



METSÄNTUTKIMUSLAITOS - VANTAAN TUTKIMUSKESKUS

PL 18, 01301 Vantaa Puh. 09-857 051, fax 09-857 2575

VEDEN IMEYTYKSEN VAIKUTUKSET METSÄMAAHAN JA KASVILLISUUTEEN VIVA

Tutkimushankkeen väliraportti 15.12.1997

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



Kansikuva. Metla/Erkki Oksanen. Sadetusimeytystä Ahveniston harjulla lokakuussa 1996.

© Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus

ALKUSANAT

Metsäntutkimuslaitoksen Vantaan tutkimuskeskus solmi keväällä 1996 tutkimussopimuksen Hämeenlinnan kaupungin teknisen viraston kanssa vuosiksi 1996-1998 aiheesta "Veden imeytyksen vaikutukset metsämaahan ja kasvillisuuteen". Tutkimus liittyy monissa Suomen kunnissa käytettävään uuteen tekopohjaveden muodostamistapaan, jossa pintavesi imeytetään metsämaahan sadettamalla. Tutkimuskohteina ovat imeytyksen maaperä-, puusto-, aluskasvillisuus- ja vajovesivaikutukset. Tutkimushankkeen päärahoittajina ovat Hämeenlinnan kaupungin tekninen virasto, Jyväskylän kaupungin vesilaitos, Mikkelin kaupungin vesilaitos, Tampereen ja Valkeakosken seudun vedenhankinnan projekti (TAVASE), Turun seudun vesi Oy, Tuusulan seudun vesilaitoskuntayhtymä ja Maa- ja metsätalousministeriö (Suomen Ympäristökeskuksen ja Hämeen Ympäristökeskuksen kautta). Lisäksi Hämeen ympäristökeskus osallistuu tutkimuskustannuksiin suorittamalla vesinäytteiden ammonium-, nitraatti- ja kokonaistyyppimääritykset.

Tutkimusta johtaa johtoryhmä, jonka kokoonpano on 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
Jorma Määttä	Turun seudun vesi Oy
Unto Tanttu	Tuusulan seudun vesilaitos kuntayhtymä
Risto Reijonen	Suomen Pohjavesitekniikka
Tuomo Hatva	SYKE
Heljä-Sisko Helmisaari	METLA

Tutkimuksen käytännön työtä koordinoi työryhmä, jonka kokoonpano on seuraava:

Heikki Heino (pj.)	Hämeenlinnan kaupunki vesilaitos
Leo Aspholm	"
Paavo Päätalo	Hämeen ympäristökeskus
Merja Manninen	"
Markku Järvenpää	Jyväskylän kaupungin vesilaitos
Risto Reijonen	Suomen Pohjavesitekniikka
Tuomo Hatva	SYKE
Heljä-Sisko Helmisaari	METLA

Tutkimuksessa pyritään selvittämään metsäekosysteemin eri toiminnoissa tapahtuvat muutokset, minkä vuoksi Metsäntutkimuslaitoksen tutkijat edustavat eri alojen asiantuntemusta: MMT Heljä-Sisko Helmisaari (koordinaattori, ravinnekierto ja juuristo), MML John Derome ja FL 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 FK Satu Monni (aluskasvillisuus), MMT Aino Smolander ja MMM Laura Paavolainen (maamikrobiologia). Dityppioksidin mittaukset

suoritetaan Kansanterveyslaitoksessa Kuopiossa (Dos. Pertti Martikainen). Tähän raporttiin on koottu ensimmäisen ja toisen tutkimusvuoden 1996-97 tulokset ja niiden johtopäätökset.

Haluamme kiittää Hämeenlinnan kaupungin vesilaitoksen henkilökuntaa, erityisesti Leo Aspholmia, Heikki Heinoa, Teuvo Mölsää, Matti Nylundia, Pekka Suvantoa ja Heli Virtasta kenttätutkimuksen käytännön toteutuksen avustamisessa. Hämeenlinnan kaupunki on vastannut sadetusimeytyksen toteutuksesta, tutkimusalueen pysyvien rakenteiden rakentamisesta ja kunnossapidosta, laitteiden valvonnasta, vajovesi- ja imulysimetrinäytteiden keräämisestä sekä pohjavesinäytteiden otosta.

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

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT.....	2
SISÄLLYSLUETTELO.....	4
JOHDANTO.....	5
TUTKIMUKSEN TAVOITTEET.....	8
TUTKIMUKSEN SUORITUS JA AIKATAULU.....	8
Tutkimusalue.....	8
Koejärjestely.....	9
Tutkimusmenetelmät.....	15
Maaperätutkimukset.....	15
Kasvillisuustutkimukset.....	17
TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	19
Happamuus ja ravinnetila.....	19
Maaperän happamuus.....	19
Imeytysveden happamuuden muutokset maaperässä.....	20
Maaperän ja vajoveden ravinnetila.....	22
Pohjaveden laadun kannalta tärkeiden aineiden pitoisuudet.....	30
Päätelmät.....	40
Typen mineralisaatio, nitrifikaatio ja typen häviöt.....	40
Paras imeytymenetelmä typen kierron suhteen?.....	43
Orgaanisen aineen fraktiointi.....	50
Aluskasvillisuus.....	51
Kasvilajien peittävyden ja elinvoiman muutokset.....	51
Maaperän eroosio ja karikkeen muodostuminen.....	53
Päätelmät.....	54
Kuusen ja männyn sädekasvu.....	54
Kuusikoealat.....	55
Mäntykoealat.....	56
Kuusen ja männyn ravinnetila.....	57
Kasvukautinen jatkuva imeytys.....	57
Talvikautinen imeytys.....	59
Päätelmät.....	60
Puuston ja aluskasvillisuuden hienojuuristo.....	61
LOPPUPÄÄTELMÄT.....	64
Imeytyksen aiheuttamat muutokset.....	64
Imeytyksen ajankohta, kesto ja toteutus.....	66
Mittausaikataulu vuonna 1998.....	67
KIRJALLISUUS.....	68
LIITE 1	

JOHDANTO

Veden allasimeytystä pohjavedeksi on Suomessa tehty useilla paikkakunnilla jo kymmeniä vuosia. Suomessa pintaveden imeytyksen tavoitteena on lähinnä vesihuollon kustannusten alentaminen ja veden laadun parantaminen. Sadetusimeytys harjualueilla voi olla osaratkaisu näihin ongelmiin, ja menetelmän kehittämiseen on siten laajempaakin mielenkiintoa.

Kun järvivesi imeytetään harjualueeseen, veden oletetaan puhdistuvan samojen prosessien kautta kuin sadeveden. Vettä muokkaavia prosesseja ovat suotautuminen, maaperän biologiset toiminnot tai adsorptioon ja ioninvaihtoon perustuvat prosessit. Normaalisissa tilanteissa nämä maaperän kiertoon kuuluvat prosessit riittäisivät puhdistamaan veden. Veden ja maaperän välinen kemiallinen tasapainotila voi kuitenkin muodostua erilaiseksi sadetusimeytyksessä verrattuna tavanomaiseen tilanteeseen, jossa maassa alaspäin suotautuva vesi on syntynyt sadevedestä. Imeytettävän veden pH (>7.0) on selvästi korkeampi kuin sadeveden pH, joka on tavallisesti 4.0 - 5.0. Lisäksi maahan imeytettävä vesimäärä ja sen mukana tulevat ravinnemäärät ovat suuria luontaisessa ravinnekierrossa oleviin ainemääriin nähden.

Imeytys muuttaa vesi- ja ravinnevirtoja metsässä. Metsään tulevat ja metsässä kiertävät ravinnevirrat vaikuttavat lopulta pohjaveden laatuun. Sade- tai imeytysveden sisältämät ionit vaihtavat maahiukkasten pinnoilta ioneja, ja nämä voivat edelleen huuhtoutua pohjaveteen tai kasvit ottavat ne ravinteiden otossa. Osa kasvien ottamista ravinteista palautuu maahan karikkeessa, esim. havupuut varistavat joka syksy osan neulasistaan, ja maassa mikrobit hajottavat kuolleen kasviaineksen takaisin hiileksi ja ravinteiksi. Osa vapautuneista ravinteista voi huuhtoutua pohjaveteen. Maaperätutkimuksessa keskeisimpänä kohteena on imeytysveden vaikutus maan epäorgaanisten ravinteiden ja orgaanisen aineen huuhtoutumiseen juuristokerroksesta ja niiden liike maaprofiilissa. Jos ravinteiden poistuma on suurempi kuin orgaanisesta aineesta vapautuva ja rapautumisen sekä imeytysveden mukana tuleva ravinnemäärä, maan pintakerros voi köyhtyä ravinteiden suhteen. Muutokset orgaanisen aineen ja nitraattitypen huuhtoutumassa vaikuttavat myös pohjaveden laatuun.

Typen kierron mikrobitoinintojen 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 ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) kautta nitraattia ($\text{NO}_3^-\text{-N}$). Nitrifikaatio on yleensä olematonta metsämaissamme etenkin maan happamuuden takia (Martikainen 1996, Paavolainen ja Smolander ym. 1997, Smolander 1997). Jokin häiriötekijä, kuten maan pH:ta kohottava kalkitus (Smolander ym. 1995) tai avohakkuu (Smolander ym. 1997), voi kuitenkin lisätä metsämaan nitraatin tuottoa. Nitraattityppi huuhtoutuu herkemmin kuin ammoniumtyppi, sillä nitraatti ei pidä negatiivisesti varautuneiden maahiukkasten pinnalle. Nitraatti on pohjaveden laadun kannalta terveysriski; se aiheuttaa mm. methemoglobinemiaa 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 denitrifikaatiossa, jossa nitraattia pelkistetään typenoksideiksi (NO , N_2O) ja edelleen N_2 -kaasuksi. Lisäksi typenoksideja voi muodostua nitrifikaation

sivutuotteena. Normaalisti N_2O -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. N_2O on voimakas kasvihuonekaasu ja haitallinen stratosfääriin otsonikerrokselle. Veden sadetusimeytyksessä 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.

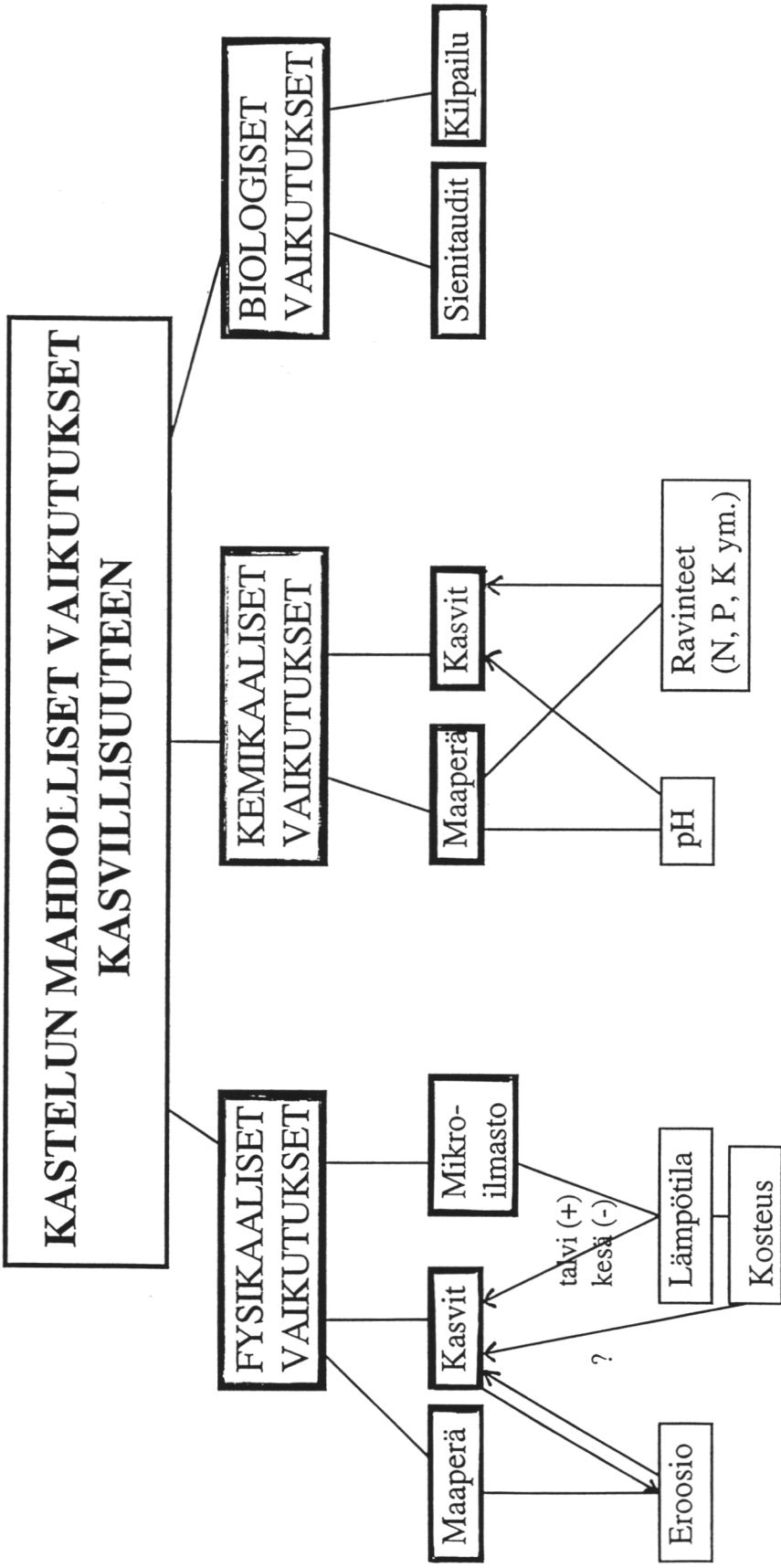
Sadetusimeytyksen seurauksena kasvien elinympäristö muuttuu. Muutokset voivat olla fysikaalisia, kemiallisia tai biologisia (kuva 1). Maaperän kosteudella, ravinteisuudella, happamuudella ja lämpötilalla on suuri vaikutus kasvilajien elinkykyyn ja kasvuun. Suurien vesimäärien imeytys maan läpi aiheuttaa muutoksia kaikissa näissä tekijöissä. Eri kasvilajien sietokyky voimakkaasti lisääntyneeseen kosteuteen vaihtelee. Kuivien kasvupaikkojen lajit kärsivät liiasta vedestä, mutta kosteutta hyvin sietävät lajit hyötyvät siitä. Fysiologinen stressi voi johtaa fotosynteesin alenemiseen, kasvun hidastumiseen ja altistaa erilaisille taudeille ja vaurioille. Pitkällä aikavälillä tämä näkyy lajien välisissä runsaussuhteissa siten, että kosteutta sietävät lajit saavat kilpailuetua muiden lajien taantuessa.

Talvella keinotekoinen sadetus nostaa maan lämpötilaa ja kesällä taas viilentää sitä. Lämpötilalla on suuri vaikutus kasvien elintoimintoihin ja niiden vuodenaikaisrytmiin. Talviaikainen sadetus saattaa esimerkiksi estää kasvien asettumisen talvilepoon, mutta aikaistaa keväistä kasvuunlähtöä. Tasaisella maalla imeytys voi täyttää maan huokostilan vedellä, minkä seurauksena kasvien juuret saattavat kärsiä ajoittain hapen puutteesta (Blom & Voosenek 1996). Rinteellä maan kyllästyminen vedellä on epätodennäköisempää.

Puustoon kohdistuvat vaikutukset riippuvat siitä, kuinka suuri osa puiden juuristosta on imeytysalueella. Imeytyksen vaikutuspiirissä olevat juuret saattavat kärsiä hapenpuutteesta, mutta kasvukauden aikana imeytyksellä saattaa olla positiivisiakin vaikutuksia puiden vesitaloudelle ja kasvulle. Toisaalta ravinteiden puute voi rajoittaa kasvua mikäli ravinteita poistuu imeytyksen myötä maan pintakerroksesta. Lisäksi jatkuva vesivirtaus maassa saattaa muuttaa puiden ravinteiden ottoa. Kasteluveden sisältämät ravinteet voivat toisaalta korvata huuhtoutumaa.

Sadetusimeytyksestä aiheutuva lisäys puiden vedensaannissa voi aiheuttaa useita muutoksia, joita voidaan seurata mittaamalla puiden sädekasvua. Kasvun selkeä hidastuminen sadetetuilla koealoilla viittaisi tietenkin ongelmiin puiden aineenvaihdunnassa. Myös muutokset puun vuotuisessa kasvurytmissä (elintoimintojen käynnistyminen keväällä ja niiden päättyminen syksyllä) olisivat merkittäviä. Talvella puiden elintoiminnot ovat hyvin vähäisiä; puut ovat lepotilassa, jossa lyhytaikaiset lämpimät jaksotkaan eivät mainittavasti vauhdita puun aineenvaihduntaa; yhteyttämistä sekä veden ja ravinteiden ottoa maaperästä. Lepotila suojaa puita epäedullisia sääoloja vastaan: puu kestää erittäin mataliakin lämpötiloja. Lepotilan purkauduttua keväällä puun kylmänkestävyys heikentyy huomattavasti. On mahdollista, että kastelu aikaistaa puun elintoimintojen käynnistymistä keväällä, mikä lisää pakkasvaurioiden riskiä.

Puilla on vedensaannin suhteen optimi; jonka voimakas kastelu saattaa ylittää; seurauksena on häiriöitä elintoiminnoissa. Toisaalta tähänastisten Skandinavian oloissa tehtyjen kokeiden mukaan optimaalisesti suoritettu keinokastelu lisää erityisesti kuusen kasvua voimakkaasti. Sädekasvua seuraamalla voidaan havaita sekä mahdollinen kasvunlisäys että vakavat kasvua heikentävät toiminnalliset häiriöt.



Kuva 1.

Imeytyksellä saattaa olla monitahoisia vaikutuksia imeytysalueen metsäekosysteemiin. Vaikutusten määrä ja laatu riippuu imeytettävän raakaveden määrästä ja laadusta, imeytysalueen maaperästä ja kasvillisuudesta sekä imeytystavasta, ajankohdasta ja kehosta.

TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää metsämaan läpi suotautuvan veden ja pintavalunnan 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 selvitetään erikseen talvella tapahtuvan imeytyksen ja kasvukauden aikana tapahtuvan imeytyksen vaikutuksia. Lisäksi tutkitaan onko tarpeellista jaksottaa imeytys kasvukauden aikana lyhyempiin jaksoihin aluskasvillisuudelle mahdollisesti aiheutuvien haittojen vähentämiseksi.

TUTKIMUKSEN SUORITUS JA AIKATAULU

Tutkimusalue

Ahveniston harju on osa kaakkois-lounaissuuntaista pitkittäisharjujaksoa. Harjujakso on tärkeää pohjaveden muodostumisaluetta. Veden imeytyksen tutkimusalue sijaitsee itään viettävällä kivisellä rinteellä, jossa maaperä on pinnassa paikoitellen moreenimäistä ja jonka kasvillisuus edustaa tuoretta keskiravinteista lehtoa (käenkaali - oravanmarja -metsätyppi, Oxalis- Maianthemum -tyyppi, OMaT). Kasvillisuutta luonnehtivat sekä tavalliset kangasmetsälajit kuten puolukka ja mustikka että ravinteikkaiden kasvupaikkojen vaateliaimmat ruohot, heinät ja sammalet. Kasvillisuuden rehevyys selittyy suurelta osin maaperän kalkkipitoisuudella. Maaperän orgaaninen kerros on lehtomultaa (paksuus 6 - 8 cm), joka muuttuu vähitellen kivennäismaaksi syvemmälle mentäessä. Koealojen ravinteisuus ja valoilmasto vaihtelevat jonkin verran, mikä näkyi myös kasvilajien runsassuhteissa. Esimerkiksi vertailualan 1 multakerros oli ohuempi ja siellä kasvoi enemmän seinäsammalta (kuva 28a) ja vähemmän metsäkerrossammalta (kuva 28c) kuin muilla koealoilla.

Rinteen jyrkkyys ja ilmansuunta vaikuttavat suuresti harjukasvillisuuden monimuotoisuuteen ja lajikoostumukseen. Harjun laella sijaitsevaa vertailualaa 4 lukuunottamatta muut koealat sijaitsevat itäisellä varjorinteellä. Pienilmasto on erilainen varjopaikoissa ja aukoissa, joissa tavattiin valoa vaativia kuivan lehdon lajeja. Tutkimusalueella ei havaittu harvinaisia tai uhanalaisia kasvilajeja, mutta esimerkiksi harvinaiset idänkeulankärki (*Oxytropis campestris*) ja tunturikurjenherne (*Astragalus alpinus*) kasvoivat imeytysaltaan toisella puolella etelään suuntautuvalla valorinteellä.

Tutkimusalueen kasviston lajimäärä oli suuri, vuonna 1996 lajeja löydettiin yhteensä 96 kappaletta, joista putkilokasveja oli 70, lehtisammalia 22 ja maksasammalia 4 (taulukko 1). Tyypillisiä pensaskerroksen lajeja olivat taikinamarja (*Ribes alpinum*), korpipaatsama (*Rhamnus frangula*), lehtokuusama (*Lonicera xylosteum*), pihlaja (*Sorbus aucuparia*) ja

harmaaleppä (*Alnus incana*). Nykyisin kaikki lehdot luetaan ns. avainbiotoopeiksi, jotka ovat luonnon monimuotoisuuden kannalta erityisen tärkeitä. Metsänhoidollisia toimenpiteitä ja muita ihmistoimintoja tulee tällaisilla paikoilla tehdä erittäin varovaisesti tai jättää ne kokonaan käsittelemättä.

Koejärjestely

Tutkimusalueena käytettävälle Ahveniston harjulle perustettiin toukokuussa 1996 on viisi koealaa, joilla imeytyksen vaikutuksia tutkitaan: talvikautinen imeytysala, kasvukautinen jatkuvasti imeytettävä ala, kasvukautinen jaksotettu imeytysala sekä kaksi vertailualaa (kuva 2).

Koealat 1,2 ja 3 mäntyvaltaisia, aloilla 4 ja 5 valtapuuna on kuusi (taulukko 2). Kaikkien koealojen puusto on vanhaa, metsätaloudellisten luokitusten mukaan jo yli-ikäistä. Tämä näkyy puuston keskiläpimitassa (ppa:lla painotettu), joka on kaikilla koealoilla samaa suuruusluokkaa: 37 - 41 cm. Myös puuston keskipituus vaihtelee varsin kapeissa rajoissa (27-28,5 m).

Mäntyvaltaisilla koealoilla puustoa on selvästi enemmän. Hehtaarikohtainen runkoluku vaihtelee noin 150:sta (ka 5) reiluun 300:an (ka 1 ja ka 2). Tiheyserot näkyvät myös pohjapinta-alassa, joka vaihtelee kuusialoilla välillä 15-22 m² / ha ja mäntyaloilla välillä 31 - 35m² / ha.

Imeytysaikataulu oli seuraava:

1996

Talvikautinen imeytys (koeala 5) 14.12.1995 - 3.6.1996.

Jaksotettu kasvukautinen imeytys (koeala 3) 12.6. - 12.7.1996 ja 12.8. - 12.9.1996.

Jatkuva kasvukautinen imeytys (koeala 2) 25.6. - 30.10.1996.

1997

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

Jaksotettu kasvukautinen imeytys (koeala 3) 9.6 - 21.7.1997 ja 18.8 - 15.9.1997.

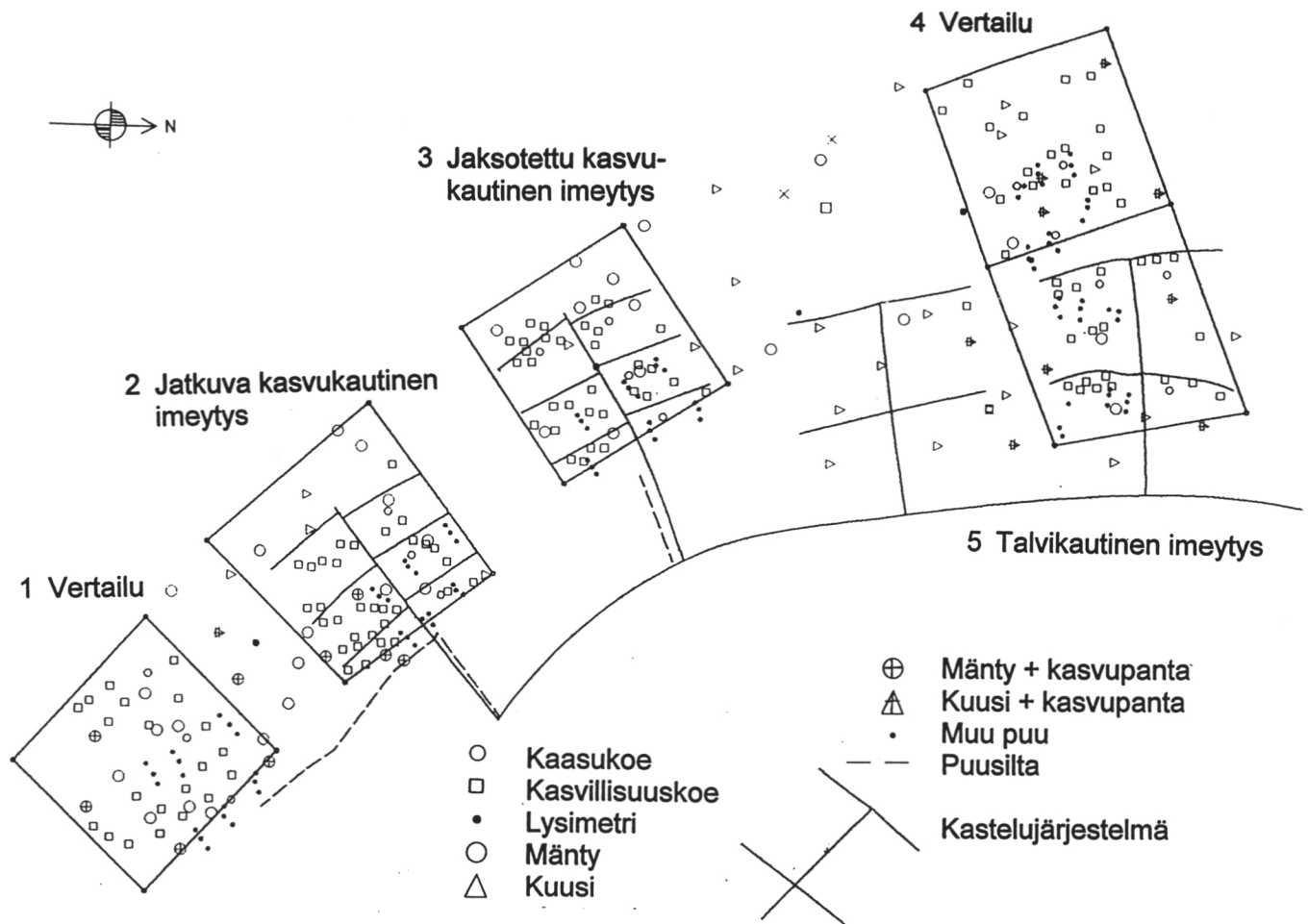
Jatkuva kasvukautinen imeytys (koeala 2) 16.5 - 6.10.1997.

Tutkimus käynnistyi alkukesästä 1996, joten kyseisenä vuonna kasvukautinen imeytysjakso jäi vuotta 1997 lyhyemmäksi. Talvikautinen imeytys oli keskeytynyt 3.3. - 4.4. 1997 välisen ajan raakavesiputkien uusimisen vuoksi.

Taulukko 1. Ahvenistonharjun imeytyskoealojen kasvilajisto. Putkilokasvilajien, lehtisamalten ja maksasamalten keskimääräiset runsaudet neliömetrin näyteruuduilla ($n = 15$) arvioituna prosentteittävyyksinä 5.-10.6. 1996. Pensaskerroksen lajiluettelo.

