

# Veden imeytyksen vaikutukset metsämaahan ja kasvillisuuteen sekä vajo- ja pohjaveden laatuun

VIVA – tutkimushankkeen loppuraportti

Heljä-Sisko Helmisaari, John Derome, Veikko Kitunen, Antti-Jussi Lindroos, Ilari Lumme, Satu Monni, Pekka Nöjd, Laura Paavolainen, Erkki Pesonen, Maija Salemaa, Aino Smolander



VANTAAN TUTKIMUSKESKUS



# Veden imeytyksen vaikutukset metsämaahan ja kasvillisuuteen sekä vajo- ja pohjaveden laatuun

VIVA – tutkimushankkeen loppuraportti

Heljä-Sisko Helmisaari, John Derome, Veikko Kitunen, Antti-Jussi Lindroos, Ilari Lumme, Satu Monni, Pekka Nöjd, Laura Paavolainen, Erkki Pesonen, Maija Salemaa, Aino Smolander

Helmisaari, H-S., Derome, J., Kitunen, V., Lindroos, A-J., Lumme, I., Monni, S., Nöjd, P., Paavolainen, L., Pesonen, E., Salemaa, M. & Smolander, A. 1999. Veden imeytyksen vaikutukset metsämaahan ja kasvillisuuteen sekä vajo- ja pohjaveden laatuun – VIVA –tutkimushankkeen loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 721. 91 s. ISBN 951-40-1667-X. ISSN 0358-4283.

Abstrakti: VIVA-tutkimuksen tulosten mukaan ravinteikkaan ja happamuudeltaan neutraalin pintaveden sadetus metsämaan pinnalle kohotti jo muutamassa kuukaudessa maaperän pintakerroksen pH:ta ja emäsravinteiden määriä. Merkittävimmät seuraukset näistä muutoksista sekä pintamaan kosteuden lisääntymisestä olivat nitraatin tuoton alkaminen, kaasumaisten typpiyhdisteiden muodostumisen lisääntyminen sekä aluskasvillisuuden lajiston muuttuminen. Vajoveden mukana huuhtoutunut nitraatti ei kuitenkaan kohottanut pohjaveden nitraattipitoisuuksia suuren imeytysvesimäärän ja pienten imeytysalojen vuoksi. Pohjaveden nitraattityppipitoisuudet olivat koko tutkimuksen ajan hyvin lähellä pohjavesien keskimääristä pitoisuutta (0,2 mg NO<sub>3</sub>-N/l). Imeytysveden rautapitoisuus väheni veden vajotessa pintamaakerroksen läpi. Imeytys on saattanut alentaa myös pohjaveden rautapitoisuutta imeytysalueiden läheisyydessä. Vesinäytteiden orgaanisen aineen fraktiointi osoitti, että harjumaaperä pystyi käsittelemään merkittävän osan sadetusveden mukana tulevasta orgaanisesta kuormasta. Aluskasvillisuuden kunto ja pintaerosio asettivat rajat imeytysjaksojen pituudelle. Aluskasvillisuus kärsi imeytyksestä selvästi, ja lajimuutosten voimakkuus oli suorassa suhteessa imeytyksen keston. Kesäkauden mittaisina imeytystaukoina kasvillisuus toipui jonkin verran. Imeytysalojen sijainti jyrkillä rinteillä lisäsi maanpinnan eroosiota tutkimusjakson lopussa. Imeytys ei vaikuttanut haitallisesti puustoon; puuston kasvu ja ravinnetila jopa paranivat hieman.

Avainsanat: Aluskasvillisuus, maaperän happamuus, orgaaninen aine, puuston kasvu, ravinnetila, sadetusimeytys, tekopohjavesi, typen kierto, vajovesi

Julkaisija: METLA/Vantaan tutkimuskeskus/Hanke 972/hyväksytty 21.1.1999

Toimitus, piirrookset ja taitto: Sari Elomaa

Kansikuva: Sadetusimeytystä Ahveniston harjulla. Kuva E. Oksanen

Painopaikka: Tampereen tekstifilmi Ky, Tampere. 1999

Tilaukset: Hämeenlinnan kaupungin vesilaitos, Suosaarentie 4, 13210 Hämeenlinna. Puhelin 03-621 2290, Telekopio 03-621 2758

Kirjoittajien yhteystiedot: Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa. Puhelin 09-857 051, Telekopio 09-8572 575

Copyright: Metsäntutkimuslaitos

# Sisällys

ALKUSANAT .....	5
JOHDANTO .....	7
Tutkimuksen tavoitteet .....	10
TUTKIMUKSEN SUORITUS JA AIKATAULU .....	11
Tutkimusalue .....	11
Koejärjestely .....	14
Imeytysaikataulu .....	14
Sadetusmäärät .....	16
Tutkimusmenetelmät .....	17
Maaperätutkimukset .....	17
Kasvillisuustutkimukset .....	21
TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELO .....	25
Happamuus ja ravinnetila .....	25
Maaperän happamuus .....	25
Imeytysveden happamuuden muutokset maaperässä .....	27
Maaperän ja vajoveden ravinnetila .....	29
Pohjaveden laatuun vaikuttavien aineiden pitoisuudet .....	36
Päätelmät .....	41
Typen mineralisaatio, nitrifikaatio ja typen häviöt .....	42
Paras imeytysajankohta typen kierron suhteen? .....	52
Orgaaninen aine tekopohjaveden valmistuksessa .....	53
Ahveniston alue .....	53
Orgaanisen aineen laatu ja kulkeutuminen maaperässä .....	54
Päätelmät .....	56
Aluskasvillisuus .....	56
Kasvilajien peittävyden ja elinvoiman muutokset .....	56
Maaperän eroosio ja karikkeen muodostuminen .....	61
Päätelmät .....	62
Kuusen ja männyn sädekasvu .....	63
Talvi-imeytys kuusikoealoilla .....	64
Jatkuva kesäimeytys mäntykoealoilla .....	69
Kuusen lahovikaisuus .....	72

Kuusen ja männyn ravinnetila .....	73
Kesäimeytys .....	73
Talvi-imeytys .....	76
Päätelmät .....	77
Puuston ja aluskasvillisuuden hienajuuret .....	79
LOPPUPÄÄTELMÄT .....	82
Imeytyksen aiheuttamat muutokset .....	82
Maaperä, vajovesi ja pohjavesi .....	82
Kasvillisuus .....	84
Yhteenveto .....	85
Imeytyksen ajankohta, kesto ja toteutus .....	85
Imeytyksen pitkäaikaisvaikutukset .....	87
KIRJALLISUUS .....	89
LIITTEET	
Liite 1. Kartta tutkimusalueesta .....	92
Liite 2. Sadetusmäärät .....	93

# Alkusanat

Metsäntutkimuslaitoksen Vantaan tutkimuskeskus solmi keväällä 1996 tutkimussopimuksen Hämeenlinnan kaupungin teknisen viraston kanssa vuosiksi 1996–1998 aiheesta ”Veden imeytyksen vaikutukset metsämaahan ja kasvillisuuteen”. Tutkimus liittyi useissa Suomen kunnissa käytettävään uuteen tekopohjaveden muodostamistapaan, jossa pintavesi imeytetään metsämaahan sadettamalla. Tutkimuksessa selvitettiin imeytyksen vaikutuksia maaperään, puustoon, aluskasvillisuuteen sekä vajo- ja pohjaveden laatuun. Hankkeen rahoittajina olivat Hämeenlinnan kaupungin vesilaitos, Jyväskylän kaupungin vesilaitos, Mikkelin kaupungin vesilaitos, Tampereen ja Valkeakosken seudun vedenhankinnan projekti (TAVASE), Turun Seudun Vesi Oy, Tuusulan seudun vesilaitos kuntayhtymä sekä Maa- ja metsätalousministeriö (Suomen ympäristökeskuksen ja Hämeen ympäristökeskuksen kautta). Lisäksi Hämeen ympäristökeskus (1.3.1998 lukien Pirkanmaan ympäristökeskus) vastasi vesinäytteiden ammonium-, nitraatti- ja kokonaistyyppimäärytyksistä ja niiden kustannuksista.

Tutkimusta seurasi johtoryhmä, jonka kokoonpano oli seuraava:

Jouko Kettunen (pj.)	Hämeenlinnan kaupunki, tekninen virasto
Heikki Heino	” vesilaitos
Timo Tuomola	” metsätoimisto
Leo Aspholm	” vesilaitos
Jukka Airola	Hämeen ympäristökeskus
Paavo Päätalo	”
Markku Hantunen	Jyväskylän kaupungin vesilaitos
Heljä-Sisko Helmisaari	Metsäntutkimuslaitos
Risto Reijonen	Suomen Pohjavesiteknikka Oy
Tuomo Hatva	Suomen ympäristökeskus
Jorma Määttä	Turun Seudun Vesi Oy
Unto Tantt	Tuusulan seudun vesilaitos kuntayhtymä

Hankkeen toteutusta koordinoi työryhmä, jonka kokoonpano oli seuraava:

Heikki Heino (pj.)	Hämeenlinnan kaupunki, vesilaitos
Leo Aspholm	”
Paavo Päätalo	Hämeen ympäristökeskus
Merja Manninen	”
Markku Järvenpää	Jyväskylän kaupungin vesilaitos
Heljä-Sisko Helmisaari	Metsäntutkimuslaitos
Risto Reijonen	Suomen Pohjavesiteknikka Oy
Tuomo Hatva	Suomen ympäristökeskus

---

Hankkeessa tutkittiin veden imeytyksen vaikutuksia metsäekosysteemin eri toimintoihin. Tutkimuksen suorittaneet Metlan tutkijat edustivat eri alojen asiantuntemusta: MMT Heljä-Sisko Helmisaari (koordinaattori, ravinnekierto), MML John Derome ja FT Antti-Jussi Lindroos (epäorgaaninen maakemia ja hydrogeologia), FT Veikko Kitunen (orgaaninen maakemia), FT Ilari Lumme (puuston ravinnetila), MMT Pekka Nöjd ja FL Erkki Pesonen (puuston kasvu), FL Maija Salemaa ja FM Satu Monni (aluskasvillisuus), MMT Aino Smolander ja MMM Laura Paavolainen (maamikrobiologia). Lisäksi metsäpatologit Tuula Piri ja Kari Korhonen selvittivät syksyllä 1998 tutkimusalueen kuusten lahovikaisuutta. Typpioksiduulin mittaukset suoritettiin Kansanterveyslaitoksessa Kuopiossa (Dos. Pertti Martikainen, FM Hannu Nykänen).

Haluamme kiittää Hämeenlinnan kaupungin vesilaitoksen henkilökuntaa, erityisesti Leo Aspholmia, Heikki Heinoa, Teuvo Mölsää, Matti Nylundia, Pekka Suvantoa ja Heli Virtasta heidän arvokkaasta panoksestaan kenttätöiden toteutuksessa. Hämeenlinnan kaupunki vastasi sadetusimeytyksen toteutuksesta, tutkimusalueella välttämättömien rakenteiden rakentamisesta ja kunnossapidosta, laitteiden valvonnasta, vajovesi- ja imulysimetrinäytteiden keräämisestä sekä pohjavesinäytteiden otosta.

Metsäntutkimuslaitoksen Vantaan tutkimuskeskus kiittää tutkimushankkeen rahoittajia sekä johtoryhmän ja työryhmän jäseniä hyvästä yhteistyöstä kuluneiden kolmen vuoden aikana.

---

# Johdanto

Allasimeytystä tekopohjaveden muodostamiseksi on tehty Suomessa useilla paikkakunnilla jo kymmeniä vuosia. Allasimeytyksessä esiintyneiden ongelmien vuoksi on ryhdytty kokeilemaan pintaveden sadetusimeytystä harjujen maaperään. Tavoitteena on alentaa vesihuollon kustannuksia, parantaa tekopohjaveden laatua ja välttää ympäristöä vaurioittavien allasrakenteiden sijoittamista harjuihin.

Imeytettäessä pintavettä harjumaaperään veden oletetaan puhdistuvan samojen prosessien kautta kuin sadeveden. Maaperässä veden laatua muokkaavat suotautumisen, maaperän biologinen toiminta sekä adsorptio ja ioninvaihto. Nämä prosessit riittävät puhdistamaan sadeveden. Pintaveden imeytyksessä käytettävä raakavesi eroaa kuitenkin sadevedestä monelta osin. Imeytettävän veden pH (>7,0) on selvästi korkeampi kuin sadeveden pH, joka on tavallisesti välillä 4,0–5,0. Lisäksi maahan imeytettävä vesimäärä ja sen mukana tulevat ravinnemäärät ovat suuria luontaisessa ravinnekierrossa oleviin ainemääriin nähden. Tämä saattaa vaikuttaa veden puhdistumiseen maaperässä sekä muuttaa imeytysalueen kasvillisuutta.

Imeytys muuttaa metsän vesi- ja ravinnevirtoja, jotka puolestaan vaikuttavat pohjaveden laatuun. Maaperässä imeytysvesi voi vaikuttaa epäorgaanisten ravinteiden ja orgaanisen aineen pidättymiseen ja huuhtoutumiseen. Sade- tai imeytysveden sisältämät ionit vaihtavat maahiukkasten pinnoilta ioneja. Vaihtuneet ionit voivat edelleen huuhtoutua pohjaveteen, tai kasvit käyttävät niitä ravinteina. Osa kasvien ottamista ravinteista palautuu maahan karikkeessa, esim. havupuut varistavat joka syksy osan neulasistaan, ja maassa mikrobit hajottavat kuolleen kasviaineksen takaisin hiileksi ja ravinteiksi. Jos ravinteiden poistuma vajovedessä on pienempi kuin orgaanisesta aineesta vapautuva ja rapautumisen sekä imeytysveden mukana tuleva ravinnemäärä, maan pintakerroksen ravinteisuus voi lisääntyä. Sadetusveden sisältämä orgaaninen aine ja maan pinnalla oleva orgaaninen kerros voivat myös lisätä maan läpi valuvan vajoveden ravinteiden ja orgaanisen aineen määriä. Muutokset ravinteiden ja orgaanisen aineen huuhtoutumassa voivat vaikuttaa pohjaveden laatuun.

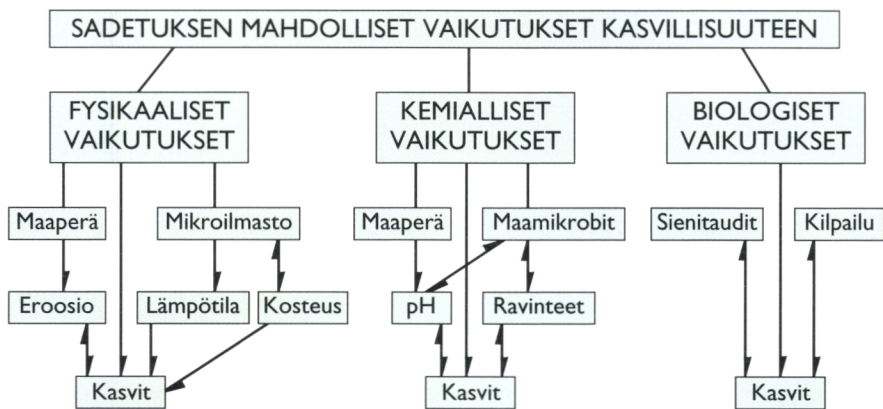
Typen kierron mikrobitoimintojen mahdolliset muutokset vaikuttavat kasvillisuuden typen saantiin ja vajoveden laatuun. Mikäli imeytys kiihdyttää typen vapautumista orgaanisesta aineesta eli typen mineralisaatiota, nostaa pH:ta tai aiheuttaa muita muutoksia, nitrifikaation ja denitrifikaation voimistuminen voi olla mahdollista. Typen mineralisaatiossa typpi muuntuu orgaanisesta muodosta epäorgaaniseen eli ammoniumtypeksi ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ). Nitrifikaatiossa nitrifikaatiobakteerit hapettavat

ammoniumista nitriitin ( $\text{NO}_2^-$ -N) kautta nitraattia ( $\text{NO}_3^-$ -N). Nitrifikaatio on yleensä olematonta metsämaissamme etenkin maan happamuuden takia (Martikainen 1996, Paavolainen ja Smolander 1998, Smolander ym. 1998). Jokin häiriötekijä, kuten maan pH:ta kohottava kalkitus (Smolander ym. 1995) tai avohakkuu (Smolander ym. 1998), voi kuitenkin lisätä metsämaan nitraatin tuottoa.

Nitraattityppi huuhtoutuu herkemmin kuin ammoniumtyppi, sillä nitraatti ei pidäty negatiivisesti varautuneiden maahiukkasten pinnalle. Nitraatti on pohjaveden laadun kannalta terveysriski; se aiheuttaa mm. methemoglobiniemiaa pienille lapsille. Raja-arvo nitraattitypen määrälle pohjavedessä on 6 mg/l (Sosiaali- ja terveysministeriön päätös nro 74, 1994).

Nitraattityppi voi poistua maasta huuhtoutumisen lisäksi myös kaasumaisessa muodossa haihtumalla. Näin tapahtuu denitrifikaatioissa, jossa nitraattia pelkistetään typen oksideiksi ( $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) ja edelleen  $\text{N}_2$ -kaasuksi. Lisäksi typen oksideja voi muodostua nitrifikaation sivutuotteena. Normaalisti  $\text{N}_2\text{O}$ -tuotto on kangasmetsämaissamme vähäistä (Martikainen ym. 1994). Se voi kuitenkin olla huomattavaa silloin, kun maassa on sekä nitraattia että maa on märkää, sillä denitrifikaatio tapahtuu hapettomissa oloissa.  $\text{N}_2\text{O}$  on voimakas kasvihuonekaasu ja haitallinen stratosfäärin otsonikerrokselle. Imeytyksessä denitrifikaation alkamista voidaan pitää pohjaveden laadun kannalta hyvänä asiana, koska se kuluttaa nitraattia ja estää siten sen huuhtoutumista pohjaveteen. Toisaalta denitrifikaatio vähentää kasvillisuudelle käyttökelpoisen typen määrää maassa.

Imeytys muuttaa kasvien elinympäristöä. Muutokset voivat olla fysiikaalisia, kemiallisia ja biologisia. Maaperän kosteudella, ravinteisuudella, happamuudella ja lämpötilalla on suuri vaikutus kasvilajien elin-



Kaavio sadetuksen vaikutuksista kasvillisuuteen.

---

kykyyn ja kasvuun. Suurten vesimäärien imeytys aiheuttaa muutoksia kaikissa näissä tekijöissä. Kosteuden sietokyky ei ole sama kaikilla kasvilajeilla. Kuivien kasvupaikkojen lajit kärsivät liiasta vedestä, mutta kosteutta hyvin sietävät lajit hyötyvät siitä. Liiallinen märkyys haittaa kasvien elintoimintoja sekä altistaa ne taudeille ja vaurioille. Pitkällä aikavälillä tämä näkyy lajien välisissä runsaussuhteissa siten, että kosteutta sietävät lajit saavat kilpailuetua muiden lajien taantuessa.

Tasaisella maalla imeytys voi aiheuttaa lammikoitumista ja täyttää maan huokostilan vedellä, minkä seurauksena kasvien juuret saattavat kärsiä ajoittain hapen puutteesta (Blom ja Voeselek 1998). Rinteellä pintamaan kyllästyminen vedellä on epätodennäköisempää. Toisaalta rinteet ovat tasamaata alttiimpia eroosiolle, joka vaikeuttaa kasvien kiinnittymistä maahan.

Talvella imeytys nostaa maan lämpötilaa ja kesällä taas alentaa sitä. Lämpötilalla on suuri vaikutus kasvien elintoimintoihin ja niiden vuodenaikaisrytmiin. Talvi-imeytys saattaa esimerkiksi estää kasvien asettumisen talvilepoon, mutta aikaistaa keväistä kasvuunlähtöä.

Sadetusimeytyksen puustovaikutukset riippuvat puulajista sekä puuston iästä ja rakenteesta. Varttuneen puuston juuristo ulottuu laajalle, joten imeytyksen puustovaikutukset saattavat olla yhteydessä imeytysalan kokoon ja sadetusputkiston sijoitteluun. Imeytysveden vaikutuspiirissä olevat juuret saattavat kärsiä hapen puutteesta, mutta erityisesti vähäsateisina kasvukausina imeytyksellä saattaa olla positiivisia vaikutuksia puiden vesitaloudelle ja kasvulle. Toisaalta ravinteiden mahdollinen huuhtoutuminen maan pintakerroksesta imeytyksen myötä voi aiheuttaa puissa ravinnepuutoksia. Sadetusveden sisältämät ravinteet voivat toisaalta korvata huuhtoutumaa. Lisäksi jatkuva vesivirtaus maassa saattaa muuttaa puiden ravinteiden ottoa.

Mikäli sadetusimeytyksen vaikutus puiden elintoimintoihin on riittävän voimakas, puuston kasvu muuttuu. Kasvun selkeä hidastuminen sadetetuilla koealoilla viittaisi ongelmiin puiden aineenvaihdunnassa. Koska imeytystä tehdään myös talvella, on tärkeää seurata muutoksia puiden vuosirytmisissä (mm. elintoimintojen käynnistyminen keväällä ja niiden päättyminen syksyllä). Talvilepo suojaa puita epäedullisia sääoloja vastaan: lyhytaikaiset lämpimät jaksoakaan eivät mainittavasti vauhdita puun aineenvaihduntaa, yhteyttämistä sekä veden ja ravinteiden ottoa maaperästä. Talvella puu kestää myös erittäin mataliakin lämpötiloja. Lepotilan purkauduttua keväällä puun kylmänkestävyys heikentyy huomattavasti. Onkin mahdollista, että sadetus aikaistaa puun elintoimintojen käynnistymistä keväällä, mikä voi lisätä pakkasvaurioiden riskiä.

Puilla on veden saannin suhteen optimi, jonka voimakas sadetus saattaa ylittää. Toisaalta tähänastisten Skandinavian oloissa tehtyjen kokeiden mukaan optimaalisesti suoritettu keinokastelu lisää voimakkaasti

---

erityisesti kuusen kasvua. Sädekasvua seuraamalla voidaan havaita sekä mahdollinen kasvunlisäys että vakavat kasvua heikentävät toiminnalliset häiriöt.

Sadetusimeytyksellä saattaa olla imeytysalueen metsäekosysteemiin monitahoisia vaikutuksia, jotka on tunnettava arvioitaessa sadetusimeytystä tekopohjaveden muodostamistapana. Vaikutusten määrä ja laatu riippuu imeytettävän raakaveden määrästä ja laadusta, imeytysalueen maaperästä ja kasvillisuudesta sekä imeytystavasta, ajankohdasta ja kestosta.

## Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää sadetusimeytyksen vaikutuksia maaperän happamuuteen, ravinnetilaan ja orgaaniseen aineeseen, aineiden huuhtoutumiseen, maaperän mikrobiologisiin ominaisuuksiin sekä puuston ravinnetilaan, kasvuun ja terveydentilaan sekä aluskasvillisuuteen keskipitkällä aikavälillä (3 vuotta).

Tutkimuksessa selvitettiin erikseen talvella ja kesällä tapahtuvan imeytyksen vaikutuksia. Lisäksi tutkittiin onko tarpeellista jaksottaa imeytystä kesän aikana varsinkin aluskasvillisuudelle mahdollisesti aiheutuvien haittojen vähentämiseksi.



E. Oksanen

Kuva 1. Tutkimusalue Ahveniston harjulla syksyllä 1997.

---

# Tutkimuksen suoritus ja aikataulu

## Tutkimusalue

Ahveniston harju on osa merkittävää Salpausselkien pohjoispuolella sijaitsevaa kaakkois-luodesuuntaista pitkittäisharjujaksoa, jossa sora- ja moreenimuodostumat vaihtelevat. Harjujakso on tärkeä pohjaveden muodostumisalue (Harjumme...1995). Tutkimusalue sijaitsi itään viettävällä kivisellä moreenirinteellä (kuva 1), jonka kasvillisuus edustaa tuoretta keskiravinteista lehtoa (käenkaali-oravanmarja -metsätyyppi, *Oxalis-Maianthemum* -tyyppi, OMaT). Rinteen jyrkkyys ja ilmansuunta vaikuttavat suuresti harjukasvillisuuden monimuotoisuuteen ja lajikoostumukseen. Lukuunottamatta vertailualaa 4, joka oli harjun laella, muut koealat sijaitsivat itäisellä varjorinteellä (liite 1). Kasvillisuutta luonnehtivat sekä tyyppilliset kangasmetsälajit kuten puolukka ja mustikka että viljavien kasvupaikkojen vaateliaimmat ruohot, heinät ja sammalet. Tutkimusalueella ei havaittu uhanalaisia kasvilajeja, mutta esimerkiksi harvinaiset harjukasvilajit idänkeulankärki (*Oxytropis campestris*) ja tunturikurjenherne (*Astragalus alpinus*) kasvoivat imeytysaltaan toisella puolella etelään suuntautuvalla valorinteellä.

Tutkimusalueen kasvillisuuden rehevyys selittyy suurelta osin ravinteikkaalla maaperällä ja suotuisilla kosteusoloilla. Maaperän orgaaninen kerros on suurimmalta osalta tutkimusaluetta lehtomultaa (paksuus 6–8 cm), joka muuttuu vähitellen kivennäismaaksi syvemmälle mentäessä. Koealojen maaperän ravinteisuus ja valoilmasto vaihtelivat jonkin verran, mikä näkyi myös kasvilajien runsassuhteissa. Esimerkiksi vertailualan 1 orgaaninen kerros on ohuempi ja paikoitellen kangashumusta, ja sen kasvilajistossa on enemmän kuivien kangasmetsien piirteitä kuin muilla koealoilla. Tämä ilmenee puustossa männyn yleisyytenä ja aluskasvillisuudessa seinäsammalen runsautena ja metsäkerrossammalen niukkuutena.

Tutkimusalueen kasvilajien lukumäärä oli suuri. Tutkimuksen aloitusvuonna 1996 lajeja löydettiin yhteensä 97 kappaletta, joista putkilokasveja oli 72, lehtisammalia 21 ja maksasammalia 4 (taulukko 1). Tyyppillisiä pensaskerroskokoisia lajeja olivat taikinamarja (*Ribes alpinum*), korpipaatsama (*Rhamnus frangula*), lehtokuusama (*Lonicera xylosteum*), pihlaja (*Sorbus aucuparia*) ja harmaaleppä (*Alnus incana*). Vaikka tutkimusalue ei täytä kaikkia avainbiotooppimäärittelyn ehtoja, sitä voidaan pitää luonnon monimuotoisuuden kannalta erityisen arvokkaana (Harjumme...1995). Tutkimusalueen läheisyydessä kasvaa harvinaisten harjukasvien esiintymiä, joiden kasvupaikkojen suojeleminen on tärkeää.

Taulukko 1. Ahveniston harjun koealojen kasvilajisto. Putkilokasvilajien, lehtisammalten ja maksasammalten keskimääräiset runsaudet neliömetrin näyteruuduilla (n=8–15 ruutua/koeala) 5–10.6.1996 prosenttipeittävyysinä arvioituna. Pensaskerroksen lajiluettelo.

Kasvilajisto:		Peittävyys % Koealat					
		1	2	3	4	5	6
Putkilokasvilajit:							
<i>Achillea millefolium</i>	Siankärsämö	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00
<i>Agrostis capillaris</i>	Nurmiröllä	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Alnus incana</i>	Harmaaleppä	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
<i>Anemone nemorosa</i>	Valkovuokko	3,14	0,86	4,66	5,56	5,14	6,00
<i>Angelica sylvestris</i>	Karhunputki	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Betula pendula</i>	Rauduskoivu	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
<i>Betula pubescens</i>	Hieskoivu	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
<i>Brachypodium pinnatum</i>	Mäkilehtoluste	0,00	0,30	0,00	0,00	14,14	0,00
<i>Calamagrostis arundinacea</i>	Metsäkastikka	2,19	0,77	5,20	4,63	9,86	22,75
<i>Campanula persicifolia</i>	Kurjenkello	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
<i>Carex digitata</i>	Sormisara	0,34	0,07	0,20	0,54	0,01	0,15
<i>Carex vaginata</i>	Tuppisara	0,00	0,00	0,08	0,01	0,03	0,13
<i>Convallaria majalis</i>	Kielo	0,96	0,00	1,58	0,86	0,74	0,00
<i>Deschampsia cespitosa</i>	Nurmilauha	0,06	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00
<i>Deschampsia flexuosa</i>	Metsälauha	7,00	2,93	5,72	5,10	1,00	0,15
<i>Dryopteris carthusiana</i>	Metsäalvejuuri	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Epilobium angustifolium</i>	Maitohorsma	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
<i>Festuca ovina</i>	Lampaannata	0,00	1,87	0,00	0,01	0,21	1,00
<i>Filipendula ulmaria</i>	Mesiangervo	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
<i>Fragaria vesca</i>	Metsämansikka	0,24	0,14	0,59	1,04	0,07	0,33
<i>Galium boreale</i>	Ahomatara	0,10	0,00	0,73	0,37	2,07	4,81
<i>Geranium sylvaticum</i>	Metsäkurjenpolvi	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,08
<i>Geum rivale</i>	Ojakellukka	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	Metsäimarre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00
<i>Hieracium</i> sp.	Keltano-ryhmä	0,01	0,00	0,00	0,07	0,07	0,00
<i>Hierochloa australis</i>	Metsämaarianheinä	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
<i>Hepatica nobilis</i>	Sinivuokko	1,52	0,33	2,70	6,06	3,86	4,38
<i>Hypericum maculatum</i>	Särmäkuisma	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
<i>Lathyrus vernalis</i>	Kevätlinnunherne	0,00	0,00	0,00	0,03	0,09	0,64
<i>Linnaea borealis</i>	Vanamo	0,18	0,80	0,51	0,08	0,00	2,19
<i>Lonicera xylosteum</i>	Lehtokuusama	0,00	0,00	0,01	0,43	0,00	0,00
<i>Luzula pilosa</i>	Kevätpiippo	0,42	0,62	0,91	0,61	0,19	0,14
<i>Lycopodium annotinum</i>	Riidenlieko	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Maianthemum bifolium</i>	Oravanmarja	8,83	2,77	3,50	2,02	1,01	1,04
<i>Melampyrum sylvaticum</i>	Metsämaatikka	0,01	0,01	0,10	0,14	0,01	0,01
<i>Melica nutans</i>	Nuokkuhelmikkä	0,03	0,03	0,04	0,53	0,01	0,28
<i>Monotropa hypopitys</i>	Mäntykukka	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Orthilia secunda</i>	Nuokkotalvikki	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
<i>Oxalis acetosella</i>	Käenkaali	0,80	0,28	2,18	2,27	0,46	0,26
<i>Paris quadrifolia</i>	Sudenmarja	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
<i>Picea abies</i>	Kuusi	0,18	0,14	0,01	0,78	0,50	3,50
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Ahopukinjuuri	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00
<i>Polypodium odoratum</i>	Kalliokieli	0,03	0,00	0,10	1,37	0,00	0,01
<i>Potentilla erecta</i>	Rätvänä	0,01	0,00	0,00	0,07	0,01	0,00
<i>Pteridium aquilinum</i>	Sananjalka	0,00	0,00	0,14	0,97	0,01	0,31
<i>Pyrola media</i>	Kellotalvikki	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
<i>Pyrola rotundifolia</i>	Isotalvikki	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
<i>Quercus robur</i>	Metsätammi	0,00	0,00	0,06	0,20	0,00	0,00
<i>Ribes alpinum</i>	Taikinaranja	0,00	0,00	0,13	0,30	0,07	0,09
<i>Rubus idaeus</i>	Vadelma	0,53	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Rubus saxatilis</i>	Lillukka	0,61	0,00	0,46	0,00	0,14	0,00
<i>Salix starkeana</i>	Ahopaju	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Kasvilajisto:		Peittävyys %					
		Koealat					
		1	2	3	4	5	6
<i>Solidago virgaurea</i>	Kultapiisku	0,10	0,03	0,00	0,30	0,23	0,60
<i>Sorbus aucuparia</i>	Pihlaja	1,32	1,14	1,56	1,47	0,17	0,34
<i>Trientalis europea</i>	Metsätähti	1,48	0,62	1,00	0,74	0,67	0,63
<i>Vaccinium myrtillus</i>	Mustikka	31,90	13,40	22,00	28,80	2,64	6,63
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	Puolukka	2,38	15,60	0,83	1,20	0,14	1,83
<i>Veronica chamaedrys</i>	Nurmitädyke	0,02	0,03	0,12	0,10	0,00	0,00
<i>Veronica officinalis</i>	Rohtotädyke	0,05	0,01	0,14	0,05	0,21	0,14
<i>Viburnum opulus</i>	Koiranheisi	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
<i>Vicia cracca</i>	Hiirenvirna	0,01	0,00	0,03	0,01	0,00	0,06
<i>Vicia sativa</i>	Rehuvirna	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
<i>Viola canina</i>	Aho-orvokki	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
<i>Viola mirabilis</i>	Lehto-orvokki	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
<i>Viola riviniana</i>	Metsäorvokki	0,00	0,00	0,17	0,22	0,09	0,14
Lehtisammalet:							
<i>Aulacomnium palustre</i>	Suonihuopasammal	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Brachythecium oedipodium</i>	Metsäsuikerosammal	0,28	0,86	1,90	2,54	0,87	0,66
<i>Brachythecium strobiliferum</i>	Kiiltosuikerosammal	0,01	0,00	0,01	0,00	0,14	0,00
<i>Brachythecium starkei</i>	Kantosuikerosammal	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
<i>Brachythecium velutinum</i>	Sirosuikerosammal	10,20	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00
<i>Cirriphyllum piliferum</i>	Lehtohaivensammal	0,33	0,00	0,00	0,80	0,01	0,01
<i>Dicranum majus</i>	Isokynsisammal	0,66	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00
<i>Dicranum polysetum</i>	Kangaskynsisammal	5,26	5,40	12,20	0,51	7,16	7,40
<i>Dicranum scoparium</i>	Kivikynsisammal	0,14	0,00	0,01	0,00	0,14	0,59
<i>Hylocomium splendens</i>	Metsäkerrosammal	1,48	10,50	8,54	15,40	27,00	18,63
<i>Plagiomnium affine</i>	Lehtolehväsammal	0,28	0,64	0,64	0,44	2,57	2,34
<i>Plagiothecium denticulatum</i>	Kivilaakasammal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
<i>Plagiothecium laetum</i>	Kantolaakasammal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<i>Pleurozium schreberi</i>	Seinäsaammal	51,20	21,40	10,30	13,50	8,87	12,63
<i>Pohlia nutans</i>	Nuokkuvarstasammal	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00
<i>Ptilium crista-castrensis</i>	Sulkasammal	0,14	0,20	0,00	0,00	0,00	0,01
<i>Rhizomnium punctatum</i>	Kilpilehväsammal	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
<i>Rhizomnium pseudopunctatum</i>	Lettolehväsammal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<i>Rhodobryum roseum</i>	Ruusukesammal	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
<i>Rhytidiadelphus triquetrus</i>	Metsäliekosammal	0,01	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
<i>Sanionia uncinata</i>	Metsäkamppisammal	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Maksasammalet:							
<i>Barbilophozia barbata</i>	Metsäpykäsammal	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00
<i>Chiloscyphus profundus</i>	Lahoalvesammal	0,07	0,00	0,01	0,02	0,01	0,03
<i>Plagiochila asplenioides</i>	Isokastesammal	2,80	0,00	0,47	3,60	1,46	0,01
<i>Ptilidium ciliare</i>	Isokorallisammal	0,13	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00
Pensaat (50–150 cm):							
<i>Alnus glutinosa</i>	Tervaleppä						
<i>Alnus incana</i>	Harmaaleppä						
<i>Betula pendula</i>	Rauduskoivu						
<i>Betula pubescens</i>	Hieskoivu						
<i>Lonicera xylosteum</i>	Lehtokuusama						
<i>Juniperus communis</i>	Kataja						
<i>Picea abies</i>	Kuusi						
<i>Pinus sylvestris</i>	Mänty						
<i>Populus tremula</i>	Haapa						
<i>Quercus robur</i>	Tammi						
<i>Rhamnus frangula</i>	Korpipaatsama						
<i>Ribes alpinum</i>	Taikinamarja						
<i>Salix sp.</i>	Pajut						
<i>Sorbus aucuparia</i>	Pihlaja						

---

Metsänhoidollisia toimenpiteitä ja muita ihmistoimintoja tulee tällaisilla paikoilla tehdä erittäin varovaisesti.

