

VESI- JA YMPÄRISTÖHALLITUKSEN MONISTESARJA

Nro 330

SORANOTON VAIKUTUS POHJAVETEEN

Tutkimusraportti III

Vajovesitutkimukset

Matti Sandborg

VESI- JA YMPÄRISTÖHALLITUKSEN MONISTESARJA

Nro 330

SORANOTON VAIKUTUS POHJAVETEEN

Tutkimusraportti III

Vajovesitutkimukset

Matti Sandborg

Vesi- ja ympäristöhallitus
Geologian tutkimuskeskus
Tiehallitus

Helsinki 1993

Tekijä on vastuussa julkaisun sisällöstä eikä siihen voida vedota vesi- ja ympäristöhallituksen virallisena kannanottona.

Julkaisua saa vesi- ja ympäristöhallituksen kuntatoimistosta, PL 250, 00101 HELSINKI
Puh. (90) 69511

ISBN 951-47-4693-7

ISSN 0783-3288

Painopaikka: Vesi- ja ympäristöhallituksen monistamo
Helsinki 1993

Julkaisija
Vesi- ja ympäristöhallitus

Julkaisun päivämäärä
9.12.1992

Tekijä(t)
Matti Sandborg

Toimielimestä: nimi, puheenjohtaja
Johtoryhmä: Tuomo Hatva (pj.)

Julkaisun nimi (myös ruotsinkielinen)
Sorannoton vaikutus pohjaveteen

Tutkimusraportti III: Vajovesitutkimukset

Julkaisun laji
Tutkimusraportti

Toimeksiantaja
VYH, GTK, TieH

Toimielimen asettamispvm
1.8.1983

Julkaisun osat

Tiivistelmä

Tutkimuksessa selvitettiin lysimetrien avulla, miten maan luontaisen pintakerroksen poistaminen vaikuttaa sorannoton seurauksena vajoveden laatuun ja määrään eri syvyyksillä maan pinnasta. Lisäksi tutkittiin:

1. Raskasmetallien kulkeutumista maaperässä luonnontilassa ja maan pintakerroksen poiston jälkeen.
2. Viemärijäteveden aiheuttamia kemiallisia muutoksia vajovedessä luonnontilassa ja pintakerroksen poiston jälkeen.
3. Pölynsidontasuolan (CaCl_2) aiheuttamia kemiallisia muutoksia vajovedessä maan pintakerroksen poiston jälkeen.
4. Soranottoalueilla maan pintaan tehtävää pintaverhoilua.
5. Soran pesussa syntyvän lietteen ominaisuuksia.

Tutkimusaikana 1984–1988 havaittiin vajoveden voimakasta happamoitumista. Maan pintakerroksen poiston jälkeen monien ionien ja orgaanisen aineksen pitoisuudet nousivat jopa moninkertaisiksi luonnontilaan verrattuna, samoin vajovesi happamoitui nopeammin kuin luonnontilassa. Maan luonnontilaisen pintakerroksen, maannoksen ja kasvien, havaittiin suojaavan pohjavettä raskasmetalli- ja jätevesisaasteelta. Pölynsidontasuolauksen havaittiin aiheuttavan vajoveden suolapitoisuuden nousua ja happamoitumista. Luonnontilaista jäljittelevän maan pintakerroksen alapuolella vajovesi oli luonnontilaisen kaltaista. Soranpesulietteestä havaittiin huuhtoutuvan vajoveteen sulfaattia suurina pitoisuuksina.

Maannoshorisonttien alapuolella havaittiin vaiheuttamisvyöhyke, joka ulottui maan pinnasta ainakin 1,5 metrin syvyyteen. Vyöhykkeessä vajoveden ominaisuudet olivat samankaltaisia kuin maannoshorisonteissa. 2,5 metrin syvyydessä vajovesi oli pohjaveden kaltaista. Johtopäätöksenä todettiin luonnontilaisen maanpintakerroksen suuri vaikutus pohjavettä suojaavana kerroksena.

Asiasanat (avainsanat)

Pohjavesi, vajovesi, maannokset, soranotto, raskasmetallit, jätevesi, pölynsidontasuolaus, soranpesuliete, jälkihoito

Muut tiedot Tutkimukseen liittyvät tutkimusraportit I, II ja IV (VYH, monistesarja) sekä raportti V: Soranotto ja pohjaveden suojele (VYH:n julkaisuja, Sarja B15) ja tutkimusraportti 1/1993. (Ympäristöministeriö, kaavoitus- ja rakennusosasto)

Sarjan nimi ja numero

Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja nro 330

ISBN

951-47-4693-7

ISSN

0783-3288

Kokonaissivumäärä

127

Kieli

Suomi

Hinta

Luottamuksellisuus

Julkinen

Jakaja

Vesi- ja ympäristöhallitus
Kuntatoimisto
puh. (90) 6951 295

Kustantaja

Vesi- ja ympäristöhallitus
PL 250
00101 HELSINKI

Utgivare
Vatten- och miljöstyrelsen

Utgivningsdatum
9.12.1992

Författare
Matti Sandborg

Organ: namn, ordförande, sekreterare)
Ledningsgrupp: Tuomo Hatva (ordf.)

Publikation (även den finska titeln)
Inverkan av grustäkt på grundvattnet.
Forskningsrapport III. Sjunkvattensundersökningarna
(Sorannoton vaikutus pohjaveteen.
Tutkimusraportti III. Vajovesitutkimukset)

Typ av publikation
Forskningsrapport

Uppdragsgivare
VMS, GFC, VägS

Datum för tillsättandet av organet
1.8.1983

Publikationens delar

Referat

I undersökningen utreddes med hjälp av lysimetrar hur avlägsnandet av markens naturliga ytskikt som en följd av grustäkt inverkar på sjunkvattnets kvalitet och mängd på olika djup från markytan. Därtill undersöktes:

1. Transporten av tungmetaller i jordmånen i naturtillstånd och efter avlägsnandet av markytan.
2. Kemiska förändringar orsakade av avloppsvatten i sjunkvattnet i naturtillstånd och efter avlägsnandet av markytan.
3. Kemiska förändringar orsakade av dammbindande salt (CaCl_2) i sjunkvattnet efter avlägsnandet av markytan.
4. Yttäckning på grustäktområden.
5. Egenskaperna hos slam som uppkommer vid tvättning av grus.

Under undersökningsperioden 1984–1988 observerades en kraftig försurning av sjunkvattnet. Efter avlägsnandet av markytan steg halterna av många joner och organiska substanser till och med flerdubbelt jämfört med de naturliga halterna. Likaså försurades sjunkvattnet snabbare än i naturtillståndet. Det observerades att markens naturliga ytskikt, jordmånen och växterna skyddar grundvattnet mot förorening med tungmetaller och avloppsvatten. Det observerades att ytbehandling med dammbindande salt orsakar en höjning av salthalten och försurning. Under ytskiktet hos sådan jord som efterliknar naturtillståndet var sjunkvattnet likt det naturliga. Det observerades att sulfater i stora mängder urlakas ur grustvåttslammet i sjunkvattnet.

Under jordmånshorisonerna observerades en övergångszon som sträckte sig från markytan till åtminstone 1,5 meters djup. I zonen var sjunkvattnets egenskaper likadana som i jordmånshorisonerna. På 2,5 meters djup liknade sjunkvattnet grundvattnet. Som slutsats konstaterades den naturliga markytans stora betydelse som grundvattenskyddande skikt.

Sakord (nyckelord)

Grundvatten, sjunkvatten, jordmåner, grustäkt, tungmetaller, avloppsvatten, dammbindning, saltning, grustvätt, slutbehandling

Övriga uppgifter Till undersökningen hör forskningsrapporterna I, II och IV (VMS, duplikatserien) samt Rapport V: Grustäkt och skyddet av grundvattnet (VMF:s publikationer–Serie B 15) och Rapport VI: Grundvattnet och grustäkt (Forskningsrapport 1/1993. Miljöministeriet, Planläggnings- och byggnadsavdelningen).

Seriens namn och nummer
Vatten- och miljöstyrelsens duplikatserie nr 330

ISBN
951-47-4693-7

ISSN
0783-3288

Sidantal
127

Språk
Finska

Pris

Sekretessgrad
Offentlig

Distribution
Vatten- och miljöstyrelsen
Kommunbyrån
tel (90) 6951 295

Förlag
Vatten- och miljöstyrelsen
PB 250
00101 Helsingfors

Published by
National Board of Waters and the Environment

Date of publication
9.12.1992

Author(s)
Matti Sandborg

Title of publication
Effect of gravel extraction on groundwater
(Sorannoton vaikutus pohjaveteen)
Report III: Seep water investigations
(Raportti III: Vajovesitutkimukset)

Type of publication
Research report

Commissioned by
National Board of Waters and the Environment
Geological Survey of Finland
Finnish National Road Administration

1.8.1983

Parts of publication

Abstract

Lysimetric investigations were carried out to study how the removal of natural topsoil on connection with gravel extraction affects the quality and quantity of seep water at different depths from ground surface. In addition, the following were studied:

1. Movement of heavy metals in soil, in natural state and after removal of topsoil.
2. Chemical changes caused by sewage in seep water, in natural state and after removal of topsoil.
3. Chemical changes in seep water caused by dust controller (CaCl₂), after removal of topsoil.
4. Restoration of topsoil at gravel extraction sites.
5. Properties of sludge that arises from washing of gravel.

In the study period 1984 – 1988 strong acidification of seep water was observed. After the removal of topsoil the concentrations of many ions and organic substances in seep water increased in some cases many-fold compared with natural state; the seep water was also acidified faster than under natural conditions. The natural topsoil, humus layer and vegetation, were observed to protect groundwater against pollution by heavy metals and sewage. Salt used to control dust was observed to increase the salt content of seep water and acidification. Under artificial topsoil seep water was the same as in natural state. Sulphates were washed out in high concentrations from sludge arising from washing of gravel.

Below the horizontal layers of humic soil a transition zone was observed which extended to a depth of 1.5 meters or more. In this zone the properties of seep water were similar to those in the humus layers. At a depth of 2.5 meters seep water is similar to groundwater. In conclusion the important role of topsoil in protecting groundwater could be affirmed.

Keywords

Groundwater, seep water, humic layers, gravel extraction, gravel excavation, heavy metals, sewage, wastewater, application of dust control salts, posterior management

Other information

Related research reports I, II and IV (Duplicate Series of the NBWE), Report V: Gravel extraction and groundwater protection (Publication of NBWE – series B15) and Report VI: Groundwater and gravel extraction (Research Report 1/1993. Ministry of the Environment, Physical Planning and Building Department).

Series (key title and no.)

Duplicate Series of National Board of Waters and the Environment, nr 330

ISBN

951-47-4693-7

ISSN

0786-3288

Pages
127

Language
Finnish

Price

Confidentiality
Public

Distributed by

National Board of Waters and the Environment
P.O.Box 250 SF 00101 HELSINKI

Publisher

National Board of Waters and the Environment
P.O.Box 250 SF 00101 HELSINKI

ALKUSANAT

Vesi- ja ympäristöhallitus, Geologian tutkimuskeskus ja Tiehallitus aloittivat vuonna 1983 yhteistyöprojektin, jonka tavoitteena oli selvittää soranoton vaikutuksia pohjaveteen. Projektin koordinoinnista on vastannut vesi- ja ympäristöhallitus.

Yhteistyöprojektin johtoryhmän puheenjohtajaksi valittiin hydrogeologi, fil.tri Tuomo Hatva ja jäseniksi dipl.ins. Tapani Suomela ja limnologi Heikki Penttinen vesi- ja ympäristöhallituksesta, fil.lis. Juho Hyyppä (1983–1988), geologi Matti Taka (1985–1987), fil.tri Martti Salmi (1988–1992) ja fil.tri Jouko Niemelä (1988–1992) Geologian tutkimuskeskuksesta, sekä dipl.ins. Erkki Matilainen (1983–1988) ja dipl.ins. Tuomo Kallionpää (1988–1992) Tiehallituksesta.

Alueellisista tutkimuksista vastasivat Juho Hyyppä ja Heikki Penttinen, mikrobiologisista tutkimuksista fil.kand. Kimmo Kuusinen sekä vajovesitutkimuksista LuK Matti Sandborg. Projektin tutkijoina olivat fil.kand. Brigitta Backman (1984–1988) ja LuK Matti Sandborg (1983–1991). Lysimetrien suunnitteluun ja kenttätoihin osallistuivat Eero Visa Geologian tutkimuskeskuksesta ja vesinäytteiden ottoon Marianne Lehtiö.

Projektisihteereinä toimivat fil.kand. Birgitta Backman (1984–1988), fil.kand. Marianne Lehtiö (1988–1990) ja fil.kand. Anna-Liisa Kivimäki (1991–1992). Projektin konsultteina toimivat Maa ja Vesi Oy (1984–1992), Juho Hyyppä (1989–1992) ja Insinööritoimisto Erkki Matilainen Oy (1988–1991).

Vesinäytteiden ottoon ja analysointiin ovat osallistuneet projektin tutkijoiden lisäksi Helsingin, Keski-Suomen, Kokkolan, Oulun, Turun ja Vaasan vesi- ja ympäristöpiirit ja Geologian tutkimuskeskus. Vesinäytteet analysoitiin vesi- ja ympäristöpiirien sekä Geologian tutkimuskeskuksen toimesta.

Projektin rahoitukseen osallistuivat Vesi- ja ympäristöhallitus, Tiehallitus, Geologian tutkimuskeskus, Ympäristöministeriö, Maj ja Tor Nesslingin säätiö, Suomen Maarakentajien Keskusliitto ry. ja Rakennusalan neuvottelukunta.

Tutkimus tehtiin vuonna 1984–1989 lysimetrikentillä Tuusulassa, Nurmijärvellä ja Lammilla osana "soranoton vaikutus pohjaveteen" -projektia. Tutkimusaiheen esitti fil.lis. Juho Hyyppä ja tutkimuksen suunnitteluun osallistuivat lisäksi fil.kand. Matti Taka ja fil.kand. Birgitta Backman. Arvokasta apua laitteistojen suunnitteluun ja rakentamiseen antoi tutkimusavustaja Eero Visa. Tutkimusraportin käsikirjoituksen tarkastivat fil.tri Pertti Lahermo ja fil.tri Tuomo Hatva. Heille esitän parhaimman kiitokseni samoin kuin Geologian tutkimuskeskuksen vesi- ja kemian laboratorion henkilökunnalle ja lukuisille näytteenottoon, rakennustöihin ja muutoin tutkimukseen osallistuneille henkilöille.

Raportin viimeistely ja toimitustyö tehtiin vesi- ja ympäristöhallituksessa.

Matti Sandborg
Omistettu veljelleni Seppo Sandborgille
15.5.1956 – 7.4.1990

SISÄLLYS

Sivu

ALKUSANAT	6
1 JOHDANTO	13
OSA I TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMINEN	
2 TUTKIMUKSET	14
2.1 Yleistä	14
2.2 Tutkimuksen osa-alueet	14
2.2.1 Vajoveden perustutkimus	14
2.2.2 Jälkihoitokokeet	15
2.2.3 Viemäriveresi- ja raskametallisaasteen kulkeutuminen maaperässä luonnontilassa ja paljaan sorapinnan alla (jätevesikoe ja raskasmetallikoe)	15
2.2.4 Soranpesu	16
3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO	16
3.1 Laitteistot	16
3.1.1 Tuusulan Kapulasillanmäen ja Lammin lysimetrit	16
3.1.2 Tuusulan Palaneenmäen jälkihoitolysimetrit	19
3.1.3 Nurmijärven Nukarin lysimetrit	20
3.2 Tutkimusalueet	22
3.2.1 Tuusulan ja Nurmijärven lysimetrikentät	22
3.2.2 Lammin lysimetrikenttä	24
3.3 Näytteenotto	25
3.4 Määrittelyt	26
OSA II TULOKSET	
4 PERUSTUTKIMUS TUUSULA KAPULASILLANMÄKI	26
4.1 Sähkönjohtavuus	26

4.1.1	Laskeuma	26
4.1.2	Luonnontilainen vajovesi	27
4.1.3	Vajovesi paljaan sorapinnan alla	33
4.1.4	Vajoveden määrän vaikutus sähkönjohtavuuteen	33
4.2	Bikarbonaatti/alkaliteetti	33
4.2.1	Laskeuma	34
4.2.2	Luonnontilainen vajovesi	34
4.2.3	Vajovesi paljaan sorapinnan alla	35
4.3	pH-luku (happamuus)	35
4.3.1	Laskeuma	35
4.3.2	Luonnontilainen vajovesi	35
4.3.3	Vajovesi paljaan sorapinnan alla	36
4.4	Kaliumpermanganaattiluku (orgaaninen aines)	39
4.4.1	Laskeuma	39
4.4.2	Luonnontilainen vajovesi	39
4.4.3	Vajovesi sorapinnan alla	40
4.5	Nitraatti	41
4.5.1	Laskeuma	41
4.5.2	Luonnontilainen vajovesi	41
4.5.3	Vajovesi sorapinnan alla	44
4.6	Kloridi	44
4.6.1	Laskeuma	44
4.6.2	Luonnontilainen vajovesi	45
4.6.3	Vajovesi sorapinnan alla	46
4.7	Sulfaatti	46
4.7.1	Laskeuma	46
4.7.2	Luonnontilainen vajovesi	46
4.7.3	Vajovesi sorapinnan alla	47
4.8	Piihappo	47
4.8.1	Laskeuma	47
4.8.2	Luonnontilainen vajovesi	51
4.8.3	Vajovesi sorapinnan alla	51
4.9	Kalsium	52
4.9.1	Laskeuma	52
4.9.2	Luonnontilainen vajovesi	52
4.9.3	Vajovesi sorapinnan alla	53
4.10	Magnesium	56
4.10.1	Laskeuma	56
4.10.2	Luonnontilainen vajovesi	56
4.10.3	Vajovesi sorapinnan alla	56
4.11	Natrium	56

4.11.1	Laskeuma	56
4.11.2	Luonnontilainen vajovesi	57
4.11.3	Vajovesi sorapinnan alla	58
4.12	Kalium	58
4.12.1	Laskeuma	58
4.12.2	Luonnontilainen vajovesi	59
4.12.3	Vajovesi sorapinnan alla	59
4.13	Rauta	61
4.13.1	Laskeuma	61
4.13.2	Vajovesi	61
4.14	Mangaani	62
4.14.1	Laskeuma	62
4.14.2	Vajovesi	62
4.15	Sinkki	63
4.15.1	Laskeuma	63
4.15.2	Vajovesi	63
4.16	Kupari	64
4.16.1	Laskeuma	64
4.16.2	Vajovesi	64
4.17	Nikkeli	65
4.17.1	Laskeuma	65
4.17.2	Vajovesi	65
4.18	Lyijy	66
4.18.1	Laskeuma	66
4.18.2	Vajovesi	66
4.19	Kadmium	67
4.19.1	Laskeuma	67
4.19.2	Vajovesi	68
4.20	Kromi	68
4.20.1	Laskeuma	68
4.20.2	Vajovesi	68
4.21	Koboltti	70
4.21.1	Laskeuma	70
4.21.2	Vajovesi	70
4.22	Alumiini	71
4.22.1	Laskeuma	71
4.22.2	Luonnontilainen vajovesi	71
4.22.3	Vajovesi sorapinnan alla	72
4.23	Vesimäärät	76
5	PERUSTUTKIMUS LAMMI, SALIMÄKI	76

6	JÄLKIHOITOKOKEET	78
	6.1 Yleistä	78
	6.2 Kasvillisuus	78
	6.3 Vajovesi	78
7	SORANPESU JA PESULIETE	81
8	SUOLAKOE	83
	8.1 Yleistä	83
	8.2 Koejärjestelyt	83
	8.3 Tulokset	83
9	JÄTEVESIKOE	84
	9.1 Yleistä	84
	9.2 Tulokset	85
10	RASKASMETALLIKOE	86
	10.1 Yleistä	86
	10.2 Luonnontila	87
	10.3 Paljas sorapinta	89
OSA III YHTEENVETO		
11	LASKEUMA TUUSULAN KAPULASILLANMÄESSÄ JA PALANEENMÄESSÄ	94
12	VAJOVESI TUUSULAN KAPULASILLANMÄESSÄ	95
	12.1 Vesimäärät	95
	12.2 Vajoveden laatu luonnontilassa	96
	12.3 Vajoveden laatu paljaan sorapinnan alapuolella	100
13	VAJOVEDEN LAATU LAMMIN SALIMÄESSÄ	102
14	JÄLKIHOITOKOKEET	103

15	SORANPESU JA PESULIETE	104
16	SUOLAKOE	106
17	JÄTEVESIKOE	107
18	RASKASMETALLIKOE	108

OSA IV JOHTOPÄÄTÖKSET

19	LOPPUTIIVISTELMÄ JA JOHTOPÄÄTÖKSET	109
20	JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSIA	113
	KIRJALLISUUS	116

LIITTEET

1	SORAN PESULIETTEEN KOOSTUMUS	
---	------------------------------	--

1 JOHDANTO

Luonnontilaisessa maaperässä kasveilla ja maan pintaosilla on tärkeä merkitys pohjaveden muodostumisessa. Kasvit sitovat vettä ja siihen liuenneita aineita sekä haihduttavat vettä. Maan pintaosiin on tuhansien vuosien kuluessa muodostunut ilmakehän, maaperän ja elollisen luonnon kontaktivyöhyke ns. maannos. Maannoksessa kasvien ja eläinten jäännökset hajoavat. Osa hajoamistuotteista varastoituu maaperään kiinteässä muodossa, osa liukenee maaperän veteen ja osa kaasuuntuu. Maannoksessa mineraaliainesta rapautuu ja liukenee veteen. Osa liuenneista aineista kulkeutuu pohjaveteen ja osa saostuu maaperän alempiin kerroksiin. Maannokseen varastoituu ilmakehästä ja mineraaliaineksesta kulkeutuvia haitallisia aineita kuten raskasmetalleja. Sadeveden imeytyessä maaperään ja kulkeutuessa maakerrosten läpi pohjavedeksi, muuttuu veden laatu sekä kasvillisuuden, maannoshorisontin että maannoksen alaisen pohjamaan vaikutuksesta. Kaikilla näillä maaperän horisonteilla on myös oma vaikutuksensa muodostuvan pohjaveden määrään.

Soranoton alkaessa kaivualueelta poistetaan puut ja pintamaa. Pohjaveden muodostumisolosuhteet muuttuvat oleellisesti. Sadeveden imeytymis- ja haihtumisolosuhteet muuttuvat. Esimerkiksi veden haihtuminen kasvien kautta jää pois ja maan pintaosan vedenläpäisevyys muuttuu. Maaperässä veden kemiallinen ja biokemiallinen ympäristö muuttuu, kun vesi suotautuu suoraan mineraalimaahan, josta puuttuvat kasvit, maaeläimet ja maannoskerrokset ja mikrobien määrä ja lajit muuttuvat.

Pohjavettä on totuttu pitämään hyvin suojattuna saasteiden vaikutuksilta. Pohjaveden muodostumisolosuhteiden muutokset saattavat kuitenkin heikentää tätä suojausta.

Soranottoalueilla jätetään usein pohjaveden pinnan yläpuolelle yhden, kahden metrin paksuinen ns. suojakerros. Laajoilla kaivualueilla suojakerroksen taloudellinen merkitys käyttämättä jääneinä soravaroina voi olla hyvinkin suuri. Käsitys kerroksen suojaavasta vaikutuksesta ja sen mitoitus perustuvat käytännön näkemyksiin enemmän kuin tutkimuksiin.

Voidaanko pohjaveden muodostumisolosuhteita muuttaa soranottoalueilla lähemmäksi luonnontilaa? Tämän kysymyksen selvittely on tärkeää, jos havaitaan, että soranotolla on kielteisiä vaikutuksia pohjaveteen. Mikäli löydetään soranottoalueiden jälkihoitotapoja, joilla veden laadun heikkenemistä voidaan estää, vähenevät myös soranoton ja pohjaveden suojaamisen väliset ristiriitatilanteet. Tällöin myös kaivualueiden jälkikäyttömahdollisuudet saattavat kasvaa.

Soranoton yhteydessä on toimintoja, joiden mahdolliseen haitallisuuteen ei ole osattu kiinnittää huomiota. Näitä ovat erityisesti pölynsidontasuolaukset ja soranpesu.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia edellä mainittuja asioita "Soraton vaikutus pohjaveteen" -projektin neljällä lysimetrikentällä Tuusulassa, Nurmijärvellä ja Lammilla vuosina 1985 – 1988. Projektin kokonaistavoitteena oli selvittää soranoton vaikutuksia pohjaveteen. Lisäksi tavoitteena oli laatia tehtyjen tutkimusten perusteella suositukset pohjaveden suojelua varten.

