasavertaisuudesta (Magurran 2004: 11). Samalla tavalla geodiversiteettiin kuuluvat kaikki geokohteet riippumatta esimerkiksi suojelullisesta arvosta (Gray 2018a: 14–15). Biodiversiteettiä voidaan mitata sekä eliölajien määränä että runsautena (Ibáñez ym. 1995: 216, 219), joista lajimäärän laskeminen on mittaustavoista yksinkertaisimpia (Tuomisto 2010: 4). Sillä tarkoitetaan tutkimusalalla olevien lajien määrää, kun taas runsaudella viitataan lajikohtaiseen yksilömäärään (Magurran 2004: 9, 12). Geodiversiteetin tutkimuksessa yleisin mittaamisessa käytetty menetelmä on laskea, paljonko tutkimusalueella on erilaisia geokohteita (Alahuhta ym. 2020: 1), kuten kivi- ja maalajeja sekä geomorfologisia muodostumia (esim. Hjort & Luoto 2010: 112; Toivanen ym. 2019: 1713). Geodiversiteetin tutkimuksessa mittausten resoluutio vaikuttaa siihen määritelläänkö laskentojen pohjalta saatu geokohteiden määrä alfa vai gamma-geodiversiteetiksi (Tukiainen ym. 2022a: 4).

Alfa, beeta ja gamma -näkökulman yhdistäminen geodiversiteetin mittaamiseen voi tuoda monia hyötyjä. Alfa-geodiversiteetin kautta saadaan tietoa tutkimusaluekohtaisesta paikallisesta geodiversiteetistä, jota voidaan hyödyntää niin tutkimuskentällä, ympäristön arvioinnissa, kuin ennustamaan biodiversiteettiä. Nykyiset geodiversiteetin mittaamenetelmät ovat suurilta osin juuri alfa -tason geodiversiteetin mittaamista. Beeta-geodiversiteetin avulla taas voidaan tunnistaa alueita, joilla sijaitsee erityyppisiä geokohteita. Tietoa tarvitaan esimerkiksi suojelalueiden ja maankäytön suunnittelussa. Gamma-geodiversiteetti antaa arvokasta tietoa koko tutkimusalueen geodiversiteetistä, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi arvioitaessa alueen elottoman luonnon kestokykyä suhteessa siihen kohdistuviin käyttöpaineisiin (Tukiainen ym. 2022a: 4). Seuraavaksi käydään läpi yksitellen alfa-, beeta- ja gamma-diversiteetin tasot ja mittaustavat. Diversiteetin tasoihin on lisätty bio- tai geo-etuliite tarkentamaan, onko eri yhteyksissä kyse biodiversiteetistä vai geodiversiteetistä.

5.1 Alfa-diversiteetti

Alfa-biodiversiteetillä tarkoitetaan Whittakerin (1960: 320) alkuperäisen määritelmän mukaan eliölajien määrää tietyssä elinympäristössä tai eliöyhteisössä, mutta sitä voidaan tarkastella myös runsautena (Willis 2019:1). Alfa-biodiversiteetti kuvastaa monimuotoisuutta, joka on kehittynyt, kun eliölajit ovat sopeutuneet erilaisiin ympäristötekijöihin ja muodostaneet juuri niille suotuisia ekologisia lokeroita (Whittaker 1972: 217). Myös geodiversiteetti on riippuvainen paikallisista ympäristötekijöistä eli spatiaalisesta kontekstista, koska erilaiset ympäristöt saavat aikaan eri ominaisuuksia elottomassa luonnossa (Hjort & Luoto 2010: 109–110; Pellitero ym. 2015: 221).

Käytännössä alfa-biodiversiteetin mittaamiseen kuuluu useita erilaisia menetelmiä, jotka kaikki vaativat kattavaa aineistonkeruuta riittävän otoskoon saamiseksi (Magurran 2004: 75–78, 99). Lajimäärän laskeminen on yksi yleisimmistä käytetyistä menetelmistä (Henry ym. 1999; Purvis & Hector 2000: 212–213). Muita sopivia menetelmiä ovat Colwellin ja Coddingtonin (1994: 101, 105, 108–109) mukaan pääasiassa tutkimusalueen arviointi akkumulaatiokäyrien kautta, runsausjakauman parametrien sovittaminen ja ei-parametriset menetelmät, kuten Chaon-indeksi, jota on mahdollista soveltaa 0/1 (0=ei esiinny, 1=esiintyy) -aineistolle. Akkumulaatiokäyrän avulla voidaan vaikuttaa aineistonkeruuseen liittyviin mittaushaasteisiin ja se soveltuu sekä runsauteen, että lajimäärään perustuvaan tutkimukseen (Gotelli & Colwell 2001: 379–380). Lajimäärää havainnollistava akkumulaatiokäyrä muodostuu lajihavaintojen yhteismäärästä, joka toimii aineistonkeruupanoksen funktiona (Colwell & Coddington 1994: 105). Siihen lisätään uusia lajeja satunnaisesti ja muodostuvaa käyrää tarkastellaan vasen-oikeasuuntaisesti (Magurran 2004: 79). Akkumulaatiokäyrän tarkasteluun välineeksi sopii ekstrapolaatio, jonka avulla on mahdollista arvioida tunnetun tutkimusjoukon kautta koko muuta joukkoa (Colwell & Coddington 1994: 101; Magurran 2004: 79).

Lisäksi eliölajien määrän ja runsauden pohjalta voidaan laskea erilaisia monimuotoisuutta mittaavia indeksejä, kuten Hurlbertin, Shannonin ja Simpsonin-indeksit (*Diversity metrics*) (Maurer & McGill 2011: 55–56), joista kaksi viimeistä on yleisimminkin käytettyjä monimuotoisuuden mittareita lajimäärän laskemisen lisäksi (Lande 1996: 1). Lajimäärään perustuvia indeksejä taas ovat esimerkiksi Margalefin ja Menhinickin-indeksit (*Richness metrics*), joihin tarvitaan tieto myös runsaudesta. Lisäksi voidaan laskea lajisuhteiden tasaisuutta mittaavia indeksejä (*evenness metrics*). Tasaisuus kuvaa sitä, miten eliöyhteisön lajien yksilömäärästä muodostuva runsaus vaihtelee niiden kesken tutkimusalueella (Maurer &

McGill 2011: 56–57, 59). Erilaisia biodiversiteetin tutkimuksessa käytettyjä indeksejä voidaan soveltaa geodiversiteetin tutkimukseen (esim. Benito-Calvo ym. 2009: 1441; Manosso ym. 2021: 3, 6) ja niiden käytölle on myös tarvetta. Käytön myötä tutkimusmenetelmät vakiintuvat osaksi geodiversiteetin tutkimusta, jonka myötä geodiversiteetin runsauden ja määrän alueellisesta jakautumisesta saadaan tarkempaa tietoa (Manosso ym. 2021: 2, 8, 11).

Yhteenvetona voidaan todeta, että alfa-biodiversiteetin tutkimus ja siihen liittyvät menetelmät toimivat ohjenuorana alfa-geodiversiteetin tutkimukselle. Samat menetelmät, joita voidaan käyttää alfa-biodiversiteetin laskemiseen, sopivat myös alfa-geodiversiteetille. Sitä voidaan tarkastella yksittäisen tutkimusalan geokohteiden, eli esimerkiksi kivilajien, vesistöjen ja muodostumien vaihtelevuutena, määrinä, runsautena tai peittävyutenä eri mittakaavoilla. Alfa-geodiversiteetin laskemiseen vaaditaan paikkatietoa geokohteista, jota voidaan kerätä esimerkiksi maastossa, tai erilaisista GIS-aineistoista (Tukiainen ym. 2022a: 3, 6). Alfa-diversiteetin mittaamiseen liittyy myös erilaisia epävarmuustekijöitä. Tutkimuksen johtopäätökset perustuvat tutkimusalalta kerättyyn aineistoon, jonka koko ja mahdolliset mittausvirheet vaikuttavat tutkimustulosten luotettavuuteen, kykyyn vastata todellista tutkimusaluetta. Esimerkiksi yleisten mittausvälineiden, kuten diversiteetti-indeksien käytössä on siten tärkeä huomioida mittausvirheet. Puutoksia on mahdollista korjata käyttämällä mittausvälineitä tai -tapoja, jotka sisältävät arvion tutkimusalalta mittaamatta jääneistä tutkimuksen kohteista, kuten eliölajeista tai geodiversiteetin tutkimuksessa geokohteista. Lisäksi varianssin sisältävien mittausvirhemallien käyttäminen alfa-diversiteetin mittaamisessa on keino vähentää näitä puutteita (Willis 2019: 2–4).

5.2 Beeta-diversiteetti

Beeta-biodiversiteettiin liittyvä tutkimus on ollut runsasta viime vuosikymmenen aikana (Anderson ym. 2011: 19). Alkuperäisen määritelmän mukaan beeta-biodiversiteetti kuvaa muutosta eliöyhteisössä, jota voidaan tarkastella myös suhteessa valittuun ympäristögradienttiin. Beeta-biodiversiteetti keskittyy eroavaisuuksien ja suhteiden mittaamiseen (Whittaker 1960: 320, 322). Sitä voidaan mitata saman eliöyhteisön eri näytealojen välillä, eri eliöyhteisöjen näytealojen välillä tai valitun gradientin eri näytealojen välillä (Tuomisto 2010: 2). Beeta -näkökulma avaa uusia mahdollisuuksia biodiversiteetin tutkimukselle, koska sillä pystytään tutkimaan eliöyhteisön rakenteessa tapahtuvaa alueellista muutosta (Legendre & De Cáceres 2013: 951). Whittakerin (1960) alkuperäinen määritelmä beeta-biodiversiteetistä on laaja, ja hän on käyttänyt sen mittaamiseen monia erilaisia

mittaustapoja. Kyseisen määritelmän jälkeen on tullut lisää erilaisia muunnoksia ja sovelluksia beeta-biodiversiteetin määritelmästä ja mittaamisesta, mikä on aiheuttanut haasteita tutkimuskentällä niin mittaustavan, kuin sopivan mittakaavankin valintaan (Tuomisto 2010: 2–3).

Beeta-geodiversiteetti kuvaa eri alueiden välisiä eroavaisuuksia niiden geokohdekoostumuksessa. Sen mittaamiseen, kuten alfa-geodiversiteetinkin, tarvitaan geokohteisiin liittyvää paikkatietoa. Beeta-geodiversiteetin mittaamiseen voidaan käyttää vastaavia menetelmiä, kuin beeta-biodiversiteetin mittaamiseen. Mittaustavasta ja analyysimenetelmästä riippuen voidaan hyödyntää joko pelkkää tietoa siitä, onko tutkimusalalla tiettyä geokohdetta vai ei (geokohteiden esiintyvyyden tutkiminen) tai tarkempaa tietoa siitä, mikä on tietyn geokohteen peittävyys tutkimusalalla (Tukiainen ym. 2022a: 3, 5–6). Beeta-biodiversiteetin mittaus voidaan Andersonin ym. (2011: 19–20, 24) mukaan jakaa kahteen eri näkökulmaan tutkimusongelman perusteella. Muutosta kuvaava näkökulma (*directional, turnover*) mittaa eliöyhteisön rakenteessa tapahtuvaa muutosta, kuten eliöläjien (tai geodiversiteetin tutkimuksessa geokohteiden) määrää näyteköiden välillä suhteessa valittuun spatiaaliseen, ajalliseen tai ympäristögradienttiin, kuten korkeuteen. Vaihtelua kuvaava näkökulma (*non-directional, variation*) mittaa eliöyhteisön (tai geodiversiteetin tutkimuksessa tutkimusalalla olevien geokohteiden muodostaman kokonaisuuden) rakenteessa tapahtuvaa vaihtelua näyteköiden joukossa koko tutkimusalueella.

Muutosta kuvaavan (*turnover*) beeta-diversiteetin mittaamisessa voidaan Andersonin ym. (2011: 21–23) mukaan hyödyntää esimerkiksi lineaarista tai ei-lineaarista regressiomallia silloin, kun halutaan selvittää, muuttuuko eliöyhteisön (tai geodiversiteetin tutkimuksessa geokohteiden kokoonpanon) rakenne kahden eri näyteköiden välillä tarkasteltaessa valitun gradientin kautta. Samoja menetelmiä voidaan käyttää myös mittaamaan, ovatko eliöyhteisöjen rakenteen eroavaisuudet yhteydessä valitussa gradientissa tapahtuneeseen muutokseen. Tämän suhteen tilastollista merkittävyyttä voidaan tarkastella Mantelin testillä, jos valittuja gradientteja on vain yksi. Vaihtelua kuvaavan (*variation*) beeta-diversiteetin mittaamisessa ja visualisoinnissa voidaan käyttää rajoittamatonta ordinaatiota (*unconstrained ordination*), esimerkiksi pääkoordinaattianalyysiä (*principal coordinate analysis, PCoA*) tai epämetristä moniulotteista skaalausta (*Non-metric multidimensional scaling, NMDS*) (Tukiainen ym. 2022a: 5–6).

Beeta-biodiversiteettiä on tyypillisesti mitattu alfa- ja gamma-diversiteettien pohjalta lasketuilla klassisilla menetelmillä ja monimuuttujamenetelmillä, jotka perustuvat

näytekysiköiden välisten parittaisten yhtäläisyyksien tai eroavaisuuksien tarkasteluun (Anderson ym. 2011: 20). Menetelmän valintaan vaikuttaa se, onko aineisto binäärisessä 0/1-muodossa, vai kuvastaako se kvantitatiivisesti laskettavaa runsautta tai peittävyttä (Tuomisto 2010: 2). Beeta-biodiversiteetin, ja vastaavasti beeta-geodiversiteetin mittaamiseen, on käytetty Chaon ym. (2005: 148–149) ja Tukiaisen ym. (2022a: 5) mukaan esimerkiksi Jaccardin ja Sørensenin similariteetti- ja dissimilariteetti-indeksejä. Ne laskevat, kuinka monta samaa eliölajia, tai geokohdetta esiintyy kummallakin tutkimusalalla ja kuinka monta eliölajia, tai geokohdetta löytyy vain toisesta. Similariteetti ja dissimilariteetti eivät itsessään perustu tarkalle matemaattiselle määritelmälle, vaan niiden mittaaminen pohjautuu erilaisille indekseille (Chao ym. 2005: 157; Hao ym. 2019: 6). Jaccardin ja Sørensenin-indeksit soveltuvat 0/1-aineiston laskentaan. Tässä tutkielmassa käytetään Jaccardin dissimilariteetti-indeksiä, joka muodostuu seuraavasta yhtälöstä:

$$\frac{b+c}{a+b+c} \quad (1)$$

Siinä a) on kahden eri yhteisön jakama lajimäärä (tai kahden tutkimusalan jakama geokohdemäärä), kun taas b) ja c) kuvaavat sellaisten lajien määrää, jotka esiintyvät vain toisessa näistä yhteisöistä (tai geokohteiden määrää, jotka esiintyvät vain toisella tutkimusaloista) (Hao ym. 2019: 4, 6). Indeksien heikkoutena on esimerkiksi se, että ne saattavat yliarvottaa lajeja, joita esiintyy tutkimusalalla vain vähän, jolloin valtalajien väliset eroavaisuudet jäävät piiloon (Whittaker & Fairbanks 1958: 54). Myös aineistonkeruuseen liittyvät haasteet voivat vaikuttaa indeksien tuloksiin, esimerkiksi ali- tai yliarvioimalla kahden yhteisön samankaltaisuutta (Chao ym. 2005: 149), tai geokohdekoostumusta eri tutkimusaloilla.

5.3 Gamma-diversiteetti

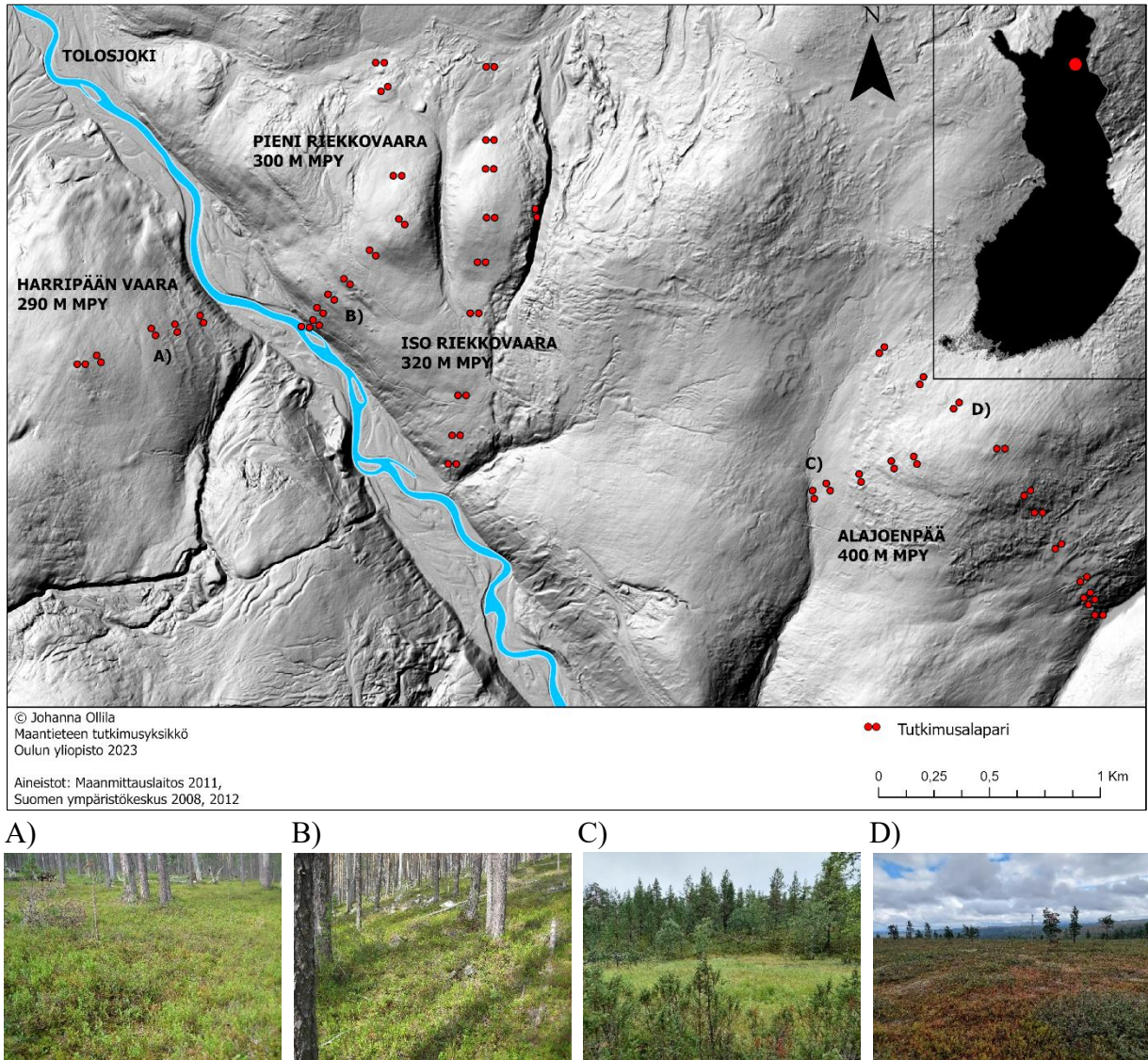
Gamma-biodiversiteetillä voidaan kuvata erilaisista lajeista koostuvaa lajimäärää tietyllä, useita eliöyhteisöjä kattavalla alueella, ja sen mittaaminen perustuu alfa-biodiversiteetin kanssa samoihin ominaisuuksiin (Whittaker 1960: 320, Whittaker 1972: 232; Tuomisto 2010: 4). Gamma-geodiversiteetti kuvaa vastaavasti erilaisten geokohteiden, kuten maa- ja kivilajien, muodostumien ja vesistöjen määrää koko tutkimusalueella (Tukiainen ym. 2022: 4). Luokittelu on tärkeä vaihe gamma-diversiteetin mittaamisessa. Havainnot jaetaan erilaisiin määriteltyihin luokkiin, kuten eliölajeihin, tai tässä geokohteisiin (Tuomisto 2010: 17).

Alfa-, beeta- ja gamma-diversiteetin analysointimenetelmäksi eri mittakaavoilla soveltuu Cristin ym. (2003: 734–735, 739) mukaan esimerkiksi additiivinen monimuotoisuuden osittaminen (*additive diversity partitioning*). Siinä lajimäärän (tai erilaisten geokohteiden määrän) tai diversiteetti-indeksin pohjalta laskettu gamma-diversiteetti jaetaan hierarkisesti alfa- ja beeta-diversiteetteihin, jotta saadaan selville kokonaisdiversiteetin osuudet eri tutkimusalueilla. Verrattuna moniin muihin menetelmiin, osittaminen on alfa- ja beeta-diversiteetin tasot yhdistävä analyysimenetelmä.

6 Tutkimusalue

Saariselkä sijaitsee Pohjois-Suomessa Lapin maakunnassa. Sen eteläinen osa kuuluu maantieteellisesti Lapin maakunnan keskiosaan, Keski-Lappiin ja pohjoinen osa sijaitsee maakunnan pohjoisosassa, Pohjois-Lapissa Inarin kunnan alueella. Saariselän alue ulottuu Hammastunturin erämaa-alueelle ja Urho Kekkosen Kansallispuistoon. Niiden välissä sijaitsee Saariselän, Kiilopään ja Kakslauttasen -matkailualue, kun taas eteläpuoli rajautuu Sompion luonnonpuistoon.

Tutkimusalue sijaitsee luoteessa Saariselän keskustasta katsoen, Tolosjoen varrella. Välimatka keskustan ja tutkimusalueen välillä on noin viisi kilometriä. Tutkimusalue jakautuu molemmin puolin Tolosjokea sijaitseville vaaroille: Alajoenpäälle, Isolle Riekkovaaralle, Pienelle Riekkovaaralle ja Harripään vaaralle, jotka sijaitsevat alle viiden kilometrin etäisyydellä toisistaan (kuva 4). Vaaroista vain Harripään vaara sijaitsee Hammastunturin erämaa-alueella, mutta ihmistoiminta on koko tutkimusalueella hyvin vähäistä, vain muutamia polkuja ja hiekkatie, joka kulkee Alajoenpään kaakkoisgradientin, Ison Riekkovaaran eteläisen gradientin ja Pienen Riekkovaaran lounaisgradientin halki. Tutkimusalojen korkeusgradientti vaihtelee 190–400 välillä merenpinnan yläpuolella (m mpy), josta korkein kohta sijaitsee Alajoenpäällä ja matalin Harripään vaaralla.



Kuva 4. Saariselän tutkimusalueen sijainti ja tutkimusalaparit punaisilla ympyröillä. Kartta-aineistot: Maanmittauslaitos (2011), Suomen ympäristökeskus (2008, 2012). Valokuvat A), B), C) ja D) Saariselän tutkimusalueelta, Johanna Kotilainen 8/2022.

6.1 Geologia ja geomorfologia

Pohjois-Suomen kallioperä kuuluu arkeisista ja varhaisproterotsooisista kivilajeista koostuvaan Fennoskandian kilpeen (Hanski & Huhma 2005: 142), joka on osa prekambrista peruskalliota (Korsman & Koistinen 1998: 94, 104). Saariselän alue kuuluu Lapin metamorfoituneista kivistä koostuvaan granuliittivyöhykkeeseen. Se on syntynyt svekokarjalaisen orogeenian aikana, jolloin tektoniset liikunnot työnsivät kivet maankuoresta nykyiselle tasolle (Kujansuu 2005b: 17–18). Eroosivoimien myötä orogeenian synnyttämät vuorijonot ovat ajan kuluessa tasoittuneet (Korsman & Koistinen 1998: 98–99, 101, 104).

Valtaosa granuliittivyöhykkeen kivilajeista on granaattigneissejä. Niiden lisäksi alueelta löytyy myös pyrokseenigneissejä ja syväkiviä, kuten gabroja, dioritteja, kvartsidioritteja ja ultramafisia kiviä sekä granaattipitoisia porfyyrisiä graniitteja. Näiden kivilajien läpi kulkee myös karkearakeisia anatektisia juonia. Syväkivistä valtaosa on kvartsidioritteja (Meriläinen 1976: 41, 60). Saariselän alueella esiintyy pakkasrapautumisen kalliosta synnyttämää rakkaa, joka on Pohjois-Suomessa tyypillinen kivikko- ja louhikkotyyppejä (Kujansuu 2005c: 30).

Saariselkä on topografisesti vaihtelevaa aluetta, sen kautta kulkee Inarijärveä kaartava, Muotkatuntureille jatkuva tunturiketju. Eteläisessä osassa Saariselkää sijaitsee sen korkein tunturi Sokosti (718 m mpy) (Kersalo & Pirinen 2009: 139). Saariselkä kuuluu Suomen korkeisiin alueisiin, jossa alueelliset korkeuserot ovat huomattavia (Kujansuu 2005d: 15–17). Jääkauden aikana jäätikön viimeisin virtaussuunta Saariselän alueella oli etelälounaissauntaisesti kohti pohjoista ja koillista (Johansson 1988: 542) ja alueellisella topografialla, kuten tuntureilla ja vaaroilla, on ollut vaikutusta jäätikön liikesuuntiin (Kujansuu 2005d: 17). Lieveuomia Saariselällä on runsaasti, syvimmit niistä syntyivät jäätikkökielekkeiden sivuilla sijainneilla kaakkois- ja luoteisrinteillä, joihin sulamisvesien virtaus kohdistui voimakkaimmin (Johansson 1995: 26–27). Tolosjoki on toiminut deglasiation vaiheessa purkausomana usealle jääjärvelle muun muassa Harrijängän alueelta, joka sijaitsee Harripään tutkimusalueen vaarasta lounaiseen. Jäätikön perääntymisvaiheen jälkeen tuulen synnyttämä eolinen toiminta kasasi hiekkaa ja hietaa Tolosjoen laaksoihin (Väisänen & Peronius 1989: 6, 20).