## Koejärjestely

Ahveniston harjulla suoritettiin tekopohjavesitutkimuksia vuosina 1995-1997, joiden perusteella alueella päätettiin kokeilla sadetusimeytystä pohjaveden rauta- ja mangaanipitoisuuksien alentamiseksi (Reijonen 1997). Sadetusimeytys aloitettiin joulukuussa 1995 kolmella imeytysalueella (koealat 5, 6 ja 7). Tämän tutkimuksen käynnistyttyä harjulle perustettiin toukokuussa 1996 viisi koealaa, joilla imeytyksen vaikutuksia tutkittiin: talvi-imeytysala (koeala 5), kesällä jatkuvasti imeytettävä ala (koeala 2) ja kesällä jaksotettu imeytettävä ala (koeala 3) sekä kaksi vertailualaa (koealat 1 ja 4) (kuva 2). Aluskasvillisuus- ja maaperätutkimuksia tehtiin myös jatkuvasti imeytetyllä alueella (ka 6), jota imeytettiin 14.12.1995–18.9.1998. Maaperän palautumista imeytyksen vaikutuksesta tutkittiin v. 1997 ja 1998 myös koealalla 7, jota imeytettiin 14.12.1995–30.10.1996.

Koealat 1, 2 ja 3 olivat mäntyvaltaisia ja koealoilla 4 ja 5 valtapuuna oli kuusi (taulukko 2). Kaikkien koealojen puusto oli vanhaa, metsätaloudellisten luokitusten mukaan yli-ikäistä. Puuston keskiläpimitta (ppa:lla painotettu), oli kaikilla koealoilla samaa suuruusluokkaa: 37–41 cm. Myös puuston keskipituus vaihteli vain vähän eri koealoilla (27–28,5 m).

Mäntyvaltaisilla koealoilla puustoa oli selvästi enemmän kuin kuusi-valtaisilla koealoilla. Runkoluku vaihteli välillä 143–327 kpl/ha. Tiheyserot näkyivät myös pohjapinta-alassa, joka vaihteli kuusialoilla välillä 15–22 m<sup>2</sup>/ha ja mäntyaloilla välillä 31–35 m<sup>2</sup>/ha.

## Imeytysaikataulu

### 1996

Talvi-imeytys (koeala 5) 14.12.1995–3.6.1996.

Jaksotettu kesäimeytys (koeala 3) 12.6.–12.7.1996 sekä 12.8.–12.9.1996.

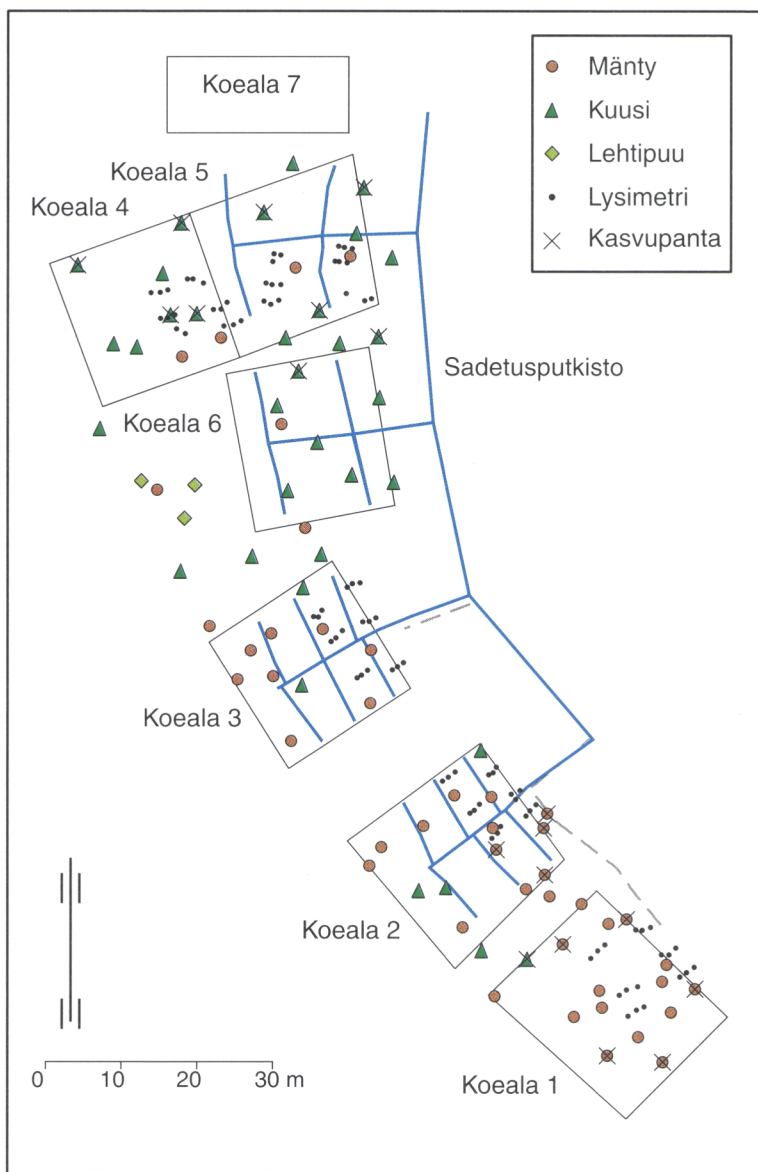
Jatkuva kesäimeytys (koeala 2) 25.6.–30.10.1996.

### 1997

Talvi-imeytys (koeala 5) 30.10.1996–3.3.1997 sekä 4.4.–16.5.1997.

Jaksotettu kesäimeytys (koeala 3) 9.6.–21.7.1997 sekä 18.8.–15.9.1997.

Jatkuva kesäimeytys (koeala 2) 16.5.–6.10.1997.



Kuva 2. Koealojen sijainti tutkimusalueella.

### 1998

Talvi-imeytys (koeala 5) 27.10.1997.–18.5.1998.

Jaksotettu kesäimeytys (koeala 3) 8.6.–20.7.1998 sekä 17.8.–18.9.1998.

Jatkuva kesäimeytys (koeala 2) 18.5.–29.10.1998.

Taulukko 2. Puustotunnukset koaloilla 1–5.

Koala		1	2	3	4	5
Runkoluku, kpl/ha	Kokonaispuusto	321	327	264	179	143
	Männyt	300	257	211		48
	Kuuset	21	70	53	179	95
Pohjapinta-ala (kuorellinen), m <sup>2</sup> /ha	Kokonaispuusto	35,3	33,5	31,4	21,8	15,3
	Männyt	33,6	24,7	23,2		4,1
	Kuuset	1,7	8,8	8,2	21,8	11,2
Runkotilavuus, m <sup>3</sup> /ha	Kokonaispuusto	431	412	373	270	195
	Männyt	408	301	284		51
	Kuuset	22	111	89	270	144
Keskiläpimitta (ppa:lla painotettu), cm	Kokonaispuusto	37,9	37,4	40,1	40,7	38,4
	Männyt	38,2	36,3	37,8		36,4
	Kuuset	32,1	40,3	46,7	40,7	39,1
Keskipituus (aritmeettinen), m	Kokonaispuusto	27,1	26,8	26,9	28,6	28,4
	Männyt	27,1	26,4	26,9		26,3
	Kuuset	27,4	28,3	26,7	28,6	29,5

Tutkimus käynnistyi alkukesällä 1996, joten kyseisenä vuonna kesän imeytysjakso jäi vuosia 1997 ja 1998 lyhyemmäksi. Talvi-imeytys oli keskeytynyt 3.3.–4.4. 1997 väliseksi ajaksi imeytysputkien uusimisen vuoksi.

## Sadetusmäärät

Sadetettava pintavesi pumpattiin Alajärvestä, joka sijaitsee n. 4 km:n päässä imeytysalueesta. Sadetusputket kulkivat harjurinteessä kahdessa rivissä talvikautisella imeytysalalla. Kesäkautena sadetettavilla aloilla putkirivejä oli kolme. Sadetus tapahtui putkien molemmilla puolilla olevista 4–5 mm läpimittaisista rei'istä n. 20 cm:n välein (kuva 3). Veden imeytymisalue oli n. 3 m<sup>2</sup>/putkimetri. Sadetukseen käytettiin vettä n. 1,1–1,3 m<sup>3</sup> tunnissa/putkimetri, jolloin pintakuormaksi tuli n. 400 mm/h (liite 2). Tämä vastaa muillakin alueilla tekopohjavesikokeiden aikana käytössä olleita pintakuormia (Mäkelä & Reijonen 1993). Talvi-imeytysalan kokonaissadetusmäärät olivat talvella 1995–1996 1778 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, 1996–1997 1706 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> ja 1997–1998 1669 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Kesäisin jatkuvasti imeytetyllä alalla imeytettiin 1118 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> vuonna 1996, 1258 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> vuonna 1997 ja 1452 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> vuonna 1998. Vastaavat luvut jaksotetulla imeytysalalla olivat 493 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> vuonna 1996, 634 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> vuonna 1997 ja 607 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> vuonna 1998. Sadetusmäärät olivat n. 8,8–10,4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/vrk. Tämä vastaa yli 2000 kertaista keskimääräistä vuotuista sademäärää.



Kuva 3. Etualalla sadetusimeytystä Ahveniston harjulla talvella 1996. Taustalla imeytysallas.

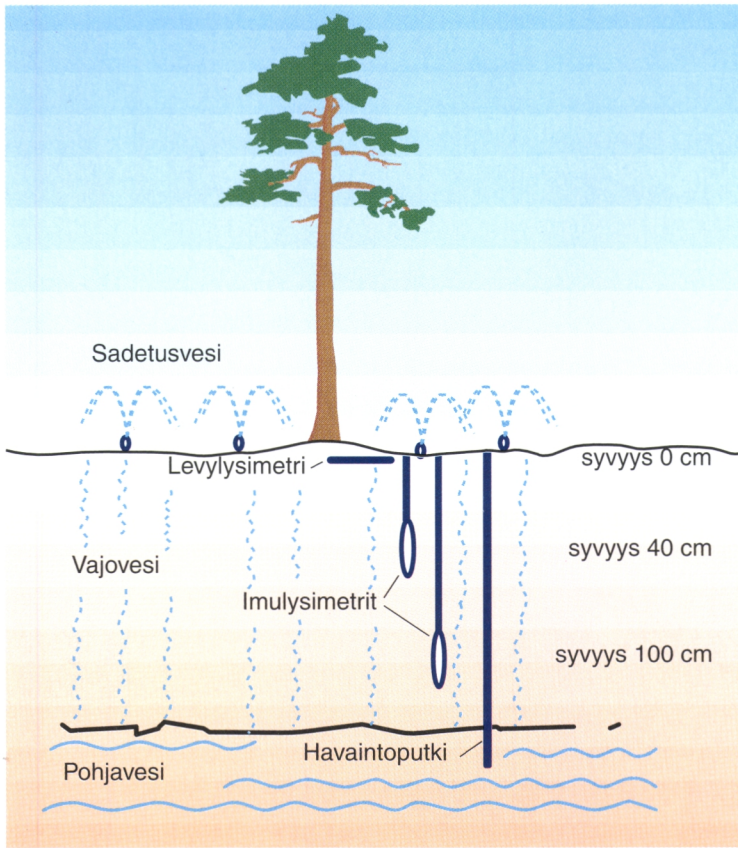
## Tutkimusmenetelmät

### Maaperätutkimukset

#### Vesinäytteet

Imeytysveden koostumuksen muutoksia maaperässä ja vaikutuksia maaperän kemialliseen tilaan tutkittiin vesi- ja maanäytteistä. Vesianalyysjä tehtiin sadetus-, vajo- ja pohjavedestä (kuva 4). Vajovettä kerättiin humuskerroksen ja kivennäismaan rajalle asennetuilla levylysimitreillä (kivennäismaan syvyys 0 cm, 6 lysimetriä/koeala). Vajo- ja maavettä kerättiin kivennäismaasta syvyyksiltä 40 ja 100 cm imulysimitreillä. Imulysimetrejä oli 6 kpl/koeala molemmilla syvyyksillä. Imulysimetrien keräämä vesi oli imeytysaloilla pääasiassa maassa painovoiman vaikutuksesta alaspäin valuvaa vettä, minkä vuoksi jäljempänä myös imulysimetrien keräämää vettä kutsutaan vajovedeksi.

Näytteenottojaksot vaihtelivat jonkin verran kolmivuotisen tutkimuksen aikana. Tutkimuksen alussa lysimetrien toimintaa seurattiin intensiivisesti, minkä vuoksi näytteitä kerättiin jopa päivittäin, ja analyysit tehtiin lysimetrikohtaisesti. Lysimetrijärjestelmän osoittauduttua toimivaksi, sadetus- ja vajovesinäytteitä kerättiin kesästä 1997 alkaen viikon



Kuva 4. Vesinäytteitä otettiin lysimetrien ja havaintoputkien avulla.

välein, ja koealan osanäytteistä muodostettiin yksi kokoomanäyte/näytteenottokerta. Pohjavesinäytteet otettiin havaintoputkista 9601, 9406, 9407, 9502 ja 9504 (ks. liite 1) säännöllisesti tutkimusjakson ajan. Eri-tyshuomio kiinnitettiin havaintoputkeen 9601, jonka sijaintinsa vuoksi (kesäimeytysalan vieressä) oletettiin edustavan parhaiten imeytyksessä muodostuvaa tekopohjavettä. Putki 9502 sijaitsi lähellä talvi-imeytysalaa ja putki 9407 lähellä Hämeenlinnan kaupungin toista imeytysaluetta. Muut havaintoputket sijaitsivat kauempana tutkimusalueesta.

Vesinäytteistä määritettiin pH ja metallit atomiemissiospektrofotometrillä (ICP/AES). Liukoinen orgaaninen hiili määritettiin TOC-analysaattorilla. Liukoinen orgaaninen hiili koostuu pääasiassa komponenteista  $< 0,45 \mu\text{m}$ . Nämä analyysit tehtiin Metlan Vantaan tutkimuskeskuksen keskuslaboratoriossa. Hämeen ympäristökeskuksessa määritettiin ammoniumtyppi (SFS 3032), nitriitti- ja nitraattitypen summa sekä kokonaistyyppi (Lachat QuicChem 8000, FIA).

## Maanäytteiden otto

Maanäytteitä otettiin kaikkien koealojen humuskerroksesta kolme kertaa kesäkausien aikana, paitsi 5.6.1996 ei koealalta 3. Lisäksi alkukesälä 1996 ja 1998 näytteet otettiin myös kivennäismaasta. Näytteenottoajankohdat valittiin siten, että jaksotetulla imeytysalalla ei ollut imeytystä käynnissä. Maanäytteet otettiin humus- (paksuus n. 5–10 cm) ja kivennäismaakerroksesta (10 cm:n syvyyteen asti) kairalla, jonka halkaisija oli 2,5 cm. Imeytysaloilla näytteet otettiin imeytysputkien alapuolelta 2 metrin päästä ja vertailualoilta vastaavista kohdista. Kesäimeytysaloilla 2 ja 3 maanäytteitä otettiin 20 kpl/putkirivi, ja osanäytteet yhdistettiin. Talvi-imeytysalalla 5 otettiin ylimmän putkirivin luota 20×2 maanäytettä ja alemman putkirivin luota 20 maanäytettä, ja nämä osanäytteet yhdistettiin kuten edellä. Yhdistettyjä näytteitä oli yhteensä 3 kpl/koeala. Lisäksi maan pH-arvoa putkirivien välissä selvitettiin ottamalla 21.7.1997 imeytysaloilta 2 ja 5 humusnäyte myös putkirivien välistä.

Maan pH-arvon mahdollista palautumista imeytyksen päätyttyä seurattiin ottamalla koealalta 7 humusnäytteet 21.7.1997, 7.10.1997 ja 23.9.1998 (aluetta oli imeytetty ainoastaan 14.12.1995–30.10.1996). Koealalla, jota oli imeytetty jatkuvasti kolmen vuoden ajan (koeala 6) otettiin humusnäytteet 22.7.1998.

Laboratoriossa tuoreet maanäytteet seulottiin 2,0 mm (kivennäismaa) tai 2,8 mm (humus) seulalla. Lisäksi pH:n paikallisen vaihtelun selvittämiseksi otettiin 22.7.1998 68 näytettä koealan 5 humuskerroksesta systemaattisesti kahden metrin välein.

## Maaperän happamuus ja ravinnetila

Tuoreista humus- ja kivennäismaanäytteistä mitattiin pH vesilietoksesta. Lisäksi 5.6.1996 ja 25.5.1998 otetuista kuivatuista humus- ja kivennäismaanäytteistä määritettiin vaihtuvat ravinteet ammoniumasettiinuuoksella (pH 4,65) ja metallien pitoisuudet uuttoliuoksesta ICP/AES:lla. Analyysit tehtiin Metlan keskuslaboratoriossa.

## Typen mineralisaatio, nitrifikaatio ja typen häviöt

Nettoammonifikaatio- ja -nitrifikaatioinkubaatiokokeessa neljän rinnakkaisen maanäytteen (4 g kuivapaino) kosteus säädettiin 60 %:iin kenttäkapasiteetista. Kahdesta rinnakkaisesta näytteestä (nollanäytteet) uutettiin  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  ja  $(\text{NO}_2^-+\text{NO}_3^-)\text{-N}$  1 M KCl-liuoksella. Loput näytteet asetettiin inkuboitumaan lämpökaappiin (+14°C 6 vk). Inkubaation jälkeen näytteet uutettiin kuten nollanäytteet. Uuttoliuoksista mitattiin  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  ja  $(\text{NO}_2^-+\text{NO}_3^-)\text{-N}$  virtausinjektorianalysaattorilla (Tecator FIA 5012). Nettonitrifikaation ja -ammonifikaation laskemisessa nollanäytteiden  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  ja  $(\text{NO}_2^-+\text{NO}_3^-)\text{-N}$  pitoisuudet vähennettiin

inkuboitujen näytteiden pitoisuuksista. Mineraalityypen nettomuodostuminen laskettiin nettonitrifikaation ja -ammonifikaation summana.

Denitrifikaatiossa ja nitrifikaation sivutuotteena syntyvän typpioksiduulin ( $N_2O$ ) tuottoa maasta mitattiin maastossa maahan asennettavien kaasunkeräyskammioiden avulla (3 kpl/koeala, kuva 5) samoina ajankohtina kuin maanäytteet otettiin nitrifikaatioinkubaatiota varten. Kaasuja kerättiin kammioista 50 ml:n B-D Plastipak ruiskuihin 3, 15 ja 30 minuutin väliajoin. Ruiskut suljettiin Connecta 3-tiehanooilla ja toimitettiin Kansanterveyslaitokselle Kuopioon, jossa ne mitattiin seuraavana päivänä kahdella toisiinsa kytketyillä HP 5890 Series II kaasukromatografilla (EC-detektori). Kaasun tuotto laskettiin kammion kaasupitoisuuden lineaarisesta muutoksesta ajan suhteen (kun kammion koon ja sen lämpötilan vaikutus oli huomioitu).

### Orgaanisen aineen fraktiointi

Liukoisen orgaanisen aineen yksityiskohtaisempaa tutkimusta varten näytteet (2 l) kerättiin havaintoputkista 9601, 9502, 9504 sekä kaivosta K4 ja sadetettavasta pintavedestä. Näytteet pakastettiin ja säilytettiin pakastettuna näytteen käsittelyä varten. Näytteistä analysoitiin talvi- (11.12.1997), kevät- (13.5.1998), kesä- (20.8.1998) ja syyskautta (7.9.1998) edustavat näytesarjat.

Tutkimusmenetelminä käytettiin kahta toisiaan tukevaa tekniikkaa. Ultrasuodatuksella pyrittiin arvioimaan, minkä kokoinen aines kulkeu-



Kuva 5. Typpioksiduulin ( $N_2O$ ) tuoton mittausta Ahveniston harjulla syksyllä 1997.

---

tui syvemmälle maaperään ja tapahtuiko maassa suotautumista, joka liittyy liukoisuuteen ja molekyylikokoon. Liuenneen aineen kemiallisen rakenteen tarkastelulla pyrittiin selvittämään kulkeutuvien/pidättyvien yhdisteiden ja yhdisteryhmien kemiallinen luonne. Nämä kaksi lähestymistapaa osoittivat sen, millainen aines pidättyi maaperään ja millainen orgaaninen aines ei juurikaan suotautunut tai sitoutunut maaperään eikä mitä ilmeisimmin myöskään hajonnut biologisissa prosesseissa.

Ultrasuodatuksessa näytteet suodatettiin paineistetussa astiassa (Amicon) suodatinfilmiä läpi. Filmiä läpäisevyydet olivat 1000 daltonia (1 kD, pienimolekyyliset yhdisteet), 10 000 daltonia (10 kD) ja 100 000 daltonia (100 kD, suurimolekyyliset yhdisteet). Yksi dalton on yhden vetyatomien massa. Näytteistä (n. 50 ml) suodatettiin puolet (n. 25 ml). Jakeista analysoitiin liukoinen orgaaninen hiili, DOC (Shimadzu 5 000).

Orgaanisen aineen kemiallista luonnetta kuvattiin liukoisen aineen fraktioinnilla adsorbtiio- (XAD-8) ja ioninvaihtohartseja (MSC-1 ja Duolite A7) käyttäen. Menetelmässä erotetaan heikosti vesiliukoiset sekä erittäin liukoiset happaman, emäksisen ja neutraalin luonteen omaavat aineet (Leenheer, 1981, Qualls ja Haines, 1991). Jakeista analysoitiin myös liukoinen orgaaninen hiili, DOC.

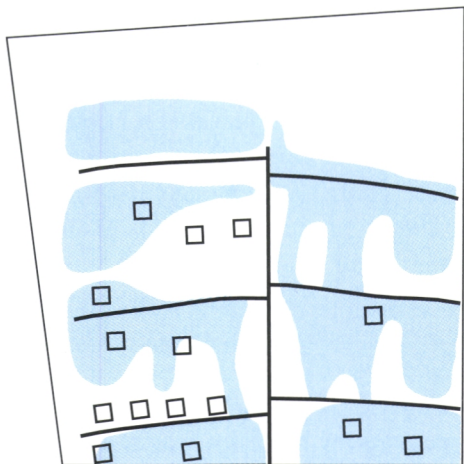
## Kasvillisuustutkimukset

### Aluskasvillisuus

Aluskasvillisuus kartoitettiin koelaloilla vuosina 1996–1998 sekä kevätaspektin että maksimibiomassan aikaan. Vuonna 1996 kartoitus tehtiin 5.–10.6. ja 22.8.–1.9., vuonna 1997 5.–7.6. ja 20.–22.8 ja vuonna 1998 15.–17.6. ja 28.8.–2.9. Koelaloille 1–4 perustettiin 15 yhden m<sup>2</sup> suuruista näyteruutua/koelaa. Talvi-imeytysalalla 5 näyteruutujen lukumäärä oli 11 ja koelalla 6 (ympäri vuotinen imeytys) 10. Imeytyskoelaloilla ruudut valittiin kasteluputkien läheisyydestä (kuva 6) ja vertailukoelaloilla ositetun satunnaisotannan mukaan. Kasvilajien vertikaaliset prosenttipeittävydet arvioitiin silmävaraisesti asteikolla 0.01, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, ... 99, 100 %. Arvioinnissa käytettiin apuna 1 m<sup>2</sup> suuruista kehikkoa, joka oli jaettu langoilla yhden prosentin suuruisiin (10×10 cm) osaruutuihin (kuva 7). Pohja-, kenttä ja pensaskerroksen kartoituksen lisäksi arvioitiin karikkeen peittävyys ja veden virtauksessa paljastuneen (erodoituneen) maan prosenttiosuudet näyteruudun pinta-alasta. Lisäksi tehtiin havaintoja kasvilajien yleiskunnosta, sienitaudeista ja muista vaurioista. Metsäkastikan typpipitoisuudet määritettiin 22.8.1997 ja 23.9.1998 kerätyistä näytteistä.

## Koeala 2

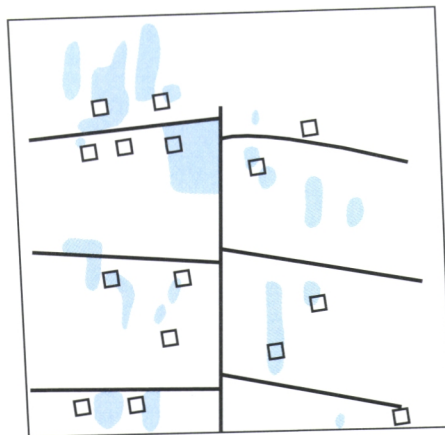
Jatkuva kesäimeytys



Erodituneen pinta-alan osuus 45-50%

## Koeala 3

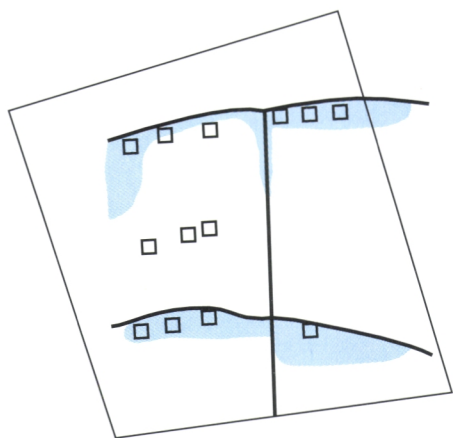
Jaksotettu kesäimeytys



15-20%

## Koeala 5

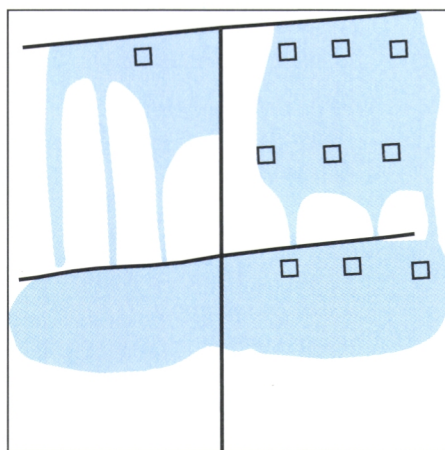
Talviimeytys



15-20%

## Koeala 6

Ympärivuotinen imeytys



60-70%



Sadetusputkisto

□ Kasviruutu

Kuva 6. Kasviruutujen sijainti ja erodoituneen alueen (sininen) osuus eri imeytysaloilla syksyllä 1998.



H.S. Helmisaari

Kuva 7. Kasvillisuuden kartoitusta Ahveniston harjulla kesällä 1997.

### **Puiden kasvu**

Vuotuista kokonaiskasvua arvioitiin ottamalla 20 koepuun rungosta vuosilustonäyte syksyllä 1998. Näytteestä mitattiin eri vuosina muodostuneiden lustojen leveydet. Lustonleveyksiä voidaan mitata puun koko elinajalta, ja vuotuisesta kasvusta voidaan muodostaa jälkikäteen pitkä aikasarja. Imeytysjakson 1996–1998 kasvutuloksia oli siksi mahdollista verrata edeltävien vuosien kasvuun.

Puiden kasvurytmiä mitattiin rungon ympärille kiinnitetyillä kasvu-pannoilla. Laite mittaa rungon ympärysmittaan muutoksia 0,03 mm:n tarkkuudella. Mittaustulokset rekisteröitiin automaattiseen tiedonkeruulaitteeseen tunnin välein koko kasvukauden ajan.

Kasvupantamittauksia tehtiin 10:stä kuusesta ja 10:stä männystä: viisi kuusta oli talvi-imeytysalalla 5 ja neljä mäntyä kesäimeytysalalla 2. Muut puut olivat vertailualoilla.

### **Kuusen lahovikaisuuden tarkastelu**

Imeytysalueella olevien kuusten pintajuurista (3–5 juurta/puu) kairattiin näytteitä kasvukairalla 21.10.1998. Kairanreiät täytettiin Bayletonilla lahon alkuunpääsyn estämiseksi. Laboratoriossa lastut liekitettiin nopeasti (pinnalla olevien kontaminaattien tuhoamiseksi) ja pantiin agaralustalle. Lastuista kasvavat sienet tunnistettiin.

---

## **Puiden ravinnetila**

Veden imeytyksen vaikutuksia havupuiden ravinnetilaan tutkittiin vuosina 1996–1998. Neulasnäytteet kerättiin vertailualoilta sekä kesäimeytysalalta 2 ja talvi-imeytysalalta 5. Vuonna 1996 tehtiin tausta-analysointi, jonka avulla selvitettiin puiden ravinnetila ennen imeytyksen aloittamista. Tausta-analyysi ei koskenut talvi-imeytysalaa 5, jossa imeytys aloitettiin jo vuonna 1995.

Neulasnäytteet kerättiin koealoilta vuosittain samoista näytepuista 5.6.1996, 3.6.1997 ja 18.8.1998. Koealoilla, joissa puiden lukumäärä oli >10, näyteoksat otettiin kymmenestä valtapuusta. Koealoilla, joissa puita oli <10 näytteet otettiin kaikista puista. Näytepuiksi valittiin puuyksilöt, joista mitattiin kasvua kasvupantojen avulla. Puuston pituuden vuoksi neulasnäytteet otettiin mäntyjen elävän latvuksen alaosasta. Kuusista näytteet otettiin puun rungon puolivälin tasolta.

Näyteoksat (kaksi oksaa/puu) katkaistiin oksaleikkurilla ja näytteet varastoitiin saman vuorokauden kuluessa pakastimeen (-18 °C). Kukin näytepuu ja neulasvuosikerta/puu käsiteltiin erillisenä näytteenä. Ravinneanalyysia varten näytteet kuivattiin (+50 °C, 48 h) ja jauhettiin.

Näytteistä analysoitiin N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Mo, Zn, Fe, Cu, Al ja B Metsäntutkimuslaitoksen Vantaan tutkimuskeskuksen keskuslaboratoriossa (LECO CHN- ja ICP). Lisäksi neulasnäytteistä määritettiin kosteus/kuiva-ainepitoisuus, neulasten keskipituus ja tuhannen neulasen massa.

## **Puuston ja aluskasvillisuuden hienojuuret**

Kesäimeytysalalla 2, talvi-imeytysalalla 5 ja niiden vertailualoilla tutkittiin puiden hienojuuriston (<2 mm läpimittaiset juuret) elinvoimaisuutta, kasvua ja kuolleisuutta kesän 1996 aikana. Hienojuurinäytteitä otettiin 15 kpl/koeala systemaattisesti n. kaksi metriä kunkin imeytysputkirivin alapuolelta. Näytteet otettiin orgaanisesta kerroksesta ja kivennäismaan pintakerroksesta 5,8 cm läpimittaisella maakairalla. Näytteet pakastettiin ja eroteltiin laboratoriossa. Ensin hienojuuret eroteltiin maasta vesipesun avulla, ja tämän jälkeen juuret jaettiin eläviin ja kuolleisiin männyn, kuusen ja aluskasvillisuuden juuriin ja eri läpimitaluokkiin (<1 mm, 1–2 mm). Näytteet kuivattiin (+70 °C, 48 h) kuivamassan määrittämiseksi.

---

# Tulokset ja niiden tarkastelu

## Happamuus ja ravinnetila

### Maaperän happamuus

Maan pH on keskeinen tunnus maaperän kemiallisen tilan kannalta. Se kuvaa maaperän happamuustilaa ja puskurikykyä, joilla puolestaan on tärkeä merkitys kasvillisuuden ravinteiden saatavuudelle. Humuskerroksen pH on myös yleisesti käytetty metsämaan viljavuuden indikaattori. Korkeimmat pH-arvot määritetään yleensä viljavilla alueilla. Metsämaan humuskerroksen keskimääräinen pH on Suomessa noin 4,0 (Starr & Tamminen 1992).

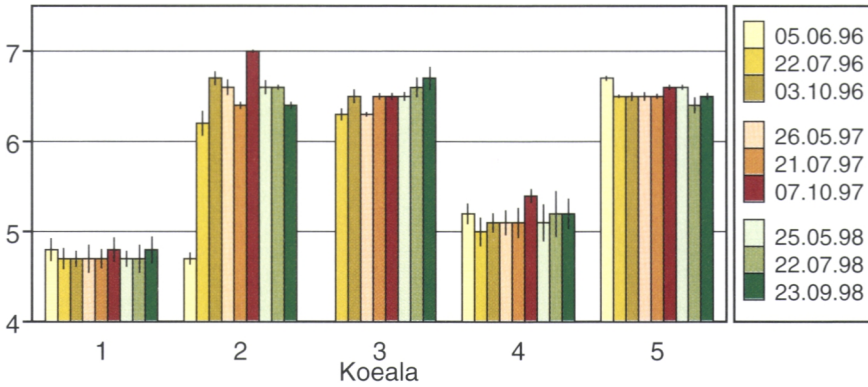
Ahveniston harjulla humuskerros on vähemmän hapanta kuin keskimäärin Suomen metsämailla, minkä perusteella maaperä on melko viljavaa. Humuskerroksen pH vaihteli vertailualalla 1 näytteenottokerroittain 4,7–4,8 vuosina 1996–1998. Vertailualan 4 vastaavat arvot olivat 5,0–5,4 (kuva 8). Kivennäismaan pH oli noin 5,0 molemmilla vertailu-aloilla vuosina 1996 ja 1998 (kuva 9).

Imeytys kohotti selvästi humuskerroksen ja kivennäismaan pH-arvoja kaikilla imeytysaloilla. Jatkuvalla kesäimeytysalalla humuskerroksen pH oli vertailualojen tasolla (4,7–4,8) ennen imeytystä, mutta imeytyksen edetessä kesällä 1996 pH kohosi korkeammaksi kuin 6,5. Humuskerroksen pH oli korkea myös kesällä 1997 ja 1998; pH-arvot vaihtelivat näytteenottokerroittain 6,4–7,0. Kolmen tutkimusvuoden korkein humuskerroksen pH mitattiin vuoden 1997 viimeisimmällä näytteenottokerralla (kuva 8). Myös kivennäismaan pH kohosi imeytysalalla 2 arvoon 6,5 (kuva 9).

Myös jaksotettu kesä- (koeala 3) sekä talvi-imeytys (koeala 5) nostivat humuskerroksen pH:n poikkeuksellisen korkeaksi. Kesäkausina 1996–1998 humuskerroksen pH-arvo oli noin 6,5 (kuva 8). Myös kivennäismaan pH kohosi näillä koealoilla (kuva 9). Jatkuvasti imeytetyllä alalla 6 humuskerroksen pH oli 6,9 eli lähellä sadetusveden pH:ta.

