

Tuula Larmola, Marja Tiirola, Sanna M. Leppänen, Anuliina Putkinen, Maija Aarva, Päivi Merilä, Hannu Fritze ja Eeva-Stiina Tuittila

## Metaanin hapettajat – suon hiilen ja typen kierron kaksoisagentit

*Soiden sammalpeite estää kasvihuonekaasu metaanin pääsyä ilmakehään. Rahkasammalien sisällä elävät bakteerit hapettavat suon syvyyksistä nousevaa metaania ja vapautuva hiilidioksidi kiihdyttää sammalten kasvua. Myös soiden typpitalous liittyy metaanin kiertoon niin, että biologinen metaaninhapettajabakteerien aikaansaama typensidonta on tärkeä typen lähde turvetta muodostaville sammalille.*

*Suot ovat merkittäviä hiilen ja typen pitkäaikaisvarastoja sekä luontaisia ilmakehän metaanin lähteitä. Maailmanlaajuisesti soihin on sitoutunut kolmannes maaperän hiilestä ja 9–15% orgaanisesta tyypestä. Suomen hiilivarastosta jopa 2/3 on sitoutunut turpeeseen. Noin 30% maailman metaanipäästöistä on soista peräisin.*

### Suon hiilen ja typen kierron paradoksit

Soiden metaanipäästö muodostuu kahden biologisen prosessin, tuotannon ja kulutuksen summana. Bakteerit ja arkit ovat ainoita biologisia eliöitä, jotka kuluttavat metaania. Hapellisissa oloissa toimivat metaaninhapettajabakteerit saavat energiansa hapettamalla kasviaineksen hajotuksessa syntyneen metaanin hiilidioksidiksi ja vedeksi. Vasta äskettäin on löydetty metaaninhapettajabakteereita myös rahkasammalten sisältä. Kiinnostavaksi löydön tekee se, että sammal saa bakteerien ansiosta lisää hiilidioksidia kasvuunsa. Näin sammal sitoo osan hajotuksessa vapautuneesta hiilestä saman tien takaisin ekosysteemiin. Tämä hajotustuotteiden, kuten metaanin, tehokas kierrätys voi osaltaan selittää rahkasammal-

valtaisten soiden paradoksin: soilla on huomattavat hiilivarastot näennäisesti alhaisesta perustuotannosta huolimatta. Koska rahkasammalsolukossa on hajottajien toimintaa ehkäiseviä yhdisteitä, ne hajoavat hitaasti, ja kertyvät turpeeksi. Tästä syystä yli puolet turpeesta on peräisin rahkasammalista (kuva 1).

Suot saavat suuren osan tarvitsemastaan tyypestä sadeveden typpilaskeuman kautta, sillä turvekerroksen kasvaessa suokasvillisuus ei enää saa tyypillisää ympäröiviltä kivennäismailta valuvista pintavesistä. Ensimmäisen ristiriidan ”suuret säästöt pienillä tuloilla” lisäksi suoekosysteemeissä piilee toinenkin paradoksi: pitkän ajan kuluessa suohon kertyy tyypeä enemmän kuin typpilaskeuman määrä antaisi olettaa. Tämän toisen paradoksin selittävät sammallissa elävät typensitotjabakteerit. Tekemämme mitaukset vakaiden isotooppien avulla osoittivat, että biologinen bakteerien aikaansaama typensidonta on tärkeä typen lähde turvetta muodostaville sammalille ja sitä kautta soiden paksuuskasvulle. Kasvit eivät voi suoraan käyttää ilmakehän kaasumaista tyypeä (N<sub>2</sub>), mutta typensitotjabakteerit muuttavat ilmakehän typpikaasun kasveille käyttökelpoiseen muotoon ammoniumiksi.