		Peittävyys %				
		Koealat				
		1	2	3	4	5
Kenttäkerroksen putkilokasvilajit:						
Achillea millefolium	Siankärsämö	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00
Agrostis capillaris	Nurmirölli	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Alnus incana	Harmaaleppä	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Anemone nemorosa	Valkovuokko	3.14	0.86	4.66	5.56	5.60
Angelica sylvestris	Karhunputki	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
Betula pendula	Rauduskoivu	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Betula pubescens	Hieskoivu	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Brachypodium pinnatum	Mäkilehtoluste	0.00	0.30	0.00	0.00	6.60
Calamagrostis arundinacea	Metsäkastikka	2.19	0.77	5.20	4.63	16.7
Carex digitata	Sormisara	0.34	0.07	0.20	0.54	0.08
Carex vaginata	Tuppisara	0.00	0.00	0.08	0.01	0.08
Convallaria majalis	Kielo	0.96	0.00	1.58	0.86	0.34
Deschampsia cespitosa	Nurmilauha	0.06	0.00	0.07	0.00	0.00
Deschampsia flexuosa	Metsälauha	7.00	2.93	5.72	5.10	1.14
Dryopteris carthusiana	Metsäalvejuuri	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
Epilobium angustifolium	Maitohorsma	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Festuca ovina	Lampaannata	0.00	1.87	0.00	0.01	0.01
Filipendula ulmaria	Mesiangervo	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Fragaria vesca	Metsämansikka	0.24	0.14	0.59	1.04	0.20
Galium boreale	Ahomatara	0.10	0.00	0.73	0.37	3.53
Geranium sylvaticum	Metsäkurjenpolvi	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04
Geum rivale	Ojakellukka	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Gymnocarpium dryopteris	Metsäimarre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Hieracium sp.	Keltano-ryhmä	0.01	0.00	0.00	0.07	0.03
Hierochloa australis	Metsämaarianheinä	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Hepatica nobilis	Sinivuokko	1.52	0.33	2.70	6.06	4.13
Hypericum maculatum	Särmäkuisma	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
Lathyrus vernalis	Kevätlinnunherne	0.00	0.00	0.00	0.03	0.38
Linnea borealis	Vanamo	0.18	0.80	0.51	0.08	1.16
Lonicera xylosteum	Lehtokuusama	0.00	0.00	0.01	0.43	0.00
Luzula pilosa	Kevätpiippo	0.42	0.62	0.91	0.61	0.16
Lycopodium annotinum	Riidenlieko	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Maianthemum bifolium	Oravanmarja	8.83	2.77	3.50	2.02	1.02
Melampyrum sylvaticum	Metsämitikka	0.01	0.01	0.10	0.14	0.01
Matteuccia struthiopteris	Kotkansiipi	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Melica nutans	Nuokkuhelmikkä	0.03	0.03	0.04	0.53	0.15
Monotropa hypoptryx	Mäntykukka	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Orthilia secunda	Nuokkotalvikki	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Oxalis acetosella	Käenkaali	0.80	0.28	2.18	2.27	0.35
Paris quadrifolia	Sudenmarja	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Picea abies	Kuusi	0.18	0.14	0.01	0.78	2.10
Pimpinella saxifraga	Ahopukinjuuri	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Polypodium odoratum	Kalliokielo	0.03	0.00	0.10	1.37	0.01
Potentilla erecta	Rätvänä	0.01	0.00	0.00	0.07	0.01
Pteridium aquilinum	Sananjalka	0.00	0.00	0.14	0.97	0.17
Pyrola media	Kellotalvikki	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Pyrola rotundifolia	Isotalvikki	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
Quercus robur	Metsätammi	0.00	0.00	0.06	0.20	0.00
Ribes alpinum	Taikinamarja	0.00	0.00	0.13	0.30	0.08
Rubus idaeus	Vadelma	0.53	0.06	0.00	0.00	0.00
Rubus saxatilis	Lillukka	0.61	0.00	0.46	0.00	0.06
Salix starkeana	Ahopaju	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

		Peittävyys %				
		Koealat				
		1	2	3	4	5
Kenttäkerroksen putkilokasvilajit: jatkuu						
Solidago virgaurea	Kultapiisku	0.10	0.03	0.00	0.30	0.42
Sorbus aucuparia	Pihlaja	1.32	1.14	1.56	1.47	0.26
Trientalis europea	Metsätähti	1.48	0.62	1.00	0.74	0.64
Vaccinium myrtillus	Mustikka	31.9	13.4	22.0	28.8	4.77
Vaccinium vitis-idaea	Puolukka	2.38	15.6	0.83	1.20	1.04
Veronica chamaedrys	Nurmitädyke	0.02	0.03	0.12	0.10	0.00
Veronica officinalis	Rohtotädyke	0.05	0.01	0.14	0.05	0.17
Viburnum opulus	Koiranheisi	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
Vicia cracca	Hiirenvirna	0.01	0.00	0.03	0.01	0.03
Vicia sativa	Rehuvirna	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Viola canina	Aho-orvokki	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Viola mirabilis	Lehto-orvokki	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Viola riviniana	Metsäorvokki	0.00	0.00	0.17	0.22	0.11
Lehtisammalet:						
Aulacomnium palustre	Suonihuopasammal	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Brachythecium oedipodium	Metsäsuikerosammal	0.28	0.86	1.90	2.54	0.76
Brachythecium salebrosum	Kiiltosuikerosammal	0.01	0.00	0.01	0.00	0.06
Brachythecium starkei	Kantosuikerosammal	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Brachythecium velutinum	Sirosuikerosammal	10.2	0.00	0.00	0.13	0.00
Campylium sommerfeltii	Kantoväkäsammal	0.01	0.00	0.00	0.07	0.01
Cirriphyllum piliferum	Lehtohaivensammal	0.33	0.00	0.00	0.80	0.01
Dicranum majus	Isokynsisammal	0.66	0.00	0.00	0.20	0.00
Dicranum polysetum	Kangaskynsisammal	5.26	5.40	12.2	0.51	7.29
Dicranum scoparium	Kivikynsisammal	0.14	0.00	0.01	0.00	0.30
Hylocomium splendens	Metsäkerrosammal	1.48	10.5	8.54	15.4	22.5
Plagiomnium affine	Lehtolehväsammal	0.28	0.64	0.64	0.44	2.44
Plagiothecium denticulatum	Kivilaakasammal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Plagiothecium laetum	Kantolaakasammal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Pleurozium schreberi	Seinäsaammal	51.2	21.4	10.3	13.5	10.8
Pohlia nutans	Nuokkuvarstasammal	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00
Ptilium crista-castrensis	Sulkasammal	0.14	0.20	0.00	0.00	0.01
Rhizomnium punctatum	Kilpilehväsammal	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
Rhizomnium pseudopunctatum	Lettolehväsammal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Rhodobryum roseum	Ruusukesammal	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
Rhytidiadelphus triquetrus	Metsäliekosammal	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00
Sanionia uncinata	Metsäkamppisammal	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Maksasammalet:						
Barbilophozia barbata	Metsäpykäsammal	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00
Chiloscyphus profundus	Lahoalvesammal	0.07	0.00	0.01	0.02	0.01
Plagiochila asplenioides	Isokastesammal	2.80	0.00	0.47	3.60	0.68
Ptilidium ciliare	Isokorallisammal	0.13	0.06	0.01	0.00	0.00
Pensaat (50 - 150 cm):						
Alnus glutinosa	Tervaleppä					
Alnus incana	Harmaaleppä					
Betula pendula	Rauduskoivu					
Betula pubescens	Hieskoivu					
Lonicera xylostium	Lehtokuusama					
Juniperus communis	Kataja					
Picea abies	Kuusi					
Pinus sylvestris	Mänty					
Populus tremula	Haapa					
Quercus robur	Tammi					
Rhamnus frangula	Korpipaatsama					
Ribes alpinum	Taikinamarja					
Salix sp.	Pajut					
Sorbus aucuparia	Pihlaja					



Kuva 2. Kartake koealojen sijainnista.

Taulukko 2. Koealojen puustoa kuvaavat metsikkötunnukset

Koeala		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 ² /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 ³ /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

Sadetusputket kulkevat rinteessä kahdessa rivissä talvikautisella imeytysalalla. Kasvukauden aikana sadetettavilla aloilla putkirivejä on kolme (kuva 2). Sadetus tapahtuu putkissa olevista 4-5 mm läpimittaisista rei'istä n. 20 cm:n välein. Sadetukseen on käytetty vettä n. 1,1-1,3 m³ tunnissa putkimetriä kohti (taulukko 3). Veden imeytymisalue on n. 3 m² putkimetriä kohti. Kokonaissadetusmäärät ovat olleet vuonna 1995-96 1778 m³/m² talvikautisella imeytysalalla, 1118 m³/m² kasvukautisella imeytysalalla ja 492 m³/m² jaksotetulla imeytysalalla. Vuonna 1996-97 sadetettiin 1726 m³/m² talvikautisella imeytysalalla, 1258 m³/m² kasvukautisella imeytysalalla ja 634 m³/m² jaksotetulla imeytysalalla (taulukko 4). Sadetusmäärät olivat n. 8.8-10.4 m³/m²/vrk. Tämä vastaa yli 2000 kertaa vuoden sademäärää.

Taulukko 3. Sadetusmäärät v. 1996. Vesimäärien laskentaperusteena on yhdestä reiästä purkautuva vesimäärä. Veden imeytymisalue n. 3 m²/jm. Reiät 20 cm välein molemmilla puolilla putkea.

Sadetus			Koeala 2		Koeala 3		Koeala 5	
			Kasvukautinen		Kasvukautinen,		Talvikautinen	
alkoi	loppui	d	144 m ²		jaksotettu 144 m ²		108 m ²	
			m ³	m ³ /m ²	m ³	m ³ /m ²	m ³	m ³ /m ²
14.12.1995	3.6.1996	171					192 067	1778
12.6.1996	12.7.1996	28			35 482	246		
12.8.1996	12.9.1996	28			35 482	246		
25.6.1996	30.10.1996	127	160 934	1 118				
Yhteensä			160 934	1 118	70 963	492	192 067	1778
Koealat 2 ja 3					Koeala 5			
1,1 m ³ /h/putkimetri n. 60 cm kaarella reiät 4 mm					1,3 m ³ /h/putkimetri n. 60 cm kaarella reiät 5 mm			

Koealojen ulkopuolella olevat sadetusputket

Sadetus			Koealan 5 vasen puoli		Koealan 5 oikea puoli	
			108 m ²		54 m ²	
alkoi	loppui	d	m ³	m ³ /m ²	m ³	m ³ /m ²
14.12.1995	30.10.1996	311	349 315	3 234	174 658	3 234
Koealan 5 vasen ja oikea puoli						
1,3 m ³ /h/putkimetri n. 60 cm kaarella, reiät 5 mm						

Tutkimusmenetelmät

Maaperätutkimukset

Happamuus ja ravinnetila

Imeytysveden koostumuksen muutoksia maaperässä ja sen vaikutuksia maaperän kemialliseen tilaan tarkasteltiin vesi- ja maanäyteanalyysien avulla. Vesianalyysit tehtiin imeytys-, vajo- ja pohjavedestä. Vajovettä kerättiin koealoilta humuskerroksen alle asennetuilla levylysimitreillä (kivennäismaan syvyys 0 cm, 6 lysimetriä/koeala). Maavettä kerättiin imulysimetreillä kivennäismaasta syvyyksiltä 40 ja 100 cm. Imulysimetrejä oli kullakin koealalla 6 kpl molemmilla syvyyksillä. Imulysimetrien keräämä vesi on imeytysaloilla pääasiassa maassa painovoiman vaikutuksesta alaspäin valuvaa vettä, minkä vuoksi jäljempänä myös imulysimetrien keräämää vettä kutsutaan vajovedeksi. Imulysimetrit voivat kerätä myös maapartikkeleiden pinnalle ja väleihin sitoutunutta vettä, jonka pitoisuudet voivat poiketa vajoveden pitoisuuksista.

Näytteenottojaksot ovat vaihdelleet kaksivuotisen tutkimuksen aikana jonkin verran. Tutkimuksen alussa haluttiin seurata lysimetrien toimintaa intensiivisesti, minkä vuoksi näytteitä kerättiin jopa päivittäin ja analyysit tehtiin lysimetrikohtaisesti. Lysimetrijärjestelmän osoittaututtua toimivaksi, imeytys- ja vajovesinäytteitä on kerätty kasvukaudella 1997 viikon välein, ja koealan osanäytteistä on muodostettu yksi kokoomanäyte näytteenottokertaa kohden. Pohjavesinäytteitä on otettu pohjavesiputkista 9601, 9406, 9407, 9502 ja 9504 (katso liite 1) säännöllisesti tutkimusjakson ajan. Erytishuomio on kiinnitetty pohjavesiputkeen 9601, jonka sijaintinsa vuoksi oletetaan parhaiten edustavan imeytyksessä muodostuvaa pohjavettä. Putki 9502 sijaitsee lähellä talvikautista imeytysalaa ja putki 9407 lähellä Hämeenlinnan kaupungin uutta imeytysaluetta. Muut havaintoputket ovat kauempana tutkimusalueesta.

Vesinäytteistä määritettiin pH sekä metallit (atomiemissiospektrofotometri, ICP/AES). Orgaaninen hiili määritettiin TOC-analysointilaitteella. Nämä analyysit tehtiin Metlassa. Hämeen ympäristökeskuksessa määritettiin ammoniumtyppi (SFS 3032), nitriitti- ja nitraattitypen summa sekä kokonaistyyppi (Lachat QuicChem 8000, FIA).

Maanäytteet pH:n seuraamista varten otettiin humuskerroksesta (n. 5-10 cm) kairalla (halkaisija 2,5 cm). Imeytysaloilla näytteet otettiin imeytysputkien alapuolelta metrin päästä ja vertailualoilta vastaavalta korkeudelta. Imeytysaloilla 2 ja 3 maanäytteitä otettiin 20 kpl joka putkiriviltä, ja nämä osanäytteet yhdistettiin. Vertailualalta 1 otettiin vastaavat näytteet. Imeytysalalla 5 otettiin ylimmän putkirivin luota 20 x 2 maanäytettä ja alemman putkirivin luota 20 maanäytettä, ja nämä osanäytteet yhdistettiin kuten edellä. Vertailualalta 4 otettiin vastaavat näytteet. Yhteensä näytteitä yhdeltä koealalta tuli siis 3. Maanäytteitä otettiin kaikilta koealoilta 22.7.1996, 3.10.1996, 26.5.1997, 21.7.1997 ja 7.10.1997. Koealoilta 1, 2, 4 ja 5 otettiin lisäksi 5.6.1996 maanäytteet sekä humus- että kivennäismaakerroksesta pH:n määrittämistä ja ravinneanalyysien varten. Näytteenottoajankohdat on valittu niin, että jaksotetulla kasvukautisella imeytysalalla (koeala 3) ei ollut imeytystä käynnissä. Maan pH-arvoa putkirivien välissä selvitettiin ottamalla 21.7.1997 koealoilta 2 ja 5 humusnäyte myös putkirivien välistä. Maan pH-arvon mahdollista palautumista seurattiin ottamalla koealan 5

vieressä olevalta imeytysalalta humusnäytteet 21.7.1997 ja 7.10.1997. Tätä aluetta oli imeytetty ainoastaan 14.12.1995-30.10.1996. Laboratoriossa maanäytteet seulottiin 2,0 mm (kivennäismaa) tai 2,8 mm (humus) seulalla.

Vuoden 1996 kesäkuun alussa otettiin humuskerroksesta ja kivennäismaakerroksesta näytteet ravinneanalyysia varten metrin päästä alaspäin imeytysputkesta ja vertailualoilta vastaavalta korkeudelta (koealat 1, 2, 4, 5). Koealalta 2 otettiin 8 kairallista näytettä joka putkiriviltä, ja nämä osanäytteet yhdistettiin (3 kokoomanäytettä humus- ja kivennäismaakerroksesta/koeala). Vertailualalta 1 otettiin vastaavat näytteet. Koealalta 5 otettiin ylimmältä putkiriviltä 8 x 2 kairallista ja alemmalta riviltä 8 kairallista, ja nämä yhdistettiin kuten edellä. Vertailualalta 4 otettiin vastaavat näytteet.

Koealoilta kerätyistä humus- ja kivennäismaanäytteistä mitattiin pH vesilietoksesta. Vaihtuvat ravinteet määritettiin ammoniumasetaattiuutoksella (pH 4,65) ja metallien pitoisuudet mitattiin uuttoliuksesta ICP/AES:lla. Maanäyteanalyysit tehtiin Metlan keskuslaboratoriossa.

Typen mineralisaatio, nitrifikaatio ja typen häviöt

Alla mainitut typen kiertoon liittyvät analyysit tehtiin samoista humusnäytteistä kuin pH:n mittausta ja lisäksi kivennäismaanäytteistä (5.6.1996) uutettiin ammonium- ja nitraattityppi (näytteenotto, kts. edellinen kappale)

Nettoammonifikaatio- ja -nitrifikaatioinkubaatiokokeessa neljän rinnakkaisen maanäytteen (4g kuivapaino) kosteus säädettiin 60 %:iin vedenpidätyskyvystä. 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 laitettiin inkuboitumaan lämpökaappiin (+14°C 42 vrk). Inkubaation jälkeen näytteet uutettiin kuten nollanäytteet. Uuttoliuksista mitattiin $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ja $(\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-)\text{-N}$ virtausinjektorianalyysatorilla (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 dityppioksidin (N_2O) tuottoa maasta mitattiin maastossa maahan asennettavien kaasunkeräyskammioiden avulla (3 kpl/koeala, kts. kartta kuva 2) samoina ajankohtina kuin maanäytteet otettiin nitrifikaatioinkubaatiota varten. Kaasuja kerättiin kammioista 50 ml:n B-D Plastipak ruiskuihin tietyin väliajoin (3, 15 ja 30 min). Ruiskut suljettiin Connecta 3-tiehanoilla ja lähetettiin pikapostina KTL:lle Kuopioon, jossa ne mitattiin seuraavana päivänä kahdella toisiinsa kytketyillä HP 5890 Series II kaasukromatografilla (EC-detektori). Emissiot laskettiin kammioipitoisuuden lineaarisesta muutoksesta ajan suhteen, kun kammion koko ja sen lämpötila otettiin huomioon.

Orgaanisen aineen fraktiointi

Liunneen orgaanisen aineen ja liunneen typen käyttäytymistä tutkittiin IR-spektroskooppisilla sekä ultrasuodatukseen (Smolander ym. 1996) ja adsorptio- ja ioninvaihtokromatografiaan (Leenheer, 1981, Qualls ja Haines, 1991) perustuvien menetelmien tavoitteena raakaveden ja suotautuvien vesien profiloiminen. Profiloiminnan tarkoituksena on edesauttaa ymmärtämään merkittävästi normaalia sadantaa suurempien vesimäärien aiheuttamia muutoksia maaperässä

tapahtuvissa prosesseissa ja niiden vaikutusta itse maaperään sekä luonnollisesti myös pohjaveteen.

Kasvillisuustutkimukset

Aluskasvillisuuden kartoitus

Aluskasvillisuus kartoitettiin vuosina 1996 ja 1997 sekä kevätaspektin että maksimibiomassan aikaan. Vuonna 1996 kartoitus tehtiin 5.-10.6. ja 22.8. - 1.9. ja vuonna 1997 5. - 7.6. ja 20. - 22.8. Koealoille 1 - 4 on kullekin perustettu 15 yhden m² suuruista näyteruutua. Koealalla 5 näyteruutujen lukumäärä on 11 ja ns. välikoealalla 6 (ympärivuotinen imeytys) 10 kappaletta. Imeytysloilla ruudut valittiin subjektiivisesti kasteluputkien läheisyydestä ja vertailualoilla ositetun satunnaisotannan mukaan. Kasvilajien vertikaaliset prosenttipeittävydet arvioitiin silmävaraisesti asteikolla 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, ...99, 100 %. Arvioinnissa käytettiin apuna 1 m² suuruista kehikkoa, joka oli jaettu langoilla 10x10 cm pikkuruutuihin. Pohja-, kenttä ja pensaskerroksen kartoituksen lisäksi arvioitiin karikkeen ja veden virtauksessa paljastuneen (erodoituneen) maan prosenttiosuudet näyteruudun pinta-alasta. Lisäksi kasvilajien yleiskunnosta, sienitaudeista ja muista vaurioista tehtiin havaintoja.

Kuusen ja männyn sädekasvu

Rungon ympärysmittan muutoksia seurattiin automaattisilla kasvupannoilla tunnin mittaustavalla. Pannan mittaustarkkuus on 0.1 mm; puun läpimitan muutos voidaan siis teoriassa approksimoida 0,02 mm:n tarkkuudella. Pannat ovat ruostumatonta terästä ja kotelo alumiinia. Laite on lämpötilakalibroitu ja mittaustuloksissa on otettu huomioon laitteen lämpötilakäyttäytyminen. Kaikkiaan tutkimuksessa asennettiin 9 kasvupantaa kuusi- ja 10 mäntykoealoille.

Kasvupannat asennettiin kesäkuussa 1996. Kesällä 1997 ilmeni merkittäviä ongelmia, jotka heikensivät aineiston laatua. Osa mäntykoealojen kasvupannoista oli revitty puista alkukesällä; seurauksena oli mittauskatkos. Yhden kuusikoealoon kasvupanta rikkoutui lisäksi myöhemmin kesäkuussa.

Koepuiden pituudet mitattiin syksyllä 1997 elektro-optisella menetelmällä sekä läpimitat rinnankorkeudelta keväällä ja syksyllä mittasaksilla. Jotta kasvupantatuloksia voitaisiin vertailla muiden tutkimusten kanssa, kaikkien koepuiden, laitteistojen ja koealojen paikat kartoitettiin. Lisäksi mitattiin kaikkien koealoilla ja välialueilla kasvavien kuusten, mäntyjen ja suurimpien lehtipuiden paikat. Kasvupantatulosten analysoinnin tueksi mitattiin lisäksi lämpötiloja ja sademääriä kerran tunnissa.

Tutkimuksen päättyessä loppuvuonna 1998 otetaan lisäksi lustonäyte jokaisesta koepuusta. Sen avulla voidaan muodostaa aikasarja puiden sädekasvusta niiden elinajalta. Vuosien 1996-1998 tuloksia voidaan tällöin vertailla huomattavasti pidemmän jakson keskiarvoihin. Tällöin voidaan lopullisesti päätellä liittyykö huonokasvuisten puuyksilöiden kasvu ajallisesti sadetuksen aloittamiseen, vai onko kyseessä pidempään jatkunut, luontaisista syistä johtuva puun kunnan heikkeneminen.

Kuusen ja männyn ravinnetila

Veden imeytyksen vaikutusta puuston ravinnetalouteen tutkitaan neulastutkimuksen avulla. Neulasnäytteet kerättiin koealoilta 1 (vertailuala), 2 (jatkuva kasvukautinen imeytys),

4 (vertailuala) ja 5 (talvikautinen imeytys). Koealojen 1 ja 2 puusto oli lähinnä mäntyä sekä koealojen 4 ja 5 puusto oli pääasiassa kuusta. Vuonna 1996 tehtiin tausta-analysointi, jonka avulla selvitettiin havupuiden ravinnetila ennen imeytyskäsittelyjen aloittamista. Ensimmäinen käsittelyjen vaikutuksia selvittävä näytteenotto tehtiin vuonna 1997. Sen perusteella voidaan arvioida, ovatko imeytyskäsittelyt aiheuttaneet merkittäviä muutoksia puuston ravinteiden saannissa ja otossa ensimmäisen tutkimusvuoden aikana (kasvukausi 1996 sekä talvikaudet 1995-1996 ja 1996-1997).

Neulasnäytteet kerättiin koealoilta samoista näytepuista 5.6.1996 ja 3.6.1997. Koealoilla, joissa puiden lukumäärä oli suurempi kuin 10, näyteoksat otettiin kymmenestä valtapuusta. Koealoilla, joissa puita oli alle kymmenen/koeala näytteet otettiin koealan kaikista puista. Näytepuiksi valittiin yksilöt, joista mitataan puun kasvua kasvupantojen avulla.

Koealojen puuston korkeuden vuoksi neulasnäytteet otettiin mäntyjen elävän latvuksen alaosaan. Kuusista näytteet otettiin puun rungon puolivälin tasolta. Tämä ei haittaa koealojen välistä vertailua. Vertailukelpoisuus voi olla heikompi kokeisiin, joissa näytteet on otettu latvuksen yläosasta. Eräiden neulasravinteiden pitoisuus voi vaihdella jonkin verran latvuksen eri osien välillä (Mälkönen 1974, Fober 1976, Helmisaari 1992, Kolari 1994).

Näyteoksat (kaksi oksaa/puu) katkaistiin oksaleikkurilla ja näytteet varastoitiin saman vuorokauden kuluessa pakastimeen (-18 °C), jossa niitä säilytettiin 1-2 kk:n ajan. Näytteiden esikäsittelyssä eri neulasvuosikerrat eroteltiin toisistaan. Ravinneanalyysia varten näytteet kuivattiin (+50 °C, 48 h) ja jauhettiin Fritsch Rotor Speed Mill-jauhimella. Näytteistä analysoitiin N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Mo, Zn, Fe, Cu, Al ja B Metsäntutkimuslaitoksen Vantaan tutkimuskeskuksen Keskuslaboratorion LECO CHN- ja ICP-laitteilla. ICP-analyysia varten näytteet märkäpoltettiin typpihappo-perkloorihappoliuoksessa.

Kukin näytepuu ja neulasvuosikerta/puu käsiteltiin erillisenä näytteenä. Lisäksi neulasnäytteistä määritettiin kosteus/kuiva-ainepitoisuus, neulasten keskipituus ja tuhannen neulasen massa.

Kuusen ja männyn sekä aluskasvillisuuden hienojuuristo

Kasvukauden aikana jatkuvasti imeytettävällä alalla ja sen vertailualalla tutkittiin myös puiden hienojuuriston (alle 2 mm läpimittaiset juuret) elinvoimaisuutta, kasvua ja kuolleisuutta kesän 1996 aikana kolme kertaa kasvukaudessa suoritettavilla näytteenotoilla (6.-10.6., 30.8. ja 3.10.). Lisäksi talvikautiselta imeytysalalta ja sen vertailualalta otettiin hienojuurinäytteet 6.6.1996. Hienojuurinäytteitä otettiin 15 kappaletta kullakin alalla, näytteet otettiin systemaattisesti n. kaksi metriä kunkin imeytysputkirivin alapuolelta. Näytteet otettiin 5,8 mm läpimittaisella maakairalla orgaanisesta kerroksesta sekä kivennäismaan pintakerroksesta. Näytteet pakastettiin ja eroteltiin laboratoriossa. Ensin eroteltiin hienojuuret maasta vesipesun avulla, ja tämän jälkeen juuret eroteltiin eläviin ja kuolleisiin männyn, kuusen, varpujen ja heinien juuriin ja eri läpimittaluokkiin (< 1mm, 1-2 mm). Näytteet kuivattiin (+ 70°C, 48 h) kuivapainon määrittämiseksi.

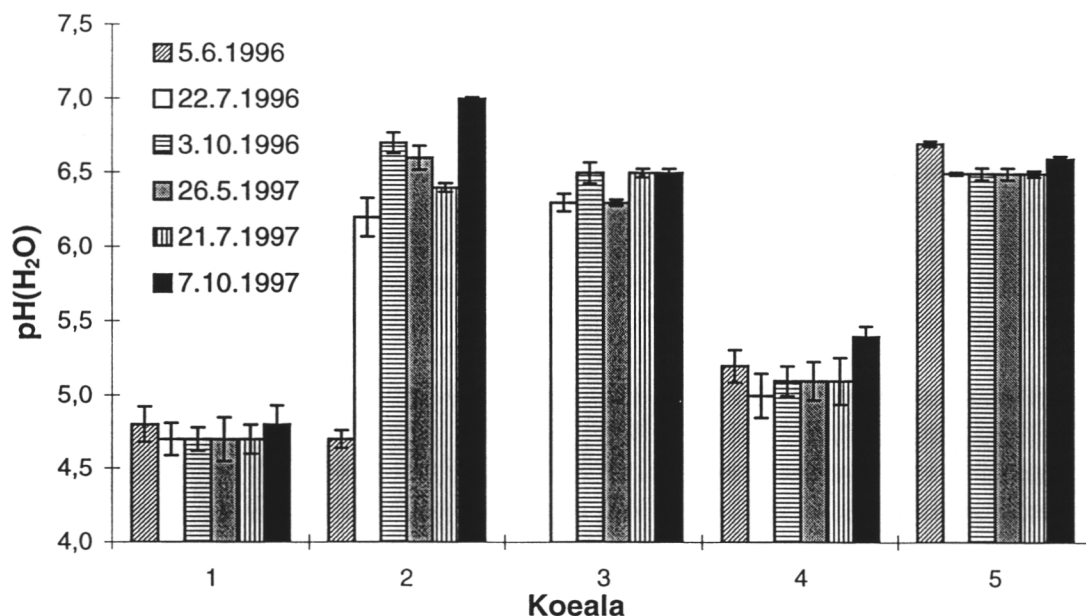
TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Happamuus ja ravinnetila

Maaperän happamuus

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

Ahveniston harjulla humuskerros on vähemmän hapanta kuin keskimäärin Suomen metsämailla, minkä perusteella alue on melko viljava. Humuskerroksen pH vaihteli vertailualalla 1 näytteenottokerroittain 4,7-4,8 (1996) ja 4,7-4,9 (1997). Vertailualan 4 vastaavat arvot olivat 5,0-5,2 (1996) ja 5,1-5,4 (1997) (kuva 3).



Kuva 3. Humuskerroksen pH vuosina 1996-97.

