

Geotermisten alueiden kasvillisuus Uuden-Seelannin Pohjoissaarella

PETTERI MUUKKONEN

Maantieteen laitos, Helsingin yliopisto & Metsäntutkimuslaitos



Muukkonen, Petteri (2005). Geotermisten alueiden kasvillisuus Uuden-Seelannin Pohjoissaarella (Vegetation of geothermal areas on the North Island, New Zealand). *Terra* 117: 4, 265–278.

The distinctive environmental conditions associated with geothermal sites allow unusual assemblages of plants to become established. These may include disjuncts normally found in warmer climates, and combinations of plants from surrounding communities capable of surviving under high-stress conditions of soil mineralisation and temperature. Where ground temperatures are sufficiently stable, local endemics may occur. In this study three geothermal sites on the North Island of New Zealand were investigated. Vegetation characters were quantified using floristic and physiognomic approaches. The results show that ground temperature and soil pH are most strongly correlated with canopy height and species richness as well as with the proportion of bare ground. Thus, geothermal vegetation zonation was closely related to soil temperature. The total number of plant species observed on Waimangu, Waiotapu and Craters of the Moon geothermal fields was 33, 8 and 19, respectively. While the basic physiognomic characters of geothermal vegetation were quite similar for each geothermal field, the species composition varied a lot. Only *Kunzea ericoides*, the Kanuka shrub, was growing at every study site.

Petteri Muukkonen, Finnish Forest Research Institute, P.O. Box 18, FI-01301 Vantaa, Finland. E-mail: <petteri.muukkonen@metla.fi>

Geotermisten alueiden kasvillisuus on useiden eri kasvillisuustyyppien mosaikkia (Gruezo & Badayos 1996). Koska näillä alueilla on erittäin omaperäiset ympäristöolot, niillä esiintyy epätavallinen kasvilajisto (Given 1980; Burns & Leathwick 1995). Geotermisillä alueilla muun muassa maaperän pintalämpötila poikkeaa merkittävästi ympäröivistä alueista (Broady ym. 1987; Bargagli ym. 1996). Koska lämpötila on eräs tärkeimmistä ympäristötekijöistä, jotka kontrolloivat organismien toimintaa ja kehitystä, on se merkittävimpiä kasvillisuuteen vaikuttavista tekijöistä geotermisillä alueilla (Brock 1967). Jokaisella kasvilajilla on ympäristötekijöiden suhteen oma sietoalueensa. Sietoalueen rajoilla kasvi ei yleensä pärjää kilpailijoilleen, joten sen esiintyminen on harvinaista.

Tämä tutkimus pyrki selvittämään niitä kasvuympäristön tekijöitä, jotka vaikuttavat kasvilajien esiintymiseen geotermisillä alueilla. Lisäksi tarkoituksena oli selvittää, mitkä kasvilajit ovat indikaattorilajeja, jotka ilmentävät kasvillisuuden alueellista vaihtelua. Tutkimusalueina olivat Uuden-

Seelannin Pohjoissaaren keskiosien vulkaanisella vyöhykkeellä sijaitsevat Waiotapun, Waimangun ja Craters of the Moonin kentät.

Geotermisyys ja kasvillisuus

Geotermisyys on ilmiö, jossa tietyllä alueella esiintyy normaalia enemmän geotermisen aktiivisuuden synnyttämää paikallista lämpöenergian johtumista ja siirtymistä maanpinnalle (Given 1980). Geotermisellä kentällä puolestaan tarkoitetaan suppeaa ja ympäröivistä alueista rajattavissa olevaa aluetta, jonka fyysiset ja kemialliset ominaisuudet ovat geotermisen vaikutuksen muovaamia.

Lüttigin (1985) ja Scheteligin (1985) mukaan geoterminen energia on maapallon omaa luonnollista lämpöenergiaa, josta osa muodostuu radioaktiivisesta hajoamisesta vaipan materiaalissa ja osa on jäännöslämpöä kuoren kuumista magmaatista kivistä. Lämpötilan kohoaa keskimäärin yhdellä asteella jokaista 30 metriä kohden alaspäin maankuoreen mentäessä. Geotermisiä systeemejä

ja ilmiöitä esiintyy eri puolilla maapalloa. Varsinkin mannerlaattojen saumakohtat ovat Maan herkimpiä vulkaanisia vyöhykkeitä, ja niillä esiintyy runsasti geotermisiä systeemejä. Suomea lähimmät tällaiset vulkaaniset vyöhykkeet sijaitsevat Pohjois-Amerikan ja Euraasian laattojen erkanemiskohdassa Pohjois-Atlantilla.

Uusi-Seelanti sijaitsee yhdellä tällaisella mannerlaattojen välisellä vulkaanisella vyöhykkeellä Australian-Intian ja Tyynenmeren laattojen erkanemiskohdassa. Uudessa-Seelannissa huomattavimmat geotermiset systeemit sijaitsevat Pohjoissaarella vyöhykkeellä, jota kutsutaan nimellä Central Volcanic Region (Grant 1979). Tunnetuin tällä vyöhykkeellä sijaitsevista seuduista on Taupon alue, jossa sijaitsee muutamia kymmeniä tämän tutkimuksen kaltaisia geotermisiä kenttiä. Useimmilla Uuden-Seelannin geotermisillä alueilla suurin osa luonnollisesta lämmönmenetyksestä ja lämpöenergian poistumisesta tapahtuu johtumalla maaperästä tai vesihöyryn välityksellä (Dawson & Fisher 1964: 144).

Geotermistä kasvillisuutta käsittelevä tutkimus on maailmanlaajuisesti katsottuna harvalukuista ja merkittävimmät tutkimukset ovat reilun parin vuosikymmenen takaa (esim. Given 1980). Tutkimusaihe on jälleen noussut ajankohtaiseksi, kun on havaittu, että vaihtoehtoisena energiamuotona käytetyn geotermisen lämpöenergian hyödyntäminen muokkaa ympäristön herkkää kasvillisuutta (Merrett & Burns 1998b). Myös geotermisten alueiden suojelutoimenpiteet ovat tulleet ajankohitsemiksi, sillä alueiden kasvillisuus on herkkää ja voi siksi kärsiä matkailijoiden aiheuttamasta talomisesta (Stark ym. 1976; Burns ym. 1995).

Useiden aiempien geotermistä kasvillisuutta käsittelevien tutkimusten perusteella maaperän lämpötila on merkittävin kasvillisuuden esiintymiseen vaikuttava kasvuympäristön ominaisuus (Given 1980; Kappen & Smith 1980; Glime & Iwatsuki 1990, 1994, 1997; Burns & Leathwick 1995; Burns 1997; Stout ym. 1997; Merrett & Burns 1998c). Mike Mongillon (1989:18) mukaan maaperän lämpötilaan vaikuttavat geotermisen aktiivisuuden lisäksi monet muutkin ulkoiset tekijät, kuten ilman vuorokautiset ja vuodenaikaiset lämpötilan vaihtelut, alueen topografia, sademäärä, ilmanpaine, maaperän kosteus sekä kasvillisuus.

Uuden-Seelannin geotermisillä alueilla maanpinnan lämpötilan vuorokautinen vaihtelu on 10–20 celsiusastetta (Dawson & Fisher 1964: 145). Aiempien tutkimusten perusteella yli 30 senttimetrin syvyydessä vuorokautinen vaihtelu on alle 1 °C. Kun geotermisen maaperän lämpötila vaihtelee jaksottaisesti ja kun johtuminen on ainoa lämpöenergian siirtymisen muoto, voidaan minkä tahan-

sa syvyyden (d) lämpötila (T) tietyllä hetkellä (t) määrittää pintalämpötilan (T_s) perusteella

$$T(d,t) = T_0 + \beta \cdot d + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ V_m \cdot \exp \left[-d \cdot \left(\frac{m \cdot \omega}{2 \cdot k} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \cos \left[m \cdot \omega \cdot t - \varepsilon_m - d \cdot \left(\frac{m \cdot \omega}{2 \cdot k} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (1)$$

jossa V_m on lämpötilan vuorokautisen vaihtelun suuruus, ε_m on vaihe siirto (eli aallon vaiheen siirtymä), ω on taajuus (tässä tapauksessa 1 vrk) ja k on maaperän lämmönjohtokyky (Allis 1979a: 5–6). Vakio β saadaan Robertsonin ja Dawsonin (1964: 135) ja Allisin (1979a: 4) kaavasta

$$\beta = \frac{T_d - T_s}{d^n}, \quad (2)$$

jossa T_d on lämpötila syvyydellä d , T_s on maanpinnan lämpötila ja n on vakio, joka saadaan Robertsonin ja Dawsonin (1964: 137) kaavasta

$$n = \log \left(\frac{d_s}{d_t} \right) \left[\frac{(T_{d_s} - T_s)}{(T_{d_t} - T_s)} \right] \quad (3)$$

Allis (1979a) korostaa, että yhtälöt pohjautuvat Dawsonin ja Fisherin (1964) oletukseen siitä, että lämmönjohtavuus on sama kaikkialla yhden geotermisen kentän alueella. Geotermisten alueiden maanpinnan lämpötila ei vaihtelee yläpuolisen ilman lämpötilan mukaan läheskään yhtä paljon kuin ei-geotermisillä alueilla (Allis 1979a).