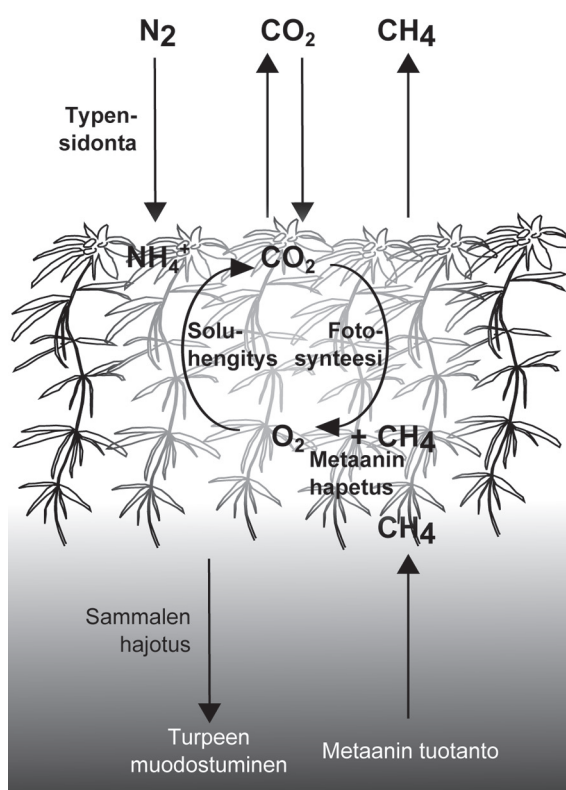
Mengen ja Hedinin vuonna 2009 esittämän nitrostaattiteorian mukaan biologinen typensidonta ilmakehästä toimii kuten termostaatti, sidonta kytkeytyy päälle, kun tyyppi rajoittaa kasvua ja pois kun muuta tyypeä on riittävästi saatavilla. Yleisen käsityksen mukaan biologinen typensidonta vähenee, kun ekosysteemin typpivarasto kasvaa. Pohjoisia havumetsiä tutkittaessa on kuitenkin havaittu vas-

takkainen ilmiö: typensidontanopeus kasvaa metsän ikääntyessä, kun mineraalityypen saatavuus vähenee. Seinäsammalilla elävillä sinibakteereilla on merkittävä osuus erityisesti vanhan metsän typpitaloudesta. Samoin soilla kasvien käytettävissä oleva typpi vähenee, vaikka turpeen typpivarasto kasvaa suon ikääntyessä.

Aikaisempien mittausten perusteella soiden biologista typensidontaa on pidetty vähäisenä. Tämä on johtunut muun muassa siitä, että mittausongelmat ovat estäneet metaania hapettavien bakteerien samanaikaisen toiminnan tutkimisen. Perinteisesti biologista typensidontanopeutta on tutkittu asetyleenipelkistysmenetelmällä. Sillä voidaan mitata toisen typensitojamikrobiryhmän, sinibakteerien aktiivisuutta, mutta asetyleeni estää metaanin hapettajabakteerien metaanin hapetukseen liittyvän entsyymien toiminnan. Toinen, mutta vähemmän käytetty menetelmä, perustuu typen ( $^{15}\text{N}$ ) ja hiilen ( $^{13}\text{C}$ ) vakaisiin isotooppiin, jotka eivät häiritse sammalten bakteerien toimintaa. Sammalnäytteistä voidaan mitata niihin kokeen aikana kertyneiden vakaiden isotooppien, eli leimojen, määrät, jotka kertovat bakteerien typensidonta- ja metaanin hapetusaktiivisuuksista (kuva 2). Tämä menetelmä tuottikin yllättäviä tuloksia typensidonnasta rahkasammalisoilla.

### Maankohoamisrannikon suot luonnon laboratoriona

Siikajoen maankohoamisrannikon soiden primaarisukessiogradientti (kuva 3) antaa harvinaisen tilaisuuden tutkia suon kehityksen aikana tapahtuvaa lajiston ja toiminnan muutosta, johon ihmisen maankäyttö ei ole vaikuttanut. Sukkessio tarkoittaa tietyllä paikalla tapahtuvaa, vuodenaikaisvaihtelusta riippumatonta suuntautunutta ja jatkuvaa lajien populaatioiden asuttamis- ja hävintäprosessia. Sukkessio päättyy kliimaksiin eli vakaaseen eliöyhteisöön, jonka lajisto ei juuri muutu. Primaarisukkessio käynnistyy vedestä tai jäätä vapautuneilla kasvittomilla alueilla, joiden maaperässä ei ole orgaanista ainesta eikä siemenpankkia. Useimmat pohjoiset ekosysteemit ovat kehittyneet primaarisukkession kautta, mutta nykyisin harvat luonnontilaiset suot ovat säilyneet malliekosysteeminä, joissa primaari-