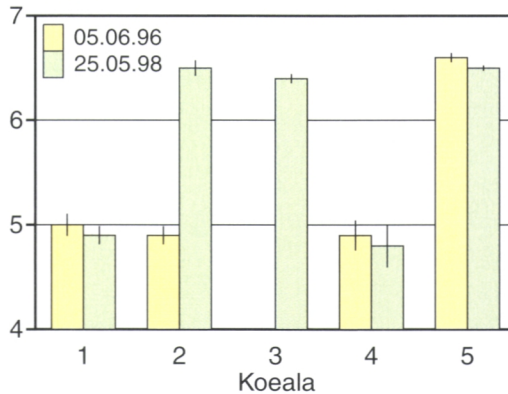
Imeytysalojen humuskerroksen pH:n nousu oli voimakkainta imeytysputkistojen lähiympäristössä. Edellä esitetyt imeytysalojen pH-arvot määritettiin kahden metrin päästä putkiriveistä rinnettä alaspäin ote- tuista näytteistä. Kesällä 1997 tutkittiin yhden näytteenottokerran yhteydessä imeytysalojen humuskerroksen happamuustilaa myös putkirivien puolivälistä. Sielläkin pH-arvot olivat kohonneet vertailualoihin nähden, mutta pH:n nousu ei ole ollut yhtä voimakasta kuin putkirivien

pH(H<sub>2</sub>O)



Kuva 8. Humuskerroksen pH vuosina 1996–1998. N=kolme kokoomanäytettä/koeala, joista määrittäminen kahdella rinnakkaisella. Jana=keskiarvon keskivirhe.

pH(H<sub>2</sub>O)



Kuva 9. Kivennäismaan pH vuosina 1996 ja 1998. Selitykset ks. kuva 8.

lähituntumassa; 5,4 imeytysalalla 2 ja 5,5 imeytysalalla 5. Vertailualueilla pH-arvot olivat vastaavana ajankohtana 4,7 (koeala 1) ja 5,1 (koeala 4).

Heinäkuussa 1998 tutkittiin humuskerroksen pH-arvoja talvi-imeytysalalla (koeala 5) eri etäisyyksillä putkiriveistä (kuva 10). pH-arvot olivat korkeimmillaan putkirivien alapuolella ja laskivat putkirivien välissä etäisyyden kasvaessa putkesta. Humuskerroksen pH oli kuitenkin kohonnut vertailuarvoja korkeammaksi laajalla alueella.

Maaperän pH:n palautumista tutkittiin imeytyksen päätyttyä koealalla 7. Humuskerroksen pH ei ollut alentunut kahden vuodenkaan kuluessa imeytyksen päättymisestä, vaan arvot olivat edelleen korkealla tasol-

Etäisyys (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	Keskiarvo
2		6,0	5,4	5,9	5,1	5,8	5,8	6,2	5,9	5,8
4		6,7	6,5	6,6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
6		6,6	6,7	6,2	6,7	6,6	6,4	6,4	5,7	6,4
8		6,6	6,7	6,5	6,5	5,9	6,5	6,4	5,0	6,3
10		5,8		6,5	6,0	5,5	6,6	4,5	5,5	5,7
12				5,3	5,3	5,9	5,8	5,8		5,6
14		5,9	6,2	5,6	6,3	6,0	6,4	6,0	5,8	6,0
16		6,6	6,5	6,3	6,5	6,3	6,4	6,6	6,5	6,5
18		5,2	4,9	4,9	5,3	5,2	5,8	5,6	5,3	5,3

Kuva 10. Humuskerroksen pH-arvon paikallinen vaihtelu 22.7.1998 imeytysalalla 5.

la vertailualoihin nähden. Keskiarvot olivat näytteenottokerroilla 6,3 ja 6,4 vuonna 1997 ja 6,4 vuonna 1998.

### Imeytysveden happamuuden muutokset maaperässä

Männiköiden maaperässä vajoveden keskimääräinen pH on humuskerroksen alla 4,7 (Lindroos ja Derome 1998). Ahveniston kokeella vajoveden pH oli vertailualoilla keskimäärin 4,9 (kivennäismaan ja humuksen raja: syvyys 0 cm) (taulukko 3 a–c). Vajoveden pH oli vertailualalla 1 keskimäärin 5,9 syvyydellä 100 cm (taulukko 3 a). Vajoveden pH nousee luontaisesti puskuri- ja neutraloitumisprosessien ansiosta veden vajotessa syvemmälle maaperässä.

Sadetetun raakaveden pH (>7) oli selvästi korkeampi kuin metsämaahan tulevan luontaisen sadannan pH. Sadeveden pH vaihtelee yleensä välillä pH 4,0–5,0. Sadetusveden korkea pH nosti vajoveden pH-arvot poikkeuksellisen korkeiksi imeytysaloilla (taulukko 3 a–c). Imeytystauko kesällä (koeala 3) tai imeytyksen päättyminen kesäajaksi (koeala 5) ei palauttanut pH-arvoja lähellekään vertailualojen tasoa (taulukko 3 b–c). Pohjaveden pH:n keskiarvo vaihteli imeytysalueen läheisyydessä (havaintoputki 9601) välillä 6,8–7,2 (taulukko 3 a).

Taulukko 3. a) Raaka-, vajo- ja pohjaveden pH. Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 1		Koeala 2		
		Kesä- kausi 1996	Talvi- kausi 1996-97	Kesä- kausi 1997	Talvi- kausi 1997-98	Kesä- kausi 1998	Ei imeytystä		Jatkuva kesäimeytys		
							1996-97	1998	1996	1997	1998
Raakavesi	x	7,68	7,25	7,11	7,2	7,17					
	SD	0,42	0,13	0,22	0,27	0,16					
	n	21	8	19	4	14					
Vajovesi	x						4,85	–	7,05	6,96	7,13
syvyys	SD						0,22	–	0,24	0,16	0,18
0 cm	n						15	–	57	21	20
Vajovesi	x						–	6,17	7,05	6,87	7,1
syvyys	SD						–	0,17	0,25	0,18	0,15
40 cm	n						–	11	16	18	17
Vajovesi	x						5,91	–	7,07	6,94	7,1
syvyys	SD						0,16	–	0,44	0,15	0,15
100 cm	n						5	–	16	20	17
Pohjavesi	x	7,15	7	6,78	7,24	7,11					
9601	SD	0,34	0,1	0,08	0,07	0,15					
	n	65	13	4	5	4					

x = keskiarvo, SD = keskihajonta, n = näytteiden lukumäärä

Taulukko 3. b) Vajoveden pH.

		Koeala 3, jaksotettu kesäimeytys											
		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä	
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997	1998	1998	1998	1998
		12.6-12.7	13.7-11.8	12.8-12.9	-8.6	9.6-21.7	22.7-17.8	18.8-15.9	16.9-27.10	-8.6	8.6-20.7	21.7-16.8	17.8-14.9
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997	1998	1998	1998	1998
Vajovesi	x	6,73	–	7,12	–	6,96	7,17	6,89	–	–	7,12	–	7,19
syvyys	SD	0,35	–	0,14	–	0,1	0,14	0,03	–	–	0,11	–	0,16
0 cm	n	21	–	14	–	6	2	3	–	–	7	–	5
Vajovesi	x	–	6,69	7,05	6,74	6,95	7,03	7,03	7,3	–	7,08	7,05	7,17
syvyys	SD	–	0,02	0,27	0,23	0,11	0,07	0,1	0,2	–	0,21	0,12	0,09
40 cm	n	–	2	4	2	6	3	3	2	–	5	4	4
Vajovesi	x	–	6,2	6,75	5,96	–	–	–	–	–	7,05	7,1	7,19
syvyys	SD	–	0,42	0,1	0,23	–	–	–	–	–	0,13	0,07	0,06
100 cm	n	–	2	3	2	–	–	–	–	–	6	4	4

Pohjaveden pH talvi-imeytysalueen lähellä (putki 9502) oli keskimäärin 6,9 vuonna 1996, 7,0 vuonna 1997 ja 7,3 vuonna 1998. Muiden havaintoputkien keskimääräiset pohjaveden pH-arvot olivat imeytys-

Taulukko 3. c) Raaka-, vajo- ja pohjaveden pH. Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

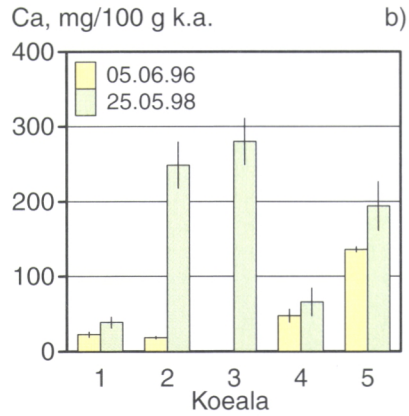
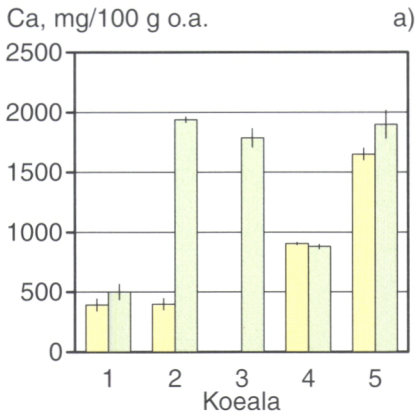
		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 4	Koeala 5											
		Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi		Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi							
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998		ei imey- tystä	imey- tys	ei imey- tystä	imey- tys	ei imey- tystä	imey- tys						
Raakavesi	x	7,68	7,25	7,11	7,2	7,17													
	SD	0,42	0,13	0,22	0,27	0,16													
	n	21	8	19	4	14													
Vajovesi	x						4,89	7,22	6,67	7,19	6,9	–	7,1						
syvyys	SD						0,11	0,11	0,19	0,15	0,2	–	0,18						
0 cm	n						11	11	4	7	7	–	5						
Vajovesi	x						–	–	6,46	–	6,7	–	7,17						
syvyys	SD						–	–	0,44	–	0,07	–	0,11						
40 cm	n						–	–	2	–	3	–	7						
Vajovesi	x						–	–	–	–	6,01	–	6,92						
syvyys	SD						–	–	–	–	0,37	–	0,14						
100 cm	n						–	–	–	–	3	–	5						
Pohjavesi	x	7,15	7	6,78	7,24	7,11													
9601	SD	0,34	0,1	0,08	0,07	0,15													
	n	65	13	4	5	4													

alueelta vedenottamolle päin: 7,1 (1996), 6,9 (1997) ja 7,2 (1998) putkessa 9407; sekä 6,8 (1997) ja 7,2 (1998) putkessa 9504. Putkessa 9406, joka sijaitsee imeytysalueelta katsoen vedenottamosta pois päin, pH-keskiarvo vaihteli 6,5 (1996), 6,4 (1997) ja 7,0 (1998).

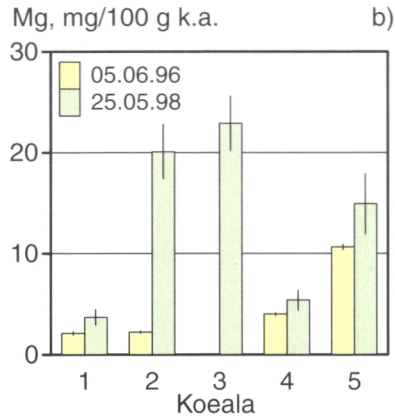
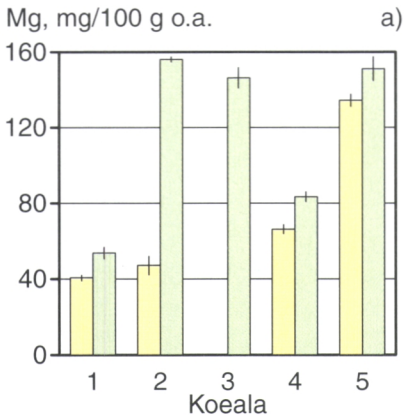
## Maaperän ja vajoveden ravinnetila

Emäskationit ovat tärkeitä maaperän happamuuden vastustuskyvyn ja kasvillisuuden ravinnetalouden kannalta. Kasveille käyttökelpoisten emäsravinteiden eli vaihtuvan kalsiumin (Ca) ja magnesiumin (Mg) pitoisuudet kohosivat humuskerroksessa ja kivennäismaassa imeytyksen vaikutuksesta (kuvat 11 ja 12). Sen sijaan kaliumin (K) pitoisuus ei kohonnut yhtä selvästi, koska kalium on herkästi veden mukana liikkuva ravinne eikä sitoudu samalla tavalla maaperään kuin kalsium ja magnesium (kuva 13).

Taulukoissa 4 a–c, 5 a–c ja 6 a–c on esitetty vesinäytteiden kalsium-, magnesium- ja kaliumpitoisuudet. Kalsiumin ja magnesiumin pitoisuudet kohosivat vajovedessä imeytyksen aikana lähelle sadetusveden tasoa, mikä oli luontaista tasoa korkeampi. Jaksotetun kesäimeytyksen alalla (koeala 3) vuonna 1997 ja 1998 imeytystaukojen aikana Ca- ja

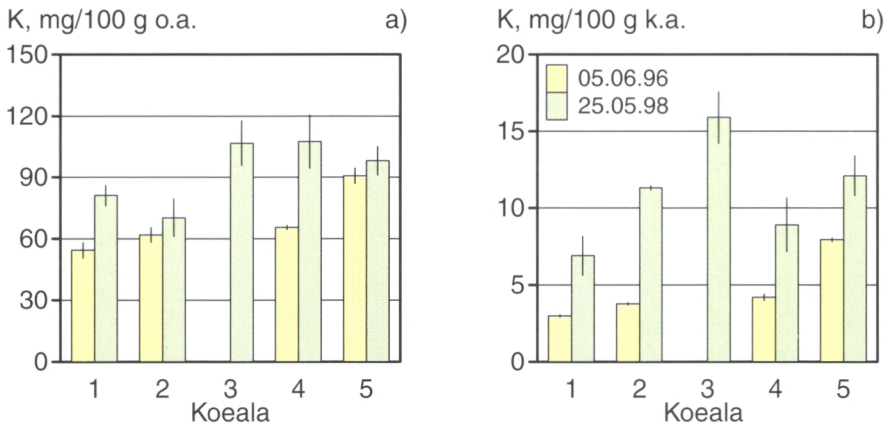


Kuva 11. Vaihtuvan kalsiumin pitoisuus a) humuskerroksessa ja b) kivennäismaassa vuosina 1996 ja 1998. O.a. = orgaaninen aine. K.a. = Kuiva-aine. Selitykset ks. kuva 8.



Kuva 12. Vaihtuvan magnesiumin pitoisuus a) humuskerroksessa ja b) kivennäismaassa vuosina 1996 ja 1998. Selitykset ks. kuva 8.

Mg-pitoisuudet kohosivat vajovedessä imeytysjaksoihin verrattuna. Syynä oli maahan imeytyksessä sitoutunut suuri emäsravinnemäärä, jota imeytysvesi ei laimentanut. Imeytysjaksojen aikana vajoveden emäsravinteiden pitoisuudet heijastivat lähinnä sadetusveden koostumusta ja maan kyllästymistä imeytysvedellä. Viitteitä vastaavanlaisesta pitoisuuksien kohoamisesta saatiin myös talvi-imeytyksen alalta imeytyksen tauottua kesäkausiksi. Vajoveden kaliumpitoisuudet alenivat imeytyksen vuoksi luontaiseen tasoon nähden, ja pitoisuudet olivat lähellä sadetusveden pitoisuuksia.



Kuva 13. Vaihtuvan kaliumin pitoisuus a) humuskerroksessa ja b) kivennäismaassa vuosina 1996 ja 1998. Selitykset ks. kuva 8.

Suuntaa-antavien ainetaselaskelmien perusteella jatkuvan kesäimeytyksen aikana (koeala 2, 25.6.–30.10.1996) maahan imeytettiin kalsiumia n. 10 kg/m<sup>2</sup> ja pintamaasta poistui 100 cm:n syvyydellä n. 8 kg/m<sup>2</sup>. Näin ollen maan pintaosaan sitoutui kalsiumia imeytyksen aikana. Vuonna 1997 vastaavaa nettositoutumista ei havaittu, vaan maasta ilmeisesti jopa huuhtoutui hieman kalsiumia. Vuonna 1998 maahan

Taulukko 4. a) Raaka-, vajo- ja pohjaveden Ca-pitoisuus (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 1		Koeala 2		
		Kesä-	Talvi-	Kesä-	Talvi-	Kesä-	Ei imeytystä	Jatkuva kesäimeytys	1996	1997	1998
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998					
Raakavesi	x	9,17	8,25	9,61	9,09	8,54					
	SD	0,39	1,96	1,39	0,3	0,25					
	n	22	8	21	4	14					
Vajovesi	x						4,56	–	8,17	9,27	9,03
syvyys	SD						2,18	–	1,14	1,04	0,4
0 cm	n						15	–	54	23	20
Vajovesi	x						3,05	3,94	7,61	9,4	9,01
syvyys	SD						0,43	0,27	1,15	0,74	0,71
40 cm	n						6	11	14	18	17
Vajovesi	x						4,53	–	7,51	10,31	8,81
syvyys	SD						0,49	–	1,64	4,31	0,46
100 cm	n						10	–	15	22	17
Pohjavesi	x	9,05	7,79	9,76	9,32	8,02					
9601	SD	0,55	1,93	1,44	1,01	0,4					
	n	64	13	5	5	5					

Taulukko 4. b) Vajoveden Ca-pitoisuus (mg/l).

		Koeala 3, jaksotettu kesäimeytys												
		ei		ei		ei		ei		ei		ei		
		imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	
		tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997	1998	1998	1998	1998	
		12.6-	13.7-	12.8-	-8.6	9.6-	22.7-	18.8-	16.9-	-8.6	8.6-	21.7-	17.8-	
		12.7	11.8	12.9		21.7	17.8	15.9	27.10		20.7	16.8	14.9	
Vajovesi	x	7,75	–	9,06	–	10,2	11,9	9,06	–	–	8,66	–	8,53	–
syvyys	SD	0,54	–	0,38	–	0,84	2,52	0,38	–	–	0,18	–	0,62	–
0 cm	n	14	–	12	–	6	3	12	–	–	7	–	5	–
Vajovesi	x	–	6,97	7,73	31,2	11,6	16,1	10,4	30,5	–	8,28	21,2	7,94	–
syvyys	SD	–	1,78	0,39	0,73	2,35	1,77	2,74	11	–	0,15	11,1	0,38	–
40 cm	n	–	4	4	4	6	3	3	4	–	6	4	4	–
Vajovesi	x	–	3,77	5,48	7,5	–	–	–	–	–	7,7	12	7,6	–
syvyys	SD	–	0,15	0,66	0,61	–	–	–	–	–	0,34	2,79	0,35	–
100 cm	n	–	4	4	4	–	–	–	–	–	6	4	4	–

Taulukko 4. c) Raaka-, vajo- ja pohjaveden Ca-pitoisuus (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 4		Koeala 5				
		Kesä-	Talvi-	Kesä-	Talvi-	Kesä-			Kesä-	Talvi-	Kesä-	Talvi-	Kesä-
		kausi	kausi	kausi	kausi	kausi	ei imey-	ei imey-	imey	ei imey-	imey	ei imey-	imey
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998	tystä	tystä	tys	tystä	tys	tystä	tystä
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998	1996-97	1996	1996-97	1997	1997-98	1998	1998
Raakavesi	x	9,17	8,25	9,61	9,09	8,54							
	SD	0,39	1,96	1,39	0,3	0,25							
	n	22	8	21	4	14							
Vajovesi	x						5,43	34,1	9	11,6	–	14,8	
syvyys	SD						1,84	11,4	3,07	3,19	–	5,79	
0 cm	n						13	3	8	9	–	5	
Vajovesi	x							12,5	–	7,25	–	30,8	
syvyys	SD							6,58	–	2,75	–	4,6	
40 cm	n							3	–	6	–	6	
Vajovesi	x							–	–	6,37	–	23,1	
syvyys	SD							–	–	3,03	–	3,46	
100 cm	n							–	–	6	–	5	
Pohjavesi	x	9,05	7,79	9,76	9,32	8,02							
9601	SD	0,55	1,93	1,44	1,01	0,4							
	n	64	13	5	5	5							

Taulukko 5. a) Raaka-, vajo- ja pohjaveden Mg-pitoisuus (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 1		Koeala 2		
		Kesä- kausi 1996	Talvi- kausi 1996-97	Kesä- kausi 1997	Talvi- kausi 1997-98	Kesä- kausi 1998	Ei imeytystä		Jatkuva kesäimeytys		
							1996-97	1998	1996	1997	1998
Raakavesi	x	1,48	1,35	1,67	1,62	1,52					
	SD	0,06	0,34	0,4	0,05	0,02					
	n	22	8	21	4	14					
Vajovesi	x						1,06	–	1,38	1,58	1,6
syvyys	SD						0,53	–	0,1	0,16	0,09
0 cm	n						15	–	54	23	20
Vajovesi	x						0,56	1,11	1,34	1,59	1,6
syvyys	SD						0,15	0,13	0,09	0,09	0,11
40 cm	n						6	11	14	18	17
Vajovesi	x						1,4	–	1,34	1,74	1,57
syvyys	SD						0,13	–	0,15	0,75	0,06
100 cm	n						10	–	15	22	17
Pohjavesi	x	1,54	1,33	1,64	1,75	1,43					
9601	SD	0,18	0,34	0,21	0,22	0,04					
	n	64	13	5	5	5					

Taulukko 5. b) Vajoveden Mg-pitoisuus (mg/l).

		Koeala 3, jaksotettu kesäimeytys												
		ei	ei	ei	ei	ei	ei	ei	ei	ei	ei	ei	ei	
		imey- tys 1996	imey- tystä 1996	imey- tys 1996	imey- tystä 1997	imey- tys 1997	imey- tystä 1997	imey- tys 1997	imey- tystä 1997	imey- tys 1998	imey- tystä 1998	imey- tys 1998	imey- tystä 1998	imey- tys 1998
		12.6- 12.7	13.7- 11.8	12.8- 12.9	-8.6	9.6- 21.7	22.7- 17.8	18.8- 15.9	16.9- 27.10	-8.6	8.6- 20.7	21.7- 16.8	17.8- 14.9	15.9-
Vajovesi	x	1,35	–	1,5	–	1,66	1,88	1,72	–	–	1,52	–	1,58	–
syvyys	SD	0,07	–	0,06	–	0,05	0,29	0,12	–	–	0,03	–	0,09	–
0 cm	n	14	–	12	–	6	3	4	–	–	7	–	5	–
Vajovesi	x	–	1,55	1,36	5,36	1,92	2,56	1,75	5,07	–	1,49	3,79	1,49	–
syvyys	SD	–	0,46	0,02	0,07	0,34	0,29	0,36	1,89	–	0,02	1,92	0,04	–
40 cm	n	–	4	4	4	6	3	3	4	–	6	4	4	–
Vajovesi	x	–	0,92	1,09	1,59	–	–	–	–	–	1,44	2,22	1,47	–
syvyys	SD	–	0,15	0,09	0,16	–	–	–	–	–	0,03	0,58	0,02	–
100 cm	n	–	4	4	4	–	–	–	–	–	6	4	4	–

Taulukko 5. c) Raaka-, vajo- ja pohjaveden Mg-pitoisuus (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 4	Koeala 5				
		Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	ei imey- tystä 1996-97	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998		ei imey- tystä 1996	imey- tys 1996-97	ei imey- tystä 1997	imey- tys 1997-98	ei imey- tystä 1998
Raakavesi	x	1,48	1,35	1,67	1,62	1,52						
	SD	0,06	0,34	0,4	0,05	0,02						
	n	22	8	21	4	14						
Vajovesi	x						0,98	5,56	1,45	1,66	–	2,43
syvyys	SD						0,42	1,94	0,45	0,4	–	1,03
0 cm	n						13	3	8	9	–	5
Vajovesi	x						–	2,52	–	1,42	–	5,45
syvyys	SD						–	1,15	–	0,4	–	0,82
40 cm	n						–	3	–	6	–	6
Vajovesi	x						–	–	–	1,23	–	4,13
syvyys	SD						–	–	–	0,47	–	0,51
100 cm	n						–	–	–	6	–	5
Pohjavesi	x	1,54	1,33	1,64	1,75	1,43						
9601	SD	0,18	0,34	0,21	0,22	0,04						
	n	64	13	5	5	5						

Taulukko 6. a) Raaka-, vajo- ja pohjaveden K-pitoisuus (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 1		Koeala 2		
		Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Ei imeytystä		Jatkuva kesäimeytys		
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998	1996-97	1998	1996	1997	1998
Raakavesi	x	1,43	1,23	1,2	1,36	1,26					
	SD	0,08	0,26	0,37	0,06	0,05					
	n	22	8	21	4	14					
Vajovesi	x						5,76	–	1,5	1,19	1,33
syvyys	SD						3,24	–	0,25	0,34	0,15
0 cm	n						15	–	54	23	20
Vajovesi	x						4,11	1,22	1,27	1,13	1,35
syvyys	SD						0,93	0,39	0,12	0,08	0,09
40 cm	n						6	11	14	18	17
Vajovesi	x						1,09	–	1,28	1,13	1,31
syvyys	SD						0,51	–	0,17	0,24	0,07
100 cm	n						10	–	15	22	17
Pohjavesi	x	1,65	1,08	1,61	1,47	1,7					
9601	SD	0,32	0,29	0,27	0,09	0,09					
	n	64	13	5	5	5					

Taulukko 6. b) Vajoveden K-pitoisuus (mg/l).

		Koeala 3, jaksotettu kesäimeytys												
		ei imey-		ei imey-		ei imey-		ei imey-		ei imey-		ei imey-		
		tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997	1998	1998	1998	1998	
		12.6-	13.7-	12.8-	-8.6	9.6-	22.7-	18.8-	16.9-	-8.6	8.6-	21.7-	17.8-	
		12.7	11.8	12.9		21.7	17.8	15.9	27.10		20.7	16.8	14.9	
Vajovesi	x	1,37	–	1,4	–	1,13	1,41	1,19	–	–	1,32	–	1,23	–
syvyys	SD	0,08	–	0,06	–	0,07	0,6	0,05	–	–	0,09	–	0,09	–
0 cm	n	14	–	12	–	6	3	4	–	–	7	–	5	–
Vajovesi	x	–	1,54	1,32	2,04	1,44	1,99	1,23	2,11	–	1,28	2,4	1,27	–
syvyys	SD	–	0,28	0,09	0,08	0,18	0,22	0,22	0,33	–	0,05	0,88	0,08	–
40 cm	n	–	4	4	4	6	3	3	4	–	6	4	4	–
Vajovesi	x	–	1,21	1,06	0,53	–	–	–	–	–	1,22	1,63	1,27	–
syvyys	SD	–	0,3	0,07	0,07	–	–	–	–	–	0,07	0,25	0,08	–
100 cm	n	–	4	4	4	–	–	–	–	–	6	4	4	–

Taulukko 6. c) Raaka-, vajo- ja pohjaveden K-pitoisuus (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

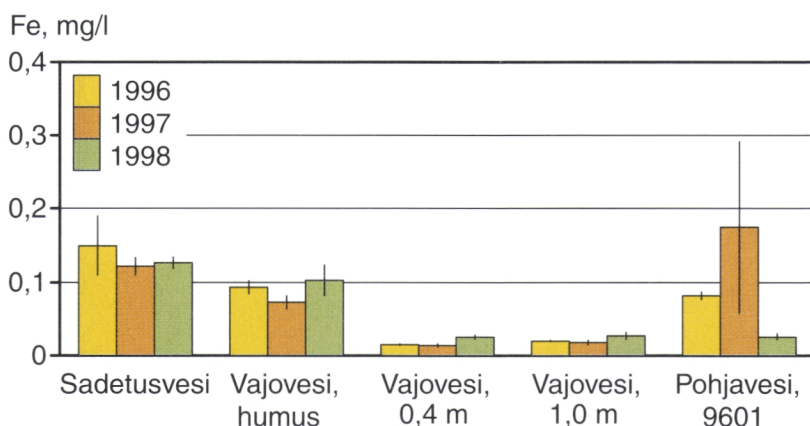
		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 4		Koeala 5				
		Kesä- Talvi-		Kesä- Talvi-				Kesä- Talvi-		Kesä- Talvi-		Kesä- Talvi-	
		kausi	kausi	kausi	kausi	kausi	kausi	ei imey-	ei imey-	imey	ei imey-	imey	ei imey-
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998	1996-97	tystä	tystä	tys	tystä	tys	tystä
Raakavesi	x	1,43	1,23	1,2	1,36	1,26							
	SD	0,08	0,26	0,37	0,06	0,05							
	n	22	8	21	4	14							
Vajovesi	x						8,61	4,62	2,6	2,26	–	1,1	
syvyys	SD						8,14	0,97	3,91	2,63	–	0,59	
0 cm	n						13	3	8	9	–	5	
Vajovesi	x						–	2,72	–	0,88	–	3,56	
syvyys	SD						–	0,7	–	0,25	–	0,5	
40 cm	n						–	3	–	6	–	6	
Vajovesi	x						–	–	–	1,24	–	2,84	
syvyys	SD						–	–	–	0,67	–	0,34	
100 cm	n						–	–	–	6	–	5	
Pohjavesi	x	1,65	1,08	1,61	1,47	1,7							
9601	SD	0,32	0,29	0,27	0,09	0,09							
	n	64	13	5	5	5							

imeytettiin suurinpiirtein yhtä paljon kalsiumia kuin siitä poistui 100 cm:n syvyydellä. Siten maaperä saavutti kemiallisen tasapainon vajoveden kanssa. Magnesiumia imeytettiin maahan koealalla 2 vuonna 1996  $1,7 \text{ kg/m}^2$ , ja huuhtouma 100 cm:n syvyydellä oli  $1,5 \text{ kg/m}^2$ . Vuonna 1997 ja 1998 nettositoutumista ei tapahtunut, vaan raakaveden mukana tullut magnesiummäärä kulkeutui lähes sellaisenaan metrin paksuisen pintamaakerroksen läpi. Myös kaliumia sitoutui hieman vuonna 1996, mutta ei enää vuonna 1997 ja 1998.

Sadetusveden emäskationien pidättyminen maaperään nosti maan pH:ta. Tämä perustuu ioninvaihtoreaktioon maahiukkasten pinnoilla; ts. imeytysveden emäskationit korvaavat maahiukkasten pinnalle sitoutuneet vetyionit. Sitoutumista ei enää tapahdu kun maahiukkasten ja vajoveden välille syntyy tasapainotila emäskationien ja vetyionien suhteen. Maan pH:n pysyminen suhteellisen vakaalla ja korkealla tasolla imeytysaloilla kesäkausien 1997 ja 1998 aikana tukee käsitystä, että maaperä ja vajovesi ovat olleet kemiallisesti tasapainossa. Vaikka kationinvaihtoreaktioilla ei olisikaan kovin suurta merkitystä imeytysveden puhdistumisprosessien kannalta, sillä on suuri merkitys kasvillisuuden ravinteiden saatavuudelle.

## Pohjaveden laatuun vaikuttavien aineiden pitoisuudet

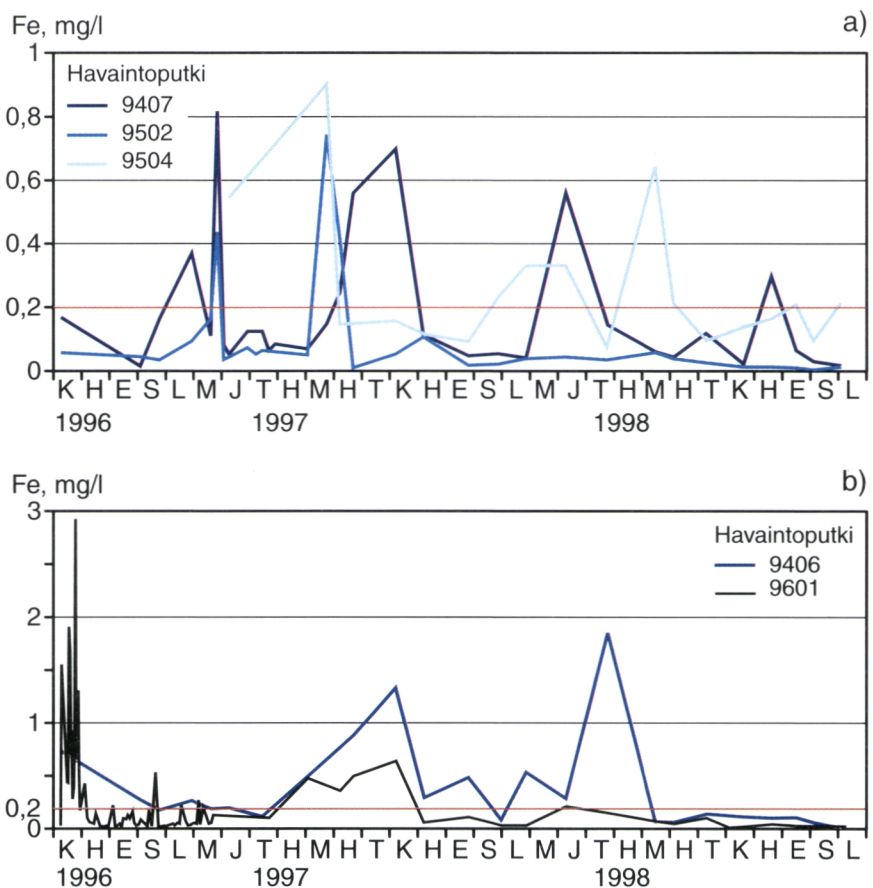
Sadetusveden rautapitoisuus väheni veden vajotessa maaperässä. Metrin syvyydeltä kerätyn vajoveden rautapitoisuudet olivat hyvin matalia (kuva 14). Vastaavanlainen raudan pidättyminen maan pintakerrokseen on havaittu myös ruotsalaisissa allasimeytyskokeissa (Frycklund &



Kuva 14. Sadetus-, vajo- ja pohjaveden rautapitoisuus jatkuvan kesäimeytyksen aikana vuosina 1996–1998. Jana=keskiarvon keskivirhe.

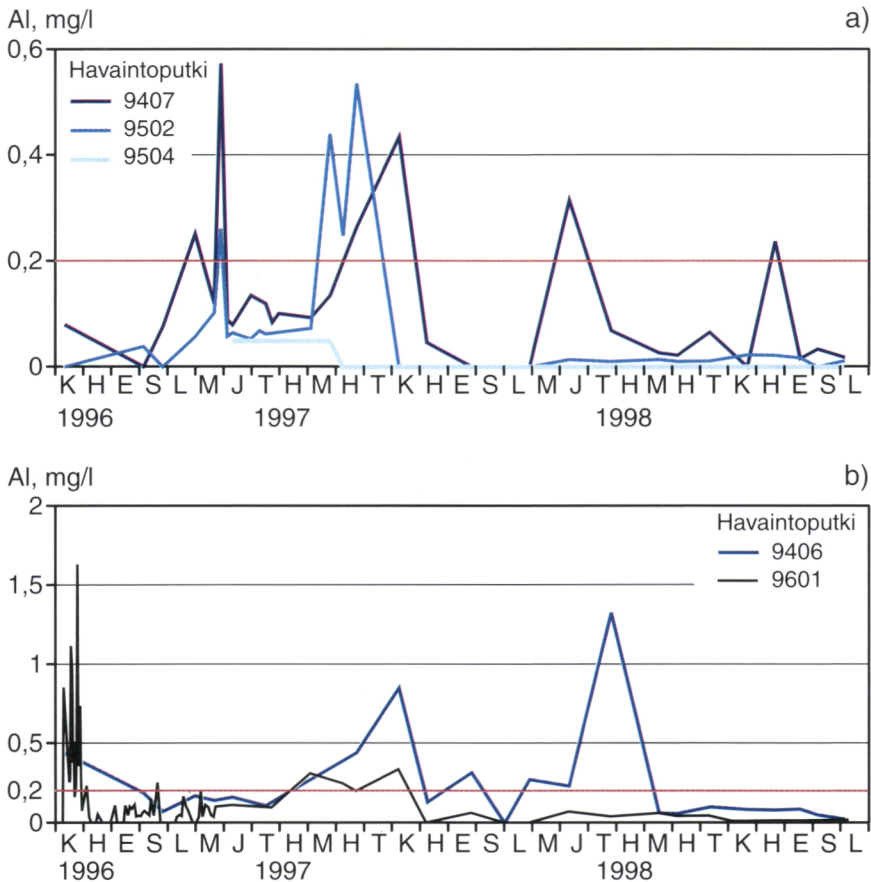
Jacks 1997). Jatkuvan kesäimeytyksen aikana muodostuvan teko-pohjaveden rautapitoisuus oli samalla tasolla tai hieman kohonnut verrattuna vajoveden pitoisuuteen metrin syvyydellä. Kesäkausien 1996–1998 aikana pohjaveden rautapitoisuudet olivat kuitenkin keskimäärin alle talousveden laatuvaatimusten enimmäispitoisuuden 0,2 mg/l (Sosiaali- ja terveysministeriö 1994).