Imeytyksen vaikutus tuli selvästi esille humuskerroksen happamuustilan muutoksena. Jatkuva kasvukautinen imeytys (koeala 2) aloitettiin 25.6.1996, minkä seurauksena humuskerroksen pH kohosi selvästi. Ennen imeytystä pH oli vertailualojen tasolla, mutta imeytyksen edetessä kasvukaudella 1996 pH kohosi korkeammaksi kuin 6,5. Jatkuvan kasvukautisen imeytyksen alan humuskerroksen pH oli korkea koko kasvukauden 1997; pH-arvot vaihtelivat näytteenottokerroittain 6,4-7,0. Kahden tutkimusvuoden korkein humuskerroksen pH mitattiin viimeisimmällä näytteenottokerralla 1997 (kuva 3).

Myös jaksotettu kasvukautinen (koeala 3) sekä talvikautinen imeytys (koeala 5) nostivat humuskerroksen pH:n poikkeuksellisen korkeaksi. Kasvukausina 1996 ja 1997 pH-arvot olivat koealoilla noin 6,5 (kuva 3). Imeytysalojen humuskerroksen pH:n nousu näyttäisi olevan voimakkainta imeytysputkistojen lähiympäristössä. Edellä esitetyt imeytysalojen pH-arvot on määritetty metrin päästä putkiriveistä rinnettä alaspäin otetuista näytteistä. Kasvukaudella 1997 tutkittiin yhden näytteenottokerran yhteydessä humuskerroksen happamuustilaa imeytysaloilla myös kauempana kasteluputkista (putkirivien puolivälistä). Imeytysalojen putkirivien välistä mitatut pH-arvot olivat myös kohonneet vertailualoihin nähden, mutta pH:n nousu ei ole ollut yhtä voimakasta kuin putkirivien lähituntumassa. Jatkuvan kasvukautisen imeytyksen alalla (koeala 2) humuskerroksen pH oli putkirivien välissä 5,4 ja talvikautisella imeytysalalla (koeala 5) 5,5. Vertailualoilla pH-arvot olivat vastaavana ajankohtana 4,7 (koeala 1) ja 5,1 (koeala 4).

Maaperän happamuustilan palautumista ja sen kestoa tutkittiin koealalla, jota oli imeytetty talvi- ja kasvukaudella 1995-96, mutta imeytystä ei enää käynnistetty kasvukaudella 1997. Koealalta otettiin humuskerrosnäytteet kaksi kertaa kasvukaudella 1997. Humuskerroksen pH:ssa ei ollut merkkejä palautumisesta, vaan arvot olivat edelleen korkealla tasolla. Keskiarvot olivat näytteenottokerroilla 6,3 ja 6,4.

Imeytysveden happamuuden muutokset maaperässä

METLAN männiköihin keskittyneissä tutkimuksissa vajoveden keskimääräinen pH on ollut humuskerroksen alla 4,7. Ahveniston harjulla vajoveden pH oli vertailualoilla vuosina 1996-97 keskimäärin 4,9 (kivennäismaan syvyys 0 cm) (taulukko 5a-c). Vajoveden pH nousee luontaisesti veden vajotessa maaperässä syvemmälle puskuri- ja neutraloitumisprosessien ansoista. Vajoveden pH oli vertailualalla 1 keskimäärin 5,9 syvyydellä 100 cm (taulukko 5a).

Imeytysveden pH (>7) on erittäin korkea metsämaahan tulevaan sadantaan verrattuna. Sadannan pH vaihtelee yleensä pH 4,0-5,0. Imeytysveden korkea pH nosti vajoveden pH-arvot poikkeuksellisen korkeiksi imeytysaloilla (taulukot 5a-c). Imeytyksen taukoaminen kasvukaudella (koeala 3) tai imeytyksen päättyminen kasvukaudeksi talvikautisella imeytysalalla (koeala 5) ei palauttanut pH-arvoja lähellekään vertailualojen tasoa. Pohjaveden pH oli imeytysalueen läheisyydessä (piste 9601) keskimäärin 7,2 kasvukaudella 1996, 7,0 talvikautisen imeytyksen aikana 1996-97 ja 6,8 kasvukaudella 1997.

Pohjaveden pH talvikautisen imeytysalueen lähellä (putki 9502) oli keskimäärin 6,9 vuonna 1996 ja 7,0 vuonna 1997. Muiden putkien keskimääräiset pohjaveden pH-arvot olivat: 6,5 (1996) ja 6,4 (1997) putkessa 9406; 7,1 (1996) ja 6,9 (1997) putkessa 9407 sekä 6,8 (1997) putkessa 9504.

Taulukko 5 a). Raaka-, vajo- ja pohjaveden pH. Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 1	Koeala 2	
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi	ei imeytystä	jatkuva kasvukautinen imeytys	
		1996	1996-97	1997		1996	1997
Raakavesi	x	7,68	7,25	7,11			
	SE	0,09	0,05	0,05			
	SD	0,42	0,13	0,22			
	n	21	8	19			
Vajovesi humusker. alla	x				4,85	7,05	6,96
	SE				0,06	0,03	0,03
	SD				0,22	0,24	0,16
	n				15	57	21
Vajovesi syv. 40 cm	x				-	7,05	6,87
	SE				-	0,06	0,04
	SD				-	0,25	0,18
	n				-	16	18
Vajovesi syv. 100 cm	x				5,91	7,07	6,94
	SE				0,07	0,11	0,03
	SD				0,16	0,44	0,15
	n				5	16	20
Pohjavesi 9601	x	7,15	7	6,78			
	SE	0,04	0,03	0,04			
	SD	0,34	0,1	0,08			
	n	65	13	4			

Taulukko 5 b). Vajoveden pH.

		Koeala 3; kasvukautinen jaksotettu imeytys							
		imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997
		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.
Vajovesi humusker. alla	x	6,73	-	7,12	-	6,96	7,17	6,89	-
	SE	0,08	-	0,04	-	0,04	0,1	0,02	-
	SD	0,35	-	0,14	-	0,1	0,14	0,03	-
	n	21	-	14	-	6	2	3	-
Vajovesi syv. 40 cm	x	-	6,69	7,05	6,74	6,95	7,03	7,03	7,3
	SE	-	0,01	0,14	0,17	0,05	0,04	0,06	0,12
	SD	-	0,02	0,27	0,23	0,11	0,07	0,1	0,2
	n	-	2	4	2	6	3	3	2
Vajovesi syv. 100 cm	x	-	6,2	6,75	5,96	-	-	-	-
	SE	-	0,3	0,05	0,16	-	-	-	-
	SD	-	0,42	0,1	0,23	-	-	-	-
	n	-	2	3	2	-	-	-	-

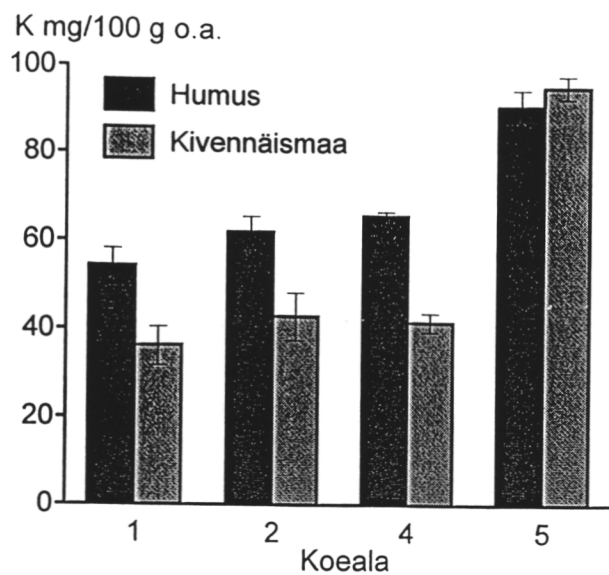
Taulukko 5 c). Raaka-, vajo- ja pohjaveden pH. Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 4 ei imeytystä 1996-97	Koeala 5			
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi		Talvikausi imeytys	Kasvukausi ei imeytystä	Talvikausi imeytys	Kasvukausi ei imeytystä
		1996	1996-97	1997		1995-96	1996	1997	1997
Raakavesi	x	7,68	7,25	7,11					
	SE	0,09	0,05	0,05					
	SD	0,42	0,13	0,22					
	n	21	8	19					
Vajovesi humusker. alla	x				4,89	7,22	6,67	7,19	6,9
	SE				0,03	0,03	0,1	0,06	0,08
	SD				0,11	0,11	0,19	0,15	0,2
	n				11	11	4	7	7
Vajovesi syv. 40 cm	x				-	-	6,46	-	6,7
	SE				-	-	0,31	-	0,04
	SD				-	-	0,44	-	0,07
	n				-	-	2	-	3
Vajovesi syv. 100 cm	x				-	-	-	-	6,01
	SE				-	-	-	-	0,21
	SD				-	-	-	-	0,37
	n				-	-	-	-	3
Pohjavesi 9601	x	7,15	7	6,78					
	SE	0,04	0,03	0,04					
	SD	0,34	0,1	0,08					
	n	65	13	4					

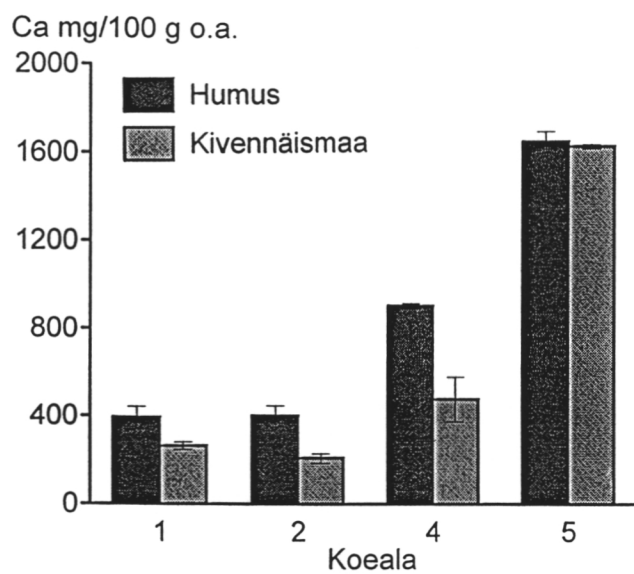
Maaperän ja vajoveden ravinnetila

Emäskationit ovat tärkeitä maaperän happamuuden vastustuskyvyn ja kasvillisuuden kannalta. Kasveille käyttökelpoisten emäsravinteiden eli vaihtuvan kaliumin (K), kalsiumin (Ca) ja magnesiumin (Mg) määrät kohosivat humuskerroksessa ja kivennäismaassa imeytyksen vaikutuksesta. Tämä havaittiin kasvukaudella 1996 tehdyissä ravinneanalyyseissä vertaamalla talvikautisen imeytysalan (5) ravinnepitoisuuksia muihin koaloihin, joilla ei imeytetty ollenkaan tai imeytystä ei vielä oltu aloitettu (kuvat 4, 5 ja 6).

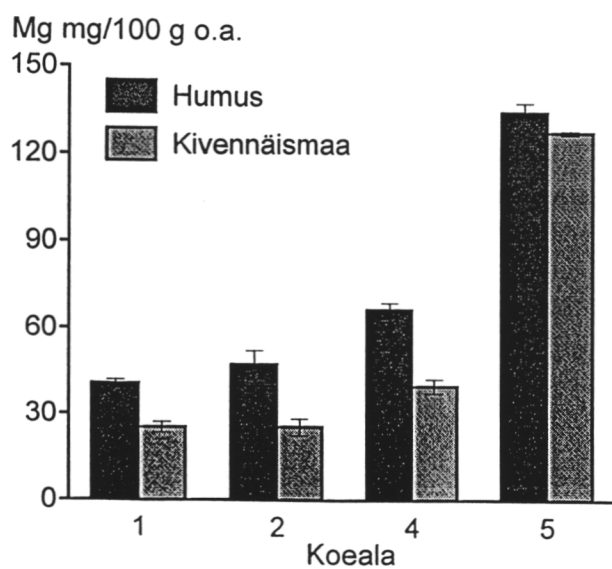
Taulukoissa 6a-c, 7a-c ja 8a-c on esitetty vesinäytteiden kalsium-, magnesium- ja kaliumpitoisuudet. Kalsiumin ja magnesiumin pitoisuudet vajovedessä kohosivat imeytyksen aikana lähelle imeytysveden tasoa, mikä oli luontaista tasoa korkeampi. Kalsiumin ja magnesiumin pitoisuudet olivat hieman korkeampia vuonna 1997 kasvukautisen imeytyksen aloilla (2 ja 3) verrattuna vastaaviin jaksoihin vuonna 1996. Kasvukautisen jaksotetun imeytyksen alalla (3) oli havaittavissa vuonna 1997, että imeytysjaksojen välillä Ca- ja Mg-pitoisuudet kohosivat vajovedessä vielä imeytysjaksoihin verrattuna. Tämä johtuu maahan imeytyksessä sitoutuneista suurista emäsravinnemääristä ja niiden heijastumisesta vajovedessä, kun suuren imeytysvesimäärän laimentava vaikutus puuttuu. Imeytysjaksojen aikana vajoveden koostumus heijastaa lähinnä imeytysveden koostumusta ja maan kyllästymistä imeytysvedellä. Viitteitä vastaavanlaisesta pitoisuuksien kohoamisesta saatiin myös talvikautisen imeytyksen alalta imeytyksen tauottua kasvukausiksi 1996 ja 1997. Vajoveden kaliumpitoisuudet laskivat imeytyksen takia luontaiseen tasoon nähden, ja pitoisuudet olivat lähellä imeytysveden pitoisuuksia.



Kuva 4. Vaihtuvan kaliumin määrä humuskerroksessa ja kivennäismaassa.



Kuva 5. Vaihtuvan kalsiumin määrä humuskerroksessa ja kivennäismaassa.



Kuva 6. Vaihtuvan magnesiumin määrä humuskerroksessa ja kivennäismaassa.

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

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 1	Koeala 2	
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi	ei imeytystä	jatkuva kasvukautinen imeytys	
		1996	1996-97	1997		1996	1997
Raakavesi	x	9,17	8,25	9,61			
	SE	0,08	0,69	0,3			
	SD	0,39	1,96	1,39			
	n	22	8	21			
Vajovesi	x				4,56	8,17	9,27
humusker.	SE				0,56	0,17	0,22
alla	SD				2,18	1,14	1,04
	n				15	54	23
Vajovesi	x				3,05	7,61	9,4
syv. 40 cm	SE				0,18	0,31	0,17
	SD				0,43	1,15	0,74
	n				6	14	18
Vajovesi	x				4,53	7,51	10,31
syv. 100 cm	SE				0,15	0,42	0,92
	SD				0,49	1,64	4,31
	n				10	15	22
Pohjavesi	x	9,05	7,79	9,76			
9601	SE	0,07	0,54	0,64			
	SD	0,55	1,93	1,44			
	n	64	13	5			

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

		Koeala 3; kasvukautinen jaksotettu imeytys							
		imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä
		1996 12.6.-12.7.	1996 13.7.-11.8.	1996 12.8.-12.9.	1997 - 8.6.	1997 9.6.-21.7.	1997 22.7.-17.8.	1997 18.8.-15.9.	1997 16.9.-27.10.
Vajovesi	x	7,75	-	9,06	-	10,16	11,89	9,06	-
humusker.	SE	0,14	-	0,11	-	0,34	1,46	0,11	-
alla	SD	0,54	-	0,38	-	0,84	2,52	0,38	-
	n	14	-	12	-	6	3	12	-
Vajovesi	x	-	6,97	7,73	31,2	11,61	16,14	10,38	30,53
syv. 40 cm	SE	-	0,89	0,19	0,37	0,96	1,02	1,58	5,48
	SD	-	1,78	0,39	0,73	2,35	1,77	2,74	10,95
	n	-	4	4	4	6	3	3	4
Vajovesi	x	-	3,77	5,48	7,5	-	-	-	-
syv. 100 cm	SE	-	0,08	0,33	0,31	-	-	-	-
	SD	-	0,15	0,66	0,61	-	-	-	-
	n	-	4	4	4	-	-	-	-

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

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 4	Koeala 5		
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi	ei imeytystä 1996-97	Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi
		1996	1996-97	1997		ei imeytystä 1996	imeytys 1997	ei imeytystä 1997
Raakavesi	x	9,17	8,25	9,61				
	SE	0,08	0,69	0,3				
	SD	0,39	1,96	1,39				
	n	22	8	21				
Vajovesi	x				5,43	34,1	9	11,62
humusker.	SE				0,51	6,59	1,09	1,06
alla	SD				1,84	11,42	3,07	3,19
	n				13	3	8	9
Vajovesi	x					12,45	-	7,25
syv. 40 cm	SE					3,8	-	1,12
	SD					6,58	-	2,75
	n					3	-	6
Vajovesi	x					-	-	6,37
syv. 100 cm	SE					-	-	1,24
	SD					-	-	3,03
	n					-	-	6
Pohjavesi	x	9,05	7,79	9,76				
9601	SE	0,07	0,54	0,64				
	SD	0,55	1,93	1,44				
	n	64	13	5				

Karkeiden ainetaselaskelmien perusteella jatkuvan kasvukautisen imeytyksen aikana (koeala 2, 25.6.-30.10.1996) maahan imeytettiin kalsiumia n. 10 kg/m² ja maasta poistui 100 cm:n syvyydellä n. 8 kg/m². Näin ollen maahan sitoutui kalsiumia imeytyksen aikana. Vuonna 1997 vastaavaa nettositoutumista ei havaittu imeytyksen aikana, vaan maasta saattoi jopa huuhtoutua hieman kalsiumia. Tämä heijastaa tilannetta, missä maaperä on lähes saavuttanut kemiallisen tasapainon vajoveden kanssa. Magnesiumia imeytettiin maahan koealalla 2 vuonna 1996 1,7 kg/m² ja huuhtouma 100 cm:n syvyydellä oli 1,5 kg/m². Vuonna 1997 nettositoutumista ei tapahtunut, vaan imeytetty magnesiummäärä meni lähes sellaisenaan metrin paksuisen pintamaakerroksen läpi. Myös kaliumia sitoutui hieman vuonna 1996, mutta ei enää vuonna 1997.

Emäskationien pidättyminen maaperään imeytysvedestä nostaa maan pH:ta, mikä havaittiin maaperän happamuustilaa kuvaavista tuloksista kasvukaudelta 1996. Tämä perustuu happamien vetyionien korvaantumiseen maahiukkasten pinnalla vaihtokykyisillä emäskationeilla. Kun maahiukkasten vaihtopakoilla olevien emäskationien ja vetyionien määrät saavuttavat tasapainon veden koostumuksen kanssa, sitoutumista ei enää tapahdu määrällisesti yhtä paljon kuin kauempana tasapainotilasta. Maan pH:n pysyminen suhteellisen vakaalla ja korkealla tasolla imetysoaloilla koko kasvukauden 1997 aikana tukee käsitystä, että maaperä ja vajovesi ovat olleet kemiallisesti tasapainossa. Vaikka kationinvaihtoreaktioilla ei olisikaan kovin suurta merkitystä imeytysveden puhdistumisprosessien kannalta, kasvillisuuden ravinteiden saatavuudelle sillä on suuri merkitys, ja imeytys vaikuttaa tulosten perusteella kationinvaihtoprosesseihin merkittävästi.

Taulukko 7 a). Raaka-, vajo- ja pohjaveden Mg-pitoisuus (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 1	Koeala 2	
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi		jatkuva kasvukautinen imeytys	
		1996	1996-97	1997	ei imeytystä	1996	1997
Raakavesi	x	1,48	1,35	1,67			
	SE	0,01	0,12	0,08			
	SD	0,06	0,34	0,4			
	n	22	8	21			
Vajovesi humusker. alla	x				1,06	1,38	1,58
	SE				0,14	0,01	0,03
	SD				0,53	0,1	0,16
	n				15	54	23
Vajovesi syv. 40 cm	x				0,56	1,34	1,59
	SE				0,06	0,03	0,02
	SD				0,15	0,09	0,09
	n				6	14	18
Vajovesi syv. 100 cm	x				1,4	1,34	1,74
	SE				0,04	0,04	0,16
	SD				0,13	0,15	0,75
	n				10	15	22
Pohjavesi 9601	x	1,54	1,33	1,64			
	SE	0,02	0,09	0,09			
	SD	0,18	0,34	0,21			
	n	64	13	5			

Taulukko 7 b). Vajoveden Mg-pitoisuus (mg/l).

		Koeala 3; kasvukautinen jaksotettu imeytys							
		imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä
		1996 12.6.-12.7.	1996 13.7.-11.8.	1996 12.8.-12.9.	1997 - 8.6.	1997 9.6.-21.7.	1997 22.7.-17.8.	1997 18.8.-15.9.	1997 16.9.-27.10.
Vajovesi humusker. alla	x	1,35	-	1,5	-	1,66	1,88	1,72	-
	SE	0,02	-	0,02	-	0,02	0,17	0,06	-
	SD	0,07	-	0,06	-	0,05	0,29	0,12	-
	n	14	-	12	-	6	3	4	-
Vajovesi syv. 40 cm	x	-	1,55	1,36	5,36	1,92	2,56	1,75	5,07
	SE	-	0,23	0,01	0,03	0,14	0,16	0,21	0,94
	SD	-	0,46	0,02	0,07	0,34	0,29	0,36	1,89
	n	-	4	4	4	6	3	3	4
Vajovesi syv. 100 cm	x	-	0,92	1,09	1,59	-	-	-	-
	SE	-	0,07	0,05	0,08	-	-	-	-
	SD	-	0,15	0,09	0,16	-	-	-	-
	n	-	4	4	4	-	-	-	-

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

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 4 ei imeytystä 1996-97	Koeala 5		
		Kasvukausi 1996	Talvikausi 1996-97	Kasvukausi 1997		Kasvukausi ei imeytystä 1996	Talvikausi imeytys 1997	Kasvukausi ei imeytystä 1997
Raakavesi	x	1,48	1,35	1,67				
	SE	0,01	0,12	0,08				
	SD	0,06	0,34	0,4				
	n	22	8	21				
Vajovesi humusker. alla	x				0,98	5,56	1,45	1,66
	SE				0,12	1,12	0,16	0,13
	SD				0,42	1,94	0,45	0,4
	n				13	3	8	9
Vajovesi syv. 40 cm	x				-	2,52	-	1,42
	SE				-	0,66	-	0,16
	SD				-	1,15	-	0,4
	n				-	3	-	6
Vajovesi syv. 100 cm	x				-	-	-	1,23
	SE				-	-	-	0,19
	SD				-	-	-	0,47
	n				-	-	-	6
Pohjavesi 9601	x	1,54	1,33	1,64				
	SE	0,02	0,09	0,09				
	SD	0,18	0,34	0,21				
	n	64	13	5				

Taulukko 8 a). Raaka-, vajo- ja pohjaveden K-pitoisuus (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 1	Koeala 2	
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi	ei imeytystä	jatkuva kasvukautinen imeytys	
		1996	1996-97	1997	1996-97	1996	1997
Raakavesi	x	1,43	1,23	1,2			
	SE	0,02	0,09	0,08			
	SD	0,08	0,26	0,37			
	n	22	8	21			
Vajovesi humusker. alla	x				5,76	1,5	1,19
	SE				0,84	0,03	0,07
	SD				3,24	0,25	0,34
	n				15	54	23
Vajovesi syv. 40 cm	x				4,11	1,27	1,13
	SE				0,38	0,03	0,02
	SD				0,93	0,12	0,08
	n				6	14	18
Vajovesi syv. 100 cm	x				1,09	1,28	1,13
	SE				0,16	0,04	0,05
	SD				0,51	0,17	0,24
	n				10	15	22
Pohjavesi 9601	x	1,65	1,08	1,61			
	SE	0,04	0,08	0,12			
	SD	0,32	0,29	0,27			
	n	64	13	5			

Taulukko 8 b). Vajoveden K-pitoisuus (mg/l).

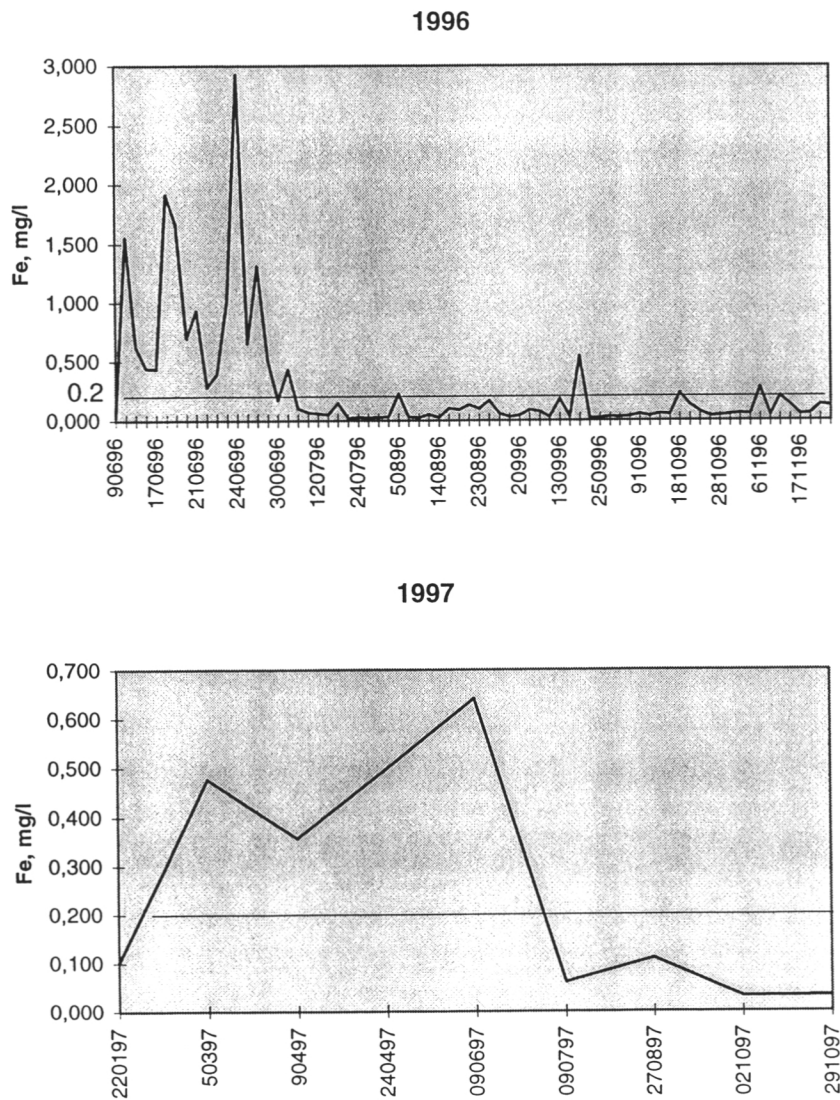
		Koeala 3; kasvukautinen jaksoitettu imeytys							
		imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997
		12.6.-12.7.	13.7.-11.8.	12.8.-12.9.	- 8.6.	9.6.-21.7.	22.7.-17.8.	18.8.-15.9.	16.9.-27.10.
Vajovesi humusker. alla	x	1,37	-	1,4	-	1,13	1,41	1,19	-
	SE	0,02	-	0,02	-	0,03	0,35	0,02	-
	SD	0,08	-	0,06	-	0,07	0,6	0,05	-
	n	14	-	12	-	6	3	4	-
Vajovesi syv. 40 cm	x	-	1,54	1,32	2,04	1,44	1,99	1,23	2,11
	SE	-	0,14	0,04	0,04	0,07	0,13	0,13	0,16
	SD	-	0,28	0,09	0,08	0,18	0,22	0,22	0,33
	n	-	4	4	4	6	3	3	4
Vajovesi syv. 100 cm	x	-	1,21	1,06	0,53	-	-	-	-
	SE	-	0,15	0,04	0,04	-	-	-	-
	SD	-	0,3	0,07	0,07	-	-	-	-
	n	-	4	4	4	-	-	-	-

Taulukko 8 c). Raaka-, vajo- ja pohjaveden K-pitoisuus (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