**Kuva 1.** Metaanin hapettajat suon pinnan hiilen ja typen kiertossa. Sammal ja sen bakteerikumppanit saavat metaanin ( $\text{CH}_4$ ) hapetuksen ansiosta lisähiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ) kasvuunsa. Metaanin hapetus myös kiihdyttää ilmakehän kaasumaisen typen ( $\text{N}_2$ ) sidontaa. Typensitojabakteerit sitovat typen kasveille käyttökelpoiseen muotoon ammoniumiksi, jonka sammal käyttää kasvuunsa. Rahkasammal kasvaa kärjestään ja hajoaa hitaasti verson tyveltä. Osittain hajonnut sammalbiomassa kertyy turpeeksi. (Kuva Sanna Leppänen).

risukkessio on voinut jatkua häiriöttä. Tässä luonnon tarjoamassa laboratoriossa on tähän mennessä tutkittu hiilenkiertoa, hiilen ja typen kerrostumista, kasvillisuuden ja mikrobiyhteisöjen sukkessiota, ja rahkasammalten ekofysiologiaa. Sukkessiosarja on myös toiminut malliekosysteeminä suon matemaattisen kehitysmallin laadinnassa.



**Kuva 2.** Tutkimusmenetelmä. Larmolan ym. tutkimuksessa selvitettiin metaania hapettavien bakteerien merkitystä metaanihiilen ja ilmakehän typen sitoutumisessa rahkasammaliin Siikajoen maankohoamisrannikon soilla. Kahdeltatoista suolta neljästä eri sukkessiovaiheesta kerättiin sekä märkien rimpien että kuivien mätästen valtarahkasammallajeja. Maastossa sammat suljettiin leimauspulloihin kasvupaikallaan kahden vuorokauden inkubointiin. Sammalten bakteeriyhteisöjen typensidonta-aktiivisuutta ja sen yhteisvaihtelua metaanin hapetuksen kanssa selvitettiin  $^{15}\text{N}$ -typpi- ja  $^{13}\text{CH}_4$ -metaani isotooppileimauksen avulla sekä valossa että alumiinifolioon käärittynä pimeässä. Eri käsittelyjen avulla pyrittiin selvittämään, mikä typensitojaryhmä oli kulloinkin aktiivinen, yhteyttävät sinibakteerit, toisenvaraiset bakteerit vai metaaninhapettajabakteerit (Kuvat Maija Aarva).

### Metaani kerryttää turvetta

Metaaninhapettajabakteerit tarjoavat hiilen lisäksi isäntäsammalelle typpeä, mikä korostaa metaanikierron merkitystä suoekosysteemin toiminnassa ja kehityksessä. Rahkasammalkerroksen typensidonta valossa ja pimeässä tehtyjen mittausten keskiarvona oli 1–29 kg N hehtaaria kohti vuodessa, mikä on jopa kymmenkertaista alueen typpilaskeumaan 3 kg N hehtaaria kohti verrattuna. Kun vertasimme metaanilisän saaneiden sammalien typensidontanopeutta niihin, jotka eivät saaneet metaanilisää, havaitsimme, että keskimäärin kolmannes typensidonnasta oli metaaninhapetuksen ansiota (kuva 4).

Biologisen typensidontan yhteys metaanihiilen kiertoon muodostaa tärkeän mekanismin, missä sammalkerros toimii suodattimena metaanin päästöille ilmakehään. Sammal ja sen bakteerikumppanit saavat metaania hapettavien bakteerien ansiosta lisähiilidioksidia ja siten kilpailuedun kasvuunsa. Näin se hiilidioksidi, joka syntyy metaanin hapetuksessa ja sitoutuu sammalen kasvuun, ei myöskään pääse ilmakehään. Metaanin hapetus voi siis kiihdyttää typensidontaa sammalissa joko niin, että metaanin-

hapettajat itse sitovat typpeä tai, että ne luovat otolliset olosuhteet muiden typensitojien toiminnalle. Tämä ilmiö selittää soihin kertyvän typen määrän ja myös rahkasammalten kasvumenestyksen vähäravinteisilla soilla. Turvevarantojen kasvu hidastaa ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvua ja siten ilmastonmuutosta. Sellaisissa sammalissa, jotka kasvoivat juuri pohjaveden rajapinnassa, bakteerit sekä hapettivat metaania että sitoivat typpeä eniten. Edellytyksenä sammalsuodattimen tehokkaalle toiminnalle olivat siis sopivan kosteat olosuhteet. Märissä oloissa kasvavissa sammalissa 10–30 % kokonaishiilestä on peräisin metaanista, mutta mätäsrahkasammalissa vain 0–3 %.