Geotermisillä alueilla ilmenee myös pidempää kuin vuodenaikaista lämpötilan vaihtelua, mikä tapahtuu joko luonnostaan tai ihmistoiminnan myötä (Allis 1981). Pääasiallisoin ihmistoiminta, joka vaikuttaa geotermisten alueiden lämpöenergian ulossäteilyn määrään ja sitä kautta maaperän lämpötilaan, on geotermisen energiantuotanto (Allis 1979b). Se laskee kuuman pohjaveden pintaa ja alentaa näin läheisten geotermisten alueiden maaperän lämpötilaa (Merrett & Burns 1998c: 5).

Kasvin kasvun kannalta otollisimmat optimisekä sen sietämät minimi- ja maksimilämpötilat määrittävät ne lämpötilaolot, joiden puitteissa se sopeutuu ympäristönsä muuttuviin oloihin (Larcher 1975). Terrestrisillä putkilokasveilla on laajat lämpötila-alueet eli termotoleranssi. Vaihteluväli, jossa putkilokasvit kykenevät kasvamaan, voi olla suurimmillaan -5 °C:sta $+55$ °C:een. Jäkä- ja sammallajit kestävät putkilokasveja vieläkin suurempia maksimilämpötiloja, jotka saattavat hetkittäin olla jopa sata celsiusastetta. Stout ynnä

muut (1997: 4) ovat huomanneet, että geotermisillä alueilla kasvit sietävät jopa +57 °C jatkuvia juurivyöhykkeen lämpötiloja. Engelbert Weis ja Joseph Berry (1988) sekä Shabala (1996) ovat todenneet, että termotoleranssin raja vaihtelee pääsääntöisesti genomin mukaan (genotyypin adaptaatio), mutta se voi olla myös kasviyksilön mukautumisen tulosta (fenotyypin adaptaatio). Termotoleranssin ylittävät lämpötilat aiheuttavat kasveille muutoksia fysiologisissa prosesseissa tai jopa kuolettavia vaurioita (Larcher 1975).

Geotermisten alueiden maaperä on usein happamampaa kuin niitä ympäröivien ei-geotermisten alueiden (Lange 1973). Maaperän happamuus vaikuttaa kasvillisuuteen merkittävimmin ”vapaaan” alumiinin pitoisuuden kautta (Black 1968). Maaperän alhainen pH vaikuttaa alumiini-ionien tasapainoon, koska pH:n laskiessa alle 4,5:n, joka on alumiinin puskurivyöhyke, vapautuu suuria määriä alumiini-ioneita (Andersson 1997). Alumiinia vapautuu, koska pääasiallinen reaktio alumiinin puskurivyöhykkeellä on $\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$ (Black 1968; De Leo ym. 1993). Suuri alumiinipitoisuus laskee kasvien tuotantokykyä tai jopa tappaa kasveja (Etherington 1982).

Geotermisten kasvillisuuden lajisto voidaan maailmanlaajuisesti jakaa kolmeen ryhmään sen mukaan, kuinka kyseiset kasvilajit esiintyvät geotermisten vaikutuksen ulkopuolisilla alueilla (Merrett & Burns 1998b, 1998c). Ensimmäiseksi geotermisillä alueilla voidaan tavata täysin kotoperäisiä lajeja. Toiseksi näillä alueilla kasvaa niitä ympäröivien ei-geotermisten alueiden kasvilajeja, jotka selviävät myös näissä äärimmäisissä kasvuoloissa. David Given (1980) ja Bruce Burns (1997) ovat todenneet, että juuri nämä lajit muodostavat suurimman osan geotermisten alueiden kasvillisuudesta. Kolmanneksi geotermisillä alueilla voi kasvaa myös lajeja, jotka muuten kasvavat ilmastollisesti huomattavasti lämpimämmillä alueilla, mutta pystyvät kasvamaan geotermisillä alueilla, koska niillä maanpinnan keskilämpötila on muutaman asteen korkeampi kuin yläpuolisen ilman keskilämpötila (Bargagli ym. 1996). Eräs esimerkki ilmiöstä ovat kuumat lähteet, jotka eivät kylmimmilläkään seuduilla koskaan jäädy ja joiden ympärille kehittyvät roudaton kasvuympäristö (Halliday ym. 1974; Broady ym. 1987). Uuden-Seelannin geotermisillä alueilla kasvavista lämpimämpien seutujen putkilokasveista suurin osa on sanikkaita (Merrett & Burns 1998b).

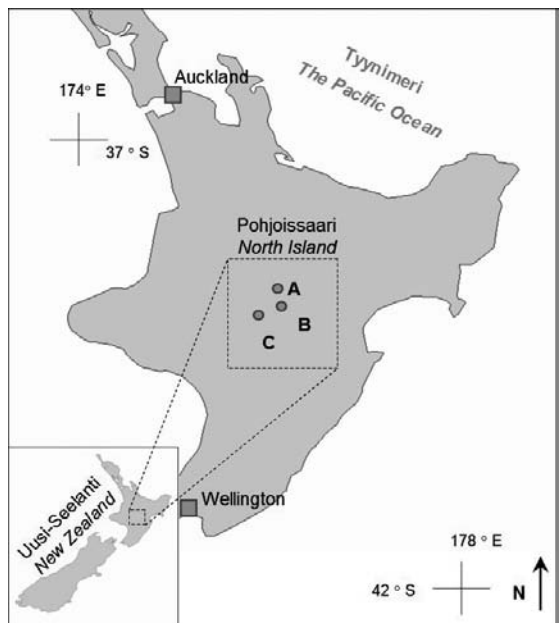
Geotermisten alueiden äärimmäisissä kasvuolosuhteissa stressaantuneet kasviyhteisöt ovat rakenteeltaan hyvin yksinkertaisia, koostuen vain muutamista kasvilajeista (Glime & Iwatsuki 1994, 1997). Lisäksi useilla geotermisillä kentillä kasviyhteisöt eroavat huomattavasti ympäröivien aluei-

den kliimaksivaiheen kasviyhteisöistä (Yoshioka ym. 1965), mutta toisaalta useimmilla geotermisillä kentillä eri puolilla maailmaa kasviyhteisöt muistuttavat fyysiomisesti suuresti toisiaan (Glime & Iwatsuki 1994).

Aineisto ja menetelmät

Tutkimusalueet

Tutkimusalueeni sijaitsivat Uuden-Seelannin Pohjoissaarella Taupon vulkaanisella vyöhykkeellä (kuva 1). Taupon alue on yksi eniten tutkituista geotermisten kasvillisuuden alueista, koska siellä geotermisyys muodostaa laajoja kenttiä, joissa kasvillisuuden vyöhykkeisyys on selvästi havaittavaa. Aiemmissa geotermistä kasvillisuutta käsittelevissä tutkimuksissa on perinteisesti keskitytty kuvaamaan vain yhden geotermisten kentän kasvillisuutta. Omassa tutkimuksessani tarkastelukohteena oli kolme geotermistä kenttää: Waiotapu, Waimangu ja Craters of the Moon (aiemmin tunnettu nimellä Karapiti).



Kuva 1. Tutkimusalueiden sijainti Uuden-Seelannin Pohjoissaarella (A Waimangu; B Waiotapu; C Craters of the Moon).

Figure 1. The location of the study sites on the North Island of New Zealand (A Waimangu; B Waiotapu; C Craters of the Moon).

Näistä Waimangun alue sijaitsee laaksossa, joka muodostui Mount Taraweran purkauksessa vuonna 1886. Waimangu on siinä suhteessa harvinaislaatui-

nen geoterminen kenttä, että kaikkien siellä esiintyvien geotermisten kohteiden ja maanpinnan muodostumien tarkka syntyhetki tunnetaan. Laakson matalin kohta sijaitsee 340 metrin korkeudella keskimerenpinnasta ja laaksoa ympäröivien harjanteiden keskimääräinen korkeus on 460 metriä. Vucetichin ja Wellsin (1978) mukaan Waimangun maaperän ylimät kerrokset ovat peräisin vuoden 1917 purkauksesta ja koostuvat ryoliittisesta hiekasta ja tuhkasta.

Waiotapu tarkoittaa maorin kielellä ”pyhää vettä”. Alue on keskimäärin 370 metrin korkeudella. Waiotapun geoterminen kenttä on Taupon vulkaanisen vyöhykkeen laajin yhtenäinen alue, jolla esiintyy hydrotermaalisia ilmiöitä. Vucetichin ja Wellsin (1978) mukaan Waiotapun maaperä koostuu hydrotermisen toiminnan muokkaamasta tuhkasta, joka on peräisin vuoden 1010 tienoilla tapahtuneesta purkauksesta.

Craters of the Moon (kuva 2) on osa Wairakein geotermistä aluetta (Allis 1979b), joka on Waiotapun ohella yksi Taupon vulkaanisen vyöhykkeen laajimmista aktiivisista hydrotermaalisista alueista (Allis 1981). Craters of the Moon sijaitsee keskimäärin 460 metrin korkeudella. Alueen kallioperä on niin sanottua Haparangin ryoliittista hohkakiiveä, josta on erotettavissa tuhka- ja lapillikerroksia sekä pyroklastista breksiaa (Geological map... 1961). Breksia on syntynyt vajaa 2000 vuotta sitten (noin vuonna 110) tapahtuneessa purkauksessa (Vucetich & Wells 1978).