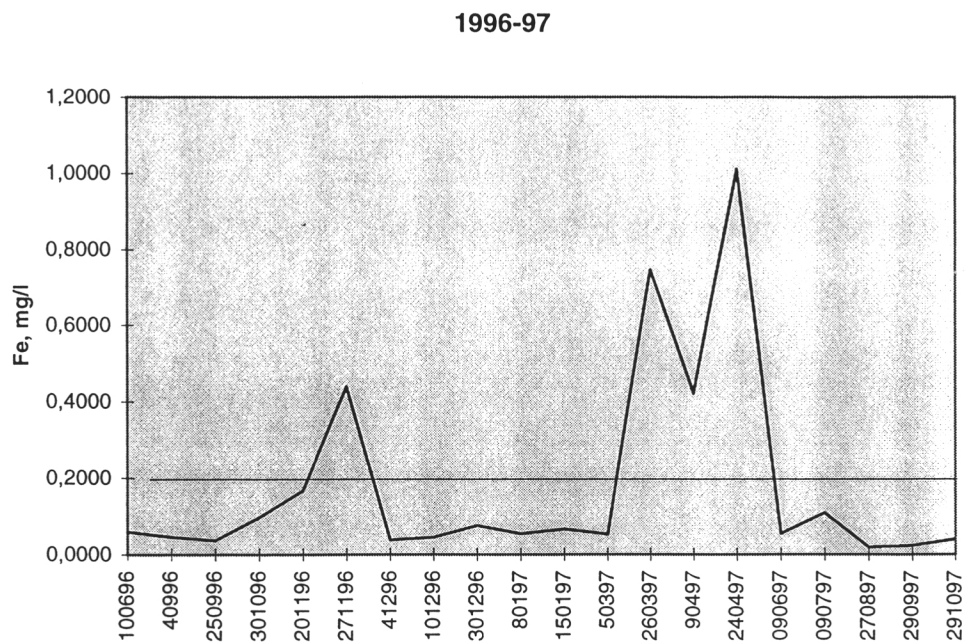
		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 4 ei imeytystä 1996-97	Koeala 5		
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi		Kasvukausi ei imeytystä	Talvikausi imeytys	Kasvukausi ei imeytystä
		1996	1996-97	1997		1996	1997	1997
Raakavesi	x	1,43	1,23	1,2				
	SE	0,02	0,09	0,08				
	SD	0,08	0,26	0,37				
	n	22	8	21				
Vajovesi humusker. alla	x				8,61	4,62	2,6	2,26
	SE				2,26	0,56	1,38	0,88
	SD				8,14	0,97	0,91	2,63
	n				13	3	8	9
Vajovesi syv. 40 cm	x				-	2,72	-	0,88
	SE				-	0,41	-	0,1
	SD				-	0,7	-	0,25
	n				-	3	-	6
Vajovesi syv. 100 cm	x				-	-	-	1,24
	SE				-	-	-	0,27
	SD				-	-	-	0,67
	n				-	-	-	6
Pohjavesi 9601	x	1,65	1,08	1,61				
	SE	0,04	0,08	0,12				
	SD	0,32	0,29	0,27				
	n	64	13	5				

Pohjaveden laadun kannalta tärkeiden aineiden pitoisuudet

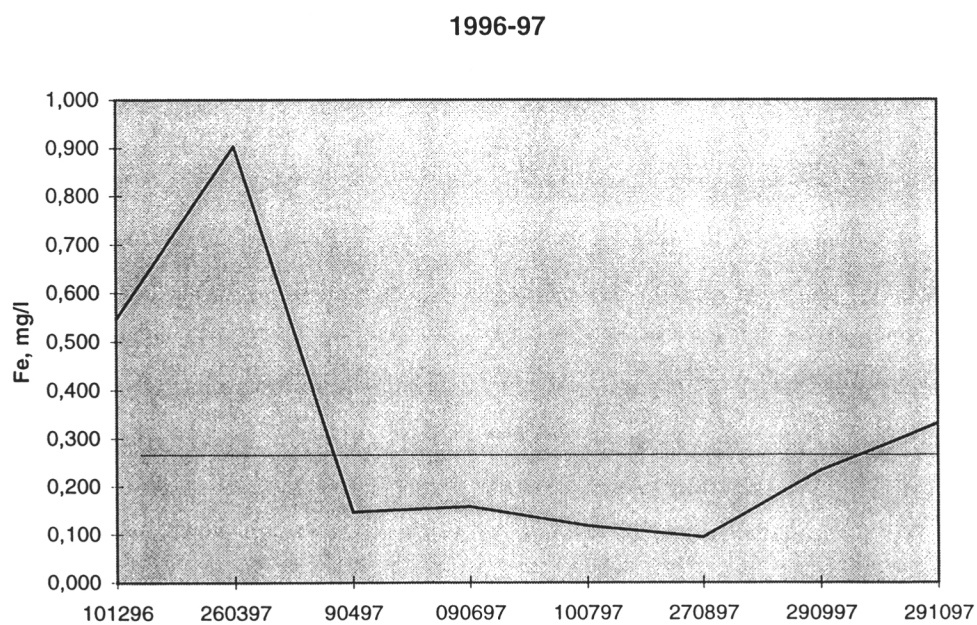
Pohjaveden rautapitoisuuden vaihtelu imeytysalueen läheisyydessä (pohjavesiputki 9601) vuosina 1996 ja 1997 on esitetty kuvassa 7. Rautapitoisuus vaihteli voimakkaasti kesäkuussa 1996 ja ylitti säännönmukaisesti talousveden laatuvaatimusten enimmäispitoisuuden 0,2 mg/l (Sosiaali- ja terveysministeriö 1994). Heinäkuun alusta lähtien pitoisuus laski voimakkaasti ja oli yleisesti ottaen raja-arvon alapuolella vuoden loppuun saakka. Rautapitoisuus oli vuonna 1997 maaliskuun alun näytteenottokerrasta lähtien aina kesäkuun alun näytteenotto-kertaan saakka korkeampi kuin 0,2 mg/l. Heinäkuun alusta lähtien pitoisuudet olivat suhteellisen matalia (kuva 7). Muiden pohjavesiputkien rautapitoisuuksien vaihtelut vuosina 1996-97 on esitetty kuvissa 8-11. Imeytysalueen lähellä mittauspisteessä 9502 (kuva 8) rautapitoisuus oli yli 0,2 mg/l maaliskuussa 1997. Imeytysalueella oli täydellinen imeytytauko ajanjaksolla 3.3.-4.4.1997.



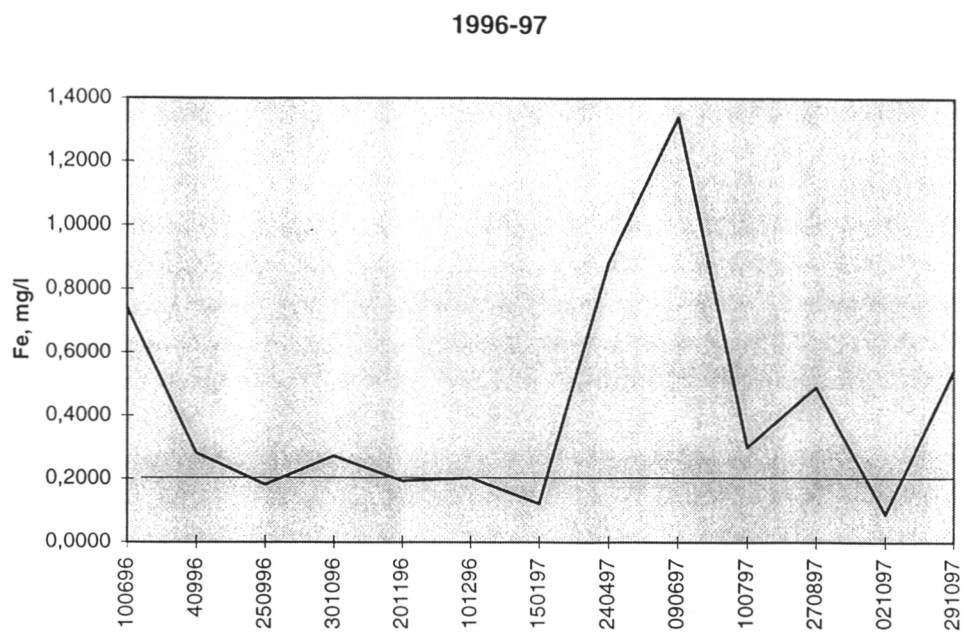
Kuva 7. Pohjaveden rautapitoisuus imeytysalueen läheisyydessä (havaintoputki 9601).



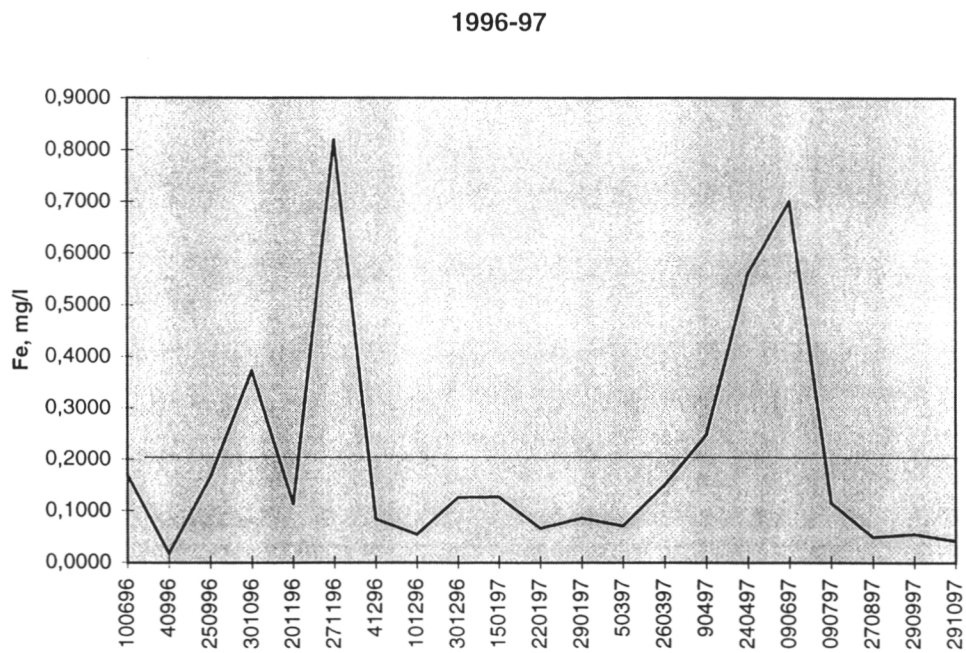
Kuva 8. Pohjaveden rautapitoisuus havaintoputkessa 9502.



Kuva 9. Pohjaveden rautapitoisuus havaintoputkessa 9504.



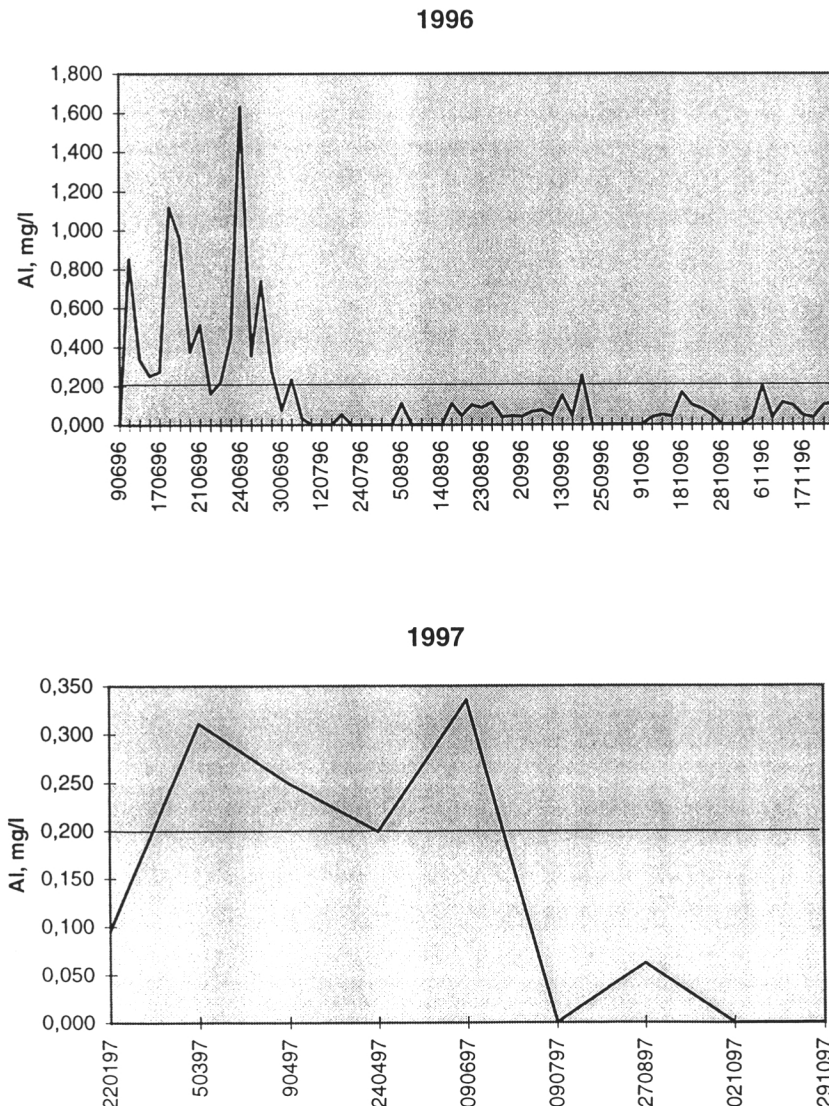
Kuva 10. Pohjaveden rautapitoisuus havaintoputkessa 9406.



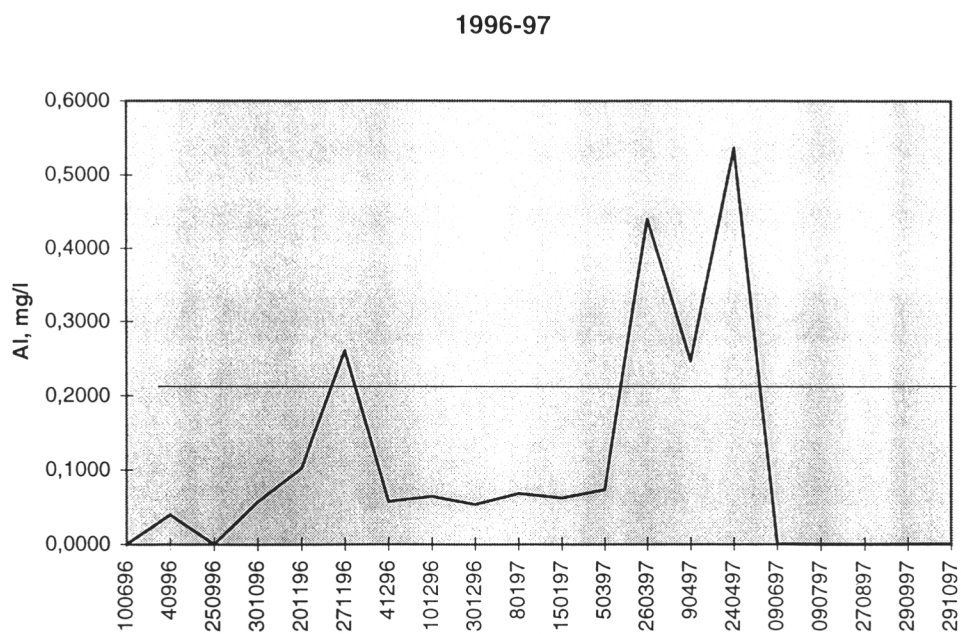
Kuva 11. Pohjaveden rautapitoisuus havaintoputkessa 9407.

Pohjaveden alumiinipitoisuus noudatti hyvin samanlaista trendiä rautapitoisuuden kanssa kaikissa mittauspisteissä (kuvat 12-16). Talousveden raja-arvo on 0,2 mg/l (Sosiaali- ja terveysministeriö 1994). Kaikkien mittauspisteiden mangaanipitoisuudet olivat yleisesti alle raja-arvon.

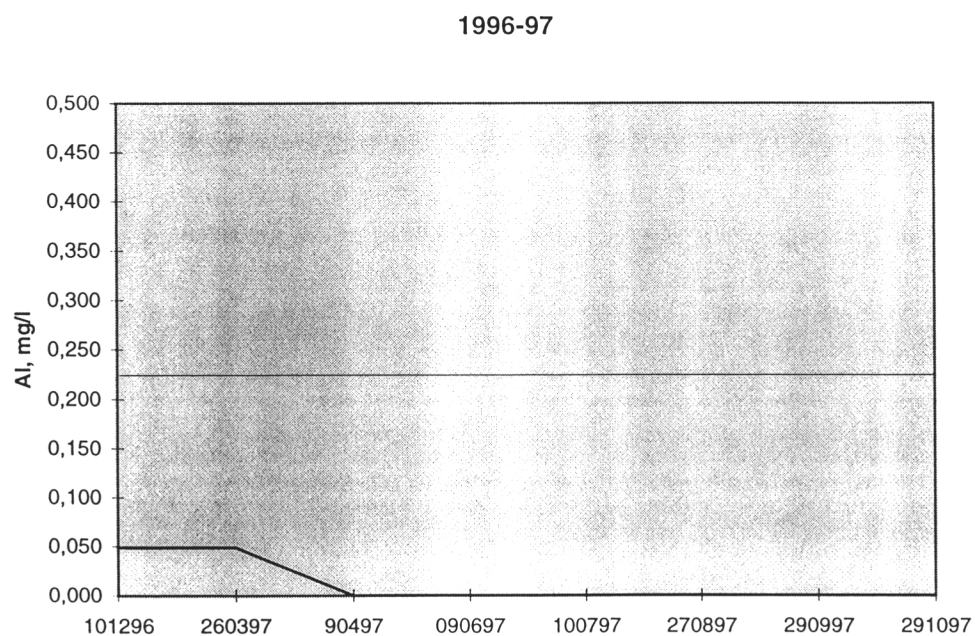
Imeytysveden orgaanisen hiilen (TOC) pitoisuus oli kasvukaudella 1996 keskimäärin 8,3 mg/l, talvikaudella 1996-97 keskimäärin 9,1 ja kasvukaudella 1997 keskimäärin 9,6 mg/l. Imeytysaloilla vajoveden TOC-pitoisuus laski imeytyksen aikana lähelle sadetusveden pitoisuutta. Imeytystaukoina pitoisuudet kohosivat. Vertailualoilta määritetyt luontaiset TOC-pitoisuudet ovat selvästi korkeampia kuin sadetusvedessä (taulukko 9a-c). Imeytysalueen läheisyydessä mitattu pohjaveden TOC-pitoisuus (putket 9601 ja 9502) oli matalampi kuin sadetusvedessä kaikkina imeytysajanjaksoina (taulukko 9a, kuva 17, kuva 18). Muiden pohjavesiputkien TOC-pitoisuuksien vaihtelu ajan suhteen on esitetty kuvissa 19, 20 ja 21.



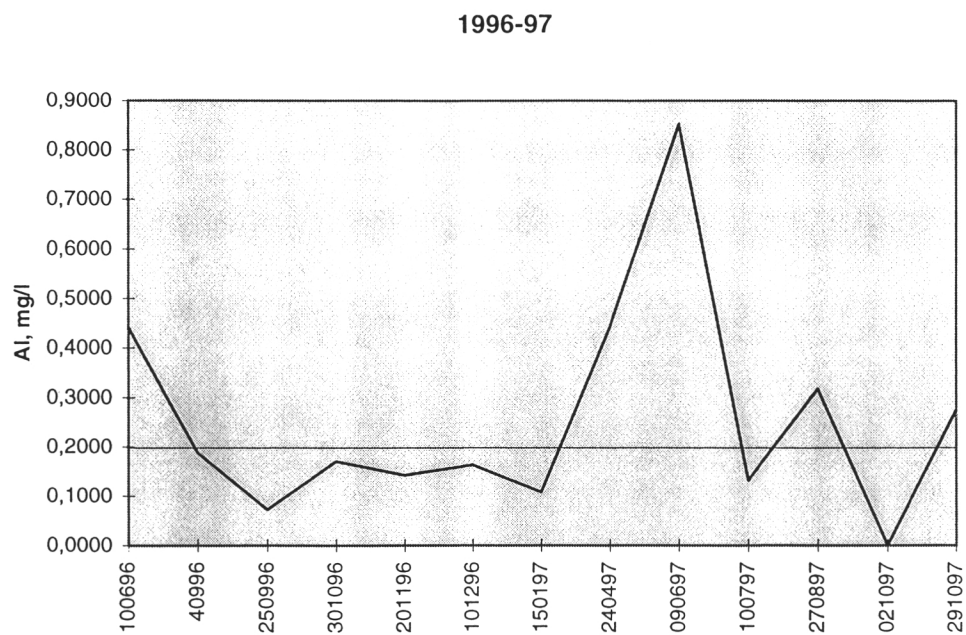
Kuva 12. Pohjaveden alumiinipitoisuus imeytysalueen läheisyydessä (havaintoputki 9601).



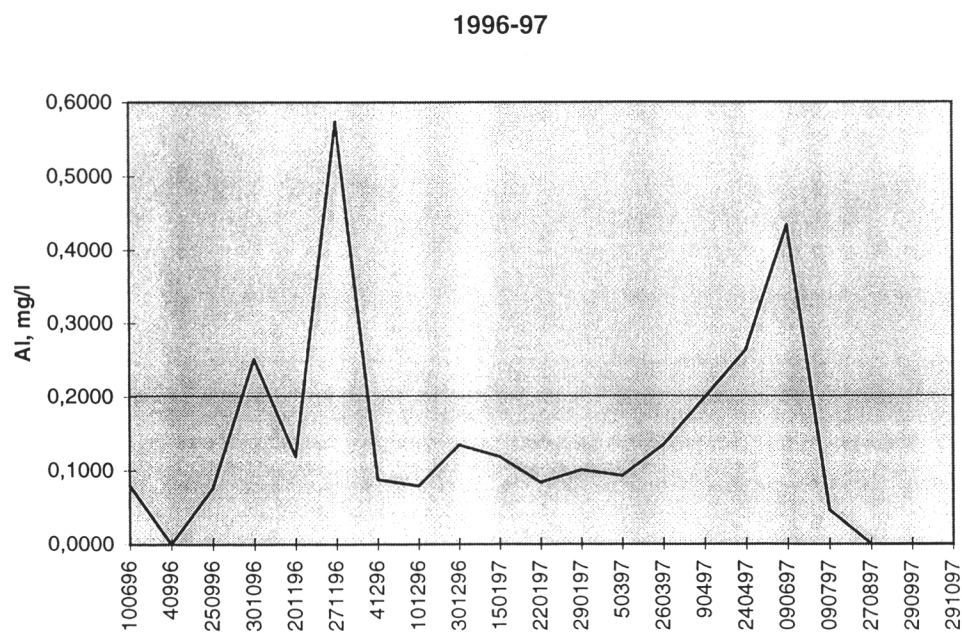
Kuva 13. Pohjaveden alumiinipitoisuus havaintoputkessa 9502.



Kuva 14. Pohjaveden alumiinipitoisuus havaintoputkessa 9504.



Kuva 15. Pohjaveden alumiinipitoisuus havaintoputkessa 9406.



Kuva 16. Pohjaveden alumiinipitoisuus havaintoputkessa 9407.

Taulukko 9 a). Raaka-, vajo- ja pohjaveden TOC (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

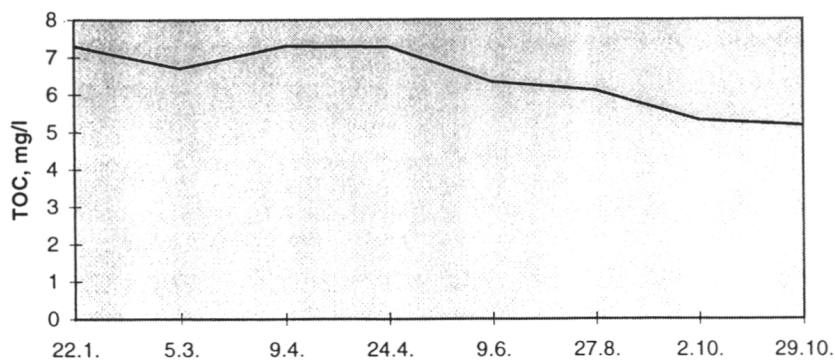
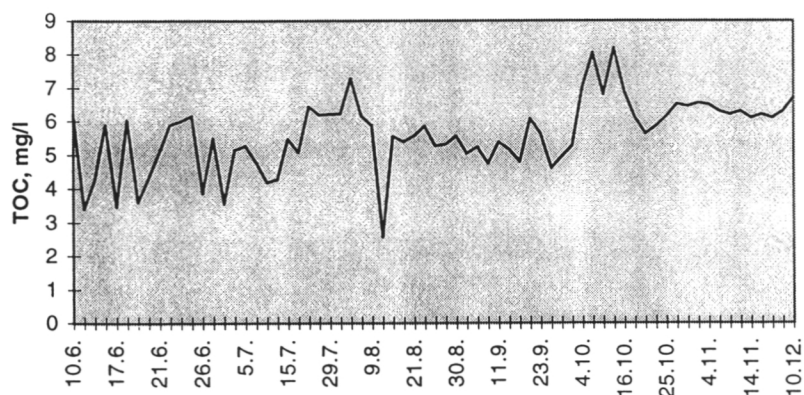
Raaka- ja pohjavesi				Koeala 1	Koeala 2	
Kasvukausi			Talvikausi	ei imeytystä	jatkuva kasvukautinen imeytys	
1996	1996-97	1997	1996-97		1996	1997
Raakavesi	x	8,34	9,06			
	SE	0,41	0,29			
	SD	1,86	0,83			
	n	21	8			
Vajovesi	x			88,91	13,38	11,98
humusker.	SE			10,5	0,65	0,47
alla	SD			40,66	4,87	2,15
	n			15	57	21
Vajovesi	x			-	-	11,86
syv. 40 cm	SE			-	-	0,89
	SD			-	-	3,77
	n			-	-	18
Vajovesi	x			75,13	-	13,77
syv. 100 cm	SE			6,32	-	1,04
	SD			10,94	-	4,64
	n			3	-	20
Pohjavesi	x	5,48	6,56			
9601	SE	0,13	0,13			
	SD	1,08	0,46			
	n	65	13			

Taulukko 9 b). Vajoveden TOC (mg/l).

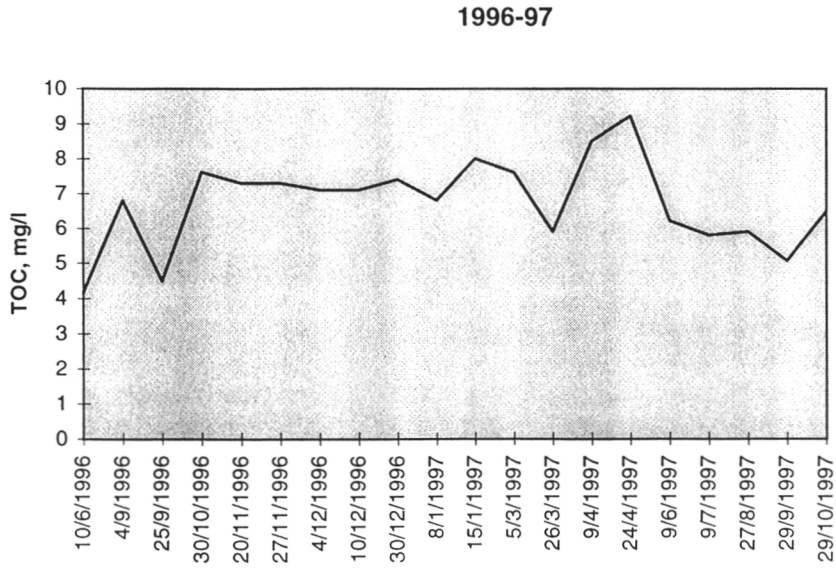
Koeala 3; kasvukautinen jaksolettu imeytys									
		imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997
		12.6.-12.7.	13.7.-11.8.	12.8.-12.9.	- 8.6.	9.6.-21.7.	22.7.-17.8.	18.8.-15.9.	16.9.-27.10.
Vajovesi	x	11,21	-	13,48	-	11,08	47,4	13,33	-
humusker.	SE	0,43	-	0,63	-	0,26	10,3	2,92	-
alla	SD	1,97	-	2,37	-	0,63	14,57	3,97	-
	n	21	-	14	-	6	2	3	-
Vajovesi	x	-	-	-	29,75	26,82	49,73	17,55	11,2
syv. 40 cm	SE	-	-	-	11,95	3,48	7,45	8,68	0,8
	SD	-	-	-	16,9	8,53	12,9	15,03	1,1
	n	-	-	-	2	6	3	3	2
Vajovesi	x	-	-	-	36,2	-	-	-	-
syv. 100 cm	SE	-	-	-	9,9	-	-	-	-
	SD	-	-	-	14	-	-	-	-
	n	-	-	-	2	-	-	-	-

Taulukko 9 c). Raaka-, vajo- ja pohjaveden TOC (mg/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

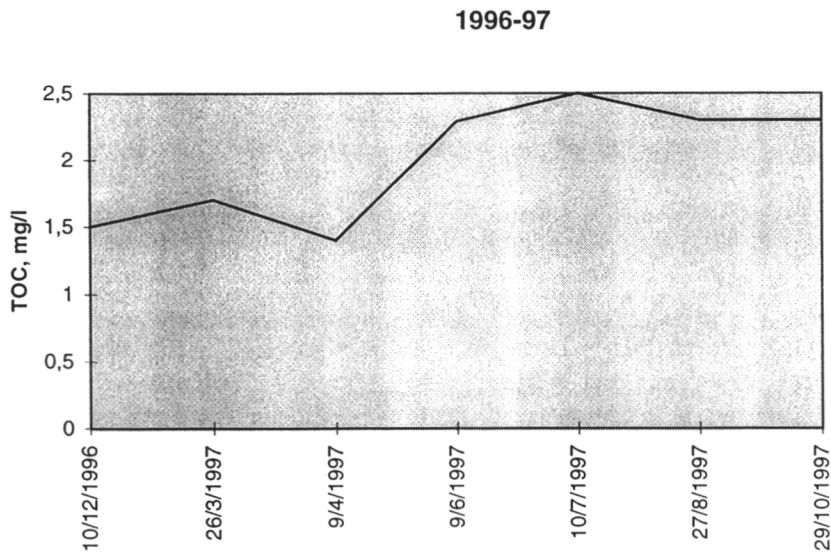
		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 4	Koeala 5			
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi	ei imeytystä 1996-97	Talvikausi imeytys	Kasvukausi ei imeytystä	Talvikausi imeytys	Kasvukausi ei imeytystä
		1996	1996-97	1997		1995-96	1996	1997	1997
Raakavesi	x	8,34	9,06	9,58					
	SE	0,41	0,29	0,1					
	SD	1,86	0,83	0,43					
	n	21	8	19					
Vajovesi humusker. alla	x				75,28	9,68	38,49	9,13	40,1
	SE				8,86	0,61	10,59	0,31	6,53
	SD				34,31	1,71	21,18	0,77	17,3
	n				15	8	4	6	7
Vajovesi syv. 40 cm	x				-	-	-	-	32
	SE				-	-	-	-	8,95
	SD				-	-	-	-	15,5
	n				-	-	-	-	3
Vajovesi syv. 100 cm	x				-	-	-	-	27,95
	SE				-	-	-	-	0,35
	SD				-	-	-	-	0,49
	n				-	-	-	-	2
Pohjavesi 9601	x	5,48	6,56	5,73					
	SE	0,13	0,13	0,29					
	SD	1,08	0,46	0,58					
	n	65	13	4					



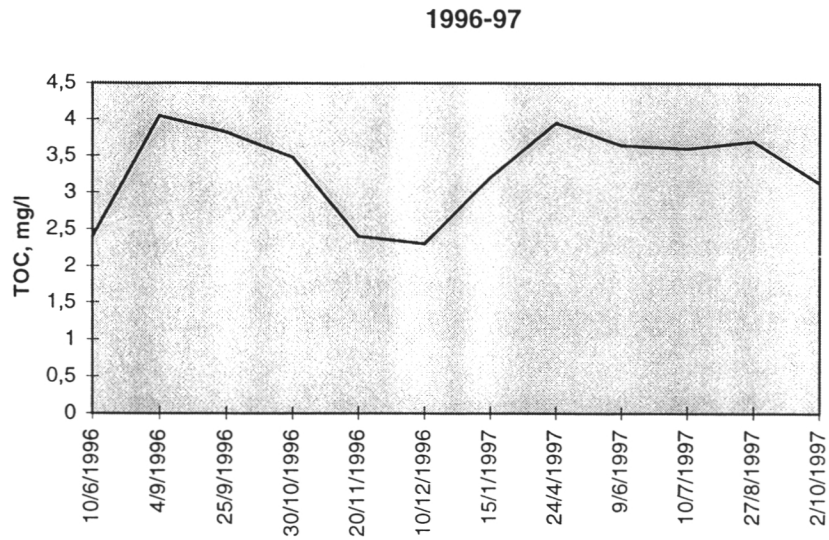
Kuva 17. Pohjaveden TOC imeytysalueen läheisyydessä (mittauspiste 9601).