Kiinnostavaa oli, että ylipäättään nopeinta typensidontaa oli nuorissa sukkessiovaiheissa, jotka myös saivat ravinteita pintaveden mukana. Nuorilla soilla fosforia oli suhteellisesti enemmän eikä sen saatavuus vielä rajoittanut typensidontaa. Typensidontaprosessi vaatii paljon energiaa ja fosforia. Niiden saatavuus säätelee myös järvien ja merien sinibakteerikukintoja. Lisäksi metaaninhapetus- ja typensidontanopeudet korreloivat vain silloin, kun fosforia on saatavilla.

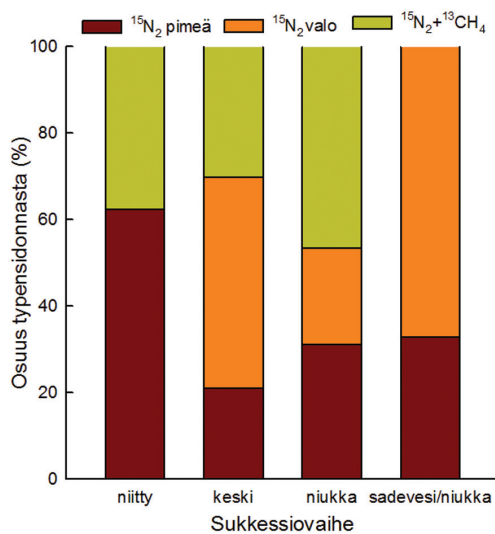




**Kuva 3.** Primaarisuknessiogradientti. Tutkimuskohteenamme oli seitsemään eri ikävaiheeseen kuuluvien soiden suknessiosarja merenrantaniitystä ombrotrofiseen suohon (n. 2500 vuotta) Siikajoen maankohoamisrannikolla Pohjois-Pohjanmaalla. Kuvissa ne ikävaiheet, joilla jo esiintyy rahkasammalia: 200, 700, 1200 ja 2500 vuotta maankohoamisen jälkeen. (Kuvat Maija Aarva).

Päinvastoin kuin odotimme, vanhimmilla karuimilla soilla aktiivinen metaanin hapetus ei lisännyt typensidontaa, vaikka metaania tuotettiin ja sitä hapetettiin kaikissa vaiheissa. Fosforin puutteen lisäksi selityksenä voi olla, että vanhat suknessiovaiheet ovat mätäsvaltaisia ja kuivempia, jolloin sammalkerroksen happipitoisuus voi olla liian suuri tehokkaalle typensidonnalle. Sen sijaan muut typensitojat, kuten sinibakteerit, olivat aktiivisia vanhemmillakin soilla. Niiden karuissa oloissa hitaasti kasvavien sammalten biomassan tyypestä suhteellisesti suurin osuus, jopa yli puolet, oli peräisin ilmakehästä sidotusta tyypestä.

Siikajoen turveprofiilit osoittivat, että 70 % tyypestä ja 40 % hiilestä kertyi suohon ensimmäisten 1000 vuoden aikana. Biologinen typensidonta on yksinkertaisin selitys turpeen typen kertymänopeuden muutoksille, koska typpilaskeuma oli hyvin alhainen ennen teollista vallankumousta. Nuorten soiden tehokkaan typen sidonnan mahdollista yleisyyttä kuvaa se, että 215 pohjoisamerikkalaista ja euraasialaista suota tutkittaessa on havaittu vastaava säännöllinen typenkertymän muutos suon kehityksen myötä: typen vuosikertymä on lähes kaksinkertainen ensimmäiset 6000 vuotta jääkauden jälkeen verrattuna viimeisten 6000 vuoden aikana kertynee-