6.2 Ilmasto ja hydrologia

Saariselkä kuuluu pohjoisboreaaliseen vyöhykkeeseen ja alueen vuodenajat ovat selkeitä, kuten yleensä mannerilmastossa. Keski- ja Pohjois-Lapissa talvi on vuodenaajoista hallitsevin (Kersalo & Pirinen 2009: 138, 144–145, 152). Vuoden keskilämpötila oli Inarin Saariselän matkailukeskuksen havaintoaseman mittausten mukaan vertailukauden 1981–2010 aikana -0,8 °C (Pirinen ym. 2012: 52) ja vertailukauden 1991–2020 aikana -0,7 °C. Vuosien 1991–2020 vertailukaudella tammikuussa keskilämpötila oli -12,1 °C ja heinäkuussa 13,1 °C, koko vertailukauden ääriarvoina ylin lämpötila oli 32,2 °C ja alin -38,6 °C (Jokinen 2021: 82). Saariselän vuotuinen sademäärä on keskimäärin 600 mm, josta noin puolet sataa lumena. Joinakin vuosina sademäärä on ylittänyt 740 mm ja Saariselän alue onkin muuta Keski-Lapin ja Pohjois-Lapin ympäristöä sateisempi. Lumensyvyys on yli 80 cm, joka jakautuu topografisesti vaihtelevalla alueella epätasaisesti, esimerkiksi ylitysuomien lumikinokset voivat

olla useamman metrin ja tuntureiden laella lunta on vain ohuesti (Kersalo & Pirinen 2009: 140, 142, 149–150). Saariselällä on tehty vain yksittäisiä ikiroutahavaintoja puurajan yläpuolelta, Kiilopään lakialueen kallioperästä. Vuotuisen keskilämpötilan lisäksi paikallisiin lämpöoloihin vaikuttavat monet tekijät, kuten sadannan määrä ja lumen syvyys, jotka rajoittavat ikiroudan muodostumista (Seppälä 1997: 89–90, 93).

Saariselän kautta kulkee luoteeseen kaartava vedenjakaja Maanselkä, joka jakaa alueen vedet Pohjanlahteen ja Jäämereen, johon myös Saariselän vesistöt laskevat (Johansson 1988: 541; Kujansuu 2005d: 16). Pohjois-Suomessa jokiuomien syntyyn ovat vaikuttaneet jääkautta edeltäneet ruhjelaaksoja muodostaneet lohkoliikunnot ja deglasiation aikaiset sulamisvedet, jotka ovat muovanneet maastoa uurtamalla siihen nykyisille jokiuomille sopivia laaksoja (Johansson 2005c: 170). Tutkimusalueen läpi, Riekkovaarojen ja Harripään vaaran välistä virtaa Tolosjoki (kuva 4). Se on Hammastunturin erämaa-alueen läpi virtaavan Ivalojoen sivu-uoma, jonka vedet virtaavat Saariselällä sijaitsevalta tunturialueelta (Mähönen 1997: 29).

Suomi sijoittuu boreaaliselle kasvillisuusvyöhykkeelle, jolle mänty- ja kuusivaltainen metsäkasvillisuus on tyypillistä. Muita valtalajeja ovat koivut ja haavat (Kuuluvainen & Aakala 2011: 825; Potapov 2017: 2). Tutkimusalue sijoittuu Harripään vaaran, Ison Riekkovaaran ja Pienen Riekkovaaran osalta kokonaisuudessaan pohjoisborealiseen mäntyvaltaiseen metsään ja metsänrajavyöhykkeelle. Alajoenpäällä tutkimusalue vaihtuu mäntymetsästä ylemmäs tunturi- ja vaivaiskoivikkoon sekä puurajan yläpuoliselle paljakalle. Alajoenpään kaakkoisrinteen alaosa on puulajistoltaan monimuotoisempaa kangasmetsää, jonka alapuolella sijaitsee tutkimusalueen ulkopuolinen kosteikkoalue.

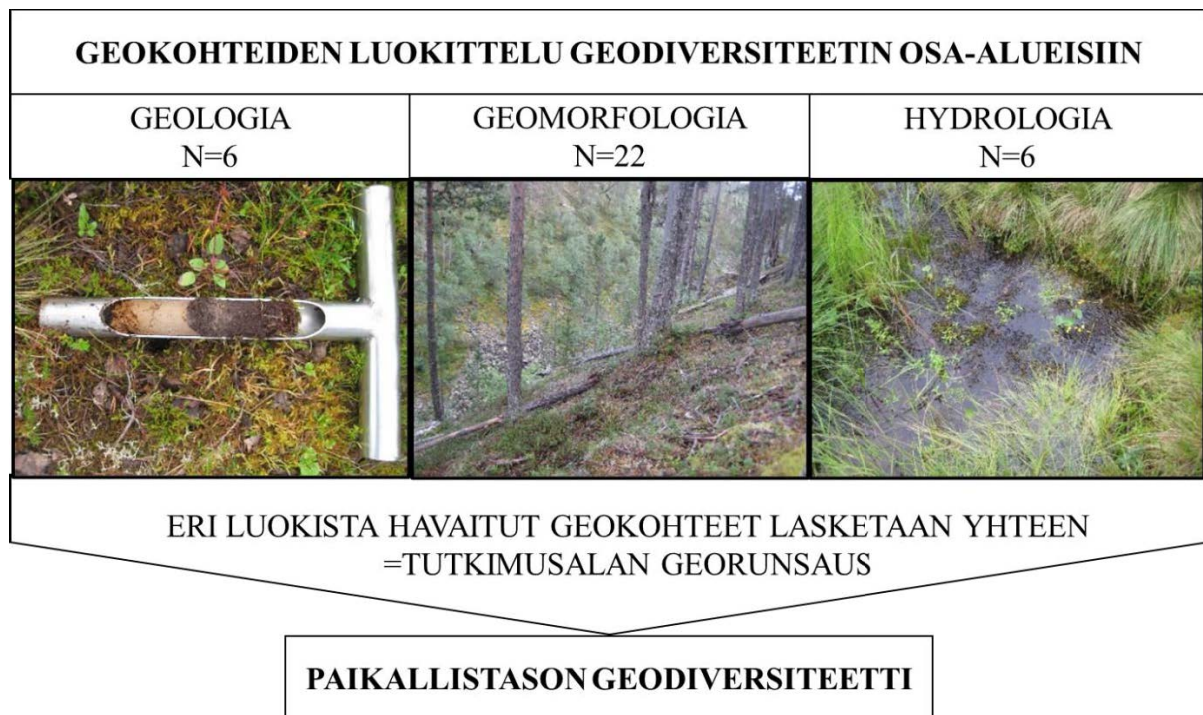
7 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

7.1. Paikallistason geodiversiteetin kartoitus

Hjort ym. (2022) ovat kehittäneet visuaaliseen havainnointiin perustuvan menetelmän paikallistason geodiversiteetin mittaamiseen maastossa. Sen avulla voidaan tarkastella erilaisten geodiversiteettiin kuuluvien elementtien, eli geokohteiden, kuten moreenin tai fyysikaalisen rapautumisen esiintyvyyttä tutkimusalueella sijaitsevilla tutkimusaloilla, joiden säde voi vaihdella muutamasta metristä useaan kymmeneen metriin. Menetelmän tarkoituksena on saada tietoa siitä, esiintyykö tarkasteltava geokohde näytealalla vai ei (*presence-absence*). Menetelmä on käyttökelpoinen erilaisissa ympäristöissä, mutta ennen aineistonkeruuta on syytä

perehtyä tutkimusalueen ominaispiirteisiin, jotta menetelmää voidaan soveltaa kyseiselle alueelle.

Geodiversiteetin arvioinnissa havainnoijan kokemuksella ja muulla aiheen osaamisella on Zwolińskin ym. (2018: 28) mukaan tyypillisesti suuri merkitys tutkimuksen kannalta. Tässä työssä käytetty Hjortin ym. (2022) menetelmä on tehty helposti omaksuttavaksi lyhyen perehdytyksen jälkeen. Menetelmän sovellettavuuden kannalta on tärkeä määritellä havainnoitavat geokohteet riittävän tarkasti etukäteen. Menetelmässä geokohteet on jaettu geodiversiteetin eri osa-alueisiin, eli geologiaan, geomorfologiaan ja hydrologiaan kuuluviin luokkiin. Laskemalla erilaiset geokohteet yhteen saadaan selville kunkin tutkimusalan georunsaus eli paikallistason geodiversiteetti (Hjort ym. 2022: 1758–1762; kuva 5), jota voidaan tarkastella myös alfa-geodiversiteettinä.



Kuva 5. Geokohteet luokiteltuna geodiversiteetin eri osa-alueisiin (geologia, geomorfologia ja hydrologia) kuuluviin luokkiin lukumääräisesti. Geokohteiden yhteenlaskettu määrä on tutkimusalan georunsaus, joka on alfa -tason geodiversiteetin mittari (mukaillen Hjortin ym. (2022) kehittämää visuaalisen havainnoinnin menetelmää ja siihen kuuluvaa luokittelua; tutkimusaloilta otetut valokuvat Johanna Ollila 8/2022).

Tässä työssä, ja alkuperäisessä menetelmäkuvauksessa määritellyt paikallistason geokohteet ovat tyypillisiä arktis-alpiinisille ympäristöille (Hjort ym. 2022: 1758; taulukot 2–4), mutta geokohdeluokitteluun on mahdollista tehdä muokkauksia tutkimusympäristön mukaan. Seuraavassa käydään läpi menetelmän luokitteluun kuuluvat geokohteet ja kriteerit, joiden

perusteella ne otetaan paikallistason geodiversiteetin tutkimuksessa huomioon. Geologiset geokohteet kuvaavat erilaisia maaperän kivennäismaalajeja raekoon mukaan jaoteltuna, kallioperän paljastumia ja kuollutta orgaanista ainesta, turvetta (Hjort ym. 2022: 1760; taulukko 2; kuva 6).

Taulukko 2. Geologiset geokohteet luokiteltuna kivennäismaalajeihin, paljastuneeseen kallioperään ja turpeeseen (mukaillen Hjortin ym. (2022) paikallistason menetelmän geokohdeluokittelua).

GEOLOGIA	GEOKOHTEEN KUVAUS JA KRITERIT
Paljastunut kallioperä	Kiinteää/ehjää kalliota, pinta ei merkittävästi rikkoutunutta
Moreeni	Vähintään 10 cm lajittumaton mineraalimaa-aineskerros
Kivikko tai lohkareikko	Vähintään 1 m ² jatkuva alue; kivien halkaisija vähintään 6 cm
Hiekka tai sora	Vähintään 10 cm lajittunut maa-aineskerros, raekoko 0,06 mm–6 cm
Siltti, savi, hieno sedimentti	Vähintään 10 cm kerros hienoa maa-ainesta, raekoko alle 0,06 mm
Turve	Vähintään 10 cm kuollut orgaaninen maa-aineskerros



Kuva 6. Geologinen geokohde – paljastunut kallioperä (valokuva Saariselän tutkimusalueelta, Johanna Ollila 8/2022).

Geomorfologisten geokohteiden luokittelun perustana ovat geomorfologiset prosessit, joihin kuuluu erilaisia kulutus- ja kasaumuodostumia. Ne geokohteet, joihin tämä luokittelu ei sovellu, on jaettu muun keskeisen ominaisuuden, kuten prosessin nopeuden, perusteella kahteen luokkaan. Menetelmä on suunnattu eri tasoille kartoittajille, joten siihen ei ole sisällytetty yksittäisten geomorfologisten muodostumien tunnistamista (Hjort ym. 2022: 1758, 1760–1761; taulukko 3; kuva 7).

Taulukko 3. Geomorfologiset geokohteet luokiteltuna geomorfologisten prosessien pohjalta erilaisiin kulutus- ja kasausmuodostumiin tai muuhun ominaisuuteen perustuen kahteen luokkaan (mukailleen Hjortin ym. (2022) paikallistason menetelmän geokohdeluokittelua).

GEOMORFOLOGIA	GEOKOHTEN KUVAUS JA KRITTEERIT
Kallioperän jyrkänne	Vähintään 45° jyrkkä, yli 50 cm korkea ja lähes pystysuora seinämä
Kallioperän rako	Vähintään 5 cm leveä halkeama kallioperässä, voi olla täyttyneenä aineksesta, kuten kivistä tai sedimenteistä
Glasigeeninen kulutus	Jäätikkösyntyinen pyöristynyt kallioperä, kuten silokallio
Glasigeeninen kasaus	Selvästi erottuva, jäätikkösyntyinen moreenimuodostuma, kuten moreenikumpu tai reunamoreeni; jäätikön kuljettama ja reunoista pyöristämä, halkaisijaltaan vähintään 1,5 m siirtolohkare
Glasifluviaalinen kulutus	Jäätikön sulavesien synnyttämät, erilaiset sulavesiuomat
Glasifluviaalinen kasaus	Selvästi erottuva, jäätikköjokisyntyinen muodostuma, kuten kame-maasto
Eolinen kulutus	Tuulisyntyiset erilaiset deflaatiopinnat
Eolinen kasaus	Tuulisyntyiset siltin tai hienon hiekan kerrokset ja dyynit
Fluviaalinen kulutus	Virtaavan veden synnyttämä eroosio, kuten kivinen pohja, uomien syvyys vähintään 20 cm ja töyrään korkeus 10 cm tai yli
Fluviaalinen kasaus	Virtaavan veden synnyttämä kasaus, kuten tulvakerrostumat ja särkkäkasaukset rannalla tai vedessä
Litoraalinen kulutus	Rantavoimien synnyttämä eroosio, vähintään 10 cm rantatörmä, 50 cm tai sen yli oleva leveä kivikkoinen rantakaistale rannalla tai vedessä
Litoraalinen kasaus	Rantavoimien synnyttämä kasaus, ruohottunut ranta, rannan hiekka tai sorakerrostumat, kuten särkät rannalla tai vedessä
Biogeeninen: pintoja tasaava turvekerrostuma	Turvekerrostumat tasoittavat mineraalimaan muodostamaa topografiaa
Biogeeninen: kumpu/mätäs turvekerrostuma	Vähintään 10 cm turvekummut ja -mättäät, kuten pounut
Nopea massaliikunto	Nopeasti tapahtuva maanvyöry ja -virtaus, joka kasaa ainesta ja jättää maaperän paljaaksi
Hidas massaliikunto (solifluktio)	Hitaasti rinteessä liikkuva, vettynyt vuotoma saa aikaan esimerkiksi solifluktioterasseja ja -kielekkeitä
Kryogeeninen prosessi: krypturbaatio	Routatoiminnan synnyttämiä muodostumia ja jälkiä maaperässä, kuten kuviomaa, routanousu ja maakummut
Kryogeeninen prosessi: maajää	Ikiroudan synnyttämiä muodostumia ja jälkiä maaperässä, kuten palsat
Nivaalinen prosessi: nivaatiopainanne	Lumenviipyymiin viittäviä painanteita ja viipymäpaikkoja
Nivaalinen prosessi: lumivyöry, sohjuvirta	Lumivyöryn tai sohjuvirran kasaamaa ainesta
Fysikaalinen rapautuminen	Rapautuneen aineksen synnyttämiä muodostumia ja kasauksia, kuten talus ja pakkasrapautunut kivikkoinen alue vähintään 1 m ²
Kemiallinen rapautuminen	Kallioperässä ja kivissä näkyvät kemiallisen rapautumisen jäljet



Kuva 7. Geomorfologinen geokohde – kallioperän rako ja jyrkänne (valokuva Saariselän tutkimusalueen ulkopuolelta, Johanna Kotilainen 8/2022).

Hydrologisten geokohteiden luokittelussa keskeistä on vesistön tyyppi eli onko kyseessä seisova- vai virtavesi sekä jaottelu pinta- ja pohjavesiin. Jaottelussa on huomioitu myös vuodenaikaisvaihtelu tiettyjen geokohteiden osalta. Tällöin riittää, että vesi virtaa uomassa tai seisoo altaassa vain osan aikaa vuodesta (Hjort ym. 2022: 1760, 1762; taulukko 4; kuva 8).

Taulukko 4. Hydrologiset geokohteet luokiteltuna sen pohjalta, onko kyseessä seisova- vai virtavesi ja pinta- vai pohjavesi. Lisäksi jaottelu ottaa huomioon vuodenaikaisvaihtelun kuivan uoman ja -altaan kohdalla (mukaillen Hjortin ym. (2022) paikallistason menetelmän geokohdeluokittelua).

HYDROLOGIA	GEOKOHTEEN KUVAUS JA KRITERIT
Lähde	Pohjaveden nousu pinnalle eri tavoin, kuten lampi tai tihkunta
Virtavesi	Jatkuva virtaus, ei merkitystä uoman syvyydellä tai leveydellä
Lampi, allas (seisova vesi)	Pysyvä vesiallas kooltaan vähintään 1 m ² , vedenpinta voi vaihdella
Kuiva uoma	Kuiva tai kausikuiva uoma, esimerkiksi kevään tulvavesiuoma
Kuiva lampi tai allas	Kausittainen allas tai lampi, esimerkiksi kevään tulva-allas
Kosteikko	Veden kyllästämä maaperä, alue vähintään 1 m ² ja korkeintaan ohut alle 5 cm kunta, ei ole luokiteltu muihin hydrologisiin luokkiin

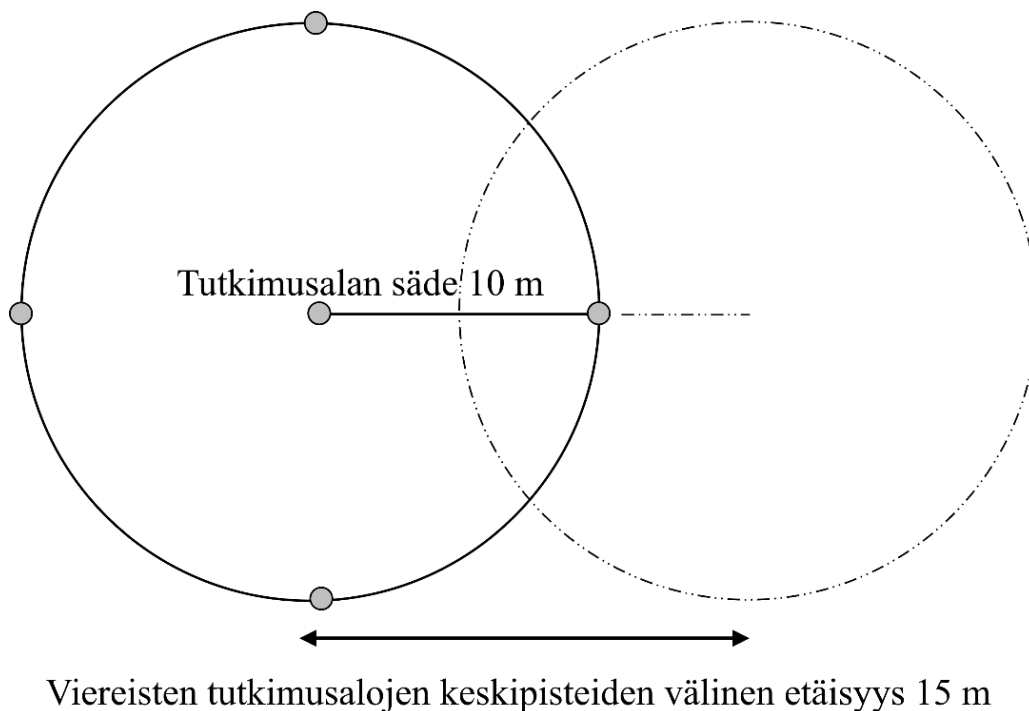


Kuva 8. Hydrologinen geokohde – lähde (valokuva Saariselältä tutkimusalueen ulkopuolelta, Johanna Ollila 8/2022).

Aineistonkeruuprosessi aloitettiin maantieteen väitöskirjatutkija Henriikka Salmisen pitämällä perehdytysluennolla eri geokohteista ja niiden kriteereistä (taulukot 2–4). Koska menetelmän ohjeistukseen kuuluva geokohdelista on suunnattu arktis-alpiinisiin ympäristöihin (Hjort ym. 2022: 1758), ei sitä tarvinnut muokata Saariselän tutkimusaluetta varten. Tutkimusaineisto kerättiin maastotöinä yhdessä toisen pro gradu -tutkielmaa tekevän opiskelijan kanssa elokuussa 2022 Saariselän neljältä vaara-alueelta: Alajoenpäältä, Isolta Riekkovaaralta, Pieneltä Riekkovaaralta ja Harripään vaaralta (kuva 4). Geodiversiteetti-aineiston keräsivät Johanna Kotilainen ja Johanna Ollila (tutkielman tekijä). Tutkijatohtori Tuija Maliniemi iGEOBIO -projektista ja maantieteen väitöskirjatutkija Henriikka Salminen, jolla on runsaasti kokemusta geodiversiteetti-menetelmän käytöstä, olivat mukana Saariselällä ohjeistamassa menetelmän käyttöä neljän päivän ajan. Kokonaisuudessaan aineistonkeruuseen meni aikaa kaksi viikkoa.

Tutkimusaloja oli merkitty GPS (*Global Positioning System*) -pistein metsän- ja metsänrajavyöhykkeellä sijaitseville korkeusgradienteille yhteensä 100 kappaletta, joista ehdittiin kartoittaa 82. Tutkimusalagradientit sijoituivat vaarojen eri ilmansuuntiin suuntautuville rinteille. Alajoenpäällä kartoitettiin läntinen, kaakkois- ja luoteisgradientti, Isolla Riekkovaaralla eteläinen ja pohjoisgradientti, Pienellä Riekkovaaralla luoteis- ja lounaisgradientti sekä Harripään vaaralla itäinen gradientti (kuva 4). Tutkimusalojen sijainti perustui vuonna 1983 tehtyyn kasvillisuuskartoitukseen (Lyytikäinen 1983). Samalta korkeusgradientilta kartoitettiin aina kaksi vierekkäistä, ympyränmuotoista tutkimusalaa.

Tutkimusalan säteeksi valittiin 10 m, koska sen arvioitiin riittävän kuvaamaan tutkimusalueen paikallistason geodiversiteettiä ja soveltuvan toista tutkimusta (Lohi 2022) varten kerättyjen kasvillisuusruutujen kanssa parhaiten yhteen (kuva 9). Tutkimusaloista ensimmäisen keskipiste merkittiin maastoon merkkikepillä GPS-pisteen mukaisesti. Siitä mitattiin 10 m köyden avulla tutkimusalan rajat samalla korkeudella sivusuuntiin sekä ylä- ja alarinteiden suuntaisesti ja myös ne merkittiin maastoon. Kun tutkimusaloista ensimmäinen oli kartoitettu, merkittiin viereinen tutkimusala 15 m päähän vastaavalla tavalla samalle korkeudelle, oikealle puolelle ylärinteen suuntaisesti.



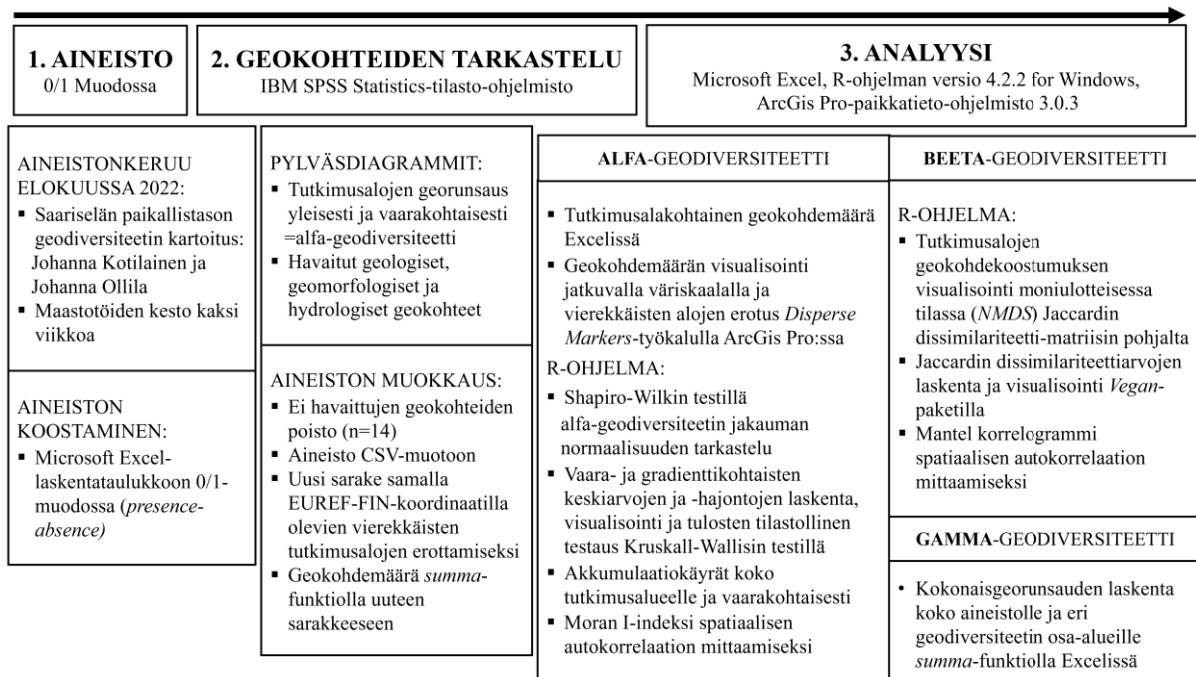
Kuva 9. Ympyränmuotoisen, yksittäisen tutkimusalan säteeksi valittiin 10 m. Samalta korkeusgradientilta kartoitettiin kaksi tutkimusalaa, jotka muodostettiin 15 m etäisyydelle toistensa keskipisteestä.