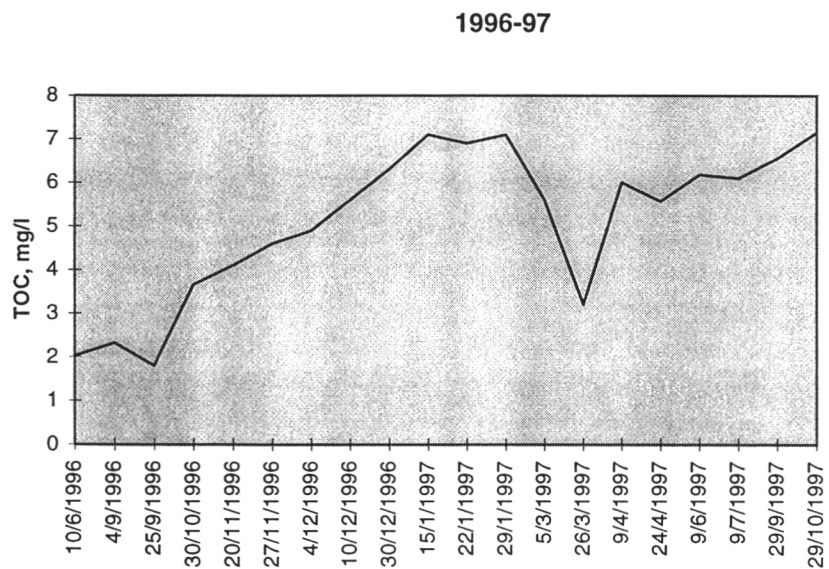
Kuva 18. Pohjaveden TOC mittauspisteessä 9502.



Kuva 19. Pohjaveden TOC mittauspisteessä 9504.



Kuva 20. Pohjaveden TOC mittauspisteessä 9406.



Kuva 21. Pohjaveden TOC mittauspisteessä 9407.

Päätelmät

Imeytyksen aiheuttama emäsravinteiden sitoutuminen maahan ja happamuuden väheneminen ovat periaatteessa positiivisia muutoksia kasvillisuuden ravinteiden saatavuuden kannalta. Myös maaperän happamoitumisprosesseja vastustava puskurikapasiteetti lisääntyy. Maaperän happamuus- ja ravinnetilan kannalta eri sadetusmuodot aiheuttavat samansuuntaisen muutoksen, ja palautuminen alkuperäiseen happamuustilaan näyttää olevan erittäin hidasta. Esimerkiksi alueella, jota ei ole imeytetty kasvukauden 1996 jälkeen lainkaan, happamuustilassa ei ole vielä tapahtunut palautumisen merkkejä. Tärkein seuraus happamuustason muutoksesta on typen kierron muuttuminen, millä voi olla merkittäviä vaikutuksia kasvillisuudelle ja maaperän veden koostumukselle. Happamuustason ja ravinnetilan muutosten lisäksi kasvillisuuden kannalta tärkeä muutos on maan kyllästyminen vedellä imeytyksen aikana. Maan kyllästyminen heijastaa imeytys- ja vajoveden ainepitoisuuksien samankaltaisuus.

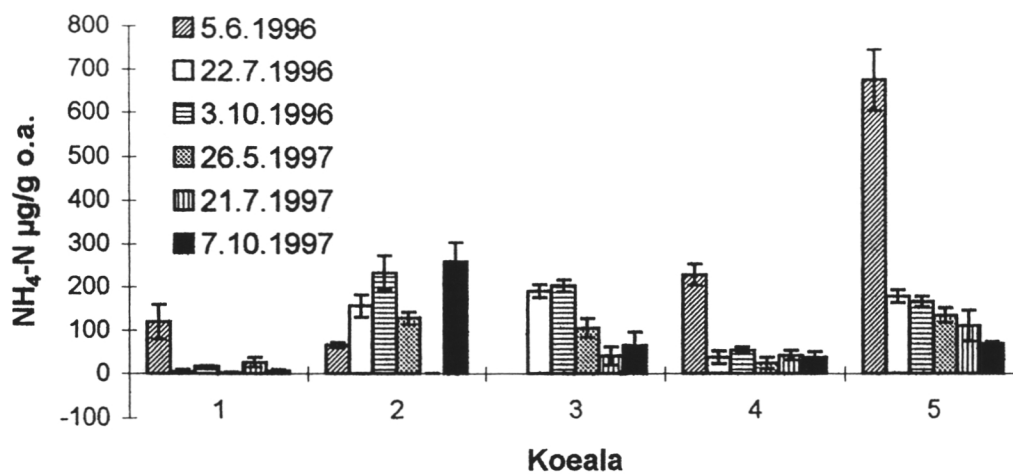
Pohjaveden orgaanisen hiilen pitoisuus on ollut sekä kasvukausien aikana että talvikaudella selvästi imeytysveden pitoisuutta matalampi, minkä perusteella Ahveniston harju on ollut suhteellisen tehokas orgaanisen aineen suodatin.

Typen mineralisaatio, nitrifikaatio ja typen häviöt

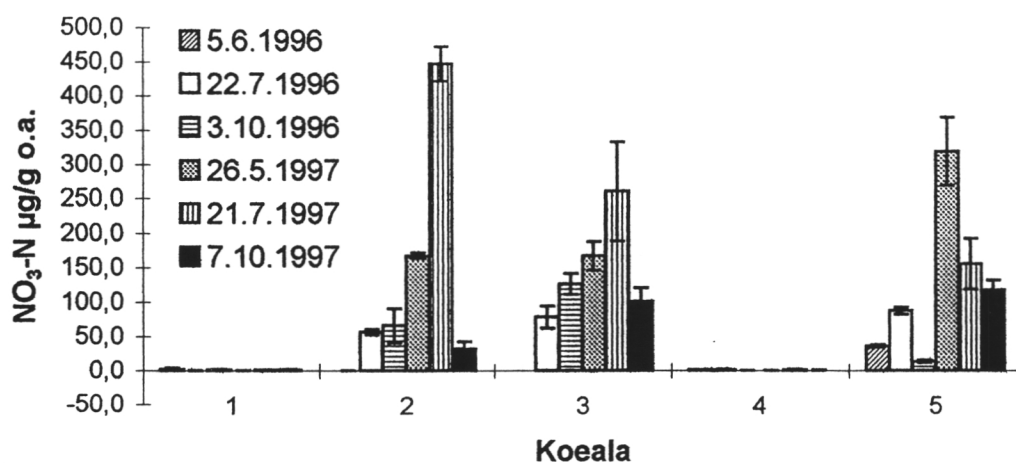
Maanäytteiden tulokset on ilmoitettu kolmen kokoomanäytteen keskiarvona, sillä näin voi parhaiten verrata koealojen välisiä eroja.

Yleensä ammoniumtyppeä oli enemmän imeytettyjen koealojen humuskerroksessa kuin vertailualoilla (kuva 22). Heinäkuussa 1997 ammoniumia oli kuitenkin imeytysaloilla jopa vähemmän kuin vertailualoilla. Tällöin puolestaan nitraattipitoisuudet olivat imeytysaloilla korkeita (jopa 450 µg/g orgaanista ainetta), joten luultavasti lähes kaikki ammonium oli hapetettu nitraatiksi (Kuva 23).

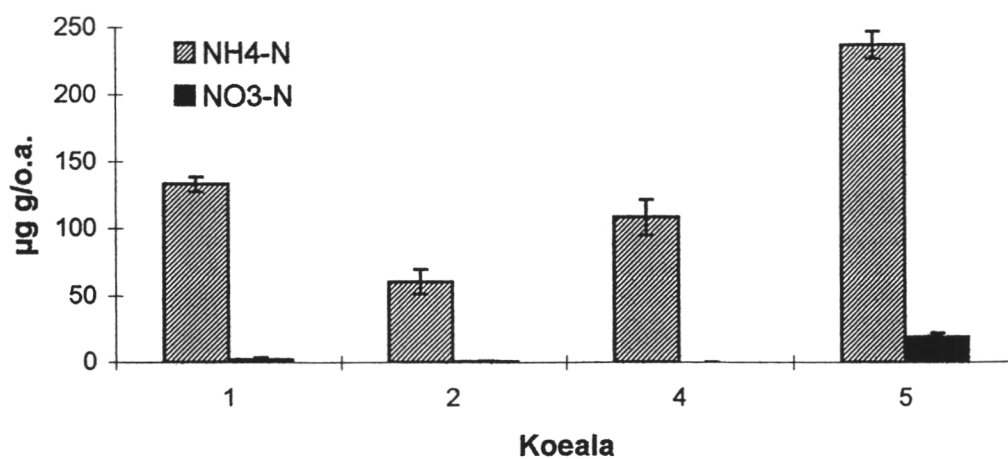
Nitraattia oli humuskerroksessa ainoastaan imeytetyillä koealoilla (Kuva 23). Kesäkuussa 1996 määritettiin myös kivennäismaan ammonium- ja nitraattipitoisuudet ja tulokset olivat samankaltaisia kun humuskerroksessa (Kuva 24). Laboratorioinkubaatiokokeet osoittivat, että mineraalitypen nettomuodostus ($\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$) oli suurinta imeytyskoealoilla (kuva 25). Imeytyskoealoilla ammoniumtyppi muutettiin nitraattitypeksi asti, kun taas vertailualoilla nettonitrifikaatio oli olematonta (kuva 26). Siis imeytys aloitti nitrifikaation, mikä selittää maan kohonneet nitraattipitoisuudet (kuva 23). Tärkein syy nitrifikaation alkamiseen on luultavasti maan pH:n kohoaminen (kuva 3), joka toisaalta mahdollisti happamuudelle herkkien nitrifikaatiobakteereiden toiminnan ja toisaalta lisäsi typen nettomineralisaatiota eli ammoniumtypen saatavuutta. Myös imeytysalalla, jolla seurattiin pH:n palautumista, mineraalityppeä oli vielä humuskerroksessa enemmän kuin vertailualoilla ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ n. 75, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ n. 65 µg/g orgaanista ainetta).



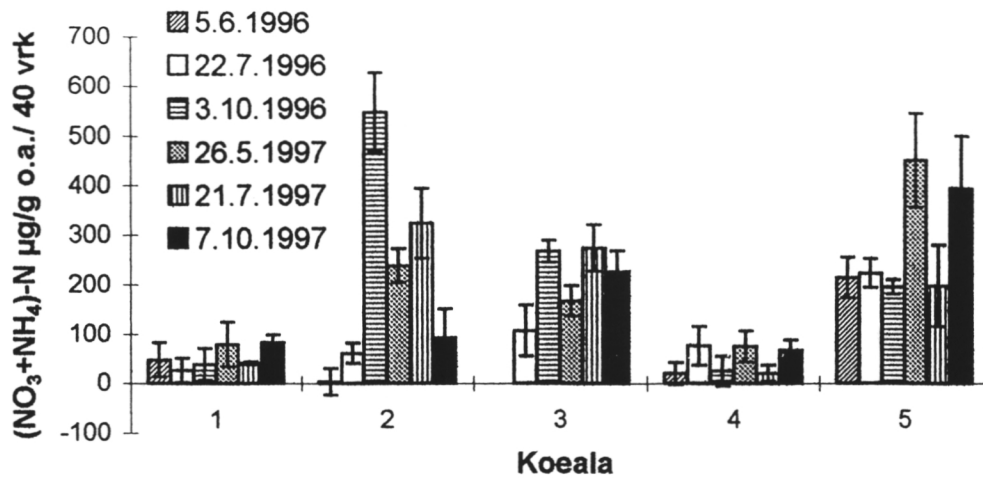
Kuva 22. Ammonium-N:n pitoisuudet humuskerroksessa. Koealan (3 kokoomanäytettä /koeala, joista määrittäminen 2:lla rinnakkaisella) keskiarvo ja keskiarvon keskivirhe.



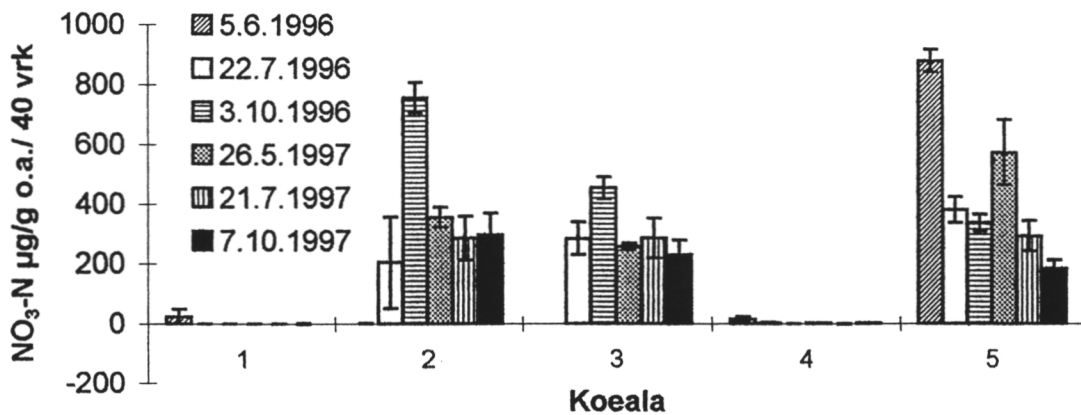
Kuva 23. Nitraatti-N:n pitoisuudet humuskerroksessa. Kuuden rinnakkaisen (kts. selitys kuva 22) maanäytteen keskiarvo ja keskiarvon keskivirhe.



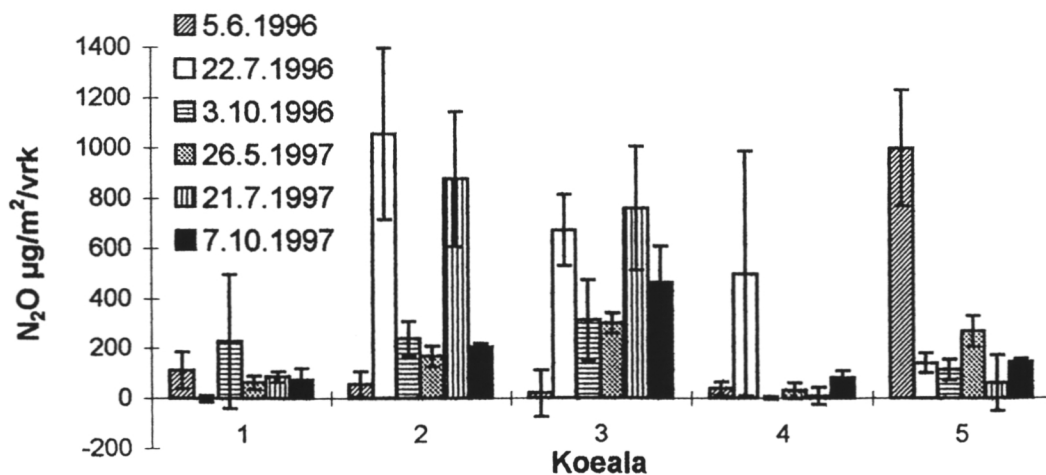
Kuva 24. Ammonium- ja nitraatti-N:n pitoisuudet kivennäismaakerroksessa. Kuuden rinnakkaisen (kts. selitys kuva 22) maanäytteen keskiarvo ja keskiarvon keskivirhe.



Kuva 25. Mineraalityypen nettomuodostuminen humuskerroksessa laboratorioinkubaatiassa (6 vko) vakiokosteudessa (60 % vedenpidätyskyvystä) ja lämpötilassa (14°C). Kuuden rinnakkaisen (kts. selitys kuva 22) maanäytteen keskiarvo ja keskiarvon keskivirhe.



Kuva 26. Nettonitrifikaatio humuskerroksessa laboratorioinkubaatiassa (6 vko) vakiokosteudessa (60 % vedenpidätyskyvystä) ja lämpötilassa (14°C). Kuuden rinnakkaisen (kts. selitys kuva 22) maanäytteen keskiarvo ja keskiarvon keskivirhe.



Kuva 27. N₂O:n tuotto koealoilla maastomittauksissa. Kolmen rinnakkaisen mittauskammion keskiarvo ja keskiarvon keskivirhe.

N_2O -kaasun kenttämittauksissa koalojen sisäinen vaihtelu oli suuri (kuva 27). Molempina vuosina N_2O -tuotto oli yleensä suurinta koaloilla, joissa oli jatkuva (2) tai jaksotettu (3) kasvukautinen imeytys ja alkoi niillä vasta imeytyksen alkamisen jälkeen. Talvikautisen imeytyksen koalalla vuoden N_2O -määrät olivat suurempia vuonna 1996 kuin vuonna 1997. Vuonna 1996 N_2O -tuotto oli suurinta heti kastelun päätyttyä, kun maassa oli nitraattia ja se oli vielä märkää. Vuoden 1997 ensimmäisen näytteenoton tulokset lienevät aliarvioita, koska maa oli vielä roudassa. Kaikenkaikkiaan dityppioksidia tuotettiin eniten silloin, kun maassa oli nitraattia, ja se oli märkää. Suurimmillaankin arvot ovat typpenä ilmoitettuna suuruusluokaltaan 2 kg/ha vuodessa, mutta tämäkin lienee yliarvio, koska kaikki mittaukset tehtiin kasvukauden aikana.

Imeytyksen aikana ammonium-, nitraatti- ja kokonaistyyppipitoisuudet olivat keskihajonnat huomioituina samaa suuruusluokkaa vajovedessä kuin raakavedessä (Taulukot 10a-c, 11a-c, 12a-c). Esim. kasvukautiselle imeytysalalle (2) imeytettiin kesän 1997 aikana saman verran nitraattityppeä kuin mitä sieltä vajoveden mukana poistui (n. 2500-3000 kg NO_3-N / ha). Jaksotetulla kasvukautisella imeytysalalla (3) kesällä 1997 imeytyksen aikana 40 cm:n syvyydestä otetuissa vajovesinäytteissä NO_3-N pitoisuudet olivat kuitenkin melkein 10 kertaa suurempia kuin raakavedessä. Tämä johtunee imeytystauosta, sillä ilmeisesti heti imeytystauon jälkeen imulysimetrillä otetuissa näytteissä vaikuttivat imeytystauon korkeat pitoisuudet. Imeytysjakson aikana nitraattipitoisuudet kuitenkin laskivat: imeytys alkoi uudelleen 19.8., ja nitraattipitoisuudet olivat 25.8. 4400, 9.9. 400 ja 16.9. 79 $\mu g/l$. Imeytystauon aikana siis maaveden tyyppipitoisuudet (etenkin nitraatti) olivat selvästi kohonneet. Tämä on nähtävissä etenkin talvikautisella imeytysalalla (5), jossa nitraattityypen määrä vajovedessä oli jopa 35 mg/l kasvukauden aikana (vrt. raja-arvo NO_3-N 6 mg/l, kts. johdanto). Syynä tähän on ilmeisesti imeytysveden laimentavan vaikutuksen poistuminen ja denitrifikaation hidastuminen (maa ei enää yhtä märkää). Ainoastaan nitraattityypen suhteen pohjaveden tyyppipitoisuudet olivat suurempia kuin raakaveden. Pohjaveden nitraattipitoisuudet ovat kuitenkin hyvin lähellä pohjavesien keskimääräistä pitoisuutta (0,21 mg/l, Soveri ja Ahlberg 1990). Vajovesinäytetulosten perusteella siis nitraattityppeä näyttäisi huuhtoutuvan ainoastaan imeytystaukojen aikana.

Paras imeytysmenetelmä typen kierron suhteen?

Kesän 1996 tulosten perusteella näytti siltä, että nitraatin huuhtoutumisen kannalta huonoin imeytysvaihtoehto oli talvikautinen kastelu. Talvikautisella imeytysalalla maan pH nousi imeytyksen vaikutuksesta (Kuva 3) ja ilmeisesti tämän seurauksena nitraattia tuotettiin runsaasti kasvukauden aikana (Kuva 23). Tarkasteltaessa kesän 1997 tuloksia havaitaan kuitenkin, että myös jaksotetulla kasvukautisella imeytysalalla huuhtoutuu runsaasti nitraattia imeytystaukojen aikana. Imeytyksen aikana nitraattipitoisuudet siis pysyvät alhaisina, koska imeytysvesi laimentaa huuhtoutuvat nitraatin määrät. Tämän lisäksi imeytyksen aikana maan ollessa hyvin märkää, nitraattityppeä denitrifioidaan N_2O-N :ksi (Kuva 27). Turvallisin imeytysmenetelmä kahden ensimmäisen kesän tulosten perusteella näyttäisi olevan jatkuva kasvukautinen imeytys, sillä näin kesän aikana ei pääse huuhtoutumaan suuria nitraattipitoisuuksia. Syksyllä kastelun loputtua on kuitenkin riski nitraatin huuhtoutumiselle, sillä runsaat sateet saattavat kuljettaa nitraattia alaspäin. Syksyllä lämpötilan laskiessa nitrifikaatio on kuitenkin hitaampaa, kuten maan nitraattituloksista voidaan havaita (Kuva 23, NO_3-N pitoisuus lokakuussa yli kymmenen kertaa pienempi kuin heinäkuussa). Vaikka kasvukautinen imeytys lopetettiin 6.10.1997, myöhempiäkin vajovesituloksia on olemassa:

vajoveden nitraattipitoisuudet olivat 9.10.97 1800 ja 23.10. enää 60 ug/l. Kaiken kaikkiaan nitraatin huuhtoutumisriski kasvukautiselta imeytysalalta syksyn aikana saattaa siis olla pieni.

Jos nitrifikaation alkaminen imeytetyillä koealoilla johtui maan pH:n noususta, sama ilmiö on luultavasti nähtävissä myös karummalla harjulla. Nitraatin tuotto maassa siis luultavasti kiihtyy, jos imeytysveden pH on monta pH-yksikköä korkeampi kun maan oma pH, ja imeytyksen seurauksena maan pH nousee samalle tasolle kun raakaveden pH.

Taulukko 10 a). Raaka-, vajo- ja pohjaveden NH₄-N (ug/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

Raaka- ja pohjavesi				Koeala 1	Koeala 2	
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi	jatkuva kasvukautinen imeytys	
		1996	1996-97	1997	ei imeytystä	
					1996	1997
Raakavesi	x	25	7	9		
	SE	7	2	2		
	SD	28	6	6		
	n	17	9	15		
Vajovesi humusker. alla	x				480	8
	SE				168	2
	SD				607	12
	n				13	54
Vajovesi syv. 40 cm	x				44	7
	SE				10	2
	SD				13	3
	n				2	14
Vajovesi syv. 100 cm	x				26	4
	SE				4	1
	SD				11	3
	n				7	15
Pohjavesi 9601	x	1	1	1		
	SE	0	0	1		
	SD	3	2	2		
	n	49	13	5		

Taulukko 10 b). Vajoveden NH₄-N (ug/l).

Koeala 3; kasvukautinen jaksotettu imeytys									
		imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997
		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.
Vajovesi humusker. alla	x	18	-	5	-	5	-	18	-
	SE	5	-	3	-	0	-	11	-
	SD	22	-	9	-	1	-	21	-
	n	21	-	12	-	5	-	4	-
Vajovesi syv. 40 cm	x	-	33	6	40	11	-	21	65
	SE	-	19	2	12	2	-	3	15
	SD	-	39	4	21	5	-	6	26
	n	-	4	4	3	5	-	3	3
Vajovesi syv. 100 cm	x	-	6	16	87	-	-	-	-
	SE	-	2	5	28	-	-	-	-
	SD	-	5	10	56	-	-	-	-
	n	-	4	4	4	-	-	-	-

Taulukko 10 c). Raaka-, vajo- ja pohjaveden NH₄-N (ug/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 4 ei imeytystä 1996-97	Koeala 5			
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi		Talvikausi imeytys	Kasvukausi ei imeytystä	Talvikausi imeytys	Kasvukausi ei imeytystä
		1996	1996-97	1997		1995-96	1996	1997	1997
Raakavesi	x	25	7	9					
	SE	7	2	2					
	SD	28	6	6					
	n	17	9	15					
Vajovesi humusker. alla	x				175	15	544	8	215
	SE				22	5	193	1	44
	SD				63	12	385	4	88
	n				8	5	4	7	4
Vajovesi syv. 40 cm	x				-	-	83	13	27
	SE				-	-	43	4	10
	SD				-	-	74	5	17
	n				-	-	3	2	3
Vajovesi syv. 100 cm	x				-	-	-	24	33
	SE				-	-	-	1	6
	SD				-	-	-	1	8
	n				-	-	-	2	2
Pohjavesi 9601	x	1	1	1					
	SE	0	0	1					
	SD	3	2	2					
	n	49	13	5					

Taulukko 11 a). Raaka-, vajo- ja pohjaveden NO₃-N (ug/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 1	Koeala 2	
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi	ei imeytystä 1996-97	jatkuva kasvukautinen imeytys	
		1996	1996-97	1997		1996	1997
Raakavesi	x	133	149	195			
	SE	43	20	47			
	SD	175	60	183			
	n	17	9	15			
Vajovesi humusker. alla	x				40	50	195
	SE				15	4	102
	SD				54	29	419
	n				13	54	17
Vajovesi syv. 40 cm	x				8	118	418
	SE				1	8	183
	SD				1	30	659
	n				2	14	13
Vajovesi syv. 100 cm	x				36	90	228
	SE				23	11	21
	SD				61	42	81
	n				7	15	15
Pohjavesi 9601	x	240	166	293			
	SE	14	20	109			
	SD	98	72	244			
	n	49	13	5			

Taulukko 11 b). Vajoveden NO₃-N (ug/l).