**Kuva 4.** Rahkasammalkerroksen typensidonta Siikajoen sukkesiogradyentilla  $^{15}\text{N}$ -typpi- ja  $^{13}\text{CH}_4$ -metaani-isotooppileimauksen avulla. Suksessiovaiheet ovat märkä, niitty, keski-, niukka- ja lähes sadevesiravinteinen suo (ks. kuva 3). Käsittelyjen avulla selvitetiin, mikä typensitojarhyhmä oli aktiivinen:  $^{15}\text{N}_2$ -typpilisäys pimeässä (toisenvaraiset bakteerit), valossa (yhteyttävät sinibakteerit),  $^{13}\text{CH}_4$ -metaanin lisäys (metaaninhapettajabakteerit). Suhteelliset osuudet perustuvat kolmen suon keskiarvoihin kussakin sukkesiiovaiheessa Larmolan ym. 2014 tutkimuksen mukaan.

seen turpeeseen. Kertymänopeuden muutosta voi se-  
littää rahkasoiden yleistymisellä ja typensidonnän  
edellytysten heikkenemisellä.

### Miten metaanijarrun käy ilmaston muuttuessa?

Ilmaston lämmetessä ikiroudan sulaminen aapasuo-  
vyöhykkeen pohjoisrajalla voi johtaa keidassoiden,  
jotka elävät sadeveden mukana tulevien ravinteiden  
varassa, romahtamiseen ja muuttumiseen märiksi  
nevoiksi. Eteläiset aapasuot taas voivat haihdunnan  
kasvaessa kuivua ja karuuntua keidassoiksi. Tämä  
raju olosuhteiden muutos vaikuttaisi edelleen typen-  
sidonnän ja metanotrofisen typen sidonnän voimak-  
kuuteen.

Nykyisin rahkasammalvaltaisella suolla valtaosa  
turvekerroksesta kumpuavasta metaanista jää sam-  
malkerrokseen. Lämpötila ja vedenpinnan korkeus  
säätelävät metaanin tuotanto- ja hapetusnopeutta,  
mutta suoekosysteemin metaanin tuoton ja hape-  
tuksen lämpötilavasteet ovat erilaiset. Kokeellinen  
tutkimus osoitti, että lämpötilan noustessa metaanin  
tuotanto kiihtyy, eivätkä metaanin hapettajat pysy  
perässä. Näin ollen sammalkerroksen suodatinvai-  
kutus vähenee. Kun viiden asteen lämpötilassa 98 %  
tuotetusta metaanista pidättyy sammalkerrokseen,  
25 °C lämpötilassa suodatinvaikutus on pudonnut  
50%:iin. Ilmaston lämpeneminen voi johtaa tule-  
vaisuudessa metaanihiilen takaisinsidonnän vähe-  
nemiseen ja siten soiden metaanipäästöjen lisään-  
tymiseen.

Hellejaksojen yleistyessä suonpinnan olot voivat  
tulla liian lämpimiksi myös typensitojille: typen-  
sidonnassa tarvittavan nitrogeenaasiensyömin läm-  
pötilaoptimi on 25 °C ja se lakkaa toimimasta jo  
30 °C:ssa. Entsyymiaktiivisuuden palautuminen  
voi kestää jopa yli vuorokauden. Sammalen otol-  
lista kasvuaikaa ovatkin kevät ja syksy perinteisen  
kasvukauden ulkopuolella.

Teollistumisen ja maatalouden tehostumisen  
myötä 150 viime vuoden aikana ilmakehän typpi-  
laskeuma on lisännyt kasvien ja mikrobien saatavilla  
olevan typen määrää. Nitrostaattiteorian mukaan,  
kun mineraalityppeä on tarjolla, ei voimavaroja  
käytetä typensidontaan. Pohjolassa typpilaskeuma  
on alhaisempi kuin esimerkiksi Keski-Euroopassa,  
mutta täälläkin Leppänen ym. ovat havainneet jo  
Etelä- ja Keski-Suomen laskeumaa (3 kg N hehtaaria  
kohti vuodessa) vastaavan typpimäärän hidastavan  
yleisten metsäsammalien, seinäsammalen ja kerros-  
sammalen, typensidontaa huomattavasti. Alhaisen  
typpilaskeuman vallitessa sammat pidättävät las-  
keuman tyyppiä ja saattavat vaimentaa laskeuman  
vaikutuksia pohjoisissa metsissä, mutta pitoisuuden  
noustessa nitrostaatti voi kuitenkin pettää.