Aineiston keruu

Otanta ja kasvillisuuden määrittäminen

Kullekin geotermiselle kentälle sijoitettiin tutkimuslinjoja, joilla näyteruudut sijaitsivat. Mittauk-

set suoritettiin lokakuun 2000 ja tammikuun 2001 välisenä aikana eli Uuden-Seelannin kasvukauden aikana. Tutkimuslinjat sijaitsivat kohtisuorassa il-mavalokuvista etukäteen kartoitettuihin geotermisen vaikutuksen mukaisiin kasvillisuusvyöhykkeisiin nähden (äärioloista lievempää vaikutusta kohden). Tutkimuslinjat ulotettiin geotermisten kenttien selvien reunojen ulkopuolelle, sillä geotermistä kasvillisuutta ja kasvuympäristöä tutkiessa on tarkasteltava myös silminhavaittavan geotermisen vaikutuksen ulkopuolella olevia viileämpiä alueita (Burns 1997: 290). Näin siksi, että maaperän kemialliset ominaisuudet ovat yleensä tavallisuudesta poikkeavat myös kauempana sijaitsevilla, pääasiallisesti metsäisillä reuna-alueilla. Muun muassa alumiini-, rauta- ja sulfaattipitoisuudet ovat niillä samankaltaiset kuin kuumemmilla alueilla.

Yhden neliömetrin kokoiset näyteruudut pyrittiin sijoittamaan linjoille kymmenen metrin välein. Näyteruutujen välisiin etäisyyksiin vaikutti kuitenkin kenttätyöskentelyn turvallisuus, minkä takia joissain paikoin näyteruutujen väliset etäisyydet saattoivat olla viisi tai joskus jopa 15 metriä. Tutkimusalueiden maanpinnan kuori saattoi olla vain muutaman sentin paksuinen ja sen alla oli kiehuvan kuumaa mutaa. Näyteruutuja jouduttiin kuitenkin siirtämään vain muutamissa kohdin. Waimangun tutkimusalueella oli 42, Waiotapun tutkimusalueella 31 ja Craters of the Moonin tutkimusalueella 26 näyteruutua. Jos näyteruutu sijaitsi paikalla, jossa esiintyi puita tai pensaita, pintakasvillisuus ja ympäristömuuttujat määritettiin 1 neliömetrin näyteruudulta, mutta pensasto (rinnankorkeudelta halkaisijaltaan alle 3 cm) määritettiin 16 neliömetrin alalta ja puusto (rinnankorkeudelta halkaisijaltaan 3 cm tai enemmän) 100 neliömetrin alalta (esim. Mueller-Dompois & Ellen-



Kuva 2. Craters of the Moonin geoterminen kenttä (Kuva: Petteri Muukkonen 10/2000).

Figure 2. The Craters of the Moon geothermal field (Photo: Petteri Muukkonen 10/2000).

berg 1974). Erikokoiselle kasvillisuudelle jouduttiin käyttämään erikokoisia näyteruutuja, koska korkeamman kasvillisuuden muuttujien arvioiminen edellyttää laajempaa näyteruutua. Tämä onnistui mainiosti, koska viileämmät ja näin ollen korkeammasta kasvillisuudesta koostuvat vyöhykkeet olivat laajempia kuin kaikkein kuumimmilla paikoilla olevat vyöhykkeet. Toisin sanoen siellä missä lämpötilat olivat korkeimpia, maaperän lämpötilan alueelliset vaihtelut olivat suurempia; aivan kuumempien paikkojen vieressä saattoi olla kymmeniä asteita viileämpää. Tämä johtuu siitä, että voimakkaan geotermisen ulossäteilyn kohteet ovat pistemäisiä.

Näyteruuduilta määritettiin sekä kasvilajien että osakasvustojen peittävyudet. Osakasvustot ovat paikallisesti rajattavissa olevia ja tiettyjen fyysiomisten piirteiden mukaisesti erotettavia kasvi- peitteen yhtenäisiä osia (Kujala 1964). Tässä tutkimuksessa käytettyjä osakasvustoja olivat puusto, pensasto, varvusto, ruohosto, sammalisto ja jäkälistö. Lisäksi määritettiin paljaan maan osuus. Kasvillisuudesta määritettiin myös seuraavat fyysiomiset muuttujat: putkilokasvillisuuden maksimikorkeus, sammalpeitteen maksimipaksuus ja jäkäläpeitteen maksimipaksuus. Kasvilajit määritettiin Sainsburyn (1955), Allanan (1961), Martinin ja Childin (1972), Heathin ja Chinnockin (1974), Mooren ja Edgariin (1976), Poolen ja Adamsin (1980), Gallowayn (1985), Beeverin ynnä muiden (1992) sekä Malcolmin ja Gallowayn (1997) mukaan. Kasvilajien määrittämisessä avusti Uuden-Seelannin metsätutkimuslaitoksen (New Zealand Forest Research Institute) Rotoruan toimipaikan henkilöstö.

Kasvuympäristön muuttujien mittaus

Maaperän lämpötila mitattiin kultakin näyteruudulta kiinteämmän humuskerroksen tai vakaan paljaan maan yläpinnasta lukien viiden senttimetrin välein viidentoista senttimetrin syvyyteen asti (ks. myös Given 1980; Glime & Iwatsuki 1994; Burns & Leathwick 1995). Viidentoista senttimetrin syvyyden lämpötilan on aiemmissa tutkimuksissa havaittu kuvaavan paremmin kuumen maaperän vaikutusta kasvistoon kuin maanpinnan lämpötilan. Tämä johtuu siitä, että juurivyöhykkeen lämpötila on kriittisin tekijä putkilokasvien esiintymiselle, koska hienojuuret ovat erityisen herkkiä kuumalle ja näin ollen ravinteidenvaihto vaikeutuu. Lämpötilat mitattiin Dostmann Electronicin digitaalisella P500-tarkkuuslämpömittarilla. Osalla näytealoista oli StowAway XTI- ja HOB0 H8- digitaalisia tiedonkeräjiä mittaamassa maanpinnan lämpötilaa 15 minuutin välein. Aiemmissa geotermistä kasvillisuutta käsittelevissä tutkimuksissa ainoastaan

Stout ynnä muut (1997) ovat käyttäneet digitaalisia tiedonkeräjiä. Näyteruutukohtaiset lämpötilamittaukset yhdistettiin digitaalisten tiedonkerääjien mittauksiin kaavojen 1–3 mukaisesti. Näin kullekin näyteruudulle saatiin johdettua korkein laskennallinen lämpötila, mikä on tärkeää, koska äärimmäiset lämpötilat ovat eliöiden esiintymisen ja selviämisen kannalta ratkaisevia, eivät niinkään keskilämpötilat. Vuodenajasta riippuvainen vuorokautinen lämpötilanvaihtelu on Uudessa-Seelannissa suurinta kesällä (Dawson & Fisher 1964: 146), kun taas tämän tutkimuksen kenttätyöt tehtiin keväällä ja alkukesästä.

Jokaiselta näyteruudulta otettiin kivennäismaasta karikkekerroksen tai mahdollisen sammal- tai jäkäläpeitteen alta kaksi kokoomanäytettä. Toisesta määritettiin pH, sähkönjohtavuus sekä vesipitoisuus. Aiempien tutkimusten mukaan nämä ovat maaperän lämpötilan jälkeen merkittävimmät kasvillisuuden esiintymiseen vaikuttavat tekijät geotermisessä ympäristössä (Glime & Iwatsuki 1994; Burns & Leathwick 1995). Ensimmäisten kokoomanäytteiden analyysit suoritettiin Wairakei Research Centerin laboratoriossa. Toisista näytteistä määritettiin kasvien saatavissa olevista ioneista Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Zn^{2+} ja P^{3-} ionien pitoisuudet ($\mu\text{g/g}$). Alumiini-ionien (Al^{3+}) määrittäminen atomiabsorbtiometriellä ei onnistunut teknisten ongelmien takia. Näytteet osittaisuutettiin 1 molaarisella ammoniumasetatiliuoksella (NH_4OAc) suhteessa 1:2,5 yhden tunnin ajan (Smith & Atkinson 1975). Uutetuista näytteistä määritettiin P^{3-} ionien pitoisuudet spektrofotometriellä ja muiden ionien pitoisuudet atomiabsorbtiometriellä. Orgaanisen aineksen osuus maanäytteen massasta määritettiin painoprosenttina kuivapainosta poistamalla orgaaninen aines 30-prosenttisella vetyperoksidilla (Head 1984). Lisäksi näytteistä määritettiin hienoaineksen raekoon (< 2 mm) mediaani Coulter LS 200 -hiukkasmittarilla. Yli 2 millimetrin partikkelien osuus saatiin punnitsemalla hienoaineksen seulonnan jäännös. Nämä toisien kokoomanäytteiden analyysit suoritettiin Turun yliopiston maantieteen laitoksen luonnonmaantieteen laboratoriossa.

Tutkimuksen suorittamiseen vaikutti merkittävästi tutkimusalueiden vaarallisuus ja liikkumisrajoitukset. Kuumimmilla paikoilla maan kantava kuorikerros oli vain muutamia senttimetrejä ohut, mikä asetti huomattavia rajoituksia tutkimusalueilla liikkumiselle.