		Koeala 3; kasvukautinen jaksotettu imeytys							
		imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997
		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.
Vajovesi humusker. alla	x	91	-	43	-	142	-	270	-
	SE	5	-	6	-	14	-	155	-
	SD	24	-	22	-	30	-	310	-
	n	21	-	12	-	5	-	4	-
Vajovesi syv. 40 cm	x	-	1821	151	21333	1600	-	1626	14100
	SE	-	980	39	333	986	-	1390	5110
	SD	-	1960	77	577	2206	-	2407	8850
	n	-	4	4	3	5	-	3	3
Vajovesi syv. 100 cm	x	-	78	69	2250	-	-	-	-
	SE	-	24	13	278	-	-	-	-
	SD	-	47	26	557	-	-	-	-
	n	-	4	4	4	-	-	-	-

Taulukko 11 c). Raaka-, vajo- ja pohjaveden NO₃-N (ug/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 4 ei imeytystä 1996-97	Koeala 5			
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi		Talvikausi imeytys	Kasvukausi ei imeytystä	Talvikausi imeytys	Kasvukausi ei imeytystä
		1996	1996-97	1997		1995-96	1996	1997	1997
Raakavesi	x	133	149	195					
	SE	43	20	47					
	SD	175	60	183					
	n	17	9	15					
Vajovesi humusker. alla	x				69	151	35250	120	2703
	SE				27	5	7134	23	743
	SD				86	12	14268	61	1486
	n				10	5	4	7	4
Vajovesi syv. 40 cm	x				-	-	10133	170	1627
	SE				-	-	5157	0	530
	SD				-	-	8932	0	919
	n				-	-	3	2	3
Vajovesi syv. 100 cm	x				-	-	-	240	3410
	SE				-	-	-	10	2690
	SD				-	-	-	14	3804
	n				-	-	-	2	2
Pohjavesi 9601	x	240	166	293					
	SE	14	20	109					
	SD	98	72	244					
	n	49	13	5					

Taulukko 12 a). Raaka-, vajo- ja pohjaveden N-tot (ug/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 1	Koeala 2	
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi	ei imeytystä	jatkuva kasvukautinen imeytys	
		1996	1996-97	1997	1996-97	1996	1997
Raakavesi	x	602	539	511			
	SE	79	29	35			
	SD	326	86	137			
	n	17	9	15			
Vajovesi humusker. alla	x				3085	566	660
	SE				431	131	124
	SD				1552	227	513
	n				13	54	17
Vajovesi syv. 40 cm	x				-	1796	1255
	SE				-	269	262
	SD				-	1008	944
	n				-	14	13
Vajovesi syv. 100 cm	x				-	1705	1127
	SE				-	356	137
	SD				-	1378	532
	n				-	15	15
Pohjavesi 9601	x	440	417	474			
	SE	15	25	115			
	SD	105	92	258			
	n	49	19	5			

Taulukko 12 b). Vajoveden N-tot (ug/l).

		Koeala 3; kasvukautinen jaksotettu imeytys							
		imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä	imeytys	ei imeytystä
		1996	1996	1996	1997	1997	1997	1997	1997
		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.
Vajovesi humusker. alla	x	581	-	606	-	578	-	865	-
	SE	33	-	20	-	20	-	313	-
	SD	151	-	69	-	44	-	627	-
	n	21	-	12	-	5	-	4	-
Vajovesi syv. 40 cm	x	-	18075	2865	25000	3980	-	3137	14967
	SE	-	8060	1301	1528	1395	-	2484	5225
	SD	-	16119	2602	2646	3120	-	4303	9050
	n	-	4	4	3	5	-	3	3
Vajovesi syv. 100 cm	x	-	9500	2200	8075	-	-	-	-
	SE	-	2608	570	2434	-	-	-	-
	SD	-	5216	1140	4867	-	-	-	-
	n	-	4	4	4	-	-	-	-

Taulukko 12 c). Raaka-, vajo- ja pohjaveden N-tot (ug/l). Pohjavesitulokset ovat havaintopisteestä 9601.

		Raaka- ja pohjavesi			Koeala 4	Koeala 5			
		Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi	ei imeytystä	Talvikausi	Kasvukausi	Talvikausi	Kasvukausi
		1996	1996-97	1997		1996-97	Imeytys	ei imeytystä	Imeytys
		1996	1996-97	1997	1996-97	1995-96	1996	1997	1997
Raakavesi	x	602	539	511					
	SE	79	29	35					
	SD	326	86	137					
	n	17	9	15					
Vajovesi	x				5110	550	38250	626	5450
humusker.	SE				2018	36	7330	48	744
alla	SD				6381	81	14660	128	1489
	n				10	5	4	7	4
Vajovesi	x				-	-	24333	1700	5933
syv. 40 cm	SE				-	-	7535	100	829
	SD				-	-	13051	141	1436
	n				-	-	3	2	3
Vajovesi	x				-	-	-	2950	13650
syv. 100 cm	SE				-	-	-	150	10350
	SD				-	-	-	212	14637
	n				-	-	-	2	2
Pohjavesi	x	440	417	474					
9601	SE	15	25	115					
	SD	105	92	258					
	n	49	19	5					

Orgaanisen aineen fraktiointi

Orgaanisen aineen fraktiointia varten otetut näytteet olivat kokoomanäytteitä. Näytteet oli kerätty kevään, kesän ja syksyn -96 aikana levylysimitreistä, raakavedestä sekä eräistä pohjavesiputkista. Imulysimetrien vesiä ei tässä yhteydessä tutkittu.

Orgaanisen aineksen molekyylikokoon perustuvassa fraktioinnissa levylysimetrin 5 keräämä vesi (talvikautinen imeytys) noudatti raakaveden "profiilia". Koealoilla 2 ja 3 orgaanisen aineen määrät olivat hieman korkeampia painottuen raskaampiin jakeisiin (1-10 kD humuksesta 10-100 kD), mikä kertoo osaltaan vähäisestä orgaanisen aineen huuhtoutumisesta. Koealalla 5 ei tätä ilmiötä esiintynyt. Vertailualoilla 1 ja 4 liukoisien orgaanisen aineen osuus oli selvästi korkeampi, mutta ultrasuodatukseen perustuva molekyylipainojakautuma oli samanlainen kuin raakavedessä. Ainoastaan pohjavesiputkesta 9601 saatiin v. 1996 riittävästi näytettä kromatografisiin karakterisointeihin eikä etäämmällä olevista putkista ole voitu tehdä vastaavia mittauksia. Putken 9601 (lähin putki) veden liukoinen orgaaninen aines oli alhaisemmalla tasolla ja painottunut fraktioihin 0-1 kD ja 1-10 kD, joka osoittaa harjun (sekä viereisen altaan) toimivan tehokkaasti näinkin poikkeuksellisissa oloissa. Kaikilla imeytysaloilla, raakavedessä ja pohjavedessä liukoinen tyyppi oli molekyylipainojakautumaltaan samanlaista ja samalla pitoisuustasolla. Vertailualoilla pitoisuudet olivat hieman korkeampia johtuen epäorgaanisen tyyppien määrästä.

Kemiallisiin ominaisuuksiin perustuva karakterisointi osoitti, että pohjaveteen (putki 9601) kulkeutuva orgaaninen aines on pääosin liukoisinta ainesosaa (hydrofiiliset yhdisteet). Hydrofiilisen ainesosan pitoisuus pohjavedessä on karkeasti ottaen sama kuin raakavedessäkin. Se ei siis juurikaan vähene humus- ja suotautumiskerroksissa. Hydrofiilinen aine on luonteeltaan orgaanisia happoja tai sen luonteisia aineita sekä neutraaliaineita. Koealoilla 2, 3 ja 5 levylysimetrien vesi noudattelee raakaveden profiilia. Kemiallinen koostumus painottuu enemmän heikommin vesiliukoisiin yhdisteisiin (hydrofobiset yhdisteet). Pääkomponentteja ovat orgaaniset hapot ja neutraaliaineet (hydrofobiset sekä hydrofiiliset).

IR-spektroskopinen analyysi osoitti, että vertailualojen levylysimetrien vesi oli selvästi erilaista kuin raakavesi, pohjavedet tai imeytysalojen vedet. Koealojen 2, 3 ja 5 spektrit olivat samantyyppisiä kuin raakavedellä, ja talvikautisen imeytysalan 5 lysimetrivesi muistutti eniten raakavettä. IR-spektroskooppisesta analyysistä käy selville se, että C-H ryhmien osuus vähenee, joka merkitsee myös sitä, että hiilivety-yhdisteiden osuus vähenee selkeästi. Siten myös IR-analyysi vahvistaa käsitystä, että harju toimii raskaasti kuormitettunakin suotimena suhteellisen normaalisti. Pohjavesiputkista 9407, 9406 ja 9502 voitiin tehdä vain TOC- ja IR-analyysi veden vähyyden takia. IR-analyysit kuitenkin osoittavat, että pohjavesiputkien etäisyyden kasvaessa imeytysalueesta hiilivetyjen osuus pohjavedessä vähenee ja siten IR-analyysit ovat TOC-mittauksissa saatujen tulosten kanssa yhdensuuntaisia.

Aluskasvillisuus

Kasvilajien peittävyden ja elinvoiman muutokset

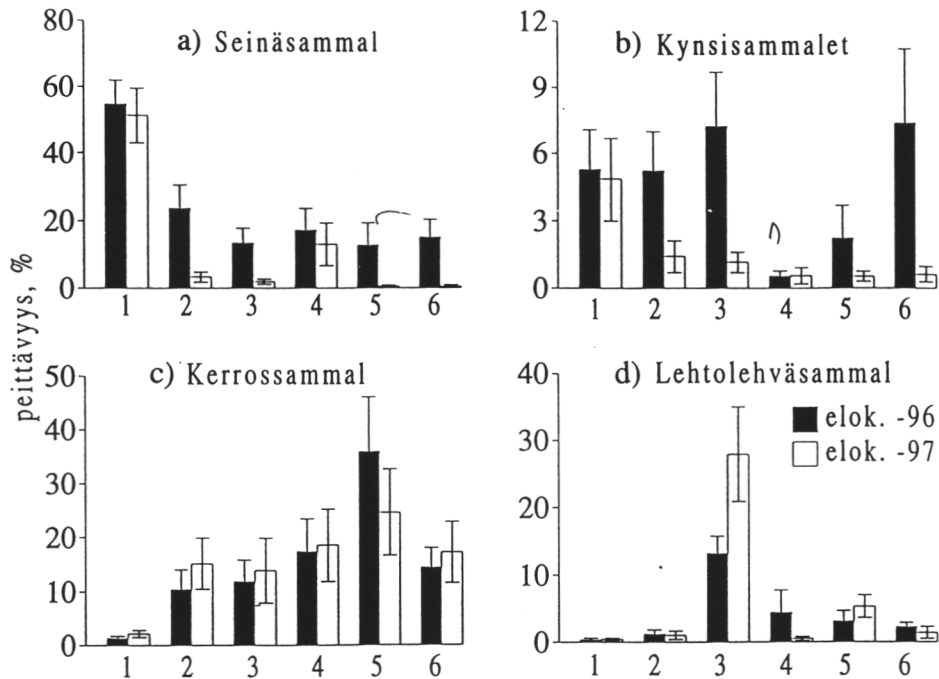
Sadetusimeytyksen kemialliset vaikutukset ilmenivät maaperän ravinteisuuden ja happamuuden muutoksina. Imeytys lisäsi maan nitrifikaatiota (kuva 26) ja kasveille käyttökelpoisten emäskationien määrää (kuvat 4-6). Myös humuskerroksen pH nousi huomattavasti imeytyksen seurauksena (kuva 3). Sadetusveden mukana tuli runsasti ravinteita. Eri kasvilajit reagoivat näihin muutoksiin eri tavoin. Suurin osa lehdoissa kasvavista heinistä, ruohoista ja sammalista viihtyy typpi- ja kalkkipitoisella kasvualustalla ja todennäköisesti sitoo ainakin osan maaperässä syntyneestä tai kasteluveden mukana tulleesta nitraatista uuteen biomassaan. Toisaalta karumpien kasvupaikkojen ja happamammalla maalla elävät metsälajit kärsivät liian kosteuden lisäksi myös pH:n noususta. Märkyiden lisääntyminen muuttaa kasvupaikkaa vähitellen epäedulliseksi myös lehtokasvien menestymiselle.

Sammalet

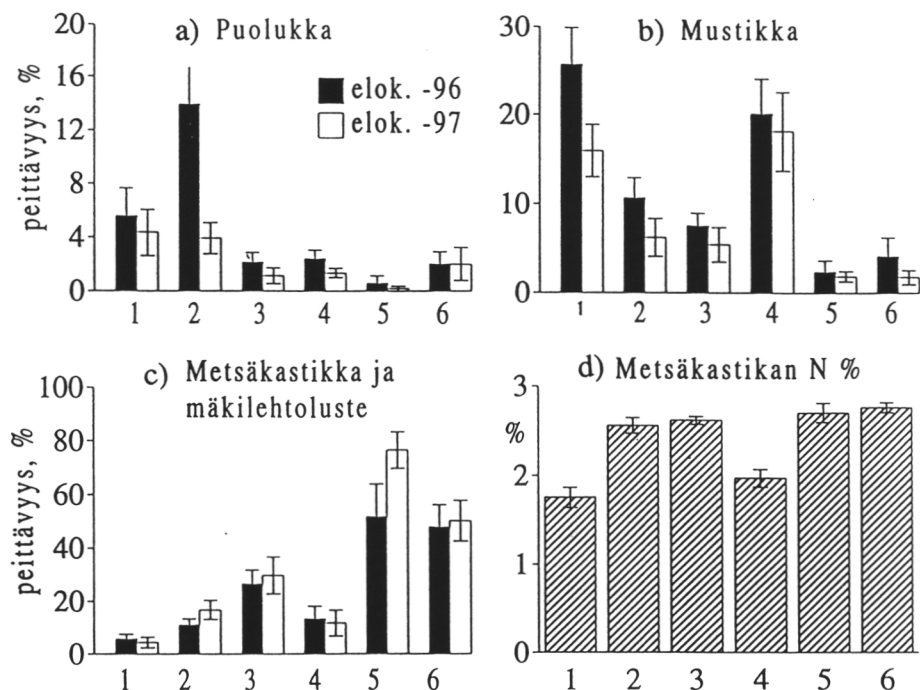
Kangasmetsien yleiset sammallajit seinäsammal (*Pleurozium schrberi*) (kuva 28a), ja kynsisammalet (*Dicranum*- suku) (kuva 28b) kärsivät liiasta märkyydestä ja niiden peittävydet pienenevät jaksolla 1996 - 1997. Vaikka metsäkerrossammalen (*Hylocomium splendens*) peittävyys pieneni vain talvikautisella imeytysalalla (kuva 28c), se oli stressaantuneen näköinen ja uusinta vuosikasvainta lukuunottamatta väriltään ruskea tai kellertävä myös muilla imeytyskoealoilla. Metsäkerrossammalen vähentymiseen näytti vaikuttavan myös metsäkastikan lisääntymisestä johtuva varjostus. Harjun laelle muodostui kasvukautisella jaksotetulla imeytysalalla sopivan kostea kasvu ympäristö lehtolehväsamallelle (*Plagiomnium affine*) (kuva 28d), jonka peittävyys kaksinkertaistui vuosina 1996 - 1997. Sen sijaan isokastesammalen (*Plagiochila asplenoides*) ja suikerosammalien (*Brachythecium* - suku) peittävyyksissä ei ollut selviä muutoksia. Uuden suosammallajin (väkäsammal, *Campylium stellatum*) löytyminen koealalta 2 elokuussa 1997 indikoi olosuhteiden muuttumista märemmiksi. Imeytysaloilla havaittiin vuonna 1996 sammalten pinnalla vaaleaa massaa, joka osoittautui jatkotutkimuksissa järvivedestä peräisin olevaksi leväkasvustoksi sisältäen mm. piilevän kuoria.

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 seurantakesän lopussa v. 1996 puolukalla (*Vaccinium vitis-idaea*) havaittiin kuolleita versoja, lehtien koon epänormaalia suurentumista ja värvikoja. Puolukalla havaittiin myös molempina tutkimusvuosina sienitautia (*Exobasidium* sp., pöhösienet), joka muutti lehdet ja varren turpeiksi ja väriltään vaaleanpunaisiksi. Kahden imeytyskauden jälkeen (1996-97) puolukan peittävyys oli pienentynyt erityisesti kasvukautisella imeytyalalla. Myös mustikan (*V. myrtillus*) peittävyys pieneni seurantajaksolla sekä imeytys- että vertailukoealoilla (kuva 29b). Mustikan versoja oli paleltunut talvella 1996-97 kaikilla koealoilla. Kasteluputkien läheisyydessä tavattiin epänormaalin suuria mustikanversoja. Elokuussa 1997 sekä puolukan että mustikan varsissa havaittiin runsaasti kilpikirvoja.



Kuva 28. Sammalten peittävyysien muutokset. a) Seinäsammalen, b) kynsisammaalien, c) metsäkerrossammalen ja d) lehtolehväsammalen keskimääräinen runsaus elokuussa 1996 ja 1997 arvioituna prosenttipeittävyysinä yhden neliömetrin suuruisilla näyteruuduilla ($n=10-15$ ruutua). Jana = keskiarvon keskiarvo.



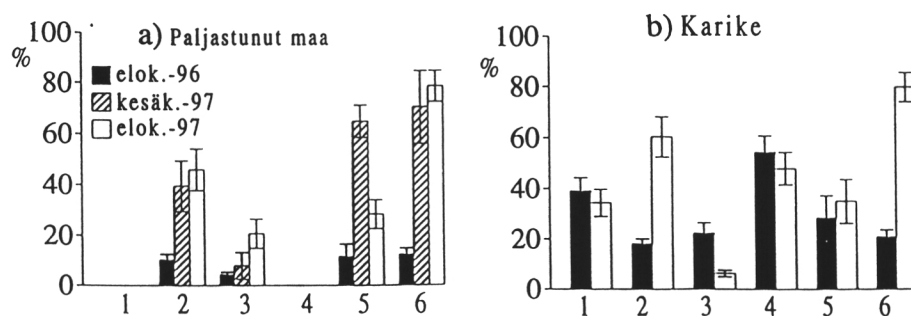
Kuva 29. a) Puolukan, b) mustikan ja c) metsäkastikan ja mäkilehtolusteen keskimääräinen runsaus elokuussa 1996 ja 1997 arvioituna prosenttipeittävyysinä yhden neliömetrin suuruisilla näyteruuduilla ($n=10-15$ ruutua). d) metsäkastikan vihreiden lehtien typpiosuudet (%) 22.8.1997. Jana = keskiarvon keskiarvo.

Heinät ja ruohomaiset kasvit olivat kahden imeytyskauden jälkeen hyväkuntoisen näköisiä. Varsinkin metsäkastikka (*Calamagrostis arundinacea*) oli loppukesällä huomattavan kookas ja voimakkaan vihreän värinen kastelun vaikutusalueella. Metsäkastikka säilyi myös syksyllä pitempään vihreänä imeytys- kuin vertailualoilla. Syynä vihreyteen saattaa olla joko vuosirytmien muuttuminen tai lisääntynyt typen saatavuus. Metsäkastikka ja mäkilehtoluste (*Brachypodium pinnatum*) runsastuivat v. 1996-97 eniten talvikautisella imeytysalalla (kuva 29c), missä myös nitrifikaation ja ravinteisuuden lisääntyminen olivat suurimmat. Metsäkastikan lehtien typpipitoisuudet olivat kaikilla imeytysaloilla tilastollisesti merkitsevästi suuremmat kuin vertailualoilla (kuva 29d). Heinien tiedetään suosivan typenlähteenä nitraattia, mikäli sitä on saatavilla.

Peittävyden muutoksia tulkittaessa on muistettava, että koealojen lähtötilanne kasvilajien runsauden suhteen ei ollut samanlainen. Pidemmällä aikavälillä on kasvuvaikutuksien lisäksi odotettavissa muutoksia kasvien lisääntymisessä, siementen leviämisessä, maassa olevan siemenvaraston koostumuksessa ja siementen itämisessä, joilla voi olla huomattavia vaikutuksia kasvilajien populaatiodynamiikkaan.

Maaperän eroosio ja karikkeen muodostuminen

Sadetuksen fysikaaliset vaikutukset ilmenivät veden pintavalunnan aiheuttamana maa-aineksen paljastumisena eli eroosiona. Maanpinnan liikkuminen häiritsee myös kasvien kiinnittymistä alustansa. Elokuussa 1997 erodoituneen maan osuus oli suurin ympärivuotisesti imeytetyllä alueella ja pienin kasvukautisen imeytyksen koealoilla (kuva 30a). Eroosio lisääntyi kaikilla imeytysaloilla tutkimusjaksolla 1996-1997. Lisääntyminen oli suurinta (yli 50 %-yksikköä) ympärivuotisen ja talvikautisen imeytyksen koealoilla ja pienintä kasvukautisen jaksotetun imeytyksen koealalla (3 %-yksikköä). Eroosio lisääntyi kesän 1997 aikana muilla koealoilla paitsi talvikautisella, missä se väheni 36 %-yksikköä (kuva 30a). Ilmeisesti imeytyksen keskeyttäminen tai jaksottaminen kasvukaudella mahdollistaa, että kasvillisuus ehtii toipua ja pystyy tämän seurauksena sitomaan tehokkaammin paljastunutta maata. Pensaskerros (esim. kuusen ja pihlajan taimet) näytti estävän maa-aineksen liikkumista rinteellä. Eroosion seurauksena kasvien juuria oli paljastunut, mikä voi altistaa niitä epäedullisille sääoloille (esim. pakkasvauriot talvella) ja sienitaudeille. Kuolleen kasviaineksen eli karikkeen määrä lisääntyi edellisvuoteen verrattuna eniten kasvukautisella ja ympärivuotisen imeytyksen koealoilla (kuva 30b). Imeytysalojen karike muodostui pääasiassa kuolleesta sammalesta, heinästä ja havupuiden neulasista.



Kuva 30. a) veden pintavalunnassa paljastuneen maan keskimääräinen peittävyys (%) yhden neliömetrin suuruisilla näyteruuduilla elokuussa 1996, kesäkuussa 1997 ja elokuussa 1997. b) kuolleen kasviaineksen eli karikkeen keskimääräinen runsaus arvioituna prosenttipeittävyysinä yhden neliömetrin suuruisilla näyteruuduilla elokuussa 1996 ja 1997 (n= 10-15 ruutua).

Päätelmät

Lyhytaikaisen seurannan perusteella ei vielä voida ennustaa luotettavasti millaisia kasvillisuusmuutoksia sadetusimeytys aiheuttaa pitkällä aikavälillä. Seuraavat muutossuunnat voitiin havaita jo kahden kasvukauden aikana:

1. Kastelu ei muistuta luonnollista sadetta, sillä vesi tulee liian suurella voimalla ja jakautuu liian pienelle alueelle. Jyrkällä rinteellä maanpinnan eroosio on suurta ja tulee voimistumaan edelleen. Eroosion ehkäisyn kannalta kasvukautinen jaksotettu imeytys on paras vaihtoehto. Pensaskerros ja tiheä heinikko pidättävät maa-ainesta paikoillaan jyrkällä rinteellä.
2. Jo ensimmäisen imeytysvuoden aikana kasvien ulkonäkö ja elinvoimaisuus muuttuivat. Kuivien ja karujen kasvupaikkojen lajit kärsivät sadetuksen aiheuttamasta liiasta kosteudesta ja maaperän ravinteisuuden ja pH:n muutoksista. Varsinkin varvut ja kangasmetsien sammalet stressaantuvat ympäristön muutoksesta.
3. Typen ja kalkin suosijat eli eräät lehdoissa elävät heinät, ruohot ja sammalet näyttivät aluksi viihtyvän imeytysaloilla. Heinien runsastuminen oli suurinta talvi-imeytyksen ja kasvukautisen imeytyksen koealoilla. Metsäkastikka satoi lehtibiomassaan lisääntyneen nitrifikaation tuottamaa typpeä kaikilla imeytysaloilla.
4. Lehtokasvillisuudessa tapahtuneiden muutoksien perusteella on vaikea tehdä yleistyksiä karummille kasvupaikoille. Ahveniston harjun tulokset antavat kuitenkin aihetta epäillä, että karu metsäkasvillisuus kärsisi liiasta vedestä enemmän kuin rehevä lehtokasvillisuus. Koska karummilla kasvupaikoilla on niukasti nopeakasvuisia heiniä ja ruohoja, niillä ei ole yhtä hyvää kapasiteettia ylimääräisen typen sitomiseen aluskasvillisuuteen kuin rehevämmillä kasvupaikoilla.

Kuusen ja männyn sädekasvu

Toisin kuin monet eläinlajit, puut kasvavat käytännössä koko elinaikansa. Puu muodostaa vuosittain yhtenäisen vaipan uutta puuainesta puun rungon ympärille. Kasvunopeuteen vaikuttavat monet tekijät: ilmasto, puun kilpailasema metsikössä, puun ikä sekä erilaiset ukoiset häiriöt kuten kasvitaudit, tuhohyönteiset, metsäpalot ja ilmansaasteet. Näistä tekijöistä johtuen puun kasvu vaihtelee vuodesta toiseen varsin voimakkaasti; Etelä-Suomen oloissa normaali vaihteluväli on $\pm 30\%$ keskiarvon ympärillä

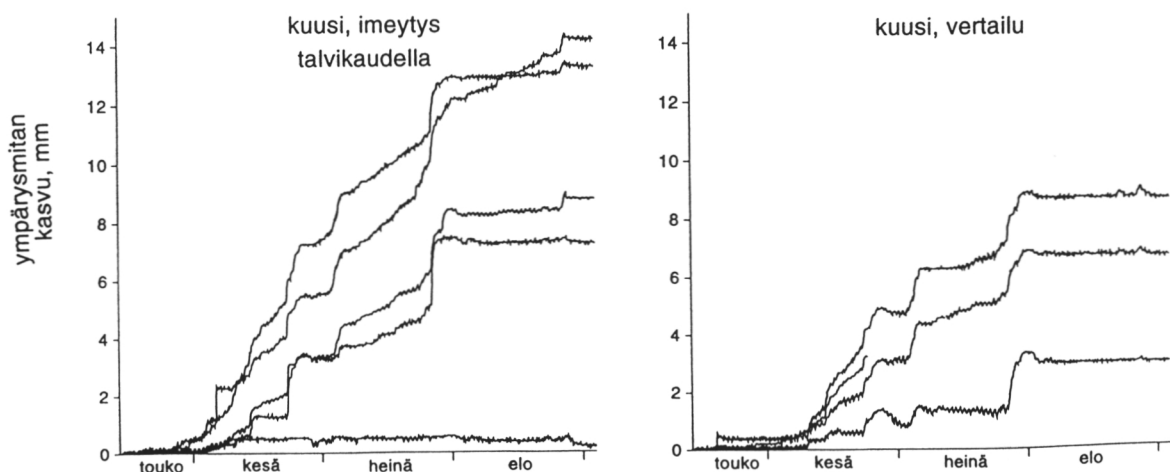
Kasvu on myös yhteydessä puun terveydentilaan. Havupuilla hidastunut kasvu kertoo neulaston ja juuriston toimintojen heikentymisestä. Tämä voi johtua epäsuotuisasta ilmastosta, jolloin muutos on palautuva. Epätavallisen voimakas kasvun heikkeneminen on toisaalta osoitus vakavammista vaurioista. Vertaamalla koetilanteessa puiden kasvua kahdella koealalla (käsitelty / kontrolli) voidaan tehdä päätelmiä käsittelyn vaikutuksista puiden elinvoimaisuuteen.

Kuusikoealat

Kasvua seurattiin pannoilla kahdella kuusivaltaisella koealalla: talvikautinen imeytys (ka 5) ja sen vieressä sijaitseva vertailuala (ka 4). Talvikaudella imeytetyn koealan kuusten kasvurytmeissä oli melkoisia keskinäisiä eroja. Kaksi viidestä koepuusta kasvoi selvästi nopeammin kuin yksikään vertailualan kuusista. Mielenkiintoista on, että nämä kaksi puuta altistuivat talvikaudella hyvin runsaalle kastelulle, joka ei siis näytä toistaiseksi ainakaan heikentäneen niiden kuntoa.

Nopea kasvu ei varmaankaan liity lisääntyneeseen vedensaantiin, sillä talvikautinen kastelu tuskin kovin merkittävästi lisää metsämaan pintakerrosten vesipitoisuutta seuraavan kasvukauden aikana. Sen sijaan järviveden sisältämät runsaat typpimäärät saattavat olla merkittävä kasvuun vaikuttava tekijä. Kasteluveden mukana metsämaahan kulkeutuvat typpimäärät ovat hyvin suuria, vaikkakin vain pieni osa tuestä sitoutuu niihin maakerrokseen, joissa puiden juuret sijaitsevat. Typpiyhdisteet ovat Suomessa käytettävien metsänlannoitteiden tärkein ainesosa ja käytännön metsänlannoitusten kerta-annokset sisältävät vain murto-osan siitä typpimäärästä, joka kulkeutuu metsämaan läpi kasteluveden mukana. Mineraalityypen nettomuodostus ja nitrifikaation lisäys sadetetuilla koealoilla vaikuttaa samansuuntaisesti lisäten puiden käytettävissä olevan typen määrää ja siten kasvua kiihdyttäen.