Tutkimusdata kerättiin tutkimuslomakkeelle (liite 1), johon kirjattiin tutkimusosalalla esiintyvät geokohteet geologisiin, geomorfologisiin ja hydrologisiin luokkiin (kuva 5). Lisäksi jokaiselta tutkimusosalalta otettiin valokuvat tutkimusalojen dokumentointia ja mahdollista jälkikäetarkastelua varten. Kerätty aineisto koostettiin Microsoft Excel-laskentataulukon 0/1-muodossa, jossa 0 tarkoittaa, ettei geokohde esiinny tutkimusosalalla ja 1 tarkoittaa, että geokohde esiintyy tutkimusosalalla. Tutkimusalueen suurmuotoja tarkasteltiin Maanmittauslaitoksen rinnevarjosteen (2011) avulla ja aineistoon lisättiin sellaiset geokohteet, joita oli ollut vaikea tunnistaa maastossa suuren kokonsa vuoksi, mutta jotka selvästi osuivat

kyseiselle tutkimusalalle. Kyseessä oli kahden metrin pikselikoon rasteriaineisto, jota voidaan hyödyntää maaston korkeusvaihteluiden visualisoinnissa (Maanmittauslaitos 2011).

7.2. Analyysi

Geokohteiden määrää ja jakaumia tarkasteltiin IBM SPSS Statistics-tilasto-ohjelmistolla (IBM 2023). Pylväsdiagrammit tehtiin erikseen tutkimusalakohtaisesta georunsaudesta, joka on yhteenlaskettujen kohteiden lukumäärä, ja sen vaarakohtaisesta jakaumasta. Ne kuvaavat alfa-geodiversiteettiä. Lisäksi pylväsdiagrammit tehtiin tutkimusalueen geologisista, geomorfologisista ja hydrologisista kohteista. Ennen varsinaisia analyysejä Microsoft Excel-laskentataulukkoon koostetusta aineistosta poistettiin sellaiset geokohteet (n=14), joista ei ollut havaintoja tutkimusalueelta. Analyysit alfa- ja beeta-geodiversiteetille tehtiin R-ohjelman versiolla 4.2.2 (The CRAN team 2022) lukuun ottamatta alfa-geodiversiteetin tutkimusalakohtaisen geokohdemäärän laskentaa omaksi aineistosarakkeekseen ja sen visualisointia. Ne suoritettiin Microsoft Excel-laskentataulukossa ja ArcGis Pro-paikkatieto-ohjelmiston versiolla 3.0.3 (ESRI 2023). Gamma-geodiversiteetin analyysi suoritettiin Microsoft Excel-laskentataulukossa. Aineiston käsittelyn ja analysoinnin vaiheet on havainnollistettu kuvassa 10.



Kuva 10. Aineiston käsittely ja analysointi kuvattuna vaiheittain, aineistonkeruusta ja koostamisesta geokohteiden tarkasteluun sekä alfa-, beeta- ja gamma-geodiversiteetin analysointiin.

7.2.1 Alfa-geodiversiteetin kvantifiointi

Alfa-geodiversiteetti laskettiin jokaiselle tutkimusalalle summaamalla havaittujen geokohteiden lukumäärä. Tutkimusalaakohtaiset geokohdemäärät havainnollistettiin jatkuvalla väriskaalalla ArcGis Pro-paikkatieto-ohjelmistossa karttapohjalle. Havainnollistamisen apuna käytettiin *Disperse Markers*-työkalua, jonka avulla lisättiin vierekkäisten tutkimusalojen etäisyyttä karttaesityksessä. Alfa-geodiversiteetin jakauman normaalisuuden tarkastelu tehtiin sen selvittämiseksi, millaiset tilastolliset testit aineistolle soveltuvat. Se suoritettiin Shapiro-Wilkin testillä, joka soveltuu eri kokoisille aineistoille ja on joustava jakauman oletusten suhteen (Shapiro & Wilk 1965: 602, 610; Legendre & Legendre 2012: 191).

Alfa-geodiversiteettiä tarkasteltiin sekä vaara-, että gradienttikohtaisesti, jolloin voidaan havaita rinteiden suuntien sekä eri vaarojen välisiä mahdollisia eroavaisuuksia. Alfa-geodiversiteetin keskiarvot ja keskihajonnat eri vaaroille ja kartoitetuille gradientteille laskettiin sekä visualisoitiin R-ohjelman *dplyr*- ja *ggplot2*-paketeilla. Gradienttien keskiarvojen ja -hajontojen laskemiseksi Harripään lakialueen kaksi tutkimusalaa yhdistettiin sen itäiseen gradienttiin, samoin Ison Riekkovaaran itäisellä gradientilla, ylitysuoman reunalla sijainneet kaksi tutkimusalaa yhdistettiin sen pohjoisgradienttiin. Keskiarvo kertoo, missä mitatun ulottuvuuden kohdassa muuttujan jakauman keskikohta sijaitsee ja keskihajonta kuvaa sitä, miten saadut havaintoarvot asettuvat muuttujan jakauman keskiarvon ympärille (Tietoa tilastoista, käsitteet: K). *Dplyr*-paketin *group_by*-funktio ryhmittelee eri vaarojen sijainnit ja gradientit selittäviksi muuttujiksi, joiden avulla *vars*-funktioilla valitulle alfa-geodiversiteetille eli vastemuuttujalle lasketaan keski- ja hajontaluvut (Wickham ym. 2022a: 29, 76). Keski- ja hajontaluvut visualisoitiin *ggplot2* -paketilla (Wickham ym. 2022b: 156).

Eri vaarojen ja gradienttien välisten alfa-geodiversiteetin keskiarvojen tilastolliseen testaamiseen käytettiin Kruskal-Wallis-parametritonta testiä, joka testaa tutkimusaineiston otosten samankaltaisuutta ja sopii useamman itsenäisen otoksen aineistolle. Tulos kertoo, ovatko otokset samanlaisesta perusjoukosta (Legendre & Legendre 2012: 203), mutta ei anna tietoa siitä, mitkä vaarat tai gradientit mahdollisesti eroavat toisistaan. Tätä olisi voinut testata parittaisella Wilcoxonin testillä, mutta vaara- ja gradienttikohtaiset havaintomäärät eivät riittäneet sen luotettavaan suorittamiseen. Tästä syystä vaarojen ja gradienttien välisiä eroavaisuuksia arvioitiin keskiarvojen ja -hajontojen kautta.

Akkumulaatiokäyrä kuvaa tasoa, jossa tutkimusalueelta löytyvien uusien lajien määrä on kerättyssä aineistossa saavutettu (Colwell & Goddington 1994: 107; Gotelli & Colwell 2001: 380; Magurran 2004: 79), eli tässä alfa-geodiversiteetin määrää. Alfa-geodiversiteetin

akkumulaatiokäyrät tehtiin *vegan*-paketin *specaccum*-funktiolla samaan kuvaan ensin koko tutkimusalueelle ja sen jälkeen jokaiselle vaaralle erikseen. Valitulla *random*-menetelmällä akkumulaatiokäyrään lisätään uusia havaintoja satunnaisessa järjestyksessä (Oksanen ym. 2022: 242–243). Akkumulaatiokäyrä sopii paikallistason lajimäärän arvioimiseen ja tässä tutkielmassa sitä sovelletaan alfa-geodiversiteettiin. Se sisältää aineistonkeruussa löydettyjen erilaisten kohteiden kumulatiivisen määrän, joka on suhteutettu siihen käytettyyn työpanokseen, esimerkiksi kerättyjen näytteiden, tai tässä tutkimusalojen, kumulatiiviseen määrään (Colwell & Goddington 1994: 105).

Alfa-geodiversiteettiä tarkasteltiin myös spatiaalisen autokorrelaation avulla, koska siten saadaan tietoa sen alueellisesta jakautumisesta (Tukiainen 2022a: 7). Alfa-geodiversiteetin spatiaalista autokorrelaatiota mitattiin *pgirmess*-paketilla ja *correlog*-funktiolla eri etäisyysluokissa ensin koko tutkimusalueelta ja sen jälkeen jokaiselta vaaralta erikseen Moranin I-indeksin avulla (Giraudoux ym. 2022: 7). Spatiaalinen autokorrelaatio on tyypillinen ilmiö maantieteellisissä tutkimuksissa (Chen 2013: 1) ja se kuvaa tilannetta, jossa maantieteellinen läheisyys lisää tehtyjen havaintojen riippuvuutta toisistaan. Positiivinen spatiaalinen autokorrelaatio viittaa havaintojen samankaltaisuuteen (Legendre 1993: 1659; Griffith & Arbia 2010: 417; Miller 2012: 682), kun taas negatiivinen spatiaalinen autokorrelaatio liittyy havaintojen välisen etäisyyden kasvuun (Borcard & Legendre 2012: 1475). Eliölaajien tutkimuksessa spatiaaliseen autokorrelaatioon vaikuttavat erilaiset ekologiset prosessit, kuten esimerkiksi levinneisyys (Miller 2012: 682).

Moranin I-indeksi on yksi yleisimmin käytetyistä menetelmistä spatiaalisen autokorrelaation mittaamiseen ennalta määritetyissä etäisyysluokissa ja se sopii yhdelle muuttujalle (Borcard & Legendre 2012: 1473; Chen 2013: 1–2). Se muodostaa spatiaalista autokorrelaatiota eri etäisyysluokissa havainnollistavan korrelogrammi-kuvaajan. Moranin I-indeksin saamat arvot jakautuvat negatiiviseen korrelaatioon viittavan -1 arvon ja positiiviseen korrelaatioon viittavan +1 arvon välille (Legendre & Legendre 2012: 792, 795). Kuvaajassa punaisella ympyrällä kuvatut arvot viittaavat tilastollisesti merkitsevään (p -arvo < 0,05) spatiaalisen autokorrelaatioon (Giraudoux ym. 2022: 7; Tukiainen ym. 2022a: 9). Harripään vaaralta kerätty aineisto oli pieni verrattuna muihin vaaroihin, joten etäisyysluokkia määritettiin vain neljä muilla vaaroilla käytetyn 15 sijaan.

7.2.2 Beeta-geodiversiteetin kvantifiointi

Beeta-geodiversiteetin analysointi aloitettiin visualisoimalla tutkimusalojen geokohteiden koostumus moniulotteisessa tilassa. Visualisointi tehtiin NMDS-kuvaajalla (*Non-metric multidimensional scaling*) kolmella ulottuvuudella käyttäen *vegan*-paketin *metaMDS*-funktioita. NMDS-kuvaaja voidaan muodostaa esimerkiksi Jaccardin dissimilariteetti-matriisiin pohjautuvana moniulotteisena ordinaationa (Oksanen ym. 2022: 121, 273; Tukiainen ym. 2022a: 7). Sen avulla voidaan visualisoida tutkimusalojen välistä lajikoostumusta (Hui ym. 2015: 399), tai tässä tutkielmassa sitä, miten erilaisten geokohteiden muodostama koostumus vaihtelee tutkimusalueella (Tukiainen ym. 2022a: 5) tutkimusalojen ja eri vaarojen välillä. Kuvaajassa geokohteiden koostumukselta eroavat alat ovat etäällä toisistaan, kun taas samankaltaiset alat sijoittuvat lähekkäin (Legendre & Legendre 2012: 512; Varanka ym. 2015: 1992). Funktio pyrkii löytämään parhaan mahdollisen vaihtoehdon useista satunnaisista aloituksista ja standardoi tuloksen skaalauksen sekä suunnan, jolloin kuvaajan rakennetta on helpompi tulkita (Oksanen ym. 2022: 121, 124). Ordinaatioon pohjautuva NMDS on tulkinnallisesti yksinkertainen menetelmä (Clarke 1993: 118, 121), jossa aloituksista paras saa alhaisimman stressiarvon (Oksanen ym. 2022: 124). Stressiarvo kertoo dissimilariteettiarvojen sovittumisesta kuvaajaan (Kruskall 1964: 3; Goral & Schellenberg 2022: 4) ja Clarken (1993: 126) mukaan sen luotettavuuden ylärajana voidaan pitää 0,20 arvoa. Stressiarvo on riippuvainen ulottuvuuksien määrästä ja laskee, jos niitä lisätään. Lukumäärällisesti yleisimmät ja ordinaatioon parhaiten sovitut geokohteet visualisoitiin kuvaajaan *goeveg*-paketin *ordiselect*-funktiolla (Goral & Schellenberg 2022: 4).

Beeta-geodiversiteettiarvojen laskennassa ja tulosten visualisoinnissa käytettiin *recluster* ja *vegan*-paketteja, jotka on kehitetty biodiversiteetin tutkimukseen (Dapporto ym. 2022: 1; Oksanen ym. 2022: 4–5). *Vegdist*-funktion avulla lasketaan Jaccardin dissimilariteetti-indeksi (Oksanen ym. 2022: 273), joka pohjautuu parittaisten eroavaisuuksien vertailuun tutkimusalueen sisällä (Anderson ym. 2011: 20). Dissimilariteettiarvot kuvaavat sitä, miten tutkimusalat eroavat toisistaan geokohteiden perusteella (Tukiainen ym. 2022a: 5). Menetelmänä Jaccardin dissimilariteetti-indeksi sopii tutkielman aineistolle, joka on 0/1-muodossa (Hao ym. 2019: 6). Beeta-geodiversiteettiarvot visualisoitiin käyttämällä *recluster.col* ja *recluster.plot.sites.col*-funktioita. Käytetyt funktiot heijastavat NMDS-kuvaajan tulokset ja beeta-geodiversiteettiarvot RGB-väriulottuvuuteen, joka tuottaa visuaalisen kuvaajan tutkimusalojen beeta-diversiteetin vaihtelusta (Tukiainen ym. 2022a: 7–8; Dapporto ym. 2022: 8, 27–28).

Viimeiseksi tarkasteltiin beeta-geodiversiteetin spatiaalista autokorrelaatiota Mantelin korrelogrammin kautta käyttämällä *vegan*-paketin *mantel.correlog*-funktiota (Oksanen ym. 2022: 116). Se sopii monimuuttuja-aineiston mittaamiseen eri etäisyysluokissa (Legendre & Legendre 2012: 792, 819) ja on luotettava mittari tutkimuksiin, joissa aineiston analysointi perustuu erilaisuuden mittaamiseen esimerkiksi Jaccardin kertoimen avulla (Borcard & Legendre 2012: 1480). Spatiaalinen autokorrelaatio voi saada sekä positiivisia, että negatiivisia arvoja (Legendre & Legendre 2012: 821) ja alle 0,05 oleva p-arvo kertoo tilastollisesti merkitsevästä tuloksesta. Mantelin korrelogrammi antaa tietoa beeta-geodiversiteetin alueellisen jakautumisen vaihtelusta (Tukiainen 2022a: 7, 9).

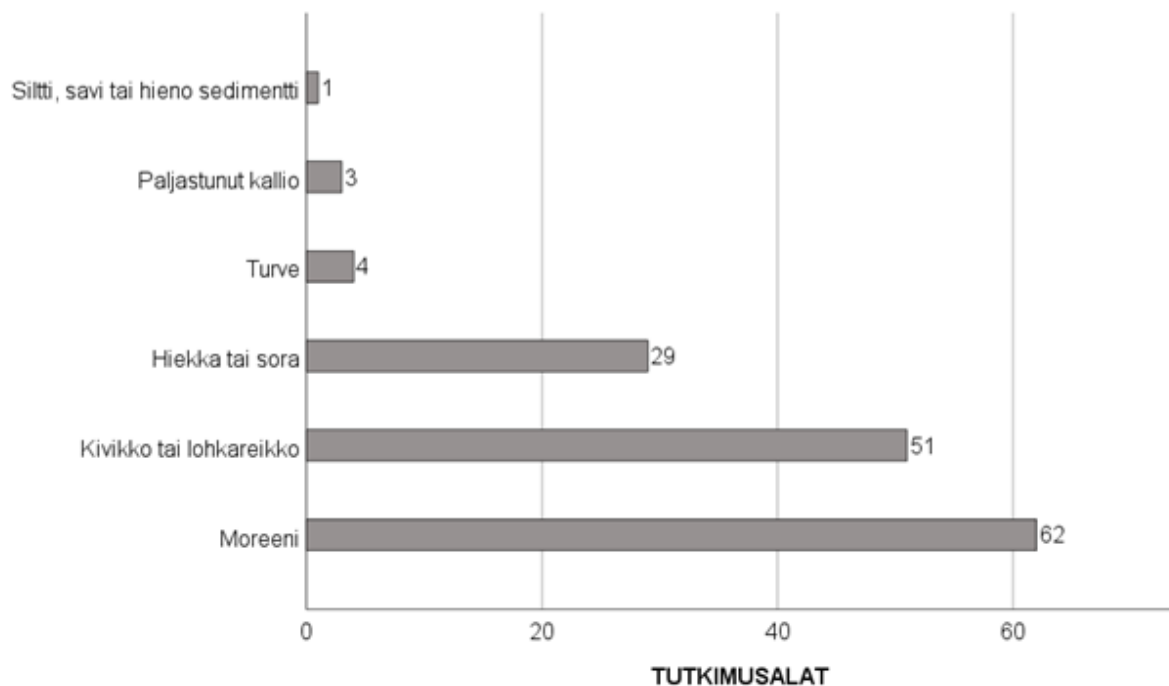
7.2.3 Gamma-geodiversiteetin kvantifiointi

Gamma-geodiversiteetin analysointi suoritettiin Microsoft Excel -laskentataulukon *summa*-funktiolla. Siinä laskettiin kaikkien erilaisten tutkimusalueelta löydettyjen geokohteiden kokonaismäärä ja miten se jakaantui geodiversiteetin osa-alueiden välillä. Tämä georunsaus kuvaa paikallistason geodiversiteettiä gamma -tasolla.

8 Tulokset

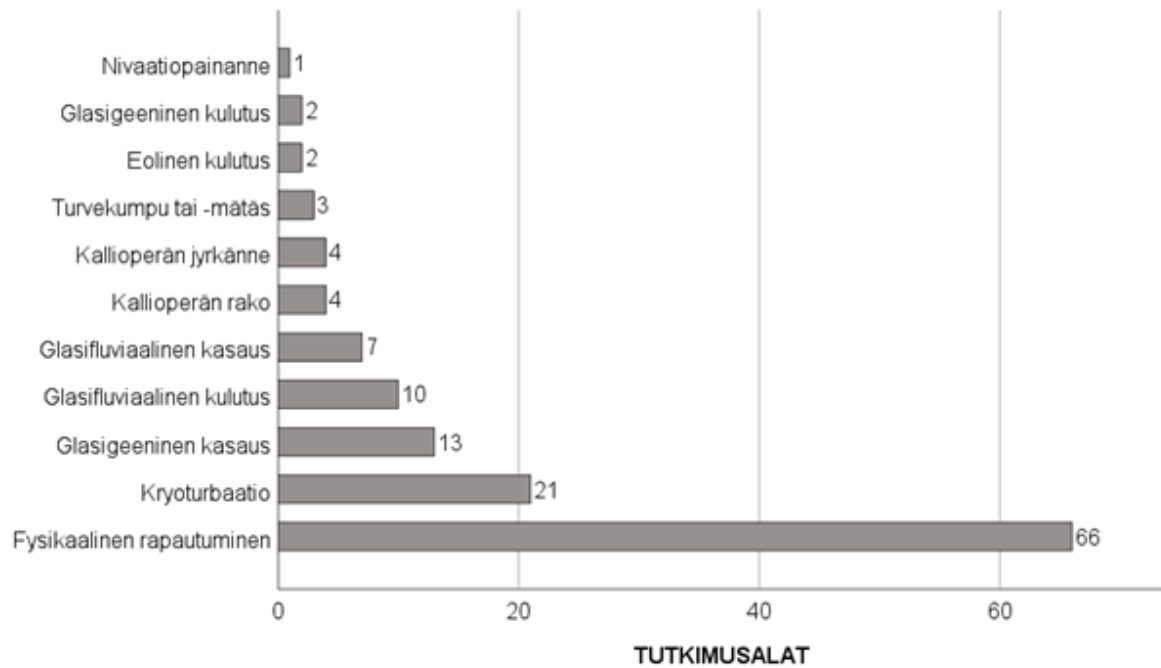
8.1 Saariselän paikallistason geokohteet

Tutkimusaloilta löytyi kaikkia arktis-alpiiniseen ympäristöön luonteenomaisia geologisia geokohteita (ks. taulukko 2). Yleisimmät geologiset geokohteet, joita tutkimusaloilla havaittiin, olivat moreeni ja kivikko/lohkareikko (kuva 11). Silttiä, savea tai hienoa sedimenttiä ja paljastunutta kalliota taas oli vain muutamalla tutkimusalalla.



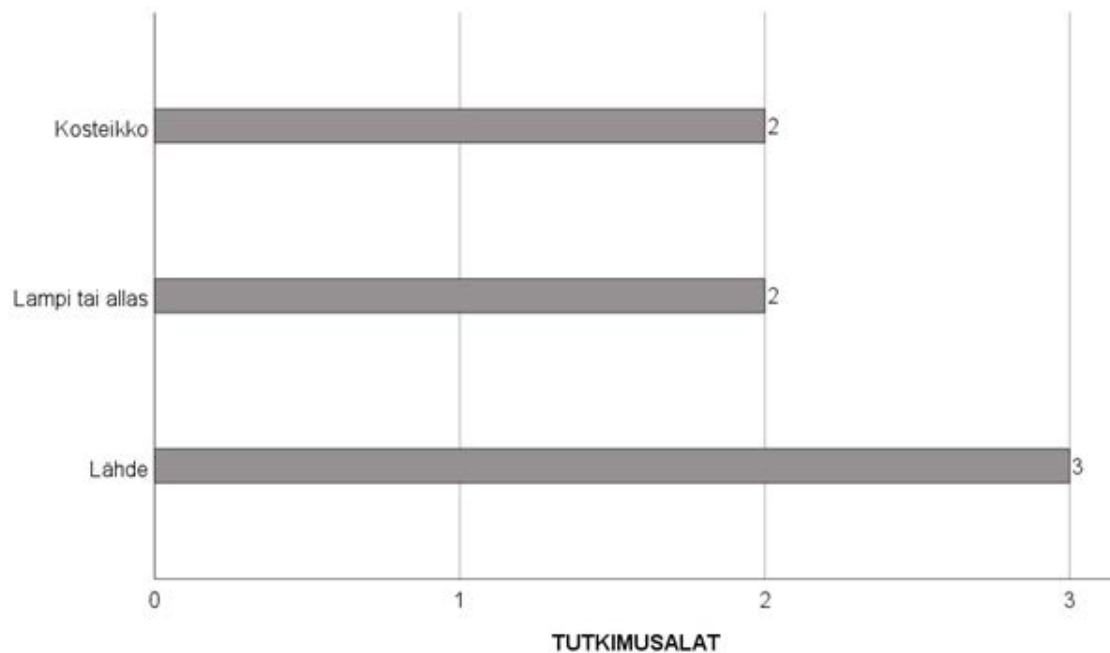
Kuva 11. Saariselän tutkimusaloilla (n=82) havaitut geologiset geokohteet.

Yleisimmät geomorfologiset geokohteet, joita tutkimusaloilta havaittiin, olivat fysikaalinen rapautuminen ja kryoturbaatio (kuva 12). Fysikaalista rapautumista havaittiin selkeästi eniten, yhteensä 66 tutkimusalalla. Sen sijaan nivaatiopainanteita, glasigeenista kulutusta ja eolista kulutusta oli vain yhdellä tai kahdella alalla. Oli myös useita geomorfologisia geokohteita, joita ei tutkimusaloilla havaittu ollenkaan (ks. taulukko 3). Näitä olivat fluviaaliset ja litoraaliset kulutus- ja kasaumuodostumat, eoliset kasaumuodostumat, massaliikunnot, kemiallinen rapautuminen, pintoja tasaava turve, maajää, lumivyöryt ja sohjuvirrat.