OSA I TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMINEN

2 TUTKIMUKSET

2.1 Yleistä

Pohjaveden muodostumisalueilla maaperä on karkearakeista, soraa ja hiekkaa. Maaperään suotautuva sadevesi virtaa suhteellisen nopeasti pohjaveden pinnan yläpuolisen, vedellä kyllästymättömän maakerroksen läpi. Nopeasta veden virtauksesta huolimatta suuri osa muutoksista, sadeveden muuttuessa pohjavedeksi, tapahtuu jo pohjaveden pinnan yläpuolella. Erityisesti maan pintaosissa tapahtuvan biologisen toiminnan ja mineraaliaineksen rapautumisen merkitys on suuri. Tästä johtuen voidaan pohjaveden muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä tutkia tutkimalla kyllästymättämän vyöhykkeen läpi virtaavaa vajovettä.

Soran ja hiekan kaivalueet sijaitsevat pääosin pohjaveden muodostumisalueilla. Vertaamalla luonnontilaisen maanpinnan ja paljaan mineraalimaapinnan alapuolella virtaavaa vajovettä eri olosuhteissa, voidaan päätellä soran ja hiekan kaivun vaikutuksia pohjaveteen.

2.2 Tutkimuksen osa-alueet

Vajovesitutkimukset jakautuivat seuraaviin osa-alueisiin:

2.2.1 Vajoveden perustutkimus

Perustutkimuksilla selvitettiin sadeveden laatua ja imeytymistä maaperään, vajoveden määrää ja laatua maaperässä eri syvyyksillä luonnontilaisen pinnan ja paljaan sorapinnan alapuolella sekä pohjaveden laatua tutkimusalueilla.

Perustutkimuksia tehtiin Tuusulan Kapulasillanmäen ja Lammin Salimäen lysimetrikentillä. Pisimmät aikasarjat saatiin Kapulasillanmäkeen rakennetusta ensimmäisestä laitteistosta toukokuusta 1985 joulukuuhun 1988.

Perustutkimuksen tärkeimmät tavoitteet olivat selvittää maaperän pintaosien merkitystä pohjaveden muodostumisessa sekä selvittää ns. suojakerroksen merkitystä ja mitoitusta ottoalueilla normaaliolosuhteissa.

2.2.2 Jälkihoitokokeet

Jälkihoitokokeissa tutkittiin vajovettä neljän erilaisen maanpintaan luonnon aineksista tehdyn rakenteen alapuolella. Rakenteet olivat:

1. luonnontilaista maannosta jäljittelevä rakenne humus-, uuttumis- ja rikastumishorisontteineen
2. muutoin edellisen kaltainen rakenne, mutta ilman humushorisonttia
3. paljas mineraalimaa, jossa maan pintaan levitettiin hiekkaa.
4. soranpesussa syntynyt liete.

Näistä soranpesuliete osoittautui ominaisuuksiltaan niin poikkeavaksi, että sen pohjalta syntyi uusi tutkimuskokonaisuus, jossa soranpesun vaikutuksia pyrittiin selvittämään laajemmin.

Jälkihoitokokeet tehtiin Tuusulan Palaneenmäen lysimetrikentällä vuosina 1986 – 1988. Jälkihoitokokeiden tarkoituksena oli selvittää voidaanko paljasta mineraalimaapintaa muuttaa siten, että vajoveden laatu muuttuu lähemmäksi luonnontilaista vajovettä ja pohjaveden pinnan yläpuolelle jätettävän suojakerroksen suojaava vaikutus tehostuu.

2.2.3 Viemäriveresi- ja raskasmetallisaasteen kulkeutuminen maaperässä luonnontilassa ja paljaan sorapinnan alla (jätevesikoe ja raskasmetallikoe)

Yhdyskuntaviemäriverettä ja raskasmetallisuoloja sadetettiin erillisissä kokeissa luonnontilaiseen, jälkihoidettuun ja paljaaseen mineraalimaahan ja tutkittiin vajoveden laatua ja eri aineiden kulkeutumista maaperässä.

Saastumiskokeet tehtiin Tuusulan Kapulasillanmäen ja Palaneenmäen sekä Nurmijärven Nukarin lysimetrikentillä vuonna 1988. Kokeiden tarkoituksena oli selvittää ns. suojakerroksen (jälkihoidettuna ja ilman jälkihoitoa) suojaavaa vaikutusta voimakkaan

saastumisen jälkeen verrattuna luonnontilaan. Kokeisiin liittyvistä bakteeri- ja virus-tutkimuksista on erillinen raportti (Kuusinen 1991).

Soranottoalueilla käytetään suolaa (usein kalsiumkloridi) pölyn sidontaan, jään sulattamiseen ja mahdollisesti myös muissa toiminnoissa. Suolakokeessa seurattiin maan pintaan imeytetyn suolaliuoksen kulkeutumista maaperässä ja vajovedessä tapahtuvia kemiallisia muutoksia.

Suolakoe tehtiin Nurmijärven Nukarin lysimetrikentällä vuonna 1988. Suolakokeen tarkoituksena oli selvittää mahdollisia pohjaveden laadussa tapahtuvia muutoksia suolankäytön seurauksena soranottoalueilla.

2.2.4 Soranpesu

Soranpesun mahdollisista haittavaikutuksista saatiin viitteitä jälkihoitokokeen yhteydessä, jossa tutkittiin vajoveden laatua maan pintaan levitetyn pesulietteen alapuolella. Pesulietettä tutkittiin tämän jälkeen uutuskokeilla kuudella alueella eri paikkakunnilla. Uutuskokeita tehtiin myös maaperästä ottoalueelle levitetyn lietteen alta. Myös pesussa käytetyn veden laatua tutkittiin pesun jälkeen. Tuloksia verrattiin pohjaveden laatuun Nurmijärven Nukarin tutkimusalueella. Soranpesututkimukset tehtiin vuosina 1987 – 1988.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

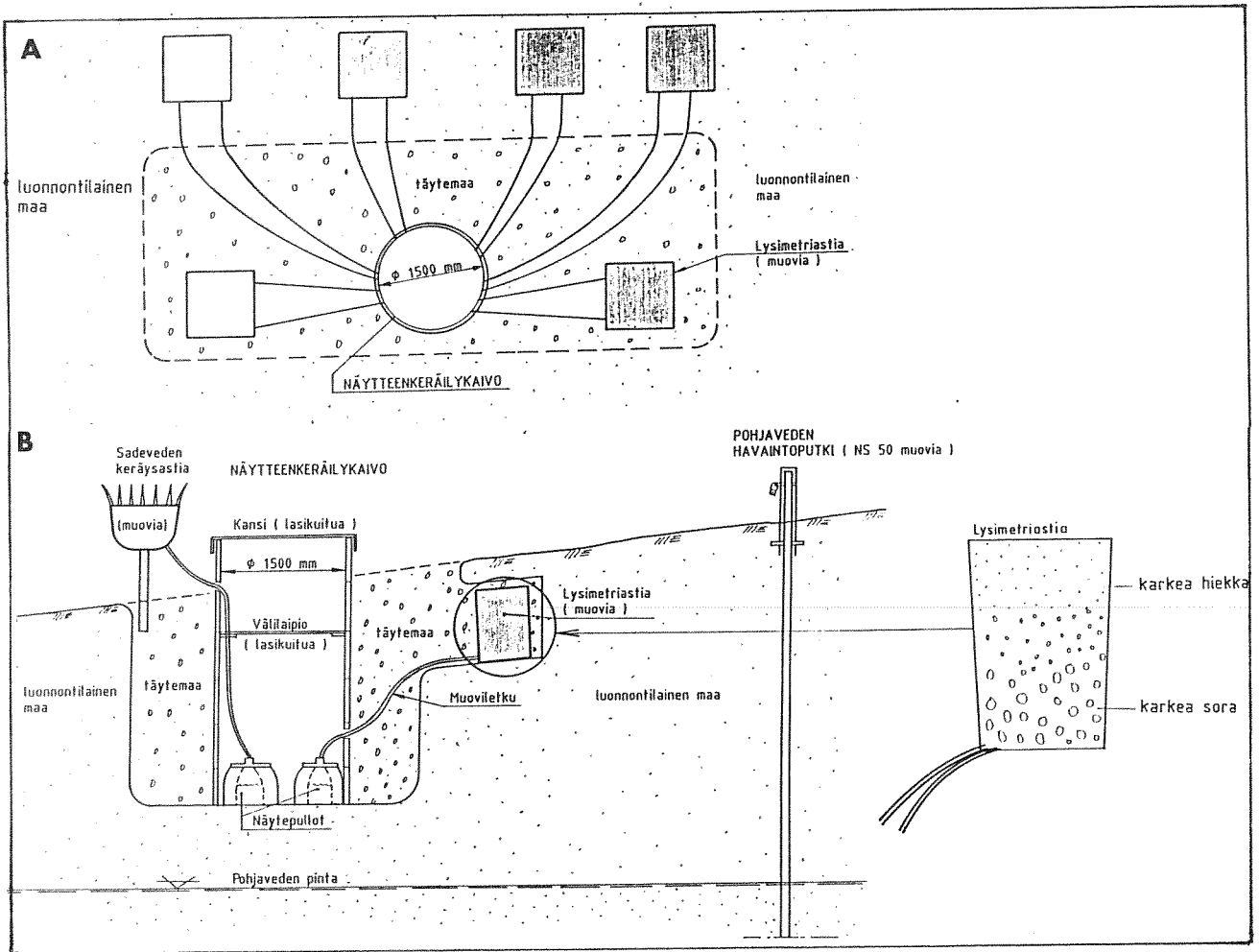
3.1 Laitteistot

3.1.1 Tuusulan Kapulasillanmäen ja Lammin lysimetrit

Lysimetriastia on suorakulmainen, muovinen astia, jonka mitat ovat yläpäästä 43 x 43 cm:ä korkeus 70 cm. Sen alapäästä lähtee 1 – 3 muovista poistoletkua. Letkujen määrällävarmistetaan niiden aukipysyminen.

Maahan kaivetaan kuoppa, jonka rintaukseen halutulle syvyydelle ehjän pintakerroksen alle tehdään vaakatasossa 1 – 1,5 m syvä, lysimetriastian suuruinen kolo. Astia täytetään puoliksi seulotulla soralla. Se työnnetään paikoilleen ja täytetään perusmaalla. Kuoppaan tehdään kaivorenkaista kuilu, jonka alaosaan poistoletkut johdetaan. Paljaan mineraalimaan lysimetri asennetaan kuoppaan halutulle syvyydelle ja kuoppa täytetään alkuperäisellä pohjamaalla. Letkujen päihin asennetaan näytepullot,

jotka sijoitetaan isompaan astiaan ylivaluvan veden määrän mittaamisen mahdollistamiseksi. Lysimetriastioita voidaan sijoittaa samaan kuoppaan useita (kuvat 1 ja 2).



Kuva 1. Lysimettilaitteiston sijoitus luonnontilaisen maanpinnan ja paljaan soramaan alapuolelle (A). Laitteiston toimintaperiaate (B), Kapulasillanmäki, Tuusula.

Lysimetriastian sisällä veden liikkumiseen vaikuttavat painovoima ja vettä maara-keisiin sitovat voimat (pintajännitys, adsorptio ym.). Painovoiman vaikutuksesta vesi liikkuu alaspäin, maara-keisiin sitovat voimat pitävät vettä paikoillaan tai nostavat sitä ylöspäin. Näiden aiheuttamat potentiaalit ovat vastakkaisia, itseisarvoltaan suurempi määrää veden liikesuunnan. Mitä vähemmän maassa on vettä, sitä voimakkaammin vesi on kiinnittynyt maara-keisiin. Lysimetriastiaan joutuva vajovesi nostaa vesipitoisuutta astian sisällä. Ympäristön pienempi vesikylläisyys toisaalta pyrkii tasoittamaan potentiaalieroja eli nostaa vettä astiasta ylöspäin. Veden liikettä alaspäin vastustaa myös adsorptio ja pintajännitys poistoletkun suulla. Mikäli astian reunat ovat liian matalat, vesi pääsee siitä pois, eikä virtaa poistoletkua myöten näytepulloon. Ensimmäiseen lysimettilaitteistoon Tuusulassa talvella -85 asennettiin kolme matalareunaista (10 cm) astiaa. Näistä ei yhdestäkään saatu näytteitä, vaikka niiden pinta-

ala oli suurempi kuin korkeareunaisten astioiden, joista saatiin parhaimmillaan satoja litroja vettä astiaa kohden vuodessa.

Taulukko 1. Kapulasillanmäen ja Lammin lysimetriastioiden etäisyys maanpinnasta.

Laitteisto	Astian yläreunan etäisyys maanpinnasta (m)
Kapulasillanmäki	
luonnontilainen	0,4
sora	0,4
Kapulasillanmäki	
luonnontilainen	0,11
"	0,16
"	0,30
"	0,80
"	1,20
"	2,50
sora	0,50
"	1,00
"	2,50
Kapulasillanmäki (täysikasvuisen männyn alla)	
luonnontilainen	0,30
"	0,40
"	0,80
sora	0,40
"	1,00
Lammi	
luonnontilainen	0,15
"	0,35
"	0,80
"	1,50
sora	0,15
"	1,00
Lammi	
luonnontilainen	0,30
"	0,30
"	0,90
"	1,20
sora	0,10
"	1,10

Kapulasillanmäen lysimetrikentällä on yhteensä 10 luonnontilaisen maan alla olevaa lysimetriastiaa ja 6 paljaan mineraalimaan alla. Lammin lysimetrikentällä on 8 astiaa luonnontilaisessa maassa ja 4 astiaa pelkän mineraalimaapeitteen alla. Lysimetriastiat on sijoitettu taulukon 1 mukaisille syvyyksille maan pinnasta. Vajovesinäytteiden lisäksi lysimetrikentillä otettiin näytteitä pohjavedestä muovisista havaintoputkista. Näytteet pumpattiin projektissa kehitetyllä uppopumpulla. Kapusillanmäen kentällä otettiin sadevesinäytteitä muovisella keräysastialla.

3.1.2 Tuusulan Palaneenmäen jäkihoitolysimetrit

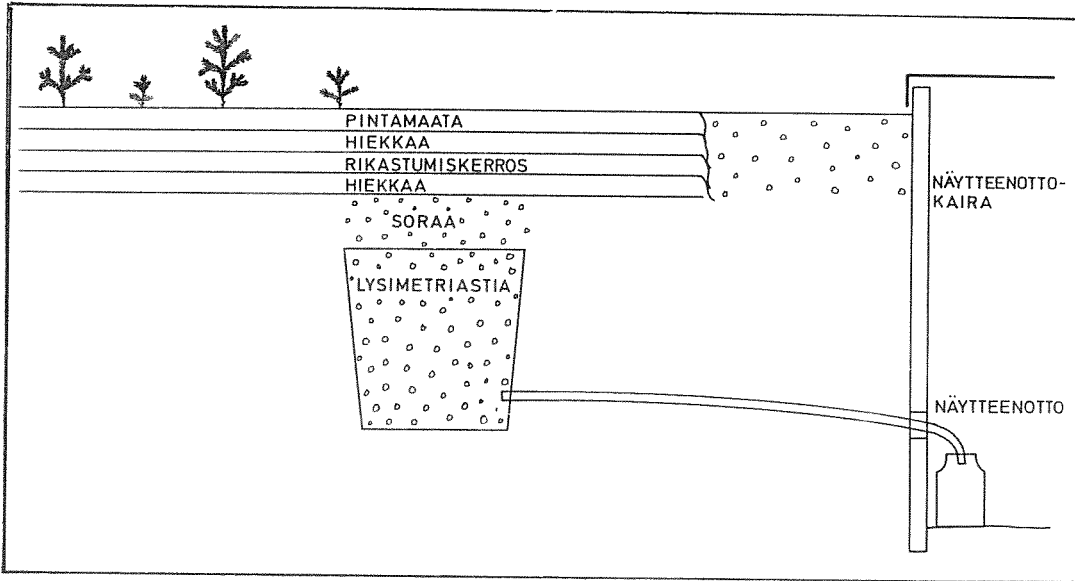
Keinotekkoisten pintarakenteiden vaikutusta vajoveden laatuun selvitettiin Palaneenmäen lysimetrikentällä Tuusulassa. Noin metrin syvyyteen sijoitettujen lysimetriastioiden päälle kasattiin soraa. Soran päälle tehtiin seuraavanlaisia pintarakenteita (kuva 2):

Rakenne 1: Soran päälle levitettiin hiekkaa noin 20 cm. Sen päälle levitettiin rautasakkapitoista hiekkaa noin 15 cm:n paksuudelta. Hiekka oli peräisin Palaneenmäen harjun lievealueelta läheltä maan pintaa. Rautasakkahiekan päälle levitettiin taas "puhdasta" hiekkaa noin 20 cm:n paksuudelta. Hiekka kuljetettiin Nukarin Patamäen soranottoalueelta. Hiekan päälle levitettiin vielä humuspitoista Palaneenmäen pintamaata noin 15 cm. Rakenteen tarkoituksena oli jäljellä podsolimaannoksen rakennetta eri horisontteineen.

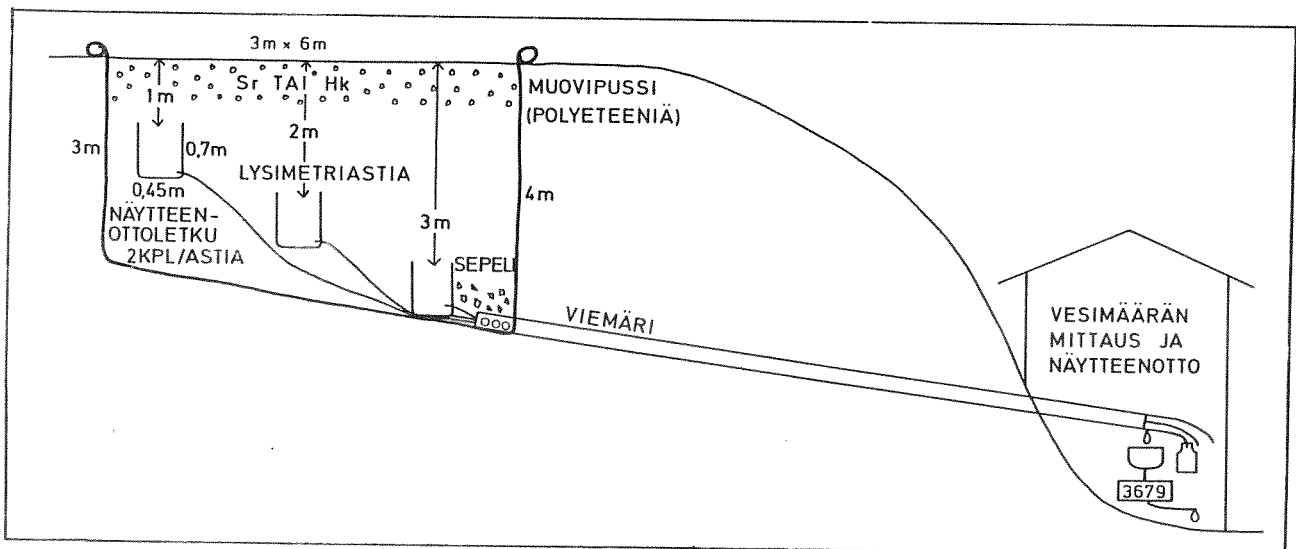
Rakenne 2: Tämä rakenne oli muutoin samanlainen kuin rakenne 1, mutta humuspitoinen pintamaa jätettiin pois. Rakenteita 1 ja 2 vertailemalla oli tarkoitus selvittää humuksen osuutta vajoveden laatuun.

Rakenne 3: Soran päälle levitettiin hiekkaa noin 20 cm paksu kerros. Tarkoitus oli jälleen edellisiin vertailemalla selvittää maannoksen eri horisonttien merkitystä sekä yleisesti hiekkakerroksen suojavaikutusta.

Lisäksi kahden lysimetriastian päälle levitettiin soran pesussa syntyynyttä lietettä, joka oli peräisin Nukarin Patamäestä. Tarkoitus oli selvittää lietteen soveltuvuutta sorakuoppaan levitettäväksi. Joidenkin lysimetriastioiden päälle eri rakenteissa istutettiin männyn ja harmaalepän taimia. Palaneenmäen kentällä otettiin myös sadevesinäytteitä.



Kuva 2. Jälkihoitolysimetrin rakenne ja toimintaperiaate. Palaneenmäki, Tuusula.

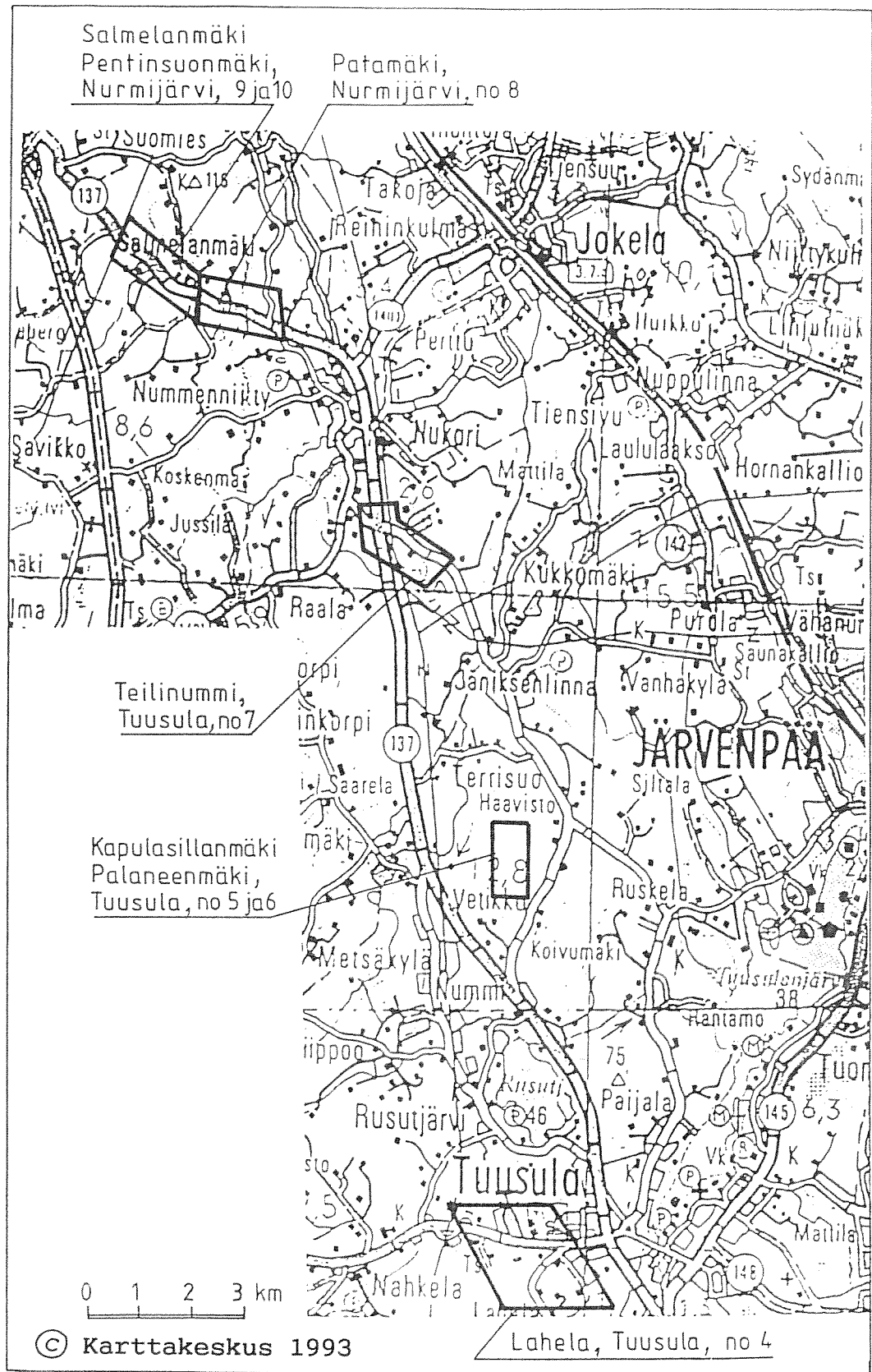


Kuva 3. Lysimettilaitteiston sijoitus muovipussiin paljaan sorapinnan alapuolelle, Nukari, Nurmijärvi.

3.1.3 Nurmijärven Nukarin lysimetrit

Nurmijärven Nukarin kylän Patamäen soranottoalueelle rakennettiin lysimettilaitteisto, joissa tutkittiin bakteerien, virusten, jäteveden, pölynsidontasuolan (CaCl_2) ja eräiden raskasmetallien kulkeutumista maaperässä. Laitteistossa (kuva 3) on suuri muovipussi 3 m x 6 m x 4 m, joka asennettiin neljä metriä syvään kuoppaan. Pussi täytettiin soralla ja lysimetriastiat asennettiin yhden, kahden ja kolmen metrin syvyyteen. Pussin pohjalta lähtee viemäri alemmalla tasolla olevaan näytteenottopisteeseen.