Pohjaveden rautapitoisuuden vaihtelu näytteenottokerroittain vuosina 1996–1998 on esitetty kuvassa 15. Pohjavesinäytteiden rauta- ja alumiinipitoisuuteen vaikuttaa myös näytteiden sisältämä kiintoainese. Tästä johtuen pohjaveden sameus todennäköisesti vaikutti vaihteluun.



Kuva 15. Pohjaveden rautapitoisuus a) havaintoputkissa 9407, 9502 ja 9504 ja b) havaintoputkissa 9406 ja 9601 näytteenottokerroittain vuosina 1996–1998. Putki 9502 sijaitsee talvi-imeytysalan vieressä ja putket 9407 ja 9504 imeytysalueelta luoteeseen vedenottamolle päin. Lähinnä vedenottamoa on putki 9504. Putki 9601 sijaitsee kesäimeytysalan vieressä ja putki 9406 imeytysalueelta kaakkoon (liite I). Talousveden laaturaja raudalle on 0,2 mg/l.

Rautapitoisuus vaihteli voimakkaasti kesäkuussa 1996 imeytysalueen läheisyydessä sijaitsevassa havaintoputkessa 9601 ja ylitti säännönmukaisesti raja-arvon 0,2 mg/l. Heinäkuun alusta lähtien pitoisuus laski voimakkaasti ja oli raja-arvon alapuolella vuoden loppuun saakka (kuva 15 b). Rautapitoisuus oli vuonna 1997 maaliskuun alusta lähtien kesäkuun alkuun saakka korkeampi kuin 0,2 mg/l. Heinäkuusta lähtien pitoisuudet olivat suhteellisen matalia. Vuonna 1998 rautapitoisuudet olivat säännönmukaisesti alle 0,2 mg/l havaintoputkessa 9601 (kuva 15 b). Imeytysalueen lähellä havaintoputkessa 9502 rautapitoisuus oli yli 0,2 mg/l maaliskuun alkuun saakka (kuva 15 a). Imeytysalueella oli täydellinen imeytystauko ajanjaksolla 3.3.–4.4.1997. Rautapitoisuuden koostuminen on saattanut olla yhteydessä imeytystaukoon.



Kuva 16. Pohjaveden alumiinipitoisuus a) havaintoputkissa 9407, 9502 ja 9504 ja b) havaintoputkissa 9406 ja 9601 näytteenottokerroittain vuosina 1996-1998. Selytykset ks. kuva 15. Talousveden laaturaja alumiinille on 0,2 mg/l.

Pohjaveden alumiinipitoisuus noudatti hyvin samanlaista trendiä raakapitoisuuden kanssa lähes kaikissa mittauspisteissä (kuva 16).

Sadetusveden liukoisen orgaanisen hiilen (Dissolved Organic Carbon, DOC) pitoisuuden keskiarvo oli pienimmillään kesällä 1996 (8,3 mg/l) ja korkeimmillaan kesällä 1998 (10,0 mg/l) (taulukko 7 a–c). Imeytyksen aikana DOC ei pidäntynyt metsämaan pintavyöhykkeeseen (0–100 cm), vaan pitoisuudet hieman kohosivat pintavyöhykkeen vajovedessä sadetusveden pitoisuuteen nähden (taulukko 7 a–c ja kuva 17). Tämä johtuu siitä, että lehdoissa kivennäismaan pintaosat sisältävät runsaasti orgaanista ainetta, ja lehdoissa kivennäismaassa on yleensä enemmän orgaanista ainetta kuin humuskerroksessa (Tamminen & Mälkönen 1986). Vertailualoilta määritetyt luontaiset vajoveden DOC-pitoisuudet olivat huomattavasti korkeampia kuin sadetusvedessä tai imeytysalueiden vajovedessä (taulukko 7 a–c).

Imeytysalueen läheisyydessä mitattu tekopohjaveden DOC-pitoisuus (putket 9601 ja 9502) oli alhaisempi kuin sadetusvedessä koko imeytyksen ajan (taulukko 7 a, kuva 18). DOC-pitoisuus aleni pohjaveden havaintoputkissa imeytysalueelta vedenottamolle päin.

Taulukko 7. a) Raaka-, vajo- ja pohjaveden liukoinen orgaaninen hiili, DOC (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

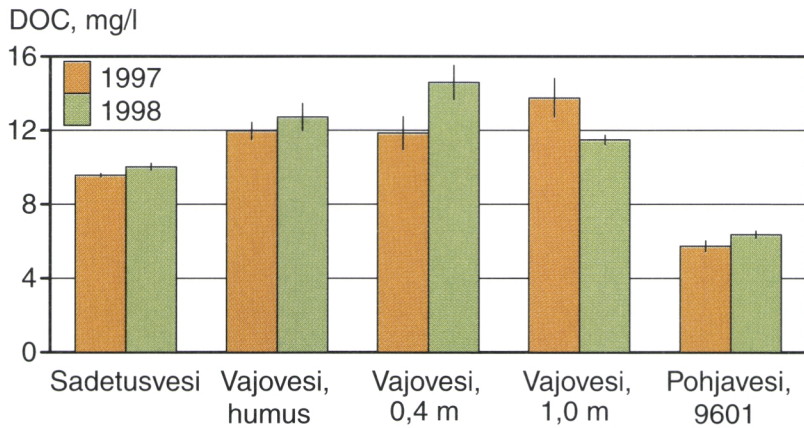
		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 1		Koeala 2		
		Kesä- kausi 1996	Talvi- kausi 1996-97	Kesä- kausi 1997	Talvi- kausi 1997-98	Kesä- kausi 1998	Ei imeytystä		Jatkuva kesäimeytys		
							1996-97	1998	1996	1997	1998
Raakavesi	x	8,34	9,06	9,58	9,66	10,04					
	SD	1,86	0,83	0,43	0,28	0,72					
	n	21	8	19	3	14					
Vajovesi 0 cm	x						88,91	–	13,38	11,98	12,73
	SD						40,66	–	4,87	2,15	3,3
	n						15	–	57	21	20
Vajovesi 40 cm	x						–	40,38	–	11,86	14,6
	SD						–	15,31	–	3,77	2,47
	n						–	10	–	18	7
Vajovesi 100 cm	x						–	–	–	13,77	11,49
	SD						–	–	–	4,64	0,7
	n						–	–	–	20	7
Pohjavesi 9601	x	5,48	6,56	5,73	6,98	6,35					
	SD	1,08	0,46	0,58	1,36	0,4					
	n	65	13	4	5	4					

Taulukko 7. b) Vajoveden DOC (mg/l).

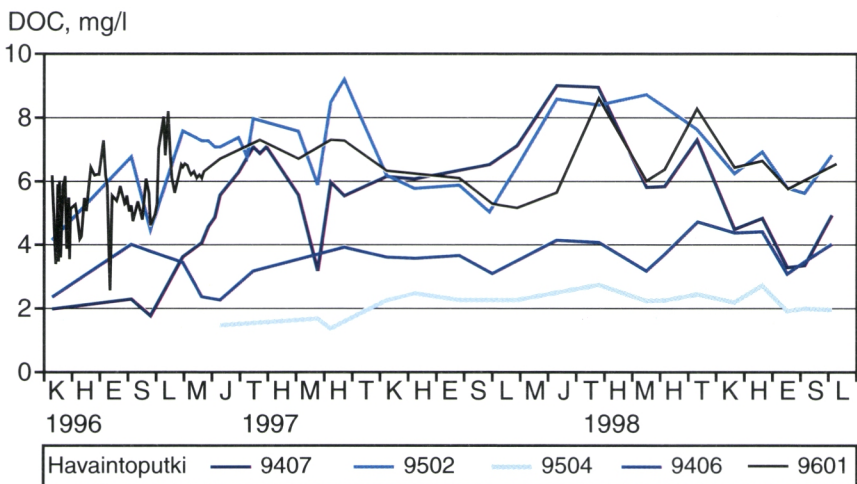
		Koeala 3, jaksotettu kesäimeytys													
		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä	
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1998	1998	1998	1998	1998
		12.6-12.7	13.7-11.8	12.8-12.9	-8.6	9.6-21.7	22.7-17.8	18.8-15.9	16.9-27.10	-8.6	8.6-20.7	21.7-16.8	17.8-14.9	15.9-	
Vajovesi x		11,2	–	13,5	–	11,1	47,4	13,3	–	–	10,8	–	14	–	
syvyys SD		1,97	–	2,37	–	0,63	14,6	3,97	–	–	1,15	–	7,36	–	
0 cm n		21	–	14	–	6	2	3	–	–	7	–	5	–	
Vajovesi x		–	–	–	29,8	26,8	49,7	17,6	11,2	–	–	–	11,8	–	
syvyys SD		–	–	–	16,9	8,53	12,9	15	1,1	–	–	–	0,45	–	
40 cm n		–	–	–	2	6	3	3	2	–	–	–	4	–	
Vajovesi x		–	–	–	36,2	–	–	–	–	–	–	–	13,5	–	
syvyys SD		–	–	–	14	–	–	–	–	–	–	–	1,48	–	
100 cm n		–	–	–	2	–	–	–	–	–	–	–	4	–	

Taulukko 7. c) Raaka-, vajo- ja pohjaveden DOC (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 4		Koeala 5						
		Kesä- Talvi- kausi kausi		Kesä- Talvi- kausi kausi		Kesä- Talvi- kausi kausi		Talvi- Kesä- kausi kausi		Talvi- Kesä- kausi kausi		Talvi- Kesä- kausi kausi		Talvi- Kesä- kausi kausi	
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998	ei imeytystä 1996-97	imey- tystä 1995-96	ei imey- tystä 1996	imey- tystä 1996-97	ei imey- tystä 1997	imey- tystä 1997-98	ei imey- tystä 1998	imey- tystä 1998	ei imey- tystä 1998
Raakavesi x		8,34	9,06	9,58	9,66	10									
SD		1,86	0,83	0,43	0,28	0,72									
n		21	8	19	3	14									
Vajovesi x							75,3	9,68	38,5	9,13	40,1	–	26,1		
syvyys SD							34,3	1,71	21,2	0,77	17,3	–	6,69		
0 cm n							15	8	4	6	7	–	5		
Vajovesi x							–	–	–	–	32	–	–		
syvyys SD							–	–	–	–	15,5	–	–		
40 cm n							–	–	–	–	3	–	–		
Vajovesi x							–	–	–	–	28	–	–		
syvyys SD							–	–	–	–	0,49	–	–		
100 cm n							–	–	–	–	2	–	–		
Pohjavesi x		5,48	6,56	5,73	6,98	6,35									
9601 SD		1,08	0,46	0,58	1,36	0,4									
n		65	13	4	5	4									



Kuva 17. Sadetus-, vajo- ja pohjaveden liukoisen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuus jatkuvan kesäimeytyksen aikana vuosina 1997 ja 1998. Jana=keskiarvon keski-  
virhe.



Kuva 18. Pohjaveden liukoisen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuus eri havaintoputkissa näytteenottokerroittain vuosina 1996-1998.

## Päätelmät

Sadetusimeytyksen aiheuttama emäsravinteiden sitoutuminen maahan ja happamuuden väheneminen olivat periaatteessa positiivisia muutoksia kasvillisuuden ravinteiden saatavuuden kannalta. Myös maaperän puskurikapasiteetti happamoitumisprosesseja vastaan lisääntyi. Maan happamuus- ja ravinnetilan kannalta eri imeytysjaksot aiheuttivat samansuuntaisen muutoksen, ja maan palautuminen alkuperäiseen happamuuteen on erittäin hidasta. Esimerkiksi alueen, jota ei ole imeytetty

---

syksyn 1996 jälkeen lainkaan, maaperän happamuudessa ei ollut syksyllä 1998 vielääkään palautumisen merkkejä. Näin ollen imeytyksen ajankohdalla ja imeytysjakson pituudella ei näytä olevan merkitystä maaperän kemiallisen tilan muutoksille, koska maaperässä syntyy joka tapauksessa tasapainotila imeytysveden kanssa.

Tekopohjaveden orgaanisen hiilen pitoisuus oli sekä kesäisin että talvisin selvästi sadetusveden pitoisuutta matalampi, minkä perusteella Ahveniston harju on suhteellisen tehokas orgaanisen aineen suodatin. Liukoisen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuus oli korkeampi imeytysalueiden välittömässä läheisyydessä sijaitsevilla havaintoputkissa ja vähäni imeytysalueelta vedenottamolle päin.

DOC-pitoisuus ei sen sijaan alentunut vajoveden pintavyöhykkeessä sadetusveteen verrattuna, vaan pitoisuudet hieman kohosivat, mikä johtuu Ahveniston harjun kivennäismaan pintaosan runsaasta orgaanisen aineen määrästä. Imeytysjaksolla ei ollut vaikutusta DOC:n pidättymiseen pintamaassa. Kun sadetusimeytys tehdään orgaanista ainetta sisältävien metsämaan pintakerrosten läpi, geologisen muodostuman on oltava riittävän paksu, jotta syvemmillä olevat kerrokset pystyvät suodattamaan DOC:in. Tällaisissa oloissa DOC vähenee imeytyksen vaikutuksesta.

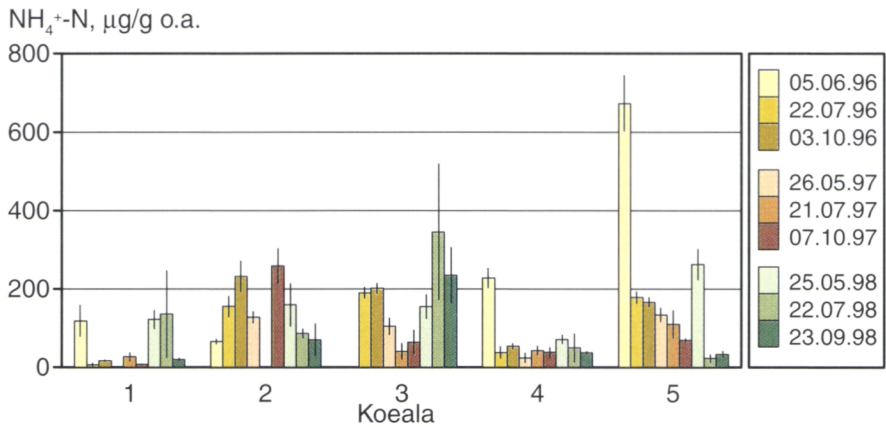
Imeytysveden rautapitoisuus aleni selvästi vajoveden pintavyöhykkeessä hyvinkin alhaiselle tasolle. Tekopohjaveden rautapitoisuutta säätelevät kuitenkin myös happipitoisuus, pH ja DOC:n pitoisuus.

## Typen mineralisaatio, nitrifikaatio ja typen häviöt

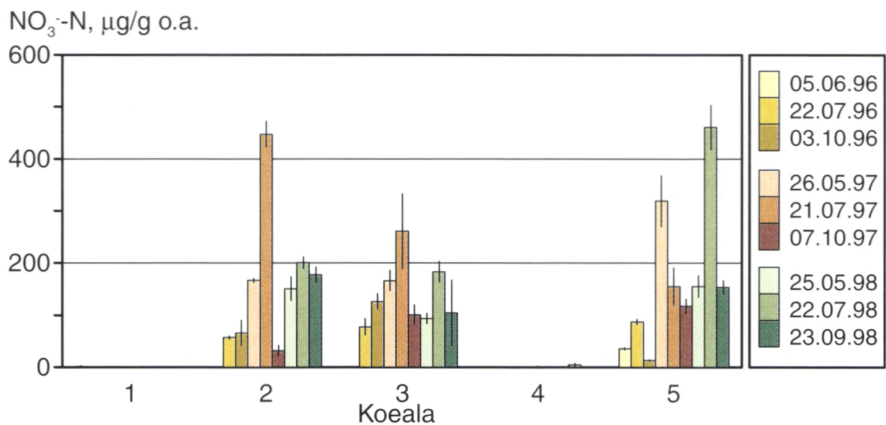
Humuskerroksen ammoniumtypen pitoisuus vaihteli kasvukauden aikana, mutta pitoisuus oli keskimäärin suurempi imeytysaloilla kuin vertailualoilla (kuva 19).

Nitraattityppeä oli ainoastaan imeytysalojen humuskerroksessa (kuva 20). Laboratorioinkubaatiokokeet osoittivat, että mineraalitypen netto muodostus ( $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ ) oli voimakkainta imeytysaloilla (kuva 21). Imeytysaloilla ammoniumtyyppi muutettiin nitraattitypeksi asti, kun taas vertailualoilla nettonitrifikaatio oli olematonta (kuva 22). Imeytys siis aloitti nitrifikaation, mikä selittää maan kohonneet nitraattipitoisuudet (kuva 20).

Tärkein syy nitrifikaation alkamiseen oli maan pH:n kohoaminen imeytyksen seurauksena. Se mahdollisti happamuudelle herkkien nitrifikaatiobakteereiden toiminnan ja lisäsi orgaanisen typen mineralisaa-



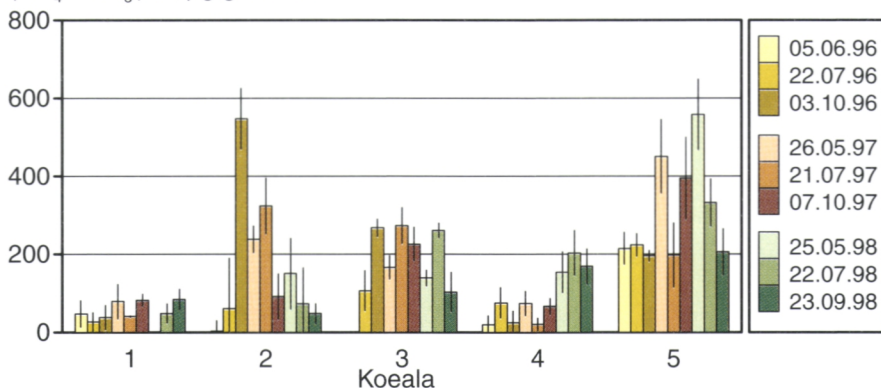
Kuva 19. Ammoniumitypen pitoisuus humuskerroksessa eri näytteenotokertoina. O.a. = orgaaninen aine. N=kolme kokoomänäytettä/koeala, joista määrittäminen kahdella rinnakkaisella. Jana=keskiarvon keskivirhe.



Kuva 20. Nitraattitypen pitoisuus humuskerroksessa eri näytteenotokertoina. Selitykset ks. kuva 19.

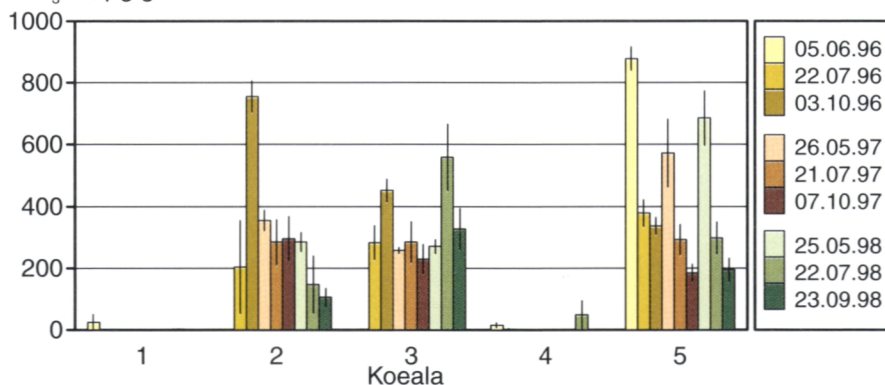
tiota ammoniumitypeksi. Laboratoriokokeet osoittivat, että voimakas nitraatin tuotto alkoi kohotettaessa vertailualoilta otettujen humusnäytteiden pH arvoon 6,7. Toisaalta alennettaessa imeytysalalta otettujen maanäytteiden pH-arvoa, nitraatin tuotto estyi; jo pH:n alentaminen arvoon 6,0 vähensi huomattavasti nitraatin tuottoa. Nämä tulokset viittaavat siihen, että jos imeytysveden pH alennettaisiin arvoon 6,0, nitraattia muodostuisi huomattavasti vähemmän.

$(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)\text{-N}$ ,  $\mu\text{g/g}$  o.a./6 vk



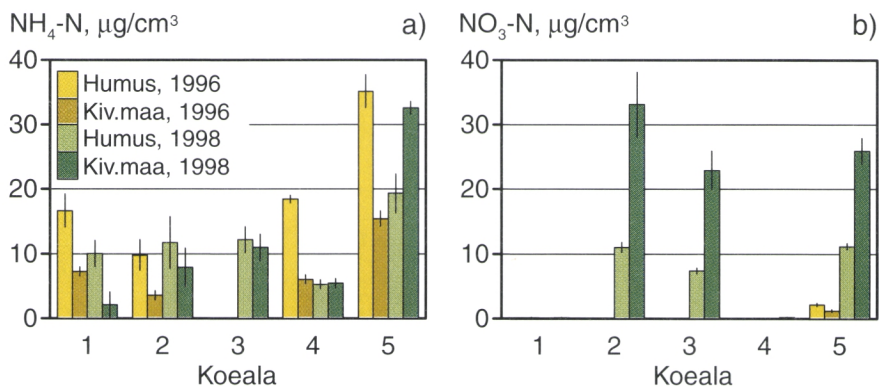
Kuva 21. Mineraalityypen nettomuodostuminen humuskerroksessa 6 viikon laboratorioinkubaatioissa eri näytteenotokertoina. Selitykset ks. kuva 19.

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ ,  $\mu\text{g/g}$  o.a./6 vk

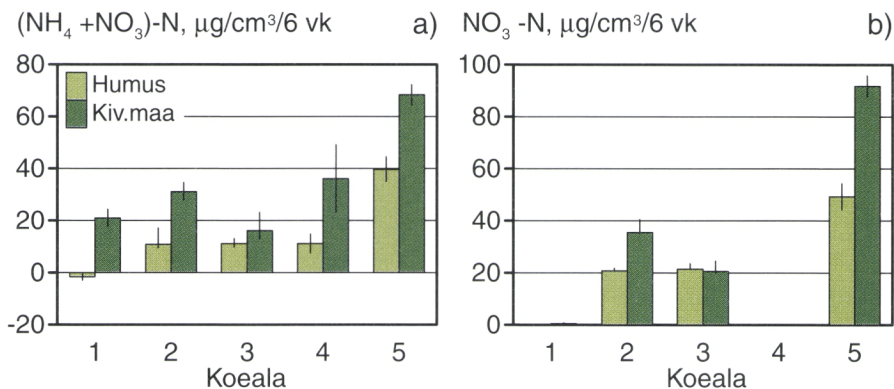


Kuva 22. Nettonitrifikaatio humuskerroksessa 6 viikon laboratorioinkubaatioissa eri näytteenotokertoina. Selitykset ks. kuva 19.

Ammonium- ja nitraattityypen pitoisuudet määritettiin kivennäismaasta alkukesällä 1996 (imeytys käynnissä vasta koealalla 5) ja vuonna 1998. Ammoniumtyypen pitoisuus oli yleensä samaa luokkaa tai alhaisempi kivennäismaassa kuin humuskerroksessa (kuva 23). Poikkeuksena oli talvi-imeytysala (koeala 5) vuonna 1998, jossa ammoniumtyyppiä oli melkein kaksi kertaa enemmän kivennäismaassa kuin humuskerroksessa. Imeytysaloilla myös kivennäismaan nitraattityypipitoisuudet olivat kohonneet vertailualoihin nähden (kuva 23). Nitraattityyppiä oli vuonna 1996 suunnilleen saman verran kivennäismaassa kuin humuskerroksessa, kun taas vuonna 1998 kivennäismaan nitraattityypipitoisuudet olivat noin kaksinkertaisia humuskerrokseen nähden. Mineraali-



Kuva 23. a) Ammonium- ja b) nitraattitypen pitoisuudet humuskerroksessa ja kivennäismaassa vuosina 1996 ja 1998. Selitykset ks. kuva 19.



Kuva 24. a) Mineraalitypen ja b) nitraattitypen nettomuodostuminen 6 viikon laboratorioinkubaatiossa vuonna 1998. Selitykset ks. kuva 19.

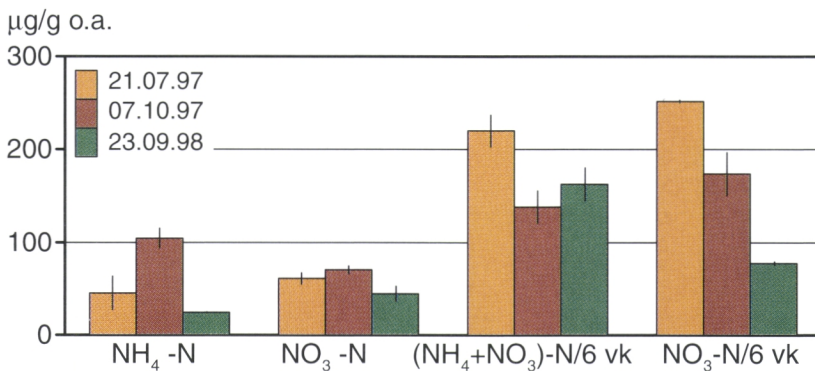
typen muodostuminen kivennäismaassa määritettiin laboratorioskokein vuonna 1998. Kokeissa havaittiin, että mineraalityppeä muodostui enemmän kivennäismaassa kuin humuskerroksessa (kuva 24). Imeytetyillä koealoilla myös nitraattityppeä muodostui yleensä enemmän kivennäismaassa kuin humuskerroksessa, koealalla 5 jopa kaksi kertaa enemmän (kuva 24). Tämä selittää kivennäismaan korkeat nitraattipitoisuudet (kuva 23). Humuskerroksen poistaminen ei siis Ahveniston harjulla luultavasti poistaisi nitraattiongelmaa, sillä nitrifikaatioaktiivisuus on suurta myös kivennäismaassa.

Koealalla 6, jota oli imeytetty jatkuvasti kolmen vuoden ajan, mineraalitypen pitoisuus ja laboratorioskokeissa määritetty ammonium- ja nitraattitypen muodostus olivat samaa luokkaa kuin muilla imeytysaloilla.

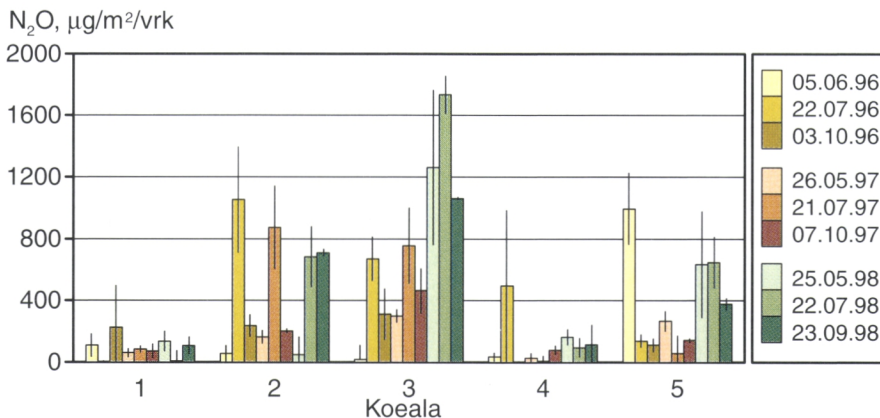
Koealalla 7, jolla seurattiin pH:n palautumista, humuskerroksen nitraattitypen pitoisuudessa ei havaittu suuria eroja näytteenottojen välillä

(kuva 25). Laboratoriokokeissa nitraattitypen muodostuminen oli kuitenkin vähentynyt ajan myötä. Syynä saattaa olla se, että nitrifioiva bakteeripopulaatio on pienentynyt. Tämä voi johtua siitä, että maa on kuivempaa ja maahan ei enää tule sadetusveden mukana ylimääräistä ammoniumia. Johtopäätöksenä on, että vaikka humuskerroksen pH ei mitausten mukaan ollut alentunut (s. 26–27), imeytyksen lopettaminen näyttäisi kuitenkin vähentävän maan nitrifikaatioaktiivisuutta.

Typpioksiduulin ( $N_2O$ -kaasun) tuotossa vuosien ja näytteenottojen välinen sekä koealojen sisäinen vaihtelu oli suurta (kuva 26). Kaikkina kolmena vuotena  $N_2O$ -tuotto oli kuitenkin yleensä suurinta imeytetyillä



Kuva 25. Ammonium- ( $NH_4-N$ ) ja nitraattitypen ( $NO_3-N$ ) pitoisuudet ja mineraalitypen nettomuodostuminen ( $NH_4-N+NO_3-N$ ) sekä nettonitrifikaatio ( $NO_3-N$ ) 6 viikon laboratorioinkubaatioissa humuskerroksessa koealalla 7 eri näytteenottokertoina. N=kaksi kokoomänäytettä/koeala, joista määrittäminen kahdella rinnakkaisella. Jana=keskiarvon keskivirhe.



Kuva 26.  $N_2O$ -kaasun tuotto maastomittauksissa eri näytteenottokertoina. N=kolme rinnakkaista mittauskammiota/koeala. Jana=keskiarvon keskivirhe.

---

koealoilla. Imeytysaloilla 2 ja 3  $N_2O$ -tuotto alkoi vasta imeytyksen alkamisen jälkeen. Talvi-imeytysalalla keskimääräinen  $N_2O$ -tuotto oli suurempi vuonna 1998 kuin vuonna 1997. Maan märkyys lisää  $N_2O$ -tuottoa, joten syynä oli todennäköisesti suurempi sademäärä kesällä 1998 kuin kesällä 1997.

Kaiken kaikkiaan typpioksiduulia tuotettiin eniten silloin, kun maassa oli nitraattia, ja se oli merkää. Arvot olivat imeytysaloilla keskimäärin 0,5 kg N/ha/v. Vuotuiseksi määräksi laskettuna tämä on kuitenkin vain suuntaa antava, koska kaikki mittaukset tehtiin kesän aikana.  $N_2O$ :ia tuotetaan nitrifikaation sivutuotteena ja/tai denitrifikaatiossa. Laboratorionkokeissa kävi ilmi että Ahveniston harjulla tuotettu  $N_2O$  oli peräisin pääosin denitrifikaatiosta. Denitrifikaation lopputuotteena voi muodostua typen oksideja tai  $N_2$ - kaasua. Laboratorionkokeet osoittivat että imeytetyillä koealoilla denitrifikaation lopputuotteena muodostui pääosin ilmakehälle haitatonta  $N_2$ - kaasua; vain n. 25 % denitrifikaation lopputuotteista oli voimakkaana kasvihuonekaasuna tunnettua  $N_2O$ :ia. Siten typen häviöt denitrifikaatiossa olivat keskimäärin n. 2 kg/ha/v. Tässä tapauksessa denitrifikaatio on toivottu ilmiö, sillä se poistaa nitraattia maaperästä pääosin ilmakehälle haitattomana kaasuna.

Imeytyksen aikana ammonium-, nitraatti- ja kokonaistypen pitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa pohjavedessä kuin sadetusvedessä (taulukot 8 a–c, 9 a–c, 10 a–c). Kuitenkin jokaisella mittaukskerralla nitraattitypen pitoisuus oli hieman suurempi ja kokonaistypen pitoisuus pienempi pohja- kuin raakavedessä. Pohjaveden nitraattipitoisuudet olivat kuitenkin samaa luokkaa kuin pohjaveden keskimääräinen pitoisuus Suomessa (0,21 mg/l, Soveri ja Ahlberg 1990).

Vajoveden kokonaistypen pitoisuudet olivat imeytyksen aikana alhaisemmat imeytysaloilla kuin vertailualoilla. Sen sijaan nitraattitypen pitoisuudet olivat suurempia, sadetusveden tasolla.

Kesäimeytysalalle 2 tuli sadetusveden mukana kesän 1997 ja 1998 aikana saman verran nitraattityppeä kuin mitä sieltä vajoveden mukana poistui (n. 2500–3000 kg  $NO_3$ -N/ha/v). Vajoveden nitraattitypen pitoisuus oli suurempi kivennäismaassa 40 cm:n syvyydessä kuin humuskerroksen alla. Tähän oli syynä nitraatin muodostus kivennäismaassa.

Jaksotetulla kesäimeytysalalla (koeala 3) vajoveden kokonais- ja nitraattitypen pitoisuudet olivat huomattavasti suurempia imeytystaukojen kuin imeytyksen aikana. Tämä johtuu siitä, että imeytysvesi laimentaa typpipitoisuuksia imeytyksen aikana.

Talvi-imeytysalalla 5 nitraattitypen pitoisuus oli vajovedessä jopa 35 mg/l kesän aikana (vrt. pohjaveden raja-arvo 6 mg  $NO_3$ -N/l, ks. johdanto). Suurimpana syynä tähän oli imeytysveden laimentavan vaikutuksen poistuminen.

Imeytys kohotti vajoveden nitraattitypen pitoisuuksia merkittävästi ainoastaan imeytystaukojen aikana.

Taulukko 8. a) Raaka-, vajo- ja pohjaveden ammoniumtyppi, NH<sub>4</sub>-N (µg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 1		Koeala 2		
		Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Ei imeytystä		Jatkuva kesäimeytys		
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998	1996-97	1998	1996	1997	1998
Raakavesi	x	25	7	9	3	8					
	SD	28	6	6	5	3					
	n	17	9	15	4	12					
Vajovesi	x						480	–	8	13	80
Syvyys	SD						607	–	12	22	156
0 cm	n						13	–	54	17	20
Vajovesi	x						44	10	7	26	78
Syvyys	SD						13	4	3	27	30
40 cm	n						2	11	14	13	17
Vajovesi	x						26	–	4	10	25
Syvyys	SD						11	–	3	6	9
100 cm	n						7	–	15	15	17
Pohjavesi	x	1	1	1	2	0					
9601	SD	3	2	2	2	0					
	n	49	13	5	5	4					

Taulukko 8. b) Vajoveden NH<sub>4</sub>-N (µg/l).