Kuva 12. Saariselän tutkimusaloilla (n=82) havaitut geomorfologiset geokohteet

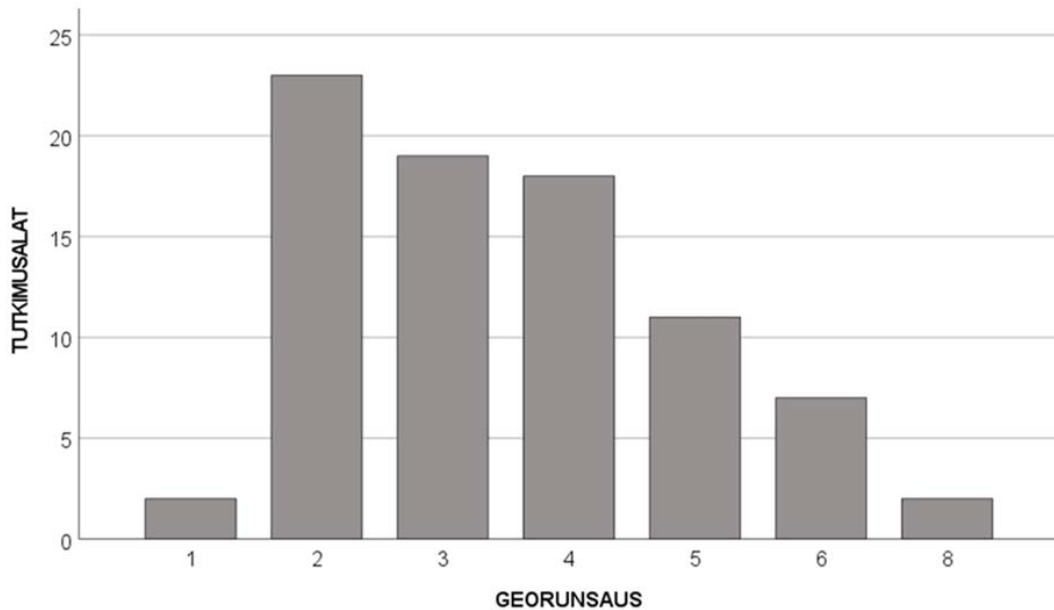
Tutkimusalueella esiintyi vain kolmea erilaista hydrologista geokohdetta, joista yleisin oli lähde. Kosteikosta ja lammesta/altaasta tehtiin muutama havainto (kuva 13). Sen sijaan havaintoja kuivasta uomasta tai altaasta, eikä virtavesistä tehty ollenkaan (ks. taulukko 4).



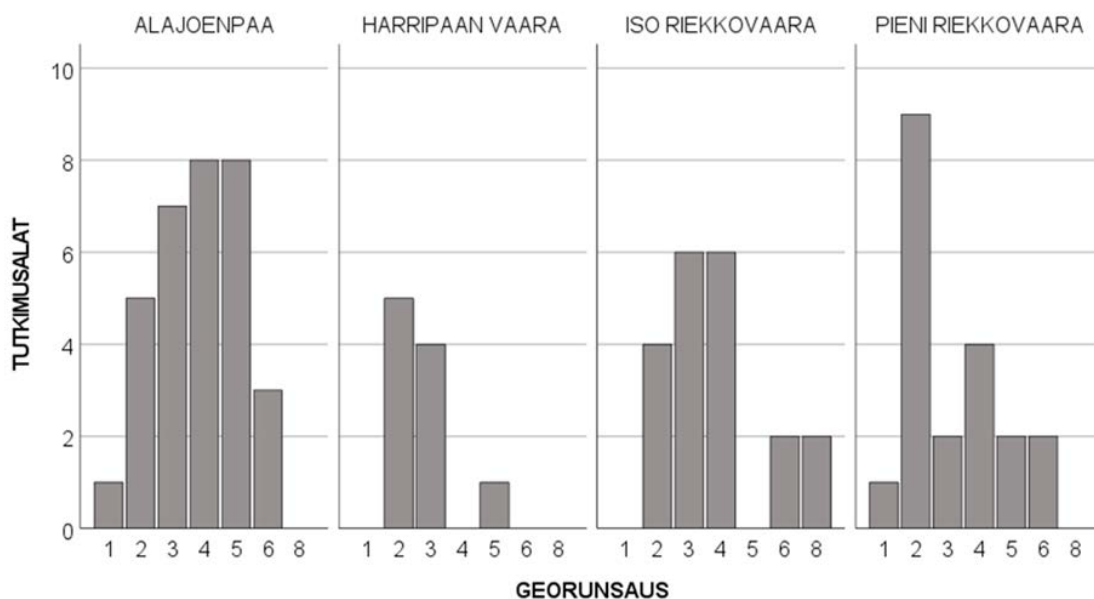
Kuva 13. Saariselän tutkimusaloilla (n=82) havaitut hydrologiset geokohteet.

8.2 Saariselän alfa-geodiversiteetti

Alfa-geodiversiteetti vaihteli yhden ja kahdeksan välillä, yleisimmin se oli kaksi (kuva 14). Vaarakohtaisessa alfa-geodiversiteetin jakaumassa havaittiin vaihtelua vaarojen välillä. Erilaisia geokohteita oli Alajoenpäällä sijaitsevilla tutkimusaloilla yleisimmin neljästä viiteen, Isolla Riekkovaaralla kolmesta neljään ja Harripään vaaralla sekä Pienellä Riekkovaaralla kaksi (kuva 15).

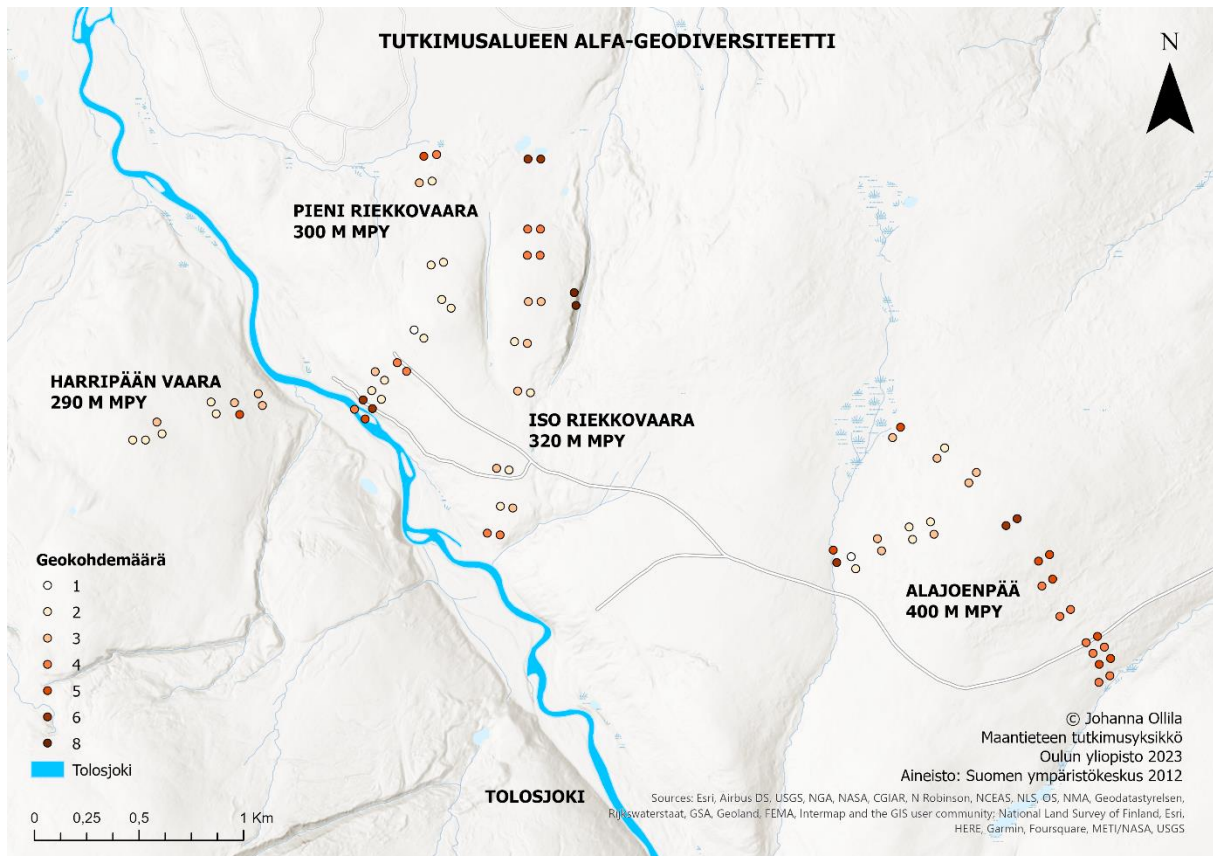


Kuva 14. Alfa-geodiversiteetti Saariselällä. Sitä kuvaava georunsaus on saatu laskemalla tutkimusalaakohtaiset erilaiset geokohteet yhteen jokaiselta tutkimusalalta.



Kuva 15. Alfa-geodiversiteetti vaarakohtaisesti. Sitä kuvaava georunsaus on saatu laskemalla tutkimusalaakohtaiset erilaiset geokohteet yhteen jokaiselta tutkimusalalta.

Sen lisäksi, että vaarojen välillä oli eroavaisuuksia alfa-geodiversiteetissä, esiintyi siinä vaihtelua myös eri korkeuksilla. Kuvasta 16 havaitaan, että suuria arvoja oli sekä matalimmissa että korkeimmissa sijainneissa. Vaihtelua oli jopa lähellä toisiaan sijaitsevien tutkimusala-erien välillä.



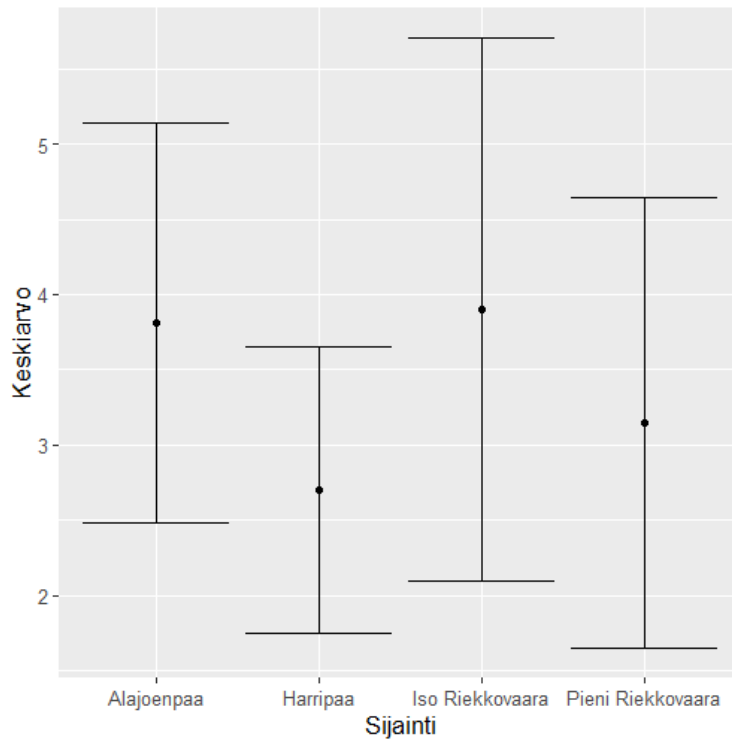
Kuva 16. Tutkimusalueen alfa-geodiversiteetti havainnollistettuna jatkuvalla väriskaalalla, jossa eri sävyt kuvaavat tutkimusala-kohtaista geokohdemäärää. Mitä tummemman sävyn tutkimusala saa, sen suurempi siellä havaittu erilaisten geokohteiden määrä on.

Vaarakohtaisen alfa-geodiversiteetin keskiarvo ja keskihajonta olivat pienimmät Harripään vaaralla ja suurimmat Isolla Riekkovaaralla (taulukko 5). Iso Riekkovaara oli alfa-geodiversiteetiltään vaaroista vaihtelevin. Alajoenpää oli keskiarvoltaan lähellä Isoa Riekkovaaraa, mutta keskihajonnoissa oli eroavaisuutta (kuva 17). Kruskal-Wallis testin (p-arvo < 0,05) perusteella eri vaarojen välisessä alfa-geodiversiteetissä oli luultavasti joitakin eroavaisuuksia, mutta tulos jäi p-arvon (0,054) perusteella epävarmaksi. Testisuureen arvo oli 7,6348 (*chi-squared*) ja tuloksen vapausasteiden (*df*) määrä oli kolme. Parametriton Kruskal-Wallis testi tehtiin, koska Shapiro-Wilkin testin tuloksen perusteella ($W=0,9099$, $p<0,001$) alfa-geodiversiteetin jakauma erosi tilastollisesti merkitsevästi normaalijakaumasta.

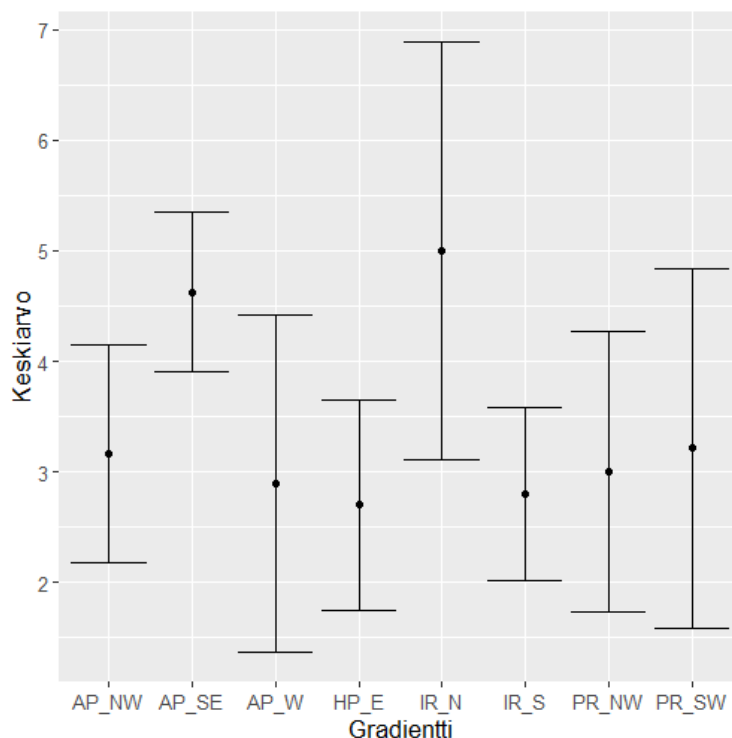
Gradienttikohtaisen alfa-geodiversiteetin keskiarvo ja -hajonta olivat suurimmat Ison Riekkovaaran pohjoisgradientilla. Alajoenpään kaakkoisgradientilla oli toiseksi suurin keskiarvo ja pienin keskihajonta, tosin siellä oli myös eniten tutkimusaloja. Nämä kaksi gradienttia erosivat keskiarvon ja -hajonnan perusteella gradienteista eniten (taulukko 5.). Graafisesta kuvaajasta havaitaan, miten alfa-geodiversiteetin keskiarvo ja -hajonta vaihtelevat vaaran eri ilmansuuntiin suuntautuvilla rinteillä (kuva 18). Kruskal-Wallis testin perusteella gradienttien välillä oli tilastollisesti merkitsevää eroavaisuutta ($p=0,002$). Testisuureen arvo oli 28,466 ja tuloksen vapausasteiden määrä oli seitsemän.

Taulukko 5. Alfa-geodiversiteetin keskiarvot ja keskihajonnat vaara- ja gradienttikohtaisesti. Sulkeisiin on kirjattu laskennan pohjana olleiden tutkimusalojen määrä.

SIJAINTI	KESKIARVO	KESKIHAJONTA
Alajoenpää (n=32)	3,8	1,3
Harripään vaara (n=10)	2,7	0,9
Iso Riekkovaara (n=20)	3,9	1,8
Pieni Riekkovaara (n=20)	3,1	1,4
Alajoenpää luoteisgradientti (n=6)	3,1	0,9
Alajoenpää kaakkoisgradientti (n=16)	4,6	0,7
Alajoenpää läntinen gradientti (n=10)	2,9	1,5
Harripään vaaran itäinen gradientti (n=10)	2,7	0,9
Iso Riekkovaara pohjoisgradientti (n=10)	5,0	1,8
Iso Riekkovaara eteläinen gradientti (n=10)	2,8	0,7
Pieni Riekkovaara luoteisgradientti (n=6)	3,0	1,2
Pieni Riekkovaara lounaisgradientti (n=14)	3,2	1,6

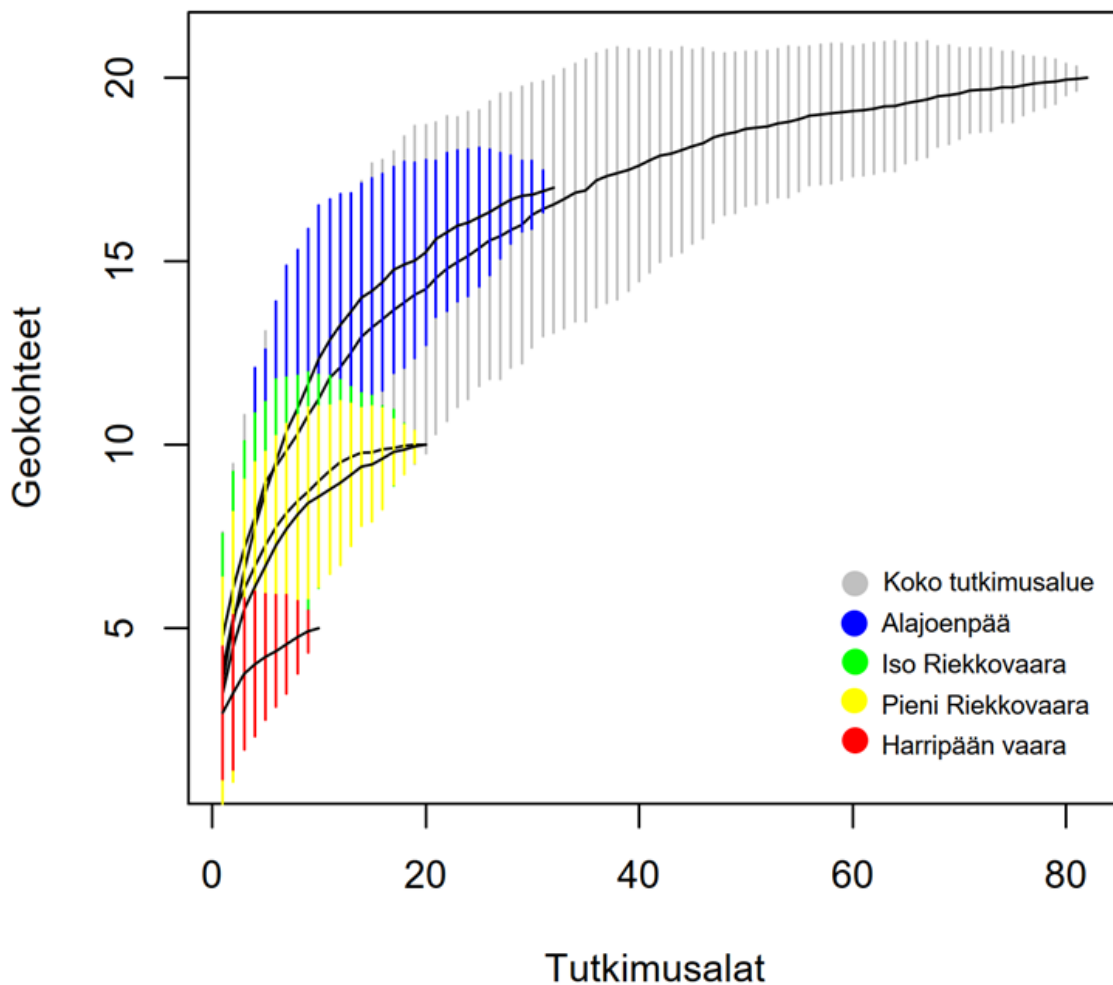


Kuva 17. Vaarakohtaiset alfa-geodiversiteetin keskiarvot ja keskihajonnat, jossa sijainti on ilmoitettu x-akselilla ja keskiarvo y-akselilla.



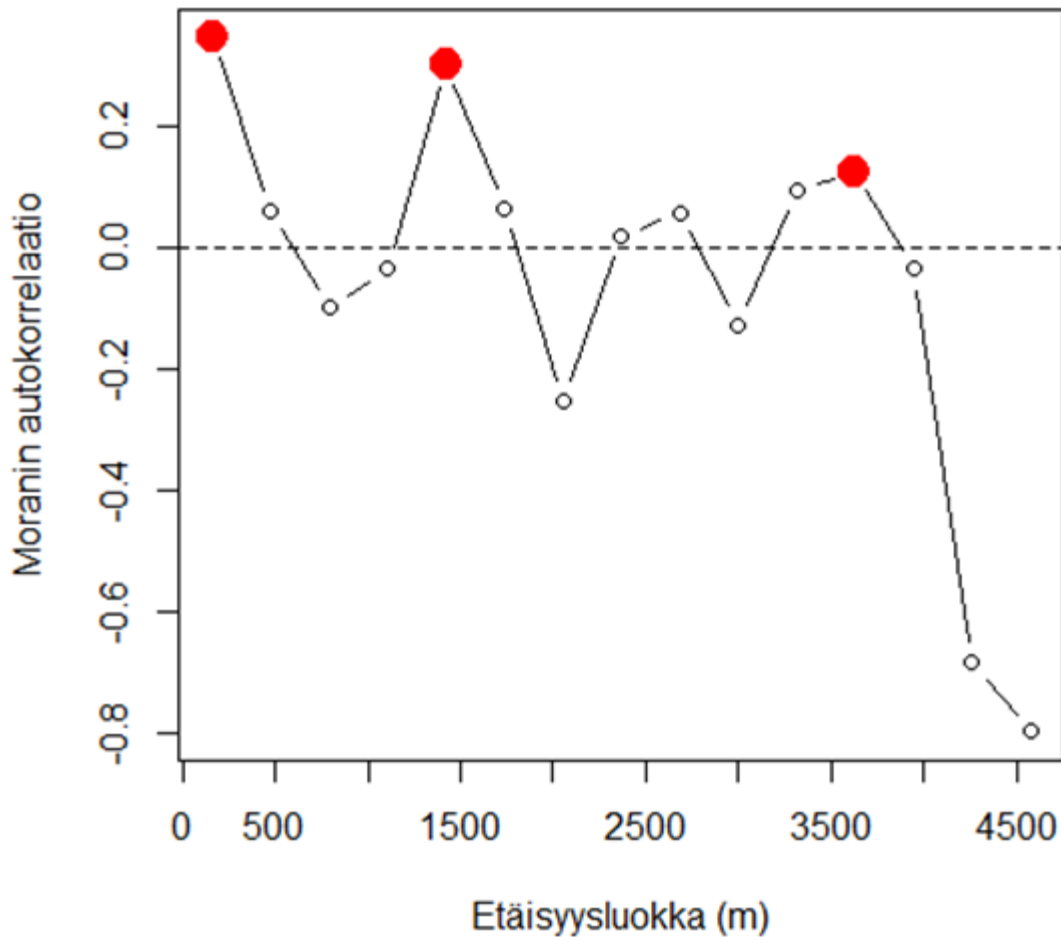
Kuva 18. Gradienttikohtaiset alfa-geodiversiteetin keskiarvot ja keskihajonnat. Graafisessa kuvaajassa gradienttien nimet on lyhennetty seuraavasti: AP_NW=Alajoenpään luoteisgradientti, AP_SE=Alajoenpään kaakkoisgradientti, AP_W=Alajoenpään läntinen gradientti, HP_E=Harripään vaaran itäinen gradientti, IR_N=Ison Riekkovaaran pohjoisgradientti, IR_S=Ison Riekkovaaran eteläinen gradientti, PR_NW=Pienen Riekkovaaran luoteisgradientti ja PR_SW=Pienen Riekkovaaran lounaisgradientti. Sijainti on ilmoitettu x-akselilla ja keskiarvo y-akselilla.

Koko tutkimusalueen akkumulaatiokäyrä (harmaa) viittaa siihen, että tutkimusaloja oli riittävästi ($n=82$) todentamaan tutkimusalueelta löytyvät erilaiset geokohteet (kuva 19). Akkumulaatiokäyrä nousi tasaisesti noin kuuteenkymmeneen tutkimusalaan saakka, jonka jälkeen käyrä alkoi tasoittua. Alajoenpään (sininen), Harripään vaaran (punainen), Pienen Riekkovaaran (keltainen) ja Ison Riekkovaaran (vihreä) vaarakohtaisista akkumulaatiokäyristä havaitaan, että ne tasoittuivat melko tasaisesti toisiinsa verrattuna ja suhteutettuna niiltä kartoitettujen tutkimusalojen määrään. Alajoenpään alueella tutkimusaloja oli määrällisesti eniten ($n=32$) ja kaikista vaaroista siellä esiintyi runsaimmin erilaisia geokohteita. Pienellä ja Isolla Riekkovaaralla tutkimusaloja oli saman verran ($n=20$) ja niiden akkumulaatiokäyrät tasoittuvat verraten tasaisesti. Harripään vaaran akkumulaatiokäyrä jäi selvästi lyhyimmäksi, koska siellä kartoitettuja tutkimusaloja oli pienin määrä ($n=10$).



Kuva 19. Erilaisten geokohteiden löytymistä tutkimusalueelta havainnollistavat akkumulaatiokäyrät koko tutkimusalueelle ja vaarakohtaisesti samassa kuvassa.