Viemärin sisällä kulkevat lysimetriastioiden näytteenottoletkut. Kokeissa käytettiin kahta laitteistoa, joista toisesta saatiin näytteitä kaikilta neljältä tasolta. Toisessa pussissa kahden ja kolmen metrin syvyydellä olevat lysimetriastiat eivät toimineet.



Kuva 4. Tutkimusalueiden sijainti. Yleiskartta. Tuusulan harjujakso.

3.2 Tutkimusalueet

3.2.1 Tuusulan ja Nurmijärven lysimetrikentät

Tutkimusalueet (kuva 4) sijaitsevat harjujaksolla, joka ulottuu Helsingin itäpuolelta Tuusulan ja Nurmijärven kuntien kautta Hyvinkäälle. Lysimetrikentät ovat Kapulasillanmäki ja Palaneenmäki nimisissä paikoissa Tuusulan Rusut-järven kylässä ja Patamäki nimisessä paikassa Nurmijärven Nukarin kylässä (kuvat 5 ja 6).

Tutkimusalueista Kapulasillanmäki on luonnontilainen harjukumpare. Se kohoaa ympäristöstä noin 20 metriä (60 – 80 m mpy). Puusto on täysikasvuista mäntymetsää. Kenttäkerroksen kasvillisuuden valtalajeja ovat puolukka, kanerva ja mustikka. Ruohojen ja heinien määrä on hyvin vähäinen. Harjuaines on lysimetrikentän kohdalla pääosin soraa ja hiekkaa, mutta myös hienorakeisten lajitteiden osuus on varsin suuri. Harjun rinteessä on rantaterasseja, joissa on pyöristyneitä lohkkareita hienorakeisessa matriksessa (Si, Hk). Kallioperä ja harjuaines alucella koostuu happamista kivilajeista. Tärkein kivilaji on kvartsi-maasälpägneissi.

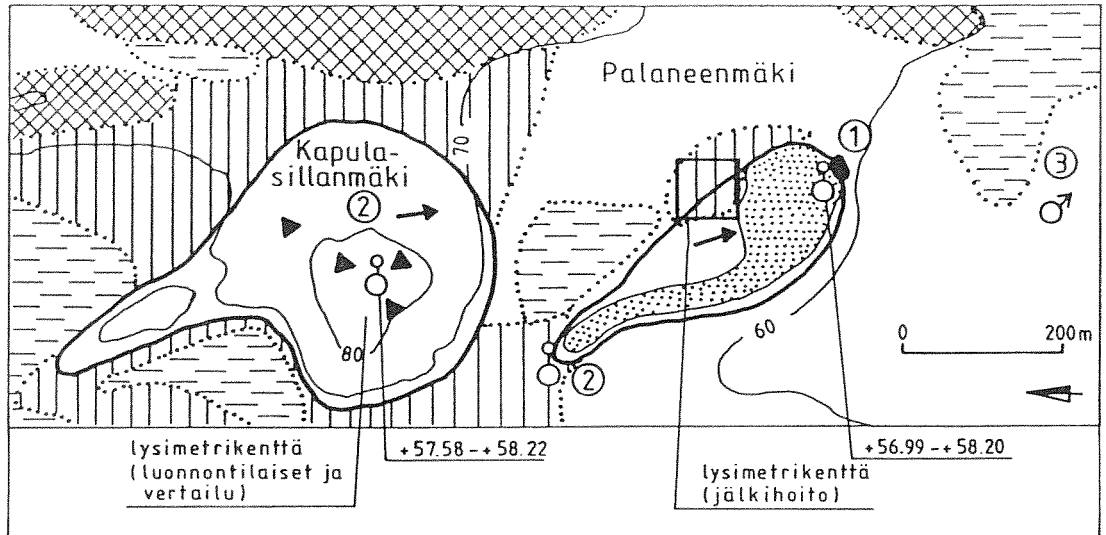
Maannos on silmämääräisesti arvioituna hyvin muodostunut. Kerrokset ovat ohuehkoja, mutta selvästi havaittavia, karikekerros on 4 – 5 cm paksu, humuskerros 1 – 2 cm, uuttumiskerros 3 – 5 cm ja rikastumiskerros 20 – 35 cm. Juuristo kulkee lähellä pintaa, joitakin yksittäisiä juuria lukuunottamatta.

Pohjavesi on lysimetrikentän kohdalla 18 – 20 metrin syvyydellä. Pohjaveden virtaussuunta on pohjoisesta etelään Kapulasillanmäestä Palaneenmäen suuntaan. Kapulasillanmäen – Palaneenmäen alue rajoittuu kallio-, savikko- ja moreenialueisiin ja on siten varsin itsenäinen pohjaveden muodostumisalue. Tutkimusalueen pohjoispuolella olevalla Terrisuolla ja noin kilometrin päässä sijaitsevalla Terrisuon kaatopaikalla ei ole todettu olevan vaikutusta alueen pohjaveteen. Kapulasillanmäellä kulkee vähän liikennöity metsätie.

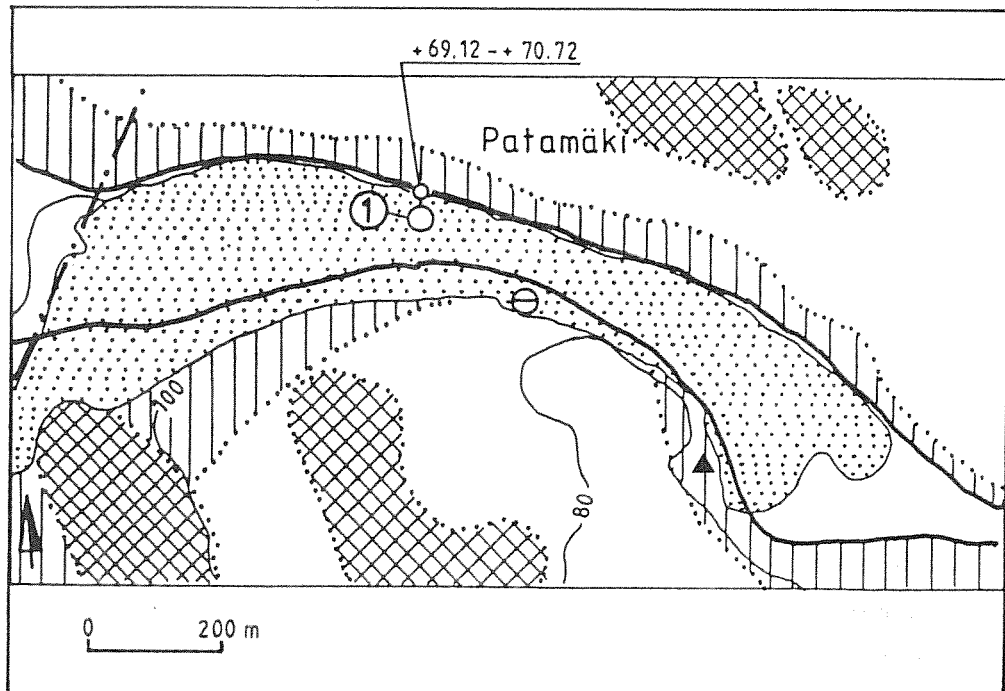
Palaneenmäen erottaa Kapulasillanmäestä pieni suoalue. Suo on savilinssin päällä. Linssin alla on hiekkaa. Kapulasillanmäen ja Palaneenmäen pohjavesiyhteys kulkee tätä kautta. Tutkimuksen alkaessa harjussa oli pieni, vanha sorakuoppa. Tutkimusai- kana aloitettiin täysimittainen soranotto. Jälkihoitolysimetrit on sijoitettu vanhan ottoalueen reunalle. Lysimetreissä käytettiin pintamateriaaleina harjun ytimen soraa, lievealueille saostuneita rautasakkoja ja ottoalueen sivuun siirrettyjä pintamaita. Harjuaines on samankaltaista kuin Kapulasillanmäessä.

Nukarin lysimetrikenttä sijaitsee laajalla soranottoalueella Nurmijärven Nukarin kylän Patamäessä. Lysimetreissä käytettiin syvältä harjun ydinosasta kaivettuja aineksia.

Kallioperä alueella on graniittia, kiillegneissia ja pyrokseenigneissia. Tummieminaeralien osuus harjuaineuksessa on suurempi kuin Tuusulan tutkimusalueilla. Alueella on pesty soraa ja pesulietettä on levitetty ottoalueelle. Hyvinkää –Hyrylä maantie kulkee ottoalueen vieressä.



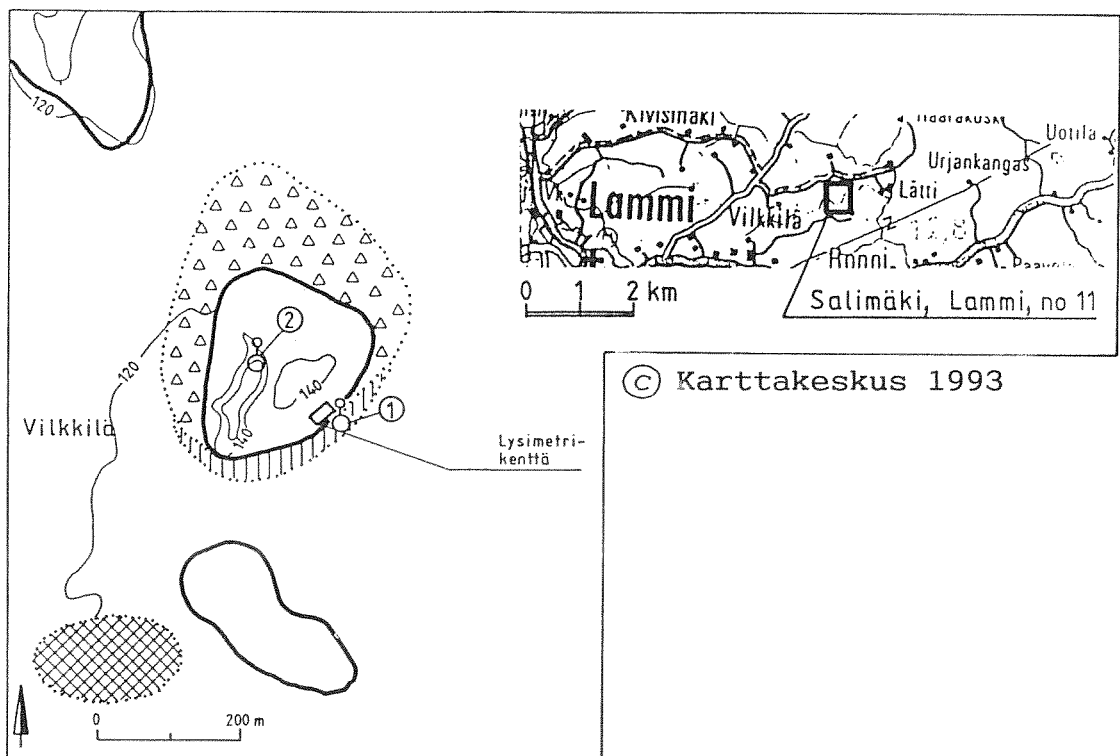
Kuva 5. Hydrogeologinen kartta ja näytteenottopisteiden sijainti. Kapulasillanmäki, Tuusula.



Kuva 6. Hydrogeologinen kartta ja näytteenottopisteiden sijainti. Patamäki, Nurmijärvi.

3.2.2 Lammin lysimetrikenttä

Tutkimusalue on II Salpausselän vyöhykkeellä Lammin kirkonkylän itäpuolella Pääjärven ja Kuurikanjärvien kautta kulkevan harjujakson Salivuori -nimisellä kumpareella (kuva 7), joka kohoaa ympäristöstä noin 25 metriä (120 –145 m mpy). Puusto on kuusivaltaista ja aluskasvillisuudessa on paljon heinää. Harjuaines on ydinosassa soravaltaista ja hyvin lajittunutta. Lysimetrikentän kohdalla aines on hiekkaa. Kallioperä on alueella pääasiassa kiillegneissiiä. Tutkimusalueen läheisyydessä, mannerjäätikön tulosuunnassa, on kiilleliuskeessa välikerroksina rikki- ja magneetti-kiisua.



Kuva 7. Hydrogeologinen kartta ja näytteenottopisteiden sijainti. Salimäki, Lammi.

Maannos on silmämääräisesti paksu (yli 1/2 m) ja sen aines moreenimaista, voimakkaasti rapautunutta. Se on väriltään tummanruskea ja uuttumiskerros erottuu heikosti. Rauta- ja mangaanisaostumia on paljon myös maannoksen alapuolella, varsinkin syvälle ulottuvien puunjuurten ympärillä. Maannoskerroksista karike- ja humuskerros yhdessä on 5 – 8 cm paksu, uuttumiskerros 6 – 7 cm, rikastumiskerroksen humuspitoinen yläosa (Bh-horisontti) 6–7 cm ja alapuolinen rikastumiskerros 30–40 cm. Harjun sivuitse kulkee vähän liikennöity tie maalaistaloon. Lysimetrikenttä on tien vieressä noin 120 m mpy. Pohjavesi on havaintoputkessa noin 10 metriä syvällä.

3.3 Näytteenotto

Vajovesi- ja sadevesinäytteitä otettiin sulan maan aikana kerran viikossa. Pohjavesinäytteet otettiin vähintään kerran kuukaudessa. Pohjavesinäytteet pumpattiin litran polyeteenipulloon muovisesta havaintoputkesta. Muut näytteet saatiin pulloon suoraan laitteistojen poistoletkuista. Vesimäärät mitattiin ylivuotoastioista.

Taulukko 2. Laskeumasta (SV), lysimetrinäytteistä (LV) ja pohjavedestä (PV) (Lammi ja Kapulasillanmäki) tehdyt määritykset ja niiden lukumäärä. Laboratoriomääritykset on tehty Geologian tutkimuskeskuksessa.

Laatumuuttuja	yksikkö	SV	LV	PV
Vesimäärä/-pinta	l, mm, cm	105	1878	128
Sähkönjohtavuus	mS/m 25 °C	119	2087	229
Alkaliteetti	mekv/l	118	2037	230
Bikarbonaatti	mg/l	118	2037	230
pH		119	2089	229
Väriluku	Pt mg/l	104	2006	218
KMnO ₄ -luku	mg/l	114	1918	229
Nitraatti	mg/l	116	1974	222
Kloridi	mg/l	116	1476	226
Sulfaatti	mg/l	117	2073	146
Piihappo	mg/l	117	2015	226
Kalsium	mg/l	119	2083	232
Magnesium	mg/l	119	2084	232
Kokonaiskovuus	mg/l	119	2083	232
Natrium	mg/l	119	2084	232
Kalium	mg/l	119	2084	232
Rauta	mg/l	119	2084	232
Mangaani	mg/l	119	2084	232
Sinkki	µg/l	117	2084	232
Kupari	µg/l	117	2083	232
Nikkeli	µg/l	117	2083	232
Lyijy	µg/l	117	2083	232
Kadmium	µg/l	117	2083	232
Kromi	µg/l	117	2083	232
Koboltti	µg/l	117	2083	232
Alumiini	µg/l	117	2082	232

3.4 Määritykset

Vesinäytteistä määritetyt ominaisuudet ja määritysten lukumäärä ovat taulukossa 2. Määritykset tehtiin Geologian tutkimuskeskuksen kemian laboratoriossa. Sähkönjohtavuus ja pH mitattiin laboratoriossa mittareilla. Väri, KMnO_4 -luku, alkaliteetti, Cl, SiO_2 ja NO_3 pitoisuudet määritettiin standardien mukaisesti (Anon 1969, Anon 1980). SO_4 määritettiin käyttäen Geologian tutkimuskeskuksessa kehitettyä epäsuoraa AAS-menetelmää. AAS:n liekkimenetelmällä määritettiin Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn ja Zn sekä grafiittiuunimenetelmällä Cu, Ni, Pb, Cd, Cr, Co ja Al.

Pohjavesinäytteistä tehtiin lisäksi vähintään neljä kertaa vuodessa täydellisempi analyysi. Edellisten määritysten lisäksi määritettiin kentällä (suluissa lukumäärä): väri (125), sameus (126), lämpötila (137), happipitoisuus (100), hiilidioksidipitoisuus (112), pH (114) ja laboratoriossa happipitoisuus (35), hiilidioksidipitoisuus (41), sameus (33), kiintoaine (42), kokonaistyyppi (35), nitriitti (35), ammonium (35), kokonaisfosfori (31) ja bakteerimäärityksiä (96). Osa näistä määrityksistä tehtiin Helsingin vesi- ja ympäristöpiirin laboratoriossa. Pohjavesianalyysijä käsitellään tarkemmin projektin aluetutkimusten yhteydessä (Hyypä, Penttinen 1993).

OSA II TULOKSET

4 PERUSTUTKIMUS TUUSULA, KAPULASILLANMÄKI

4.1 Sähkönjohtavuus

Laskeuman, vajo- ja pohjaveden tärkeimmät elektrolyytit ovat anionit bikarbonaatti, nitraatti, kloridi ja sulfaatti ja kationit kalsium, magnesium, natrium ja kalium. Laskeumassa ja vajovedessä maaperän pintaosissa on lisäksi mm. ammoniumia ja orgaanisia elektrolyyttejä.

4.1.1 Laskeuma

Laskeumassa on mukana sadevesi (märkä laskeuma) sekä sadeveteen keräysastiaan kertyneestä pölystä liuenneet aineet (kuiva laskeuma).

Taulukko 3. Elektrolyyttien keskinäiset suhteet laskeumassa Kapulasillanmäessä (pitoisuus mg/l ja mekv/l).

	minimi	mediaani	maksimi	alle määrittäjärajan %
SO ₄ ²⁻	1,00/0,021	4,05/0,084	26,00/0,541	0
NO ₃ ²⁻	<1,00/<0,016	1,10/0,018	7,10/0,115	35
Cl ⁻	1,00/0,028	1,60/0,045	3,80/0,107	0
HCO ₃ ⁻	<0,61/<0,0101	3,05/0,050	2,80/0,210	24
Anionit yht.	0,075	0,197	0,973	
Ca ²⁺	<0,50/<0,025	0,70/0,035	6,80/0,339	15
Mg ²⁺	<0,05/<0,004	0,17/0,014	0,66/0,054	4
Na ⁺	<0,50/<0,022	0,50/0,022	2,10/0,091	43
K ⁺	0,50/<0,013	0,60/0,015	2,10/0,054	28
Kationit yht.	0,064	0,086	0,538	

Sähkönjohtavuuden minimi-, mediaani- ja maksimi-arvot Kapulasillanmäessä olivat 0,8, 2,9 ja 10,9 mS/m 25 C ja Palaneenmäessä 1,3, 3,0 ja 19,5 mS/m 25 C. Järvisen (1986) mukaan keskimääräisen kuukausilaskeuman sähkönjohtavuus Sipoon Martinkylässä 1971 – 1982 oli 3,2 mS/m 25 C. Korkeimpiin sähkönjohtavuusarvoihin liittyi korkea nitraattipitoisuus ($r = 0,88$) ja/tai erityisesti korkea sulfaattipitoisuus ($r = 0,53$). Anioneista laskeumassa oli selvästi eniten sulfaattia ja kationeista kalsiumia (ammoniumia ei ole analysoitu). Elektrolyyttien keskinäiset suhteet ilmenevät taulukosta 3. Taulukosta puuttuu ammoniumin lisäksi orgaanisten elektrolyyttien osuus.

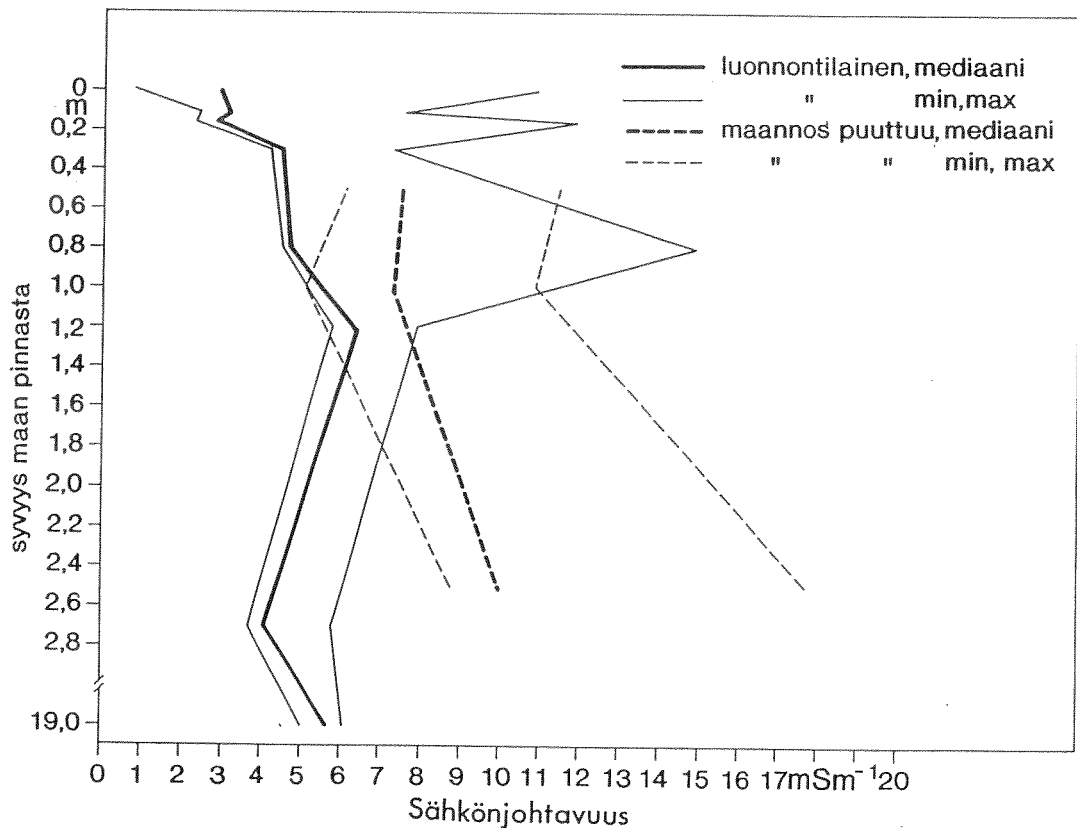
4.1.2 Luonnontilainen vajovesi

Maannoksen yläosassa (humus- ja huuhtoutumishorisontit 0 – 0,2, 0 – 0,3 m) sähkönjohtavuuden mediaaniarvo oli lähellä laskeuman mediaaniarvoa. Bikarbonaatin, kloridin, sulfaatin, kalsiumin, magnesiumin, natriumin ja kaliumin pitoisuudet nousivat, ja nitraatin ja orgaanisen aineksen (KMnO₄-luku) pitoisuudet laskivat laskeumaan verrattuna. Ilmeisesti myös ammoniumin pitoisuus pieneni tällä välillä (kuvat 8, 9 ja 10).

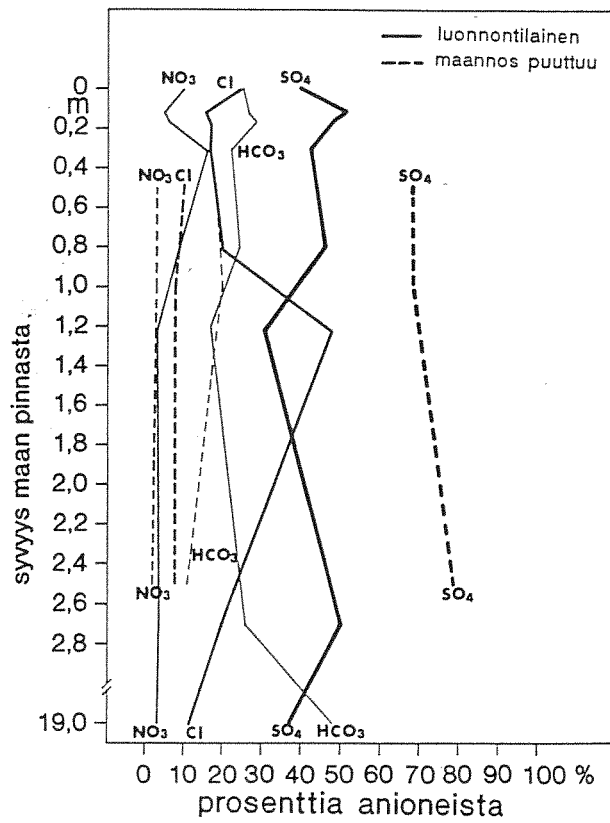
Rikastumishorisontissa (0,2 / 0,3 – 1,2 m) sähkönjohtavuus oli korkeampi kuin pintahorisonteissa ja alempana (max. 1,2 m) (kuva 11). Maannoksen alapuolella välillä 1,2 – 2,7 m vajovesi muuttuu pohjaveden kaltaiseksi bikarbonaattipitoisuuksia

lukuunottamatta. Sähkönjohtavuus pieneni kloridin, nitraatin ja kalsiumin pitoisuuksi-
en pienetessä. Bikarbonaatin ja sulfaatin pitoisuudet nousivat. Välillä 2,7 m – 19 m
(pohjavesi) bikarbonaatin mediaanipitoisuus nousi noin kaksinkertaiseksi. Kalsiumin,
magnesiumin ja natriumin pitoisuudet nousivat bikarbonaatin mukana.