		Koeala 3, jaksotettu kesäimeytys											
		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä		ei imeytystä	
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997	1998	1998	1998	1998
		12.6-12.7	13.7-11.8	12.8-12.9	-8.6	9.6-21.7	22.7-17.8	18.8-15.9	16.9-27.10	-8.6	8.6-20.7	21.7-16.8	17.8-14.9
Vajovesi	x	18	–	5	–	5	–	18	–	–	4	–	33
Syvyys	SD	22	–	9	–	1	–	21	–	–	3	–	55
0 cm	n	21	–	12	–	5	–	4	–	–	7	–	5
Vajovesi	x	–	33	6	40	11	–	21	65	–	51	126	30
Syvyys	SD	–	39	4	21	5	–	6	26	–	40	72	9
40 cm	n	–	4	4	3	5	–	3	3	–	6	4	4
Vajovesi	x	–	6	16	87	–	–	–	–	–	49	170	25
Syvyys	SD	–	5	10	56	–	–	–	–	–	17	105	5
100 cm	n	–	4	4	4	–	–	–	–	–	6	4	4

Taulukko 8. c) Raaka-, vajo- ja pohjaveden NH<sub>4</sub>-N (µg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 4	Koeala 5					
		Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	ei imey- tystä 1996-97	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998		1995-96	1996	1996-97	1997	1997-98	1998
Raakavesi	x	25	7	9	3	8							
	SD	28	6	6	5	3							
	n	17	9	15	4	12							
Vajovesi	x						175	15	544	8	215	–	69
syvyys	SD						63	12	385	4	88	–	91
0 cm	n						8	5	4	7	4	–	5
Vajovesi	x						–	–	83	13	27	–	260
syvyys	SD						–	–	74	5	17	–	130
40 cm	n						–	–	3	2	3	–	7
Vajovesi	x						–	–	–	24	33	–	732
syvyys	SD						–	–	–	1	8	–	658
100 cm	n						–	–	–	2	2	–	5
Pohjavesi	x	1	1	1	2	0							
9601	SD	3	2	2	2	0							
	n	49	13	5	5	4							

Taulukko 9. a) Raaka-, vajo- ja pohjaveden nitraattityppi, NO<sub>3</sub>-N (µg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 1		Koeala 2		
		Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Ei imeytystä		Jatkuva kesäimeytys		
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998	1996-97	1998	1996	1997	1998
Raakavesi	x	133	149	195	165	136					
	SD	175	60	183	24	75					
	n	17	9	15	4	12					
Vajovesi	x						40	–	50	195	286
syvyys	SD						54	–	29	419	496
0 cm	n						13	–	54	17	20
Vajovesi	x						8	29	118	418	547
syvyys	SD						1	77	30	659	584
40 cm	n						2	11	14	13	17
Vajovesi	x						36	–	90	228	328
syvyys	SD						61	–	42	81	145
100 cm	n						7	–	15	15	17
Pohjavesi	x	240	166	293	208	167					
9601	SD	98	72	244	86	69					
	n	49	13	5	5	4					

Taulukko 9. b) Vajoveden NO<sub>3</sub>-N (µg/l).

		Koeala 3, jaksotettu kesäimeytys												
		ei		ei		ei		ei		ei		ei		
		imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	imey-	
		tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	tys	tystä	
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997	1998	1998	1998	1998	
		12.6-	13.7-	12.8-	-8.6	9.6-	22.7-	18.8-	16.9-	-8.6	8.6-	21.7-	17.8-	
		12.7	11.8	12.9		21.7	17.8	15.9	27.10		20.7	16.8	14.9	
Vajovesi	x	91	–	43	–	142	–	270	–	–	151	–	119	–
syvyys	SD	24	–	22	–	30	–	310	–	–	28	–	135	–
0 cm	n	21	–	12	–	5	–	4	–	–	7	–	5	–
Vajovesi	x	–	1821	151	21333	1600	–	1626	14100	–	278	9175	148	–
syvyys	SD	–	1960	77	577	2206	–	2407	8850	–	154	10740	41	–
40 cm	n	–	4	4	3	5	–	3	3	–	6	4	4	–
Vajovesi	x	–	78	69	2250	–	–	–	–	–	282	4750	270	–
syvyys	SD	–	47	26	557	–	–	–	–	–	56	3679	187	–
100 cm	n	–	4	4	4	–	–	–	–	–	6	4	4	–

Taulukko 9. c) Raaka-, vajo- ja pohjaveden NO<sub>3</sub>-N (µg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 4		Koeala 5					
		Kesä-	Talvi-	Kesä-	Talvi-	Kesä-			Talvi-	Kesä-	Talvi-	Kesä-	Talvi-	Kesä-
		kausi	kausi	kausi	kausi	kausi			kausi	kausi	kausi	kausi	kausi	kausi
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998			1995-96	1996	1996-97	1997	1997-98	1998
									ei imey-	imey-ei	imey-	imey-	ei imey-	imey ei imey-
									tystä	tys	tystä	tys	tystä	tys tystä
Raakavesi	x	133	149	195	165	136								
	SD	175	60	183	24	75								
	n	17	9	15	4	12								
Vajovesi	x						69	151	35250	120	2703	–	8000	
syvyys	SD						86	12	14268	61	1486	–	6887	
0 cm	n						10	5	4	7	4	–	5	
Vajovesi	x						–	–	10133	170	1627	–	16494	
syvyys	SD						–	–	8932	0	919	–	9754	
40 cm	n						–	–	3	2	3	–	7	
Vajovesi	x						–	–	–	240	3410	–	17400	
syvyys	SD						–	–	–	14	3804	–	3435	
100 cm	n						–	–	–	2	2	–	5	
Pohjavesi	x	240	166	293	208	167								
9601	SD	98	72	244	86	69								
	n	49	13	5	5	4								

Taulukko 10. a) Raaka-, vajo- ja pohjaveden kokonaistyyppi ( $\mu\text{g/l}$ ). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 1		Koeala 2		
		Kesä- kausi 1996	Talvi- kausi 1996-97	Kesä- kausi 1997	Talvi- kausi 1997-98	Kesä- kausi 1998	Ei imeytystä		Jatkuva kesäimeytys		
							1996-97	1998	1996	1997	1998
Raakavesi	x	602	539	511	565	520					
	SD	326	86	137	66	73					
	n	17	9	15	4	12					
Vajovesi	x						3085	–	566	660	855
syvyys	SD						1552	–	227	513	681
0 cm	n						13	–	54	17	20
Vajovesi	x						–	6500	1796	1255	2259
syvyys	SD						–	8669	1008	944	1049
40 cm	n						–	11	14	13	17
Vajovesi	x						–	–	1705	1127	1580
syvyys	SD						–	–	1378	532	577
100 cm	n						–	–	15	15	17
Pohjavesi	x	440	417	474	460	340					
9601	SD	105	92	258	97	80					
	n	49	19	5	5	4					

Taulukko 10. b) Vajoveden kokonaistyyppi ( $\mu\text{g/l}$ ).

		Koeala 3, jaksotettu kesäimeytys											
		ei		ei		ei		ei		ei		ei	
		imey- tys 1996	imey- tystä 1996	imey- tys 1996	imey- tystä 1997	imey- tys 1997	imey- tystä 1997	imey- tys 1997	imey- tystä 1997	imey- tys 1998	imey- tystä 1998	imey- tys 1998	imey- tystä 1998
		12.6- 12.7	13.7- 11.8	12.8- 12.9	-8.6	9.6- 21.7	22.7- 17.8	18.8- 15.9	16.9- 27.10	-8.6	8.6- 20.7	21.7- 16.8	17.8- 14.9
Vajovesi	x	581	–	606	–	578	–	865	–	–	630	–	758
syvyys	SD	151	–	69	–	44	–	627	–	–	99	–	583
0 cm	n	21	–	12	–	5	–	4	–	–	7	–	5
Vajovesi	x	–	18075	2865	25000	3980	–	3137	14967	–	1967	20650	833
syvyys	SD	–	16119	2602	2646	3120	–	4303	9050	–	1048	14938	153
40 cm	n	–	4	4	3	5	–	3	3	–	6	4	4
Vajovesi	x	–	9500	2200	8075	–	–	–	–	–	2100	9225	1125
syvyys	SD	–	5216	1140	4867	–	–	–	–	–	696	5014	218
100 cm	n	–	4	4	4	–	–	–	–	–	6	4	4

Taulukko 10. c) Raaka-, vajo- ja pohjaveden kokonaistyyppi ( $\mu\text{g/l}$ ). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi					Koeala 4	Koeala 5													
		Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi		Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi	Kesä- kausi	Talvi- kausi									
		1996	1996-97	1997	1997-98	1998		ei imey- tystä	1995-96	1996	1996-97	1997	1997-98	1998							
Raakavesi	x	602	539	511	565	520															
	SD	326	86	137	66	73															
	n	17	9	15	4	12															
Vajovesi	x						5110	550	38250	626	5450	–	9560								
syvyys	SD						6381	81	14660	128	1489	–	6814								
0 cm	n						10	5	4	7	4	–	5								
Vajovesi	x						–	–	24333	1700	5933	–	23586								
syvyys	SD						–	–	13051	141	1436	–	12119								
40 cm	n						–	–	3	2	3	–	7								
Vajovesi	x						–	–	–	2950	13650	–	27600								
syvyys	SD						–	–	–	212	14637	–	5550								
100 cm	n						–	–	–	2	2	–	5								
Pohjavesi	x	440	417	474	460	340															
9601	SD	105	92	258	97	80															
	n	49	19	5	5	4															

## Paras imeytysajankohta typen kierron suhteen?

Nitraatin huuhtoutumisriskin kannalta huonoimmat imeytysvaihtoehdot ovat jaksotettu kesä- ja talvi-imeytys. Näiltä koealoilta huuhtoutuu nitraattia imeytystaukojen aikana. Paras imeytysvaihtoehdo on kesä-imeytys, koska imeytysvesi laimentaa nitraattipitoisuuksia kesän aikana. Talvella pohjavettä ei yleensä muodostu, joten nitraattia ei huuhtoudu pohjaveteen talvikautisen imeytystauon aikana. Kesän alussa imeytysvesi laimentaa maaperässä talven aikana mahdollisesti muodostuneen nitraatin pitoisuuksia vajovedessä edellyttäen, että imeytys aloitetaan riittävän ajoissa.

Nitraatin huuhtoutumisriskin kannalta edullisin vaihtoehdo olisi jatkuva imeytys siten, että samalla pohjaveden muodostumisalueella sijaitsevia aloja imeytettäisiin vuorottain niin, että imeytyksessä ei olisi pitkiä taukoja. Niin kauan kuin imeytetään ei nitraatti aiheuta pohjaveden laadulle riskiä.

Nitraatin huuhtoutumisriski on olemassa, kun imeytys lopetetaan alueella kokonaan. Sen takia imeytysalueen pinta-ala ei saisi muodostaa merkittävää osaa pohjaveden muodostumisalueesta.

---

## Orgaaninen aine tekopohjaveden valmistuksessa

Luonnonvesien liukoinen orgaaninen aines (DOC) on molekyylikooltaan pääosin (ultrasuodatus, UF) pienempää kuin 100 kD. DOC on hyvin heterogeeninen erilaisten yhdisteiden joukko, jossa on vähän tunnistettavia yhdisteitä. DOC:n luonteen ja käyttäytymisen kulloisessakin ympäristössä määritteleekin lähinnä yhdisteiden sisältämien funktionaalisten ryhmien määrä ja laatu sekä fysikaaliset suureet, kuten molekyylien koko.

Tekopohjaveden valmistuksessa maaperään kulkeutuu joskus suuriakin määriä orgaanisia yhdisteitä, joita ei siellä välttämättä luonnollisten muodostumisprosessien yhteydessä synny, ei ainakaan samassa määräsuhteessa. Imeytys tehdään usein rajoitetulle alueelle, ja imeytetyt vesimäärät ovat hyvin suuria.

### Ahveniston alue

Ahveniston harjuun imeytettävän raakaveden kokonaismäärä oli n. 2,8 milj. m<sup>3</sup>/v. Raakaveden liunneen orgaanisen hiilen pitoisuus oli n. 10 mg/l ja epäorgaanisen hiilen pitoisuus n. 3 mg/l. Edellämainitulla annosnopeudella maaperään kulkeutuu n. 30 tonnia orgaanista ja n. 8 tonnia epäorgaanista hiiltä/v. Orgaanisen sekä epäorgaanisen aineen kokonaismäärä oli jonkin verran suurempi yhdisteiden rakenteesta riippuen.

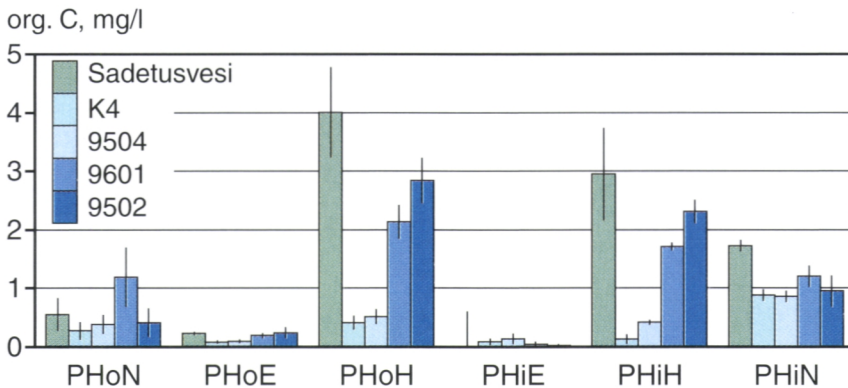
Maaperästä pumpataan n. 3,5 milj. m<sup>3</sup> vettä/v., josta noin 20–30 % on luontaisesti muodostunutta pohjavettä. Tuotetun kaivoveden orgaanisen hiilen pitoisuus oli n. 2 mg/l, mutta epäorgaanisen hiilen pitoisuus vaihteli näytteenottoajankohdasta riippuen välillä 6,0–8,0 mg/l. Kaivoveden epäorgaanisen hiilen pitoisuus oli korkeampi talviaikana ja matalampi lumettomana aikana.

Epäorgaanisen hiilen alkuperää ei voida varmuudella tässä yhteydessä tietää, mutta jos oletetaan, että se on peräisin joko kokonaan tai pääosin orgaanisen aineen mineralisaatiosta, niin Ahveniston harjuun pidättyvän hiilen osuus olisi n. 10–15 tonnia/v. Kun maaperän biologinen toiminta on tehokasta, voidaan olettaa huomattavan osan pidättyneestä orgaanisesta hiilestä mineralisoituvan ja kulkeutuvan esim. maaperän huokosilmaan ja poistuvan harjusta CO<sub>2</sub>:na. Vuotuisen harjuun jäävän orgaanisen aineen määrä saattaa näin jäädä hyvinkin vähäiseksi ja viipymä lyhyeksi. Tämä oletus perustuu epäorgaanisen hiilen yllättävän korkeisiin pitoisuuksiin pohjavedessä.

Oletusta tukee huonosti (mutta ei sulje pois) se seikka, että esim. havaintoputkessa 9504 epäorgaanisen hiilen pitoisuus on enimmilläänkin vain noin 2/3 kaivoveden pitoisuudesta, eikä kovin merkittäviä DOC:n muutoksia tämän havaintopisteen jälkeen enää tapahdu. Asiaa voitaneen selventää jatkotutkimuksilla (mahdollisesti kairausnäytteet).

## Orgaanisen aineen laatu ja kulkeutuminen maaperässä

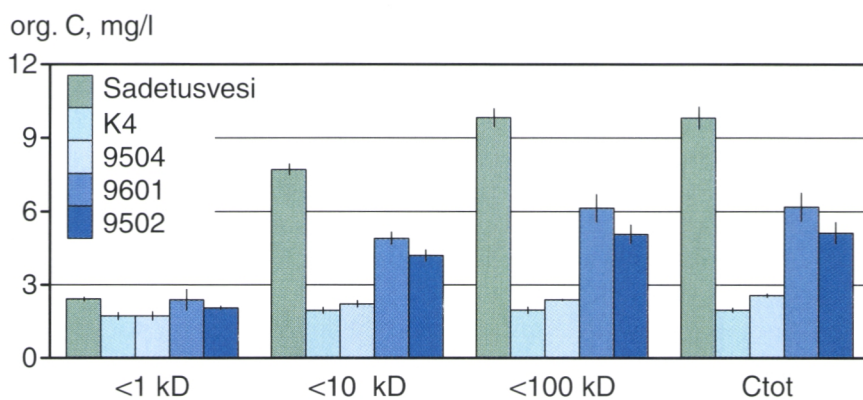
Ahveniston harjuun imeytettävä raakavesi on kohtalaisen hyvälaatuista sekä koostumukseltaan normaalia luonnonvettä. Veden pääkomponentteja ovat happamat aineet (hydrofiiliset eli vesihakuiset ja hydrofobiset eli vesipakoiset) ja neutraaliaineet. Emäksisesti käyttäytyviä aineita on vähän (kuva 27). Lähellä imeytysalueita olevista havaintoputkista (9601, 9502) otetut näytteet olivat profiililtaan melko samankaltaisia järiveden kanssa, joskin pitoisuudet olivat jo selvästi alentuneet. Noin 500 m etäisyydellä imeytysalueista (9504) poistuma oli saavuttanut kaivoveden tason jokseenkin kaikilta osin, ja muutokset olivat tämän jälkeen vähäisiä.



Kuva 27. Orgaaninen hiili vesinäytteissä neljän näytteenottokerran (kevät, kesä, syksy, talvi) keskiarvoina vuonna 1998. Näytteet ovat sadetetusta pintavedestä, imeytysalueen lähistöltä otetuista näytteistä (havaintoputket 9601 ja 9502), n. 500 m etäisyydellä olevasta havaintoputkista (havaintoputki 9504) ja kaivovedestä (K4). PHoN = hydrofobiset neutraaliaineet (alhainen hapetusaste ja vähäinen funktionaalisuus, esim. hiilivedyt ja klorofylli), PHoE = emäksisesti käyttäytyvät hydrofobiset aineet (heikko liukoisuus, fenolisia rakenteita, esim. flavonoidit ja tanniinit), PHoH = hydrofobiset orgaaniset hapot (humus- ja fulvohapot, aromaattiset hapot ja hapettuneet fenoliset rakenteet), PHiE = vesiliukoisia emäksisiä aineita (yleensä merkityksetön ryhmä), PHiH = vesiliukoiset orgaaniset hapot (pitkälle hapettuneita selvästi happaman luonteen omaavia aineita, alhainen molekyylipaino ja erinomainen liukoisuus) ja PHiN = hydrofiiliset neutraaliaineet (korkea hapetusaste, erittäin liukoisia ja pysyviä, alkoholit, aldehydit, ketonit). Jana=keskiarvon keskivirhe.

Yhdisteiden kemiallinen luonne vaikuttaa merkittävästi poistumaan. Harjussa kulkevasta vedestä poistuivat ensin heikommin veteen liukoiset yhdisteet sekä selkeästi kemiallisesti aktiiviset aineet kuten orgaaniset hapot ja viimeisenä vesiliukoiset neutraaliaineet, joita kaivoveden ja havaintoputken 9504 orgaaninen aines pääosin oli. Tämä yhdisteryhmä muodostuu pitkälle hajonneista tai muutoin stabiileista yhdisteistä, jotka eivät ole sopivia esim. hiilenlähteiksi mikrobeille ja ovat kemiallisesti pysyviä. Tämän jakeen poistuminen esim. imeytyksen intensiteetin muutoksilla tai muillakaan imeytysteknisillä keinoilla ei ole todennäköistä. Jos on tarpeen, poisto voidaan tehdä jälkikäsitteilyin.

Kaivovedessä esiintyvä orgaaninen aines oli pääosin pienimolekyylistä (<1kD) ja myös äärimmäisen liukoista ainesta (kuva 28). Raskaimmat jakeet poistuvat eri tavoin veden kulkiessa harjussa. Poistumiseen vaikuttavat luonnossa normaalisti tapahtuvat prosessit, joista tärkeimpiä ovat transformaatioreaktiot (bioottiset ja abiottiset) ja sitoutuminen maaperään (ioninvaihto ja adsorbtiio) aina vaihtelevassa järjestyksessä. Orgaanisen aineen kulkeutumisen maaperässä melkein poikkeuksetta määrittelee yhdisteen liukoisuus, ja suurimolekyylisten yhdisteiden liukoisuus on rajallinen. Yhdisteen kemiallinen ominaisuus on toissijainen kulkeutumiseen vaikuttava suure.



Kuva 28. Orgaaninen hiili vesinäytteissä neljän näytteenottokerran (kevät, kesä, syksy, talvi) keskiarvoina vuonna 1998. Näytteet ovat sadetusta pintavedestä, imeytysalueen lähistöltä otetuista näytteistä (havaintoputket 9601 ja 9502), n. 500 m etäisyydellä olevasta havaintoputkesta (havaintoputki 9504) ja kaivovedestä (K4). Tulokset on saatu ultrasuodattamalla vesinäytteet (molekyylipaino < 1kD, < 10kD ja < 100 kD). Vetyatomien massa (H = 1D) on 1 dalton = 1D. Tulokset on esitetty kumulatiivisesti siten, että vasemmanpuolinen pylväistö sisältää molekyylipainoltaan <1000 daltonia (1kD) olevat liukoiset molekyylit, seuraava pylväistö kaikki molekyylit < 10000 daltonia (10 kD) jne. Jana=keskiarvon keski-  
virhe.

---

## Päätelmät

Yhteenvedona voidaan todeta, että harju toimii moitteettomasti ja tuottaa em. parametreilla mitattuna puhdasta vettä, joka on mitä ilmeisimmin verrattavissa luontaisesti syntyneeseen pohjaveteen. Tämä tutkimus antaa kuitenkin vain viitteellistä tietoa siitä, mitä maaperässä tapahtuu. Tulokset viittaavat siihen, että maaperä pystyy käsittelemään merkittävän osan sadetusveden mukana maaperään tulevasta orgaanisesta kuormasta. Näin ollen mitään merkittäviä ongelmia ei olisi odotettavissa ainakaan lähitulevaisuudessa. Tämän asian varmistaminen edellyttää kohdennettuja jatkotutkimuksia, joissa tutkitaan suoraan myös itse maaperää. Epäsuorilla menetelmillä päästään tuskin tarkempaan arvioon.

## Aluskasvillisuus

### Kasvilajien peittävyiden ja elinvoiman muutokset

Sadetusimeytyksen kemialliset vaikutukset ilmenivät maaperän ravinteisuuden ja happamuuden muutoksina. Imeytys lisäsi maan nitrifikaatiota ja kasveille käyttökelpoisten emäskationien määriä. Myös humuskerroksen pH kohosi huomattavasti imeytyksen seurauksena. Sadetusveden mukana tuli runsaasti ravinteita. Eri kasvilajit reagoivat näihin muutoksiin eri tavoin. Suurin osa lehdossa kasvavista heinistä, ruohoista ja sammalista viihtyy typpi- ja kalkkipitoisella kasvualustalla ja todennäköisesti sitoo ainakin osan maaperässä syntyneestä tai sadetusveden mukana tulleesta nitraatista uuteen biomassaan. Toisaalta karummilla kasvupaikoilla ja happamammalla maalla elävät metsälajit kärsivät liian kosteuden lisäksi myös pH:n noususta. Märkyiden lisääntyminen muuttaa kasvupaikkaa vähitellen epäedulliseksi myös lehtokasvien menestymiselle.

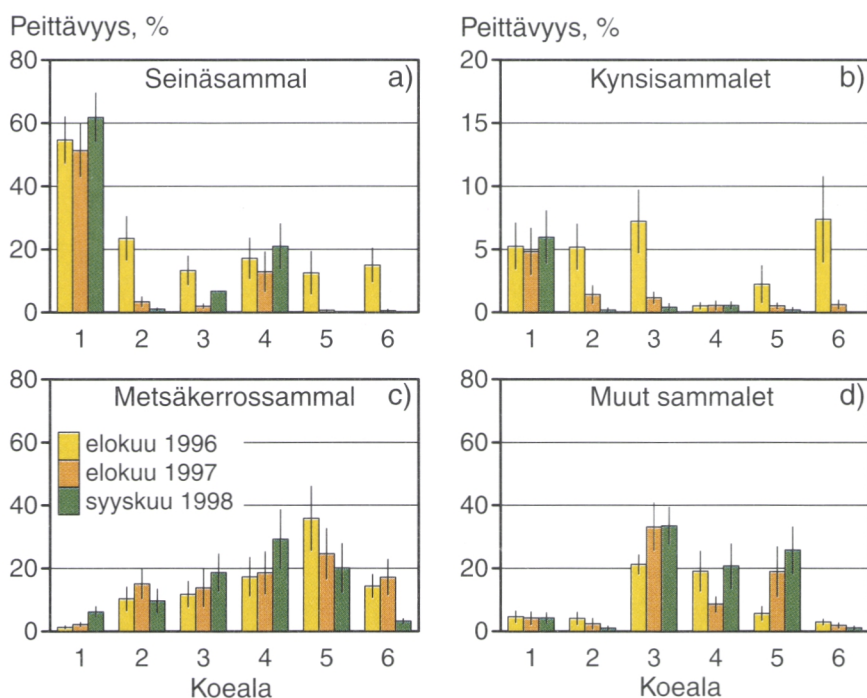
Pidemmällä aikavälillä on kasvuvaikutuksien lisäksi odotettavissa muutoksia kasvien lisääntymisessä, siementen leviämisessä, maassa olevan siemenvaraston koostumuksessa ja itämisessä, joilla voi olla huomattavia vaikutuksia kasvilajien populaatiodynamiikkaan.

### Sammalet

Kangasmetsien yleiset sammallajit seinäsammal (*Pleurozium schreberi*) (kuva 29a), kynsisammalet (*Dicranum*- suku) (kuva 29b) ja metsäkerrossammal (*Hylocomium splendens*) (kuva 29c) kärsivät imeytysaloilla liiasta märkydestä. Seinäsammal pysyi ensimmäisenä imeytyskesänä hengissä, mutta alkoi loppukesällä muuttua väriltään ruskehtavaksi. Kynsisammalten peittävyys pieneni jo ensimmäisenä ke-

sänä. Sekä seinä- että kynsisammalten peittävydet romahtivat toisena kesänä kaikilla imeytysaloilla ja kolmantena kesänä ne hävisivät lähes kokonaan. Metsäkerrossammal kärsi ensimmäisenä imeytyskesänä vähiten, mutta toisena imeytysvuonna sekin oli uusinta vuosikasvainta lukuunottamatta väriltään ruskea tai kellertävä. Myös sen peittävyys pieneni kolmantena kesänä muilla imeytysaloilla paitsi jaksotetulla kesäimeytysalalla. Sammalten vähentymiseen näytti vaikuttavan kosteuden lisäksi myös metsäkastikan lisääntymisestä johtuva varjostus. Imeytysaloilla havaittiin vuonna 1996 sammalten pinnalla järvisedestä peräisin olevaa vaaleaa levämassaa, mikä lienee myös haitannut sammalten kasvua.

Lehväsammalien (pääasiassa *Plagiomnium*-sukua) peittävyys kaksinkertaistui vuosina 1996–1998, koska harjun laelle muodostui jaksotetulla kesäimeytysalalla sopivan kostea kasvu ympäristö. Muiden lehtosammalten kuten suikerosammalien (*Brachythecium*-suku), lehto- haivensammalten (*Cirriphyllum piliferum*), kastesammalten (*Plagiochila asplenoides*) ja ruusukesammalten (*Rhodobryum roseum*) runsauksien



Kuva 29. Sammalten peittävyysmuutokset. a) Seinäsammalten, b) kynsisammalten, c) metsäkerrossammalten ja d) muiden sammalten keskimääräinen runsaus loppukesällä 1996, 1997 ja 1998 arvioituna prosenttipeittävyysinä yhden neliömetrin suuruisilla näyteruuduilla ( $n = 10-15$  ruutua/koeala). Jana = keskiarvon keskivirhe.

---

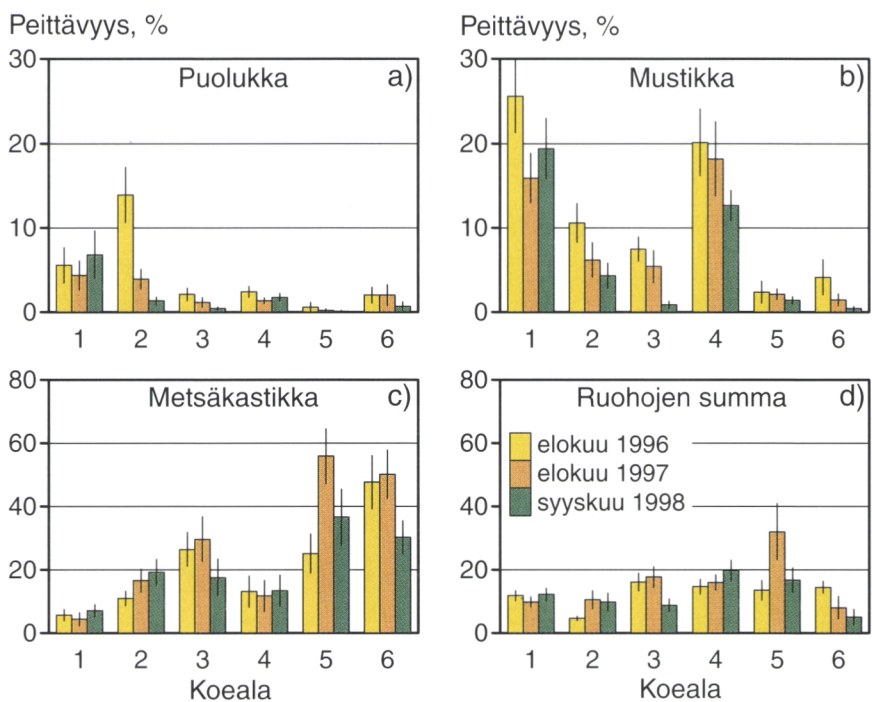
muutossuunnat vaihtelivat eri koealoilla (kuva 29d). Esimerkiksi talvi-imeytyksen alalla ne runsastuivat, mutta kärsivät ympärivuotisesta imeytyksestä. Uuden suosimmallajin (väkäsammal, *Campyllum stellatum*) löytyminen koealalta 2 elokuussa 1997 indikoi olosuhteiden muuttumista märemmiksi.

### **Putkilokasvit**

Putkilokasvien (ruohot, heinät, varvut ja alle 50 cm pensaat) reaktiot imeytyksen aiheuttamiin kasvupaikan muutoksiin vaihtelivat lajiryhmittäin. Lisääntynyt märkyys oli selvästi haitallista metsävarvuille. Jo ensimmäisen tutkimuskesän lopussa v. 1996 puolukalla (*Vaccinium vitis-idaea*) havaittiin kuolleita versoja, lehtien koon epänormaalia suurentumista ja värivikoja. Puolukalla havaittiin myös kahtena ensimmäisenä tutkimuskesänä pöhösienten (*Exobasidium* sp.) aiheuttamaa tautia, joka muutti lehdet ja varren turpeiksi ja väriltään vaaleanpunaisiksi. Kolmantena imeytysvuonna (1998) puolukan peittävyys oli pienentynyt kaikilla imeytysaloilla. Alkutilanteeseen suhteutettuna muutos oli suurin (90 %-yksikköä) kesäimeytysalalla (kuva 30a).

Mustikan (*Vaccinium. myrtillus*) peittävyys pieneni seurantajaksolla sekä imeytys- että vertailualoilla (kuva 30b). Mustikan versoja oli paleltunut talvella 1996–97 kaikilla koealoilla, mikä selittää vertailualoilla havaittua peittävyuden pienentymistä. Mustikka näytti aluksi sietävän märkyyttä paremmin kuin puolukka, mutta jo toisen imeytyskesän lopussa versokuolema oli voimistunut. Sadetusputkien läheisyydessä tavattiin epänormaalin suuria mustikanversoja. Elokuussa 1997 sekä puolukan että mustikan varsissa havaittiin runsaasti kilpikirvoja.

Heinät, sarat ja ruohot olivat kahden imeytyskauden jälkeen hyväkuntoisia (kuva 31), mutta kolmantena tutkimusvuonna myös niiden peittävyudet pienenivät. Heinien valtalaji, metsäkastikka (*Calamagrostis arundinacea*), runsastui aluksi kastelun vaikutusalueella (kuva 32). Peittävyuden kasvu (1996–1997) oli suurinta talvi-imeytysalalla. Kolmantena imeytysvuonna myös metsäkastikka alkoi kärsiä märkyydestä ja sen peittävyys pienentyi muilla imeytysaloilla paitsi kesäkautisella (kuva 30c). Ruohoilla havaittiin samanlainen muutossuunta kuin heinillä (kuva 30d). Kolmantena tutkimusvuonna imeytysaloilta löytyi uusia pioneerikasveja pidettäviä lajeja: pillikkeet (*Galeopsis* sp.), horsmat (*Epilobium* sp.), kaura (*Avena sativa*) ja tähtimöt (*Stellaris* sp.). Monilla ruohoilla kuten orvokeilla (*Viola* sp.), mataroilla (*Galium* sp.) ja tädykkeillä (*Veronica* sp.) havaittiin muuttunut kasvutapa, joka ilmeni pitkinä rönnyilevinä varsina ja suurina ohentuneina lehtinä. Pensas-kerroksen pihlajat kärsivät sienitaudeista kaikilla koealoilla, ja niiden kuolleisuus voimistui erityisesti kesäimeytysalalla (kuolleita n. 11 %) ja ympärivuotisella imeytysalalla (kuolleita n. 16 %).



Kuva 30. Putkilokasvien peittävyksien muutokset. a) Puolukan, b) mustikan ja c) metsäkastikan ja d) ruohojen keskimääräinen runsaus loppukesällä 1996, 1997 ja 1998 arvioituna prosenttipeittävyksinä yhden neliömetrin suuruisilla näyte-ruuduilla (n = 10–15 ruutua/koeala). Jana = keskiarvon keskivirhe.



H-S. Helmissaari

Kuva 31. Ruohoja ja heiniä imeytysalalla alkukesällä 1998.



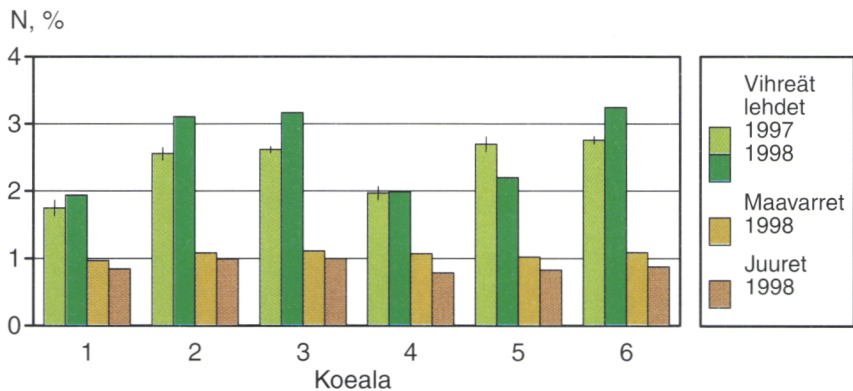
E. Oksanen

Kuva 32. Metsäkastikkaa Ahveniston harjulla syksyllä 1997.

Eri koealojen kasvillisuutta verrattaessa on muistettava, ettei niiden lähtötilanne ollut samanlainen kasvilajien runsauden suhteen. Peittävyksien muutokset tietyllä käsittelyllä antoivat sen sijaan luotettavamman kuvan imeytyksen vaikutuksesta kasvillisuuteen.