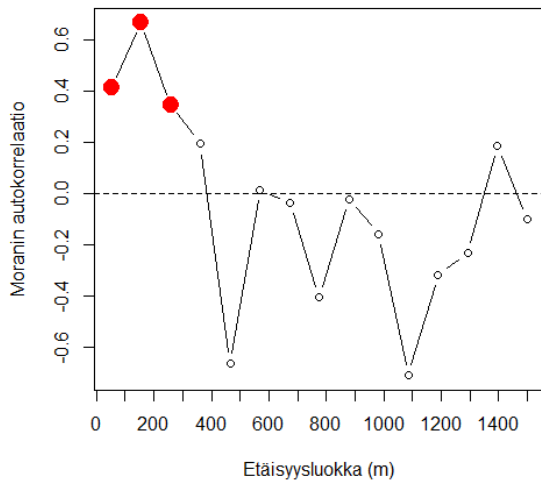
Koko tutkimusalueen alfa-geodiversiteetin spatiaalisen autokorrelaation tarkastelu Moranin I -indeksillä osoittaa, että 15:sta etäisyysluokasta kolmessa esiintyi p-arvoltaan ($<0,05$) tilastollisesti merkitsevää, positiivista spatiaalista autokorrelaatiota, kuten kuvasta 20 havaitaan. Moran I-indeksin saamat arvot jakautuvat -1 ja +1 välille.



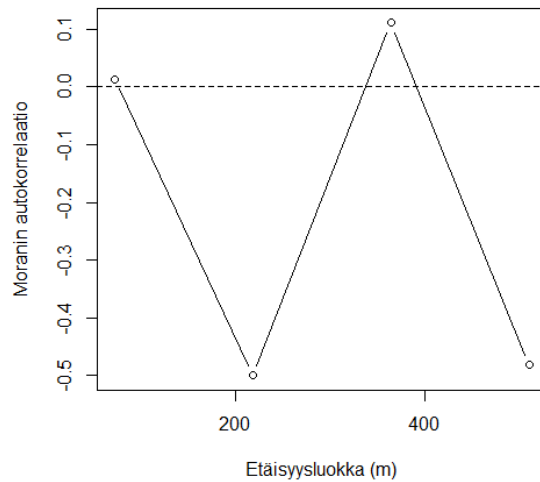
Kuva 20. Graafinen kuvaaja Saariselän tutkimusalueen alfa-geodiversiteetin spatiaalisesta autokorrelaatiosta 15:sta eri etäisyysluokassa Moran I-indeksillä mitattuna. Punaiset ympyrät kuvaavat tilastollisesti merkitsevää ($p < 0,05$) positiivista spatiaalista autokorrelaatiota.

Vaarakohtaisen georunsauden spatiaalisen autokorrelaation tarkastelu Moran I-indeksin perusteella kertoo, että Harripään vaaraa lukuun ottamatta kaikilla vaaroilla esiintyi tilastollisesti merkitsevää ($p < 0,05$) positiivista spatiaalista autokorrelaatiota (kuva 21). Muilla vaaroilla rakenteen etäisyysluokkien määräksi asetettiin 15, paitsi Harripään vaaralla, jossa se oli tutkimusalojen pienen määrän vuoksi neljä. Alajoenpäällä spatiaalista autokorrelaatiota oli kolmessa, Isolla Riekkovaaralla kahdessa ja Pienellä Riekkovaaralla neljässä etäisyysluokassa.

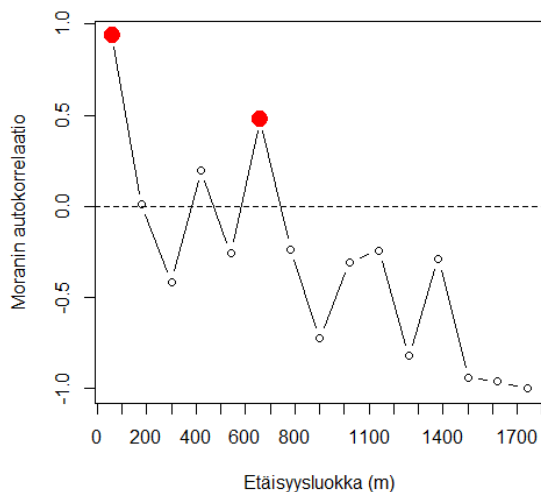
A) Alajoenpää



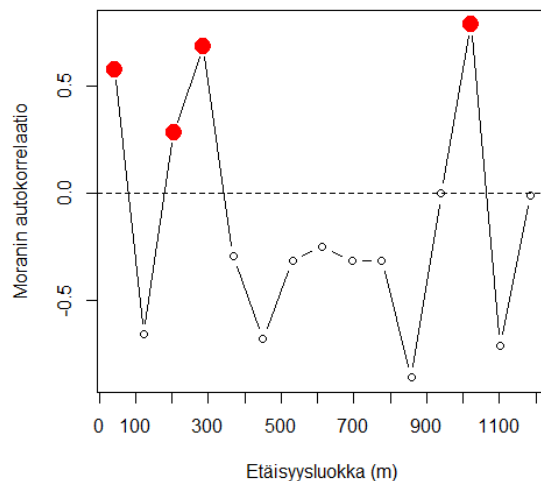
B) Harripään vaara



C) Iso Riekkovaara



D) Pieni Riekkovaara



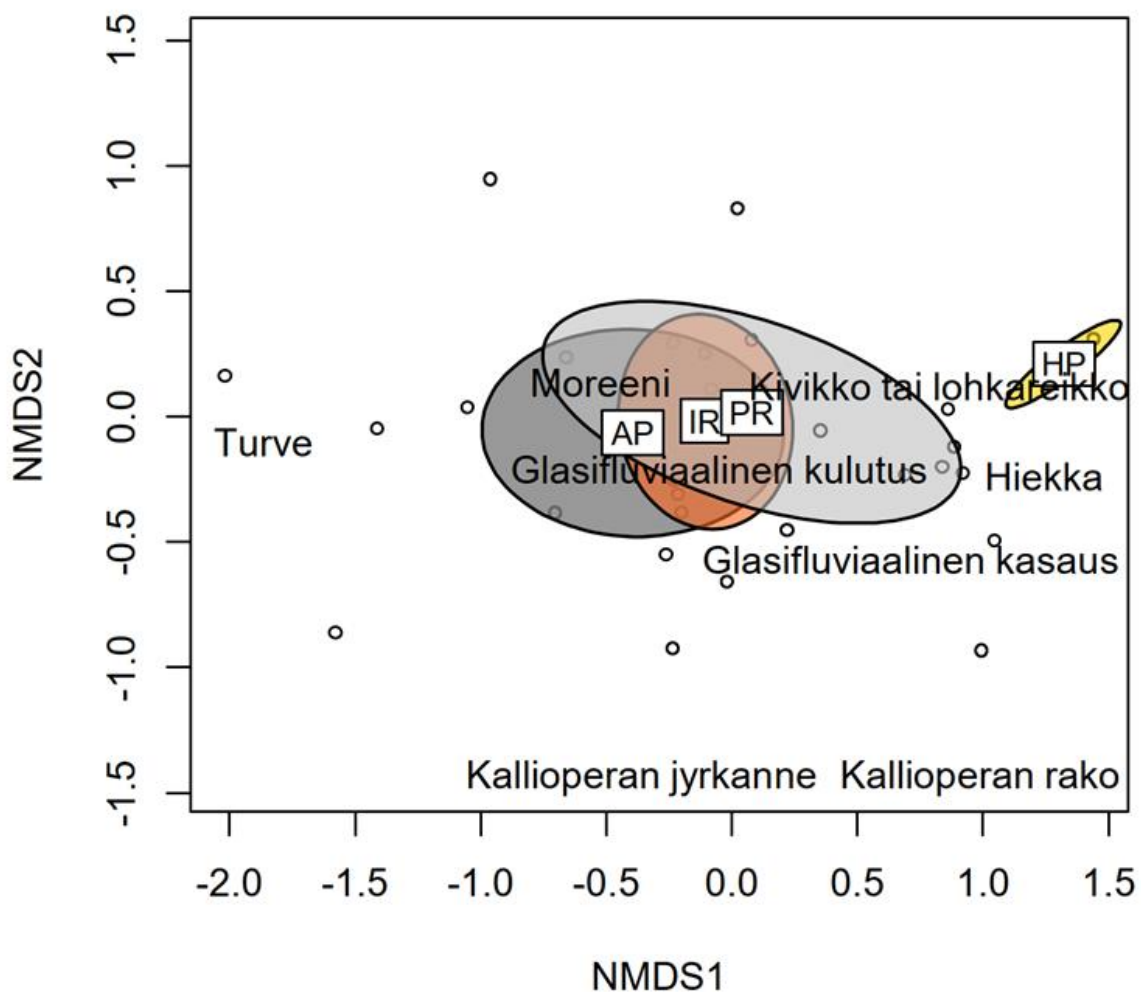
Kuva 21. Graafinen kuvaaja Saariselän alfa-geodiversiteetin vaarakohtaisesta spatiaalisesta autokorrelaatiosta Moran I-indeksillä mitattuna.

8.3 Saariselän beeta-geodiversiteetti

NMDS-kuvaaja tehtiin kolmella ulottuvuudella ($k=3$), koska Jaccardin dissimilariteettiarvot eivät soveltuneet siihen luotettavasti kahdella (kuva 22). Tuloksen stressiarvo (0,06) oli alle luotettavan tuloksen raja-arvon 0,20. NMDS1 ja NMDS2 ovat beeta-geodiversiteetin vaihtelun pääsuuntia, mutta myös kolmas ulottuvuus vaikuttaa kuvaajan taustalla. Kuvaajan ellipsit havainnollistavat tutkimusalueen vaarakohtaista geokohdekoostumusta. Alajoenpään, Ison Riekkovaaran ja Pienen Riekkovaaran ellipsit menivät osin päällekkäin, mikä viittaa siihen, että

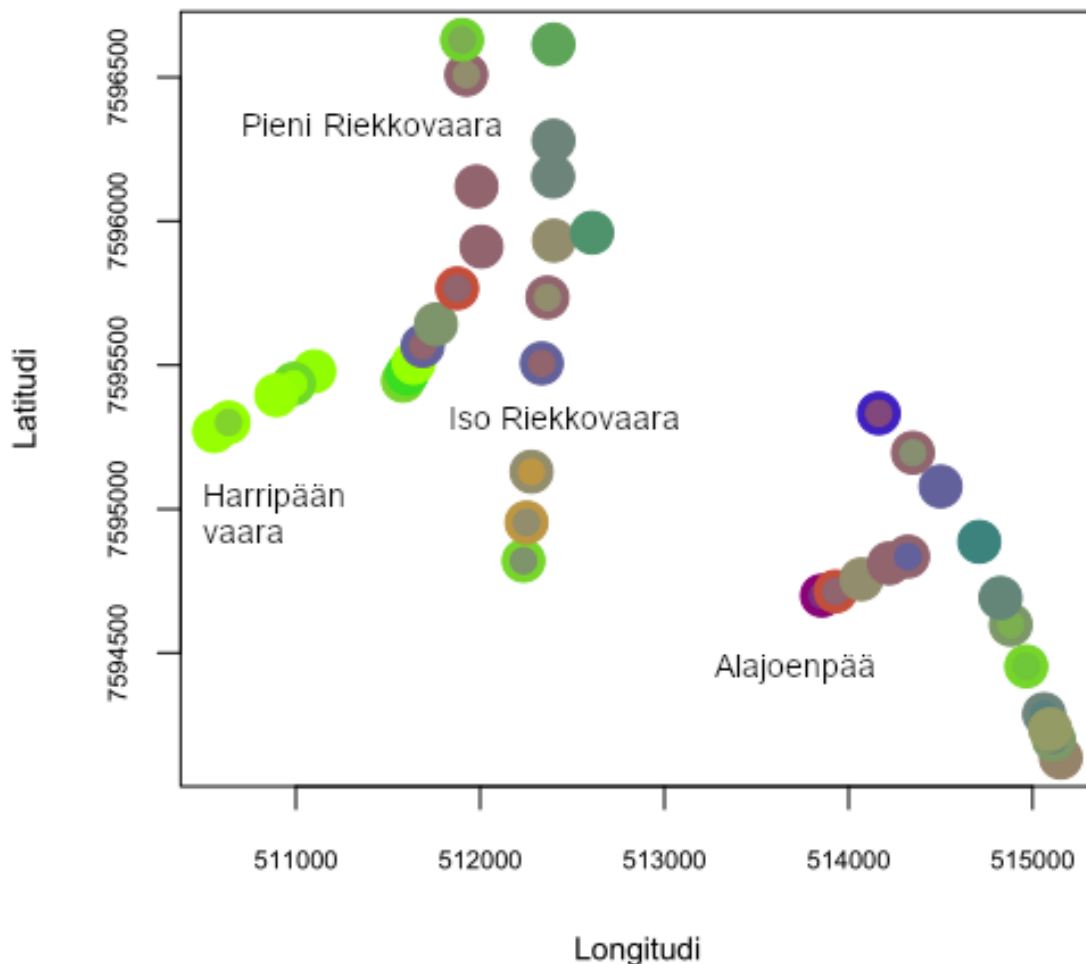
niiden geokohdekoostumuksessa oli samankaltaisuutta. Harrispään vaara sen sijaan erosi muista vaaroista geokohteiltaan ellipsin ollessa niistä selvästi erillään.

NMDS-kuvaajaan havainnollistettiin myös parhaiten sovitut geokohteet, jonka perusteella Harrispään vaara erosi muista vaaroista erityisesti maa-aineskoostumukseltaan. Siellä sijaitsevilla tutkimusaloilla esiintyi pääasiassa hiekkaa, kun taas muilla vaaroilla moreenia muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Kivikko/lohkareikkoa sen sijaan esiintyi tasaisemmin kaikilla vaaroilla. Harrispään vaaran geokohdekoostumus oli muista vaaroista lähimpänä Pientä Riekkovaaraa. Haja-aloja havainnollistavat valkoiset ympyrät kuvaavat tutkimusaloja, joilla oli keskimääräisestä poikkeava geokohdekoostumus.



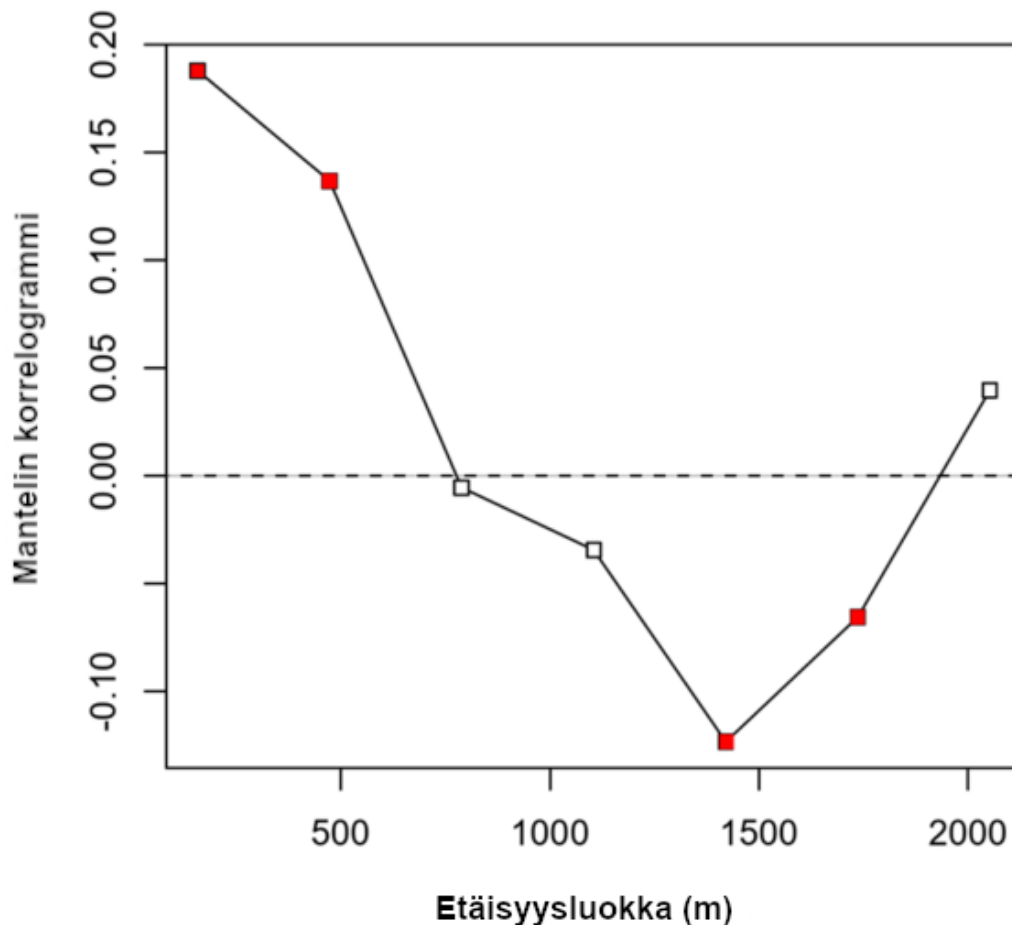
Kuva 22. NMDS-kuvaaja (*Non-metric multidimensional scaling*) kolmella ulottuvuudella, jossa ellipsit havainnollistavat tutkimusalueen geokohdekoostumuksen eroavaisuuksia vaarakohtaisesti. Kuvaajaan on visualisoitu myös tutkimusalueen parhaiten sovitut geokohteet. Vaarojen nimet on lyhennetty tulkittavuuden helpottamiseksi: AP=Alajoenpää, IR=Iso Riekkovaara, PR=Pieni Riekkovaara ja HP=Harrispään vaara.

Tutkimusalaikohtaiset Jaccardin dissimilariteetti-indeksin arvot on visualisoitu eri värein, ja ne kuvaavat tutkimusalueen beeta-geodiversiteettiä eroavaisuuksien kautta (kuva 23). Mitä selvempi ero arvojen saamien värien välillä on, sitä suuremmin ne eroavat toisistaan geokohdekoostumukseltaan. Tuloksista havaitaan, että Harripään vaara erosi beeta-geodiversiteetiltään selvimmin Alajoenpäästä ja Isosta Riekkovaarasta, kun taas Harripään ja Pienen Riekkovaaran osalta tuloksissa oli osin samankaltaisuutta. Vaarakohtaisesti eroavaisuuksia havaittiin selvimmin Alajoenpään gradienttien välillä. Vierekkäisten tutkimusalojen geokohteiden eroavaisuudet on havainnollistettu siten, että toinen niistä visualisoitiin pienemmällä ympyrällä toisen sisään. Kaikilla vaaroilla havaittiin eroavaisuuksia geokohdekoostumuksessa vierekkäisillä tutkimusaloilla. Niissä esiintyi eroavaisuuksia myös kaikilla gradientteilla Isoa Riekkovaaraa lukuun ottamatta.



Kuva 23. Tutkimusalaikohtaiset beeta-geodiversiteetti-arvot, joiden laskenta perustuu Jaccardin dissimilariteetti-indeksiin. Ympyröiden värit osoittavat tutkimusalojen geokohdekoostumuksen eroavaisuuksia vaarojen ja gradienttien välillä. Mitä selvempi ero arvojen saamien värien välillä on, sitä suuremmin ne eroavat toisistaan. Vierekkäisten tutkimusalojen väliset eroavaisuudet on esitetty sisäkkäisillä eri kokoisilla ympyröillä.

Mantelin korrelogrammi osoittaa, että tutkimusalojen välillä oli rakenteen kahdessa eri etäisyysluokassa arvoiltaan positiivista ja kahdessa etäisyysluokassa negatiivista spatiaalista autokorrelaatiota (kuva 24). Positiivinen spatiaalinen autokorrelaatio sijoittui ensimmäisiin etäisyysluokkiin, ja negatiivinen spatiaalinen autokorrelaatio myöhempisiin etäisyysluokkiin.



Kuva 24. Mantelin korrelogrammi-kuvaaja Saariselän tutkimusalueen beeta-geodiversiteetin spatiaalisesta autokorrelaatiosta. Punaiset neliöt kuvaavat tilastollisesti merkitsevää, arvoiltaan positiivista tai negatiivista spatiaalista autokorrelaatiota.

8.4 Saariselän gamma-geodiversiteetti

Saariselän tutkimusalueen gamma-geodiversiteetti eli kokonaisgeorunsaus on kaikkien erilaisten löydettyjen geokohteiden kokonaismäärä. Microsoft Excel-laskentataulukon *summa*-funktioilla laskettuna geokohteiden kokonaismäärä oli yhteensä kaksikymmentä. Siitä 6 oli geologisia, 11 geomorfologisia ja 3 hydrologisia geokohteita. Tutkimusalueella esiintyi kaikkia arktis-alpiinisille ympäristöille luonteenomaisia (Hjort ym. 2022; taulukot 2–4) geologisia geokohteita, mutta geomorfologisista ja hydrologisista geokohteista osaa ei havaittu tutkituilta aloilta.

9 Tulosten tarkastelu ja pohdinta

9.1 Paikallistason geokohteet

Tässä työssä Saariselän tutkimusalueelta saadut tulokset antavat uutta tietoa siitä, millaisia paikallistason geokohteita pohjoisborealisilla metsänrajametsien vaaroilla esiintyy ja missä määrin. Keskeisimpänä tuloksena havaittiin, että paikallistason geodiversiteetti muodostui yleisimmin vain tietyistä geologisista ja geomorfologisista geokohteista (esimerkiksi moreeni ja fysikaalinen rapautuminen), vaikka tutkimusalueella esiintyi myös muita geokohteita. Siitä huolimatta, että paikallistason geodiversiteetti oli tutkimusalueella verrattain alhaista, soveltui alfa, beeta ja gamma -tasojen kvantifioiminen siihen liittyvän ymmärryksen syventämiseen.

Saariselän paikallistason geodiversiteetti oli tutkimusalueella melko homogeenista, vaikka eri luokkiin kuuluvista 34:stä kartoitettavasta geokohteesta yhteensä kahdestakymmenestä tehtiin havaintoja. Osa näistä geokohteista, kuten nivaatiopainanne, jäi kuitenkin yksittäiseksi tai vain muutamalla tutkimusalueella esiintyväksi havainnoksi. Alfa-geodiversiteetti olikin yleisimmin vain kaksi (ks. kuva 14). Vaarakohtaisista alfa-geodiversiteetin jakaumista kuitenkin havaittiin, että eri vaarojen välillä oli eroavaisuuksia. Erilaisia geokohteita havaittiin Alajoenpäällä sijaitsevilta tutkimusaloilta yleisimmin neljästä viiteen, Isolta Riekkovaaralta kolmesta neljään ja Harripään vaaralta sekä Pieneltä Riekkovaaralta kaksi (ks. kuva 15).

Pohjoisborealisilla metsänrajametsien vaaroilla ei ole aikaisemmin tehty paikallistason geodiversiteetin tutkimusta, koska menetelmiä paikallistason tutkimukseen ei juuri ole ollut, kuten Hjort ym. (2022: 1757) tuovat esille. Saariselän tuloksia ei siten voida verrata muihin tutkimuksiin vastaavasta ympäristöstä, mutta Hjortin ym. (2022) paikallistason menetelmää on aikaisemmin käytetty pro gradu -tutkielmassa, joka sijoittuu alpiiniseen metsänrajametsään Norjassa. Siinä tutkimusala-kohtainen geokohteiden määrä oli tulosten perusteella hieman suurempi, keskimäärin viisi. Toisaalta tutkimusala oli kookkaampi kuin Saariselällä, joka todennäköisesti osaltaan selittää suurempaa geokohteiden määrää (Reisæter-Thu 2021: 9–10, 12–13, 18), kuten Hjort ym. (2022: 1763–1764) ovat menetelmän pilottitutkimuksessa havainneet. Norjan ja Kilpisjärven arktis-alpiiniseen ympäristöön sijoittuvassa pilottitutkimuksessa aineisto oli kerätty kolmelta eri kokoiselta tutkimusalueelta ja tulosten perusteella koolla oli vaikutusta geokohdemäärään. Vertailtaessa tuloksia samankokoiselta 10 m säteeltä, paikallistason geodiversiteetti muodostui useammasta erilaisesta geokohteesta, kuin Saariselällä. Hjortin ym. (2022) menetelmää on käytetty myös

Pohjois-Suomessa puuttomalla tunturi- ja tundra-alueella tehdyssä tutkimuksessa, jossa tutkimusalan säde oli viisi metriä. Yleisimpiä geokohteita tällä alueella olivat esimerkiksi moreeni ja fysikaalinen rapautuminen (Salminen ym. 2023: 2229–2230, 2232), jotka vastaavat Saariselän tuloksia.