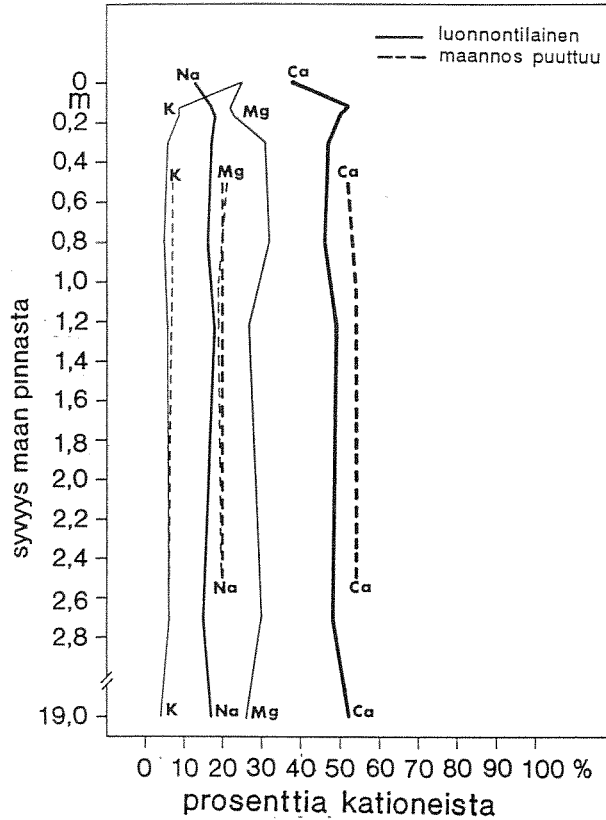
Sähkönjohtavuuden aikakuvaajissa oli pienipiirteistä vaihtelua sekä pitoisuuksien
nousujaksoja joissa sähkönjohtavuus nousi jopa monikymmenkertaiseksi perustasosta.
Selviä pitempiaikaisia muutossuuntia kuvaajissa ei ollut. Sähkönjohtavuuden
pienipiirteisestä vaihtelusta voitiin erottaa ainakin seuraavat seikat: keväisin
sulamisvesien mukana huuhtoutui elektrolyyttejä. Huuhtoutuvia aineita olivat mm.
bikarbonaatti, nitraatti, kloridi, sulfaatti, kalsium, natrium, kalium ja orgaaninen
aines. Vuosien välillä oli melko suuria eroja. Rakentamisvuotena keväthuuhtoumat
olivat selviä ja mahdollisesti osaksi rakentamisen aiheuttamia häiriöitä. Alkukesästä
sähkönjohtavuus aleni ja syksyä kohti nousi. Kuivien aikojen jälkeen pitoisuuksissa
oli pientä nousua ja runsaiden sateiden aikana joko nousua tai laskua. Sateisiin rea-
goivia aineita olivat bikarbonaatti, nitraatti, kalsium, magnesium ja orgaaninen aines.
Nämä pienipiirteiset vaihtelut eivät olleet kovin selkeitä ja suuret pitoisuuksien
nousujaksot häiritsivät tulkintaa. Maannoksen alapuolella (2,5 m) sähkönjohtavuus
pysyi hyvin muuttumattomana.



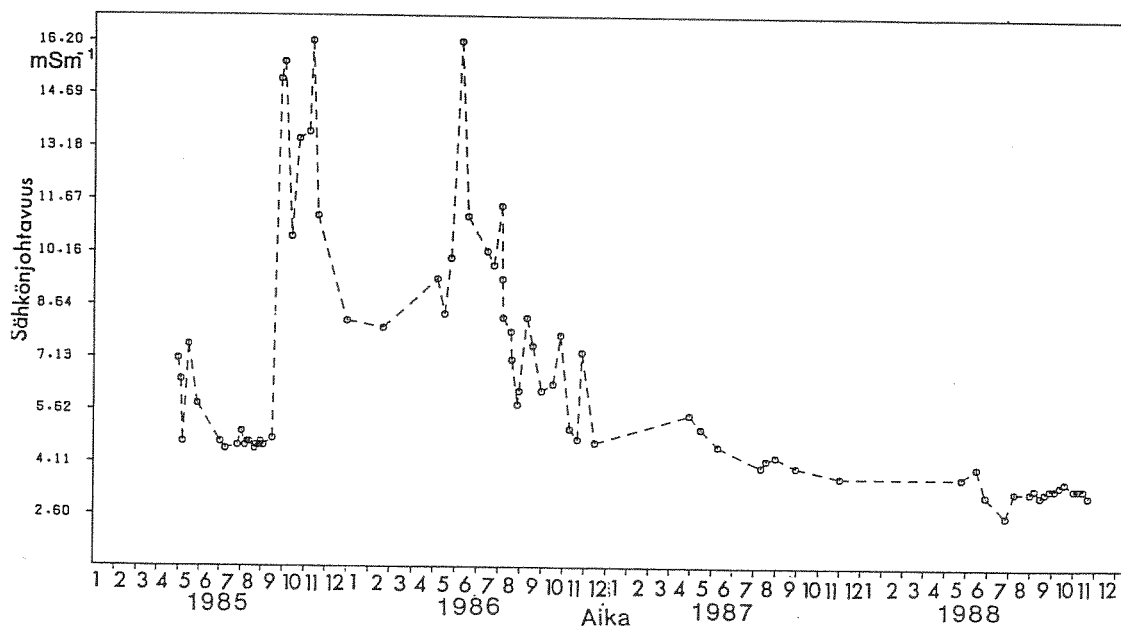
Kuva 8. Vajoveden sähkönjohtavuus eri syvyyksillä (0 m = laskeuma, 19 m =
pohjavesi).



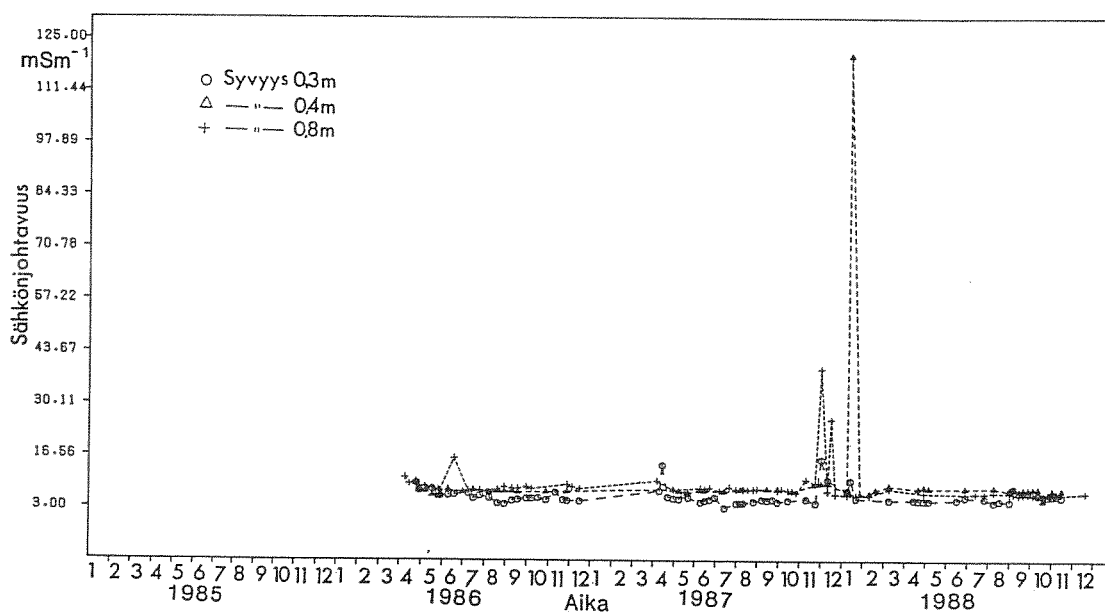
Kuva 9. Vajoveden pääkationien suhteelliset pitoisuudet.



Kuva 10. Vajoveden pääanionien suhteelliset pitoisuudet.



Kuva 11. Vajoveden sähkönjohtavuus rikastumishorisontissa luonnontilaisessa lysimetrissä (0,4 m).



Kuva 12. Vajoveden sähkönjohtavuus luonnontilaisessa lysimetrissä.

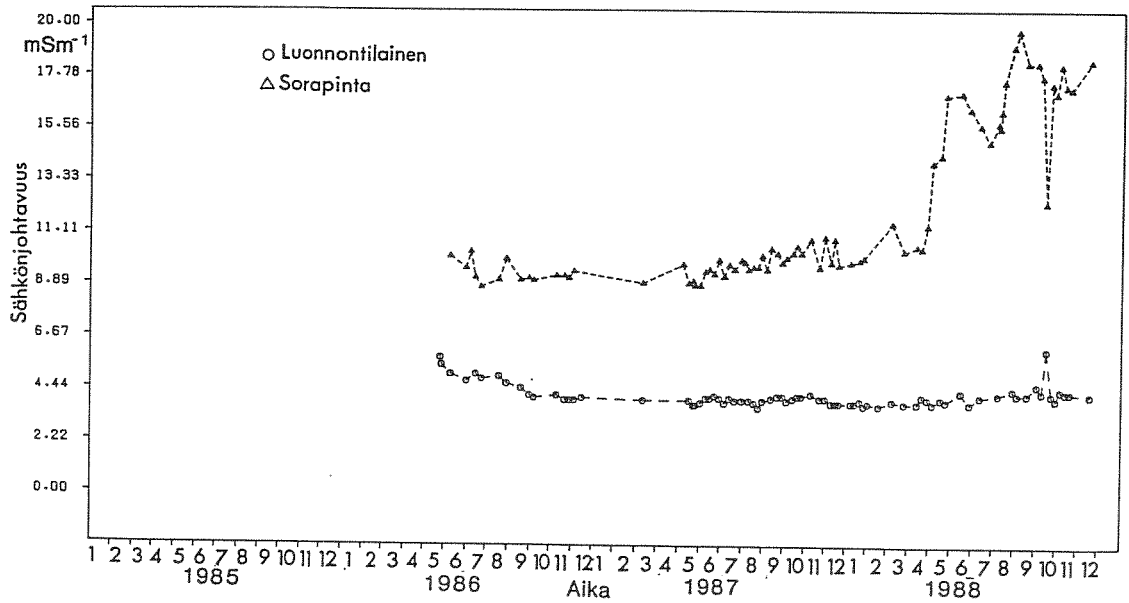
Maannoshorisonteissa vajoveden sähkönjohtavuus nousi ajoittain suuresti. Seuraavassa lueteltuna tärkeimmät pitoisuuksien nousujaksot:

1. Lysimetrissä H334B (0,4 m:n syvyydellä, kuva 11) nousivat sähkönjohtavuus ja orgaanisen aineksen pitoisuus syksyllä 1985, KMnO_4 -luku oli 15 – 20 – kertainen normaaliin verrattuna. Nousua oli syyskuussa edeltänyt lämpötilan

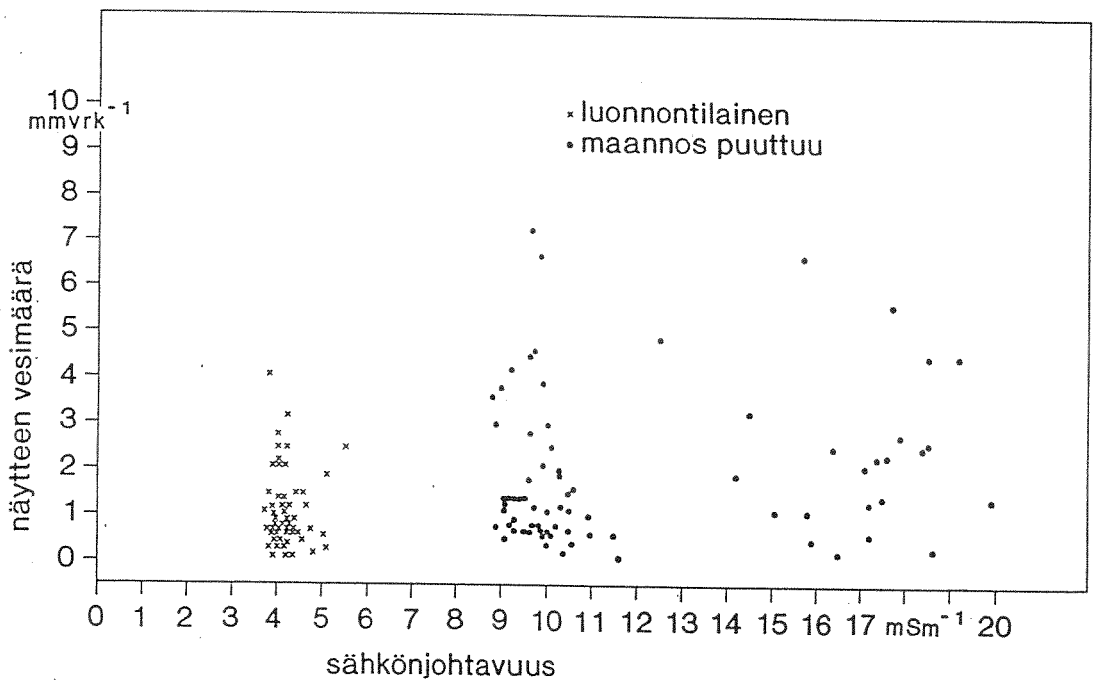
lasku lähelle nollaa. Pitoisuuksien nousu tapahtui kahdessa jaksossa, joiden välillä oli lämmin sääjakso. Ainakin toisen huipun aikana oli runsaita sateita. Samanaikaisesti orgaanisen aineksen kanssa nousivat kloridi (20-kertainen pitoisuus), sulfaatti (5 - 10-kertainen pitoisuus), emäskationit ja alumiini (30 - 40-kertainen pitoisuus). Vähäisempää nousua oli piihapon ja nitraatin pitoisuuksissa. Raskasmetalleista kohosivat raudan, kuparin ja nikkelin ja vähäisemmin sinkin, lyijyn, kadmiumin, kromin ja kobolttin pitoisuudet. Bikarbonaattipitoisuus oli edellä mainittujen huippujen aikana huomattavasti pienempi kuin sitä aikaisemmin.

2. Edellistä jaksoa seurasi nitraattipitoisuuksien nousu vuoden 1986 aikana. Samanaikaisesti nitraatin nousun kanssa bikarbonaatin pitoisuus ja pH olivat alhaisia. Kloridin ja sulfaatin pitoisuudet laskivat, kun nitraatin pitoisuus nousi. Piihapon pitoisuus nousi. Emäskationien pitoisuudet nousivat ja laskivat samassa rytmissä nitraatin kanssa. pH:n laskiessa alumiinipitoisuus nousi Kapulasillanmäen aineiston korkeimpaan arvoon 1,3 mg/l. Raskasmetalleista happamuuteen reagoivat selvästi mangaani, kadmium ja koboltti ja vähemmän sinkki ja nikkeli. Orgaanisen aineksen pitoisuus ei noussut. Tässä jaksossa nitraattipitoisuuden nousu aiheutti vajoveden voimakasta happamoitumista.
3. Lysimetreissä H336A-C (0,3, 0,4, 0,8 m) sähkönjohtavuus nousi syksyllä 1987. Näytteiden pH, bikarbonaatti-, sulfaatti-, piihappo-, natrium- ja kaliumpitoisuudet nousivat. Voimakkaimmillaan ilmiö oli nähtävissä 13.1.1988 lysimetrissä H336B (kuva 12). Sähkönjohtavuus oli 121 mS/m, bikarbonaatti 542,9 mg/l, pH 9,1, sulfaatti 160,0 mg/l, piihappo 21,5 mg/l, natrium 220 mg/l ja kalium 250 mg/l. Kun pH oli 9,1 oli mukana myös hydroksidia, joka on tullut titrauksesa HCO_3^- :na mukaan. Vähäisempää nousua oli orgaanisen aineksen määrässä (KMnO_4 -luku) ja alumiinipitoisuudessa. Raskasmetalleista kromipitoisuudet kohosivat suhteellisesti eniten (max 48 $\mu\text{g/l}$ lysimetrissä H336C 1.12.87) ja kupari-, nikkeli- ja kobolttipitoisuudet vähäisemmin. Ilmiö oli ajoittain lievempänä havaittavissa myös muissa lysimetreissä, myös paljaan sorapinnan alla, keväällä, syksyllä tai talvella, veden ollessa kylmää.
4. Äkilliset, lyhytaikaiset nitraatin ja sulfaatin pitoisuuksien nousupulssit aiheuttivat pH:n ja bikarbonaatin laskua ja kalsiumin, magnesiumin ja alumiinin nousua.

Maannoksen alapuolella ei suuria pitoisuuksien nousujaksoja havaittu.



Kuva 13. Vajoveden sähkönjohtavuus luonnontilaisessa ja sorapintaisessa lysimetrissä 2,5 metrin syvyydessä.



Kuva 14. Sähkönjohtavuuden riippuvuus näytteen vesimäärästä 2,5 metrin syvyydellä. Yli 12 mS/m sähkönjohtavuudet johtuvat nitraatin pitoisuustason noususta vuonna 1988.

4.1.3 Vajovesi paljaan sorapinnan alla

Maannoksen ja kasvien puuttuessa elektrolyyttien huuhtoutuminen lisääntyi luonnontilaan verrattuna. 0,5 m:n syvyydessä sähkönjohtavuuden mediaaniarvo oli noin 2,5 kertainen laskeumaan verrattuna. Metrin syvyydessä sähkönjohtavuus hiukan pieneni. Alaspäin mentäessä sähkönjohtavuus jälleen nousi, toisin kuin luonnontilassa.

Maan pinnan ollessa paljas pienipiirteiset vaihtelut ulottuivat syvemmälle kuin luonnontilassa. 2,5 m:n syvyydessä veden sähkönjohtavuus vaihteli paljon enemmän kuin luonnontilassa. Sulamisvesien ja sateiden vaikutukset näkyivät selvästi. Sähkönjohtavuuden heilahtelut aiheutuivat pääasiassa sulfaatin ja nitraatin pitoisuuksien vaihteluista. Emäskationeista kalsium ja magnesium seurasivat nitraatin pitoisuuden muutoksia. Sulfaatin pitoisuuden muutoksia seurasivat kaikki emäskationit.

Sähkönjohtavuuden suurimmat arvot aiheutuivat nitraattipitoisuuden noususta. Lysimetrissä H335X (0,5 m) näkyi merkkejä nitraatin huuhtoutumisesta keväällä 1987. Alkukeväästä nitraatti hävisi, mutta pitoisuudet nousivat taas heinäkuun puolivälissä. Puoli metriä syvemmällä nitraatti ilmaantui syyskuun puolivälin jälkeen ja 2,5 m:ssä lokakuun alussa (ks. nitraatti). Nitraattipitoisuuden kasvaessa myös emäskationit lisääntyivät ja pH laski. Merkittävä ero luonnontilaan verrattuna oli se, että useimpien elektrolyyttien (erityisesti nitraatin ja sulfaatin) ja muiden aineiden huuhtoutuminen oli 2,5 m:n syvyydessä paljon suurempaa kuin vastaavalla syvyydellä luonnontilassa ja kasvoi syvyyden kasvaessa. Sähkönjohtavuudet ja siten usean ionin pitoisuudet olivat tällöin monikertaisia verrattuna luonnontilaisen vajoveden vastaaviin lukuihin.

4.1.4 Vajoveden määrän vaikutus sähkönjohtavuuteen

2,5 m:n syvyydellä lysimetreistä saatujen näytteiden vesimäärän ja sähkönjohtavuuden välillä ei ollut selvää yhteyttä (kuva 14). Elektrolyyttipitoisuudet eivät pienenneet vesimäärän kasvaessa.

4.2 Bikarbonaatti/alkaliteetti

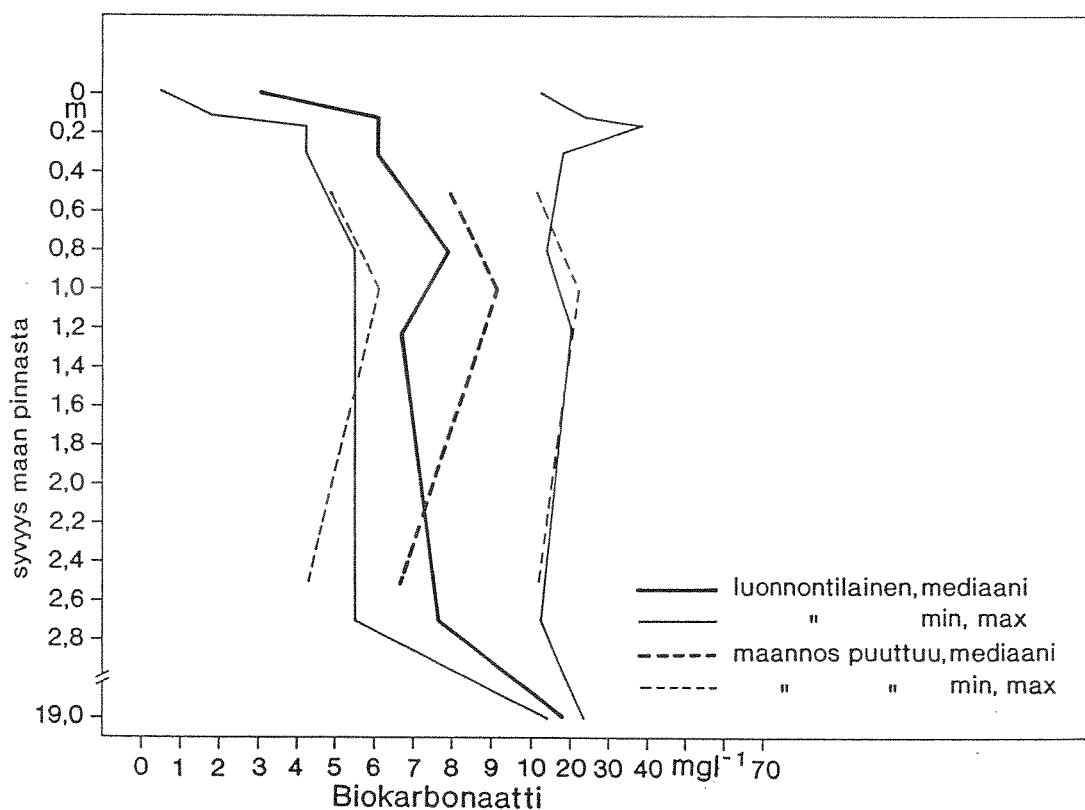
Bikarbonaatti on määritetty alkaliteettititrauksella. Erityisesti maannoksen pintahorisonttien (0,3 – 0,4 m:n syvyyteen) ja laskeuman alkaliteetissa voi olla mukana myös muiden erityisesti orgaanisten heikkojen happojen aiheuttamaa alkaliteettiä, joten bikarbonaattipitoisuus on näissä horisonteissa pienempi kuin titraustulos edellyttäisi.

4.2.1 Laskeuma

Laskeumanäytteiden alkaliteetti/bikarbonaattipitoisuus oli pieni, mikä kuvastaa vahvojen happojen suurta osuutta laskeumassa. Alkaliteetin minimi-, mediaani- ja maksimi-arvot olivat Kapulasillanmäessä < 0,01, 0,05 ja 0,21 mekv/l ja Palaneenmäessä < 0,01, < 0,01 ja 0,06 mekv/l. Alle määrittämissä 0,01 mekv/l oli määrityksistä Kapulasillanmäessä 24 % (12/50) ja Palaneenmäessä 61 % (14/23). Ero johtuu siitä, että Kapulasillanmäen keräysastia oli metsän keskellä ja Palaneenmäen astia aukeammassa paikassa.

4.2.2 Luonnontilainen vajovesi

Humushorisontin alla bikarbonaatin pitoisuuden mediaaniarvo oli noin kaksinkertainen sadeveteen verrattuna. 0,8 metrin syvyydessä pitoisuudessa oli maksimikohta. Muuten pitoisuus kasvoi tasaisesti aina pohjaveteen asti. Bikarbonaattipitoisuuden vaihtelut olivat suuria myös 2,5 metrin syvyydessä. Pohjavedessä vaihtelut olivat pieniä (kuva 15).



Kuva 15. Vajoveden bikarbonaattipitoisuus eri syvyyksillä (0 m = laskeuma, 19 m = pohjavesi).