Tilastollinen tarkastelu

Ensimmäiseksi kunkin tutkimusalueen kasvilajien peittävyysaineisto luokiteltiin klusteri- eli ryhmit-

telyanalyysillä (Join Tree Clustering), jolla pyrittiin selvittämään aineiston eri kasvillisuustyypit (Breiman ym. 1984). Seuraavaksi peittävyysaineistosta laskettiin kullekin kasvilajille tutkimusalueittaiset indikaattoriarvot IndVal-analyysillä (Dufrene & Legendre 1997). Tällä pyrittiin löytämään sellaiset indikaattorilajit, jotka ilmentävät merkitsevästi kasvillisuuden luokittelua. Indikaattoriarvot laskettiin erikseen jokaiselle klusterianalyysin jakotasolle (jakotasolla tarkoitetaan vaiheittain etenevän ryhmittelyn ”haarautumiskohtaa”). Seuraavaksi lajistollinen peittävyysaineisto yhdessä kasvuympäristön muuttujien kanssa analysoitiin CCA-menetelmällä (Canonical Correspondence Analysis, kanoninen korrespondenssianalyysi), jolla pyrittiin selvittämään samanaikaisesti sekä kasvillisuuden mahdollista jatkuvaa vaihtelua, yksittäisten lajien ja kasvuympäristön muuttujien välisiä suhteita että saamaan vahvistusta klusterianalyysillä tuotetuille luokituksille (ter Braak 1986, 1987).

CCA-menetelmän kuvia tulkitaan siten, että lyhyellä vektorilla kuvatut kasvuympäristön muuttajat vaikuttavat heikommin kasvilajistoon kuin pidemmällä vektoreilla kuvatut muuttajat. Samaan suuntaan osoittavat vektorit vaikuttavat lajistoon samansuuntaisesti. Kasvilajin sijoittuminen lähelle kasvuympäristön muuttujan vektoria kuvastaa lajin esiintymisen riippuvuutta kyseisen muuttujan gradientilla. Mitä kauempana kasvilaji on kyseisen vektorin linjassa origosta, sitä voimakkaampi lajin ja kasvuympäristön ominaisuuden suhde on. Mitä lähempänä origoa kasvilaji sijaitsee, sitä heikompi suhde puolestaan on. Kasvilajin sijaitseminen vektorin nuolen kärjen suunnassa merkitsee positiivista suhdetta, kun taas sijaitseminen vektoriin nähden origon vastakkaisella puolella merkitsee negatiivista suhdetta. Mikäli kasvilaji ei sijaitse jonkin kasvuympäristön muuttujan vektorin linjalla, kyseinen muuttuja ei vaikuta merkitsevästi lajin esiintymiseen. Kaukana origosta sijaitsevat lajit vaativat kasvaakseen erityisempiä oloja kuin lähellä origoa sijaitsevat generalistit.

Tulokset ja keskustelu

Kasvillisuuden yleispiirteet

Näytealojen kasvilajien määrä vaihteli Waimangussa nollassa yhdeksään (yhteensä 33 lajia), Waiotapussa yhdestä neljään (yhteensä 8 lajia) ja Craters of the Moonissa kahdesta seitsemään (yhteensä 19 lajia) (taulukko 1). Kasvilajien vähäinen määrä tukee Janice Glimen ja Zennoske Iwatsukin (1994, 1997) huomioita siitä, että geotermisten alueiden kasviyhteisöt voivat olla hyvinkin yksinkertaisia.

Waiotapussa oli muihin tutkimusalueisiin nähden poikkeuksellinen kasvillisuus, sillä siellä ei esiintynyt lainkaan sammallajeja tai ruohomaisia kasveja. Lisäksi ainoastaan Waimangun tutkimusalueella esiintyi puita – muilla tutkimusalueilla korkein kasvillisuus oli pensaita. Yhtä geotermistä aluetta tarkastelemalla ei siis välttämättä voida tehdä pitkälle meneviä muitakin kenttiä koskevia lajistollisia yleistyksiä.

Pearsonin korrelaatiokertoimien perusteella kaikilla tutkimusalueilla paljaan maan osuus korreloi tilastollisesti merkitsevästi ($p < 0,05$) sekä pH:n että lämpötilan kanssa. Mitä happamampaa ja kuumempaa maaperä on, sitä vaikeampaa kasvien on selvitä.

Kunkin osakasvuston osuus korreloi voimakkaasti osakasvuston korkeuden kanssa eli osakasvuston yleistyessä myös versot olivat korkeampia. Kasvillisuus muuttui matalammaksi lämpötilan noustessa aivan kuten Bruce Burns ja John Leathwick (1995) sekä Burns (1997) ovat omissa tutkimuksissaan aiemmin todenneet. Tämän tutkimuksen tulokset ovat samassa linjassa Burns (1997) havaintojen kanssa siitä, että Uuden-Seelannin olosuhteissa geotermisten alueiden dominoiva kasvillisuus vaihtuu viileämpien reuna-alueiden ikivihreästä ja leveälehtisestä metsästä kuumempien alueiden pensasiin, joilla on pieniä neulasmaisia lehtiä ja matalia juuria. Samoin havainnot siitä, että geotermisten alueiden kasvillisuus on rakenteeltaan matalampaa kuin ympäröivien ei-geotermisten alueiden, tukevat sekä Yoshiokan ynnä muiden (1965) että Burns (1997) tahoillaan havaitsemia tuloksia.

Kasvuympäristön ja kasvillisuuden suhde

CCA-menetelmä selitti 33,0 prosenttia Waimangun kasvilajien peittävyysaineistosta ja 74,2 prosenttia kasvilajien ja kasvuympäristön muuttujien suhteesta. Vastaavat tunnusluvut Waiotapulle olivat 40,6 ja 93,2 sekä Craters of the Moonille 47,7 ja 87,5 prosenttia. Kasvilajit, jotka esiintyivät useissa kasvillisuustyypeissä geotermisellä alueella näkyvät tulosdiagrammissa origon lähellä (kuva 3). Waimangun alueella putkilokasvilajit *Wikipedia extenuata*, *Dicksonia fibrosa*, *Brachyglottis repanda*, *Melicytus ramiflorus*, *Blechnum vulcanum* ja *Phymatosorus diversifolius* esiintyivät geotermisen kentän laitamilla ja korreloivat positiivisesti pH:n kanssa (kuva 3a). Sähkönjohtavuus ja maaperän lämpötila vaikuttavat merkitsevästi lajistolliseen koostumukseen, mutta mikään yksittäinen laji ei suostu kuumaa kasvuympäristöä. Lämpötilan kasvaessa pH alenee.

Myös Waiotapun alueella sähkönjohtavuus ja pH vaikuttavat merkittävästi kasvillisuuteen (kuva

Taulukko 1. Fysionomisen aineiston ja kasvuympäristön muuttujien tilastolliset tunnusluvut.
 Table 1. The descriptive statistics of the physiognomic data and the data of environmental variables.