Ilmastolla on pohjoisessa ympäristössä monenlaisia vaikutuksia elottoman luonnon toimintoihin (Aalto ym. 2014: 237) ja ympäristön paikallisilla olosuhteilla siihen, millaisista geokohteista geodiversiteetti tyypillisesti muodostuu (Hjort ym. 2022: 1758, 1763). Saariselällä oli geokohteista eniten kivikoita, moreenia, kryoturbaatiota ja fysikaalista rapautumista (ks. kuvat 11–12). Pohjoisessa ympäristössä kivikkojen tyypillinen syntyisyys on pakkasrapautuminen, joka irrottaa kallioperästä kiviaineista lakialueilla ja rinteissä (Kujansuu 2005c: 30). Jääkauden aikana syntynyt maa-aines moreeni on hioutunut maa- ja kallioperästä jäätikön liikkeiden mukana ja on yleisin maalaji Pohjois-Suomessa (Kujansuu 2005a: 26; Sharma 2010: 187–188). Kryoturbaatio kuuluu pakkasen aiheuttamiin prosesseihin, jotka ovat riippuvaisia paikallisista olosuhteista, kuten lumen määrästä ja kosteusolosuhteista. Sillä tarkoitetaan maaperässä tapahtuvaa jäätymis-sulamissyklin synnyttämää aineksen eri suuntaista liikehdintää (French 1988: 169; Seppälä 2005: 349). Fysikaalinen rapautuminen liittyy esimerkiksi lämpötilan vaihteluun, kuten jäätymiseen, joka alkaa rikkoa kiven rakennetta ja irrottaa siitä eri kokoisia kappaleita. Viileä ilmasto onkin otollinen fysikaaliselle rapautumiselle (Birkeland 1999: 53–54), ja aiemmassa arktis-alpiiniseen ympäristöön sijoittuvassa paikallistason geodiversiteetin tutkimuksessa myös Hjort ym. (2022) havaitsivat sen olevan yleisin geomorfologinen geokohde tutkimuksensa tunturialueilla. Samaan tulokseen päätyivät myös Salminen ym. (2023: 2232). Ottaen huomioon Saariselän kylmän ja äärevän ilmaston, tulokset ovat olosuhteet huomioiden odotettuja.

Pohjoiseen ympäristöön sijoittuvan aiemman, maisematason tutkimuksen mukaan prekambriin kallioperä ja pintamoreeni vaikuttavat geodiversiteetin geologisen osa-alueen homogeenisuuteen (Hjort & Luoto 2010: 110, 113). Saariselän tuloksissa moreeni olikin kivikon lisäksi selvästi yleisin geologinen geokohde. Usealta tutkimusalalta havaittiin kuitenkin myös hiekkaa, joka voi viitata esimerkiksi deglasiaatiovaiheen glasifluvialiseen toimintaan. Maisematason mittakaavassa on lisäksi havaittu, että etenkin vaihtelevat geomorfologiset kulutus- ja kasausprosessit luovat runsaampaa geodiversiteettiä (Hjort & Luoto 2010: 115). Saariselän alue kuuluu pohjoisiin ympäristöihin, jossa tunturit ja vaarat luovat selkeää, suuripiirteistä topografista vaihtelua alueelle (Kujansuu 2005d: 15–17), ja geomorfologiset muodostumat, kuten moreenikummut ja siirtolohkareet, muodostavat pienialaisempaa paikallista topografiaa. Tutkimusalueelta havaittiinkin geomorfologisista geokohteista

yleisimmin kryoturbaation ja fysikaalisen rapautumisen lisäksi glasigeenistä ja glasifluviaalista kasausta sekä glasifluviaalista kulutusta, jotka viittaavat viimeisimmän jääkauden aikaisiin jäätikön liikkeisiin sekä sen sulamisvesien voimaan Pohjois-Suomessa (Johansson 2005a: 116–117, Johansson 2005b: 95).

Tutkimusalueella esiintyi kaikkia aineistonkeruumenetelmän listaukseen kuuluvia geologisia geokohteita, mutta geomorfologisia tai hydrologisia geokohteita (ks. taulukot 2–4) ei havaittu yhtä kattavasti. Toisaalta osa geologisista geokohteista, kuten siltti tai paljastunut kallioperä, havaittiin vain yhdellä tai muutamalla tutkimusalueella. Havaitsematta jääneitä geomorfologiseen luokkaan kuuluvia kohteita olivat fluviaaliset ja litoraaliset kulutus- ja kasaumuodostumat, massaliikunnot, kemiallinen rapautuminen, pintoja tasaava turve ja merkit maajäästä, lumivyöryistä sekä sohjuvirroista. Useamman tutkimusalueen välittömässä läheisyydessä esiintyi esimerkiksi erilaisia fluviaalisia ja litoraalisia geokohteita, mutta niiden vaikutus ei kuitenkaan ulottunut tutkimusalueille saakka. Esimerkiksi Tolosjoki virtasi tutkimusalueen läpi, jonka varrelle Pienen Riekkovaaran lounaisgradientin alaosan vierekkäiset tutkimusalueet sijoittuivat, mutta ylemmäs rinteeseen. Ison Riekkovaaran pohjoisgradientilla rinteiden alaosassa taas oli suuri lampi, jossa oli silmämääräisesti havaittavissa litoraalista kasausta (ks. taulukko 3), kuten ruohottunutta rantaa, mutta joka jäi tutkimusalueista liian kauas. Se, etteivät tutkimusalueet sijoittuneet suoraan vesistöjen läheisyyteen selittää osaltaan näiden litoraalisten ja fluviaalisten geokohteiden puuttumisen aineistosta. Tämän perusteella voidaan todeta, että tutkimuksen rajauksella ja mittakaavalla on suuri vaikutus tuloksiin.

Tolosjoen viereisiltä tutkimusalueilta havaittiin kairausnäytteissä hiekkaa, jotka merkittiin geologisiksi geokohteiksi, mutta eolista kasausta ei havaittu. Sen sijaan Alajoenpään paljaalta lakialueelta tehtiin havaintoja eolisesta kulutuksesta, joka viittaa siihen, että tuuli on suojaavan puuston ja muun kasvillisuuden puuttuessa päässyt puhaltamaan irtomaa-aineita mukaansa (Sharma 2010: 253). Vastaavia havaintoja ei esiintynyt muilla korkeusgradienteilla tai muiden vaarojen lakialueilla, jotka olivat mäntymetsän suojassa. Tutkimusalueen sijoittuessa metsään, tiheä kasvillisuus saattaa olla yksi siellä esiintyviin geokohteisiin vaikuttavista tekijöistä. Geokohteita voi tällöin olla vaikeampi joko havaita tai niitä esiintyy vähemmän (Hjort ym. 2022: 1765).

Hydrologisia geokohteita havaittiin verrattain vähän, ainoastaan lähde, allas ja kosteikko (ks. kuva 13). Sen sijaan kuivasta uomasta tai altaasta, eikä virtavesistä tehty yhtään havaintoa. Pienen Riekkovaaran luoteis- ja lounaisgradienteilla sekä Alajoenpään kaakkoisgradientilla havaittiin muutamia epäselviä merkkejä mahdollisista vanhoista, kasvillisuuden peittämistä kuivista uomista, mutta näitä havaintoja ei kuitenkaan laskettu

omiksi geokohteikseen. Aiemmassa pohjoiseen ympäristöön sijoittuvassa paikallistason tutkimuksessa kuivat uomat sen sijaan olivat yleisin havaittu hydrologinen geokohde (Hjort ym. 2022: 1763; Salminen ym. 2023: 2232). Saariselän tulokseen vaikutti jälleen tutkimusalueen rajaus, koska hydrologisista geokohteista, kuten virtavesistä, tehtiin havaintoja tutkimusalueen ulkopuolelta.

Monet geodiversiteetin osa-alueet ovat herkkiä ympäristössä tapahtuville muutoksille, kuten maankäytön muutoksille (Gordon & Barron 2013: 4–5). Ihmisen toiminta vaikuttaakin yhä kiihtyvämpään tahtiin elottoman luonnon osa-alueisiin ja prosesseihin globaalilla mittakaavalla (Kozłowski 2004: 833). Ilićin ym. (2016: 325) mukaan ihmistoiminnan suora vaikutus geodiversiteettiin on kuitenkin havaittu useissa tutkimuksissa verrattain vähäiseksi harvaanasutuilla tai asuttamattomilla alueilla (esim. Hjort & Luoto 2010: 110; Pellitero ym. 2011: 164). Tutkimusalueella ihmistoiminta oli hyvin vähäistä, lähinnä se oli vaikuttanut kahteen Alajoenpään kaakkoisgradientin tutkimusalaan. Niiden läheisyydessä kulki hiekkatien lisäksi sähkölinja, jonka ympäriltä oli tehty metsänhakkuita. Kyseisten tutkimusalojen osalta oli silminnähtävää, että hiekkatien ja sähkölinjan rakennustyöt ovat aikanaan vaikuttaneet niillä nykyisin esiintyviin geokohteisiin. Esimerkiksi eri kokoisia kiviä oli kasoina tutkimusalan tienpuoleisella reunalla, jotka oli todennäköisesti siirretty siihen rakennustöiden aikana, ja ne olivat jo peittyneet kuntaan. Vertailukohteenä olevalla Harripään vaaran itäisellä gradientilla tutkimusalat olivat luonnontilaisia (kuva 25).

A)



B)



Kuva 25. A) Alajoenpään kaakkoisgradientin tutkimusala, jossa ihmistoiminnan vaikutus oli tutkimusalueen suurinta ja B) Harripään vaaran itäisen gradientin tutkimusala, jossa ihmistoiminnan vaikutus oli päinvastoin vähäistä (valokuvat Saariselän tutkimusalueelta, Johanna Kotilainen 8/2022).

Tässä aineistossa ihmistoiminnan vaikutus oli hyvin vähäistä, mutta sen vaikutusta paikallistason geodiversiteettiin on syytä tutkia tarkemmin eri ympäristöissä. Ihmistoiminta voi

potentiaalisesti muuttaa paikallistason geodiversiteettiä paljonkin, kuten näiden kahden Alajoenpään tutkimusalan osalta havaittiin.

9.2 Alfa-geodiversiteetti

Keskimääräisen alfa-geodiversiteetin vaarakohtaisen ja gradienttien välisen tarkastelun perusteella ainakin gradienttien välillä esiintyi tilastollisesti merkitseviä eroavaisuuksia. Sen sijaan vaarojen väliset eroavaisuudet jäivät p-arvon perusteella epävarmaksi. Koska Kruskal-Wallis-tulos kertoo vain sen, ovatko eri ryhmät samankaltaisesta perusjoukosta vai esiintyykö niiden välillä eroavaisuuksia (Legendre & Legendre 2012: 203), täytyi keskiarvokuvaajia tarkastelemalla päätellä se, mikä gradienteista erosi muista.

Keskiarvoinen alfa-geodiversiteetti oli melko samankaltaista eri vaaroilla. Keskiarvokuvaajan perusteella Ison Riekkovaaran keskihajonta oli vaaroista suurin, joka viittasi tutkimusalaan vaihteluun geokohteiden määrässä (ks. kuva 17). Tätä voi osaltaan selittää se, että Ison Riekkovaaran tutkimusaloista kaksi sijaitsi geokohteiltaan koko tutkimusalueen monimuotoisimmalla ylitysuoman reuna-alueella, kun taas osa tutkimusaloista sijaitsi hyvin tasaisella alueella, jossa geokohteita oli vain vähän. Vaaroihin verrattuna, eri ilmansuuntiin avautuvien gradienttien välillä oli selkeämmin eroja keskiarvoisessa alfa-geodiversiteetissä. Ison Riekkovaaran pohjoisgradientti erosi kaikista muista gradienteista selvimmin keskiarvokuvaajan perusteella. Tulokset viittaavat siten siihen, että alfa-geodiversiteetissä on paikallista vaihtelua gradienttikohtaisesti, kun taas vaarakohtaisessa tarkastelussa mittakaava kasvaa ja erot tasoittuvat. Akkumulaatiokäyrien tarkastelu koko tutkimusalueelta ja vaarakohtaisesti osoitti, että ne tasoittuivat melko takaisesti suhteutettuna vaarakohtaisen aineiston kokoon ja suhteessa toisiinsa. Tämä viittaa siihen, että tutkimusalueen aineisto oli riittävän kokoinen paikallistason geodiversiteetin tarkasteluun.

Positiivista spatiaalista autokorrelaatiota esiintyi koko tutkimusalueella ja vaarakohtaisesti lukuun ottamatta Harripään vaaraa. Tulosta voi osaltaan selittää se, että erilaisten geokohteiden koko vaihtelee, ja esimerkiksi geomorfologisten prosessien vaikutukset tai erilaiset muodostumat voivat ulottua laajalle alueelle, yli tutkimusalan rajojen (Hjort ym. 2022: 1760). Jos sama geokohde huomioidaan vierekkäisistä tutkimusaloista molemmissa, samankaltaistaa se niiden georunsautta, joka näkyy ensimmäisen etäisyysluokan positiivisena spatiaalisena autokorrelaationa. Tulosta voi selittää myös se, että tutkimusalat sijaitsevat eri korkeusgradieniteilla pareittain. On todennäköistä, että samalla korkeusgradientilla sijaitsevien

tutkimusalojen välillä esiintyy voimakasta spatiaalista autokorrelaatiota, johon kuvaajan seuraavat etäisyysluokat viittaavat.

9.3 Beeta-geodiversiteetti

Beeta-geodiversiteetin perusteella havaittiin, että geokohdekoostumus vaihtelee selvästi huolimatta tutkimusalueen pienestä koosta. Sen kvantifioiminen antaa lisätietoa tutkimusalueen geodiversiteetin paikallistason vaihtelusta. Tulosten perusteella voidaankin todeta, että beeta-geodiversiteetin kvantifioiminen sopii erittäin hyvin myös paikallistason tutkimukseen. Aiemmin vastaavia tuloksia beeta-diversiteetin soveltuvuudesta geodiversiteetin tutkimukseen on saatu maisematasolta (esim. Erikstad ym. 2022: 2, 13–14; Tukiainen ym. 2022a: 8).

Beeta-geodiversiteetti antaa tietoa siitä, millaista vaihtelua geokohdekoostumuksessa on tutkimusalojen välillä (Tukiainen ym. 2022a: 3). Jaccardin dissimilariteettiarvoihin pohjautuvan NMDS-kuvaajan perusteella voidaan todeta, että maa-aineksessa (turve-moreeni-hiekka) oli selvä NMDS1 pääsuunnan mukainen eroavaisuus vaarojen välisessä geokohdekoostumuksessa. Tämä viittaa siihen, että geologisten geokohteiden vaihtelu luultavasti määrittää eri geokohteista voimakkaimmin geodiversiteetin vaihtelua tutkimusalueella (ks. kuva 22).

Tutkimusalamohtaisesti lasketut Jaccardin dissimilariteettiarvot kuvasivat beeta-geodiversiteetin eroavaisuuksia tutkimusalueella (ks. kuva 23). Vaarakohtaisesti eroavaisuuksia esiintyi selvimmin Alajoenpään gradienttien välillä, jossa tutkimusaloja oli määrällisesti eniten. Siellä havaittiin gradientista riippuen esimerkiksi tutkimusalueen ainoat hydrologiset geokohteet, näkyvintä ihmistoiminnan vaikutusta ja suurin vaihtelu metsätyypissä. Kaikilla vaaroilla ja gradienteilla, lukuun ottamatta Ison Riekkovaaran pohjoisgradienttia, esiintyi eroavaisuuksia vierekkäisten tutkimusalojen välisessä geokohdekoostumuksessa.

Gradienttien välisistä Jaccardin dissimilariteettiarvoista havaittiin, että Harripään vaaran ja Pienen Riekkovaaran osalta geokohdekoostumus erosi muista (ks. kuva 23). Harripään vaara ja osin Pienen Riekkovaaran lounaisgradientti sijaitsivat molemmat Tolosjoen uoman eri rinteillä, jossa glasifluviaalinen toiminta on ollut aktiivista. Tolosjoki on toiminut esimerkiksi usean jäärjärven purkausomana deglasiaation vaiheessa (Väisänen & Peronius 1989: 20). Rinnevarjosteen tarkastelussa havaittiin, että myös Alajoenpään kaakkoisgradientin, Ison Riekkovaaran etelä- ja pohjoisgradienttien sekä Pienen Riekkovaaran luoteisgradientin alaosissa on ollut glasifluviaalista toimintaa. Harripään vaaran kaikilta ja Pienen Riekkovaaran lounaisgradientilta, rinteiden alaosan tutkimusaloilta havaittiin moreenin sijasta hiekkaa ja ohuen

kuntan alta kivikkoa. Vastaavaa geokohdekoostumusta löytyi myös Pienen Riekkovaaran luoteisgradientin alaosasta, Ison Riekkovaaran eteläisen gradientin alaosasta ja Alajoenpään kaakkoisgradientin keskiosasta, joista kaikista havaittiin ohuen kunnan alta kivikkoa ja hiekkaa vähintään toiselta vierekkäisistä tutkimusaloista.

Alajoenpään kaakkoisgradientin ja Ison Riekkovaaran pohjoisen gradientin geokohdekoostumuksessa oli samankaltaisuutta, joka erosi muihin gradientteihin verrattuna (ks. kuva 23). Eroavaisuuksia suhteessa saman gradientin eri korkeuksilla sijaitseviin tutkimusaloihin ja muihin gradientteihin oli Pienen Riekkovaaran molempien gradienttien keskiosissa ja lakialueella, Alajoenpään läntisellä ja luoteisgradientteilla sekä Ison Riekkovaaran eteläisen gradientin yläosassa. Alhaisen alfa-geodiversiteetin saaneita tutkimusaloja sijaitsi esimerkiksi Pienen Riekkovaaran lounaisgradientilla ja Alajoenpään läntisellä gradientilla, joilla yksittäisten tutkimusalojen muista poikkeava väritys viittasi samaan geologiseen geokohdehavaintoon. Alajoenpään läntisen ja luoteisgradienttien alaosien tutkimusalat erosivat myös muista ja niillä tehtiinkin tutkimusalueen ainoat turvehavainnot, jonka lisäksi niillä esiintyi hydrologisia geokohteita.

Beeta-geodiversiteetin osalta havaittiin positiivista spatiaalista autokorrelaatiota, joka viittaa geokohdekoostumuksen samankaltaisuuteen vierekkäisillä tutkimusaloilla. Sama geokohde voi sijoittua tutkimusalan rajojen ylitse (Hjort ym. 2022: 1760). Etäisyyden kasvaessa havaittiin myös tilastollisesti merkitsevää negatiivista spatiaalista autokorrelaatiota. Se viittaa eroavaisuuksien lisääntymiseen kauempana olevien tutkimusalojen välillä (Tukiainen ym. 2022a: 8).

9.4 Gamma-geodiversiteetti

Saariselällä sijaitsevan tutkimusalueen paikallistason gamma-geodiversiteetti koostui yleisimmin erilaisista geologiseen ja geomorfologiseen luokkaan kuuluvista geokohteista. Tämä yleistason tieto voi olla hyödyksi esimerkiksi silloin, kun suunnitellaan alueen maankäyttöä. Gamma -tason avulla voidaan arvioida näiden muutosten mahdollisia vaikutuksia geodiversiteettiin (Tukiainen ym. 2022a: 4). Tutkimusalueen rajauksella on kuitenkin vaikutusta gamma-geodiversiteetin tuloksiin paikallistason tutkimuksessa. Jos tutkimusalat olisi sijoitettu kasvillisuusruutujen sijasta geodiversiteetikartoitusta ajatellen, olisi aineistosta todennäköisesti saatu erilainen kuva paikallistason geodiversiteetistä. Tämä on tärkeä huomioida aluesuunnittelussa.

9.5 Alfa, beeta ja gamma -tasojen käyttö geodiversiteetin arvioinnissa

Luonnon monimuotoisuuden mittaamisen ja viitekehyksen yhdenmukaistamisen kannalta voi olla eduksi yhdistää menetelmiä sen eri osa-alueiden, geodiversiteetin ja biodiversiteetin, tutkimuksessa. Whittakerin (1960: 320) alun perin määrittelemällä alfa-, beeta- ja gamma-diversiteetillä on pitkät juuret biodiversiteetin tutkimuksessa ja sitä voidaan soveltaa myös geodiversiteetin tutkimukseen. Nykyiset geodiversiteetin mittaamenetelmät ovat suurilta osin alfa -tason geodiversiteetin mittaamista vastaavia. Alfa- ja beeta-geodiversiteetin yhdistäminen antaa kuitenkin tarkempaa tietoa tutkimusalueen geodiversiteetistä, kuin pelkästään alfa-geodiversiteetin analysointi. Tällöin saadaan tietoa eri tutkimusalojen geokohdekoostumuksesta ja määrästä, kuten laajemmalla Rokuan geopark-alueella aiemmin tehty tutkimus osoittaa (Tukiainen ym. 2022a: 2–4, 7–9), ja jota myös Saariselältä saadut tulokset tukevat. Niiden perusteella voidaan todeta, että vaikka Saariselän paikallistason geodiversiteetti ei ollut erityisen runsasta alfa-geodiversiteetin perusteella tarkasteltuna, erosi se tutkimusalueen beeta-geodiversiteetistä. Vertailun kautta onkin mahdollista saada kattavampaa tietoa paikallistason geodiversiteetin erityispiirteistä. Tietoa beeta-geodiversiteetistä voidaan hyödyntää esimerkiksi aluesuunnittelussa (Tukiainen ym. 2022a: 4, 8–9).

Alfa, beeta ja gamma -tasojen mittaaminen kohdistuu paikallistason geodiversiteetin tutkimuksessa vain pienelle maantieteelliselle alueelle, koska sen tarkoituksena on saada tietoa geodiversiteetin pienipiirteisestä vaihtelusta (esim. Kärnä ym. 2018; Hjort ym. 2022). Tässä tutkielmassa tutkimusalue muodostettiin Lyytikäisen (1983) keräämän kasvillisuusaineiston tutkimusalojen sijaintien perusteella, joka rajasi silmämääräisesti ja rinnevarjosteesta tarkasteltuna geodiversiteetiltään vaihtelevampia alueita tutkimusalueen ulkopuolelle. Paikallistason tutkimusaineisto onkin erityisen riippuvainen tutkimusalueen rajauksesta ja tutkimusalan koosta, koska ne vaikuttavat siihen, millaisia geokohteita siinä mahdollisesti esiintyy (Hjort ym. 2022: 1759). Tuloksista kuitenkin havaittiin, että paikallistason geodiversiteetistä saatiin tarkempaa tietoa yhdistämällä alfa ja beeta -tasot, vaikka tutkimusalueen rajausta ei oltukaan tehty geodiversiteetin perusteella. Tämä on myös aivan uusi tapa kvantifioida elotonta luontoa ja sen monimuotoisuutta (ks. Tukiainen ym. 2022a).

Paikallistason geodiversiteetin tutkiminen on tärkeää monista eri syistä, ja yksi keskeisimpiä on sen merkitys biodiversiteetille, jonka vähentyminen vaikuttaa Cardinalen ym. (2012) mukaan monin tavoin ekosysteemien toimintaan. Ilmastonmuutoksen vaikutukset kohdistuvat IPCC:n raportin mukaan voimakkaasti pohjoisiin ympäristöihin ja aiheuttavat

riskejä herkille ekosysteemeille (Constable ym. 2022: 2323, 2327–2328). Useat tutkimukset ovatkin osoittaneet geodiversiteetin eri osa-alueiden ja biodiversiteetin välisen yhteyden (Boothroyd & McHenry 2019: 9; Tukiainen ym. 2022b: 1–3, 11). Yhtenä keskeisenä paikallistason tiedon tarjoamana hyötynä on, että sen kautta voidaan saada syvempää ymmärrystä biodiversiteettiin vaikuttavista tekijöistä (Hjort ym. 2022: 1765; Tukiainen ym. 2022b: 7). Alfa, beeta ja gamma -tasojen kautta taas saadaan tietoa geodiversiteetistä tutkimusalakohtaisesti ja koko tutkimusalueelta, sekä sen vaihtelusta, joka tuo lisäarvoa luonnonsuojelun näkökulmasta (Tukiainen ym. 2022a: 4, 9). Geodiversiteetin merkitystä biodiversiteetin suojelussa on tarkasteltu Conserving Nature’s Stage -näkömyksen kautta. Nekin geokohteet, jotka eivät ole erityisen vakaita, voivat silti luoda biodiversiteetin kannalta suotuisat ympäristön olosuhteet. Suojelutoimia tulisi siten kohdentaa monimuotoisen elottoman luonnon muodostamaan ympäristöön, joka sitä kautta vaikuttaisi biodiversiteetin säilymiseen (Anderson & Ferree 2010: 1, 5, 9; Lawler 2015: 619, 625; Beier ym. 2015: 614–615; Tukiainen ym. 2022b: 4, 12). Tästä näkökulmasta valitut tutkimusalojen sijainnit ovat perusteltuja, koska samoilta aloilta kerättiin uusi, vuoden 2022 kasvillisuusaineisto. Sitä tutkittiin suhteessa geodiversiteetti -muuttujaan ja vuoden 1983 kasvillisuusaineistoon. Tulosten perusteella havaittiin, ettei paikallistason geodiversiteetillä ollut yhteyttä ajalliseen muutokseen kasvillisuudessa Saariselän tutkimusalueella. Tämä voi johtua monista eri syistä, kuten geokohteiltaan homogeenisesta tutkimusalueesta ja hydrologisten geokohteiden vähäisestä määrästä (Lohi 2022: 53–54, 60). Sen sijaan Johanna Kotilainen (2023) havaitsi pro gradu -tutkielmassaan Saariselän paikallistason georunsaudella olevan positiivinen yhteys kasvillisuuden lajirunsauteen.