Typpilaskeuma voi heikentää myös soiden hiilen-  
sidontakykyä usealla tavalla: nopeuttamalla hajo-  
tusta ja ravinteiden kiertoa, antamalla kilpailuetua  
putkilokasveille, kuten suovarvuille ja saroille,  
tai inhiboimalla eli estämällä metaanin hapetusta.  
Kilpailuetu johtuu siitä, että typpi rajoittaa putki-  
lokasvien kasvua, vaikka biologinen typensidonta  
kyseenalastaakin yleisen käsityksen, että rahka-

sammalet olisivat typpirajoitteisia. Typpilaskeuman ammoniumionit voivat estää metaanin hapetusta ja siten edelleen häiritä suon sisäistä hiilen kiertoa ja metaanijarrua.

Sammal-bakteerisysteemi säätelee merkittävästi pohjoisten soiden hiilitasetta muuttuvassa ilmastossa. Osapuolten välille on kehittynyt vastavuoroinen suhde, jossa mikrobit antavat hiiltä ja typpeä sammalelle, jolta ne saavat orgaanisia yhdisteitä, suojaa ja mahdollisesti myös happea. Tiettyjen metaanin-hapettajakkeerilajien ja sammallajien esiintyminen suon eri kehitysvaiheissa viittaa myös samanlaisiin ekologisiin strategioihin isännällä ja kumppaneilla. Putkisen ym. tutkimus osoitti kiinnostavasti, että Siikajoella vanhojen soiden karu ja vakaa ympäristö näyttäisi suosivan juuri näihin oloihin erikoistuneita, stressiä sietäviä metaanin hapettajalajeja.

### Tulosten soveltaminen

Käytännön sovelluksena metaania hapettavaa rahkasammalta voidaan käyttää tilanteissa, joissa halutaan vähentää metaanipäästöjä, kuten kaatopaikoilla ja tuotannosta poistuneilla turvekentillä. Metsäntutkimuslaitoksessa käynnissä olevassa tutkimuksessa käytöstä poistettu turvetuotantoalue onkin tällä tavalla kasvitettu ja metaanipäästöjä onnistuttu pienentämään.

### Kirjallisuutta

- Larmola, T., Leppänen, S.M., Tuittila, E.-S., Aarva, M., Merilä, P., Fritze, H. & Tiirola, M. 2014. Methanotrophy induces nitrogen fixation during peatland development. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 111(2): 734–739.
- Leppänen, S.M., Salemaa, M., Smolander, A., Mäkipää, R. & Tiirola, M. 2013. Nitrogen fixation in forest mosses along a N deposition gradient. *Environment and Experimental Botany* 90: 62–69.
- Menge, D.N.L. & Hedin, L.O. 2009. Nitrogen fixation in different biogeochemical niches along a 120000-year chronosequence in New Zealand. *Ecology* 90: 2190–2201.
- Putkinen, A., Larmola, T., Tuomivirta, T., Siljanen, H.M.P., Bodrossy, L., Tuittila, E.-S. & Fritze, H. 2014. Peatland succession induces a shift in the community composition of Sphagnum associated active methanotrophs. *FEMS Microbiology Ecology* 88(3): 596–611.
- Raghoebarsing, A.A. ym. 2005. Methanotrophic symbionts provide carbon for photosynthesis in peat bogs. *Nature* 436: 1153–1156.
- Tuittila, E.-S., Juutinen, S., Frolking, S., Väiliranta, M., Laine, A., Miettinen, A., Seväkivi, M.-L., Quillet, A. & Merilä, P. 2013. Wetland chronosequence as a model of peatland development: Vegetation succession, peat and carbon accumulation. *Holocene* 23(1): 25–35.

■ Tuula Larmola, Helsingin yliopisto, metsätieteiden laitos & Metla, Vantaa;  
 Marja Tiirola & Majja Aarva, Jyväskylän yliopisto, bio- ja ympäristötieteiden laitos;  
 Sanna M. Leppänen, Jyväskylän yliopisto, bio- ja ympäristötieteiden laitos & Metla, Vantaa  
 Anuliina Putkinen & Hannu Fritze, Metla, Vantaa  
 Päivi Merilä, Metla, Oulu  
 Eeva-Stiina Tuittila, Helsingin yliopisto, metsätieteiden laitos & Itä-Suomen yliopisto, Joensuu  
 Sähköposti tuula.larmola@gmail.com