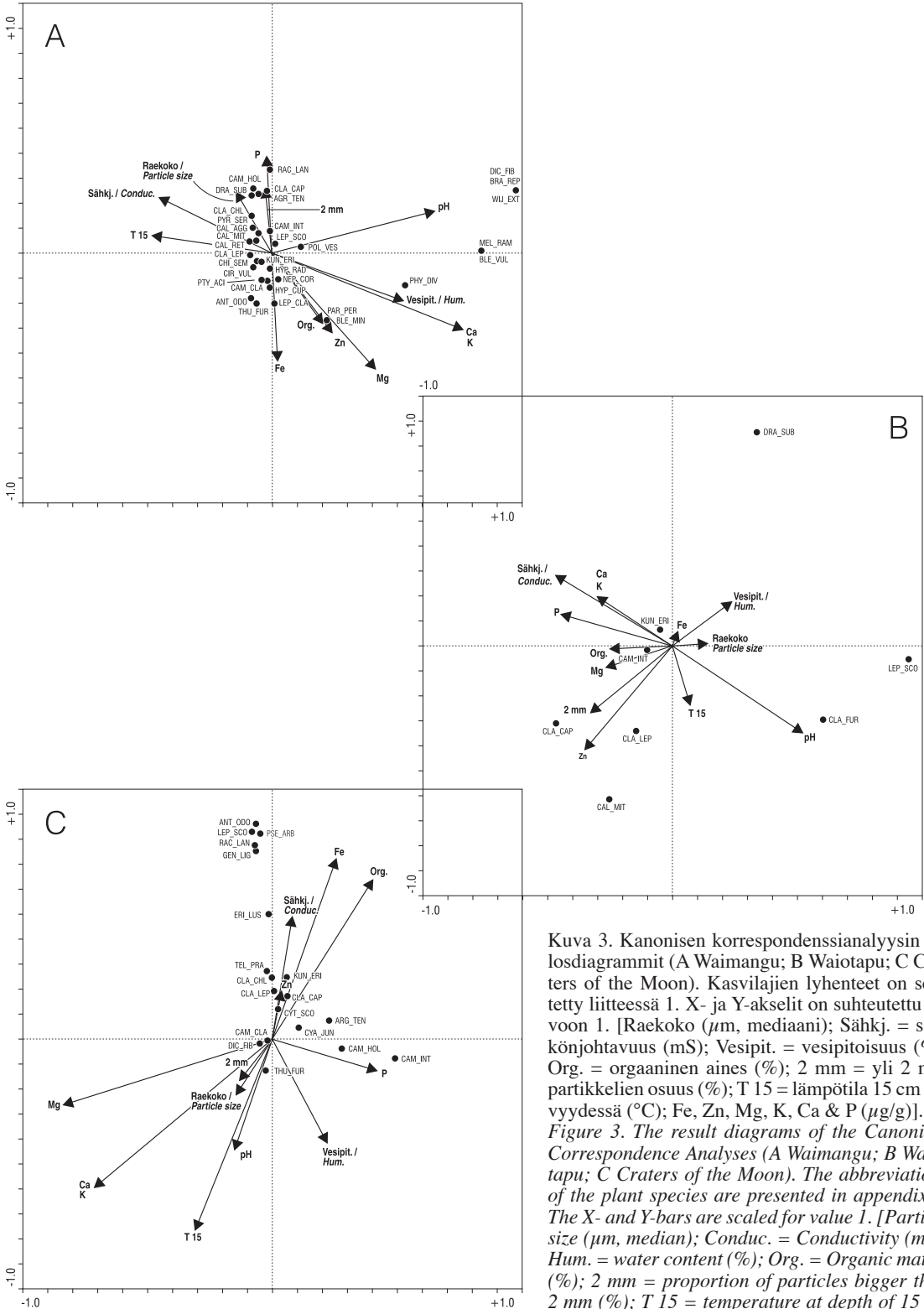
	Waimangu			Waiotapu			Craters of the Moon		
	Min	Max	Keskiarvo – Mean	Min	Max	Keskiarvo – Mean	Min	Max	Keskiarvo – Mean
Paljas maa–Bare ground (%)	0	100	18,3	10	100	65,8	0	90	23,8
Sammalikko–Bryophytes (%)	0	90	63,3	0	0	0,0	10	100	68,8
Jäkälikkö–Lichens (%)	0	50	10,5	0	90	29,4	0	30	2,7
Ruohosto–Herbs & grasses (%)	0	80	9,8	0	0	0,0	0	10	1,5
Varvusto–Dwarf shrubs (%)	0	90	16,4	0	100	31,6	0	100	55,0
Pensasto–Shrubs (%)	0	90	30,0	0	90	45,2	0	100	14,2
Puusto–Trees (%)	0	90	8,3	0	0	0,0	0	0	0,0
Sammalikko–Bryophytes (cm)	0	11	3,6	0	0	0,0	2	6	3,1
Jäkälikkö–Lichens (cm)	0	7	2,5	0	2	0,8	0	5	0,5
Ruohosto–Herbs & grasses (cm)	0	72	9,2	0	0	0,0	0	29	1,7
Varvusto–Dwarf shrubs (cm)	0	105	20,1	0	102	46,2	0	71	36,7
Pensasto–Shrubs (cm)	0	475	110,4	0	340	134,8	0	271	36,2
Puusto–Trees (cm)	0	800	106,1	0	0	0,0	0	0	0,0
Korkein kasvillisuus–Highest vegetation (cm)	0	800	201,4	26	340	151,1	23	271	69,1
Lajien määrä–Number of species	0	9	4,8	1	4	1,8	2	7	3,5
pH	4,8	7,6	5,9	3,1	4,1	3,6	4,2	6,8	5,6
Vesipitoisuus–Water content (%)	5	32	13,3	24	40	29,8	22	61	36,3
Sähköjohtavuus–Conductivity (mS)	3	13271	3948	25217	49462	34676	2	20478	6927
Orgaaninen aines–Organic matter (%)	0	15	2,5	0	11	3,1	0	11	4,3
Raekoko–Particle size (µm)	249	934	640	20	749	376	34	654	231
Yli 2mm:n partikkelit–Particles >2mm (%)	1	24	11,6	0	23	8,1	0	1	0,2
T _{15cm} (°C)	15,1	103,2	41,9	20,1	56,5	30,2	17,6	102,7	65,5
P (µg/g)	0,03	0,63	0,11	0,03	0,65	0,26	0,00	1,85	0,46
Zn (µg/g)	0,1	1,6	0,95	0,0	3,0	1,1	0,6	1,2	0,9
Ca (µg/g)	17	667	222	0	9	3	60	642	418
K (µg/g)	42	1669	557	1	22	7	151	1605	1044
Mg (µg/g)	1,0	23,2	15,9	0,5	13,1	2,6	5,9	23,1	18,0
Fe (µg/g)	0,0	1,1	0,34	0,2	8,2	1,4	0,0	1,3	0,3

3b). Maaperän lämpötila ei näytä olevan merkittävä kasvillisuuteen vaikuttava tekijä tällä geotermisellä kentällä. Tämä johtuu siitä, että muihin tutkimusalueisiin verrattuna Waiotapun maaperä on niin hapan, että se vaikuttaa ensisijaisesti kasvillisuuteen. Tämän takia Waiotapun kasvillisuustyytit eroavat Waimangun ja Craters of the Moonin kasvillisuustyypeistä. Craters of the Moonin geotermisellä kentällä puolestaan maaperän lämpötila vaikuttaa voimakkaasti kasvilajien esiintymiseen ja runsauteen (kuva 3c). Kaikilla tutkimusalueilla liukoisista ioneista Ca²⁺-, Mg²⁺- ja K⁺- pitoisuudet vaikuttavat merkittävästi muutamien yksittäisten kasvilajien esiintymiseen.

Given (1980) sekä Glime ja Iwatsuki (1994) ovat esittäneet, että kasvien juurivyöhykkeen läm-

pötila on merkittävin juurehtivien putkilokasvien esiintymistä rajoittava tekijä, minkä takia aktiivinen juurten kasvu tapahtuu pääasiallisesti viileämmässä pintakerroksessa. Givenin (1980) mukaan aktiivinen juuritoiminta rajoittuu noin +50 °C lämpötilaan, kun taas Stout ynnä muut (1997: 4) ovat huomanneet, että eräät kasvit sietävät jopa +57 °C kuumuutta. Näistä Givenin (1980) tulokset on saatu mittaamalla lämpötila vain yhden kerran, kun taas Stout ynnä muut (1997) ovat hyödyntäneet digitaalisten tiedonkerääjien mittaamaa aikasarjaa.

Putkilokasveista ainoastaan Kanuka-pensas (*Kunzea ericoides*) esiintyi lähes koko geotermisen vaikutuksen piirissä. Samallaista *Campylopus holomitrium* puolestaan suosii kuumempia kasvupaikkoja. Samallaista *Chiloscyphus semiteres*



Kuva 3. Kanonisen korrespondenssianalyysin tulostadiagrammit (A Waimangu; B Waiotapu; C Craters of the Moon). Kasvilajien lyhenteet on selitetty liitteessä 1. X- ja Y-akselit on suhteutettu arvoon 1. [Raekoko (μm , mediaani); Sähkö. = sähkönjohtavuus (mS); Vesipit. = vesipitoisuus (%); Org. = orgaaninen aines (%); 2 mm = yli 2 mm partikkelien osuus (%); T 15 = lämpötila 15 cm syvyydessä ($^{\circ}\text{C}$); Fe, Zn, Mg, K, Ca & P ($\mu\text{g/g}$)].
 Figure 3. The result diagrams of the Canonical Correspondence Analyses (A Waimangu; B Waiotapu; C Craters of the Moon). The abbreviations of the plant species are presented in appendix 1. The X- and Y-bars are scaled for value 1. [Particle size (μm , median); Conduc. = Conductivity (mS); Hum. = water content (%); Org. = Organic matter (%); 2 mm = proportion of particles bigger than 2 mm (%); T 15 = temperature at depth of 15 cm ($^{\circ}\text{C}$); Fe, Zn, Mg, K, Ca & P ($\mu\text{g/g}$)].

kasvaa runsaimmin korkean ja varjostavan *Kunzea ericoides* -pensaikon alla geotermisen gradientin keskivaiheilla.

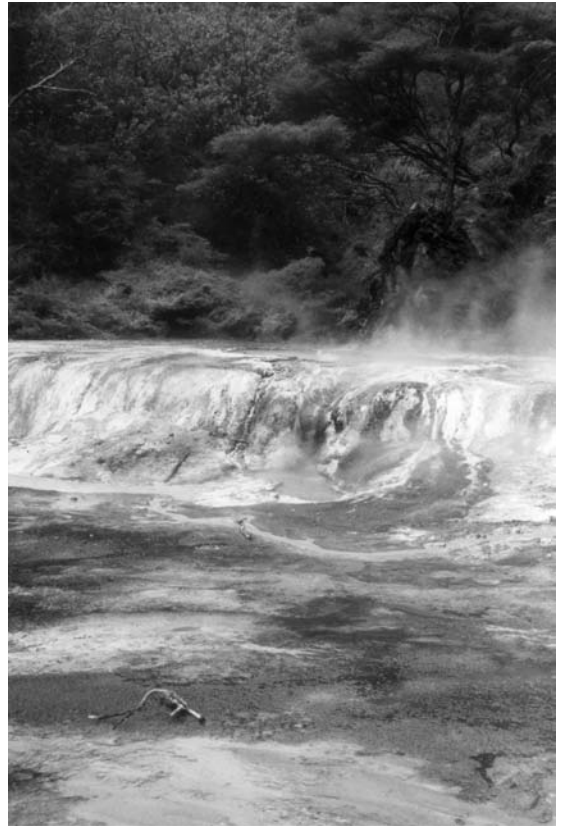
Merrettin ja Burns (1998a) sekä Burns (1998) ynnä muiden (1995) mukaan geotermisten alueiden maaperän lämpötila muuttuu lyhyessäkin ajassa. Kasvillisuus on siis koko ajan muutostilassa eikä kasvillisuuden lajistollinen koostumus mukaudu yhtä nopeasti lyhyellä aikavälillä tapahtuviin muutoksiin kuin yksittäisten versojen elinvoimaisuus ja sitä myöten niiden koko.