Kahden muun talvikautisen imeytyksen vaikutuksille altistuneen kuusen kehitys ei poikennut mainittavasti vertailualueen kuusista. Yksi talvikaudella imeytetyn koealan kuusista ei sen sijaan ole käytännössä kasvanut lainkaan. Puun neulasto ei ole poikkeuksellisen heikkokuntoinen; ilmiselvää syytä vähäiselle kasvulle ei ole. Ylhäällä, noin 5-6 m:n korkeudella puussa on kuitenkin runkovaurio, joka viittaa siihen että puussa on lahoa. Kasvupantaseurannan päättyessä syksyllä 1998 koepuut kairataan; tässä yhteydessä voidaan myös varmistaa onko kyse laajasta lahoviasta. Jos näin on, kyse on ennen imeytyksen alkua syntyneestä vauriosta, sillä lahottajasieni etenee kuusen rungossa varsin hitaasti; lahon leviäminen laajalle vaatii monia vuosia. Heikkokasvuisuus tuskin johtuu kastelun vaikutuksesta, sillä puu ei ole altistunut erityisen runsaalle sadetukselle. Lähin kasteluputki sijaitsee sen alapuolella rinteessä; sen vaikutus puun juuristoon on tuskin ollut kovin voimakas.



Kuva 31. Kuusten ympärösmittan kehitys kasvukaudella 1997 a) talvikautisella imeytysalalla ja b) vertailualalla (ka 4). Käyrät edustavat yksittäisiä koepuita.

Kahden nopeakasvuosimman kuusen rungon ympäröymän muutokset alkoivat huomattavan aikaisin keväällä, toukokuun puolella. Tämä voisi olla merkinä kastelun vaikutuksista puun elintoimintojen rytmittymiseen. Nämä kaksi puuta ovat myös vesiputken alapuolella ja niiden juuristo on altistunut voimakkaasti kastelulle. Toisaalta muiden talvikautiselle kastelulle altistuneiden kuusten ympäröymän muutokset ovat käynnistyneet kesäkuun alussa, siis samaan aikaan kuin kontrollialan kuusilla.

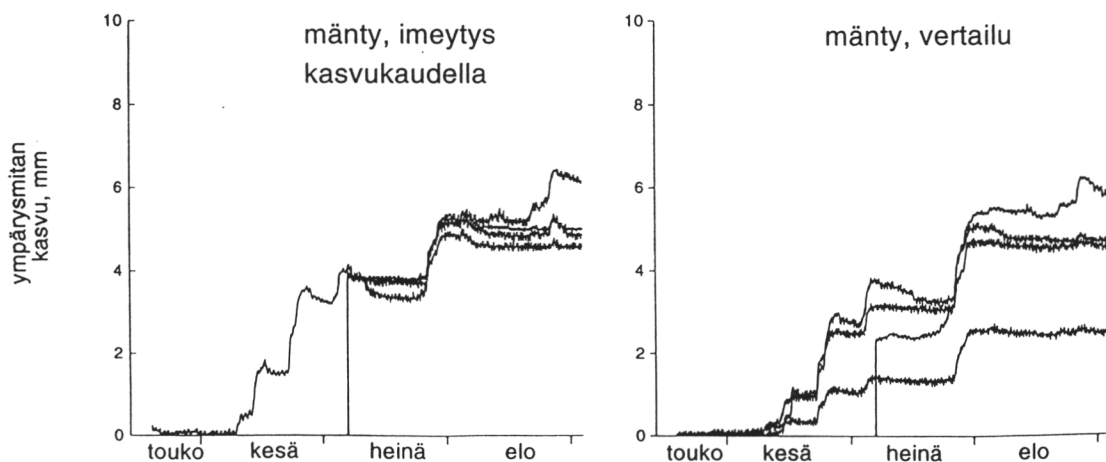
Kuusten ympäröymän kasvu näyttää päättyneen heinä-elokuun vaihteessa; sateiseen jaksoon (23-30.7) liittyvän voimakkaan turpoamisen jälkeen. Erot sadetun ja vertailualan puiden kasvun päätymisessä ovat vähäisiä.

Sadettua kuusikoealaa kasteltiin vain talvikaudella. Siksikin molempien alojen puut ovat reagoineet hyvin selvästi kesän sateisiin. Erityisesti loppukesä 1997 oli lämmin ja sadepäiviä oli varsin vähän. Esimerkiksi heinäkuun lopulla oli kuitenkin usean peräkkäisen sadepäivän jakso (23-30.7), jonka vaikutus näkyy hyvin selvästi äkillisenä lisäyksenä puiden ympäröymämitoissa. Muutamia päiviä sateiden päättymisen jälkeen runkojen ympäröymät ovat jopa hieman pienentyneet — puut ovat haihduttaneet osan imemästään runsaasta vedestä.

Mäntykoealat

Kasvupantoja oli sijoitettu lisäksi mäntyvaltaiselle koealalle 2, jota imeytettiin kasvukauden aikana jatkuvasti sekä sen vieressä sijaitsevalle vertailualalle (ka 1). Alkukesästä tehty ilkivalta häytti mittauksia: täydellinen aikasarja pystyttiin tuottamaan vain yhden sadetun koealan männystä ja lisäksi kolmesta vertailualan männystä. Kuvissa 32 a) ja b) on lisäksi esitetty tuloksia niistä puista, joiden kasvupannat tuottivat tietoa kesä-heinäkuun vaihteesta lähtien. Vertailun helpottamiseksi näiden puiden kasvuaikasarjat on merkitty alkamaan kohdasta, joka vastaa muiden saman koealan puiden kehitystä heinäkuun alkuaan mennessä.

Erot imeytys- ja vertailualan mäntyjen kasvussa ovat tämän aineiston perusteella varsin vähäisiä. Valtaosalla puita ympäröymän kasvu näyttää olleen samaa suuruusluokkaa. Poikkeuksena on yksi vertailualan männystä, joka on kasvanut selkeästi muita heikommin. Myös tässä puuyksilössä havaittiin merkkejä lahoviasta; asia voidaan kuitenkin varmistaa varmistaa vasta syksyllä 1998 otettavista kairausnäytteistä.



Kuva 32. Mäntyjen ympäröymän kehitys kasvukaudella 1997 a) kasvukautisella imeytysalalla (ka 2) ja b) vertailualalla (ka 1). Käyrät edustavat yksittäisiä koeputia.

Niillä puilla joiden osalta on käytettävissä täydellinen aikasarja, kasvun alkaminen on ajoittunut kesäkuun alkupuolelle. Ajalliset erot imeytetyn alan ja vertailualan välillä ovat vähäisiä. Kuusien tapaan myös mäntyjen ympärysmitan kasvu näyttää päättyneen heinäkuun lopulle sattuneen sateisen jakson jälkeen. Männyillä ei siis havaittu sadetuskäsittelyyn liittyviä eroja kasvurytmissä.

Mielenkiintoista on, että myös kasvukauden aikana imeytetyn koeruudun puut männyt ovat reagoineet voimakkaasti kuivaa kautta seuranneisiin sadejaksoihin (erityisesti 22-26.6. ja 23-30.7). Tämä selittyy sillä, että veden haihdunta puun neulasista riippuu merkittävästi ilman vesipitoisuudesta. Sadesäällä ilman suhteellinen kosteus on suuri ja haihdunta siksi vähäistä; seurauksena on veden kertyminen puun runkoon. Mahdollinen lisäselitys on, että sadetettu vesi kohdistuu koealalle epätasaisesti, jolloin osa puiden juuristoista altistuu kastelusta huolimatta kuivuudelle.

Kuusen ja männyn ravinnetila

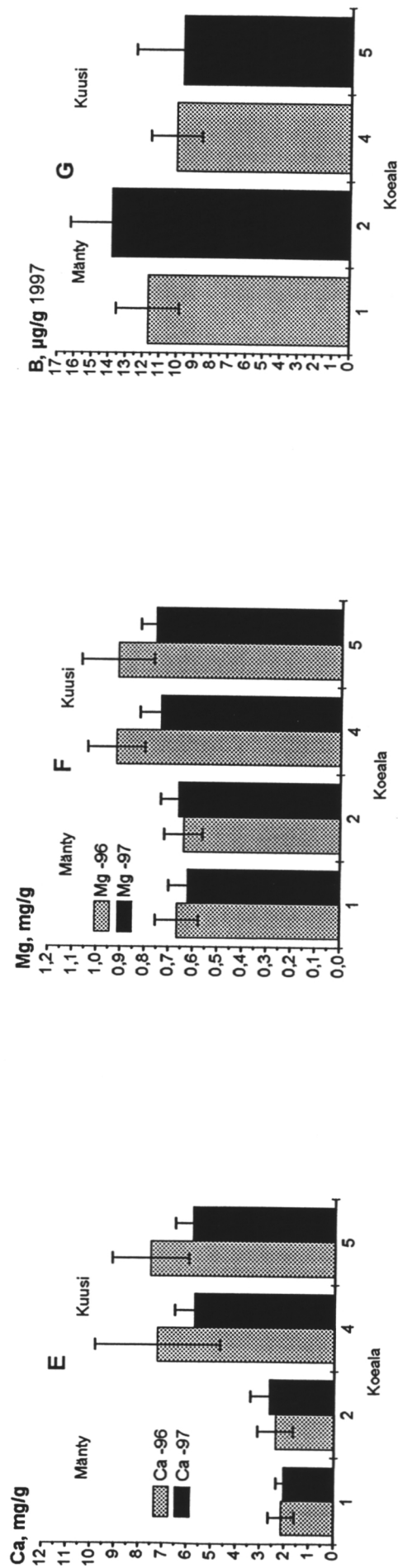
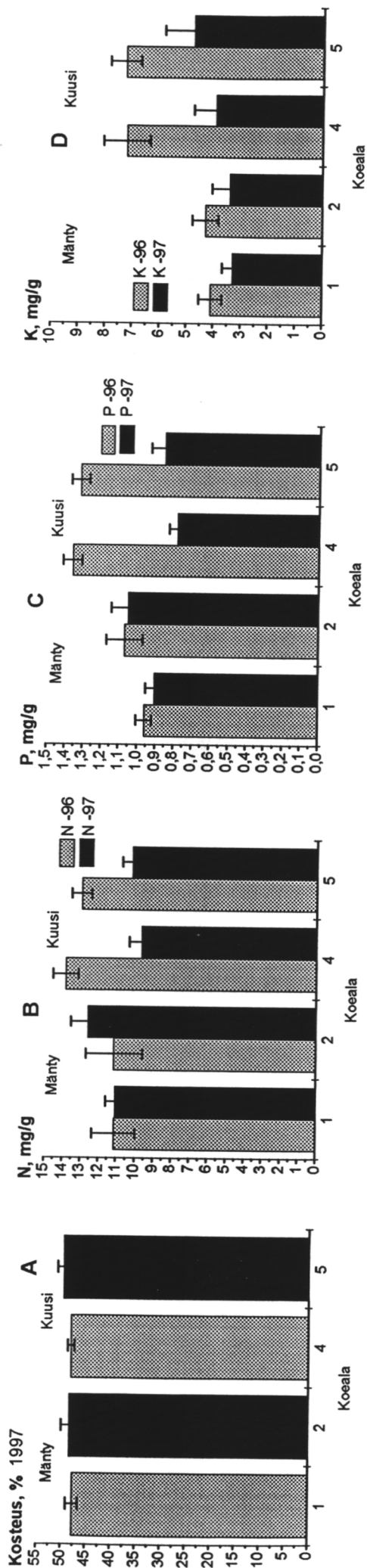
Kasvukautinen, jatkuva imeytys

Yhden kasvukauden mittaisen, jatkuvan veden imeytyksen jälkeen männyn yksivuotiaiden neulasten vesipitoisuus oli lievästi korkeampi imeytyskoealalla 2 (kasvukautinen jatkuva imeytys) kuin sen vertailualalla 1, mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä (Kuva 33a)

Lähtötilanteessa vuonna 1996 koealat 1 ja 2 eivät eronneet neulasten ravinnetilan osalta merkittävästi toisistaan. Yksivuotiaiden männyn neulasten typpipitoisuus (N) oli molemmilla koealoilla ravinteikkaasta maaperästä huolimatta suhteellisen alhainen ja puusto kärsi todennäköisesti lievistä typen puutteesta (Kuva 33b).

Yhden kasvukauden mittaisen veden imeytyksen jälkeen yksivuotiaiden männyn neulasten typpipitoisuus oli tilastollisesti merkitsevästi ($p < 0,001$) korkeampi koealalla 2 kuin sen vertailukoealalla 1 (Kuva 33b). Vertailukoealalla näytteenottovuosien välillä ei havaittu merkittävää eroa, mutta imeytyskoealalla neulasten typpipitoisuus oli merkitsevästi ($p < 0,001$) korkeampi vuonna 1997 kuin vuonna 1996. Koealan 1 männyillä saattoi olla lievä typenpuutostila, mutta koealalla 2 typpipitoisuus oli kohonnut tyydyttävälle tasolle (Fober 1976, Jukka 1988, Hüttl 1991, Mälkönen 1991, Helmisaari 1992, Kolari 1994).

Lähtötilanteessa vuonna 1996 yksivuotiaiden männyn neulasten fosfori- (P) ja kalium- (K) pitoisuudet olivat suhteellisen alhaisia ja puustossa saattoi esiintyä lievää fosforin puutosta (Kuva 33c ja 33d). Neulasten fosforipitoisuus oli yhden kasvukauden pituisen imeytyksen jälkeen merkitsevästi ($p < 0,05$) korkeampi koealalla 2 kuin vertailukoealalla 1 (Kuva 33c). Fosforipitoisuudet olivat kuitenkin lievästi alhaisemmat molemmilla koealoilla vuonna 1997 kuin vuonna 1996, mutta erot eivät olleet merkitseviä. Neulasten fosforin pitoisuudet olivat alhaisia ja männyissä saattoi esiintyä fosforin puutosta. Neulasten kaliumpitoisuus oli koealoilla 1 ja 2 samaa luokkaa vuonna 1997 (33d). Toisaalta kaliumpitoisuus oli imeytyskoealalla (2) suuntaa-antavasti merkitsevästi alhaisempi vuonna 1997 kuin vuonna 1996. Kaliumin pitoisuudet olivat melko alhaiset, lähellä puutosrajaa.



Kuva 33. Yksivuotiaiden männyn ja kuusen neulasten vesipitoisuus (A) sekä typpi- (B), fosfori- (C), kalium- (D), kalsium- (E), magnesium- (F) ja booripitoisuus (G) tausta-analyyseissä 5.6.1996 sekä yhden kasvukautisen, jatkuvan imeytysjakson (koeala 2) ja kahden talvikautisen imeytysjakson (koeala 5) jälkeen 3.6.1997.

Alkutilanteessa neulasten kalsiumpitoisuudet (Ca) olivat tyydyttävällä tasolla, mutta magnesiumipitoisuudet (Mg) olivat suhteellisen alhaisia ja puustossa saattoi olla lievää magnesiumin puutosta (Kuva 33e ja 33f). Kalsiumpitoisuus oli imeytyksen jälkeen koealalla 2 jonkin verran korkeampi kuin sen vertailukoealalla 1, mutta ero ei ollut merkitsevää. Näytteenottovuosienkaan välillä ei havaittu merkittäviä eroja (Kuva 33e). Neulasten kalsiumin pitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla. Samoin neulasten magnesiumipitoisuus oli kohonnut lievästi imeytyksen jälkeen koealalla 2 vertailukoealaan nähden, mutta ero ei ollut merkitsevää, eikä vuosien 1996 ja 1997 välillä todettu eroja (Kuva 33f). Magnesiumin pitoisuudet olivat suhteellisen alhaiset ja männyissä saattoi olla magnesiumin puutosta (Fober 1976, Jukka 1988, Hüttl 1991, Mälkönen 1991, Helmisaari 1992, Kolari 1994).

Mangaanipitoisuutta lukuunottamatta männyn neulasten hivenaineiden pitoisuudet eivät eronneet merkittävästi koealojen välillä vuonna 1996. Mangaanipitoisuus oli jonkin verran korkeampi koealalla 2 kuin koealalla 1, mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevää. Neulasten rauta-, mangaani-, sinkki- ja molybdeenipitoisuudet olivat vähintään tyydyttävällä tasolla. Sen sijaan kuparin pitoisuus oli männyissä melko alhainen, mutta puutostilaa ei todennäköisesti esiintynyt.

Yhden kasvukauden mittaisen, jatkuvan veden imeytyksen jälkeen männyn neulasten boori- ja mangaanipitoisuudet olivat imeytyskoealalla 2 korkeammat kuin vertailukoealalla 1 (Kuva 32g, boori). Boorin suhteen ero oli merkitsevää ($p < 0,05$). Koealojen 1 ja 2 neulasten rauta- ja alumiinipitoisuudet eivät eronneet merkittävästi toisistaan vuonna 1997, eikä näytteenottovuosien välillä ollut suuria eroja. Samoin koealojen välillä ei ollut vuonna 1997 merkittäviä eroja neulasten molybdeeni- ja kuparipitoisuuksien suhteen, mutta vuosien väliset erot olivat merkitseviä ($p < 0,05$). Neulasten molybdeenipitoisuus laski ja kuparipitoisuus puolestaan kohosi molemmilla koealoilla vuodesta 1996 vuoteen 1997 mentäessä (Fober 1976, Jukka 1988, Hüttl 1991, Mälkönen 1991, Helmisaari 1992, Kolari 1994).

Talvikautinen imeytys

Kahden talvikautisen veden imeytysjakson jälkeen yksivuotiaiden kuusen neulasten vesipitoisuus oli lievästi korkeampi imeytyskoealalla 5 kuin sen vertailualalla 4, mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevää (Kuva 33a).

Lähtötilanteessa vuonna 1996 puiden ravinnetila oli koealoilla 4 ja 5 samankaltainen eikä merkittäviä eroja havaittu. Yksivuotiaiden kuusen neulasten typpipitoisuus oli tyydyttävä eikä puutostilaa todennäköisesti esiintynyt. Neulasten typpipitoisuus oli lievästi korkeampi vertailualalla (4) kuin imeytyskoealalla (5), mutta ero ei ollut merkitsevää (Kuva 33b). Kahden talvikauden imeytysjakson jälkeen yksivuotiaiden kuusen neulasten typpipitoisuus oli imeytyskoealalla 5 kohonnut lievästi korkeammaksi kuin vertailukoealalla 4, mutta ero ei ollut merkitsevää (Kuva 33b). Toisaalta neulasten typpitaso oli merkitsevästi ($p < 0,001$) alhaisempi vuonna 1997 kuin vuonna 1996 molemmilla koealoilla (Kuva 33b). Analyysitulokinnan mukaan kuusissa saattoi esiintyä lievää typen puutosta (Fober 1976, Jukka 1988, Hüttl 1991, Mälkönen 1991, Helmisaari 1992, Kolari 1994).

Alkutilanteessa vuonna 1996 yksivuotiaiden neulasten fosforipitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla eivätkä koealat eronneet toisistaan (Kuva 33c). Imeytyksen jälkeen neulasten fosforipitoisuus oli koealalla 5 jonkin verran korkeampi kuin koealalla 4, mutta ero ei ollut merkitsevää. Sen sijaan fosforipitoisuudet olivat merkitsevästi ($p < 0,01$) alhaisemmat vuonna

1997 kuin vuonna 1996 (Kuva 33c). Kuusissa saattoi olla fosforin puutosta. Lähtötilanteessa neulasten kaliumpitoisuudet olivat korkeat molemmilla koealoilla (Kuva 33d). Imeytyksen jälkeen kaliumpitoisuus oli lievästi korkeampi imeytyskoealalla (5) kuin sen vertailukoealalla (4), mutta ero ei ollut merkitsevä (Kuva 33d).

Yksivuotiaiden neulasten kalsiumpitoisuudet olivat korkeat ja magnesiumpitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla koealoilla 4 ja 5 vuonna 1996 (Kuva 33e ja 33f). Imeytyksen jälkeen kalsium- ja magnesiumpitoisuuksissa ei ollut eroja koealojen 4 ja 5 välillä (Kuva 33e ja 33f). Toisaalta K-, Ca- ja Mg-pitoisuudet olivat merkitsevästi ($p < 0,05$) alhaisemmat vuonna 1997 kuin vuonna 1996. Taso oli tyydyttävä kaliumin ja kalsiumin osalta, mutta magnesiumin pitoisuudet olivat melko alhaiset (Fober 1976, Jukka 1988, Hüttl 1991, Mälkönen 1991, Helmisaari 1992, Kolari 1994).

Lähtötilanteessa vuonna 1996 kuusen neulasten mangaanipitoisuus oli jonkin verran korkeampi koealalla 4 kuin koealalla 5. Kuparipitoisuudessa tilanne oli päinvastainen. Erot eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkitseviä. Neulasten mangaani-, rauta-, sinkki-, kupari- ja molybdeenipitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla. Kahden talvikauden imeytysjakson jälkeen kuusen neulasten boori- ja mangaanipitoisuudet olivat lievästi korkeammat vertailukoealalla 4 kuin imeytyskoealalla 5, mutta erot eivät olleet merkitseviä (Kuva 32g, boori). Neulasten rauta-, alumiini- ja kuparipitoisuudet olivat koealalla 5 lievästi korkeammat kuin koealalla 4 vuonna 1997, mutta erot eivät olleet merkitseviä. Rauta- ja alumiinipitoisuudet olivat jonkin verran alhaisemmat vuonna 1997 kuin vuonna 1996. Koealojen välillä ei ollut merkittäviä eroja neulasten molybdeenipitoisuuksien suhteen vuonna 1997, mutta pitoisuudet olivat merkitsevästi ($p < 0,05$) alhaisempia kuin vuonna 1996.

Päätelmät

Vuoden 1996 taustamittauksen mukaan puiden ravinnetila oli lähtötilanteessa tyydyttävä eikä todella merkittäviä ravinnehäiriöitä puustossa esiintynyt (Jukka 1988, Hüttl 1991, Mälkönen 1991, Helmisaari 1992).

Yhden kasvukauden mittainen, jatkuva (5 kk) veden imeytys kohotti puuston (männyn) neulasten typpi- ja fosforipitoisuuksia merkittävästi imeytyskoealalla. Vertailukoealalla ei vastaavaa vaihtelua havaittu, joten veden imeytys oli todennäköisimmin syynä muutokseen, jota voidaan pitää puiden kannalta lähinnä positiivisena. Vuonna 1996 tehdyn taustamittauksen mukaan männyissä saattoi olla luonnontilassa lievää typen- ja fosforinpuutosta (Jukka 1988, Hüttl 1991, Mälkönen 1991, Helmisaari 1992).

Muiden pääravinteiden osalta tilastollisesti merkitseviä muutoksia ei havaittu, mutta toisaalta puiden kannalta tärkeiden emäskationien (Ca ja Mg) pitoisuudet olivat imeytyskoealalla lievästi korkeammat kuin vertailukoealalla. Lievä puutostila magnesiumin suhteen männyissä jatkui vuonna 1997, eikä imeytyksellä liene ollut siihen vaikutusta. Toisaalta neulasten kaliumpitoisuus aleni imeytyskoealalla vuonna 1997 vuoteen 1996 verrattuna, mutta samansuuntainen tulos vertailukoealalla viittaa siihen, että imeytys ei ole ollut ratkaisevassa asemassa muutokseen. Pääravinteissa ilmenneiden muutosten lisäksi imeytys kohotti männyn neulasten booripitoisuutta. Muiden hivenaineiden pitoisuudet eivät muuttuneet merkittävästi.

Vuonna 1996 tehdyn taustaanalyysin mukaan talvikautinen veden imeytys (kesto noin 5,5 kk) talvella 1995-1996 ei muuttanut olennaisesti kuusten ravinnetilaa vertailualaan nähden.

Kahden talvikauden (5,5 ja 6,5 kk) kestänyt veden imeytys sen sijaan saattoi kohottaa neulasten typpi-, kalium- ja fosforipitoisuutta jonkin verran. Hivenravinteiden kohdalla merkittäviä eroja ei havaittu. Talvikautisen imeytyksen vaikutus puuston ravinnetilaan oli siten tässä vaiheessa vähäisempi kuin kasvukauden aikana tapahtuvan jatkuvan imeytyksen vaikutus.

Syitä eroihin kesä- ja talvikautisen imeytyksen vaikutuksissa puuston ravinnetilaan saattaa olla useita. Keskeisimpänä on todennäköisesti toisen imeytysvaiheen ajoittuminen kasvukauteen ja toisen pääasiassa puiden lepovaiheeseen. Tulosten tulkintaa hankaloittaa se, että puulaji ei ollut sama eri käsittelyissä. Mänty ja kuusi eroavat toisistaan muun muassa juuristosityvyyden ja ravinne dynamiikan suhteen sekä todennäköisesti myös sopeutumisessa maaperän vesipitoisuuden vaihteluihin. Männyn juuristo ulottuu yleensä syvemmälle kuin kuusen, joten männyt voivat ottaa ravinteita tehokkaammin vajovesivyöhykkeestä kuin kuusi. Tämän eron merkitys saattaa kuitenkin pienentyä, jos imeytys kestää usean vuoden ajan. Taustanalyysin mukaan männyn ravinnetila oli jonkin verran heikompi lähtötilanteessa kuin kuusen, minkä vuoksi männyn reaktio ravinnelisäyksiin saattaa olla voimakkaampi kuin kuusen reaktio. Jokatapauksessa puut kykenevät hyödyntämään imeytyksen maaperässä aiheuttamaa ravinnelisäystä tehokkaammin kasvukauden aikana kuin lepovaiheessa.

Usean neulasravinteiden pitoisuus oli sekä vertailu- että imeytyskoealalla alhaisempi vuoden 1997 näytteenotossa kuin vuoden 1996 näytteenotossa. Sadetus imeytys ei todennäköisesti ollut syynä muutoksiin vaan ilmeisesti säätekijät. Vuonna 1996 kasvukauden lämpösumma ja kuukauden keskilämpötilat (elokuuta lukuunottamatta) olivat normaalia alhaisemmat.

Tutkimuksen tässä vaiheessa voitaneen todeta, että yhden kasvukauden kestävä, jatkuva veden imeytys ja talvikautinen, jatkuva veden imeytys (kesto kaksi talvikautta) eivät todennäköisesti haittaa puiden ravinnetaloutta, vaan niillä saattaa olla positiivisiakin puustovaikutuksia. Siten puusto voi vähentää muun muassa typen huuhtoumisriskiä imeytysalueelta. Toisaalta imeytysveden mukanaan tuoma suuri kalsiumin ja muiden emäskationien määrä ei ainakaan tässä vaiheessa ole lisännyt merkittävästi vastaavia ravinnepitoisuuksia puissa. Tässä yhteydessä on syytä huomioda, että imeytyskokeessa käytetty alue on pieni, jonka vuoksi imeytysalueella kasvavien puiden juuret eivät ehkä ole kokonaisuudessaan imeytyksen vaikutuspiirissä vaan kasvavat myös luonnontilaisessa maaperässä.

Tutkimuksen loppuvaiheessa tulee kiinnittää huomiota veden imeytyksen pitkäaikaisvaikutuksiin puuston ravinnetilassa. Neulastutkimuksella tulisi selvittää typpitaloudessa havaitun muutoksen kehitystä männyllä ja sen mahdollista voimistumista kuusella. Samoin tulee seurata alkaako imeytysveden mukana tulevien emäskationien suuri määrä heijastua puiden ravinnepitoisuudessa. Voimakas kalsiumpitoisuuden kasvu voi vaikuttaa haitallisesti muun muassa puiden boorin saantiin. Mahdollisimman pitkän seurantajakson saavuttamiseksi neulasnäytteet tulisi ottaa vuonna 1998 sekä alkukesällä että syksyllä tutkimuksen päättyessä.

Puuston ja aluskasvillisuuden hienojuuristo

Metsäpuiden juuristo muodostuu rakenteeltaan ja toiminnaltaan erilaisista juurista: monivuotisista pitkistä puutuneista paksujuurista sekä lyhytikäisistä hienojuurista. Hienojuuret ovat alle 2 mm läpimittaisia juuria. Ohuimmat, alle millimetrin paksuiset

hienojuurit ovat havupuillamme lähes aina sienijuurellisia eli mykorritsaalisia, ja muodostavat jopa 90 % juurten kokonaispituudesta. Puiden ravinteiden ja veden otto tapahtuu pääasiassa sienijuurellisten juurenkärkien kautta. Hienojuurten veden- ja ravinteidenottotehokkuus määrää paljolti puuston kasvua. Metsämaan ympäristötekijöistä hienojuurten kasvuun ja ravinteiden ottoon vaikuttaa maan lämpötila, kosteus, ravinteisuus, ilmatila ja tiiviys. Hienojuurit uusiutuvat jatkuvasti. Yksittäisen hienojuurten elinikä vaihtelee muutamista viikoista muutamaan vuoteen. Juurten kasvu, kuoleminen ja hajoaminen ovat tärkeä osa hiilen ja ravinteiden kiertoa metsäekosysteemeissä (Helmisaari 1995). Hienojuurten nopean uusiutumisen vuoksi suuri osa metsämaan orgaanisesta aineesta on peräisin kuolleista ja hajonneista hienojuurista.