Globaalimuutos muodostaa merkittävän uhkatekijän luonnon monimuotoisuudelle (Chapin III ym. 2000: 234). Monet siihen kuuluvat tekijät, kuten muutokset maankäytössä, jätteiden käsittelyyn liittyvät haasteet, kaupunkialueiden laajentuminen ja kiihtyvä ilmastonmuutos luovat riskejä geodiversiteetin säilymiselle (Prosser ym. 2010: 134; Gray 2013: 152–154, 163, 183–184; Kaur 2022: 1227). Ihmisen toiminnalla on lukuisia vaikutuksia geodiversiteetin osa-alueisiin ja prosesseihin eri mittakaavoilla (Gordon & Barron 2013: 4–5). Syntyneet vahingot taas ovat usein suhteellisen pysyviä (Sharples 2002: 2; Kaur 2022: 1227), ja osia geodiversiteetistä on mahdollista jopa menettää (Ruban 2010: 327). Alfa, beeta ja gamma -tasojen kvantifiointi voikin tuoda uusia ulottuvuuksia geodiversiteetin tutkimukseen ja suojeluun, koska sitä voidaan soveltaa eri mittakaavoille ja moniin tarkoituksiin. Tietoa alfa-geodiversiteetistä tarvitaan esimerkiksi ympäristön arvioinneissa ja tutkimuskentällä. Beeta-geodiversiteetin avulla taas voidaan paikantaa geodiversiteetiltään arvokkaita alueita ja saada

suojeluun sekä maankäyttöön uusia näkökulmia. Gamma-geodiversiteetti antaa tärkeää tietoa elottoman luonnon kestokyvyn ja siihen kohdistuvien käyttöpaineiden suhteen arviointiin (Tukiainen ym. 2022a: 2, 4, 9).

Vaikka Saariselän tutkimusalueella paikallistasolla näkyvä ihmistoiminta oli sinänsä hyvin vähäistä ja geodiversiteetti oli tulosten perusteella melko alhaista, ulottuvat ilmastonmuutoksen vaikutukset läpi eri mittakaavojen. Saariselän alueella sijaitsee myös esimerkiksi Saariselän, Kiilopään ja Kakslauttasen -matkailualue, jossa rekisteröitiin vuoden 2022 aikana yhteensä 334 000 matkailijoiden yöpymistä (Saariselkä – majoitustilastot...). Se viittaa runsaampaan ihmistoimintaan, mutta nämä vaikutukset eivät ulottuneet tutkimusalueelle. Paikallistasolta kerätystä aineistosta ei siten voida tehdä luotettavasti eri alueelle tai suuremmalle mittakaavalle yleistettäviä johtopäätöksiä geodiversiteetistä. Tätä tukee se, että jo pelkästään tutkimusalueen välittömässä läheisyydessä esiintyi silmämääräisesti runsaampaa ja vaihtelevampaa geodiversiteettiä. Geodiversiteetin arviointi eri mittakaavoilla on kuitenkin tärkeää niin maankäytön, kuin suojelutoimienkin suunnittelussa (Hjort & Luoto 2010: 115), jos alueelle esimerkiksi perustetaan uusia reittejä matkailupaineen kasvaessa.

Huoli luonnon monimuotoisuuden vähenemisestä ja erilaisten resurssien riittävydestä myös tulevaisuudessa on lisännyt huomiota geodiversiteetin suojelua kohtaan (Schrodt ym. 2019: 16156–16157), mutta käytännön toimet ovat toistaiseksi Prosserin (2011: 339–341) mukaan olleet riittämättömiä. Geodiversiteetillä on monia välineellisiä arvoja, mutta myös itseisarvoa (Sharples 2002: 2; Hjort ym. 2015: 631), ja sen vuoksi onkin tärkeää, että geosuojelu ulottuu eri mittakaavoille (Serrano ja Ruiz-Flaño 2007: 142–143; Prosser 2013: 569, 579). Luonnon monimuotoisuuden säilymisen näkökulmasta tarvitaan arvostusta ja tahtoa suojella geodiversiteettiä ja biodiversiteettiä rinnakkain, tasavertaisina luonnon osa-alueina (Gray 2012: 193). Tähän tavoitteeseen pääsemiseksi tarvitaan bio- ja geotieteenalojen välistä yhteistyötä (Tukiainen ym. 2022b: 13). Alfa, beeta ja gamma -tasojen soveltaminen myös geodiversiteetin tutkimukseen on yksi askel kohti tätä (Tukiainen ym. 2022a: 9).

9.6 Virhelähteet

Aineiston havaintojen vertailukelpoisuuden kannalta on tärkeää, etteivät tutkimusalojen kartoittajat vaihdu välillä (Hjort ym. 2022: 1766). Aineistonkeruussa kumpikin kartoittaja toimi havainnoijana jokaisella tutkimusalalla tulosten luotettavuuden lisäämiseksi ja vain kirjausvuoroja vaihdettiin seuraavalla tutkimusalaparilla. Aineistonkeruussa voi kuitenkin tapahtua erilaisia virheitä, vaikka siinä noudatetaan huolellisuutta. Osa geokohteista voi

kartoittajien kokemattomuuden vuoksi jäädä havaitsematta tai tehdyt havainnot voivat olla virheellisiä, vaikka menetelmä sinänsä on Hjortin ym. (2022: 1758) mukaan suunniteltu helpokäyttöiseksi. Tutkimusalueen kairauksissa havaittiin moreenin olevan paikoitellen hyvin hiekkaista, joka aiheutti maa-aineksen tunnistamiseen haasteita hiekan ja moreenin välillä. Myös kivikon tunnistamisessa oli paikoin haasteita, koska osa siitä oli ohuen kunttakerroksen alla. Luotettavuuden lisäämiseksi tutkimusaloilta havaituista geokohteista ja alan yleisilmeestä otettiin valokuvia, jotta epäselviä geokohteita pystyttiin tarkistamaan myöhemmin uudelleen. Aineistonkeruun loppuvaiheessa tehtiin myös paikoitellen tarkistuskairauksia eri tutkimusaloille. Niiden avulla haluttiin rajatapausten osalta varmistaa, löytyykö kivien välistä maa-ainesta vai onko kyseessä selkeästi erilliseksi geokohteeksi luettava kivikkoalue. Harripään vaaran osalta tarkistuskairauksia ei tosin päästy tekemään aikataulun vuoksi.

Hjortin ym. (2022: 1765) mukaan tiheä kasvillisuus voi vaikeuttaa joidenkin geokohteiden havaitsemista. Alajoenpään kaakkoisrinteen korkeusgradientin alaosassa sijainneilla vierekkäisillä tutkimusaloilla kasvillisuus oli tiheää ja geokohteiden kartoittamiseen etenkin korkeat pensasmaiset katajat toivat haasteita. Siitä huolimatta menetelmän soveltaminen metsäiseen ympäristöön onnistui kuitenkin hyvin. Saman rinteen kahdelta tienvarressa sijainneelta vierekkäiseltä tutkimusalalta laskettuun georunsauteen taas liittyi epävarmuustekijänä todennäköinen ihmistoiminnan vaikutus. Muuten ihmistoiminnan vaikutus oli kuitenkin hyvin vähäistä koko tutkimusalueella ja haasteellisemmin kartoitettavia tutkimusaloja oli lopultaan vain muutama, joten niillä ei ollut suurta vaikutusta kartoituksen onnistumiseen.

Käytetyssä aineistonkeruumenetelmässä (Hjort ym. 2022) geokohteiden perehdytykseen sisältyneet ohjeistuskuvat olivat hyvin ympäristöstään erottuvia esimerkkejä geodiversiteetiltään monimuotoisemmalla alueella. Homogeenisemmalla tutkimusalueella geokohteet eivät välttämättä erotu yhtä selvästi ympäristöstään, vaikka niitä siellä esiintyy. Tämä onkin tärkeää ottaa huomioon niin sovellettaessa menetelmää erilaisiin ympäristöihin, kuin osana menetelmän perehdytystä. Esimerkiksi Saariselän tutkimusalueella ohuen kunnan alaiset kivikot muodostivat tutkimusalueella osan paikallistason geodiversiteettiä, mutta menetelmän mukainen kivikon määritelmä ei riittänyt ohjeistukseksi tällaisen kivikon tunnistamiseen geokohteena. Saariselän aineistonkeruussa luotettavuutta lisäsin asiantuntevan ohjeistuksen saaminen tutkimusalueen maastossa ensimmäisten päivien aikana.

Mahdollisia virhelähteitä saattaa sisältyä myös aineistoon liittyviin valintoihin ja sen analysointiin. Käytettäessä 0/1-aineistoa tutkimuksessa, on otettava huomioon 0-tulokseen liittyvän virheen mahdollisuus. Laji, tai tässä tutkielmassa geokohde, voi esiintyä

tutkimusalueella, vaikka sitä ei tutkimusaloilla havaittaisikaan (Gotelli & Colwell 2011: 41). Vastaavassa geodiversiteetin tutkimuksessa on myös mahdollista kartoittaa 0/1-aineiston sijasta geokohteiden tutkimusalakohtainen pinta-ala, jolloin saadaan jatkuva muuttuja. Jaccardin-indeksi taas lasketaan tutkimusalakohtaisten otosten perusteella ja sen ennustuskyky diversiteetin rakenteesta on siksi rajoittunutta. Se saattaa esimerkiksi ali- tai ylikorostaa diversiteetin samankaltaisuutta eri alojen välillä (Chao ym. 2005: 149). Harripään vaaran osalta aineisto jäi verrattain pieneksi, koska tutkimusalinja kartoitettiin vain sen itäiseltä rinteeltä, joka rajaa tulosten luotettavuutta. Toisaalta akkumulaatiokäyrät viittasivat siihen, että tutkimusaloja oli riittävästi erilaisten geokohteiden löytämiseksi kartoitetulta alueelta.

10 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tutkielman tarkoituksena oli vastata kysymykseen, millaisista geokohteista Saariselän paikallistason geodiversiteetti muodostuu ja millaista se on alfa, beeta ja gamma -tasoilla arvioituna. Aihe on ajankohtainen, koska pohjoisborealisilla metsänrajametsien vaaroilla tai metsissä ylipäättään ei ole aikaisemmin tehty paikallistason geodiversiteetin tutkimusta. Lisäksi paikallistason geodiversiteetin mittaamiseen on tutkimuskentällä selvä tarve, koska siihen ei ole ollut juurikaan menetelmiä. Tulokset antavat siten uutta tietoa siitä, millaisista geokohteista paikallistason geodiversiteetti muodostuu tällaisessa ympäristössä. Aineisto kerättiin maastotöinä elokuussa 2022 ja siinä hyödynnettiin Hjortin ym. (2022) kehittämää, geokohteiden kartoitukseen tarkoitettua visuaalisen havainnoinnin menetelmää. Aineistoon koottiin tieto eri geokohteiden esiintymisestä tutkimusaloilla, ja geodiversiteetti kvantifioitiin alfa, beeta ja gamma -tasoilta. Menetelminä alfa-geodiversiteetin kvantifioinnissa olivat keskiarvokuvaajat, niiden tilastollinen testaus ja akkumulaatiokäyrät. Beeta-geodiversiteetin kvantifioinnissa menetelminä olivat NMDS-kuvaaja ja Jaccardin dissimilariteettiarvot. Lisäksi spatiaalinen autokorrelaatio testattiin alfa- ja beeta-geodiversiteetin osalta. Gamma-geodiversiteetti kvantifioitiin laskemalla tutkimusalueelta havaittujen geokohteiden kokonaismäärä.

Saariselän tutkimusalueella paikallistason geodiversiteetti muodostui yleisimmin vain tietyistä geologisista ja geomorfologisista geokohteista, kuten moreenista ja fysikaalisesta rapautumisesta. Saariselän kylmä ja äärevä ilmasto huomioiden, tulokset olivat olosuhteisiin nähden odotettuja. Alfa-geodiversiteetissä oli vaarojen välisiä eroavaisuuksia, mutta yleisimmin se oli vain kaksi. Tulokset kuitenkin osoittivat, että vaikka paikallistason

geodiversiteetti oli tutkimusalueella melko alhaista, saatiin siitä alfa, beeta ja gamma -tasojen kautta tarkempaa tietoa. Tämän perusteella voidaan todeta, että biodiversiteetin tutkimuksessa paljon käytetyn alfa-, beeta- ja gamma-diversiteetin kvantifiointi soveltuu geodiversiteetin tutkimukseen. Se tuo tutkimukseen lisäarvoa ja soveltuu tulosten perusteella myös pienelle tutkimusalueelle, mutta tutkimusta eri kokoisilta mittakaavoilta tarvitaan vielä lisää.

Saariselän tutkimusalueen ulkopuolella geodiversiteetti oli silminnähden vaihtelevaa, joten paikallistason tutkimuksessa tutkimusalueen rajauksen merkitys korostuu. Saariselän tutkimusalue noudatti vuonna 1983 kerätyn kasvillisuusaineiston tutkimusalojen sijaintia, eikä tutkimusalueen rajausta tehty alueen elottoman luonnon ominaispiirteiden perusteella. Paikallistason tuloksia ei tämän perusteella voida täysin luotettavasti yleistää muille alueille Pohjois-Suomessa tai laajemmin Saariselän alueelle. Tulokset antavat kuitenkin hyvän kuvan pohjoisborealisen metsäympäristön geodiversiteetistä. Kokonaiskuvan saamiseksi jatkotutkimusaiheena olisi tärkeä tarkastella, millaista Saariselän geodiversiteetti on maisematasolla, koska alueella on useita suurmuotoja, kuten jääkauden sulamisvesien aikaansaamat ylitysuomat, Ruma- ja Kulmakurut. Saariselän tutkimusalueella ihmistoiminta oli pääasiassa hyvin vähäistä, mutta kahdella tutkimusalalla se oli selvästi vaikuttanut paikallistason geodiversiteettiin sitä muuttaen. Tämän perusteella olisi vertailun vuoksi tarpeellista tarkastella sitä, millaista ihmistoiminnan vaikutus paikallistason geodiversiteettiin on Saariselän sellaisilla alueilla, joilla sitä esiintyy enemmän.

Koska samalta tutkimusalueelta on kerätty myös kasvillisuusaineisto (Lohi 2022), on aineistoja mahdollista hyödyntää geodiversiteetin ja biodiversiteetin vertailuun eri näkökulmista. Tämä vastaisi siihen puutteeseen, että paikallistason biodiversiteetin ja geodiversiteetin välistä suhdetta on toistaiseksi tutkittu vain vähän (Tukiainen ym. 2022b: 10, 12). Tietoa geodiversiteetin ja biodiversiteetin vaihtelusta voidaan hyödyntää esimerkiksi geodiversiteetin paikallistason tutkimuksen kehittämiseen ja luonnonsuojelun suunnitteluun.

Lähteet

- Aalto, J., le Roux, P. C. & Luoto, M. (2014). The meso-scale drivers of temperature extremes in high-latitude Fennoscandia. *Climate Dynamics* 42(1–2) 237–252. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1590-y>
- Alahuhta, J., Ala-Hulkko, T., Tukiainen, H., Purola, L., Akujärvi, A., Lampinen, R. & Hjort, J. (2018). The role of geodiversity in providing ecosystem services at broad scales. *Ecological Indicators* 91 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.068>
- Alahuhta, J., Toivanen, M. & Hjort, J. (2020). Geodiversity-biodiversity relationship needs more empirical evidence. *Nature Ecology & Evolution* 4(1) 2–3. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1051-7>
- Amatulli, G., Domisch, S., Tuanmu, M.-N., Parmentier, B., Ranipeta, A., Malczyk, J. & Jetz, W. (2018). A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling. *Scientific Data* 5(1) 180040 1–15. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.40>
- Anderson, M. G. & Ferree, C. E. (2010). Conserving the stage: climate change and the geophysical underpinnings of species diversity. *PLoS ONE* 5(7) e11554 1–10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011554>
- Anderson, M. J., Crist, T. O., Chase, J. M., Vellend, M., Inouye, B. D., Freestone, A.L.,... & Swenson, N. G. (2011). Navigating the multiple meanings of β diversity: a roadmap for the practicing ecologist. *Ecology Letters* 14(1) 19–28. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01552.x>
- Antonelli, A., Kissling, W., Flantua, S., Bermúdez, M., Mulch, A., Muellner-Riehl, A., . . . & Hoorn, C. (2018). Geological and climatic influences on mountain biodiversity. *Nature Geoscience* 11(10) 718–725. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0236-z>
- Bailey, J. J., Boyd, D. S. & Field, R. (2018). Models of upland species' distributions are improved by accounting for geodiversity. *Landscape Ecology* 33(12) 2071–2087. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0723-z>
- Beier, P., Hunter, M. L. & Anderson, M. (2015). Introduction. Special section: conserving nature's stage. *Conservation Biology* 29(3) 613–617. <https://doi.org/10.1111/cobi.12511>
- Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Magri, O. & Meza, P. (2009). Assessing regional geodiversity: The Iberian Peninsula. *Earth Surface Processes and Landforms* 34(10) 1433–1445. <https://doi.org/10.1002/esp.1840>
- Birkeland, P. W. (1999). *Soils and geomorphology*. 3. p. Oxford University Press, New York.

- Boothroyd, A. & McHenry, M. (2019). Old processes, new movements: the inclusion of geodiversity in biological and ecological discourse. *Diversity* 11(11) 216. <https://doi.org/10.3390/d11110216>
- Borcard, D. & Legendre, P. (2012). Is the mantel correlogram powerful enough to be useful in ecological analysis? A simulation study. *Ecology* 93(6) 1473–1481. <https://doi.org/10.1890/11-1737.1>
- Brilha, J. (2016). Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage* 8(2) 119–134. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3>
- Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., . . . & Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486(7401) 59–67. <https://doi.org/10.1038/nature11148>
- Carrión-Mero, P., Dueñas-Tovar, J., Jaya-Montalvo, M., Berrezueta, E. & Jiménez-Orellana, N. (2022). Geodiversity assessment to regional scale: Ecuador as a case study. *Environmental Science & Policy* 136 167–186. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.06.009>
- Chao, A., Chazdon, R. L., Colwell, R. K. & Shen, T-J. (2005). A new statistical approach for assessing similarity of species composition with incidence and abundance data. *Ecology Letters* 8(2) 148–159. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00707.x>
- Chapin III, F. S., Zavaleta, E. S., Eviner, V. T., Naylor, R. L., Vitousek, P. M., Reynolds, H. L.,...& Díaz, S. (2000). Consequences of changing biodiversity. *Nature* 405(6783) 234–242. <https://doi.org/10.1038/35012241>
- Chen, Y. (2013). New approaches for calculating moran’s index of spatial autocorrelation. *PLoS ONE* 8(7) e68336 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068336>
- Chorley, R. J., Schumm, S. A. & Sugden, D. E. (1984). *Geomorphology*. Methuen & Co. Ltd, London.
- Clarke, K. R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Austral Ecology* 18(1) 117–143. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x>
- Colwell, R. K. & Coddington, J. A. (1994). Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London. Series B: Biological Sciences* 345(1311) 101–118. <https://doi.org/10.1098/rstb.1994.0091>
- Constable, A. J., Harper, S., Dawson, J., Holsman, K., Mustonen, T., Piepenburg, D. & Rost, B. (2022). Cross-chapter paper 6: polar regions. Teoksessa Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A.,...& Rama, B. (toim.). *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 2319–2368. Cambridge University Press, Cambridge. doi:10.1017/9781009325844.023

- Crisp, J. R. A., Ellison, J. C. & Fischer, A. (2021). Current trends and future directions in quantitative geodiversity assessment. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 45(4) 514–540. <https://doi.org/10.1177/0309133320967219>
- Crisp, J. R., Ellison, J. C. & Fischer, A. (2022). Omnidiversity consolidation of conservation assessment: a case study of Tasmanian coastal geoconservation sites. *Geoconservation Research* 5(1) 108–134. <https://doi.org/10.30486/gcr.2022.1947195.1099>
- Crist, T. O., Veech, J. A., Gering, J. C. & Summerville, K. S. (2003). Partitioning species diversity across landscapes and regions: a hierarchical analysis of α , β , and μ diversity. *The American Naturalist* 162(6) 734–743. <https://doi.org/10.1086/378901>
- Dapporto, L., Ramazzotti, M., Fattorini, S., Vila, R., Talavera, R. & Dennis, R. H. L. (2022). *Package 'recluster': ordination methods for the analysis of beta-diversity indices*. R package version 2.9. <https://cran.r-project.org/web/packages/recluster/recluster.pdf>
- Decaulne, A. & Sæmundsson, Þ. (2006). Meteorological conditions during slush-flow release and their geomorphological impact in northwestern Iceland: a case study from the Bildudalur valley. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 88(3) 187–197. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2006.00294.x>
- Derbyshire, E., Gregory, K. J. & Hails, J. R. (1979). *Geomorphological processes*. Wm Dawson & Sons Ltd, Folkestone.
- Doherty, K. D., Kuhlman, M. P., Durham, R. A., Ramsey, P. W. & Mummey, D. L. (2021). Fine-grained topographic diversity data improve site prioritization outcomes for bees. *Ecological Indicators* 132 108315 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108315>
- Erikstad, L., Bakkestuen, V., Dahl, R., Arntsen, M. L., Margreth, A., Angvik, T. L. & Wickström, L. (2022). Multivariate Analysis of Geological Data for Regional Studies of Geodiversity. *Resources* 11(6) 51 1–19. <https://doi.org/10.3390/resources11060051>
- ESRI (2023). ArcGIS Pro – The world's leading GIS software. 8.1.2023 <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- Farahi, A., Ebrahimzadea, E., Nabiana, S., Hanafi-Bojdb, A. A., Akbarzadehb, K. & Bahonar, A. (2016). Temporal and spatial distribution and species diversity of hard ticks (acari: ixodidae) in the eastern region of Caspian Sea. *Acta Tropica* 164 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2016.08.013>
- Ferrer-Valero, N., Hernández-Calvento, L. & Hernández-Cordero, A. I. (2019). Insights of long-term geomorphological evolution of coastal landscapes in hot-spot oceanic islands. *Earth Surface Processes and Landforms* 44(2) 565–580. <https://doi.org/10.1002/esp.4518>

- Fox, N., Graham, L. J., Eigenbrod, F., Bullock, J. M. & Parks, K. E. (2020). Incorporating geodiversity in ecosystem service decisions. *Ecosystems and People* 16(1) 151–159. <https://doi.org/10.1080/26395916.2020.1758214>
- French, H. M. (1988). Active layer processes. Teoksessa Clark, M. J. (toim.) *Advances in periglacial geomorphology*, 151–177. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- Giraudoux, P., Antonietti, J.-P., Beale, C., Lancelot, R., Pleydell, D. & Treglia, M. (2022). *Package 'pgirmess': spatial analysis and data mining for field ecologists*. R package version 2.0.0. <https://cran.r-project.org/web/packages/pgirmess/pgirmess.pdf>
- Gordon, J. E. & Barron, H. F. (2013). The role of geodiversity in delivering ecosystem services and benefits in Scotland. *Scottish Journal of Geology* 49(1) 1–34. <https://doi.org/10.1144/sjg2011-465>
- Gordon, J. E., Crofts, R., Díaz-Martínez, E. & Woo, K. S. (2018). Enhancing the Role of Geoconservation in Protected Area Management and Nature Conservation. *Geoheritage* 10(2) 191–203. <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0240-5>
- Gotelli, N. J. & Colwell, R. K. (2001). Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecology Letters* 4 (4) 379–391. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2001.00230.x>
- Gotelli, N. J. & Colwell, R. K. (2011). Estimating species richness. Teoksessa Magurran, A. E., & McGill, B. J. (toim.). *Biological diversity: Frontiers in measurement and assessment*, 39–54. Oxford University Press, electronic book.
- Goral, F. & Schellenberg, J. (2022). *Package 'goeveg': title functions for community data and ordinations*. R package version 0.5.1. <https://cran.r-project.org/web/packages/goeveg/goeveg.pdf>
- Gray, M. (2005). Geodiversity and geoconservation: what, why, and how? *Parks Stewardship Forum* 22(3) 4–12. <https://www.jstor.org/stable/43597951>
- Gray, M. (2012). Valuing geodiversity in an 'ecosystem services' context. *Scottish Geographical Journal* 128(3–4) 177–194. <https://doi.org/10.1080/14702541.2012.725858>
- Gray, M. (2013). *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. 2. p. Wiley, Blackwell.
- Gray, M. (2018a). Geodiversity: the backbone of geoheritage and geoconservation. Teoksessa Reynard, E. & Brillha, J. (toim.). *Geoheritage: assessment, protection, and management*, 13–25. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00001-0>
- Gray, M. (2018b). The confused position of the geosciences within the “natural capital” and “ecosystem services” approaches. *Ecosystem Services* 34 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.10.010>