Aiemmat tutkimukset Uuden-Seelannin geotermisestä kasvillisuudesta ovat olleet aina yhtä kenttää (esim. Given 1980; Burns & Leathwick 1995; Burns ym. 1995; Burns 1998; Merrett & Burns 1998a, 1998b, 1998c) tai yhden kasvilajin esiintymistä (Merrett & Burns 1999) koskevia selvityksiä. Aiemmin ei ole juuri pohdittu eri kenttien välisiä samankaltaisuuksia tai eroja. Tutkimukseni perusteella voi päätellä, että geotermisillä kentillä kasvillisuus vaihtelee kylläkin vyöhykkeittäin kuumemmasta viileämpään, mutta se, mistä kasvilajeista toisiaan vastaavat lämpötilavyöhykkeet koostuvat, voi vaihdella suuresti. Koska geotermisillä alueilla kasvuympäristön olosuhteet ovat niin äärimmäiset, pienetkin erot maaperän happamuudessa tai kemiallisessa koostumuksessa rajoittavat täysin joidenkin lajien esiintymistä. Ainoastaan Kanukapensas esiintyy ja pärjää kaikilla tutkituilla kentillä – vaikkakin sekin karttaa aivan kuumimpia pisteitä. Aiemmat tutkimukset ovat keskittyneet ennemminkin harvinaisten lajien metsästyksen kuin eri geotermisten kenttien välisten erojen ja yhtäläisyyksien analysoimiseen. Tämä on ymmärrettävää, koska aiemmin ensisijaisena tutkimusintressinä on ollut erityisesti näiden herkkien elinympäristöjen suojeleminen ja siitä tiedottaminen. Aiheeseen liittyvä perustutkimus on jäänyt Uudessa-Seelannissa taka-alalle. Sen sijaan erityisesti Japanin geotermisillä alueilla on tehty perusteellista perustutkimusta (Glime & Iwatsuki 1990, 1994, 1997).

Kasvillisuuden vyöhykkeisyys

Useissa aiemmissa tutkimuksissa on päädytty tämän tutkimuksen kanssa samansuuntaisiin johtopäätöksiin siitä, että geotermisillä alueilla niin kasvillisuuden lajistollinen koostumus kuin kasvillisuuden fyysiomiset piirteetkin vaihtelevat vyöhykkeittäin geotermisen vaikutuksen voimakkuuden mukaan (Yoshioka ym. 1965; Lange 1973; Tsujimura 1977; Given 1980; Glime & Iwatsuki 1997; Merrett & Burns 1998b). Vyöhykkeisyys on silmin selvästi havaittavaa, koska geotermisen vaikutuksen alaisilla kasvupaikoilla kasvaa vain vähän kasvilajeja. Kasvilajien määrä vähenee maaperän läm-

pötilan kasvaessa, minkä ovat havainneet tahoillaan myös Glime ja Iwatsuki (1994) sekä Burns (1997). Vyöhykkeisyys alkaa paljaasta vyöhykkeestä, jossa kasvuympäristön ominaisuudet ovat liian vaativat: maaperä on kasveille aivan liian hapanta ja kuumaa (kuva 4).



Kuva 4. Kasvillisuudesta paljasta maata Waimangun geotermisellä kentällä (Kuva: Petteri Muukkonen 11/2000).
Figure 4. Bare ground on the Waimangu geothermal field (Photo: Petteri Muukkonen 11/2000).

Uloimpana geotermisestä vaikutuksesta esiintyy kasvillisuusvyöhyke, jossa valtaosa lajistosta koostuu sanikkaista ja ruohoista ja jossa kasvoi niukasti sammalia ja jäkäliä. Sekä varpumaisena että pensasmaisena kasvava *Kunzea ericoides* esiintyy sitä hallitsevampana, mutta matalampana, mitä selvempää geotermisen vaikutus oli, lukuunottamatta aivan kuumimpia näyteruutuja. Näillä kuumimmilla paikoilla kasvillisuus muodosti kasvillisuustyypin, jossa valtaosa kasvillisuudesta oli jäkäliä ja sammalia. Lisäksi paljasta maata oli runsaasti. Myös Given (1980) ja Yoshioka ynnä muut (1965) ovat päätyneet samoihin päätelmiin kasvillisuuden vyöhykkeisyydestä. Parhaiten geotermistä vaikutusta kestävät muutamat sammalajit, kun taas putkilo-

kasveja esiintyy ainoastaan geotermisen gradientin suotuisammassa osassa, aivan kuten Glime ja Iwatsukikin (1997) ovat aiemmin havainneet.

IndVal-analyysin indikaattoriarvojen summan perusteella klusterianalyysi tuli keskeyttää Waimangu- ja Craters of the Moon -tutkimuskentille neljännellä jakotasolla ja Waiotapulle kolmannelle jakotasolla. Tällöin Waimangulle saatiin neljä erilaista kasvillisuustyyppiä, Craters of the Moonille seitsemän ja Waiotapulle kolme. Waimangun ja Craters of the Moonin kasvillisuustyypit muistuttivat aavistuksen toisiaan, mutta Waiotapu erosi edellisistä huomattavasti. Waiotapun kasvillisuustyypit eivät lajiston perusteella muistuttaneet ainoatakaan Waimangun tai Craters of the Moonin kasvillisuustyyppiä, eivätkä myöskään aiempien tutkimusten kasvillisuustyyppiä muilla Pohjoissaaren geotermisillä kentillä (Dawson 1964; Burns & Leathwick 1995; Burns 1997; Merrett & Burns 1998b). Waiotapussa ei kasvanut lainkaan sammalia ja putkilokasvejakin löytyi *Kunzea ericoides* -pensaana lisäksi vain kaksi muuta lajia. Tämä osoittaa, ettei vain yhtä tai edes muutamaa geotermistä kenttää tutkimalla voida tehdä vahvoja lajien esiintymistä koskevia yleistyksiä koskien kaikkia Pohjoissaaren geotermisiä kenttiä. Selkeä yleistettävissä oleva tulos on kuitenkin se, että mitä suurempaa geotermisen vaikutus kasvuympäristössä on, sitä enemmän eri kenttien kasvillisuustyypit muistuttavat toisiaan.

IndVal-arvojen perusteella yleislajeja Waimangussa ja Craters of the Moonissa olivat sammalista *Campylopus clavatus* ja *Campylopus holomitrium* sekä putkilokasveja *Kunzea ericoides*. Spesialistilajeja olivat kaksi jäkälää, jotka kasvoivat vain kuumimmilla paikoilla sekä kolme putkilokasvilajia, jotka esiintyivät vain viileämmillä reuna-alueilla. Fahselt (1995) onkin korostanut, että makroskoopista kasvillisuudesta juuri (levä- ja sienosakkaasta koostuvat) jäkälät selviävät parhaiten aivan fumarolien (kaasulähteen, josta purkautuu varsinkin suolahappopitoista vesihöyryä) läheisyydessä, mikä on osoitus symbioottisten eliömuotojen ylivertaisesta kyvystä kasvaa vaativissa olosuhteissa ja voimakkaan stressin alaisuudessa. Jäkäläpeite on hänen mukaansa kuitenkin vähäistä siellä, (1) missä maaperän lämpötila on liian korkea, (2) missä esiintyy korkeaa ja varjostavaa putkilokasvikasvustoa tai (3) missä geotermisten kaasujen purkausaukko on liian lähellä. Jäkälät ovatkin erityisen herkkiä geotermiselle ilmansaasteelle (Loppi & Bargagli 1996; Loppi ym. 1998). Tavalisimpia ilmansaasteita geotermisillä alueilla ovat arseni, boori, rikkivety ja elohopea, joista erityisesti rikkivety aiheuttaa jäkälille vakavia vaurioita (Loppi 1996).

Waiotapussa yleislajeja eli lähes kaikilla kasvillisuusvyöhykkeillä esiintyviä lajeja olivat jäkälä *Cladonia furcata* sekä jo aiemmin mainittu *Kunzea ericoides*, joka oli indikaattoriarvon perusteella yleislaji kaikilla tutkimusalueilla, mutta ainoastaan Waiotapussa se indikoi voimakkaasti kasvillisuustyyppien vaihtumista toiseksi. Muutamaa poikkeusta lukuunottamatta *Kunzea ericoides* oli näyteruudun korkeimmaksi kasvava laji. Sammal *Campylopus holomitrium* oli yleislaji sekä Waimangussa että Craters of the Moonissa, mutta laji ei esiintynyt lainkaan Waiotapussa. Sammalet *Campylopus holomitrium* ja *Chiloscyphus semiteres* olivat indikaattorilajeja eli indikoivat kasvillisuuden vyöhykkeisyyttä sekä Waimangussa ja Craters of the Moonissa. Myös Burns ja Leathwick (1995) ovat todenneet, että *Campylopus holomitrium* on merkittävä vyöhykkeisyyttä indikoiva laji. Muut indikaattorilajit vaihtelivat kullakin alueella. Spesialisteja ei Waiotapussa IndVal-analyysin perusteella ollut, ja Waimangussa ja Craters of the Moonissakin oli keskenään eri spesialistilajit.

Tämän tutkimuksen perusteella voi päätellä, että kasvillisuusvyöhykkeiden yleispiirteet ovat kaikilla tutkimusalueilla samankaltaiset, mutta lajiston poikkeavat huomattavasti toisistaan. Vyöhykkeiden fyysiomiset ominaisuudet, kuten elomuototyyppi (jako ulkomuodoltaan erilaisiin kasviryhmiin) ja versojen korkeus vaihtuvat geotermisen vaikutuksen mukaan kaikilla tutkimusalueilla lähes samankaltaisesti.