Välillä kesäkuun alusta lokakuun loppuun 1987 bikarbonaatin määrä (vesimäärä x pitoisuus) oli 2,5 metrin syvyydessä vähintään 1,7 kertainen laskeumaan verrattuna.

Vajoveden bikarbonaattipitoisuudessa tapahtui jatkuvasti äkillisiä muutoksia. Pitoisuuksien huippuarvot (max 542,9 mg/l) mitattiin puun alla sijaitsevassa luonnontilaisessa lysimetrissä H336. Vuodesta 1985 vuoteen 1986 tapahtui lysimetrissä H334B (0,4 m) selvä bikarbonaatin pitoisuustason aleneminen samalla kun nitraattipitoisuus nousi ja pH laski. Muita selviä pitoisuustason muutoksia ei näytteissä ollut havaittu.

4.2.3 Vajovesi paljaan sorapinnan alla

Maannoksen puuttuessa bikarbonaatin mediaanipitoisuus ja pitoisuusvaihtelut olivat samaa suuruusluokkaa kuin luonnontilassa. Pitoisuuden maksimi oli yhden metrin syvyydessä. Tämän alapuolella pitoisuus laski toisin kuin luonnontilaisessa lysimetrissä.

Bikarbonaatin määrä näytteissä aikavälillä kesäkuu –lokakuu 1987 pysyi tasaisena syvyyden kasvaessa. 2,5 metrin syvyydessä oli näytteissä bikarbonaattia vähintään 2,9 kertaa laskeuman määrä.

4.3 pH-luku (happamuus)

4.3.1 Laskeuma

Laskeumanäytteiden pH-arvot olivat alhaisia. Kapulasillanmäessä pH:n minimi-, mediaani- ja maksimi-arvot olivat 3,8, 4,3 ja 6,0 ja Palaneenmäessä 3,8, 4,2 ja 4,6. pH-arvo 5 ylittyi vain yhdessä näytteessä (1/74). Järvisen (1986) mukaan keskimääräinen kuukausilaskeuman pH-arvo Sipoon Martinkylässä vuosina 1971 – 1982 oli 4,6. Tämän mukaan keskimääräinen vetyionipitoisuus näytteissä oli 1,8 – 2,6 -kertainen Järvisen tuloksiin verrattuna.

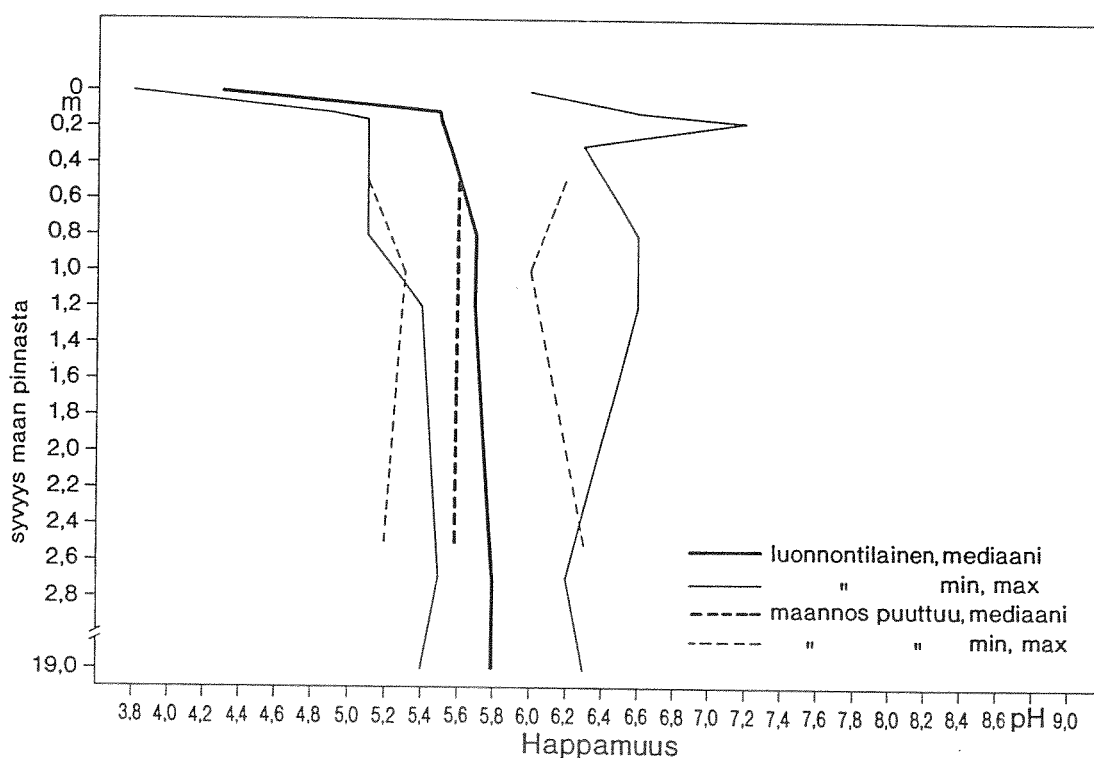
4.3.2 Luonnontilainen vajovesi

pH:n mediaaniarvo nousi humushorizontin alapuolella laskeuman 4,3:sta 5,5:een eli 1,2 pH-yksikköä. Humushorizontin alapuolisessa maaperässä muutos oli noin 19 metrin matkalla pohjaveteen vain 5,5:stä 5,8:aan eli 0,3 yksikköä (kuva 16). 2,5 metrin syvyydessä pH oli sama kuin pohjavedessä. Alhaisimmat pH-arvot mitattiin välillä 0 – 0,8 m (pH 4,8 lysimetrissä H334B [0,4 m]).

Lysimetrinäytteiden pH oli tutkimusaikana selvässä laskusuunnassa. Ensimmäisessä vuonna 1985 asennetussa lysimetrissä H334B (0,4 m) (kuva 17) oli näytteiden pH:n

mediaaniarvo vuonna 1985 5,5. Seuraavana vuonna arvo laski 5,1:een nitraattipitoisuuden nousun seurauksena. Myös alumiini- ja emäskationipitoisuudet nousivat. 1987 nitraattipitoisuus laski ja pH:n mediaaniarvo oli 5,25. 1988 pH oli 5,0 ja samalla emäskationien pitoisuudet vajovedessä pienenevät.

Muissa lysimetreissä pH:n mediaaniarvot laskivat vuodesta 1986 vuoteen 1988 0,1 – 0,3 yksikköä. Tutkimusaikana myös pohjaveden pH laski nopeasti (kuva 18).



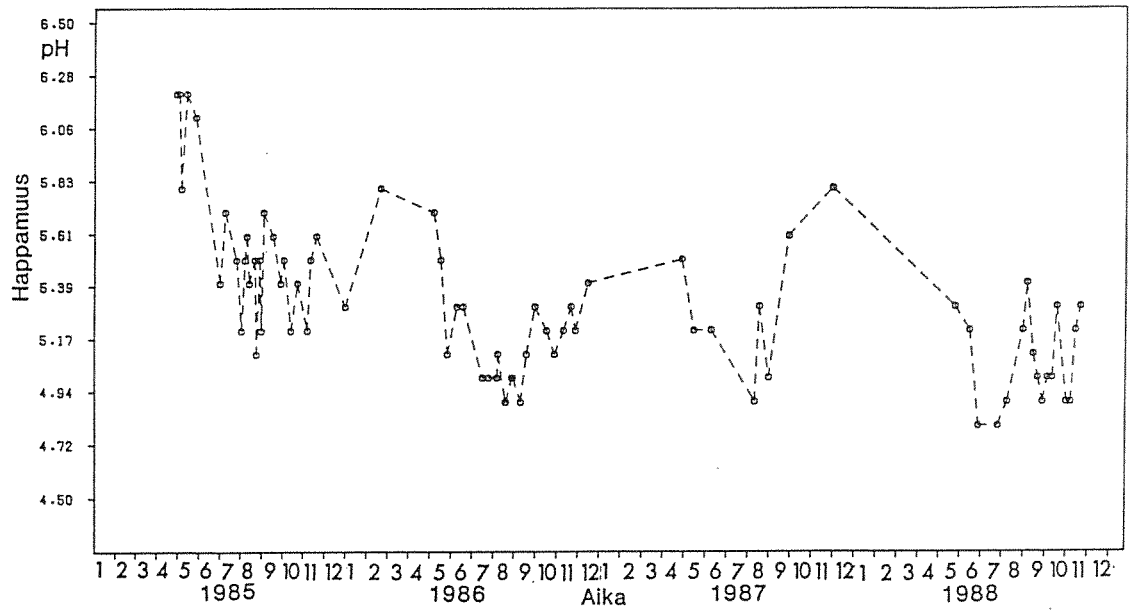
Kuva 16. Vajoveden pH eri syvyyksillä (0 m = laskeuma, 19 m = pohjavesi).

Vajoveden pH vaihteli erityisesti pintahorisonteissa. pH:lla oli selvä vuodenaikaisrytmi. Keväällä pH-taso oli korkea. Sen jälkeen seurasi nopea lasku ja pH oli alhaisimmillaan kesällä tai alkusyksyllä kohoten taas myöhemmin syksyllä. Alhaisimmat pH-arvot osuivat usein sateisiin kuukausiin.

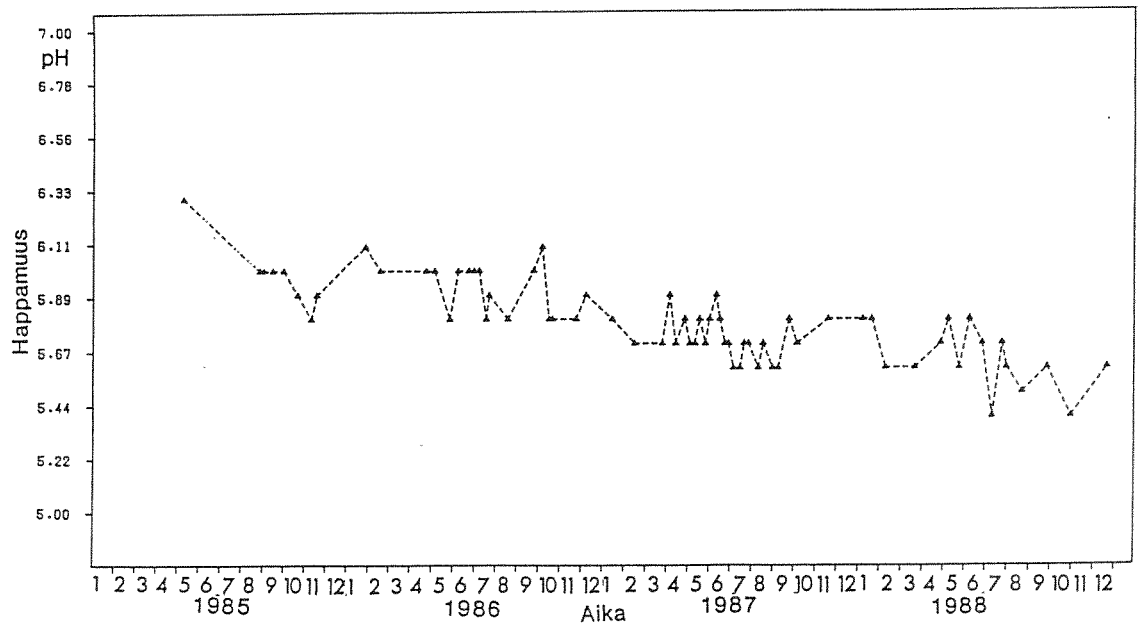
4.3.3 Vajovesi paljaan sorapinnan alla

Maannoksen puuttuessa pH:n mediaaniarvo oli 5,6 kaikilla syvyyksillä. Puolen metrin syvyydessä pH oli sama kuin luonnontilassa; tämän alapuolella alhaisempi.

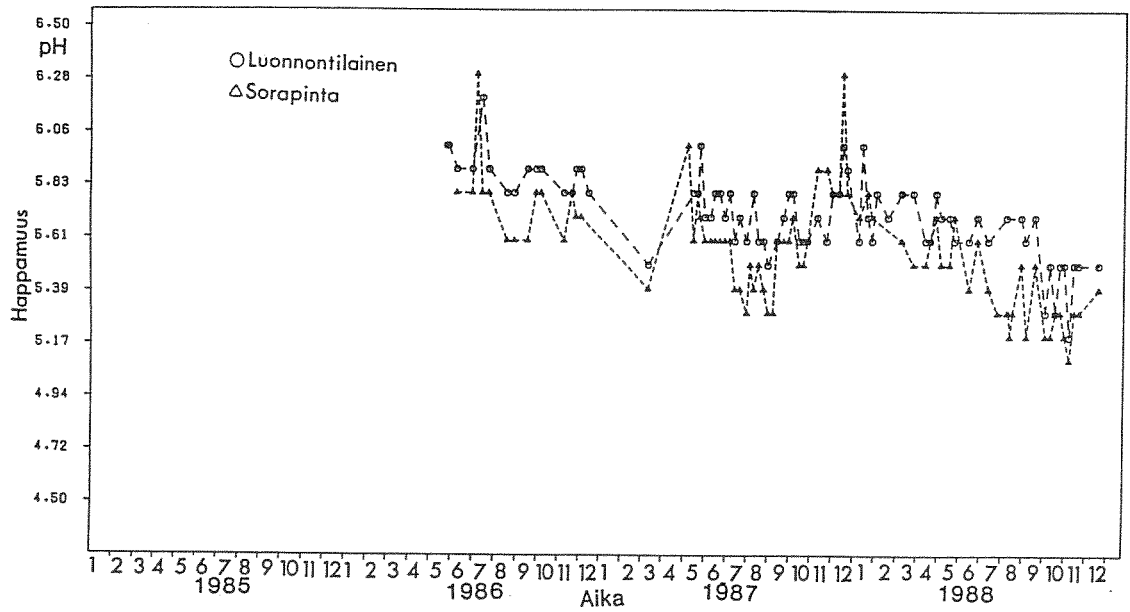
pH:n lasku tutkimusaikana oli mediaaniarvoissa eri lysimetreissä 0,1 – 0,4 yksikköä (kuva 19) ja lasku oli syvällä suurempi kuin lähellä pintaa. Laskun seurauksena näytteiden alumiinipitoisuus nousi (ks. alumiini).



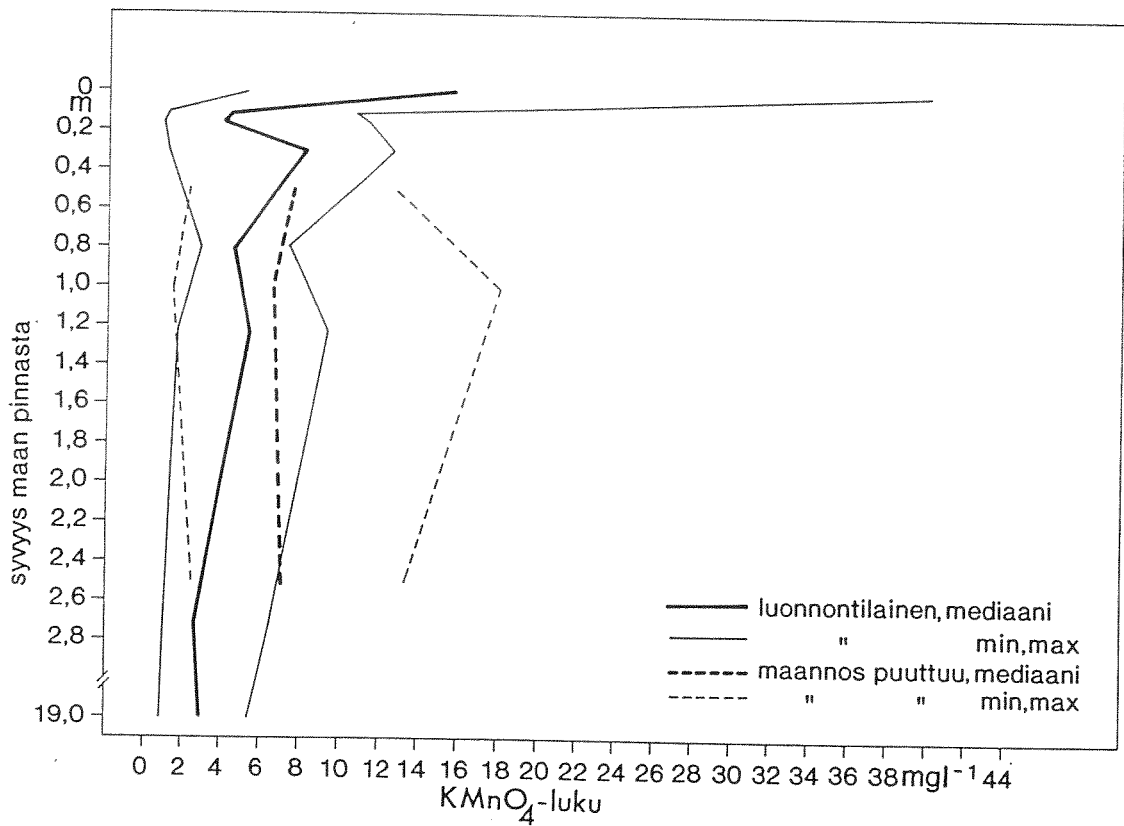
Kuva 17. Vajoveden pH luonnonalaisessa lysimetrissä (0,4 m).



Kuva 18. Pohjaveden pH Kapulasillanmäessä. Pohjaveden pinta havaintoputkessa on noin 19 metrin syvyydessä



Kuva 19. Vajoveden pH luonnontilaisessa ja sorapintaisessa lysimetrissä 2,5 metrin syvyydessä.



Kuva 20. Vajoveden kaliumpermanganaattiluku eri syvyyksissä (0 m = laskeuma, 19 m = pohjavesi).

4.4 Kaliumpermanganaattiluku (orgaaninen aines)

Kaliumpermanganaattiluku kuvastaa helposti hapettuvan orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen määrää vedessä. Tässä tapauksessa hapettava aines on suurimmaksi osaksi orgaanista.

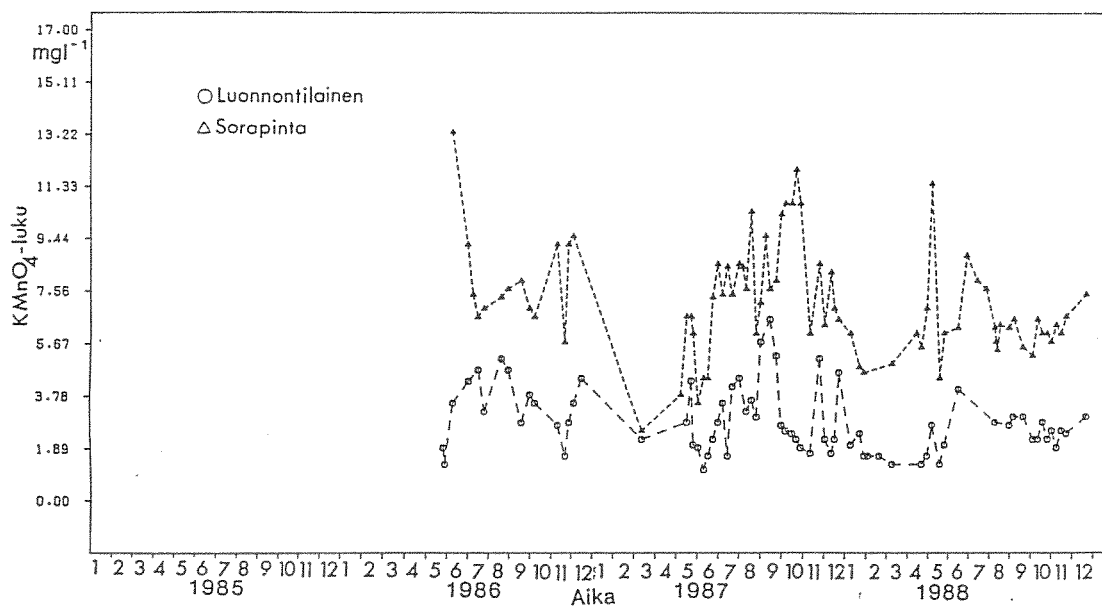
4.4.1 Laskeuma

Laskeumanäytteissä oli ajoittain varsin runsaasti orgaanista ainesta. Keräysastioiden pintaan kertyi nopeasti mustaa nokea. Lehvästöstä irtoava aines vaikutti orgaanisen aineksen määrään erityisesti Kapulasillanmäessä. Kaliumpermanganaattiluvun mini-, mediaani- ja maksimiarvot olivat Kapulasillanmäessä 5,1, 15,7 ja 40,1 mg/l ja Palaneenmäessä 3,6, 10,4, ja 17,7 mg/l.

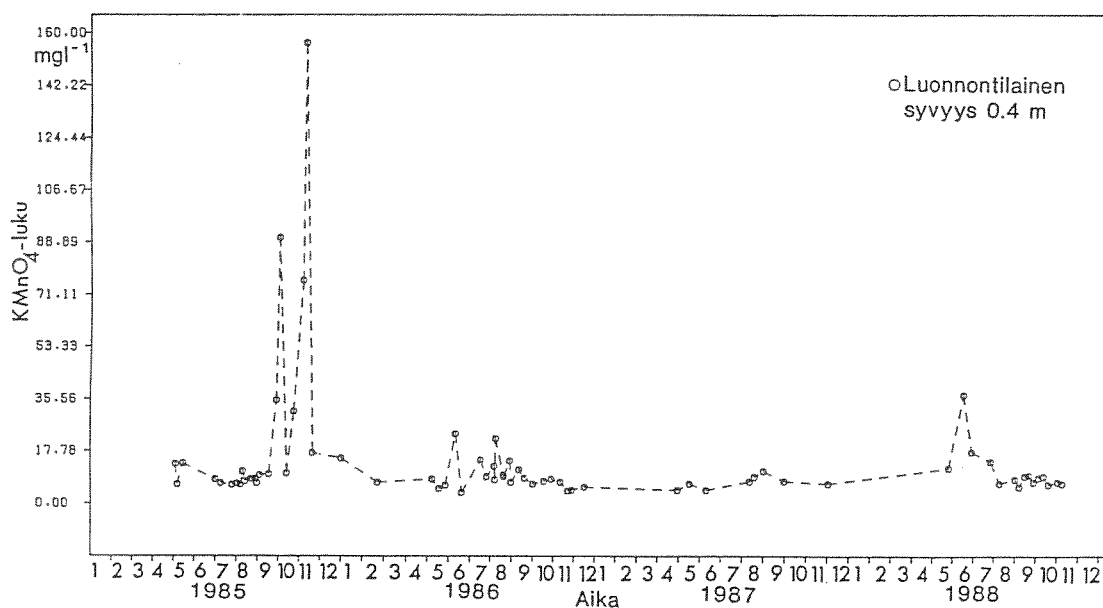
4.4.2 Luonnontilainen vajovesi

Laskeuman orgaanisesta aineksesta suuri osa pidättyi maan pintaan. Humushorisontin läpi tullut ja horisontista huuhtoutuva aines kulkeutui uuttumishorisontin läpi laimeina pitoisuuksina. Rikastumishorisontin yläosaan (0,20 m) saostui orgaanista ainesta, mistä syystä KMnO_4 -luku oli korkea. Horisontin läpi kulkeutui ajoittain orgaanista ainesta, mikä aiheutti uuden pitoisuusmaksimin 1,2 metrin syvyyteen. 2,5 metrin syvyydessä KMnO_4 -luku vastasi pohjaveden pitoisuuksia (kuva 20). Vuoden 1987 kesäkuun alusta lokakuun loppuun KMnO_4 -luvulla mitattuna orgaanisen aineksen määrä 2,5 metrissä oli 6 % laskeuman määrästä.

Vajoveden orgaanisen aineksen pitoisuus oli sateista riippuvaista. Selviä muutossuuntia pitoisuusvaihteluissa ei ollut, vaan vaihtelut kuvastivat ilmeisesti eri vuosien sateisuuseroja. Orgaaninen aines huuhtoutui vajoveteen usein äkillisinä ryöpsähdyksinä; pitoisuuksien vaihtelu oli varsin suuri. Sulamisvesien pitoisuudet eivät olleet korkeita, mutta pieni huippu oli nähtävissä keväisin. Korkeimmillaan arvot olivat kesällä ja syksyllä; kevät oli vähäsateisia. Lysimetrissä H334B (0,4 m) oli orgaanisen aineksen pitoisuuden kohoamisjakso syksyllä 1985 (kuva 22) (ks. sähköjohtavuus) ja lysimetrissä H336A (0,3 m) pitoisuudet olivat jatkuvasti korkeita mahdollisesti läheisten puiden vaikutuksesta. Vajoveden alumiini- ja kloridipitoisuudet kasvoivat selvästi orgaanisen aineksen lisääntyessä. Korrelaatiokertoimet olivat alumiinille $r = 0,69$ ja kloridille $r = 0,40$. Erittäin merkittäviä olivat myös sulfaatin ($r = 0,23$), kalsiumin ($r = 0,22$), magnesiumin ($r = 0,23$), raudan ($r = 0,77$), kuparin ($r = 0,37$), nikkelin ($r = 0,36$) ja lyijyn ($r = 0,22$) korrelaatiot. Orgaanista ainesta paljon sisältävä vesi oli usein myös värillistä profiilin yläosassa (kuva 23).