- Gray, M. (2019). Geodiversity, geoheritage and geoconservation for society. *International Journal of Geoheritage and Parks* 7(4) 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2019.11.001>
- Gregory, K. J. (2010). *The earth's land surface: landforms and processes in geomorphology*. SAGE Publications Ltd, London.
- Griffith, D. A. & Arbia, G. (2010). Detecting negative spatial autocorrelation in georeferenced random variables. *International Journal of Geographical Information Science: IJGIS* 24(3) 417–437. <https://doi.org/10.1080/13658810902832591>
- Hanski, E. & Huhma, H., (2005). Central Lapland greenstone belt. Teoksessa Lehtinen, M., Nurmi, R. A., Rämö, O. T. (toim.). *Precambrian geology of Finland: key to the evolution of the Fennoscandian shield*, 139–194. Elsevier B. V., Amsterdam.
- Hao, M., Corral-Rivas, J. J., González-Elizondo, M. S., Ganeshiah, K. N., Nava-Miranda, M. G., Zhang, C., . . . & von Gadow, K. (2019). Assessing biological dissimilarities between five forest communities. *Forest Ecosystems* 6(1) 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0188-9>
- Henry, M., Stevens, H. & Carson, W. (1999). Plant density determines species richness along an experimental fertility gradient. *Ecology* 80(2) 455–465. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[0455:PDDSR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[0455:PDDSR]2.0.CO;2)
- Hjort, J. & Luoto, M. (2010). Geodiversity of high-latitude landscapes in northern Finland. *Geomorphology* 115(1) 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.039>
- Hjort, J. & Luoto, M. (2012). Can geodiversity be predicted from space? *Geomorphology* 153–154 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.02.010>
- Hjort, J., Heikkinen, R. K. & Luoto, M. (2012). Inclusion of explicit measures of geodiversity improve biodiversity models in a boreal landscape. *Biodiversity and Conservation* 21(13) 3487–3506. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0376-1>
- Hjort, J., Gordon, J. E., Gray, M. & Hunter JR, M. L. (2015). Why geodiversity matters in valuing nature's stage. *Conservation Biology* 29(3) 630–639. <https://doi.org/10.1111/cobi.12510>
- Hjort, J., Tukiainen, H., Salminen, H., Kemppinen, J., Kiilunen, P., Snåre, H., . . . & Maliniemi, T. (2022). A methodological guide to observe local-scale geodiversity for biodiversity research and management. *The Journal of Applied Ecology* 59(7) 1756–1768. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14183>
- Hui, F. K., Taskinen, S., Pledger, S., Foster, S. D., Warton, D. I. & O'Hara, R. B. (2015). Model-based approaches to unconstrained ordination. *Methods in Ecology and Evolution* 6(4) 399–411. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12236>

- Ibáñez, J. J., De-Alba, S., Bermúdez, F. F. & García-Álvarez, A., (1995). Pedodiversity: concepts and measures. *Catena* 24(3) 215–232. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00028-Q](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00028-Q)
- IBM (2023). IBM SPSS Statistics. 8.1.2023 <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>
- Ilic, M. M., Stojkovic, S., Rundic, L., Calic, J. & Sandic, D. (2016). Application of the geodiversity index for the assessment of geodiversity in urban areas: an example of the Belgrade city area, Serbia. *Geologia Croatica* 69(3) 325–336. <https://doi.org/10.4154/gc.2016.27>
- International Geodiversity Day. 25.1.2022 <https://en.unesco.org/commemorations/geodiversityday>
- IUGS Geological Heritage sites. 27.2.2023 <https://www.unesco.org/en/iggp/igcp-projects/731>
- Johansson, P. (1988). Deglaciation pattern and ice-dammed lakes along the Saariselkä mountain range in northeastern Finland. *Boreas* 17(4) 541–552. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1988.tb00567.x>
- Johansson, P. (1995). *The deglaciation in the eastern part of the Weichselian ice divide in Finnish Lapland*. Bulletin of Geological Survey of Finland 383.
- Johansson, P. (2005a). Mannerjäätikön sulamisvesien toiminta. Teoksessa Johansson, P. & Kujansuu, R. (toim.). *Pohjois-Suomen maaperä: Maaperäkarttojen 1:400 000 selitys*, 116–127. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Johansson, P. (2005b). Mannerjäätikön toiminta ja sen virtaussuunnat. Teoksessa Johansson, P. & Kujansuu, R. (toim.). *Pohjois-Suomen maaperä: Maaperäkarttojen 1:400 000 selitys*, 95–99. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Johansson, P. (2005c). Virtaavan veden toiminta. Teoksessa Johansson, P. & Kujansuu, R. (toim.). *Pohjois-Suomen maaperä: Maaperäkarttojen 1:400 000 selitys*, 170–174. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Jokinen, P., Pirinen, P., Kaukoranta, J-P., Kangas, A., Alenius, P., Eriksson, P.,... & Wilkman, S. (2021). *Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1991–2020*. Raportteja 2021: 8. Ilmatieteen laitos, Helsinki. <https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361485>
- Kaur, G. (2022). Geodiversity, geoheritage and geoconservation: a global perspective. *Journal of the Geological Society of India* 98(9) 1221–1228. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-2156-1>
- Kersalo, J. & Pirinen, P. (2009). *Suomen maakuntien ilmasto*. Ilmatieteen laitoksen raportteja 2009: 8. Ilmatieteen laitos, Helsinki. <http://hdl.handle.net/10138/15734>
- Korsman, K. & Koistinen, T. (1998). Suomen kallioperän yleispiirteet. Teoksessa Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T. (toim.). *3000 vuosimiljoonaa: Suomen kallioperä*, 93–103. Suomen Geologinen Seura, Helsinki.

- Kotilainen, J. (2022). Paikallistason geodiversiteetin ja kasvillisuuden monimuotoisuuden yhteys Saariselän alueella. Pro gradu -tutkielma. Maantieteen tutkimusyksikkö, Oulun yliopisto. <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-202308182945.pdf>
- Kozłowski, S. (2004). Geodiversity. The concept and scope of geodiversity. *Przełoga, D Geologiczny* 52 (8/2) 833–837.
- Kruskal, J. B. (1964). Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. *Psychometrika* 29(1) 1–27. <https://doi.org/10.1007/BF02289565>
- Kujansuu, R. (2005a). Maalajien levinneisyys ja paksuussuhteet. Teoksessa Johansson, P. & Kujansuu, R. (toim.). *Pohjois-Suomen maaperä: Maaperäkartojen 1:400 000 selitys*, 26–28. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Kujansuu, R. (2005b). Kallioperä ja sen vaikutus korkokuvaan. Teoksessa Johansson, P. & Kujansuu, R. (toim.). *Pohjois-Suomen maaperä: Maaperäkartojen 1:400 000 selitys*, 17–20. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Kujansuu, R. (2005c). Kivikot ja louhikot. Teoksessa Johansson, P. & Kujansuu, R. (toim.). *Pohjois-Suomen maaperä: Maaperäkartojen 1:400 000 selitys*, 30–32. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Kujansuu, R. (2005d). Korkeussuhteet. Teoksessa Johansson, P. & Kujansuu, R. (toim.). *Pohjois-Suomen maaperä: Maaperäkartojen 1:400 000 selitys*, 15–17. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Kuuluvainen, T. & Aakala, T. (2011). Natural forest dynamics in boreal Fennoscandia: a review and classification. *Silva Fennica* 45(5) 823–841. <https://doi.org/10.14214/sf.73>
- Kähkönen, Y. & Lehtinen, M. (1998). Geologian peruskäsitteitä. Teoksessa Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T. (toim.). *3000 vuosimiljoonaa: Suomen kallioperä*, 23–90. Suomen Geologinen Seura, Helsinki.
- Kärnä, O.-M., Heino, J., Grönroos, M. & Hjort, J. (2018). The added value of geodiversity indices in explaining variation of stream macroinvertebrate diversity. *Ecological Indicators* 94(1) 420–429. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.034>
- Lande, R. (1996). Statistics and partitioning of species diversity, and similarity among multiple communities. *Oikos* 76(1) 5–13. <https://doi.org/10.2307/3545743>
- Lawler, J. J., Ackerly, D. D., Albano, C. M., Anderson, M. G., Dobrowski, S. Z., Gill, J. L.,... & Weiss, S. B. (2015). The theory behind, and the challenges of, conserving nature's stage in a time of rapid change. *Conservation Biology* 29(3) 618–629. <https://doi.org/10.1111/cobi.12505>
- Legendre, P. (1993). Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? *Ecology* 74(6) 1659–1673. <https://doi.org/10.2307/1939924>

- Legendre, P. & Legendre, L. (2012). *Numerical ecology*. 3. p. Elsevier, Amsterdam.
- Legendre, P. & De Cáceres, M. (2013). Beta diversity as the variance of community data: dissimilarity coefficients and partitioning. *Ecology Letters* 16(8) 951–963. <https://doi.org/10.1111/ele.12141>
- Lohi, J. (2022). Saariselän pohjoisboreaalisen metsänrajametsän kasvillisuusmuutokset 40 vuoden aikana sekä niiden yhteys paikallistason geodiversiteettiin. Pro gradu -tutkielma. Maantieteen tutkimusyksikkö, Oulun yliopisto. <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-202212143747.pdf>
- Lyytikäinen, J. (1983). Eräiden vaarojen metsätyypeistä ja niiden ekologiasta Saariselällä. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, kasvitieteen laitos.
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Blackwell Publishing, Malden.
- Manosso, F. C. & de Nóbrega, M. T. (2016). Calculation of geodiversity from landscape units of the Cadeado range region in Paraná, Brazil. *Geoheritage* 8(3) 189–199. <https://doi.org/10.1007/s12371-015-0152-1>
- Manosso, F., Zwoliński, Z., Najwer, A., Basso, B., Santos, D. & Pagliarini, M. (2021). Spatial pattern of geodiversity assessment in the Marrecas river drainage basin, Paraná, Brazil. *Ecological Indicators* 126 107703 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107703>
- Martinez-Granã, A. M., Goy, J. L. & Cimarra, C. (2015). 2D to 3D geologic mapping transformation using virtual globes and flight simulators and their applications in the analysis of geodiversity in natural areas. *Environmental Earth Sciences* 73(12) 8023–8034. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3959-1>
- Maunu, M. & Virtanen, K. (2005). Suot ja turvekerrostumat. Teoksessa Johansson, P. & Kujansuu, R. (toim.). *Pohjois-Suomen maaperä: Maaperäkarttojen 1:400 000 selitys*, 80–85. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Maurer, B. A. & McGill, B. J. (2011). Measurement of species diversity. Teoksessa Magurran, A. E. & McGill, B. J. (toim.). *Biological diversity: Frontiers in measurement and assessment*, 55–65. Oxford University Press, electronic book.
- Mehdioui, S., El Hadi, H., Tahiri, A., Brilha, J., El Haibi, H. & Tahiri, M. (2020). Inventory and quantitative assessment of geosites in Rabat-Tiflet region (north western Morocco): preliminary study to evaluate the potential of the area to become a geopark. *Geoheritage* 12(2) 1–17 <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00456-5>
- Meriläinen, K. (1976). *The granulite complex and adjacent rocks in Lapland, northern Finland*. Bulletin of Geological Survey of Finland 281, Geologinen tutkimuslaitos, Espoo. https://tupa.gtk.fi/julkaisu/bulletin/bt_281.pdf

- Miller, J. A. (2012). Species distribution models: spatial autocorrelation and non-stationarity. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 36(5) 681–692. <https://doi.org/10.1177/0309133312442522>
- Mokma, D., Yli-Halla, M. & Lindqvist, K. (2004). Podzol formation in sandy soils of Finland. *Geoderma* 120(3) 259–272. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.008>
- Mucivuna, V. C., Garcia, M. d. G. M., Reynard, E. & Rosa, P. A. d. S. (2022). Integrating geoheritage into the management of protected areas: a case study of the Itatiaia national park, Brazil. *International Journal of Geoheritage and Parks* 10(2) 252–272. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.04.004>
- Mähönen, O. (1997). Vesistöt. Teoksessa Tynys, T. (toim.). *Hammastunturin erämaa - luonto ja käyttö*. 2. p. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja A: 52, 27–33. Metsähallitus, Vantaa. <https://julkaisut.metsa.fi/assets/pdf/lp/Asarja/a52.pdf>
- Oksanen, J., L. Simpson, G. L., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R.,... & Weedon, J. (2022). *Package ‘vegan’: community ecology package*. R package version 2.6–4. <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf>
- Pellitero, R., González-Amuchastegui, M. J., Ruiz-Flaño, P. & Serrano, E. (2011). Geodiversity and geomorphosite assessment applied to a natural protected area: the Ebro and Rudron Gorges natural park (Spain). *Geoheritage* 3(3) 163–174. <https://doi.org/10.1007/s12371-010-0022-9>
- Pellitero, R., Manosso, F. C. & Serrano, E. (2015). Mid- and large-scale geodiversity calculation in Fuentes Carrionas (nw Spain) and Serra do Cadeado (Parana, Brazil): methodology and application for land management. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 97(2) 219–235. <https://doi.org/10.1111/geoa.12057>
- Pereira, D. I., Pereira, P., Brilha, J. & Santos, L. (2013). Geodiversity assessment of Parana’ state (Brazil): an innovative approach. *Environmental Management* 52(3) 541–552. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>
- Pereira, D. I., Pereira, P., Brilha, J. & Cunha, P. P. (2015). The Iberian massif landscape and fluvial network in Portugal: a geoheritage inventory based on the scientific value. *Proceedings of the Geologists’ Association* 126(2) 252–265. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2015.01.003>
- Perotti, L., Carraro, G., Giardino, M., De Luca, D. A. & Lasagna, M. (2019). Geodiversity evaluation and water resources in the Sesia Val Grande UNESCO geopark (Italy). *Water* 11(10) 2102, 1–18. <https://doi.org/10.3390/w11102102>
- Pirinen, P., Simola, H., Aalto, J., Kaukoranta, J-P., Karlsson, P. & Ruuhela, R. (2012). *Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010, (climatological statistics of Finland 1981–2010)*. Ilmatieteen laitoksen raportteja 2012:1. Ilmatieteen laitos, Helsinki. <http://hdl.handle.net/10138/35880>

- Potapov, P., Hansen, M. C., Laestadius, L., Turubanova, S., Yaroshenko, A., Thies, C., . . . & Esipova, E. (2017). The last frontiers of wilderness: tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Science Advances* 3(1) e1600821 1–13. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600821>
- Prosser, C. D., Burek, C. V., Evans, D. H., Gordon, J. E., Kirkbride, V. B., Rennie, A. F. & Walmsley, C. A. (2010). Conserving geodiversity sites in a changing climate: management challenges and responses. *Geoheritage* 2(3–4) 123–136. <https://doi.org/10.1007/s12371-010-0016-7>
- Prosser, C. D., Bridgland, D. R., Brown, E. J. & Larwood, J. G. (2011). Geoconservation for science and society: challenges and opportunities. *Proceedings of the Geologists' Association* 122(3) 337–342. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2011.01.007>
- Prosser, C. D. (2013). Our rich and varied geoconservation portfolio: the foundation for the future. *Proceedings of the Geologists' Association* 124(4) 568–580. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2012.06.001>
- Purvis, A. & Hector, A. (2000). Getting the measure of biodiversity. *Nature* 405(6783) 212–219. <https://doi.org/10.1038/35012221>
- Reisæter-Thu, H. D. (2021). The effects of geodiversity on temporal shifts in alpine plant communities. Pro gradu -tutkielma, Department of Biological Sciences, University of Bergen. <https://hdl.handle.net/11250/2759840>
- Riley, S. J., DeGloria, S. D. & Elliot, R. (1999). A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal Of Sciences* 5(1–4) 23–27.
- Ruban, D. A. (2010). Quantification of geodiversity and its loss. *Proceedings of the Geologists' Association* 121(3) 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2010.07.002>
- Räsänen, A., Kuitunen, M., Hjort, J., Vaso, A., Kuitunen, T. & Lensu, A. (2016). The role of landscape, topography, and geodiversity in explaining vascular plant species richness in a fragmented landscape. *Boreal Environment Research* 21(1–2) 53–70. ISSN 1797-2469 (online)
- Saariselkä – majoitustilastot ja matkailutilastot* (2023). 20.5.2023 <https://visitory.io/fi/saariselka/2022-01/2022-12/>
- Salminen, H., Tukiainen, H., Alahuhta, J., Hjort, J., Huusko, K., Grytnes, J., . . . & Maliniemi, T. (2023). Assessing the relation between geodiversity and species richness in mountain heaths and tundra landscapes. *Landscape Ecology* 38 2227–2240 <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01702-1>
- Scarsi, M., Crispini, L., Malatesta, C., Spagnolo, C. & Capponi, G. (2019). Geological map of a treasure chest of geodiversity: the Lavagnina lakes area (Alessandria, Italy). *Geosciences* 9(5) 229 1–14. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050229>

- Schrodt, F., Bailey, J. J., Kissling, W. D., Rijdsdijk, K. F., Seijmonsbergen, A. C., Reed, D. V.,... & Field, R. (2019). To advance sustainable stewardship, we must document not only biodiversity but geodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS* 116(33) 16155–16158. <https://doi.org/10.1073/pnas.1911799116>
- Seppälä, M. (1997). Distribution of permafrost in Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 69(1–2) 87–96. <https://doi.org/10.17741/bgsf/69.1-2.007>
- Seppälä, M. (2005). Periglacial environment. Teoksessa Seppälä, M. (toim.) *The physical geography of Fennoscandia*, 349–364. Oxford University Press, New York.
- Serrano, E. & Ruiz-Flaño, P. (2007). Geodiversity: a theoretical and applied concept. *Geographica Helvetica* 62(3) 140–147. <https://doi.org/10.5194/gh-62-140-2007>
- Shapiro, S. S. & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3–4) 591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Sharma, V. K. (2010). *Introduction to process geomorphology*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Sharples, C. (1995). Geoconservation in forest management -principles and procedures. *Forestry Tasmania* 7 37–50.
- Sharples, C. (2002). *Concepts and principles of geoconservation*. Tasmanian Parks & Wildlife Service. <http://dpiwwe.tas.gov.au/Documents/geoconservation.pdf>
- Silva, J. P., Pereira, D. I., Aguiar, A. M. & Rodrigues, C. (2013). Geodiversity assessment of the Xingu drainage basin. *Journal of Maps* 9(2) 254–262. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.775085>
- Soms, J. (2017). Assessment of geodiversity as tool for environmental management of protected nature areas in south-eastern Latvia. *Environment. Technology. Resources I* 271–277. <https://doi.org/10.17770/etr2017vol1.2581>
- Taipale, K. & Saarnisto, M. (1991). *Tulivuorista jääkausiin: Suomen maankamaraan kehitys*. Werner Söderström Osakeyhtiö, Porvoo.
- The CRAN team (2022). The R Foundation for Statistical Computing. 17.11.2022 <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>
- Thomas, M. F. (2012). Geodiversity and landscape sensitivity: a geomorphological perspective. *Scottish Geographical Journal* 128(3–4) 195–210. <https://doi.org/10.1080/14702541.2012.725863>
- Thorn, C. (1988). Nivation: a geomorphic chimera. Teoksessa Clark, M. J. (toim.) *Advances in periglacial geomorphology*, 3–31. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- Tietoa tilastoista, käsitteet: K. Tilastokeskus. 28.12.2022 <https://tilastokeskus.fi/meta/kas/index.html?K>

- Toivanen, M., Hjort, J., Heino, J., Tukiainen, H., Aroviita, J. & Alahuhta, J. (2019). Is catchment geodiversity a useful surrogate of aquatic plant species richness? *Journal of Biogeography* 46(8) 1711–1722. <https://doi.org/10.1111/jbi.13648>
- Tukiainen, H., Bailey, J. J., Field, R., Kangas, K. & Hjort, J. (2017). Combining geodiversity with climate and topography to account for threatened species richness. *Conservation Biology* 31(2) 364–375. <https://doi.org/10.1111/cobi.12799>
- Tukiainen, H., Kiuttu, M., Kalliola, R., Alahuhta, J. & Hjort, J. (2019). Landforms contribute to plant biodiversity at alpha, beta and gamma levels. *Journal of Biogeography* 46(8) 1699–1710. <https://doi.org/10.1111/jbi.13569>
- Tukiainen, H. & Hjort, J. (2021). Maisematason geodiversiteetti Suomessa (landscape-scale geodiversity in Finland). *Terra* 133(2) 55–76. <https://doi.org/10.30677/terra.99435>
- Tukiainen, H., Maliniemi, T., Alahuhta, J., Hjort, J., Lindholm, M., Salminen, H.,... & Heino, J. (2022a). Quantifying alpha, beta and gamma geodiversity. *Progress In Physical Geography: Earth and Environment* 0(0) 1–12. <https://doi.org/10.1177/03091333221114714>
- Tukiainen, H., Toivanen, M. & Maliniemi, T. (2022b). Geodiversity and biodiversity. *Geological Society, Special Publications* 530(1) 1–36. <https://doi.org/10.1144/SP530-2022-107>
- Tuomisto, H. (2010). Diversity of beta diversities: straightening up a concept gone awry. Part 1. Defining beta diversity as a function of alpha and gamma diversity. *Ecography* 33(1) 2–22. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.05880.x>
- UNESCO Global Geoparks (UGGp). 19.12.2022 <https://en.unesco.org/global-geoparks>
- Varanka, S., Hjort, J. & Luoto, M. (2015). Geomorphological factors predict water quality in boreal rivers. *Surface Processes and Landforms* 40(15) 1989–1999. <https://doi.org/10.1002/esp.3601>
- Väisänen, U. & Peronius, A. (1989). *Laanilan alueen maaperä KL 3831 I*. Raporttiedosto N:O 3705. Geologian tutkimuskeskus, Rovaniemi. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/p22_4_007.pdf
- Whittaker, R. H. & Fairbanks, C. W. (1958). A study of plankton copepod communities in the Columbia basin, southeastern Washington. *Ecology* 39(1) 46–65. <https://doi.org/10.2307/1929966>
- Whittaker, R. H. (1960). Vegetation of the Siskiyou mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs* 30(3) 279–338. <https://doi.org/10.2307/1943563>
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon* 21(2/3) 213–251. <https://doi.org/10.2307/1218190>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K. & RStudio (2022a). *Package ‘dplyr’: a grammar of data manipulation*. R package version 1.0.10. <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/dplyr.pdf>

- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Pedersen, T. L., Takahashi, K., Wilke, C.,... & RStudio (2022b). *Package 'ggplot2': create elegant data visualisations using the grammar of graphics*. R package version 3.4.0. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/ggplot2.pdf>
- Willis, A. D. (2019). Rarefaction, alpha diversity, and statistics. *Frontiers in Microbiology* 10(2407) 1–5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02407>
- Wolniewicz, P. (2023). Quantifying Geodiversity at the Continental Scale: Limitations and Prospects. *Resources* 12(5) 59. <https://doi.org/10.3390/resources12050059>
- World Heritage. 22.1.2022 <https://whc.unesco.org/en/about/>
- Zakharovskiy, V. & Németh, K. (2021). Quantitative-qualitative method for quick assessment of geodiversity. *Land* 10(9) 946. <https://doi.org/10.3390/land10090946>
- Zarnetske, P. L., Read, Q. D., Record, S., Gaddis, K. D., Pau, S., Hobi, M.,... & Finley, A. O. (2019). Towards connecting biodiversity and geodiversity across scales with satellite remote sensing. *Global Ecology and Biogeography* 28(5) 548–556. <https://doi.org/10.1111/geb.12887>
- Zwoliński, Z., Najwer, A. & Giardino, M. (2018). Methods for assessing geodiversity. Teoksessa Reynard, E. & Brilha, J. (toim.) *Geoheritage: assessment, protection, and management*, 27–52. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2>

Aineistolähteet

- Maanmittauslaitos (2011). Rinnevarjoste (korkeusmalli) 2m. <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/?lang=fin&metadata=4de42057-1457-4280-b765-0057a1834905> Ladattu 8.12.2022
- Suomen ympäristökeskus (2008). Suomen rajat. <https://ckan.ymparisto.fi/dataset/suomen-rajat> Ladattu 1.9.2022
- Suomen ympäristökeskus (2012). Ranta10 – Joet <https://ckan.ymparisto.fi/dataset/%7BC40D8B4A-DC66-4822-AF27-7B382D89C8ED%7D> Ladattu 3.4.2023

Liitteet

Liite 1. Aineistonkeruussa käytetty kartoitustomake (Hjort ym. 2022).

ID	PVM			Kuvien ID:
	Kerääjä			
Koordinaatit	5 m	10 m	25 m	
GEOLOGIA				Huomioita:
Paljastunut kallioperä				
Moreeni/diamiktoni				
Kivikko/lohkareikko				
Hiekka/sora				
Siltti/savi/hieno sedimentti				
Turve				
GEOLOGIA YHT.				
GEOMORFOLOGIA				
Kallioperän jyrkäne				
Kallioperän rako				
Glasigeeniset muodostumat				
Kulutus				
Kasaus				
Glasifluviaaliset muodostumat				
Kulutus				
Kasaus				
Fluviaaliset muodostumat				
Kulutus				
Kasaus				
Eoliset muodostumat				
Kulutus				
Kasaus				
Litoraaliset muodostumat				
Kulutus				
Kasaus				
Biogeeniset muodostumat				
Turvekerrostuma, pintoja tasaava				
Turvekerrostuma, kumpu/mätäs				
Massaliikunnat				
Nopea				
Hidas (solifluktiio)				
Kryogeeniset prosessit				
Kryoturbaatio				
Maajää				
Nivaaliset prosessit				
Nivaatiopainanteet				
Lumivyöryt ja sohjuvirrat				
Rapautuminen				
Fysikaalinen				
Kemiallinen				
GEOMORFOLOGIA YHT.				
HYDROLOGIA				
Lähde				
Virtavedet				
Lampi ja allas (seisova vesi)				
Kuiva uoma				
Kuiva lampi/allas				
Kosteikko				
HYDROLOGIA YHT.				