Johtopäätökset

Tutkimuksen tärkeimmät tulokset ovat:

- 1) Geotermisten alueiden kasvillisuudessa on havaittavissa selvä vyöhykkeisyys viileiden reuna-alueiden korkeammasta kasvillisuudesta kuumempien paikkojen matalampaan kasvillisuuteen. Reuna-alueilla esiintyy runsaammin putkilokasvilajeja, kun taas kuumemmilla paikoilla kasviaste koostuu sammalista ja jäkäläistä. Sammalista ja jäkäläistä löytyy putkilokasveja paremmin korkeita lämpötiloja sietäviä lajeja.
- 2) Maaperän lämpötila on merkittävin kasvillisuuteen vaikuttava kasvuympäristön muuttaja geotermisillä alueilla.
- 3) Geotermisten alueiden kasvillisuus koostuu vain muutamista kasvilajeista, koska geotermiset kentät ovat äärimmäinen kasvuympäristö. Alueiden kasvillisuus koostuu sekä endeemisistä, vain geotermisillä kentillä kasvavista lajeista, reuna-alueiden geotermisyyttä sietävistä lajeista sekä normaalisti ilmastolli-

sesti lämpimämmillä alueilla esiintyvistä lajeista.

- 4) Uuden-Seelannin geotermisten kenttien kasvillisuus muistuttaa toisiaan fyysiomisten ominaisuuksien mukaan, mutta lajisto voi vaihdella alueittain.
- 5) Uudessa-Seelannissa ainoastaan Kanuka-pensas (*Kunzea ericoides*) esiintyy runsaana geotermisen vaikutuksen piirissä kaikilla Pohjoissaaren geotermisillä kentillä. Kanuka-kasvuston korkeus indikoi hyvin vallitsevan geotermisen vaikutuksen suuruutta.

Aiemmat Uuden-Seelannin geotermistä kasvillisuutta käsittelevät tutkimukset ovat keskittyneet ennemminkin harvinaisten lajien luettelointiin kuin geotermisten kenttien välisten eroavaisuuksien ja samankaltaisuuksien tulkintaan. Tämä johtuu siitä, että päällimmäisenä tutkimusintressinä on ollut erityisesti näiden herkkien elinympäristöjen suojeleminen ja siitä tiedottaminen. Aiheeseen liittyvä perustutkimus on jäänyt Uudessa-Seelannissa vähemmälle. Ainoastaan Givenin (1980) ja Burns ja Leathwickin (1995) tutkimuksissa on pohdittu kasvillisuuden ja kasvuympäristön välisiä suhteita.

Geotermisten kenttien hyödyntäminen energiantuotantoon lisää niiden perustutkimuksen tarvetta, koska lisääntyvä geotermisen energian hyödyntäminen laskee alueiden maaperän lämpötilaa. Vaikutukset voivat ulottua laajallekin alueelle (Allis 1981), sillä geotermiset systeemit voivat olla maan pinnan alla hyvin laaja-alaisia (MacDonald 1979). Kun kasvillisuuden ja kasvuympäristön väliset suhteet tunnetaan paremmin, mahdollisia muutoksia ja niiden voimakkuutta pystytään ennustamaan paremmin ja kasvillisuudessa tapahtuvia muutoksia voidaan käyttää apuna geotermisten alueiden monitoroinnissa.

Acknowledgements

The author thanks Dr. Patrick Browne (Geothermal Institute, University of Auckland) and Dr. Ray Merton (Earth Observation Centre, CSIRO Office of Space Science and Applications, Australia) who recommended the geothermal fields used in this study. The Waitapu Thermal Tourist Park, the Wairakei Natural Thermal Valley and the Department of Conservation (Turangi and Rotorua offices) granted the permission to work in the geothermal areas. I am also grateful to my wife Eveliina for assistance with surveys and field works. I also thank Dr. Chris Eckroyd of the New Zealand Forest Research Institute for identifying the lichen and bryophyte species. University of Turku has funded this study. Laboratory tests were made in Wairakei Research Center and in the Laboratory of Physical Geography, Department of Geography, University of Turku. Dr. Matti Rossi and Prof. Sakari Tuhkanen from the Department of Geography, University of Turku have supervised the present work.

KIRJALLISUUS

- Allan, H. (1961). *Flora of New Zealand*. 1083 s. R.E. Owen Government Printer, Wellington.
- Allis, R. (1979a). Heat flow and temperature investigations in thermal ground. *Geophysics Division Report* 135. Department of Scientific and Industrial Research, Wellington. 28 s.
- Allis, R. (1979b). Thermal history of the Karapiti area, Wairakei. *Geophysics Division Report* 137. Department of Scientific and Industrial Research, Wellington. 38 s.
- Allis, R. (1981). Changes in heat flow associated with exploitation of Wairakei geothermal field, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 24: 1, 1–19.
- Andersson, M. (1997). Aluminium toxicity as a factor limiting the distribution of *Allium ursinum* (L.). *Annals of Botany* 72: 6, 607–611.
- Bargagli, R., P. Broady & D. Walton (1996). Preliminary investigation of the thermal biosystem of Mount Rittmann fumaroles (northern Victoria Land, Antarctica). *Antarctic Science* 8: 2, 121–126.
- Beever, J., K. Allison & J. Child (1992). *The mosses of New Zealand*. 2. p. 214 s. University of Otago Press, Otago.
- Black, C. (1968). *Soil-plant relationships*. 2. p. 792 s. John Wiley & Sons, New York.
- Breiman, L., J. Friedman, R. Olshen & C. Stone (1984). *Classification and regression trees*. 358 s. Wadsworth & Brooks, Monterey.
- Broady, P., D. Given, L. Greenfield & K. Thompson (1987). The biota and environment of fumaroles on Mt. Melbourne, Northern Victoria Land. *Polar Biology* 7: 2, 97–113.
- Brock, T. (1967). Life at high temperatures. *Science* 158: 2, 1012–1019.
- Burns, N. (1997). Vegetation change along a geothermal stress gradient at the Te Kopia steamfield. *Journal of the Royal Society of New Zealand* 27: 2, 279–294.
- Burns, B. & J. Leathwick (1995). Geothermal vegetation dynamics. *Science for Conservation* 18. 26 s.
- Burns, B., K. Whaley & P. Whaley (1995). Thermotolerant vegetation of the Tauhara geothermal field. *Landcare Research Contract Report* LC9596/020. Landcare Research, Hamilton. 19 s.
- Dawson, G. (1964). The nature and assessment of heat flow from hydrothermal areas. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 7: 1, 155–177.
- Dawson, G. & R. Fisher (1964). Diurnal and seasonal ground temperature variations at Wairakei. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 7: 1, 144–154.
- Dufrêne, M. & P. Legendre (1997). Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* 67: 3, 345–366.
- Etherington, J. (1982). *Environment and plant ecology*. 2. p. 487 s. John Wiley & Sons, New York.
- Fahselt, D. (1995). Growth form and reproductive character of lichens near active fumaroles in Japan. *Symbiosis* 18: 3, 211–231.