### **Typen sitoutuminen aluskasvillisuuteen**

Metsäkastikan lehtien kokonaistypen pitoisuudet olivat loppukesällä 1997 kaikilla imeytysaloilla suuremmat kuin vertailualoilla (kuva 33). Imeytysaloilta kerättyjen lehtinäytteiden typpipitoisuudet olivat vertailualoja korkeammat myös vuonna 1998 lukuunottamatta talviimeytysalaa. Metsäkastikan maavarsien ja juurien typpipitoisuudet olivat alhaisemmat kuin lehtien eikä koealojen välillä havaittu selviä eroja. Lehdoissa kasvavien heinien tiedetään suosivan nitraattia typen lähteenä mikäli sitä on saatavilla (Falkengren-Grerup & Lakkenborg-Kristensen 1994). Vaikuttaa siltä, että metsäkastikka sitoi imeytysaloilla ammoniumtypen lisäksi nitraattia, jonka osuus maaperän kokonaistypistä oli suurentunut voimistuneen nitrifikaation seurauksena. Myös sadetusveden typpipitoisuudet olivat korkeat. Typen saatavuuden lisääntyminen näkyi lehtien kohonneina typpipitoisuuksina ja aluksi myös voimistuneena kasvuna. Lehdet säilyivät lisäksi vihreinä pitkälle syksyyn, mikä niinkään voi olla seurausta typpilisästä, tai imeytysalojen muuttuneen vesi- ja lämpötilan vaikutuksesta heinien vuosirytmiiin. Koska maavarsi- ja juurinäytteet otettiin lehtien ollessa vielä vihreät, ei ole tiedossa siirtääkö metsäkastikka lehtien typpiyhdisteitä talveksi

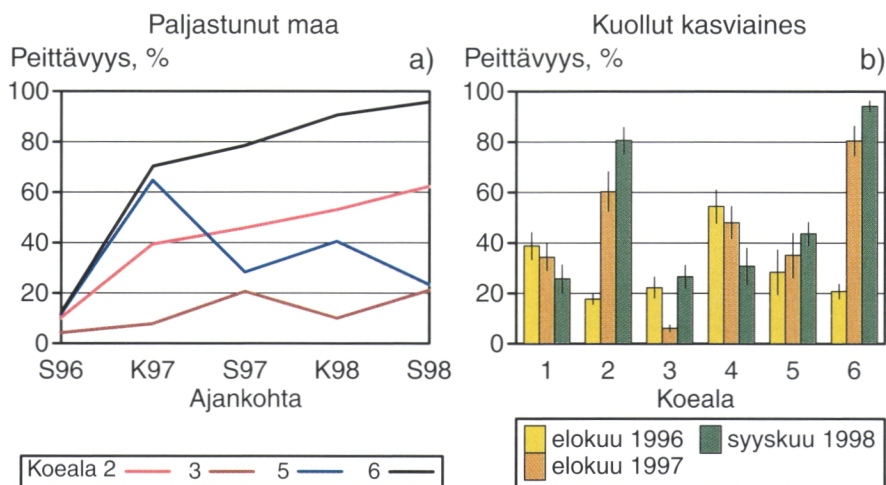


Kuva 33. Metsäkastikan kokonaistyyppipitoisuudet (%) eri kasvinosissa vuosina 1997 (vain lehdet) ja 1998. Jana = keskiarvon keskivirhe. Näytteet kerättiin 22.8.1997 ja 23.9.1998 (4–5 kpl/koeala). Vuonna 1997 kaikki näytteet analysoitiin erikseen, ja vuonna 1998 kunkin koealan näytteet yhdistettiin kokoomanäytteeksi.

maanalaisiin varastoihin vai palautuuko typpi maaperään lehtien lakastuttua.

## Maaperän eroosio ja karikkeen muodostuminen

Sadetuksen fysikaaliset vaikutukset ilmenivät jyrkällä rinteellä veden pintavalunnan aiheuttamana maa-aineksen paljastumisena eli eroosiona. Vesisuihku tuli sadetusputkista kovalla voimalla ja jakaantui pienelle alueelle. Putkien lähietäisyydelle (1–2 m) muodostui lammikoita, joista vesi virtasi pintavaluntana alas rinnettä. Veden virtaus paljasti aluksi vain orgaanista maakerrosta, mutta vähitellen vesi syövytti kivennäismaahan asti ulottuvia uria. Eroosio lisääntyi tutkimusjaksolla 1996–1998 kaikilla imeytysaloilla (kuva 34a). Syyskuun alussa 1998 erodoituneen maan osuudet näyteruuduilla olivat suurimmat ympäri vuotisesti (95 %) ja kesäkaudella imeytetyillä (62 %) koealoilla ja pienimmät jaksotetun kesäimeytyksen (21 %) ja talvi-imeytyksen koealoilla (23 %). Vastaavat osuudet olivat koko koealalla 60–70 %, 45–50 %, 15–20 % ja 15–20 % maastossa tehdyistä peitepiirroksista arvioituna (kuva 6). Talvi-imeytysalalla eroosio väheni kesän tauon aikana, mutta eteni muilla imeytysaloilla kesän aikana. Ilmeisesti imeytyksen keskeyttäminen tai jaksottaminen kesäisin mahdollistaa, että kasvillisuus ehtii toipua ja pystyy taas sitomaan tehokkaammin paljastunutta maata. Maanpinnan liikkuminen häiritsi kasvien kiinnittymistä alustansa, ja juurten paljastuminen altisti niitä pakkasvaurioille ja sienitaudeille. Pensaskerros (esim. kuusen ja pihlajan taimet) ja tiheä heinikko näyttivät estävän maa-aineksen liikkumista rinteellä.



Kuva 34. a) Veden pintavalunnassa paljastuneen maan keskimääräinen peittävyys (%) yhden neliömetrin suuruisilla näyteruuduilla syksyllä (S) ja keväällä (K) vuosina 1996, 1997 ja 1998. b) Kuolleen kasviaineksen eli karikkeen keskimääräinen runsaus arvioituna prosenttipeittävyysinä yhden neliömetrin suuruisilla näyteruuduilla loppukesällä 1996, 1997 ja 1998 (n = 10–15 ruutua/koeala). Jana = keskiarvon keskivirhe.

Kuolleen kasviaineksen eli karikkeen määrä lisääntyi tutkimusjaksolla (1996–1998) eniten kesäkaudisella ja ympärivuotisen imeytyksen koaloilla (kuva 34b). Imeytysalojen karike muodostui pääasiassa kuolleesta sammalesta, heinästä ja havupuiden neulasista.

## Päätelmät

Kolme kasvukautta kestäneen veden imeytyksen seurauksena havaittiin lehtorinteellä seuraavat muutossuunnat:

1. Maaperän eroosio voimistui kaikilla imeytysaloilla, ja oli seuranta-jakson lopussa suurinta ympärivuotisen (95 %) ja kesäkaudisen (62 %) imeytyksen koaloilla. Jyrkkä rinne edisti eroosiota. Eroosion ehkäisyn kannalta veden imeytystä pitäisi jaksottaa. Imeytysaukojen aikana kasvillisuus ehtii toipua ja kiinnittyä tehokkaammin maahan. Talvi-imeytyksen ja jaksotetun kesäimeytyksen aiheuttama eroosio oli syksyllä samaa suuruusluokkaa (n. 20 %), mutta alkukesällä eroosio oli suurempaa talvi-imeytysalalla. Pensaskerros ja tiheä heinikko näyttivät parhaiten pidättävän maa-ainesta paikoillaan jyrkällä rinteellä. Sadetusvettä ei saisi suihkuttaa maahan liian kovalla voimalla, vaan olisi pyrittävä tasaiseen, luonnollista sadetta muistuttavaan sadetukseen.

- 
2. Suurten vesimäärien imeyttäminen maan läpi oli haitallista aluskasvillisuudelle ja pensaille. Jo ensimmäisen imeytyskesän aikana joidenkin kasvilajien ulkonäkö ja elinvoimaisuus muuttuivat. Kuivien ja karujen kasvupaikkojen lajit kärsivät ensisijaisesti liiasta märkyydestä. Myös maaperän ravinteisuuden ja pH:n muutokset saattoivat heikentää niiden kilpailukykyä nopeakasvuisiin ruohoihin ja heiniin verrattuna. Kangasmetsien tyypillisten sammalten ja varpujen peittävyudet pienenevät voimakkaasti sadetuksen vaikutusalueella. Sienitaudit lisäsivät varpujen ja pensaiden kuolemista.
  3. Ravinteikkaassa lehdossa viihtyvät heinät, ruohot ja sammalet näyttivät aluksi menestyvän imeytysaloilla, ja niiden peittävyudet kasvoivat kahden ensimmäisen kesän aikana. Kolmantena seuranta-kesänä myös heinät ja ruohot alkoivat vähentyä imeytysaloilla. Metsäkastikka sitoi lehtibiomassaan lisääntyneen nitrifikaation tuottamaa tai sadetusveden mukana tullutta typpeä.
  4. Imeytyksen jaksottaminen oli sekä kasvilajien hengissäsäilymisen että maaperän eroosion kannalta paras vaihtoehto. Talvi-imeytys aiheutti suurempia häiriöitä kasvivyhteisössä kuin kesäimeytys. Tämä ilmeni kasvien vuosirytmien muutoksina, metsäsammalten elinvoimaisuuden suurempana laskuna ja voimakkaampana eroosiona.
  5. Lehtokasvillisuuden perusteella voidaan saada vain viitteitä miten veden imeytys vaikuttaa karumpien kasvupaikkojen kasvillisuuteen. Ahveniston harjun tulokset antavat aiheutta epäillä, että karu metsäkasvillisuus kärsisi liiasta vedestä enemmän kuin rehevä lehtokasvillisuus. Koska karummilla kasvupaikoilla on niukasti nopeakasvuisia heiniä ja ruohoja typen sitoutuminen aluskasvillisuuteen on todennäköisesti vähäisempää kuin viljavilla kasvupaikoilla.

## Kuusen ja männyn sädekasvu

Imeytysalueella mitattiin puiden kasvua kesinä 1996–1998 (kuva 35). Tarkoituksena oli selvittää kärsivätkö puiden elintoiminnot sadetuksen vaikutuksista. Kysymystä lähestyttiin kahdesta näkökulmasta:

1. Kiihdyttääkö tai hidastaako suuren vesimäärän imeytys kasvualustan läpi puiden vuotuista kokonaiskasvua?
2. Muuttuuko puiden kasvurytmi? Alkaako kasvu sadetetuilla koelohjoilla tavanomaista aiemmin ja päättyykö se normaalia myöhemmin?



H-S. Helmsaari

Kuva 35. Puun sädekasvua mittaava kasvupanta.

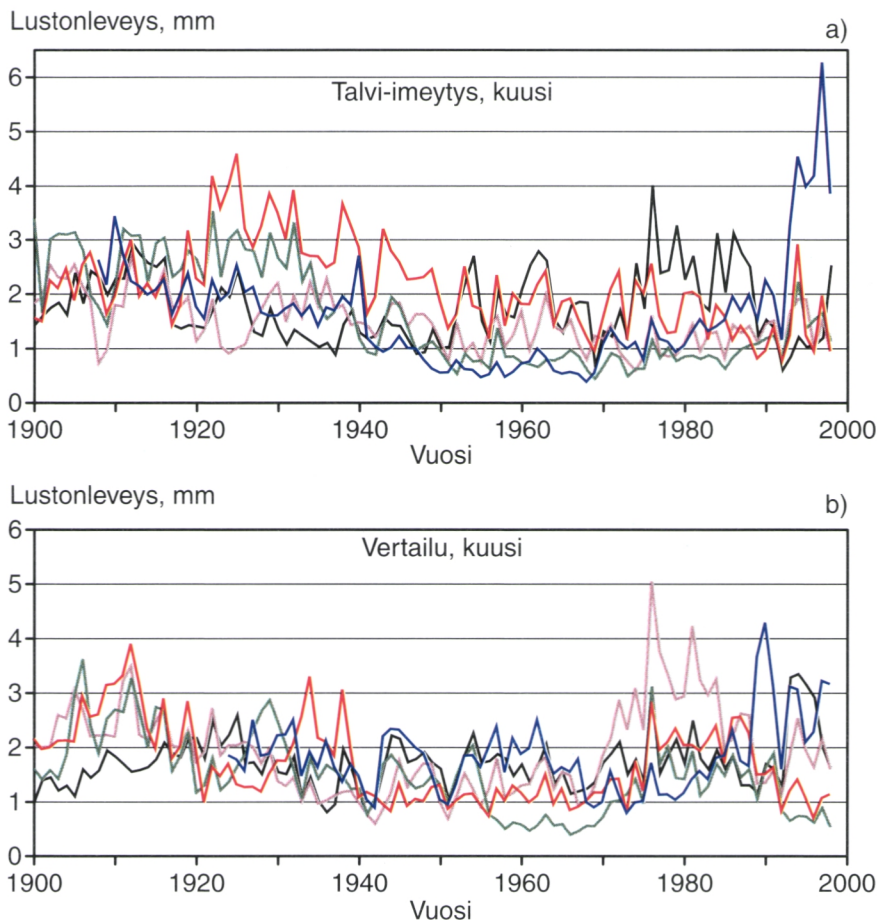
Vuotuisen kasvun taantuminen olisi merkki elintoimintojen heikkenemisestä ja viittaisi todennäköisesti siihen, ettei puusto kestä imeytystä pidemmällä aikavälillä. Kiihtyminen puolestaan viittaisi siihen, että runsas vedensaanti on ollut puille eduksi.

Kasvurytmin muuttuminen ei välttämättä näkyisi puiden terveyden-tilassa välittömästi. Sen sijaan se luultavasti lisäisi epätavallisiin sää-oloihin liittyvää riskiä. Hallat myöhään keväällä tai aikaisin syksyllä vaurioittavat puuta herkemmin, jos elintoiminnot ovat käynnissä – eli puu ei ole talvikautisessa lepotilassa, jossa se kestää koviakin pakkasia.

## Talvi-imeytys kuusikoealoilla

### Kasvu

Koealoilla 4 ja 5 kasvavat koepuiksi valitut kuuset olivat keskenään hyvin samanikäisiä – 110–120 vuotiaita. Tulosten mukaan puiden kasvu vaihteli varsin paljon vuosina 1900–1998 peräkkäistenkin vuosien välillä (kuva 36). Pääasiallisena syynä olivat erot loppukevään ja kesän sääoloissa, joskin muita mahdollisia syitä on lukuisia: sienten, tuhohyönteisten tai tuulen aiheuttamat vauriot tai ihmisen toiminta – jos metsikköä harvennetaan, jäljellejäävien puiden kasvu kiihtyy. Kuvista nä-

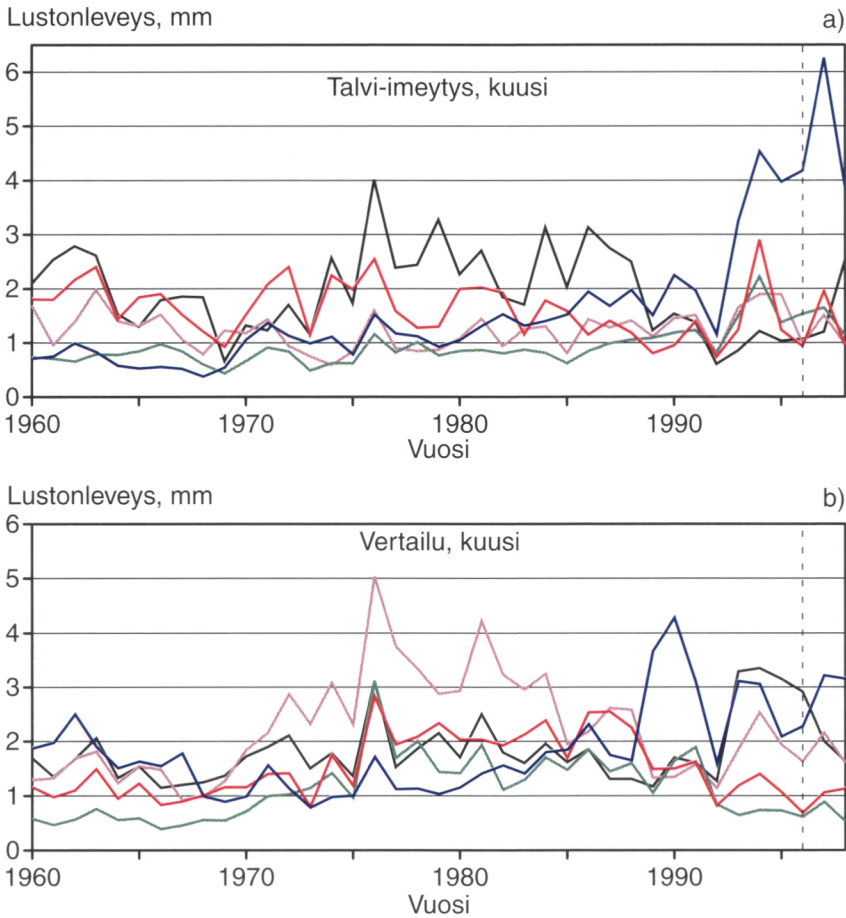


Kuva 36. a) Talvi-imeytysalan (ka 5) ja b) vertailualan (ka 4) koepuiden lustonleveydet vuosina 1900–1998.

kyy myös useimmille puulajeille tyypillinen sädekasvun trendinomainen hidastuminen puun iän lisääntyessä. Se ei merkitse sitä että tuotetun puuaineen määrä vähenisi: puun ympäröimän kasvaessa uudet solukerrokset peittävät laajemman pinnan. Lähellä kuorta olevat usein ohuet lustot saattavat sisältää enemmän puuainetta kuin lähellä puun ydintä sijaitseva hyvinkin paksu lusto.

Jos vertaillaan peräkkäisten vuosien lustonleveyksiä lyhyellä jaksolla, lustojen iänmukainen kapeneminen ei vaikeuta vertailua mainittavasti, etenkin jos puut ovat iäkkäitä. Vertaamalla lustonleveyksiä ennen sadetuksen käynnistymistä ja sen kestoaikana, voidaan siis tehdä päätelmiä tietyn käsittelyn aiheuttamista kasvumuutoksista.

Talvi-imeytysalan ja vertailualan kuuset olivat kasvaneet keskimäärin samaan tapaan vuosina 1960–1980 (kuva 37). Lustonleveydet vaihteli-



Kuva 37. a) Talvi-imeytysalan (ka 5) ja b) vertailualan (ka 4) koepuiden lustonleveydet vuosina 1960–1998.

vat tuolloin vajaasta millimetristä noin kahteen millimetriin. Sen jälkeen kolmen vertailualan kuusen kasvu on kiihtynyt; imeytysalalla näin tapahtui vain yhdelle koepuulle. Syynä kasvun kiihtymiseen on melko varmasti se, että etenkin vertailualalla puustoa on harvennettu, minkä seurauksena jäljellejääneille puille on jäänyt aiempaa enemmän valoa ja ravinteita.

Talvi-imeytysalan kuusten kasvu on jatkunut sadetuksen käynnistymisen jälkeen (v.1996; katkoviiva) hyvin samaan tapaan kuin 1990-luvun alkupuolella (kuva 37). Vuonna 1992 kuuset kasvoivat epätavallisen heikosti. Tuolloin niissä oli hyvin runsaasti käpyjä, joiden muodostamiseen kului runsaasti yhteyttämistuotteita.

Muista poiketen yhden koepuun kasvu kiihtyi erittäin paljon 1990-luvun keskivaiheilta alkaen. Todennäköistä on, että kasvukairaus on osu-

---

nut suuntaan, johon on viime vuosina muodostunut leveämpiä lustoja kuin rungon eri puolille keskimäärin. Joka tapauksessa kasvun kiihtyminen on käynnistynyt jo ennen sadetuksen aloittamista, eikä siis liene yhteydessä siihen. Mielenkiintoista kuitenkin on, että juuri kyseinen puuyksilö on altistunut sadetukselle kaikkein voimakkaimmin: se kasvaa aivan putken alapuolella. Puun kasvu on jatkunut erittäin nopeana sadetuksen käynnistyttyä, eikä se siis näytä ainakaan kärsineen valtavasta vedensaannin lisäyksestä.

Myös vertailualan kuusten kasvu oli samaa tasoa kuin 1990-luvun alkupuolella (kuva 36 b). 1960-lukuun verrattuna vertailualan kuusten kasvu oli kuitenkin muuttunut huomattavasti. Viidestä koeapuusta kahden kasvu oli laskenut varsin jyrkästi 1990-luvulla (kuva 37). Ilmiö liittyy siihen että puissa todettiin pahoja lahovikoja. Muilla kasvu kiihtyi selvästi 1960-luvun tasolta. Vuosina 1996–1998 näiden puiden kasvu kuitenkin jatkui suunnilleen yhtä nopeana kuin edeltävinä vuosina.

Talvi-imeytysalan kuusten vuotuinen kasvu ei siis mainittavasti muuttunut käsittelyn alkamisen jälkeen. Vertailualalta saadut tulokset eivät viittaa siihen, että vuodet 1996–1998 olisivat olleet ilmastollisesti poikkeuksellisen suotuisia tai epäsuotuisia. Talvikaudella sadetetun koealan kuusten tasaisena jatkunut kasvu oli siis odotusten mukainen, eikä anna viitteitä siitä, että puiden elinvoimaisuus olisi heikentynyt.

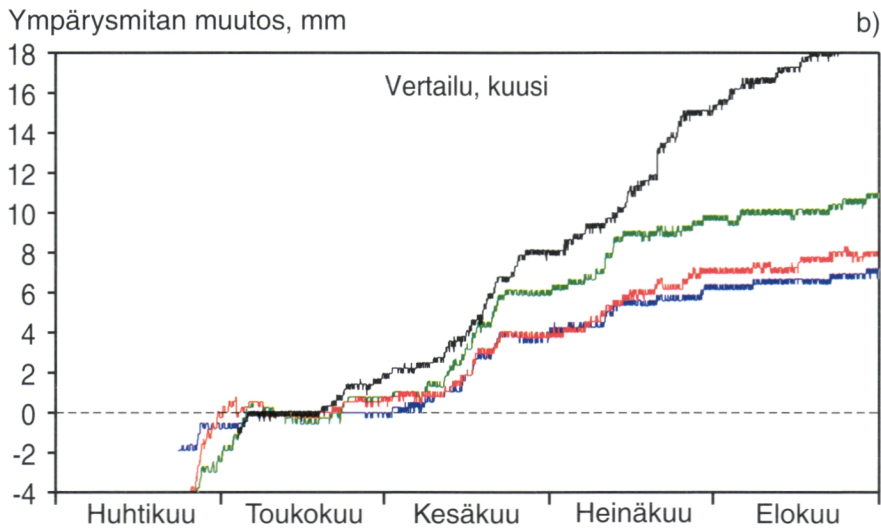
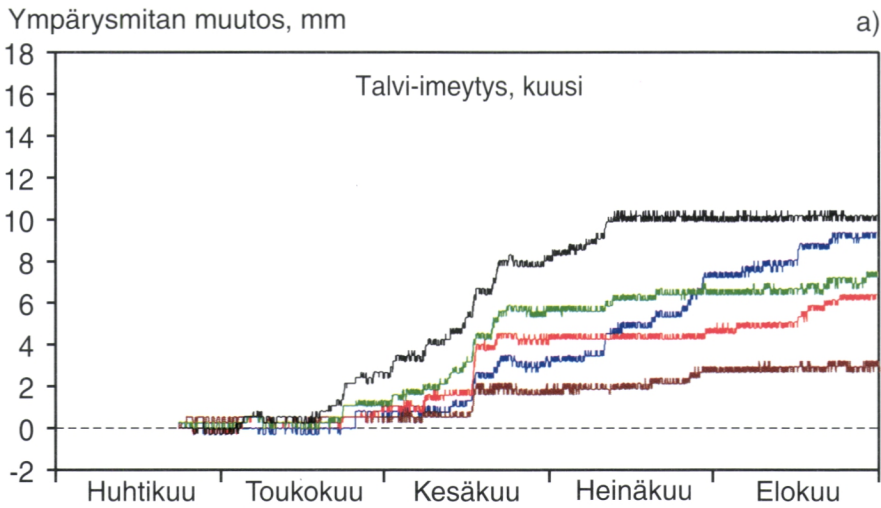
Tulosten tulkintaa vaikeuttaa jossain määrin se, että syksyn 1998 kasvukairaukset osoittivat vertailualan (koeala 4) kuusien kärsivän pahoista lahovioista. Kolme viidestä koeapuusta oli kairauskorkeudelta pahoin lahoja. Tämä heikentää talvi-imeytysalan (koeala 5) ja vertailualan (koeala 4) kuusten vertailukelpoisuutta. Kuusen lahoviat kehittyvät normaalisti varsin hitaasti; on varmaa että koepuut ovat olleet lahoja jo ennen jakson 1996–1998 alkua. Valitettavasti koeala 4 oli puustoltaan niin harva, ettei terveempiä koeputa ollut tarjolla. Lisäksi lahoisuus voidaan todeta luotettavasti vain kairausten avulla. Niihin ei haluttu turvautua ennen tutkimusjakson alkua, koska ne hieman vaurioittavat puuta.

Talvi-imeytysalan kuusten kasvua verrattiin toisaalta myös niiden omaan aiempaan kehitykseen. Merkittäviä kasvumuutoksia ei havaittu jaksolla 1960–1998. Siksi on mahdollista luotettavasti päätellä, ettei sadetuksella ole ollut mainittavaa puiden kasvua heikentävää vaikutusta.

### **Kasvurytmi**

Ilkivalta ja tekniset ongelmat häiritsivät kasvupantamittauksia melko pahoin vuosina 1996–1997. Tuolloin tehdyt havainnot viittasivat kuitenkin siihen, ettei imeytys näytä merkittävästi vaikuttaneen puiden kasvun käynnistymis- tai päättymisajankohtaan.

Vuoden 1998 kasvupantahavainnot alkoivat 23. huhtikuuta. Vertailualan kuusten läpimitat kasvoivat hyvin voimakkaasti huhti-toukokuun



Kuva 38. a) Talvi-imeytysalan (ka 5) ja b) vertailualan (ka 4) puiden ympärysmitan kehitys 23.4.–31.8.1998. Katkoviivalla merkitty nollassa kuvaa keväisen turpoilun jälkeistä puun ympärysmittaa.

vaihteessa (kuva 38b). Näin varhain puiden runkoon ei muodostu uusia solukerroksia. Kyse on runkoon imeytyvän veden aiheuttamasta turpoilusta. Neulasten aineenvaihdunta käynnistyy hyvin varhain keväällä jolloin neulasista haihtuu vettä; seurauksena on puun rungon alhainen vesipitoisuus. Neulasten haihuttama vesi korvautuu, kun juurten vedenotto käynnistyy roudan sulassa. Sateet luonnollisesti sekä jouduttavat roudan sulamista että lisäävät puille käyttökelpoisen veden määrää.

---

Mielenkiintoista on, ettei talvikaudella sadetettujen kuusien ympärysmitta ole lisääntynyt vastaavasti huhtikuun lopulla (kuva 38a). Valittavasti kasvupantahavainnot ei ole huhtikuun 23. päivää edeltävältä ajalta. On kuitenkin ilmeistä, että talvi-imeytysalan kuuset ovat kyenneet korvaamaan haihduttamansa veden jo aiemmin, koska maassa on ollut imeytyksen tuloksena jatkuvasti runsaasti vettä.

Vaikka sadetuksella siis näyttää olleen vaikutusta puiden vedenottoon, sädekasvun alkamisajankohdissa ei ole systemaattisia eroja imeytys- ja vertailualan puiden välillä. Lähes kaikkien koepuiden kasvu näyttää käynnistyneen noin viikkoa ennen toukokuun loppua. Viimeinen pysyväksi jäänyt ympärysmittan lisäys on mitattu useimmilla puilla heinäkuun viimeisinä päivinä. Elokuun lopulla ympärysmittat ovat kylläkin vielä kasvaneet varsin voimakkaastikin. Kyse on kuitenkin voimakkaiden sateiden aiheuttamasta turpoamisesta.

## Jatkuva kesäimeytys mäntykoaloilla

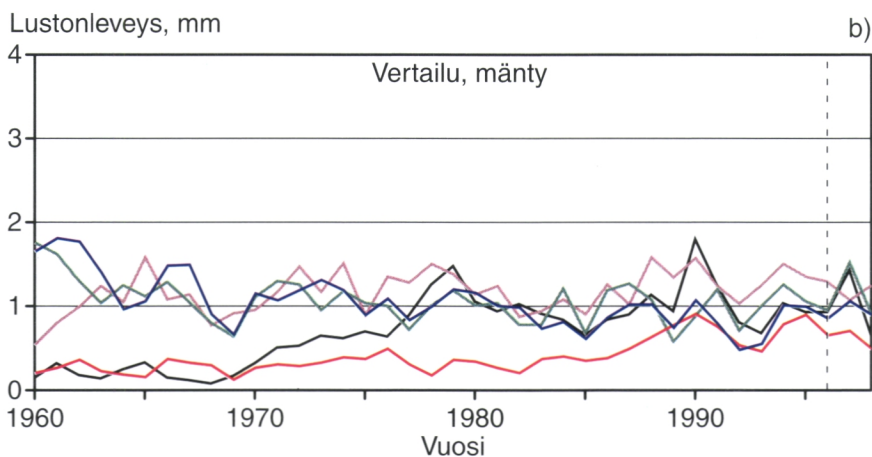
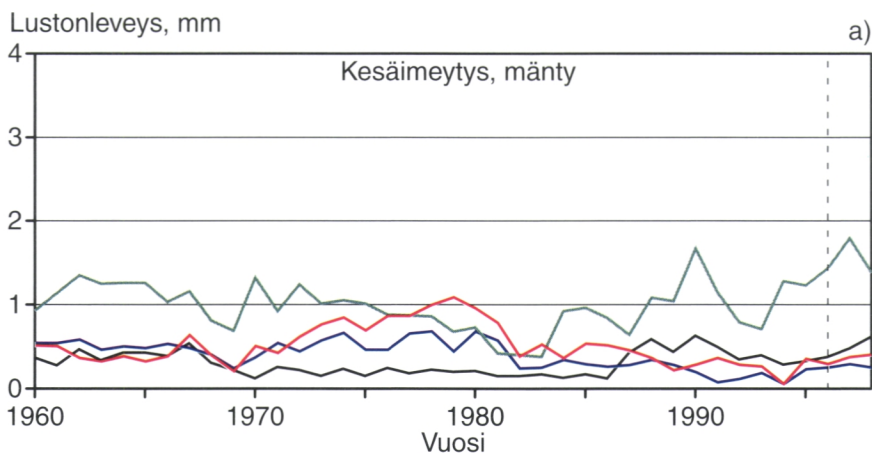
### **Kasvu**

Kesäkaudella jatkuvasti imeytetty koeala 2 oli lähes puhdasta männikköä, samoin sen vieressä sijaitseva vertailuala 1. Koepuiden ikäerot ovat hieman suurempia kuin kuusikoaloilla. Sadetettulla koealalla vaihteluväli oli 120–160 vuotta, ja vertailualalla vastaavasti 110–150. Kaikki puut olivat kuitenkin niin vanhoja, että nuoruusvaiheen nopean – ja nopeasti hidastuvan – sädekasvun vaihe oli ohi. Siten lyhyiden, peräkkäisten kasvujaksojen vertailu keskenään oli perusteltua, vaikkeivat koepuut kovin tasaikäisiä olekaan.

Koealan 2 männyt olivat ennen imeytyksen alkamista kasvaneet vertailukoelan mäntyjä hitaammin (kuva 39). Imeytys kiihdytti niiden kasvua: vuosina 1996–1998 suunta oli hyvin lievästi nouseva jaksoa edeltäviin vuosiin verrattuna.

Vertailualalla erot vuosikymmenen alkupuolen tuloksiin olivat niinkin vähäisiä. Päinvastoin kuin imeytysalalla, useimpien koepuiden kasvu oli kuitenkin pikemminkin hieman hidastunut kuin kiihtynyt jaksolla 1996–1998. Erityisesti kesällä 1998 suunta oli aleneva.

Teoriassa on mahdollista, että kesäkautisella imeytyksellä oli puille suotuisa vaikutus. Kokeelliset tutkimukset Ruotsissa ovat tuottaneet samansuuntaisia tuloksia; tosin olosuhteet, joissa kokeita on tehty, eivät ole olleet kovinkaan vertailukelpoisia Ahveniston vedenimeytyskokeen kanssa. Joka tapauksessa vuosilustoanalyysit eivät ainakaan anna viitteitä siihen suuntaan, että kesäkautisella imeytyksellä olisi ollut puiden kasvua hidastava vaikutus.



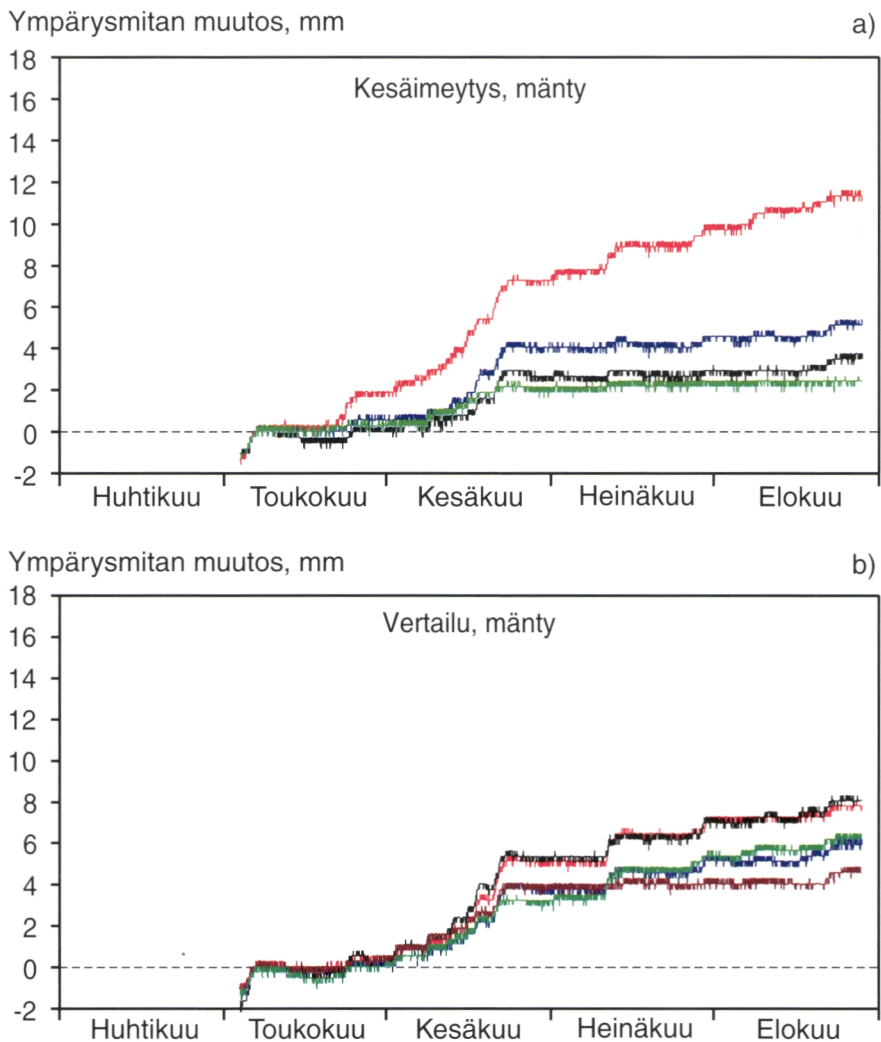
Kuva 39. a) Kesäimeytysalan (ka 2) ja b) vertailualan (ka 1) koepuiden lustonleveydet vuosina 1960–1998.

### Kasvurytmi

Kesäkaudella imeytetyn koealan 2 männyt kasvoivat kesällä 1998 keskimäärin hieman vertailualan männyjä hitaammin (Kuva 40). Yksi imeytysalan männyistä, joka sijaitsi aivan sadetusputken alapuolella, tosin kasvoi enemmän kuin yksikään vertailualan männyistä; muut sen sijaan hieman vertailualan puuta hitaammin.