Kuva 21. Vajoveden kaliumpermanganaattiluku luonnontilaisessa ja sorapintaisessa lysimetrissä 2,5 metrin syvyydessä.



Kuva 22. Vajoveden kaliumpermanganaattiluku luonnontilaisessa lysimetrissä (0,4 m).

4.4.3 Vajovesi sorapinnan alla

Profiilin yläosassa pitoisuudet vastasivat luonnontilaa. 2,5 metrin syvyydessä KMnO_4 -luvun mediaaniarvo oli kaksinkertainen luonnontilaan verrattuna (kuva 25) ja pitoisuuksien vaihteluväli suurempi. Vuoden 1987 kesäkuun alusta lokakuun loppuun orgaanisen aineksen määrä oli 2,5 metrissä 40 % laskeuman määrästä.

KMnOn-luvun erittäin merkittävät korrelaatiokertoimet olivat: alumiini ($r=0,30$), kloridi ($r=0,40$), mangaani ($r=0,27$) ja koboltti ($r=0,25$).

4.5 Nitraatti

4.5.1 Laskeuma

Typpilaskeumasta analysoitiin vain nitraattipitoisuus. Ammoniumtypen osuus typpilaskeumasta lienee samaa suuruusluokkaa kuin nitraattitypen, ja orgaanisen typen osuus on myös huomattava. Nitraatin minimi-, mediaani- ja maksimipitoisuudet Kapulasillanmäessä olivat $< 1,0$, $1,1$ ja $7,1$ mg/l ja Palaneenmäessä $< 1,0$, $1,7$ ja $5,5$ mg/l. Alle määrittäysrajan 1 mg/l pitoisuus oli 37 %:ssa näytteistä ($16/50$). Nitraattilaskeuma oli suurimmillaan 32 mg/m²/vrk (7 vrk) toukokuussa 1987. Laskeuma oli keskimäärin $2,5$ mg/m²/vrk vastaten 75 mg/m² kuukaudessa. Järvisen (1986) mukaan keskimääräinen kuukausilaskeuma Sipoon Martinkylässä oli 1971 – 1982 88 mg/mg/m² (20 mg/m² NO₃-N).

4.5.2 Luonnontilainen vajovesi

Välittömästi humushorisontin alapuolella nitraattia oli vajovedessä määrittäysrajan 1 mg/l ylittäviä pitoisuuksia vain keväisin. Rikastumishorisontin vajovedessä $0,3$ – $0,4$ metrin syvyydessä nitraattipitoisuuden mediaaniarvo oli korkea verrattuna muihin horisontteihin. Alaspäin mentäessä nitraattipitoisuus ensin väheni $0,8$ metrissä, mutta $1,2$ metrissä nitraattipitoisuus jälleen nousi. Syvyysvälillä $1,2$ – $2,5$ metriä nitraattipitoisuus laski alle määrittäysrajan (kuva 24).

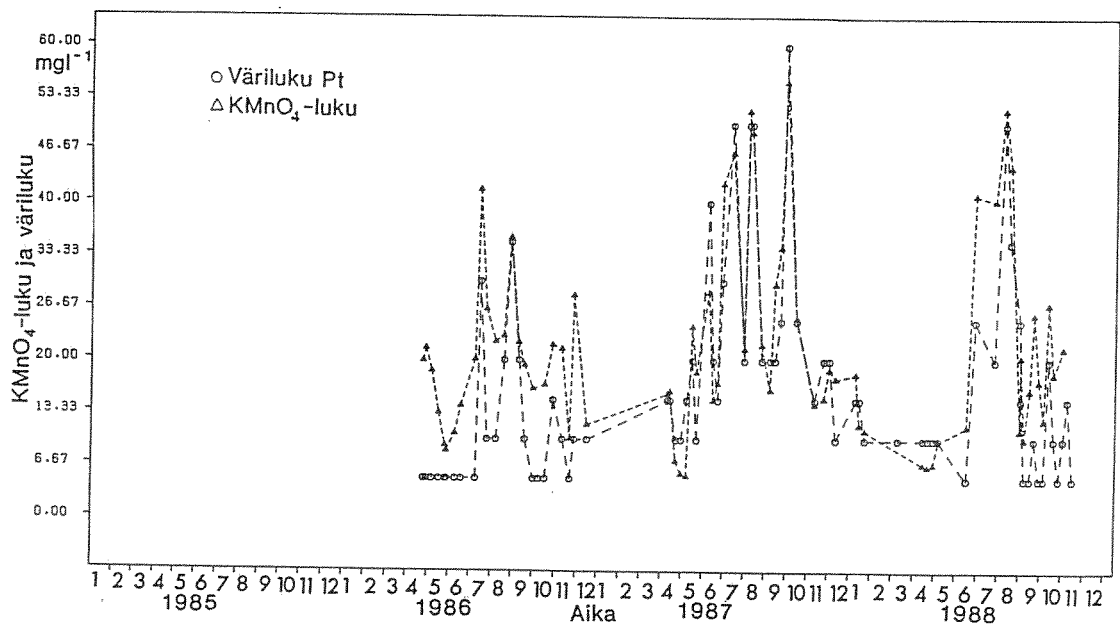
Ylimmissä maannoshorisonteissa oli keväisin selvä nitraattipitoisuuden huippukohta. Alemmissä horisonteissa nitraattipitoisuuden kohoamiset olivat pulssinomaisia. Näissä tapahtumissa korkeita nitraattipitoisuuksia havaittiin muinakin vuodenaikoina. Sateilla ja laskeumalla ei ollut välitöntä vaikutusta nitraattipitoisuuksiin. Emäskationeista nitraatin mukana liikkui kalsiumia ja magnesiumia. Nitraattipulssin aikana pH laski selvästi ja tätä seurasi alumiinipitoisuuden ja ajoittain mangaanipitoisuuden nousu. Vajoveden sulfaattipitoisuus pieneni nitraattipitoisuuden noustessa.

4.5.3 Vajovesi sorapinnan alla

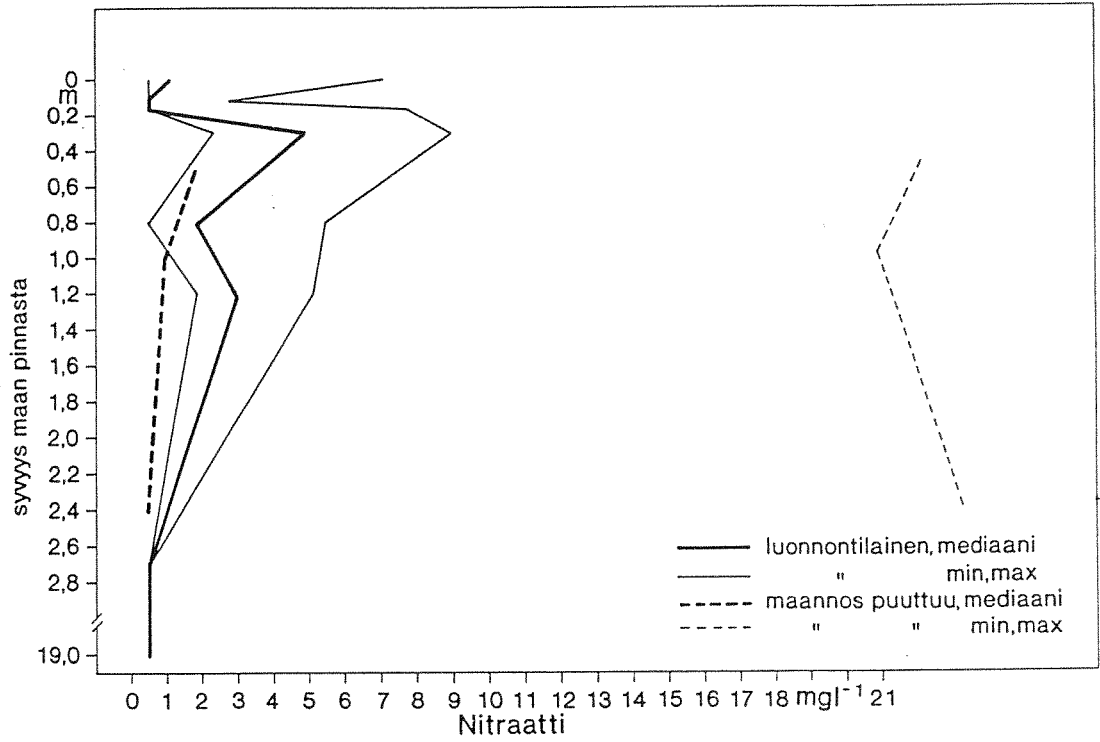
Sorapinnan alla nitraattia kulkeutui pulssinomaisesti ylimmistä horisonteista alempiin. Nitraattipitoisuus eri syvyyksillä riippui pulssien etenemisvaiheesta. Pulssien edetessä

pitoisuus kasvoi alaspäin mentäessä, mutta noin metrin syvyydessä oli kohta, jossa nitraattipitoisuus pieneni. Korkeista nitraattipitoisuuksista aiheutui vajoveden pH:n voimakas lasku.

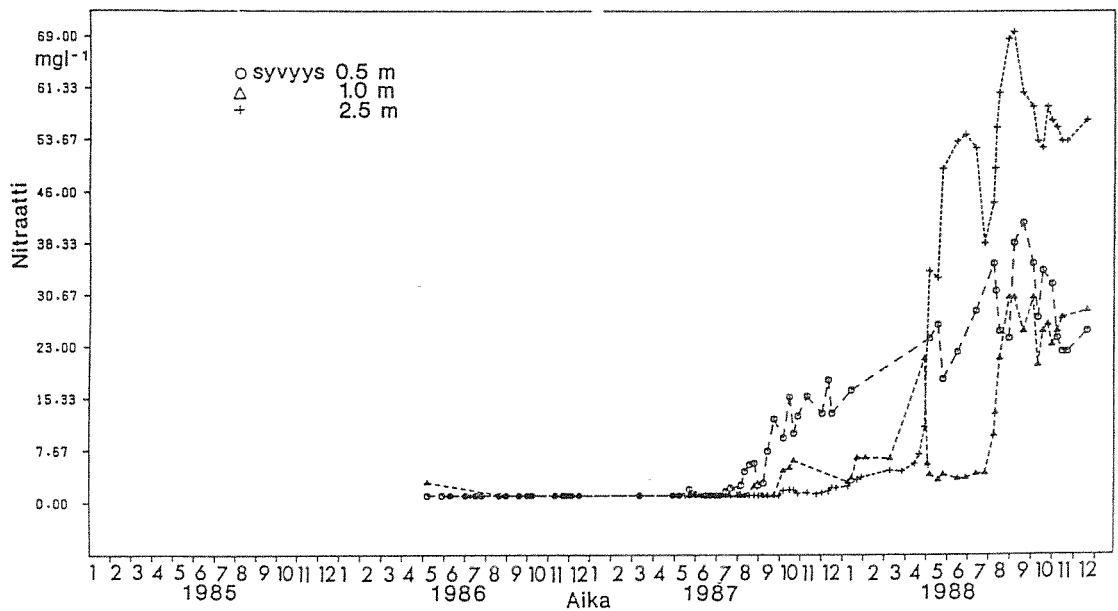
Lysimetrissä H336 havaittiin selvä nitraattipitoisuuden kohoaminen heti kevään alkaessa, jonka jälkeen oli selvä lasku. Kevään ja alkukesän kuivan ajan jälkeiset sateet aiheuttivat voimakkaan pulssin vuosina 1986 ja 1987. Pulssin huippukohdat osuivat puolella metrissä kesä – heinäkuulle ja se kulkeutui metrin syvyydelle 1,5 kuukaudessa. Nitraatin huuhtoutuminen jatkui pitkälle syksyyn. Lysimetrissä H335 maaperä pystyi adsorboimaan nitraattia 1986 keväästä 1987 heinäkuulle (kuva 25). Tällöin alkoi voimakas nitraatin huuhtoutuminen sateisen kesän aikana. 0,5 metrissä ensimmäiset merkit nähtiin heinäkuussa, 1,0 metrissä elokuun lopussa ja 2,5 metrin syvyydellä lokakuussa. Huuhtoutuminen voimistui vuonna 1988. Nitraatin huuhtoutuessa pH laski, kalsium- ja magnesiumpitoisuudet ja myös kloridipitoisuus nousivat.



Kuva 23. Vajoveden kaliumpermanganaattiluku ja väriluku luonnontilaisessa lysimetrissä (0,3 m).



Kuva 24. Vajoveden nitraattipitoisuus eri syvyyksillä lysimetrissä (0 m = laskeuma, 19 m = pohjavesi).

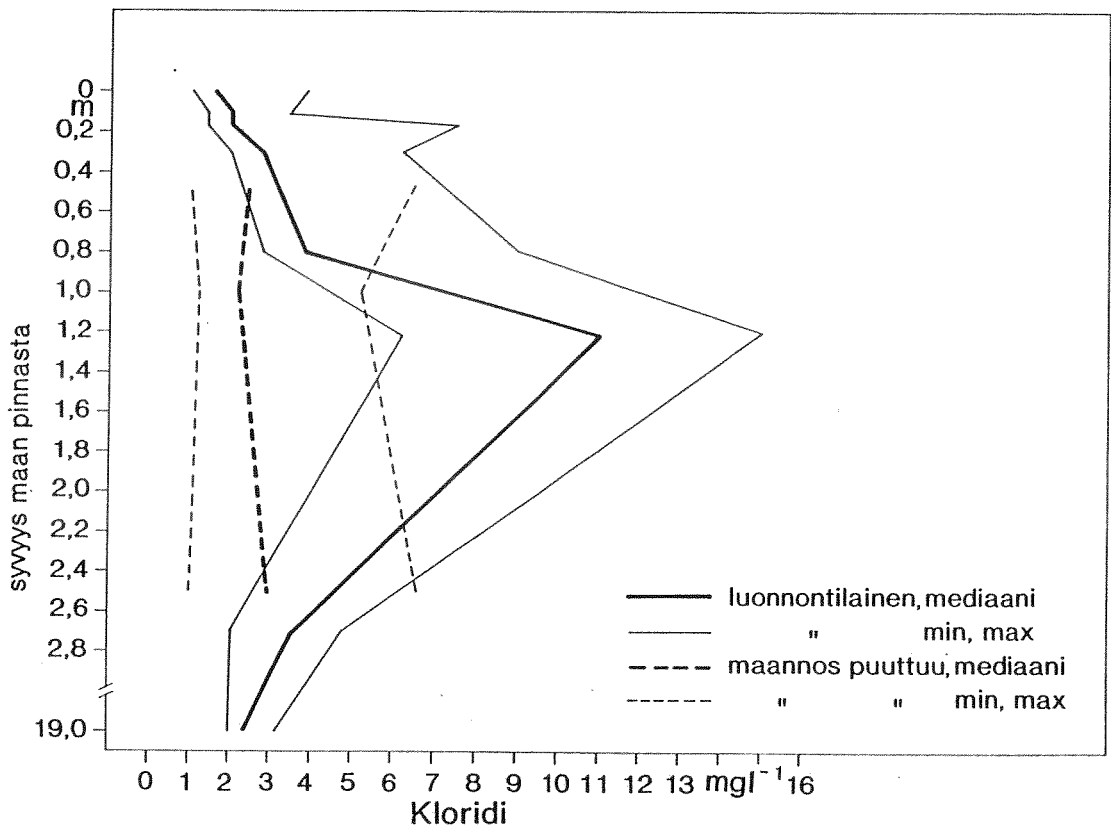


Kuva 25. Vajoveden nitraattipitoisuus sorapintaisessa lysimetrissä

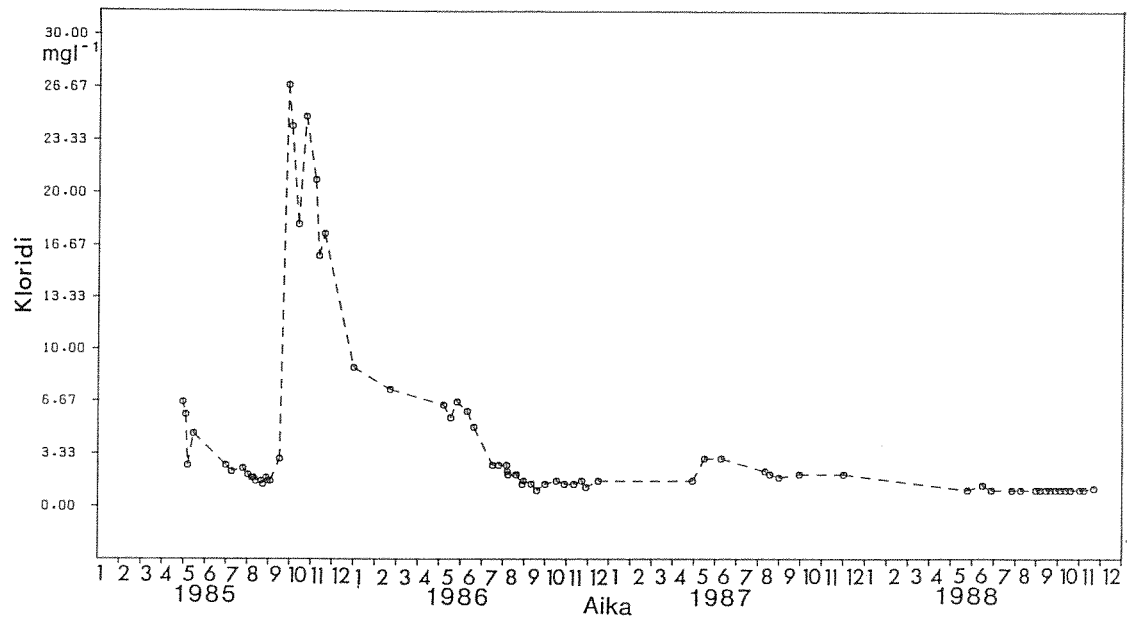
4.6 Kloridi

4.6.1 Laskeuma

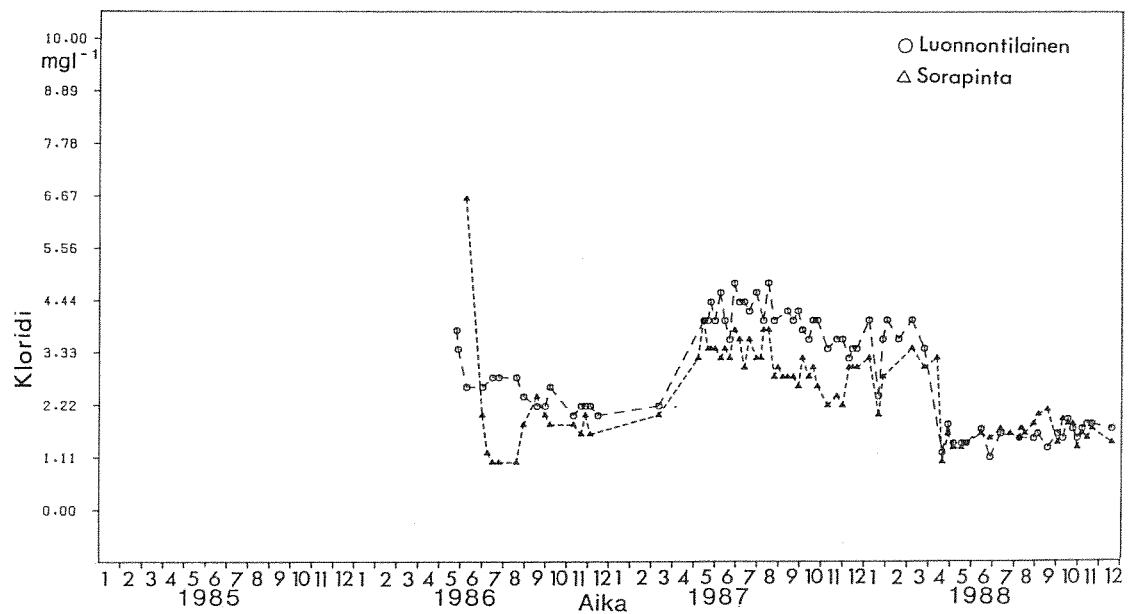
Laskeuman kloridin tärkein lähde on merestä ilmakehään kulkeutuva suolapitoinen aerosoli. Kloridipitoisuudet ovat rannikolla sisämaata korkeammat. Laskeuman toinen lähde ovat teiden suolaukseen ja pölyn sidontaan käytetyt suolat. Tuusulassa on merellinen vaikutus vielä varsin voimakas. Kapulasillanmäessä kloridin minimi-, mediaani- ja maksimipitoisuudet olivat 1,0, 1,6 ja 3,8 mg/l ja Palaneenmäessä 1,2, 1,8 ja 2,4 mg/l. Kloridilaskeuma oli suurimmillaan vuoden 1987 elokuussa 20,2 mg/m²/vrk (4 vrk) ja keskimäärin 2,4 mg/m²/vrk vastaten 72 mg/m² kuukaudessa. Järvinen (1986) sai keskimääräiseksi kuukausilaskeumaksi 1971 – 1982 Sipoon Martinkylässä 36 mg/m². Tässä kuukausilaskeuma oli kaksinkertainen, mikä johtuu kesän 1987 sateisuudesta. Vuoden 1987 keskimääräinen kuukausilaskeuma oli 98,9 mg/m² ja vuoden 1988 50,2 mg/m².



Kuva 26. Vajaveden kloridipitoisuus eri syvyyksillä (0 m = laskeuma, 19 m = pohjavesi).



Kuva 27. Vajoveden kloridipitoisuus luonnontilaisessa lysimetrissä 0,4 metrin syvyydellä.



Kuva 28. Vajoveden kloridipitoisuus luonnontilaisessa ja sorapintaisessa lysimetrissä 2,5 metrin syvyydellä.

4.6.2 Luonnontilainen vajovesi

Vajoveden kloridipitoisuus oli maan pintaosissa hiukan suurempi kuin sadevedessä. Rikastumishorisontissa oli löyhästi adsorboitunutta kloridia, joka lähti liikkeelle kovien sateiden jälkeen. Erityisen voimakkaasti kloridipitoisuus nousi syvyydsvälillä 0,8 – 1,2 m. Välillä 1,2 – 2,5 m pitoisuus laski lähelle pohjaveden pitoisuutta (kuva

26). Vuoden 1987 kesäkuun alusta lokakuun loppuun kloridin määrä 2,5 metrin syvyydessä oli 79 % laskeuman määrästä.

Vajoveden kloridipitoisuus vaihteli eri horisonteissa sateiden ja orgaanisen aineksen pitoisuuden mukana. Lumen sulamisen aikana pitoisuudet nousivat ja samoin sateina aikoina. Kesän 1987 sateisuus nosti kloridipitoisuutta eri horisonteissa. Kloridin yhteys orgaaniseen ainekseen oli selvä ($r = 0,40$). Syksyllä 1985 lysimetrissä H334B kloridipitoisuus nousi noin kymmenkertaiseksi samalla kun orgaanisen aineksen ja sulfaatin pitoisuudet kohosivat voimakkaasti (kuva 27).

4.6.3 Vajovesi sorapinnan alla

Maannoksen puuttuessa kloridipitoisuuksissa ei syvyyden kasvaessa tapahtunut suuria muutoksia. Pitoisuus oli hiukan sadeveden pitoisuutta suurempi. 2,5 metrin syvyydessä pitoisuus oli samaa suuruusluokkaa kuin luonnontilassa ja pohjavedessä. Tällä syvyydellä kloridin määrä näytteissä oli 132 % sadeveden kloridin määrään verrattuna vuoden 1987 kesäkuun alusta lokakuun loppuun.

Maannoksen puuttuessa kloridin pitoisuuksien aikakuvaajat olivat varsin samanlaisia kuin luonnontilassa. Vajoveden kloridipitoisuus riippui maahan imeytyvän sulamisveden ja sadeveden määrästä (kuva 28).

4.7 Sulfaatti

4.7.1 Laskeuma

Laskeuman anioneista sulfaatin pitoisuus oli selvästi suurin. Sen mediaanipitoisuus oli noin kolminkertainen kloridiin ja nitraattiin verrattuna. Kapulasillanmäessä sulfaatin minimi-, mediaani- ja maksimipitoisuudet olivat 1,00, 4,05 ja 26,00 mg/l ja Palaneenmäessä 1,10, 5,25 ja 11,00 mg/l. Laskeuma oli suurimmillaan 42 mg/m²/vrk (7 vrk) vuoden 1987 toukokuussa. Laskeuma oli keskimäärin 7,4 mg/m²/vrk vastaten 222 mg/m² kuukaudessa (Järvinen (1986) Sipoon Martinkylä 1971 – 1982 220 mg/m²). Sulfaatilla oli vahva korrelaatio raskasmetallien kanssa (liite 2).