- Galloway, D. (1985). *Flora of New Zealand: lichens*. 662 s. P.D. Hasselberg Government Printer, Wellington.
- Geological map on New Zealand (1961). *Sheet N94, Taupo, 1:63360*. New Zealand Geological Survey, Department of Scientific and Industrial Research, Wellington.
- Given, D. (1980). Vegetation on heated soils at Karapiti, central North Island, New Zealand, and its relation to ground temperature. *New Zealand Journal of Botany* 18: 1–13.
- Glime, J. & Z. Iwatsuki (1990). Niche characteristics of *Cladonia* lichens associated with geothermal vents in Japan. *Ecological Research* 5: 1, 131–141.
- Glime, J. & Z. Iwatsuki (1994). Geothermal communities on Ponponyama, Hokkaido, Japan. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory* 75, 133–147.
- Glime, J. & Z. Iwatsuki (1997). Niche partitioning of plant taxa associated with geothermal vents at Wakoto, Hokkaido, Japan. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory* 82, 123–141.
- Grant, M. (1979). Structure of geothermal fields with emphasis on surface features. *Proceedings of a seminar on the management of geothermal reserves: 16–18 October 1979. Reserves Series* 5, 15–18. Department of Lands and Survey, Wellington.
- Gruezo, W. & R. Badayay (1996). Vegetation of Mt. Labo and vicinity, Camarines Norte Province (Luzon, Philippines). *Asia Life Sciences* 5: 2, 63–106.
- Halliday, G., L. Kliim-Nielsen & I. Smart (1974). Studies on the flora of the north Blossville Kyst and on the hot springs of Greenland. *Meddelelser om Grønland* 199: 2, 49 s.
- Head, K. (1984). *Manual of soil laboratory testing I: soil classification and compaction*. 339 s. Pentech Press, Lontoo.
- Heath, E. & R. Chinnock (1974). *Ferns and fern allies of New Zealand*. 47 s. A.H. & A.W. Reed, Wellington.
- Kappen, L. & C. Smith (1980). Heat tolerance of two *Cladonia* species and *Campylopus praemorsus* in a hot steam vent of Hawaii. *Oecologia* 47: 2, 184–189.
- Kujala, V. (1964). Metsä- ja suokasvillisuuden levinneisyys- ja yleisyysuhteista Suomessa. *Communications Instituti Forestalia Fenniae* 59: 1, 137 s.
- Lange, B. (1973). The *Sphangum* flora of hot springs in Iceland. *Lindbergia* 2: 1, 81–93.
- Larcher, W. (1975). *Physiological plant ecology*. 252 s. Springer-Verlag, New York.
- De Leo, G., L. Del Furia & M. Gatto (1993). The interaction between soil acidity and forest dynamic: a simple model exhibiting catastrophic behavior. *Theoretical Population Biology* 43: 1, 31–51.
- Loppi, S. (1996). Lichens as bioindicators of geothermal air pollution in Central Italy. *The Bryologist* 99: 1, 41–48.
- Loppi, S. & R. Bargagli (1996). Lichen biomonitoring of trace elements in a geothermal area (Central Italy). *Water, Air and Soil Pollution* 88: 1, 177–187.
- Loppi, S., E. Cenni, F. Bussotti & M. Ferretti (1998). Biomonitoring of geothermal air pollution by epiphytic lichens and forest trees. *Chemosphere* 36: 4–5, 1079–1082.
- Lüttig, G. (1985). The role of geothermal energy in the relation between sources and demands of conventional energies. *Teoksessa* Romijn, E., E. Groba, G. Lüttig, K. Fiedler, R. Laugier, E. Löhnert & C. Garagunis (toim.): *Geothermics, thermal-mineral water and hydrogeology*, 3–18. Theophrastus Publications, Ateena.
- MacDonald, W. (1979). Types of geothermal systems. *Proceedings of a seminar on the management of geothermal reserves, 16–18 October 1979. Reserves Series* 5, 12–14. Department of Lands and Survey, Wellington.
- Malcolm, W. & D. Galloway (1997). *New Zealand lichens: checklist, key, and glossary*. 192 s. Museum of New Zealand Te Papa Tongerawa, Wellington.
- Martin, W. & J. Child (1972). *New Zealand lichens*. 193 s. A.H. & A.W. Reed, Wellington.
- Merrett, M. & B. Burns (1998a). Wairakei geothermal field vegetation monitoring changes after two years. *Landcare Research Contract Report LC9798/089*. Landcare Research, Hamilton. 22 s.
- Merrett, M. & B. Burns (1998b). Thermotolerant vegetation of the Wairakei geothermal field. *Landcare Research Contract Report LC9798/119*. Landcare Research, Hamilton. 19 s.
- Merrett, M. & B. Burns (1998c). Thermotolerant vegetation of the Ohaaki geothermal fields. *Landcare Research Contract Report LC9798*. Landcare Research, Hamilton. 22 s.
- Merrett, M. & B. Burns (1999). Distribution and abundance of *Christella* sp. ‘thermal’ and *Cyclosorus interruptus* in geothermal areas of the Taupo Volcanic Zone. *Landcare Research Contract Report LC9900/041*. Landcare Research, Hamilton. 35 s.
- Mongillo, M. (1989). A re-examination of the 1972 and 1975 aerial infrared surveys of the Tauhara geothermal field. *Geophysics Division Research Report* 220. Department of Scientific and Industrial Research, Wellington. 20 s.
- Moore, L. & E. Edgar (1976). *Flora of New Zealand II*. 354 s. A.R. Shearer Government Printer, Wellington.
- Mueller-Dombois, D. & H. Ellenberg (1974). *Aims and methods for vegetation ecology*. 547 s. John Wiley & Sons, New York.
- Poole, A. & N. Adams (1980). *Trees and shrubs of New Zealand*. 5. p. 256 s. P.D. Hasselberg Government Printer, Wellington.
- Robertson, E. & G. Dawson (1964). Geothermal heat flow through the soil at Wairakei. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 7: 1, 134–143.
- Sainsbury, G. (1955). A handbook of the New Zealand mosses. *Royal Society of New Zealand Bulletin* 5, 490 s.
- Schetelig, K. (1985). Recommendations on development of geothermal energy in Greece. *Teoksessa* Romijn, E., E. Groba, G. Lüttig, K. Fiedler, R. Laugier, E. Löhnert & C. Garagunis (toim.): *Geothermics, thermal-mineral water and hydrogeology*, 35–46. Theophrastus Publications, Ateena.
- Shabala, S. (1996). Leaf temperature kinetics measure plant adaptation to extreme high temperatures. *Australian Journal of Plant Physiology* 23: 4, 445–452.

- Smith, R. & K. Atkinson (1975). *Techniques in pedology*. 213 s. Paul Elek, Lontoo.
- Stark, J., R. Fordyce & M. Winterbourn (1976). An ecological survey of the hot springs area Hurunui River, Canterbury, New Zealand. *Mauri Ora* 4: 35–52.
- Stout, R., M. Summers, T. Kerstetter & T. McDermott (1997). Heat- and acid-tolerance of a grass commonly found in geothermal areas within Yellowstone National Park. *Plant Science* 130: 1, 1–9.
- ter Braak, C. (1986). Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* 67: 5, 1167–1179.
- ter Braak, C. (1987). The analysis of vegetation-environment relationship by canonical correspondence analysis. *Vegetatio* 69: 8, 69–77.
- Tsujimura, A. (1977). Difference of the vegetation of solftaras according to their positions on the vegetation zone. *Japanese Journal of Ecology* 27: 4, 319–322.
- Vucetich, C. & N. Wells (1978). Soils, agriculture and forestry of Waiotapu region, Central North Island, New Zealand. *New Zealand Soil Bureau Bulletin* 31. 100 s.
- Weis, E. & J. Berry (1988). Plants and high temperature stress. Teoksessa Long, S. & F. Woodward (toim.): *Proceedings of a meeting held at the University of Essex, England 8–10 September 1987. Symposia of the Society for Experimental Biology number XXXII*, 329–346. Society for Experimental Biology, Southampton.
- Yoshioka, K., K. Saitô & H. Tachibana (1965). Solfatar vegetation at Osoreyama. *Ecological Review* 16: 3, 137–151.

Liite 1. Tutkimuksessa tavatut kasvilajit ja niistä käytetyt lyhenteet (A Waimangu; B Waiotapu; C Craters of the Moon).

Appendix 1. The plant species found in the study and their abbreviations (A Waimangu; B Waiotapu; C Craters of the Moon).

	Lyhenne – Abbreviation	Laji – Species	Kenttä – Field
	AGR_TEN	<i>Agrostis tenuis</i>	A
	ANT_ODO	<i>Antoxanthum odoratum</i>	A
	BLE_MIN	<i>Blechnum minus</i>	A
	BLE_VUL	<i>Blechnum vulcanicum</i>	A
	BRA_REP	<i>Brachyglottis repanda</i>	A
	CIR_VUL	<i>Cirsium vulgare</i>	A
	CYA_JUN	<i>Cyathodes juniperina</i>	C
	CYT_SCO	<i>Cytisus scoparius</i>	C
	DIC_FIB	<i>Dicksonia fibrosa</i>	A
	DRA_SUB	<i>Dragophyllum subulatum</i>	A, B
	ERI_LUS	<i>Erica lusitanica</i>	C
	GEN_LIG	<i>Geniostoma ligustrifolia</i>	C
	HYP_RAD	<i>Hypochoeris radicata</i>	A
	KUN_ERI	<i>Kunzea ericoides</i>	A, B, C
	LEP_SCO	<i>Leptospermum scoparium</i>	A, B, C
Putkilokasvit – Vascular plants	LYC_CER	<i>Lycopodium cernuum</i>	C
	MEL_RAM	<i>Meliccytus ramiflorus</i>	A
	NEP_COR	<i>Nephrolepis cordifolia</i>	A
	PHY_DIV	<i>Phymatosorus diversifolia</i>	A, C
	POL_VES	<i>Polystichum vestitum</i>	A
	PYR_SER	<i>Pyrosia serpens</i>	A
	PSE_ARB	<i>Pseudopanax arboreus</i>	C
	PTE_ESC	<i>Pteridium asculentum</i>	C
	TEL_PRA	<i>Teleranea pranitens</i>	C
	Sammalet – Bryophytes	CAM_CLA	<i>Campylopus clavatus</i>
CAM_HOL		<i>Campylopus holomitrium</i>	A, C
CAM_INT		<i>Campylopus introflexus</i>	A, B, C
CHI_SEM		<i>Chiloscyphus semiteres</i>	A, C
HYP_CUP		<i>Hypnum cupressiforme</i>	A
PTY_ACI		<i>Ptychomnion aciculare</i>	A
RAC_LAN		<i>Racomitrium lanuginosum</i>	A
THU_FUR		<i>Thuidium furfurosum</i>	A, C
WIJ_EXT		<i>Wijkia extenuata</i>	A
Jäkälät – Lichens	CAL_AGG	<i>Cladia aggregata</i>	A
	CLA_CHL	<i>Cladia chlorophaea</i>	A
	CAL_RET	<i>Cladia retipora</i>	A
	CLA_LEP	<i>Cladina leptoclada</i>	A, B, C
	CAL_MIT	<i>Cladina mitis</i>	A, B
	CLA_CAP	<i>Cladonia capitellata</i>	A, B, C
	CLA_FUR	<i>Cladonia furcata</i>	B, C
	LEP_CLA	<i>Lepidozia glaucophyllum</i>	A
	PAR_PER	<i>Parmotrema perlatum</i>	A

Lajeja yhteensä – Total number of species 42