Männyissä todettiin turpoilua toukokuun alussa – vaiheessa, jossa solunmuodostus ei ole vielä voinut käynnistyä. Ilmiö todettiin sekä sadetus- että vertailualan puissa, mikä onkin luonnollista, sillä kesäimeytys aloitettiin vuonna 1998 vasta 18.5.

Varsinainen kasvu käynnistyi lähes kaikissa puissa toukokuun viimeisellä viikolla sekä imeytys- että vertailualalla. Viimeiset puun kas-



Kuva 40. a) Kesäimeytysalan (ka 2) ja b) vertailualan (ka 1) puiden ympärysmitan kehitys 6.5.–22.8.1998 katkoviivalla kuvattu nollassa kuvaa puun keväisen turpoilun jälkeistä ympärysmittaa.

vuun liittyvät läpimitan lisäykset mitattiin heinä-elokuun vaihteessa. Kuten kuustenkin, myös mäntykoepuiden läpimitat lisääntyivät selvästi elokuun viimeisellä viikolla. Kyse on mitä ilmeisimmin sateen aiheuttamasta turpoilusta, koska elokuun viimeinen viikko oli runsassateinen. Aiempien tulosten mukaan näin myöhäisessä vaiheessa kesää uusia soluja ei enää muodostu. Ilmiö oli havaittavissa puiden läpimitassa molemmilla mäntyaloilla.

# Kuusen lahovikaisuus

Kari Korhonen ja Tuula Piri

Koalojen imeytys aloitettiin v. 1996, joten tarkasteluajankohtana imeytystä oli tehty kahtena vuonna. Tämä aika on liian lyhyt vaikutusten selvittämiseksi juurilahon kannalta. Tutkittu pieni aineisto ei paljasta tavallisuudesta poikkeavaa vanhan kuusikon ollessa kysymyksessä.

Vertailualalla on neljä kuusta, joissa on yli rinnankorkeustason ulotuva, ilmeisesti juurikäävän aiheuttama tyvilaho. Koetalta ja sen läheisyydestä löytyi myös kääpiä tuulenkaatamien kuusten juuristosta. Se, että juurikäpä voitiin eristää vain yhden lahon kuusen pintajuurista, ei ole poikkeuksellista, ei myöskään se, että lievää värivikaa esiintyi useiden kuusten pintajuurissa, jotka usein saavat pieniä pintavaurioita. Värivikainen puu saattaa olla merkki puun puolustusreaktiosta, eikä tällaisesta puusta useinkaan voida eristää sieniä.

Imeytys sinänsä ei oletettavasti lisää juuriston tartuntavaaraa, koska vesi on virtaavaa ja happipitoista, eikä siis aiheuta juurten tukehtumista niukkahappisissa oloissa kuten märässä maaperässä seisova vesi. Sillä, että kastelu nostaa maaperän pH-arvoa, saattaa olla juurikäävän tartuttaa jossakin määrin edistävä vaikutus, mutta tämän seikan selvittäminen vaatisi pitemmän tarkastelujakson ja ohuiden juurten tutkimista.

Joka tapauksessa imeytysalat ovat pinta-alaltaan niin pieniä, että vaikka kuusen lahoisuus niillä lisääntyisikin, sillä olisi taloudellisesti

Puu no	Lastun ulkonäkö	Lahottaja	Kairaus rinnankorkeudelta
Vertailuala 4			
1	värivikaa	-	laho (juurikäpä?)
2	värivikaa	-	- " -
3	laho	Juurikäpä	- " -
4	värivikaa	-	- " -
5	terve	-	terve
6	terve	-	- " -
7	värivikaa	-	- " -
Talvi-imeytysala 5			
8	värivikaa (juurivaurio)	-	terve
9	terve	-	- " -
10	terve	-	- " -
11	terve	-	- " -
12	terve	-	ei kairattu
Jatkuva kesäimeytysala 2			
13	värivikaa	-	- " -
14	värivikaa	-	terve
15	värivikaa	Penicillium	- " -

---

marginaalisen pieni merkitys. Lahojen puiden kaatumisen mahdollisesti aiheuttamat vahingot saattavat olla merkittävämpiä, mutta tämä vaara on aina olemassa vanhoissa kuusikoissa, ja sitä voidaan ennalta ehkäistä puiden ajoittaisella tutkimisella.

## Kuusen ja männyn ravinnetila

### Kesäimeytys

Yhden ja kahden kesäkauden mittaisen, jatkuvan veden imeytyksen jälkeen yksivuotiaiden männyn neulasten vesipitoisuudessa ei havaittu suurta eroa imeytysalalla 2 ja sen vertailualan 1 välillä (kuva 41 a). Sen sijaan neulasten vesipitoisuuden yleistaso oli korkeampi vuonna 1998 kuin vuonna 1997.

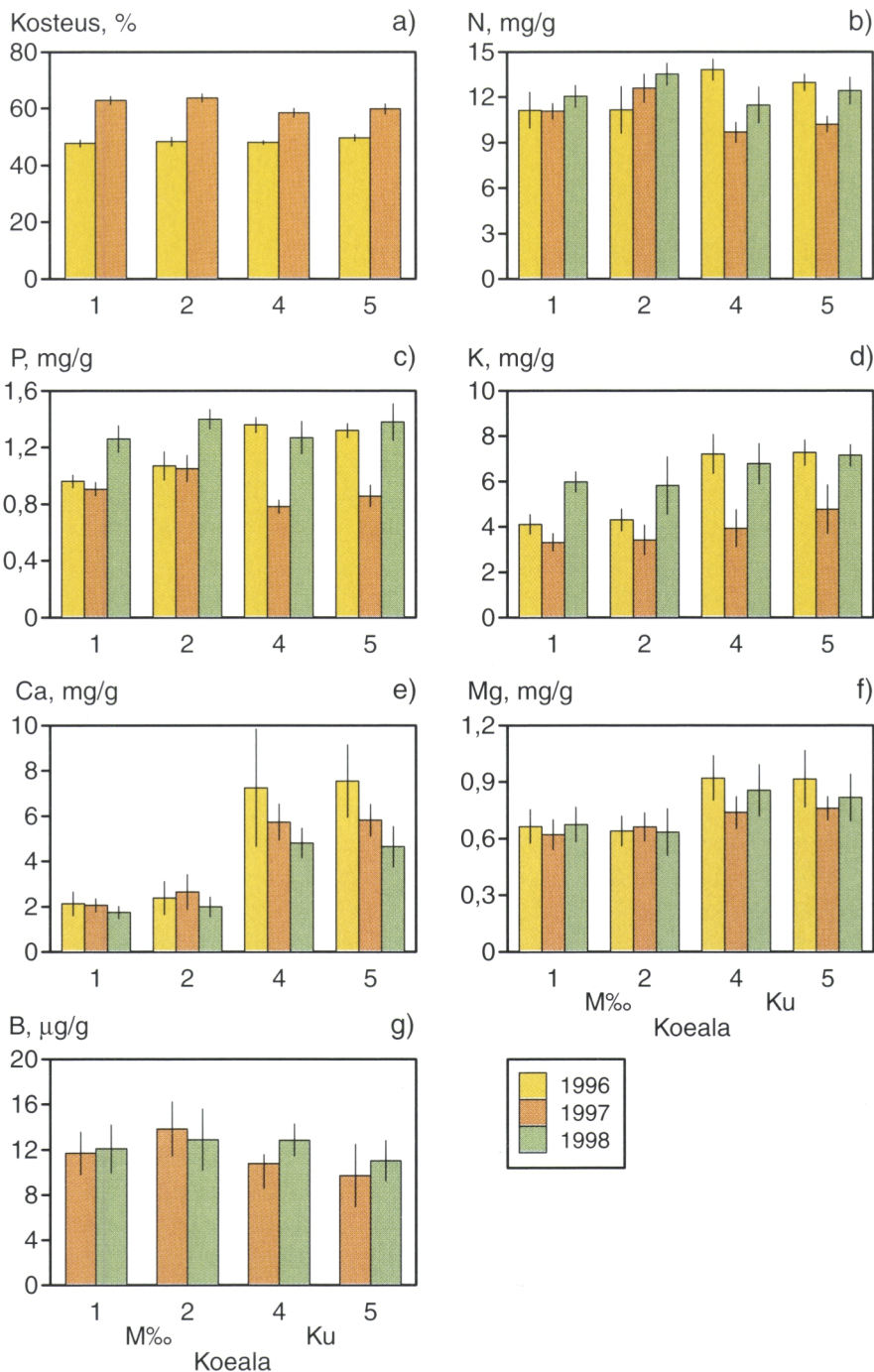
Vuoden 1996 tausta-analyysin mukaan koealat 1 ja 2 eivät eronneet neulasten ravinnetilan osalta merkittävästi toisistaan. Yhden kesän mittaisen jatkuvan veden imeytyksen jälkeen yksivuotiaiden männyn neulasten typpipitoisuus oli korkeampi imeytysalalla 2 kuin vertailualalla 1 (kuva 41 b). Vertailualalla näytteenottovuosien välillä ei havaittu merkittävää eroa, mutta imeytysalalla neulasten typpipitoisuus oli korkeampi vuonna 1997 kuin vuonna 1996.

Kahden kasvukauden mittaisen imeytyksen jälkeen vuonna 1998 tulos oli samansuuntainen, mutta neulasten typpipitoisuuden taso oli kohonnut sekä koealoilla 1 että 2 vuoteen 1997 verrattuna. Imeytysalalla 2 yksivuotiaiden neulasten typpipitoisuus oli edelleen korkeampi kuin vertailualalla 1 (kuva 41 b). Koealan 1 männyissä oli typen puutosta koko mittausjakson ajan. Koealalla 2 typpipitoisuus oli puutosalueella vuosina 1996–1997, mutta se kohosi lähes tyydyttävälle tasolle vuonna 1998.

Neulasten fosforipitoisuus oli korkeampi koealalla 2 kuin vertailukoelalla 1 sekä yhden että kahden kesän mittaisen jatkuvan veden imeytyksen jälkeen vuosina 1997 ja 1998 (kuva 41 c). Koealojen 1 ja 2 sisäinen vaihtelu neulasten fosforipitoisuudessa mittausvuosien 1997 ja 1998 välillä oli melko voimakasta. Vuonna 1998 pitoisuudet olivat korkeammat kuin vuonna 1997 molemmilla koealoilla.

Alkutilanteessa vuonna 1996 ja vuonna 1997 yksivuotiaiden neulasten fosforipitoisuus oli suhteellisen alhainen ja puustossa saattoi esiintyä fosforin puutosta molemmilla koealoilla. Vuonna 1998 pitoisuus oli kohonnut tyydyttävälle tasolle imeytysalalla 2 (kuva 41 c).

Yksivuotiaiden neulasten kaliumin pitoisuudessa ei havaittu merkittäviä eroja imeytysalan 2 ja vertailualan 1 välillä vuosina 1997–1998



Kuva 41. Yksivuotiaiden männyn ja kuusen neulasten a) vesipitoisuus sekä b) typi-, c) fosfori-, d) kalium-, e) kalsium-, f) magnesium- ja g) booripitoisuus vuosina 1996-1998. N=5-10 puuta/koeala. Jana=keskiarvon keskivirhe.

---

(kuva 41 d). Sen sijaan koealojen 1 ja 2 sisäinen vaihtelu neulasten kaliumpitoisuudessa oli voimakasta eri vuosien välillä. Pitoisuus oli korkeimmillaan vuonna 1998 ja alhaisin vuonna 1997. Vuonna 1996 yksivuotiaiden neulasten kaliumpitoisuus oli puutosrajalla. Pitoisuudet olivat puutosalueella myös vuonna 1997, mutta ne kohosivat lähes optimitasolle vuonna 1998. Neulasten kalsiumpitoisuudessa ei havaittu suuria eroja imeytysalan 2 ja vertailualan 1 välillä vuosina 1997–1998 (kuva 41 e). Alkutilanteessa vuonna 1996 yksivuotiaiden männyn neulasten kalsiumpitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla, mutta vuonna 1998 alhaisempia.

Samoin yksivuotiaiden neulasten magnesiumpitoisuudessa ei ollut eroja imeytysalan 2 ja vertailualan 1 välillä vuosina 1997–1998 (kuva 41 f). Vuosien välinen vaihtelu oli myös vähäistä molemmilla koealoilla. Pitoisuudet olivat suhteellisen alhaisia ja männynissä saattoi olla magnesiumin puutosta.

Mangaanipitoisuutta lukuunottamatta yksivuotiaiden männyn neulasten hivenaineiden pitoisuudet eivät eronneet merkittävästi koealojen välillä tausta-analyysissa vuonna 1996. Neulasten rauta-, mangaani-, sinkki- ja molybdeenipitoisuudet olivat vähintään tyydyttävällä tasolla. Sen sijaan kuparin pitoisuus oli melko alhainen, mutta puutostilaa ei todennäköisesti esiintynyt.

Yhden kesän mittaisen, jatkuvan veden imeytyksen jälkeen vuonna 1997 yksivuotiaiden neulasten boori- ja mangaanipitoisuudet olivat imeytysalalla 2 korkeammat kuin vertailualalla 1 (kuva 41 g, boori). Kahden kasvukauden mittaisen jatkuvan imeytyksen jälkeen vuonna 1998 edellä mainitut erot olivat tasoittuneet molempien hivenaineiden kohdalla. Koealalla 2 neulasten boori- ja mangaanipitoisuudet olivat vuonna 1998 alhaisemmat kuin vuonna 1997. Pitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla.

Yksivuotiaiden neulasten rauta- ja alumiinipitoisuudet eivät eronneet koealojen 1 ja 2 välillä merkittävästi toisistaan yhden kasvukauden mittaisen jatkuvan imeytyksen jälkeen vuonna 1997. Sen sijaan kahden kasvukauden mittaisen jatkuvan imeytyksen jälkeen vuonna 1998 pitoisuudet olivat koealalla 2 alhaisemmat kuin koealalla 1. Samoin neulasten rautapitoisuudet olivat alhaisemmat vuonna 1998 kuin vuonna 1997 molemmilla koealoilla. Pitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla.

Yhden kesän mittaisen jatkuvan veden imeytyksen jälkeen vuonna 1997 yksivuotiaiden neulasten kupari- ja molybdeenipitoisuuksissa ei havaittu merkittäviä eroja koealojen 1 ja 2 välillä. Sen sijaan vuonna 1998 kahden kasvukauden mittaisen imeytyksen jälkeen neulasten kuparipitoisuus oli alhaisempi koealalla 2 kuin koealalla 1. Lisäksi neulasten kuparipitoisuus oli koealalla 2 alentunut vuonna 1998 vuoteen 1997 verrattuna. Pitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla.

---

## Talvi-imeytys

Kolmen talvi-imeytysjakson jälkeen yksivuotiaiden kuusen neulasten vesipitoisuus oli lievästi korkeampi imeytysalalla 5 kuin vertailualalla 4 (kuva 41 a).

Ensimmäisen imeytystalven jälkeen vuonna 1996 yksivuotiaiden kuusen neulasten typpipitoisuus oli lievästi korkeampi vertailualalla 4 kuin imeytysalalla 5 (kuva 41 b). Tilanne oli sama kahden talvi-imeytysjakson jälkeen vuonna 1997. Sen sijaan kolmen imeytystalven jälkeen vuonna 1998 neulasten typpipitoisuus oli imeytysalalla 5 korkeampi kuin vertailualalla 4.

Neulasten typpipitoisuus vaihteli eri mittausvuosina melko voimakkaasti ja koealojen sisäiset vuosittaiset erot olivat suuria (kuva 41 b). Analyysitulokinnan mukaan typpitaso oli tyydyttävä vuonna 1996, mutta kuusissa oli typen puutosta molemmilla koealoilla erityisesti vuonna 1997 ja mahdollisesti myös vuonna 1998.

Vuosina 1996–1998 yhden ja kahden talvi-imeytysjakson jälkeen yksivuotiaiden kuusen neulasten fosforipitoisuudessa ei ollut merkittäviä eroja vertailualan 4 ja imeytysalan 5 välillä (kuva 41 c). Kolmen talvi-imeytysjakson jälkeen vuonna 1998 neulasten fosforipitoisuus oli korkeampi imeytysalalla 5 kuin vertailualalla 4.

Vuonna 1997 fosforipitoisuudet olivat alhaisemmat kuin vuosina 1996 ja 1998 (kuva 41 c). Vuosina 1996 ja 1998 neulasten fosforipitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla, mutta vuonna 1997 kuusissa saattoi olla fosforin puutosta.

Vuonna 1996 ensimmäisen talvi-imeytysjakson jälkeen yksivuotiaiden kuusen neulasten kaliumpitoisuus oli samaa luokkaa vertailualalla 4 ja imeytysalalla 5. Kahden ja kolmen imeytysjakson jälkeen vuosina 1997 ja 1998 neulasten kaliumpitoisuus oli lievästi korkeampi koealalla 5 kuin koealalla 4 (kuva 41 d).

Neulasten kaliumpitoisuudet olivat korkeat molemmilla koealoilla vuosina 1996 ja 1998, mutta vuonna 1997 taso oli alhaisempi ja kuusissa saattoi olla lievää kaliumin puutosta.

Erot yksivuotiaiden neulasten kalsium- ja magnesiumpitoisuuksissa koealojen 4 ja 5 välillä olivat vähäiset vuositasolla (1996–1998) (kuva 41 e ja f). Magnesiumpitoisuuksissa myös koealojen sisäinen vuosivaihtelu oli melko pientä. Molemmilla koealoilla kalsiumpitoisuudet alenivat kolmen imeytysvuoden aikana. Kalsiumin taso neulasissa oli varsin korkea. Magnesiumin pitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla vuosina 1996 ja 1998, mutta puutosrajalla vuonna 1997.

Vuonna 1997 kahden talvi-imeytysjakson jälkeen yksivuotiaiden kuusen neulasten booripitoisuus oli lievästi alhaisempi imeytysalalla 5 kuin vertailualalla 4 (kuva 41 g). Sen sijaan vuonna 1998 kolmen talvi-

---

imeytysjakson jälkeen neulasten booripitoisuus oli selvästi alhaisempi imeytysalalla 5 kuin vertailualalla 4. Kehitys neulasten mangaanipitoisuudessa vuosina 1996–1998 oli samansuuntainen boorin kanssa.

Yksivuotiaiden kuusen neulasten alumiini-, kupari- ja rautapitoisuudet olivat imeytysalalla 5 lievästi korkeammat kuin vertailualalla 4 koko tutkimusjakson ajan. Pitoisuudet alenivat jonkin verran molemmilla koealoilla kolmen imeytystalven aikana. Neulasten boori-, kupari-, mangaani- ja rautapitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla koealoilla 4 ja 5.

## Päätelmät

Vuoden 1996 taustamittauksen mukaan koealojen 1 ja 2 männyissä oli lähtötilanteessa typen puutosta. Samoin fosfori ja magnesiumpitoisuudet olivat melko alhaiset. Muilta osin ravinnetila oli tyydyttävä (Mälkönen 1974, Fober 1976, Jukka 1988, Hüttl 1991, Mälkönen 1991, Helmi-saari 1992, Braecke 1994, Kolari 1994).

Kahden kesäkauden mittainen (5–6 kk/vuosi), jatkuva veden imeytys kohotti merkittävästi männylle tärkeiden pääravinteiden, typen ja fosforin pitoisuuksia neulasissa jo ensimmäisenä imeytysvuotena. Vertailualalla vastaavaa vaihtelua ei havaittu, joten veden imeytys oli todennäköisimmin syynä muutokseen. Vuonna 1996 tehdyn taustamittauksen mukaan männyissä oli typen- ja ehkä myös fosforipuutosta, joten ravinnetilan muutos oli puiden kannalta positiivinen. Muutos jatkui ainakin kahden kesän ajan.

Veden imeytyksen suora vaikutus liittyyneessä tässä yhteydessä lähinnä puuston typen saannin parantumiseen (vrt. maa- ja mikrobiologisen tutkimuksen tulokset). Fosforin oton on havaittu korreloivan voimakkaasti typen oton kanssa, koska typen pelkistys kuluttaa puissa runsaasti energiaa, jota saadaan fosforia sisältävistä ATP- molekyyleistä (Amberger 1979). Veden imeytyksessä käytetyn raakaveden aiheuttaman maaperän pH:n kohoamisen pitäisi itse asiassa alentaa kasveille käyttökelpoisen fosforin määrää maassa (Hartikainen 1979). Koealueen maaperän luontainen fosforipitoisuus lienee kuitenkin riittävän korkea turvaamaan fosforin saannin. Toisaalta raakavesi sisälsi myös fosforia. Lisäksi imeytykseen käytetty alue on pieni puiden juuristoalueeseen verrattuna, joten juuret eivät olleet kokonaisuudessaan imeytyksen vaikutuspiirissä.

Ravinnetilan parantuminen typen ja fosforin suhteen edistää puuston kuntoa, mutta selvät positiiviset muutokset esimerkiksi puuston kasvussa riippuvat myös muissa ravinteissa ja kasvutekijöissä ilmenevistä muutoksista.

Muiden pääravinteiden osalta veden imeytyksen vaikutuksiin liitettäviä merkittäviä muutoksia puustossa ei havaittu. Imeytysveden korkea

---

emäskationipitoisuus (Ca, K, Mg) ei heijastunut puuston ravinnetilassa tutkimusjakson aikana. Syynä saattaa olla puiden juuriston ulottuminen imeytyksen vaikutuksen ulkopuolelle. Lisäksi lisääntynyt ammoniumtypen saanti (vrt. maaperän typpitulokset) vähentää emäskationien ottoa havupuissa (Boxman & Roelofs 1988).

Pääravinteissa ilmenneiden muutosten lisäksi veden imeytys kohotti männyn neulasten booripitoisuutta, mutta vain ensimmäisen imeytysvuoden aikana. Toisaalta imeytys alensi neulasten kupari- ja rautapitoisuuksia merkittävästi kahden imeytysvuoden jälkeen.

Kaksi talvi-imeytysjaksoa (5–6 kk/vuosi) vuosina 1996–1997 eivät aiheuttaneet suuria muutoksia kuusen neulasten ravinnetilassa. Sen sijaan kolmannen talvi-imeytysjakson jälkeen imeytyksen todettiin kohottaneen kuusen neulasten typpipitoisuutta merkittävästi. Kuten kesäimeytysalan mäntyjen myös talvi-imeytysalan kuusten neulasten fosforipitoisuus kohosi, mutta ero ei ollut yhtä merkittävä kuin männyllä. Neulasten fosforitason kohoamiseen liittynevät samat syy-yhteydet kuin männyn kohdalla on jo mainittu.

Muissa pääravinteissa ei havaittu suuria muutoksia kolmannenkaan imeytysjakson jälkeen. Erikoista kuusenkin osalta on, ettei imeytysveden korkea emäskationipitoisuus lisännyt neulasten emäskationipitoisuuksia. Syy-yhteydet voivat olla samat kuin männyn kohdalla.

Talvi-imeytys alensi kuusen neulasten hivenravinteiden pitoisuuksia. Kolmannen imeytysjakson jälkeen kuusen neulasten booripitoisuudet olivat merkittävästi alhaisemmat kuin vertailukoelalla. Boorin vähentyminen saattaa johtua imeytysveden korkeasta emäskationipitoisuudesta. Erityisesti kalkin on havaittu haittaavan kuusen boorin ottoa (Lipas 1990). Neulasten booripitoisuus ei kuitenkaan ollut vähentynyt puutosalueelle vuoteen 1998 mennessä. Boorin puutoksella voisi olla pitkällä tähtäimellä haitallisia seurauksia puiden kasvun kannalta.

Talvi-imeytyksen vaikutus kuusen ravinnetilaan oli siten tässä vaiheessa hitaampi ja jonkin verran vähäisempi mutta samansuuntainen kuin jatkuvan kesäimeytyksen vaikutus männyn ravinnetilaan. Syinä saattoivat olla toisen imeytysvaiheen ajoittuminen kasvukauteen ja toisen puiden lepo vaiheeseen sekä kuusissa haavaittu lahovikaisuus.

Lisäksi männyn ravinnetila vertailualoilla oli lähtötilanteessa jonkin verran heikompi kuin kuusen, minkä vuoksi männyn reaktio ravinnetilaisyyksiin saattaa olla voimakkaampi kuin kuusen reaktio.

Kahden kesän mittainen jatkuva imeytys ja jatkuva talvi-imeytys (kesto kolme talvikautta) eivät aiheuttaneet puuston ravinnetaloudelle merkittävää haittaa. Päinvastoin imeytyksellä saattaa olla ainakin sen alkuvaiheessa positiivisia vaikutuksia ravinnetilassa, erityisesti jos puusto

---

kärsii luonnontilassa ravinnepuutoksista. Samalla puuston kiihtynyt ravinteiden otto vähensi typen huuhtoumisriskiä imeytysalueelta.

Toisaalta tutkimusjakson aikana saatiin myös viitteitä siitä, että pitkäaikainen veden imeytys samalla alueella voi haitata sekä kuusen että männyn hivenravinnetaloutta, erityisesti jos raakaveden emäskationipitoisuus on korkea.

## Puuston ja aluskasvillisuuden hienojuuret

Metsäpuiden juuristo muodostuu rakenteeltaan ja toiminnaltaan erilaisista juurista: monivuotisista puutuneista paksujuurista sekä lyhytikäisistä hienojuurista. Ohuimmat, alle millimetrin paksuiset hienojuurit ovat havupuillamme lähes aina sienijuurellisia eli mykorritsallisia, ja ne muodostavat jopa 90 % juurten kokonaispituudesta. Puiden ravinteiden ja veden otto tapahtuu pääasiassa sienijuurellisten juurenkärkien kautta. Hienojuurten kasvuun ja ravinteiden ottoon vaikuttavat maan lämpötila, kosteus, ravinteisuus, ilmatila ja tiiviys. Hienojuurit uusiutuvat jatkuvasti. Yksittäisen hienojuurin elinikä vaihtelee muutamasta viikoista muutama vuoteen. Juurten kasvu, kuoleminen ja hajoaminen ovat tärkeä osa hiilen ja ravinteiden kiertoa metsäekosysteemissä (Helmisaari 1995). Hienojuurten nopean uusiutumisen vuoksi suuri osa metsämaan organisesta aineesta on peräisin kuolleista ja hajonneista hienojuurista.

Veden imeytys voi olla haitallista hienojuurille, mikäli maan ilmatila kyllästyy pysyvästi vedellä, ja vesi ei vaihdu nopeasti. Juuret tarvitsevat happea elintoimintojensa ylläpitämiseksi, minkä vuoksi riittävä ilmatila maassa on edellytyksenä juurten menestymiselle. Ilmatila voi olla riittämätön, jos maalaji on savi- tai hiesuvaltainen, ja varsinkin jos pohjavesipinta jostakin syystä on noussut. Maan kosteuden ja ravinteisuuden lisääntyminen voi toisaalta lisätäkin hienojuurten kasvua ja tehostaa ravinteiden ottoa. Varsinkin kuusikoissa maan pintakerroksen kuivuminen kasvukauden aikana voi vaikuttaa haitallisesti hienojuuristoon ja ravinteiden ottoon.

Imeytysalueella tutkittiin puiden elävien ja kuolleiden hienojuurten määriä organisessa kerroksessa vuonna 1996 välittömästi ensimmäisen talvi-imeytysjakson jälkeen koealoilla 4 ja 5 sekä ennen ja jälkeen kesäimeytysjakson koealoilla 1 ja 2.

Talvi-imeytysalan (koeala 5) humuskerroksessa oli kesäkuussa 1996 imeytyksen päätyttyä lievästi enemmän sekä kuusen eläviä (taulukko 11) että kuolleita hienojuuria kuin vertailualalla (koeala 4).

Kesäimeytyksen vertailualan (koeala 1) kuusten elävät hienokuuret vähenivät ensimmäisenä imeytyskesänä kesäkuusta lokakuulle, mutta imeytysalan (koeala 2) kuusten hienokuuret lisääntyivät hieman imeytysjakson aikana. Havupuiden kuolleiden hienokuurten määrä väheni hieman sekä vertailualalla että kesäimeytysalalla kesäkuusta lokakuulle (taulukko 11). Elävien hienokuurten suhde kuolleisiin oli suurempi kesäimeytysalalla imeytyksen jälkeen, mutta vertailualalla se ei juuri muuttanut kasvukauden aikana.

Koealoilla 1 ja 2 puusto oli mäntyvaltaista. Koska varttuneen puuston juuristo ulottuu laajalle, myös näiden koealojen ulkopuolella kasvaneiden kuusten juuret ulottuivat koealoille. Kuusen hienokuurten suuri määrä humuskerroksessa mäntyyn verrattuna johtuu todennäköisesti myös kuusen hienokuurten pinnallisemmasta sijainnista. Kuusen hienokuuret keskittyvät humuskerrokseen, mutta männyn hienokuuria on eniten kivennäismaan yläosassa (Makkonen ja Helmisaari 1998, Helmisaari ja Hallbäcken 1999). Mäntyjen hienokuurten määrissä ei ollut imeytyksestä johtuvia eroja.

Hienokuuritulokset osoittavat, että yhden talvikauden tai kesäkauden mittainen veden imeytys ei aiheuttanut merkittäviä muutoksia havupuiden elävien tai kuolleiden hienokuurten määriin. Kesäkautisen imeytysalan tulokset viittasivat parantuneeseen kuusen hienokuurten kasvuun. Vuonna 1998 maan eroosio lisääntyi voimakkaasti, ja paikoitellen juuria paljastui humuskerroksesta (kuva 42). Seisovan veden aiheuttama pinta-

Taulukko 11. Kuusen ja männyn hienokuurimassat humuskerroksessa kesäkuussa ja lokakuussa 1996 imeytys- ja vertailualoilla. \* Hienokuurinäytteenotto suoritettiin koealoilla 4 ja 5 vain kesäkuussa 1996. N = 15 näytettä/koeala.

		Vertailu- ala		Kesä- imeytysala		Vertailu- ala		Talvi- imeytysala	
		1		2		4		5	
Juurimassa, g/m <sup>2</sup>	kk	x	s.e.	x	s.e.	x	s.e.	x	s.e.
Kuusen elävät hienokuuret	06	53,2	10,1	30,6	4,7	76,8	37,1	121,9	37,1
	10	27,0	7,1	47,1	15,6	*		*	
Männyn elävät hienokuuret	06	0,0	0,0	0,0	0,0	9,3	7,0	5,0	5,8
	10	2,7	1,5	2,1	1,1	*		*	
Kuusen ja männyn kuolleet hienokuuret	06	17,7	9,3	9,3	1,1	19,0	15,6	57,4	16,4
	10	7,1	1,6	6,2	1,2	*		*	

x = keskiarvo, s.e. = keskiarvon keskivirhe.



Kuva 42. Pintaeroosion paljastamaa juuristoa kesäimeytysalalla syksyllä 1998.

maan hapettomuus voi paikoitellen heikentää, hienojuuriston toimintaa, mutta kuivemmilla välialueilla kasvavat hienujuuret voivat vähentää puille tästä mahdollisesti aiheutuvia haittoja. Hienojuuriston toiminnan ja puiden hyvinvoinnin kannalta onkin edullista, että imeytysaluetta ei imeytetä tasaisesti, vaan putkien välissä on kuivempia välialueita.

---

# Loppupäätelmät

## Imeytyksen aiheuttamat muutokset

### Maaperä, vajovesi ja pohjavesi

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että pintaveden imeytyksellä on monitahoisia vaikutuksia imeytysalueen maaperään ja kasvillisuuteen. Vaikutusten määrä ja laatu riippuu imeytettävän raakaveden määrästä ja laadusta, kuten happamuudesta ja epäorgaanisten ja orgaanisten aineiden pitoisuuksista.

Koska imeytettävät vesimäärät olivat erittäin suuria vastaten 8 800–10 400 mm:n vuorokausisadantaa, imeytysveden pH oli korkea (7,1–7,7) ja vesi sisälsi runsaasti emäskationeja (kalium, kalsium ja magnesium), metsämaan pH kohosi kaikilla imeytysaloilla luontaisesta arvosta 4,7–5,4 keskimäärin kaksi pH-yksikköä (n. 6,4–7,0). Happamuuden palautuminen luontaiseen tilaan tapahtuu imeytyksen päätyttyä varsin hitaasti. Ahveniston kokeessa pH ei palautunut luonnontilaan edes kahden vuoden kuluessa imeytyksen päättymisestä.

Metsämaan pH:n kohoaminen oli suurinta imeytysputkien välittömässä läheisyydessä. Putkirivien välialueillakin pH kohosi, mutta huomattavasti vähemmän.

Maan pH:n kohoaminen ja kosteuden lisääntyminen aiheuttivat jo ensimmäisenä vuonna merkittäviä muutoksia typen kierrossa. Nitrifikaatio eli nitraattitypen tuotto alkoi imeytysalojen humuskerroksessa ja kivennäismaassa. Laboratoriokokeet osoittivat nitraatin tuoton pH-riippuvuuden; imeytysalalta otettujen maanäytteiden pH-arvoa alentamalla nitraatin tuotto saatiin vähemmän huomattavasti jo pH-arvossa 6. Nitraattia tuotettiin enemmän kivennäismaassa kuin humuskerroksessa.

Kahden vuoden kuluttua imeytyksen päättymisestä nitraattia oli edelleen runsaasti humuskerroksessa. Nitraatin tuotto oli kuitenkin vähentynyt imeytyksen päättymisen jälkeen, vaikka maan pH pysyi korkeana. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että maa oli kuivempaa, ja ammoniumtypen saatavuus oli vähentynyt.

Typpioksiduulia tuotettiin yleensä eniten imeytysaloilla, koska nitraattia oli runsaasti maassa ja maa oli märkää.  $N_2O$  oli peräisin denitrifikaatiosta. Kaasumaisten typen häviöiden arvioitiin olevan keskimäärin n. 2 kg/ha/v. Laboratoriokokeet osoittivat, että tästä vain n. 25 % oli voimakkaana kasvihuonekaasuna tunnettua  $N_2O$ :ia, ja n. 75 % oli ilmakehälle haitatonta  $N_2$ -kaasua.

---

Nitraattityypen pitoisuudet kohosivat vajovedessä merkittävästi ainoastaan imeytystaukojen aikana (jopa 35 mg/l). Pohjaveden nitraattityypen pitoisuudet olivat kuitenkin koko tutkimuksen ajan hyvin lähellä pohjaveden keskimääräistä pitoisuutta Suomessa (0,2 mg/l, Soveri ja Ahlberg 1990).

Vuonna 1996 emäskationeja sitoutui maahan enemmän kuin huuhtoutui vajovedessä. Vuonna 1997 ja 1998 sitoutumista ei enää tapahtunut, ts. maaperä oli saavuttanut kemiallisen tasapainon vajoveden kanssa.

Imeytysveden rautapitoisuus aleni selvästi maaperän pinta-vyöhykkeessä. Kolmen tutkimusvuoden alhaisimmat rautapitoisuudet mitattiin v. 1998, jolloin imeytysalueen läheisyydessä sijaitsevista havaintoputkissa pitoisuudet olivat säännönmukaisesti alle 0,2 mg/l.

Liukoinen orgaaninen hiili, DOC lisääntyi hieman vajovedessä maaperän pintavyöhykkeessä. Tämä johtui siitä, että Ahveniston harjun maaperän orgaaninen kerros on paksu, ja myös kivennäismaan pintaosa sisältää runsaasti orgaanista ainetta. Imeytysalueella sijaitsevista havaintoputkissa tekopohjaveden orgaanisen hiilen pitoisuus oli sekä kesäkausien aikana että talvikausina selvästi imeytysveden pitoisuutta matalampi. Siten Ahveniston harju on ollut suhteellisen tehokas orgaanisen aineen suodatin.