4.7.2 Luonnontilainen vajovesi

Sulfaatin mediaanipitoisuus nousi noin kaksinkertaiseksi heti humushorisontin alapuolella. Pitoisuuden mediaaniarvo pysyi suunnilleen tällä tasolla aina pohjaveden

asti. Rikastumishorisontissa 0,8 metrin syvyydessä oli pieni pitoisuustason nousu. Tällä syvyydellä mitattiin myös suurimmat sulfaattipitoisuudet. Aikavälillä vuoden 1987 kesäkuun alusta lokakuun loppuun sulfaatin määrä laskeumassa oli suunnilleen sama kuin 2,5 metrin syvyydestä otetuissa näytteissä (kuva 29).

Vajoveden sulfaattipitoisuus riippui voimakkaasti pH-tasosta. pH:n laskiessa sulfaattipitoisuus laski ja sen noustessa sulfaattipitoisuus nousi. Sulfaattipitoisuus lisääntyi orgaanisen aineksen pitoisuuden lisääntyessä. Nitraatilla ja sulfaatilla oli selvä yhteys. Nitraatin noustessa sulfaattipitoisuus pieneni pH:n pienenemisen myötä (kuvat 30, 31). Selviä vuodenaikais- tai sateisuusvaihteluiden aiheuttamia muutoksia sulfaattipitoisuudessa ei havaittu.

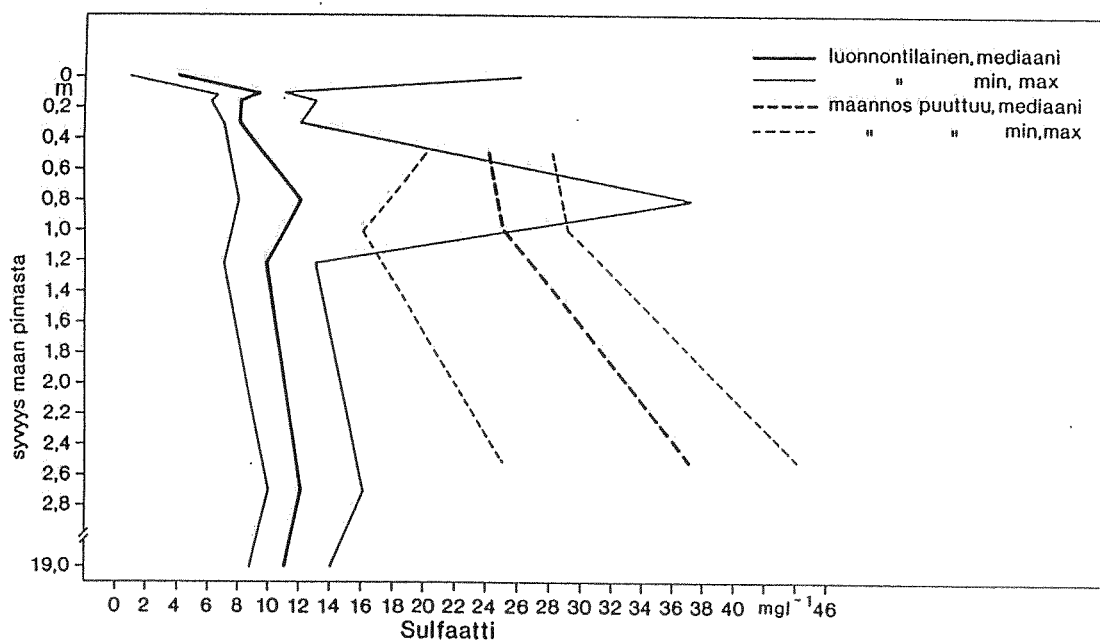
4.7.3 Vajovesi sorapinnan alla

Maannoksen puuttuessa vajoveden sulfaattipitoisuuden mediaaniarvot olivat 5 – 10 –kertaisia sadeveteen verrattuna. Sulfaattipitoisuus kasvoi alaspäin mentäessä. Sulfaatin mukana liikkui emäskationeista eniten kalsiumia (kuva 32). Vuoden 1987 kesäkuun alusta lokakuun loppuun sulfaatin määrä 2,5 metrin syvyydessä oli noin 6,5-kertainen laskeuman sulfaatin määrään verrattuna. Myös maannoksen puuttuessa sulfaattipitoisuuden ja pH:n välillä oli selvä yhteys. Nitraattipitoisuuksien nousun aiheuttamasta pH:n laskusta johtuen sulfaattipitoisuus oli tutkimusaikana laskusuunnassa (kuva 33). Pitoisuusvaihtelut olivat 2,5 metrin syvyydessä paljon suurempia kuin vastaavalla syvyydellä luonnontilassa (kuva 34). Lysimetrissä H334X sulfaattipitoisuudet olivat pieniä alhaisesta pH:sta johtuen.

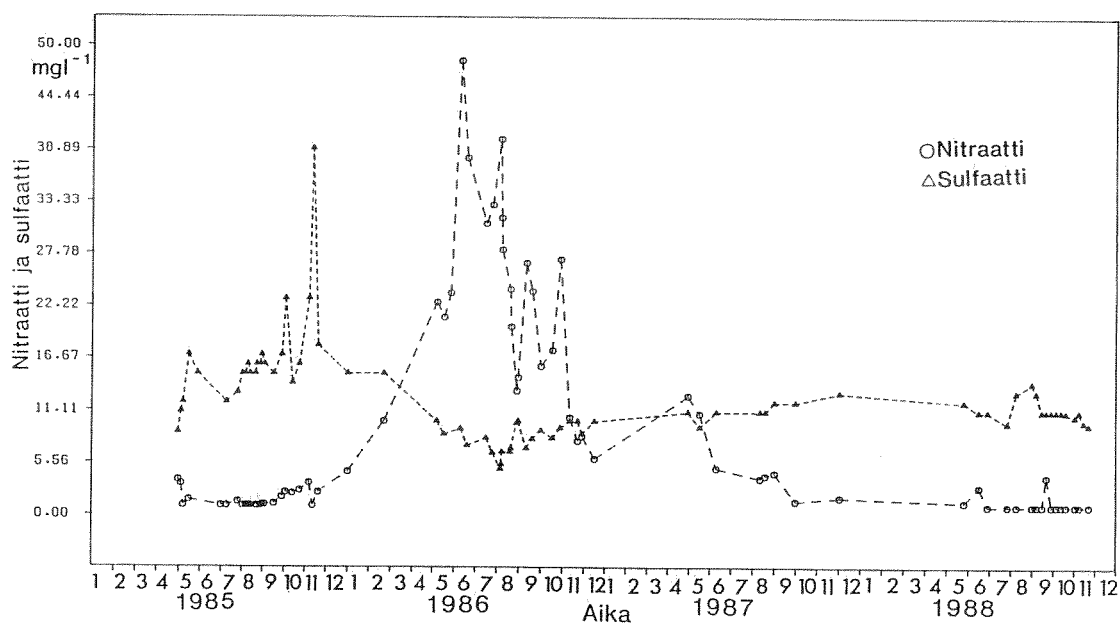
4.8 Piihappo

4.8.1 Laskeuma

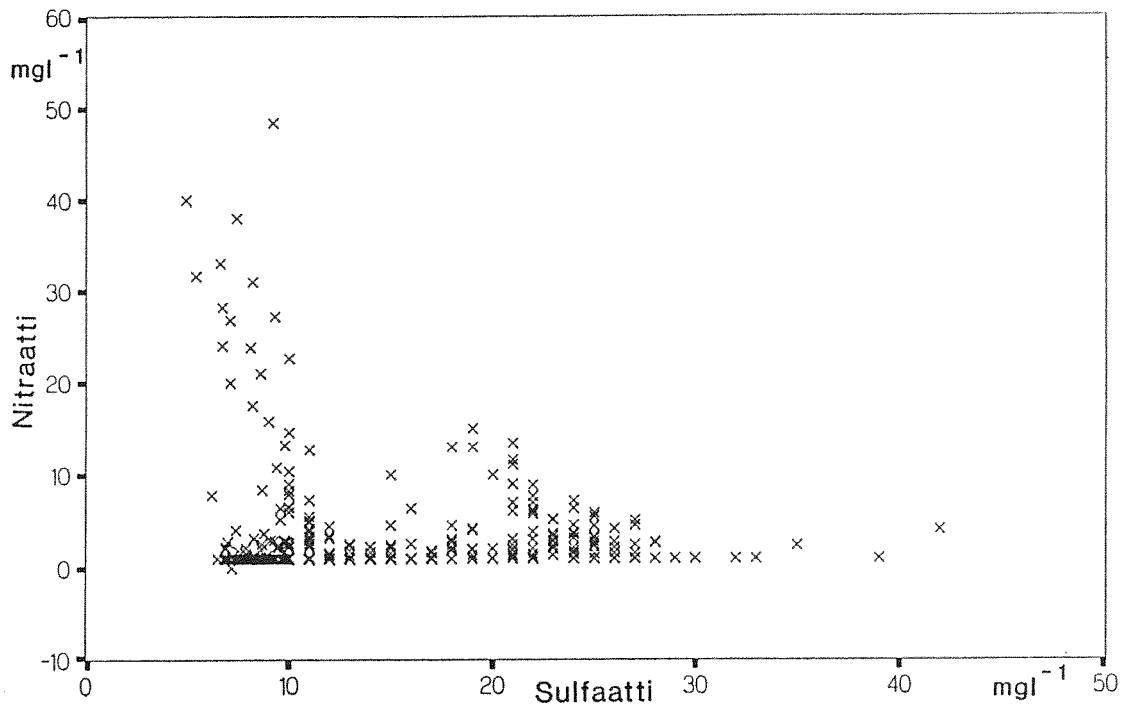
Laskeuman piihappopitoisuus oli alhainen vajo- ja pohjaveteen verrattuna. Kapulasillanmäessä pitoisuuksien minimi-, mediaani- ja maksimi-arvot olivat 0,0, 0,2 ja 1,1 mg/l ja Palaneenmäessä 0,0, 0,2 ja 0,8 mg/l. Laskeuma oli keskimäärin 0,4 mg/m²/vrk.



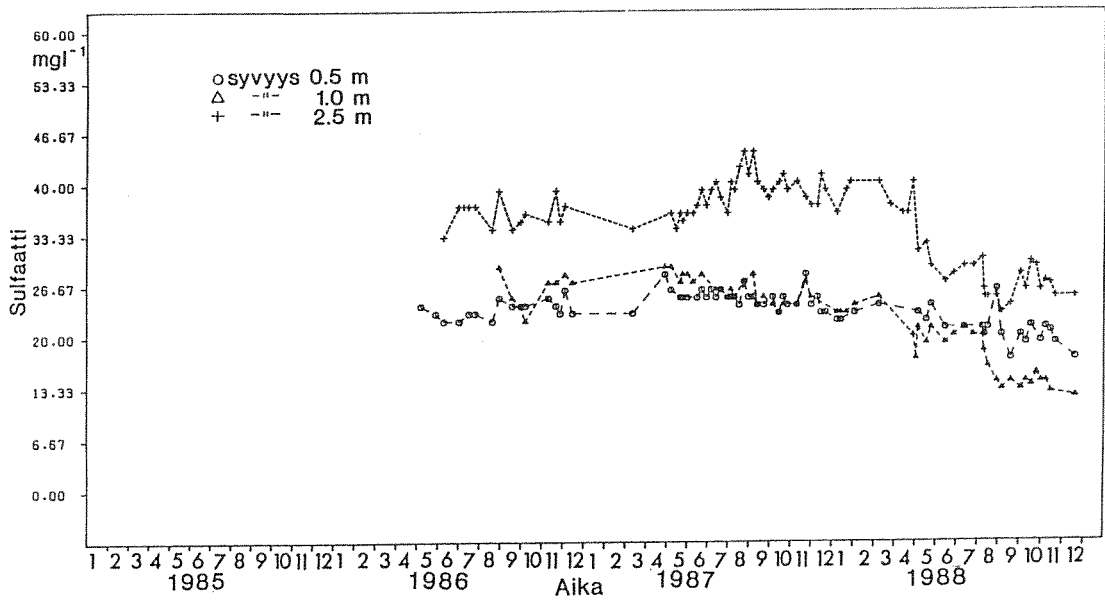
Kuva 29. Vajoveden sulfaattipitoisuus eri syvyyksillä (0 m = laskeuma 19 m = pohjavesi).



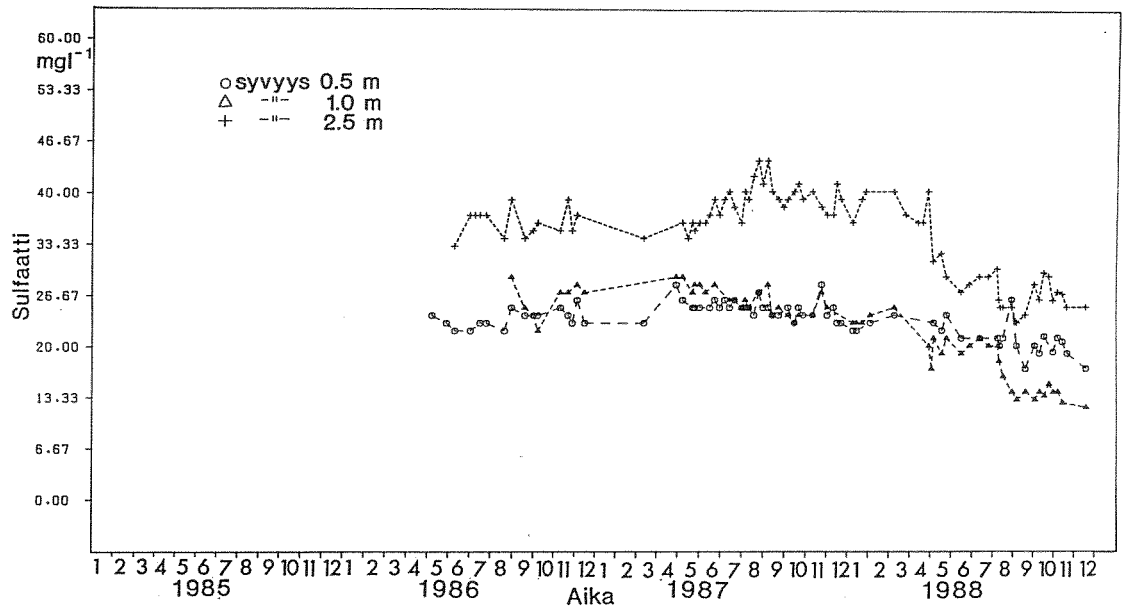
Kuva 30. Vajoveden sulfaatti- ja nitraattipitoisuudet luonnontilaisessa lysimetrissä 0,4 metrin syvydessä.



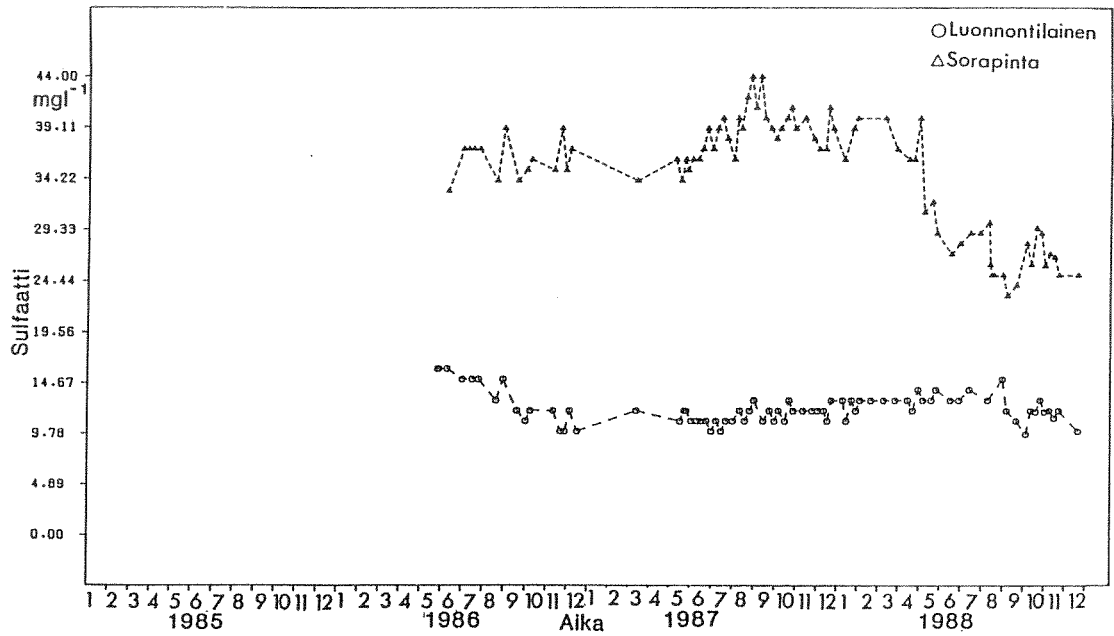
Kuva 31. Vajoveden nitraatti- ja sulfaattipitoisuuksien (mg/l) keskinäinen riippuvuus luonnontilaisissa lysimetreissä.



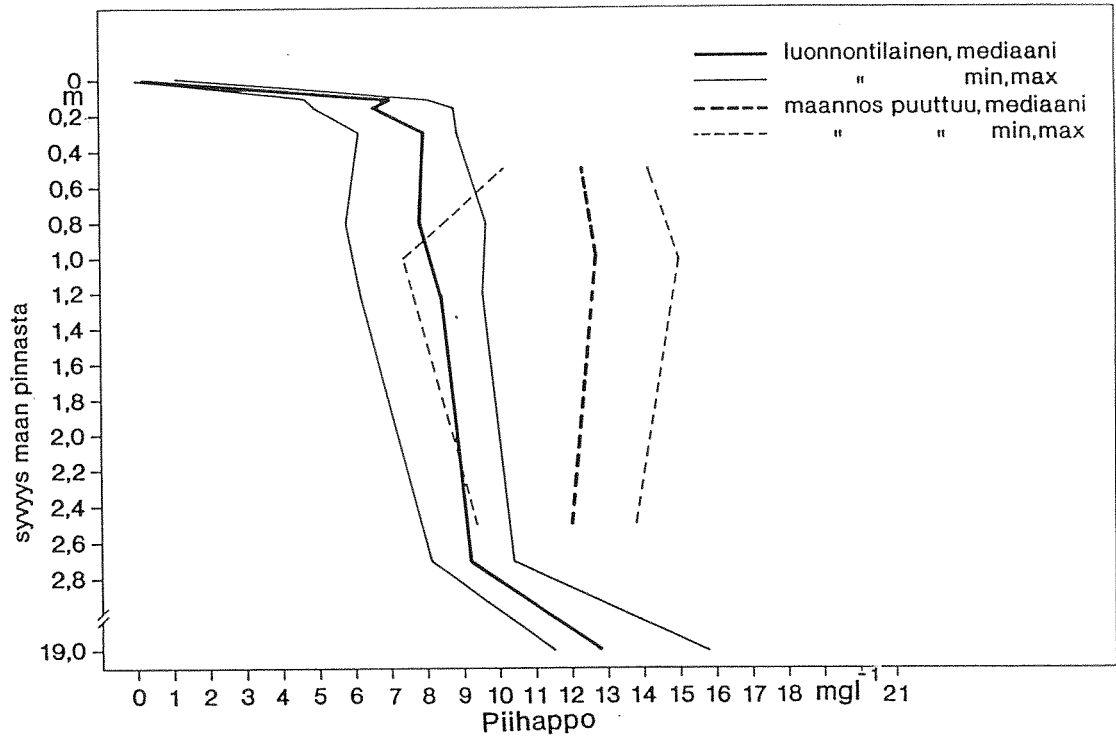
Kuva 32. Vajoveden kalsium- ja sulfaattipitoisuuksien (mg/l) keskinäinen riippuvuus sorapintaisissa lysimetreissä.



Kuva 33. Vajoveden sulfaattipitoisuus sorapintaisessa lysimetrissä.



Kuva 34. Vajoveden sulfaattipitoisuus luonnontilaisessa ja sorapintaisessa lysimetrissä 2,5 metrin syvyydellä.



Kuva 35. Vajoveden piihappopitoisuus eri syvyyksillä

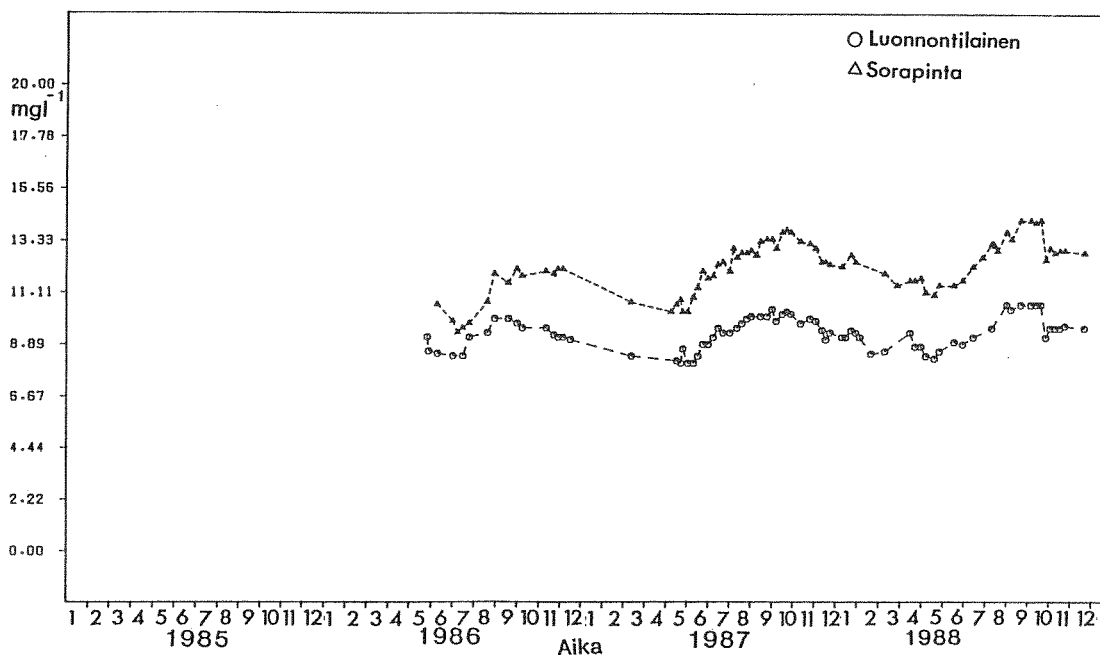
4.8.2 Luonnontilainen vajovesi

Vajoveden piihappopitoisuus oli monikymmenkertainen laskeumaan verrattuna jo heti humushorisontin alapuolella (mediaanit: laskeuma 0,2 – vajovesi 7,0 mg/l). Alaspäin mentäessä pitoisuus hiljalleen nousi (kuva 35).

Piihapon liukeneminen veteen riippuu lämpötilasta. Piihapon aikakuvaajissa näkyi selvä vuodenaikaisvaihtelu siten, että pitoisuudet olivat korkeimmillaan elo–syyskuussa. Myös sateet lisäsivät piihapon määrää vajovedessä. Piihapon liukenevuus veteen kasvaa myös hiilihapon pitoisuuden kasvaessa. Hiilihappopitoisuuden vaihtelu aiheutti piihappopitoisuuden äkillisiä nousuja.

4.8.3 Vajovesi sorapinnan alla

Paljaan sorapinnan alla piihappopitoisuudet olivat luonnontilaa suuremmat. Piihapon mediaanipitoisuus hiukan pieneni alaspäin mentäessä maksimikohdan ollessa yhden metrin syvyydessä. Piihappopitoisuus vaihteli myös sorapinnan alla vuodenajasta riippuen. Pitoisuudet olivat korkeimmillaan kesäisin (kuva 36).



Kuva 36. Vajoveden piihappopitoisuus luonnontilaisessa ja sorapintaisessa lysimet-rissä 2,5 metrin syvyydellä.

4.9 Kalsium

4.9.1 Laskeuma

Emäskationien pitoisuudet laskeumassa olivat alhaisia vajo- ja pohjaveteen verrattu-na. Kalsiumia oli kationeista eniten, mutta ero natriumiin ja kaliumiin ei ollut suuri. Magnesiumia oli sen sijaan selvästi edellisiä vähemmän. Kalsiumin maksimipitoisuu-det olivat korkeammat kuin muiden emäskationien. Kapulasillanmäessä kalsiumin minimi-, mediaani- ja maksimipitoisuudet olivat < 0,5, 0,7 ja 6,8 mg/l ja Palaneen-mäessä < 0,5, 0,85 ja 6,9 mg/l. Alle määritysrajan 0,5 mg/l oli määrityksistä 15 % (10/66).