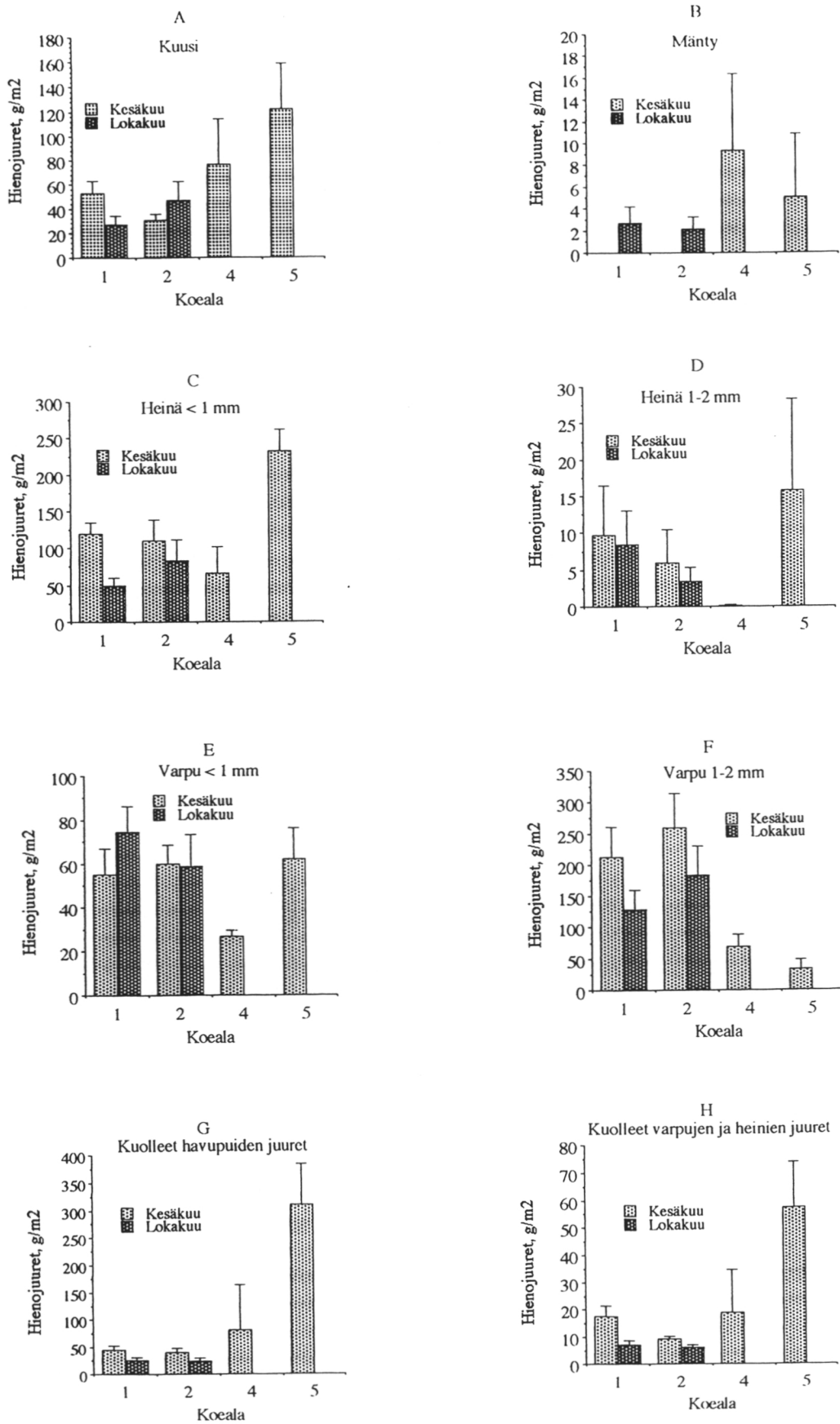
Veden imeytys voi olla haitallista hienojuurille, mikäli vesi seisoo, ja maan ilmatila kyllästyy vedellä. Juuret tarvitsevat happea elintoimintojensa ylläpitämiseksi. Suomalaisissa metsämaissa ilmatila voi olla riittämätön, jos maalaji on savi- tai hiesuvaltainen, ja varsinkin jos pohjavesipinta jostakin 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.

Talvikautisen imeytysalan (ka 5) humuskerroksessa oli kesäkuussa 1996 imeytyksen päätyttyä enemmän sekä kuusen eläviä (Kuva 34 a) että kuolleita (Kuva 34g) hienojuuria kuin vertailualalla (ka 4), mutta erot eivät olleet merkitseviä. Sensijaan heinien eläviä hienojuuria oli merkitsevästi ($p < 0,05$) enemmän talvikautisella imeytysalalla kuin vertailualalla (Kuvat 34 c ja d). Tulos on yhdenmukainen aluskasvillisuuden peittävyystulosten kanssa.

Kasvukautisen imeytyksen vertailualan (ka 1) kuusten elävät hienojuurit vähenivät ensimmäisenä imeytyskesänä kesäkuusta lokakuulle, mutta imeytysalan (ka 2) kuusten hienojuurit lisääntyivät imeytysjakson aikana, ei kuitenkaan merkitsevästi (Kuva 34a). Havupuiden kuolleiden hienojuurten määrä väheni hieman sekä vertailualalla että kasvukautisella imeytysalalla kesäkuusta lokakuulle (Kuva 34g). Elävien hienojuurten suhde kuolleisiin oli suurempi kasvukautisella imeytysalalla imeytyksen jälkeen, mutta vertailualalla se ei juuri muuttunut kasvukauden aikana. Koealoilla 1 ja 2 puusto on mäntyvaltaista. Kuusen hienojuurten suuri määrä humuskerroksessa mäntyyn verrattuna johtuu todennäköisesti kuusen hienojuurten pinnallisemmasta sijainnista. Kuusen hienojuurit keskittyvät humuskerrokseen, mutta männyn hienojuuria on eniten kivennäismaan yläosassa (Makkonen ja Helmisaari 1997, Helmisaari ja Hallbäcken 1997). Mäntyjen hienojuurten määrissä ei ollut merkitseviä imeytyksestä johtuvia eroja (Kuva 34b).

Heinien (Kuvat 34 c ja d) ja varpujen (Kuvat 34 e ja f) hienojuurten määrissä (läpimitta < 1 mm) ei ollut merkitseviä eroja imeytysalalla eri ajankohtina. Heinien hienojuurten määrä väheni vähemmän kasvukauden aikana imeytysalalla kuin vertailualalla. Varpujen hienojuurten määrä puolestaan lisääntyi kasvukauden aikana vertailualalla, mutta ei imeytysalalla. Tulokset ovat yhdenmukaisia aluskasvillisuuden peittävyystulosten kanssa, joiden mukaan heinät hyötyivät ja varvut kärsivät imeytyksestä.

Yhteenvedon voidaan todeta, että ensimmäisen tutkimusvuoden 1996 hienojuuritulokset osoittavat, että sadetusimeytys ei aiheuttanut merkittäviä muutoksia havupuiden elävien tai kuolleiden hienojuurten määriin. Kasvukautisen imeytysalan tulokset viittasivat parantuneeseen kuusen hienojuurten kasvuun.



Kuva 34. a) Kuusen (läpimitta < 1 mm), b) männyn (läpimitta < 1 mm), c) heinien (läpimitta < 1 mm), d) heinien (läpimitta 1-2 mm), e) varpujen (läpimitta < 1 mm), f) varpujen (läpimitta 1-2 mm) hienojuuribiomassa sekä g) havupuiden ja h) varpujen ja heinien kuolleet hienojuurit humuskerroksessa kesä- ja lokakuussa 1996 Ahveniston harjun koaloilla, koalat 4 ja 5 näytteenotto vain kesäkuussa. Kuvassa 15 näytteen keskiarvo ja keskiarvon keskivirhe.

LOPPUPÄÄTELMÄT

Imeytyksen aiheuttamat muutokset

Kahden ensimmäisen tutkimusvuoden tulokset osoittivat, että pintaveden imeytyksellä on monitahoisia vaikutuksia imeytysalueen metsämaahan ja kasvillisuuteen. Vaikutusten määrä ja laatu riippuu oleellisesti imeytettävän raakaveden määrästä ja laadusta, kuten happamuudesta ja eri aineiden pitoisuuksista.

Koska imeytettävät vesimäärät ovat pinta-alayksikköä kohti varsin suuria, ja imeytysvesi on happamuudeltaan lähellä neutraalia ja sisältää runsaasti emäskationeja (kalium, kalsium ja magnesium), imeytysalueen metsämaan pH kohosi luontaisesta pH-arvosta 4,7 - 5,4 keskimäärin kaksi pH-yksikköä (n. 6,4 - 7,0) eli lähelle samaa tasoa kuin raakaveden pH (7,1 - 7,7). Happamuuden palautuminen luontaiseen tilaan tapahtuu imeytyksen päätyttyä varsin hitaasti. Talvikautisen imeytysalueen pH ei palautunut kumpanakaan kesänä viiden kuukauden imeytystauon aikana. Myös aiemmin imeytetyn alueen pH oli vuoden kuluttua imeytyksen päättymisestä vielä n. 6,4. Tämän alueen pH:n palautumista seurataan myös v. 1998.

Metsämaan pH:n kohoaminen oli suurinta imeytysputkien välittömässä läheisyydessä. Putkirivien välialueilla pH oli muuttunut, mutta huomattavasti vähemmän (0,4 - 0,7 pH-yksikköä). Vuonna 1998 tehdään imeytysaloilla vielä tarkempi humuskerroksen pH:n paikallisen vaihtelun kartoitus.

Typen kierron muutokset metsämaassa jo ensimmäisenä vuonna olivat merkittävin seuraus maan pH:n kohoamisesta ja kosteuden lisääntymisestä. pH:n kohoaminen kiihdytti nitrifikaatiota eli nitraatin muodostusta imeytyksen aikana. Nitraattia oli maaperässä ainoastaan imeytetyillä koelaloilla. Imeytyksen päätyttyä maan kuivuminen vähensi nitrifikaatiota vain hieman. Vuoden kuluttua imeytyksen päättymisestä nitraatin tuotto oli edelleen suurta, joten näyttää siltä, että nitraatin tuotto jatkuu niin kauan kuin maan pH pysyy korkeana. Dityppioksidin tuotto oli suurinta imeytyksen aikana ja välittömästi sen päätyttyä, kun nitraattia oli runsaasti maassa ja maa oli vielä märkää. Imeytystaukojen aikana maassa tuotettiin edelleen nitraattia, jota myös huuhtoutui sadeveden mukana pohjaveteen, mutta N₂O-tuotto oli vähentynyt. Loppusyksyllä 1997 nitraatin tuotto (ja huuhtoutuminen) oli kuitenkin vähäisempää maaperän viilentyessä.

Maan pH:n nousu ja typen kierron muuttuminen voi tapahtua myös karuimmilla imeytysalueilla, mutta syntyvät (ja mahdollisesti huuhtoutuvat) nitraattimäärät saattavat olla pienempiä kuin viljavilla kasvupaikoilla.

Typen kierron muuttuminen ei kuitenkaan kohottanut pohjaveden nitraattipitoisuuksia, koska imeytysvesi laimensi vajoveden nitraattipitoisuuksia. Pohjaveden laadun kannalta on edullista, että imeytyksen päättymisen jälkeen lähialueella imeytys jatkuu. Läheiseltä imeytysalueelta valuva vesi laimentaa imeytyksestä poistetulla alueella syntyviä korkeita nitraattipitoisuuksia. Imeytysvesi myös lisäsi maaperään tulevaa nitraattimäärää merkittävästi, mutta imeytysveden sisältämä nitraatti valui imeytysveden mukana pohjaveteen. Suurella nitraattimäärällä ei ole kuitenkaan merkitystä pohjaveden laadun kannalta, koska suuri vesimäärä vastaavasti pitää nitraattipitoisuuden alhaisena.

Vuonna 1996 emäskationeja nettositoutui maahan, mutta v. 1997 sitoutumista ei enää tapahtunut, ts. maaperä oli saavuttanut kemiallisen tasapainon vajoveden kanssa.

Pohjaveden pH vaihteli havaintoputkissa keskimäärin välillä 6,8 - 7,1 putkea 9406 lukuunottamatta, jossa pH oli välillä 6,4 - 6,5. Tämä putki sijaitsee eri suunnassa kuin muut putket (imeytysalueiden itäpuolella), joten on mahdollista, että imeytys vaikuttaa sen veden laatuun vähemmän kuin muista havaintoputkista otettavaan veteen.

Pohjaveden orgaanisen hiilen pitoisuus on ollut sekä kasvukausien aikana että talvikaudella selvästi imeytysveden pitoisuutta matalampi, minkä perusteella Ahveniston harju on ollut suhteellisen tehokas orgaanisen aineen suodatin. Orgaanisen aineen fraktiointi ensimmäisen vuoden näytteistä osoitti myös, että Ahveniston harjun suodatuskyky on hyvä ja toimii toivotulla tavalla. Orgaanisen aineen huuhtoutuminen metsämaasta ei vaikuttanut pohjaveden laatuun. Orgaanisessa muodossa olevat liukoisen typen pitoisuudet olivat pieniä pohjavedessä. Kokonaisuudessaan raakaveden mukana tuli ensimmäisenä imeytysvuonna n. 500 kg orgaanista typpeä ja n. 3000 kg orgaanista hiiltä koko imeytysalueelle ja seurantajaksolle (joulukuu 1995-marraskuu 1996) laskettuna.

Aluskasvillisuustutkimuksen mukaan veden imeytys edistää typen ja kalkin suosijakasvien (eräät lehdossa elävät heinät, ruohot ja sammalet) esiintymistä ja kasvua. Heinät, erityisesti metsäkastikka, sitoivat tehokkaasti lisääntyneen nitrifikaation maassa tuottamaa nitraattia. Kuivien ja karujen kasvupaikkojen lajit, kuten varvut ja kangasmetsien sammallajit, puolestaan kärsivät sadetuksen aiheuttamasta liiasta kosteudesta sekä maaperän ravinteisuuden ja pH:n muutoksista. Maanpinnan eroosio lisääntyi kaikilla imeytysaloilla tutkimusjaksolla 1996 - 97, eniten ympärivuotisen ja talvikautisen imeytyksen koaloilla ja vähiten kasvukautisella jaksotetulla imeytysalalla. Imeytyksen keskeyttäminen tai jaksottaminen kasvukaudella edistää kasvillisuuden toipumista ja kasvien kykyä sitoa paljastunutta maata. Pensaskerroksella on maa-aineksen liikkumista estävä vaikutus.

Puuston kasvumittaukset alkoivat kesällä 1996 kesäkuussa, ja ensimmäisen kesän tuloksista ei vielä voinut päätellä imeytyksen vaikutuksia. Kesällä 1997 kasvua voitiin mitata koko jakson ajan, paitsi kasvukautisella imeytysalalla, jossa alkukesän ilki-valta häiritsi mittauksia. Puuston kasvutulokset vaihtelivat puuyksilöittäin, mutta kokonaisuudessaan imeytys on joko ollut puiden kasvulle positiivista tai sillä ei ole ollut vaikutusta. Talvikautisella imeytysalalla kaksi imeytykselle altistunutta kuusta kasvoi erityisen hyvin, mahdollisesti typen saannin paranemisesta johtuen. Kasvukautisen imeytysalan ja sen vertailualan mäntyjen kasvussa ei ollut eroja. Muutamassa huonosti kasvaneessa puuyksilössä oli runkovaurioita, mikä viittasi jo ennen imeytystä alkunsa saaneen runkolahon esiintymiseen.

Kastelulle altistuneiden ja vertailualojen puiden kasvurytmi oli myös hyvin samantapainen. Kahdella talvikautisen imeytyksen koelatan puulla nestevirtaukset rungossa tosin käynnistyivät noin kaksi viikkoa aiemmin kuin vertailualan puilla. Näin pieni ero tuskin kovin oleellisesti lisää pakkasvaurioriskiä. Muilla kastelulle altistuneilla koepuilla ei lisäksi havaittu vastaavaa muutosta kasvurytmissä.

Syksyllä 1997 tehdyn silmämääräisen metsäpatologisen tarkastelun perusteella ei voitu päätellä, onko imeytys vaikuttanut juurikääpäsienen leviämiseen, vaan alueen puut näyttivät tässä suhteessa varsin normaaleilta. Maannousemaa aiheuttava juurikääpäsieni viihtyy

maaperässä, jossa on korkea pH. Sieni leviää varsin hitaasti, joten lahovikaisten puiden laho on todennäköisesti saanut alkunsa jo kauan ennen imeytyksen alkamista. Vuoden 1998 syksyllä puiden kasvukairauksen yhteydessä otetaan kairanäytteitä myös imeytykselle altistuneista ja altistumattomista paksujuurista juurikäävän esiintymisen selvittämiseksi.

Puuston ravinnetilatutkimukset osoittivat, että tähän astisella imeytyksellä ei ole ollut negatiivisia vaikutuksia puuston ravinnetalouden kanalta. Parantunut typen saatavuus maasta heijastui myös kohonneina neulasten typpipitoisuuksina. Typpi on kangasmaillamme minimiravinne, joten kohtuullinen typpilisäys vaikuttaa positiivisesti puuston kasvuun.

Kasvukauden 1996 hienojuuritulokset osoittivat, että sadetusimeytys ei aiheuttanut merkittäviä muutoksia havupuiden elävien tai kuolleiden hienojuurten määrissä. Maan kosteuden ja ravinteisuuden lisääntyminen saattoi lisätäkin kuusten hienojuurten kasvua ja siten tehostaa ravinteiden ottoa. Hienojuuriston toimintaa voi paikoitellen heikentää seisovan veden aiheuttama pintamaan hapettomuus, 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.

Imeytyksen ajankohta, kesto ja toteutus

Imeytyksen lopettamisajankohta näyttää nitraatin huuhtoutumisen kannalta keskeisemmältä kuin varsinainen imeytysajankohta. Suurin riski nitraatin huuhtoutumiselle pohjaveteen syntyy imeytyksen päätyttyä, kun imeytysvesi ei enää laimenna huuhtoutuvia nitraattimääriä. Runsaat sateet imeytyksen jälkeen lisäävät nitraatin huuhtoutumisriskiä. Imeytys tulisi näin ollen lopettaa silloin, kun nitraatin tuotto maassa on vähäisempää ja vetenä tulevat sateet vähäisiä. Talvikautisella imeytysalalla nitraatin tuotto ja huuhtoutuminen jatkuivat kasvukauden ajan. Toisaalta jaksotetulla kasvukautisella imeytysalalla nitraattia tuotettiin ja sitä huuhtoutui imeytystaukojen aikana. Kasvukautisen imeytyksen päätyttyä nitraattia myös huuhtoutui, mutta muodostuvat nitraattimäärät olivat pienempiä maaperän viilentyessä. Vuosien 1996 ja 1997 tulokset viittaisivat siihen, että nitraatin huuhtoutumisriskin minimoimiseksi paras imeytyksen päättymisajankohta olisikin syksy ts. kasvukautinen imeytys olisi talvikautista edullisempi, mutta asian varmentamiseksi ensi vuoden lisätutkimukset ovat tarpeen.

Aluskasvillisuuden kannalta imeytysalueiden vuorottelu on tärkeää, koska jo tässä vaiheessa voidaan sanoa, että mitä vähemmän aikaa tiettyä aluetta imeytetään, sen pienemmät ovat vaikutukset aluskasvillisuuteen. Ahveniston harjun aluskasvillisuustulokset antavat aihetta epäillä, että karu metsäkasvillisuus kärsisi liiasta vedestä enemmän kuin rehevä lehtokasvillisuus, ja tällaisilla alueilla imeytyksen vuorottelu voisi olla vielä tärkeämpää. Sitä, missä mittakaavassa nyt todetut ilmiöt esiintyisivät karummilla kasvupaikoilla, tulisikin jatkossa selvittää näillä kasvupaikoilla tehtävällä erillistutkimuksella.

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

Mittausaikataulu vuonna 1998

Mikään vuonna 1996 ja 1997 tehdyistä mittauksista ei ole ollut vaikutusten tutkimisen kannalta turhaa, vaan suoritettut mittaukset ovat antaneet arvokasta ja monipuolista tietoa harjumetsän muuttumisesta imeytyksen vaikutuksesta. Imeytyskokeita tulee jatkaa entiseen tapaan myös vuonna 1998. Saatujen kokemusten perusteella alkuperäistä mittausohjelmaa pitäisi tarkentaa vuonna 1998 seuraavasti:

Aluskasvillisuuden kartoitus suoritetaan kaksi kertaa kesässä, kuten v. 1997, aiemmin ehdotetun kolmen kerran sijasta. Puuston kasvu, puuston ja maaperän ravinnetila sekä hienojuuristo tutkitaan alkuperäisen suunnitelman mukaisesti.

Vajovesitutkimus tehdään samoin kuin v. 1996 ja 1997. Pohjavesinäytteenottoa jatketaan samalla ohjelmalla. Nitrifikaatio määritetään kolme kertaa kasvukaudessa aiemmin ehdotetun kahden sijasta, samoin N_2O -kaasun tuottoa määritetään kolme kertaa kasvukaudessa aiemmin ehdotetun yhden sijasta. Nämä prosessit muuttuvat merkittävästi imeytyksen vaikutuksesta, mikä puoltaa aiempaa tarkempaa mittausohjelmaa. Kasvukautena 1998 tehdään myös maan pH:n paikallisen vaihtelun kartoitus imeytysaloilla, jotta saataisiin selville, kuinka laaja-alaista pH:n muutos on. Nitraatin tuoton määrittäminen myös kivennäismaasta antaisi lisäselvyyttä vajovesitulosten tulkintaan. Maaperän happamuuden ja nitraatin tuoton palautumista luontaiseen tilaan aiemmin imeytetyllä alalla seurataan edelleen v. 1998. Myös ympärivuotisesti imeytettävää aluetta tulisi tutkia myös v. 1998 maaperämuutosten (pH, nitraatti) ja aluskasvillisuusmuutosten määrittämiseksi.

KIRJALLISUUS

Blom, C.W.P.M. & Voeseck, L.A.C.J. 1996. Flooding: the survival strategies of plants. *Trends in Ecology & Evolution* 11(7):290-295.

Fober, H. 1976. Distribution of mineral elements within the crown of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies*, Karst.). *Arboretum Kornickie*, s. 323-331.

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. & Hallbäck, L. 1997. Fine-root biomass production in limed and fertilized Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands. In: Andersson, F., Braekke, F.H. & Hallbäck, L. Imbalanced forest nutrition - vitality measures. A SNS project 1993-1996. Final report, Swedish University of Agricultural Sciences, p. 222-256.

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 ravinnepitoisuuden vaihtelu männyn latvuksessa. *Suo* 45:47-55.

Leenheer, J.A. (1981) Comprehensive approach to preparative isolation and fractionation of dissolved organic carbon from natural waters and wastewaters. *Environ Sci. Technol.* 15:578-587.

Makkonen, K. & Helmisaari, H.-S. 1997. Seasonal variation of fine-root biomass in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. *Forest Ecology and Management* (painossa).

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 (N₂O) emissions from some natural environments in Finland. *Julkaisussa: Hupa M. & Matinlinna J. (eds.). Proceedings of the 6th International Workshop on Nitrous Oxide Emissions, Turku, Finland, June 7-9, 1994. ÅAU CCRG Report 94-10:553-560.*

Mälkönen, E. 1991. Neulas- ja maa-analyysien käyttökelpoisuus metsänhoitotoimenpiteiden suunnittelussa. *Julkaisussa: Mäkkeli, P. & Hotanen, J. (toim.), Metsänkasvatuksen perusteet turve- ja kivennäismailla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 383:52-61.

Paavolainen L. & Smolander A. 1997. Nitrification and denitrification in soil from a clear-cut Norway spruce (*Picea abies*) stand. *Soil Biology & Biochemistry*, painossa.

Qualls, R.G. and Haines, B.L. (1991) Geochemistry of dissolved organic nutrients in water percolating through a forest ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1112-1123.

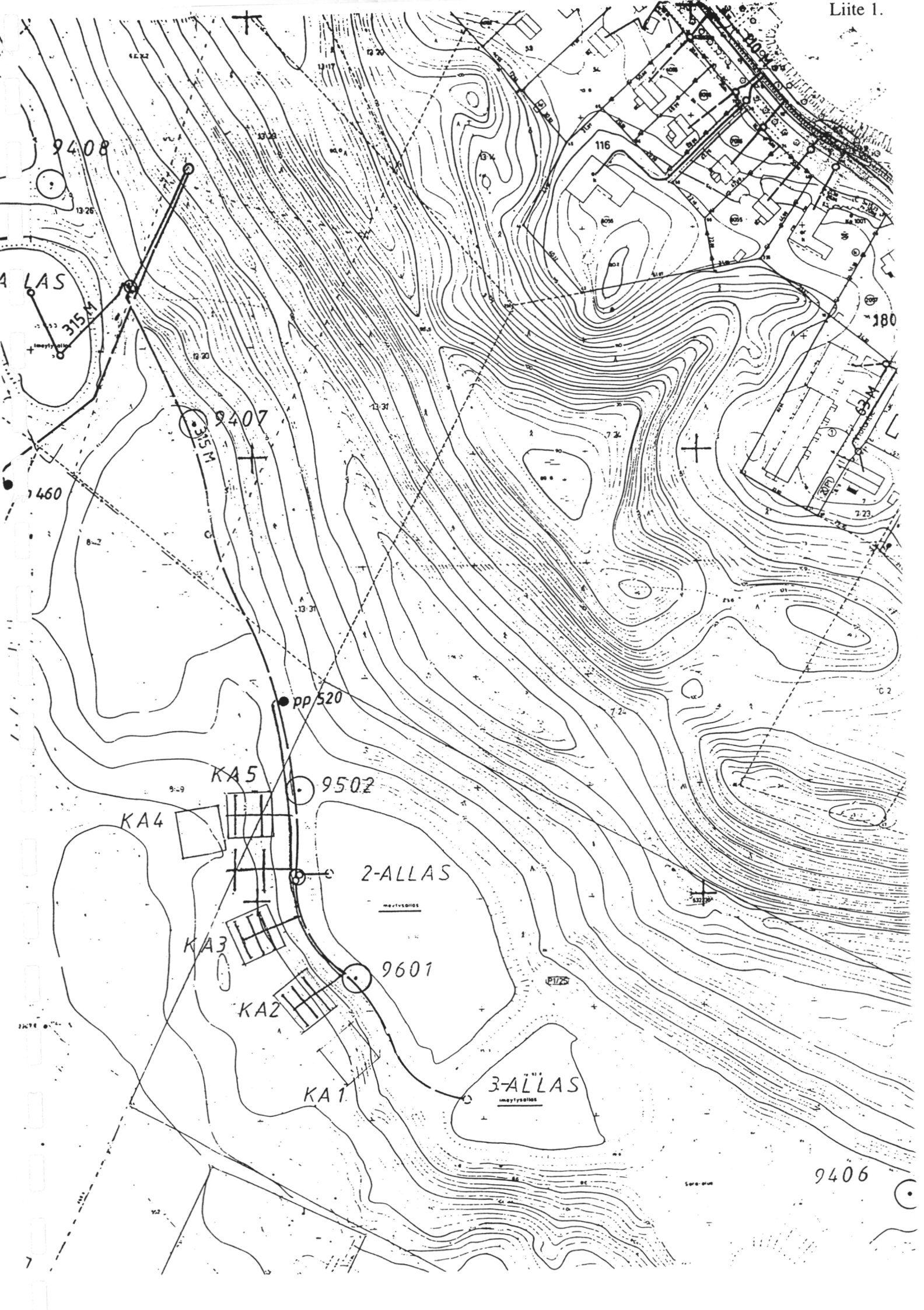
Smolander A., Kitunen V., Priha O. & Mälkönen E. 1995. Nitrogen transformations in limed and nitrogen fertilized soil in Norway spruce stands. *Plant and Soil* 172. 107-115.

Smolander A., Priha O., Paavolainen L., Steer J. ja Mälkönen E. 1997. Nitrogen and carbon transformations before and after clearcutting in repeatedly N-fertilized and limed forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, painossa.

Sosiaali- ja terveysministeriö 1994. Päätös nro 74. 20.1.1994.

Soveri, J. ja Ahlberg, T. 1990. Effects of air pollutants on chemical characteristics of soil water and groundwater. Teoksessa: P. Kauppi, P. Anttila ja K. Kenttämies (toim). *Acidification in Finland*. Springer-Verlag. Berlin. ss. 117-145.

Starr, M. ja Tamminen, P. 1992. Suomen metsämaiden happamoituminen. Teoksessa: I. Kukkonen ja H. Tanskanen (toim). *Ympäristötieteelliset kartat ja kartoitushankkeet Suomessa*. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 115: 7-14.



9408

A LAS

1460

9407

pp 520

KA5

KA4

9502

2-ALLAS

KA3

9601

KA2

KA1

3-ALLAS

9406