Imeytettäessä raakavettä orgaanista ainetta sisältävien metsämaan pintakerrosten läpi, geologisen muodostuman on oltava riittävän paksu puhdistumisen varmistamiseksi. DOC-pitoisuus väheni selvästi myös havaintoputkissa imeytysalueelta vedenottamolle päin. Tämä viittaisi siihen, että myös imeytysalueen ja vedenottamon etäisyydellä oli merkitystä DOC-pitoisuuden vähenemiselle. Noin 500 metrin etäisyydellä imeytysalueista orgaanisen hiilen pitoisuus oli kaivoveden tasolla, ja pitoisuuden ja koostumuksen muutokset olivat tämän jälkeen vähäisiä.

Orgaanisen aineen fraktiointi osoitti myös, että Ahveniston harjun suodatuskyky on hyvä ja toimii toivotulla tavalla. Maaperä pystyy käsittelemään merkittävän osan imeytysveden mukana tulevasta orgaanisesta kuormasta.

Orgaanisen aineen kulkeutumisen maaperässä määrittelee yhdisteen liukoisuus. Raskaimmat jakeet poistuvat eri tavoin veden kulkeutuessa harjussa. Erittäin vesiliukoinen, pitkälle hajonnut ja kemiallisesti ja biologisesti stabiili yhdisteryhmä ei poistu vedestä luonnollisten prosessien kautta. Tämä jae jää kaivoveteen riippumatta imeytyksen toteutustavasta.

---

## Kasvillisuus

Aluskasvillisuuden seurannassa havaittiin, että veden imeytys suosi aluksi tyyppistä ja kosteudesta hyötyviä kasveja (eräät lehdoissa elävät heinät, ruohot ja sammalet), mutta kolmantena kesänä myös ne alkoivat vähentyä imeytysaloilla. Metsäkastikan typpipitoisuus nousi ilmeisesti nitraatin oton seurauksena. Kuivien ja karujen kasvupaikkojen lajit, kuten varvut ja kangasmetsien sammalet, kärsivät suuresti sadetuksen aiheuttamasta liiasta kosteudesta sekä maaperän ravinteisuuden ja pH:n muutoksista. Kosteuden lisääntyminen edisti sienitautien leviämistä varvuilla ja pensailla. Maanpinnan eroosio lisääntyi kaikilla imeytysaloilla tutkimusjakson lopussa, eniten ympärivuotisen ja kesäkautisen imeytyksen koelaloilla ja vähiten talvi-imeytysalalla ja jaksotetulla kesäimeytysalalla. Imeytysalueet sijaitsevat varsin jyrkällä rinteellä, mikä on myötävaikuttanut eroosion voimistumiseen. Imeytyksen keskeyttäminen tai jaksottaminen kesäkaudella edistää kasvillisuuden toipumista ja kasvien kykyä sitoa paljastunutta maata. Pensaskerroksella ja tiheällä heinikolla on maa-aineksen liikkumista estävä vaikutus.

Kasvutulokset vaihtelivat puuyksilöittäin, mutta kokonaisuutena puiden kasvu on joko kiihtynyt imeytyksen käynnistymisen jälkeen tai säilynyt entisellä tasolla. Kuusivaltaisella talvi-imeytysalalla muutokset olivat vähäisiä. Kesäimeytysalan männyt kasvoivat imeytysjaksolla 1996–1998 hieman paremmin kuin edeltävinä vuosina. Vertailualalla mäntyjen kasvu sen sijaan hieman hidastui vastaavalla jaksolla. Imeytys ei myöskään vaikuttanut kasvun käynnistymis- ja päättymisajankohtiin.

Syksyllä 1997 tehdyn silmänvaraisen metsäpatologisen tarkastelun perusteella ei voitu päätellä, onko imeytys aiheuttanut juurikääpäsienen leviämistä, vaan alueen puut näyttivät tässä suhteessa varsin normaaleilta. Syksyn 1998 kairaukset osoittivat kuitenkin, että osa vertailualan 4 kuusista oli varsin pahoin lahoja. Runkolaho on varsin tavallista näinkin vanhassa kuusikossa (110–120 v.). Maannousemaa aiheuttava juurikääpäsieni viihtyy maaperässä, jonka pH on korkea. Sieni leviää varsin hitaasti, joten kuusten laho on todennäköisesti saanut alkunsa jo kauan ennen imeytyksen alkamista.

Puiden neulasten ravinnetutkimukset osoittivat, että tähänastisella imeytyksellä ei ole ollut haitallisia vaikutuksia puuston ravinnetalouden kannalta. Lisääntynyt typen saatavuus maassa heijastui myös kohonneina neulasten typpipitoisuuksina. Samalla puusto otti maahan kertynyttä ylimääräistä tyyppiä. Tyyppi on kangasmaillamme minimiravinne, joten kohtuullinen typpilisäys lisää puuston kasvua.

Ensimmäisen tutkimusvuoden hienojuuritulokset osoittivat, että imeytys ei aiheuttanut merkittäviä muutoksia havupuiden elävien tai kuolleiden hienojuurten määrissä. Maan kosteuden ja ravinteisuuden lisääntyminen saattoi lisätä kuusten hienojuurten kasvua ja tehostaa ra-

---

vinteiden ottoa. Vuonna 1998 maan eroosio lisääntyi voimakkaasti, ja paikoitellen juuria paljastui humuskerroksesta. Seisovan veden aiheuttama pintamaan hapettomuus voi paikoitellen heikentää, hienojuuriston toimintaa, mutta kuivemmillä välialueilla kasvavat hienojuuret voivat vähentää puille tästä mahdollisesti aiheutuvia haittoja. Hienojuuriston toiminnan ja puiden hyvinvoinnin kannalta onkin edullista, että imeytysaluetta ei imeytetä tasaisesti, vaan putkien välissä on kuivempia välialueita.

## Yhteenveto

Yhteenvetona imeytyksen vaikutuksista maaperään ja kasvillisuuteen sekä vajo- ja pohjaveden laatuun kolmen vuoden aikana voidaan todeta, että imeytys kohotti metsämaan pH:ta ja ravinteisuutta (emäskationit, ammonium- ja nitraattityppi), mutta huuhtoutunut nitraatti ei kohottanut pohjaveden nitraattipitoisuuksia suuren imeytysvesimäärän ja pienten imeytysalojen vuoksi. Osa nitraatista muuttui kaasumaisiksi typpiyhdisteiksi, jotka haihtuivat ilmakehään. Voimakkaan kasvihuonekaasun typpioksiduulin osuus oli kuitenkin suhteellisen pieni.

Imeytysveden rautapitoisuus aleni voimakkaasti veden vajotessa pintamaakerroksen läpi. Tutkimus antoi myös viitteitä siitä, että imeytys saattoi alentaa pohjaveden rautapitoisuutta imeytysalueiden läheisyydessä.

Vesinäytteiden orgaanisen aineen fraktiointi osoitti, että Ahveniston harjun suodatuskyky on hyvä ja toimii toivotulla tavalla. Maaperä pystyi käsittelemään merkittävän osan imeytysveden mukana tulevasta orgaanisesta kuormasta.

Aluskasvillisuus kärsi imeytyksestä selvästi. Lajiston muutos näkyi ensimmäisenä varpujen ja sammalten ja myöhemmin heinien ja ruohojen vähentymisenä. Muutosten voimakkuus oli suorassa suhteessa imeytyksen keston. Kesäkauden mittaisina taukoina kasvillisuus toipui jonkin verran. Maanpinnan eroosio lisääntyi kaikilla imeytysaloilla tutkimusjakson lopussa. Imeytysalueet sijaitsevat jyrkällä rinteellä, mikä on myötävaikuttanut eroosioon.

Puustoon imeytyksellä ei ollut vaikutusta tai vaikutukset olivat positiivisia sekä puuston ravinnetilan että kasvun kannalta.

## Imeytyksen ajankohta, kesto ja toteutus

Maaperämuutokset, kuten pH:n kohoaminen ja nitraatin tuoton käynnistyminen tapahtuivat kaikilla imeytysaloilla imeytyksen ajankohdasta ja

---

kestosta riippumatta. Nitraattia tuotettiin myös kivennäismaassa. Huuhtoutuva nitraatti ei aiheuta pohjaveden laadulle riskiä, mikäli imeytys on käynnissä samalla pohjaveden muodostusalueella, koska imeytysvesi laimentaa pohjaveteen huuhtoutuvan nitraatin pitoisuutta. Imeytys pitäisi järjestää siten, että samalla pohjaveden muodostusalueella sijaitsevia alueita imeytettäisiin vuorotellen ilman pitkiä taukoja.

Huuhtoutuva nitraatti ei myöskään aiheuta riskiä pohjaveden laadulle mikäli imeytysalueet ovat pieniä. Imeytysalueen pinta-ala ei saisi muodostaa merkittävää osaa pohjaveden muodostusalueen koko pinta-alasta.

Orgaanisen aineen määrä lisääntyi veden vajotessa maan pintakerroksen läpi, mutta imeytysalueen havaintoputkissa orgaanista hiiltä oli jo selvästi vähemmän kuin imeytysvedessä. Vajovesivyohykkeen paksuudella on näin ollen merkitystä orgaanisen hiilen vähenemiselle. Orgaaninen hiili väheni edelleen tekopohjaveden kulkeutuessa imeytysalueelta kaivoille, joten myös imeytysalueen ja vedenottamon välisellä etäisyydellä on merkitystä.

Orgaanisen aineen kulkeutumisen maaperässä määrittelee yhdisteen liukoisuus. Raskaimmat jakeet poistuvat eri tavoin veden kulkeutuessa harjussa. Erittäin vesiliukoinen, pitkälle hajonnut ja kemiallisesti ja biologisesti stabiili yhdisteryhmä ei poistu vedestä luonnollisten prosessien kautta. Tämä jae jää kaivoveteen riippumatta imeytyksen toteutustavasta.

Aluskasvilajisto muuttui kaikilla imeytysaloilla ja muutosten suuruus oli yhteydessä imeytyksen keston. Eroosio lisääntyi kolmivuotisen seurannan aikana huomattavasti, minkä vuoksi jatkuva ympärivuotinen ja jatkuva kesäimeytysala jätettiin pois imeytyksestä syksyllä 1998. Aluskasvillisuuden ja maan pinnan erodoitumisen kannalta imeytysalueiden vuorottelu on tärkeää, koska mitä lyhyemmän aikaa tiettyä aluetta imeytetään, sen pienemmät ovat vaikutukset aluskasvillisuuteen.

Aluskasvillisuus tarvitsee imeytystaukoja toipuakseen. Toipumista ei vielä ehdi tapahtua kuukauden mittaisten imeytystaukojen aikana. Talvikautisen imeytysalan kasvillisuus toipui jonkin verran kasvukauden imeytystaukoina, kun taas talvella toipumista ei tapahdu, koska kasvit ovat lepotilassa. Kasvillisuus tarvitsee ainakin yhden kasvukauden mittaisia imeytystaukoja toipuakseen imeytyksestä edes jonkin verran. Toipuminen on tärkeää, koska kasvillisuus sitoo maa-ainesta ja estää eroosiota.

Osasyynä eroosion lisääntymiseen Ahveniston harjulla oli myös imeytysalueiden rinteiden jyrkkyys ja humuskerroksen paksuus, mikä vaikuttaa imeytymisnopeuteen. Tasaisempi maaston topografia vähen-

---

tää pintamaan eroosiota, mutta saattaa lisätä vahingollista lammikoitumista.

Maan pinnan erodoitumisen ja aluskasvillisuuden kannalta olisi edullista, jos imeytys muistuttaisi enemmän luonnollista sadetta. Sadetusputkien reikien ja vesisuihkun kokoa voisi pienentää, ja pinta-alayksikköä kohti sadetettavaa vesimäärää vähentää esim. lisäämällä putkirivistöjä. Kuitenkin väliin tulisi jäädä alueita, joilla maaperän vesipitoisuus on lähellä luontaisia oloja.

Puiden kasvu, kasvurytmi ja ravinnetila eivät muuttuneet imeytyksen vuoksi tai muutokset olivat lievästi positiivisia. Eri imeytysalojen ja ajankohtien välillä ei juuri ollut eroja. Kolmantena kasvukautena joitakin pieniä pihlajia kuoli todennäköisesti lammikoitumisen aiheuttaman juurten hapenpuutteen ja pintamaan erodoitumisen vuoksi. Puuston kannalta on tärkeää, että imeytysputkistot sijaitsevat niin harvassa, että väliin jää ainakin muutaman metrin levyisiä kaistaleita, joiden maaperän pH ja kosteus ei muutu. Nuori puusto on todennäköisesti herkempi imeytykselle kuin varttunut puusto, koska puiden juuristot ovat suppeammalla alueella. Näin ollen nuoressa puustossa sadetusputkien tulisi sijaita edellä esitettyä vieläkin harvemmassa. Jos puustoa joudutaan uudistamaan, imeytystä ei todennäköisesti voi jatkaa ennen kuin uusi puusukupolvi on ohittanut taimikkovaiheen.

Aluskasvillisuuden kunto ja pintaerosio asettivat Ahveniston harjulla rajat imeytysjakson pituudelle. Tulosten perusteella tietyn alueen imeytysjaksot voivat olla korkeintaan vuoden mittaisia, jonka jälkeen alueen pitäisi saada palautua vähintään yhden kesäkauden ajan.

## Imeytyksen pitkäaikaisvaikutukset

Tutkimusjakso oli kolmen vuoden mittainen, ja pisin yhtäjaksoinen imeytysjakso kesti lähes koko tutkimuskauden (21 kk). Talvi-imeytysalaa imeytettiin kolmen vuoden aikana 17,5 kk, kesäimeytysalaa 14,5 kk ja jaksotettua kesäimeytysalaa 6,5 kk.

Ravinteikkaan ja happamuudeltaan neutraalin pintaveden imeytys metsämaan pinnalle kohottaa jo lyhyessä ajassa maaperän pintakerroksen pH:ta ja emäsravinteiden määriä. Nämä muutokset ovat suhteellisen pysyviä myös pitkällä aikavälillä. Merkittävimmät seuraukset näistä maaperämuutoksista sekä pintamaan kosteuden lisääntymisestä Ahvenistolla olivat nitraatin tuoton alkaminen sekä aluskasvillisuuslajiston muuttuminen.

Nitraatin tuotto ei kuitenkaan ole riski pohjaveden kannalta, niin kauan kuin imeytys jatkuu, eikä sen jälkeenkään, mikäli imeytysalat ovat

---

pieniä, eivätkä muodosta merkittävää osaa koko pohjaveden muodostumisalueesta. Jo käynnistyneessä jatkotutkimuksessa selvitetään nitraatin tuoton jatkumista ja vajoveden mukana huuhtoutuvia nitraattipitoisuuksia alueilla, joilla imeytys on jo päättynyt. Samalla tutkitaan imeytyksen pitkäaikaisvaikutuksia (>3 v.)

Aluskasvillisuuden kunto ja pintaeroosio asettivat Ahvenistolla rajat imeytysjakson pituudelle. Pitkäkestoinen veden imeytys vaikuttaa aluskasvillisuuden luontaiseen sukkessiokehitykseen. Sukkession alkuvaiheen lajit (esim. horsmat, pillikkeet ja eräät heinät) leviävät helposti siemenistä kasvipeitteestä vapautuneille erodoituneille alueille ja runsastuvat imeytystaukojen aikana. Sen sijaan varttuneen metsän lajit (esim. seinäsammal, puolukka ja mustikka), jotka edustavat sukkession loppuvaihetta, eivät ehdi palautua alueelle taukojen aikana. Riittävän pitkät imeytystauot mahdollistavat pysyvän kasvipeitteen säilymisen, mutta kasviyhteisöjen lajikoostumus tulee imeytysalueilla väistämättä muuttumaan lyhytikäisten pioneerilajien tai tyypeä ja korkeaa pH:ta suosivien lajien osuuden lisääntymisen myötä.

Imeytyksellä ei ollut vaikutusta puustoon tai vaikutukset olivat positiivisia sekä puuston ravinnetilan että kasvun kannalta. Tämä tilanne voi jatkua myös pidemmällä aikavälillä, kun vain huolehditaan siitä, että imeytys tehdään tarpeeksi harvaan sijoitetulla putkistolla, niin että osa jokaisen puun juuristosta on imeyttämättömässä maassa.

Imeytyksellä tuotetun pohjaveden laatu on pysynyt erittäin hyvänä kolmen vuoden tutkimusjakson ajan. Pohjaveden laadun kannalta tärkeää on ollut orgaanisen aineen väheneminen veden muuntuessa imeytysvedestä tekopohjavedeksi ja kulkeutuessa imeytysalueelta kaivoille. Korkealaatuisen pohjaveden tuotannon kannalta pitkällä aikavälillä on keskeistä, miten kauan harjumuodostuma kykenee suodattamaan orgaanista ainetta. Siksi on oleellista selvittää kuinka suuri osa orgaanisesta aineesta jää harjuun ja kuinka suuri osa siitä hajoaa. Orgaanisen aineen kohtaloa Ahveniston harjussa aiotaan selvittää jatkotutkimuksissa, joissa tutkitaan maaperään pidättynyttä orgaanista ainetta syväkairauksien avulla.

---

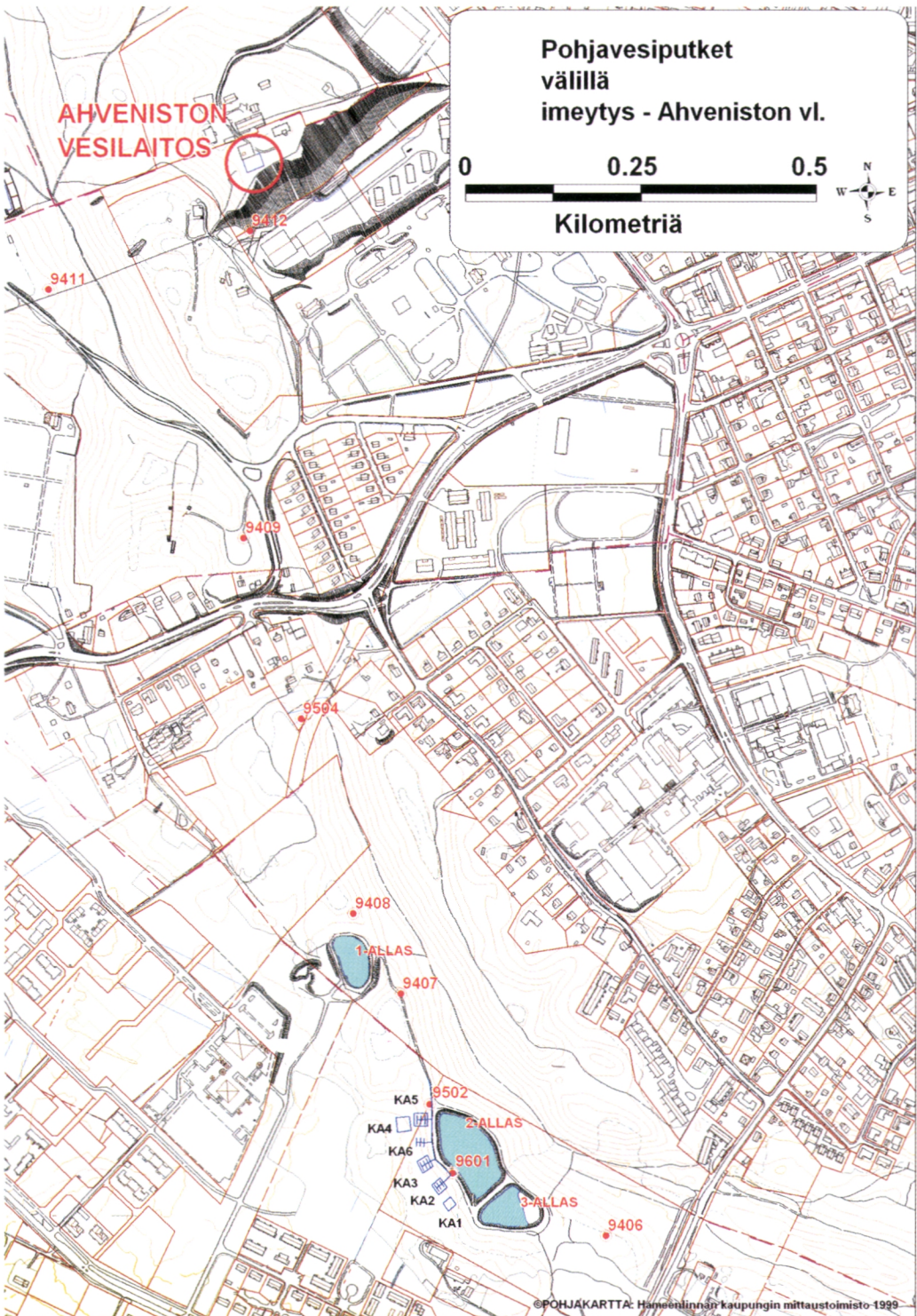
# Kirjallisuus

- Amberger, A. 1979. Pflanzenernährung. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart. 237 s.
- Blom, C.W.P.M. & Voesenek, L.A.C.J. 1996. Flooding: the survival strategies of plants. *Trends in Ecology & Evolution* 11(7):290-295.
- Boxman, A. & Roelofs, J. 1988. Some effects of nitrate versus ammonium nutrition on the nutrient fluxes in Scots pine seedlings. Effects of mycorrhizal infection. *Can. J. Bot.* 66:1091-1097.
- Braekke, F. 1994. Diagnostiske grenseverdier for næringselementer i gran- og furunåler. Aktuelt fra Skogforsk. 15. 11 s.
- Falkengren-Grerup, U. & Lakkenborg-Kristensen, H. 1994. Importance of ammonium and nitrate to the performance of herb-layer species from deciduous forests in southern Sweden. *Environmental and Experimental Botany* 34(1):31-38.
- Fober, H. 1976. Distribution of mineral elements within the crown of Scots pine (*Pinus silvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies*, Karts.). Arboretum Kornickie, s. 323-331.
- Frycklund, C. & Jacks, G. 1997. Iron and artificial recharge of groundwater. *Boreal Environment Research* 2:171-181.
- Harjumme huominen. 1995. Harjuaalueen metsäluonnon hoito- ja käyttösuunnitelma 1996-2005. Hämeenlinnan kaupunki. Metsätoimisto.
- Hartikainen, H. 1979. Phosphorus and its reactions in terrestrial soils and lake sediments. *J. Sci. Agric. Soc. Fin.* 51:537-624.
- Hatva, T. 1996. Artificial groundwater recharge in Finland. Julkaisussa: Kivimäki, A.-L. & Suokko, T. (toim.). Artificial recharge of groundwater. Proceedings of an international symposium, Helsinki, Finland, June 3-5, 1996. NHP Report 38: 3-12.
- Helmisaari, H-S. 1992. Spatial and age-related variation in nutrient concentrations of *Pinus sylvestris* needles. *Silva Fennica* 26:145-153.
- Helmisaari, H-S. 1995. Nutrient cycling in *Pinus sylvestris* stands in eastern Finland. *Plant and Soil* 168-169:327-336.
- Helmisaari, H-S. & Hallbäcken, L. 1999. Fine-root biomass and necromass in limed and fertilized Norway spruce (*Picea abies* L.) stands. *Forest Ecology and Management* (painossa).

- 
- Helmisaari, H-S., Kitunen, V., Lindroos, A.-J., Lumme, I., Monni, S., Nöjd, P., Paavolainen, L., Pesonen, E., Salemaa, M. & Smolander, A. 1998. Sprinkling infiltration in Finland: Effects on forest soil, percolation water and vegetation. Julkaisussa: Peters, J.H. ym. (toim.). Artificial Recharge of Groundwater. Balkema, Rotterdam, s. 243-248.
- Hüttl, R. 1991. Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen. Offsetdruck Gerhard Seeger, Freiburg im Breisgau. 440 s.
- Jukka, L. (toim.). 1988. Metsänterveysopas. Metsätuhot ja niiden torjunta. Samerka Oy. Helsinki. 168 s.
- Kolari, K. 1994. Neulasten ravinnepitäisyyden vaihtelu männyn latvuksessa. *Suo* 45:47-55.
- Leenher, J. A. 1981. Comprehensive approach to preparative isolation and fractionation of dissolved organic carbon from natural waters and waste waters. *Environ. Sci. Technol.* 15:578-587.
- Lipas, E. 1990. Kalkituksen aiheuttama boorinpuute kangasmaan kuusikossa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 352. 22 s.
- Lindroos, A.-J. & Derome, J. 1998. Laskeuma ja sen vaikutus metsämaahan. Julkaisussa: Mälkönen, E. (toim.). Ympäristömuutos ja metsien kunto - Metsien terveydentilan tutkimusohjelman loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 691:151-159.
- Lindroos, A.-J., Paavolainen, L., Smolander, A., Derome, J. & Helmisaari, H-S. 1998. Changes in nitrogen transformations in forest soil as a result of sprinkling infiltration. *Environmental Pollution* 102:421-426.
- Makkonen, K. & Helmisaari, H-S. 1998 Seasonal and yearly variations of fine-root biomass and necromass in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. *Forest Ecology and Management* 102:283-290.
- Martikainen, P.J. 1996. Microbial processes in boreal forest soils as affected by forest management practices and atmospheric stress. *Soil Biochemistry* 9:195-232.
- Martikainen, P.J., Nykänen, H., Silvola, J., Alm, J., Lång, K., Smolander, A. & Ferm, A. 1994. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions from some natural environments in Finland. Julkaisussa: Hupa, M. & Matinlinna, J. (toim.). Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Workshop on Nitrous Oxide Emissions, Turku, Finland, June 7-9, 1994. ÅAU CCRG Report 94-10:553-560.
- Mäkelä, J. & Reijonen, R. 1993. Muuratharjun tekopohjavesitutkimus, Muurame. Tutkimusraportti, Keski-Suomen vesi- ja ympäristöpiiri, Jyväskylä ja Suomen Pohjavesitekniikka Oy, Helsinki. 62 s. + 118 liites.
- Mälkönen, E. 1974. Annual primary production and nutrient cycle in some Scots pine stands. *Commun. Inst. For. Fenn.* 84. 87 s.

- 
- Mälkönen, E. 1991. Neulas- ja maa-analyysien käyttökelpoisuus metsänhoitotoimenpiteiden suunnittelussa. Julkaisussa: Mäkkeli, P. & Hotanen, J. (toim.). Metsänkasvatuksen perusteet turve- ja kivennäismaila. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 383:52-61.
- Paavolainen, L. & Smolander, A. 1998. Nitrification and denitrification in soil from a clear-cut Norway spruce (*Picea abies*) stand. *Soil Biology & Biochemistry* 30:775-781.
- Qualls, R.G. & Haines, B.L. 1991. Geochemistry of dissolved organic nutrients in water percolating through a forest ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1112-1123.
- Reijonen, R. 1997. Ahveniston tekopohjavesialueen mallintaminen ja tekopohjaveden laadun parantaminen. Raportti, Suomen Pohjavesiteknikka Oy.
- Smolander, A., Kitunen, V., Priha, O. & Mälkönen, E. 1995. Nitrogen transformations in limed and nitrogen fertilized soil in Norway spruce stands. *Plant and Soil* 172:107-115.
- Smolander, A., Priha, O., Paavolainen, L., Steer, J. & Mälkönen, E. 1998. Nitrogen and carbon transformations before and after clearcutting in repeatedly N-fertilized and limed forest soil. *Soil Biology & Biochemistry* 30:477-490.
- Sosiaali- ja terveysministeriö 1994. Päätös nro 74. 20.1.1994.
- Soveri, J. & Ahlberg, T. 1990. Effects of air pollutants on chemical characteristics of soil water and groundwater. Julkaisussa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag, Berlin, s. 865-881.
- Starr, M. & Tamminen, P. 1992. Suomen metsämaiden happamoituminen. Julkaisussa: I. Kukkonen ja H. Tanskanen (toim.). Ympäristötieteelliset kartat ja kartoitushankkeet Suomessa. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 115:7-14.
- Tamminen, P. & Mälkönen, E. 1986. Kangasmaiden herkkyys happamoitumiselle. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 210. 25 s.

Liite I. Tutkimusalueen ja pohjavesiputkien sijainti Ahveniston harjulla.



Liite 2. a) Sadetusmäärät tutkimusalueella. 1995-1998. HML Vesilaitos/LA.

Sadetusmäärät 1996

Sadetus			koeala 2 kesäkautinen		koeala 3 kesäkautinen jaksotettu		koeala5 talvikautinen		koeala 6 jatkuva		koeala 7 pH-palautumisen seuranta	
alkoi	loppui	d	48m m <sup>3</sup>	144 m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	48m m <sup>3</sup>	144 m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	36m m <sup>3</sup>	108 m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	36m m <sup>3</sup>	108m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	(18m) m <sup>3</sup>	54m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
14.12.1995	3.6.1996	171					192067	1778				
14.12.1995	30.10.1996	311							349315	3234	174658	3234
12.6.1996	12.7.1996	28			35482	246						
12.8.1996	12.9.1996	28			35482	246						
25.6.1996	30.10.1996	127	160934	1118								
30.10.1996	31.12.1996	63					68515	635	6815	635		
yhhteensä	1995-1996		160934	1118	70963	492	260582	2413	417830	3869	174658	3234

Sadetusmäärät 1997

sadetus			koeala 2 kesäkautinen		koeala 3 kesäkautinen jaksotettu		koeala 5 talvikautinen		koeala 6 jatkuva		koeala 7 pH-palautumisen seuranta	
alkoi	loppui	d	48m m <sup>3</sup>	144m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	48m m <sup>3</sup>	144m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	36m m <sup>3</sup>	108m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	36m m <sup>3</sup>	108m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	(18m) m <sup>3</sup>	54m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
1.1.1997	3.3.1997	61					68515	634	68515	634	putket poistettu	
4.4.1997	16.5.1997	42					47174	437				
4.4.1997	31.12.1997	272							304387	2818		
16.5.1997	6.10.1997	143	181210	1258								
9.6.1997	21.7.1997	43			54490	378						
18.8.1997	15.9.1997	29			36749	255						
27.10.1997	31.12.1997	66					74131	686				
yhhteensä	1997		181210	1258	91238	634	189821	1758	372902	3453		

Sadetusmäärät 1998

sadetus			koeala 2 kesäkautinen		koeala 3 kesäkautinen jaksotettu		koeala 5 talvikautinen -30 %		koeala 6 jatkuva -30 %		koeala 7 pH-palautumisen seuranta		yhhteensä
alkoi	loppui	d	48m m <sup>3</sup>	144m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	48m m <sup>3</sup>	144m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	36m m <sup>3</sup>	108m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	36m m <sup>3</sup>	108m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	18m m <sup>3</sup>	54m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>
1.1.1998	18.9.1998	210							165110	1529			
1.1.1998	18.5.1998	135					106142	983					
18.5.1998	29.10.1998	165	209088	1452									
8.6.1998	20.7.1998	33			41818	290							
17.8.1998	18.9.1998	33			41818	290							
29.10.1998	31.10.1998	3			3802	26	3370	31					
yhhteensä	31.10.1998		209088	1452	87437	607	109512	1014	165110	1529			571147
	1997		181210	1258	91238	634	189821	1758	372902	3453			835171
	1996		160934	1118	70964	493	241488	2236	398736	3692	165110		1037232
	1995						19094	177	19094	177	9547	3058	47735
yhhteensä	1995-1998		551232		249639		559915		955842		174657		2491285

Liite 2. b) Sadetusmäärät tutkimusalueen ulkopuolisilla alueilla 1997-1998. HML Vesilaitos/LA.

sadetus		I-altaan vieressä oleva alue						yhteensä
alkoi	loppui	reikäväli 25 cm		9m jatko-osa reikäväli 20 cm		reikäväli 40 cm		
		d	150m m <sup>3</sup>	450m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	45m m <sup>3</sup>	135m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	138m m <sup>3</sup>	414m <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
1.1.1997	3.3.1997	61	197640	439	72468	537		
4.4.1997	31.12.1997	271	878040	1951	321948	2385		
1.1.1998	22.6.1998	180	583200	1296	213840	1584		
22.6.1998	31.10.1998	131					238630	576
	jatkuu							
	31.10.1998		583200	1296	213840	1584	238630	576
	1997		1075680	2390	394416	2922		1470096
	1996		184680	410	67716	502		252396
	1995							
yhteensä	1995-1998		1843560		675972		238630	2758162

Liite 2. c) Sadetusmäärät kaikilla alueilla yhteensä. HML Vesilaitos/LA.

sadetus	m <sup>3</sup>
1995	47735
1996	1289628
1997	2305267
1998	1606816
yhteensä	5249446

Liite 2. d) Ominaisadetusmäärät. HML Vesilaitos/LA.

Koealat 2 ja 3

1,1 m<sup>3</sup>/h/putkimetri n. 60 cm kaarella  
veden imeytymisalue n. 3m<sup>2</sup>/jm  
reiät 4 mm  
reiät 20 cm välein molemmilla puolilla putkea

koeala 2		
kesäkautinen		
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
48m		144m <sup>2</sup>
h	52,8	0,37
vrk	1267,2	8,80
kk	38016	264,00

koeala 3		
kesäkautinen		
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
48m		144m <sup>2</sup>
h	52,8	0,37
vrk	1267,2	8,80
kk	38016	264,00

Koeala 5

1,3 m<sup>3</sup>/h/putkimetri n. 60 cm kaarella  
veden imeytymisalue n. 3m<sup>2</sup>/jm  
reiät 5 mm  
reiät 20 cm välein molemmilla puolilla putkea

koeala 5		
talvikautinen		
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
36m		108m <sup>2</sup>
h	46,8	0,43
vrk	1123,2	10,40
kk	33696	312,00

Koealat 6 ja 7

1,3 m<sup>3</sup>/h/putkimetri n. 60 cm kaarella  
veden imeytymisalue n. 3m<sup>2</sup>/jm  
reiät 5 mm  
reiät 20 cm välein molemmilla puolilla putkea

koeala 6		
jatkuva		
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
36m		108m <sup>2</sup>
h	46,8	0,43
vrk	1123,2	10,40
kk	33696	312,00

koeala 7		
pH-palaut. seuranta		
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
(18m)		54m <sup>2</sup>
h	23,4	0,43
vrk	561,6	10,40
kk	16848	312,00

veden imeytymisalue n. 3m<sup>2</sup>/jm

1-altaan vieressä:

0,9 m<sup>3</sup>/h/ putkimetri n. 60 cm kaarella  
reiät 25 cm välein molemmilla puolilla putkea 15m  
yht. 150m reiät 4mm

9 m jatko-osat:

1,1 m<sup>3</sup>/h/putkimetri n. 60 cm kaarella  
reiät 20 cm välein putk. oikealla puolella 9 m  
yht.45m reiät 4 mm

1-altaan vieressä		
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
reikäväli 25 cm		450m <sup>2</sup>
150m		135m <sup>2</sup>
h	135	0,30
vrk	3240	7,20
kk	97200	216,00

1-altaan vieressä		
9m jatko-osat		
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
reikäväli 20 cm		135m <sup>2</sup>
45m		135m <sup>2</sup>
h	49,5	0,37
vrk	1188	8,80
kk	35640	264,00

1-altaan vieressä:

0,45 m<sup>3</sup>/h/ putkimetri n. 60 cm kaarella väli 40 cm  
reiät 4mm

veden imeytymisalue n. 3m<sup>2</sup>/jm

1-altaan vieressä reikäväli 40 cm		
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
138m		414m <sup>2</sup>
h	62,1	0,15
vrk	1490,4	3,60
kk	44712	108,00





ISBN 951-40-1667-X  
ISSN 0358-4283