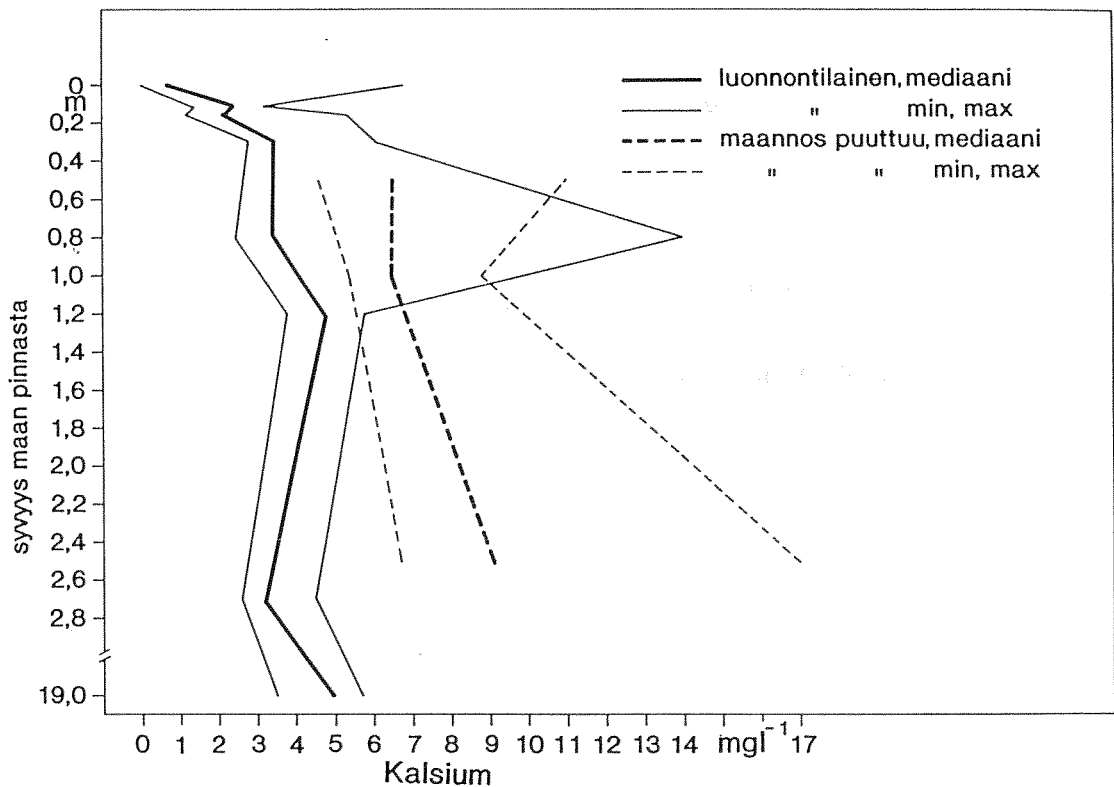
Kalsiumlaskeuma oli suurimmillaan 4,1 mg/m²/vrk (7 vrk) vuoden 1987 toukokuussa. Laskeuma oli keskimäärin 1,6 mg/m²/vrk vastaten 48 mg/m² kuukaudessa [Järvinen (1986) 1971 - 1982 Sipoon Martinkylä 51 mg/m²].

4.9.2 Luonnontilainen vajovesi

Vajoveden kalsiumpitoisuus oli heti humushorisonin alapuolella moninkertainen sadeveteen verrattuna. Kalsiumin pitoisuus ja sen vaihtelu oli suurimmillaan rikastu-

mishorisontissa 1,2 metrin syvyydessä. Välillä 1,2 – 2,5 m pitoisuudet laskivat (kuva 37). Matkalla pohjaveteen tapahtui tasaista nousua yhdessä bikarbonaatin kanssa. 2,5 metrin syvyydessä näytteiden kalsiummäärä oli vuoden 1987 kesäkuusta loka-kuuhun noin puolitoista kertainen laskeumaan verrattuna.

Vajoveden kalsiumpitoisuus oli keväisin korkea ja laski kesän aikana. Syksyisin pitoisuudet joko nousivat tai laskivat kesän arvoista. Sulfaatin ja nitraatin pitoisuuksien nousujaksot tosin sotkivat tätä kuviota vaikeuttaen selkeiden muutossuuntien arviointia. Lysimetrissä H334B kalsiumin pitoisuuden väheneminen oli kuitenkin selvä vuosien 1985 ja 1986 voimakkaiden nousujaksojen jälkeen (kuva 38). Myös lysimetrissä H335F (2,5 m) pitoisuudet laskivat vuoden 1986 arvoista. Sadejaksot joko nostivat tai laskivat kalsiumin pitoisuutta pintahorisonteissa riippuen saatavilla olevan kalsiumin määrästä.



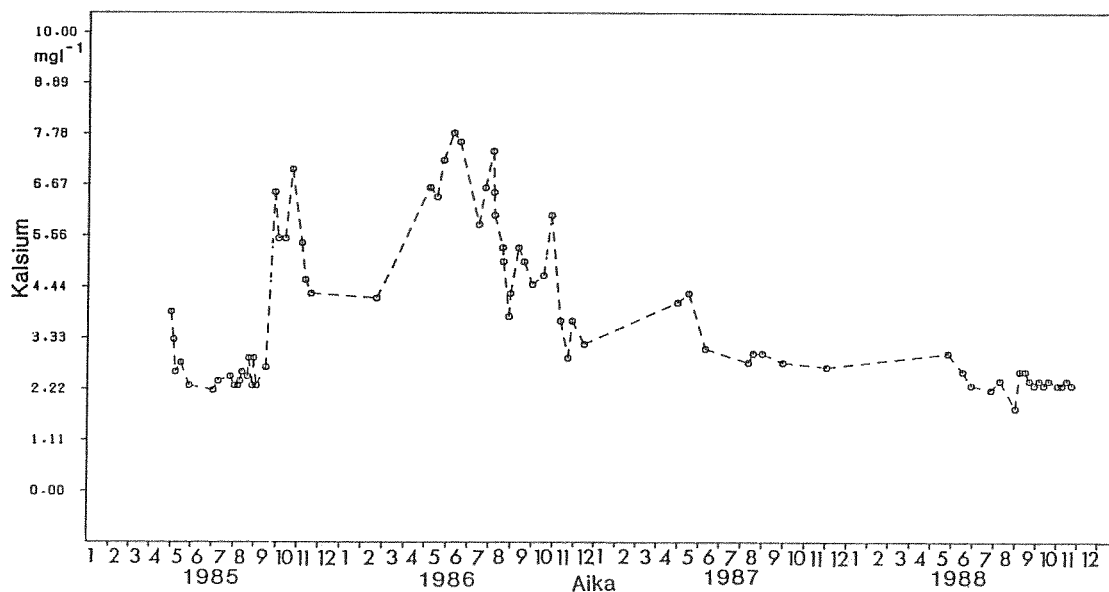
Kuva 37. Vajoveden kalsiumpitoisuus eri syvyyksillä (0 m = laskeuma, 19 m = pohjavesi).

4.9.3 Vajovesi sorapinnan alla

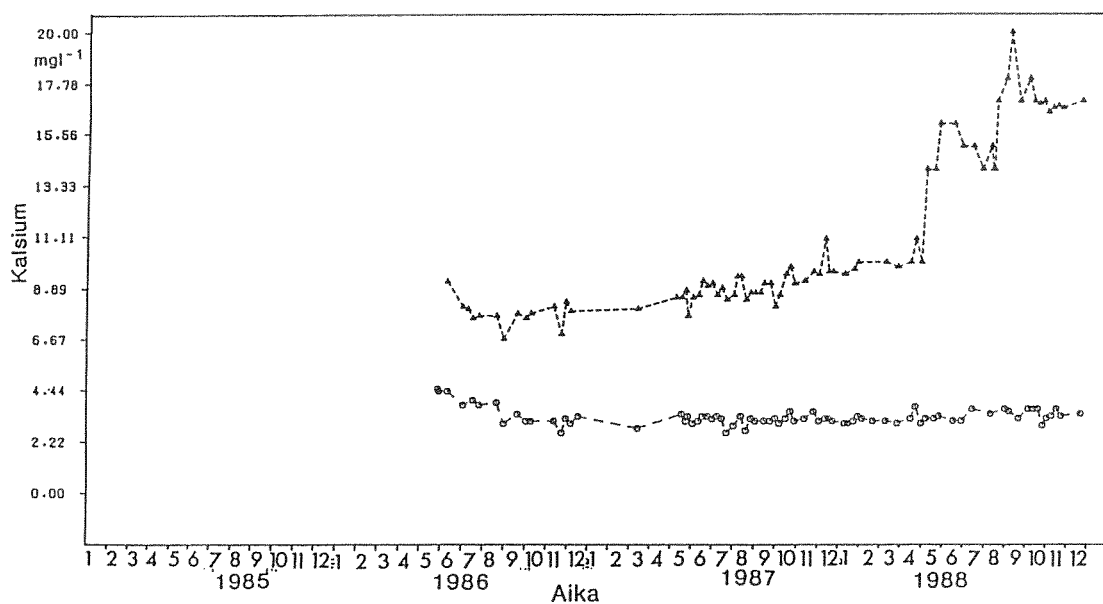
Maannoksen puuttuessa kalsiumpitoisuudet olivat selvästi suurempia kuin luonnontilassa. Pitoisuudet nousivat alaspäin mentäessä. Suurimmat kalsiumpitoisuudet olivat selvässä yhteydessä vahvojen happoanionien, erityisesti sulfaatin ja nitraatin nousuun.

Vajoveden kalsiummäärä oli 2,5 metrin syvyydessä vuoden 1987 kesäkuusta loka-kuuhun noin kahdeksankertainen sadeveteen verrattuna.

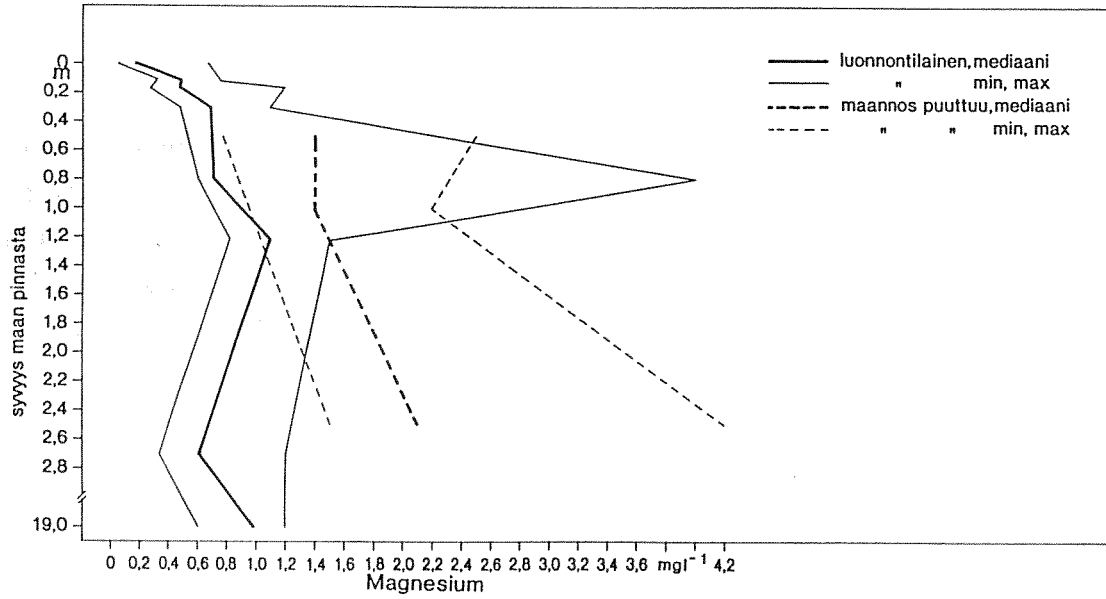
Myös aikakuvaajissa vahvojen happoanionien vaikutus näkyi selvästi näytteiden kalsiumpitoisuudessa. Pitoisuustaso oli korkeampi kuin luonnontilassa voimakkaan rapautumisen tuottamasta kalsiumista johtuen. Erityisesti nitraattipitoisuuden vaihtelut aiheuttivat kalsiumpitoisuuden muutoksia (kuva 39).



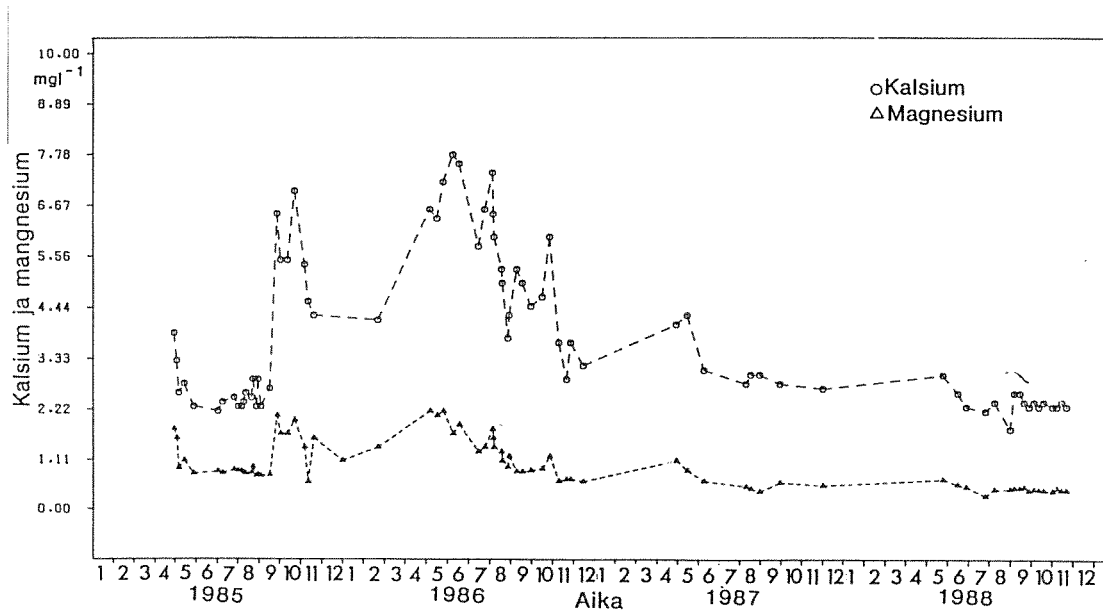
Kuva 38. Vajoveden kalsiumpitoisuus luonnontilaisessa 0,4 metrin syvyydellä.



Kuva 39. Vajoveden kalsiumpitoisuus luonnontilaisessa ja sorapintaisessa lysimetrissä 2,5 metrin syvyydellä. Sorapintaisessa lysimetrissä kalsiumin pitoisuustaso nousi voimakkaasti vuonna 1988 nitraatin huuhtoutumisen johdosta.



Kuva 40. Vajoveden magnesiumipitoisuus eri syvyyksillä (0 m = laskeuma, 19 m = pohjavesi).



Kuva 41. Vajoveden kalsiumpitoisuus ja magnesiumipitoisuus luonnontilaisessa lysimetrissä 0,4 metrin syvyydellä.

4.10 Magnesium

4.10.1 Laskeuma

Kapulasillanmäessä magnesiumin minimi-, mediaani- ja maksimipitoisuudet olivat < 0,05, 0,17 ja 0,66 mg/l ja Palaneenmäessä < 0,05, 0,11 ja 1,6 mg/l. Määrittämisistä oli alle määrittämissrajaa 0,05 mg/l 9 % (6/66). Magnesiumlaskeuma oli suurimmillaan 1,6 mg/m²/vrk (7 vrk) vuoden 1987 toukokuussa. Laskeuma oli keskimäärin 0,3 mg/m²/vrk vastaten 8,8 mg/m² kuukaudessa [Järvinen (1986) Sipoon Martinkylä 1971 – 1982 7 mg/m²].

4.10.2 Luonnontilainen vajovesi

Vajoveden magnesiumipitoisuudet olivat paljon pienempiä, kuten luonnonvesissä yleensä, kuin kalsiumipitoisuudet, mutta niiden vaihtelut seurasivat tarkasti kalsiumipitoisuuden vaihteluita (kuvat 40 ja 41).

Vajoveden magnesiumipitoisuus oli heti humushorisonnin alla noin kolminkertainen laskeumaan verrattuna. Pitoisuudet nousivat rikastumishorisonnissa tästä vielä kaksinkertaiseksi. Pitoisuustaso oli alhaisempi 2,5 metrin syvyydellä, mutta kasvoi taas pohjavedessä samaan suuruusluokkaan kuin rikastumishorisonnissa. Vuoden 1987 kesäkuusta lokakuuhun magnesiumin määrä 2,5 metrin syvyydestä saaduissa näytteissä oli 1,8 kertainen laskeumaan verrattuna.

4.10.3 Vajovesi sorapinnan alla

Maannoksen puuttuessa magnesiumipitoisuudet olivat selvästi suurempia kuin luonnontilassa. 2,5 metrin syvyydessä mediaanipitoisuus oli yli kolminkertainen luonnontilaan verrattuna. Aikavälillä kesäkuu – lokakuu –87 2,5 metrin syvyydestä saaduissa näytteissä magnesiumin määrä oli yli 12-kertainen laskeumaan verrattuna.

4.11 Natrium

4.11.1 Laskeuma

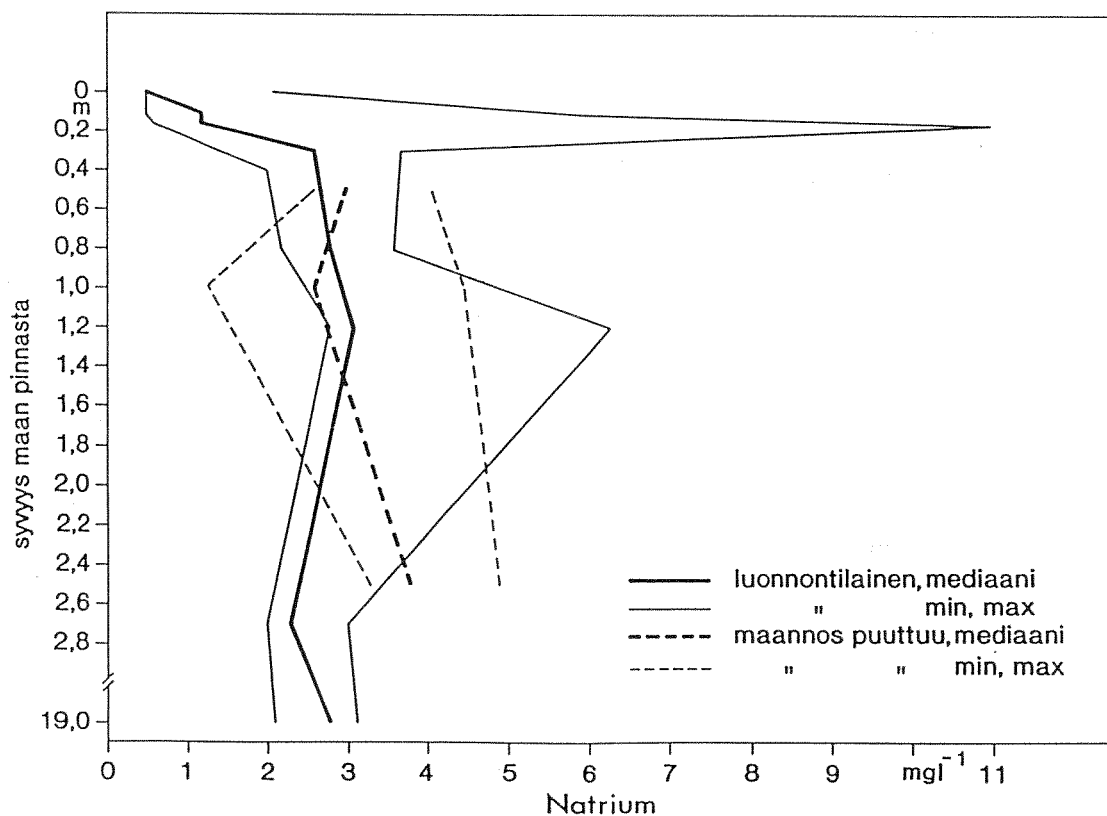
Natriumin minimi-, mediaani- ja maksimipitoisuudet Kapulasillanmäessä olivat < 0,5, 0,5 ja 2,1 mg/l ja Palaneenmäessä < 0,5, < 0,5 ja 2,9 mg/l. Alle määrittämissrajaa pitoisuuksista oli 52 % (34/66). Natriumlaskeuma oli suurimmillaan vuoden 1987

toukokuussa $9,5 \text{ mg/m}^2/\text{vrk}$ (7 vrk). Laskeuma oli keskimäärin $0,97 \text{ mg/m}^2/\text{vrk}$ eli $29 \text{ mg/m}^2/\text{kk}$ [Järvinen (1986) Sipoon Martinkylä 1971 – 1982 $20 \text{ mg/m}^2/\text{kk}$].

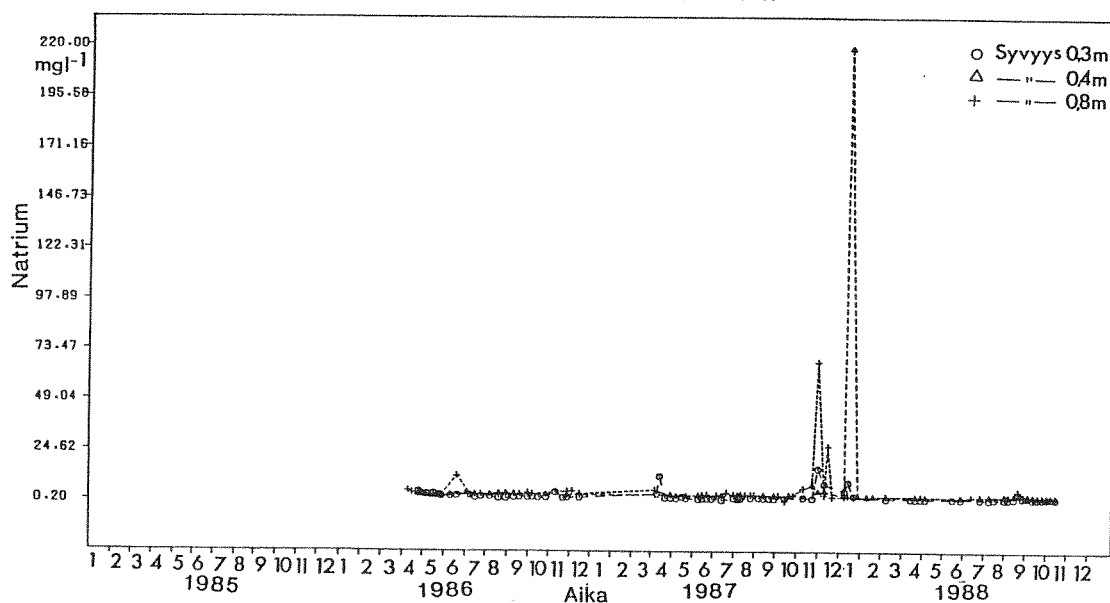
4.11.2 Luonnontilainen vajovesi

Keskimääräinen natriumpitoisuus nousi noin kaksinkertaiseksi laskeumaan verrattuna heti humushorizontin alapuolella. Tämän alapuolella pitoisuus nousi 1,2 metrin syvyyteen asti, jonka jälkeen oli vähäistä laskua välillä 1,2 – 2,5 m. Natriumpitoisuus oli 2,5 metrin syvyydessä hiukan alhaisempi kuin pohjavedessä (kuva 42).

Korkeimmillaan natriumpitoisuus oli lysimetrissä H336B (0,4 m) (kuva 43) 220 mg/l vuoden 1987 tammikuussa. Natriumpitoisuudet olivat korkeita yleisimmin keväällä, syksyllä ja talvella, kun vesi oli kylmää. Lysimetrin H334B (0,4 m) orgaanisen aineksen ja nitraatin pitoisuuksien nousujaksot nostivat myös natriumpitoisuutta selvästi. Keskimääräiset natriumpitoisuudet olivat lievässä laskusuunnassa.



Kuva 42. Vajoveden natriumpitoisuus eri syvyyksillä. (0 m = laskeuma, 19 m = pohjavesi).



Kuva 43. Vajoveden natriumpitoisuus luonnontilaisessa lysimetrissä. Korkeimmat pitoisuudet syksyllä – talvella 1987 aiheutuivat veteen runsaana liuenneesta hiilidioksidista.

4.11.3 Vajovesi sorapinnan alla

Yhden metrin syvyyteen asti vajoveden natriumpitoisuus oli suunnilleen sama kuin luonnontilassa. Tämän alapuolella se oli selvästi suurempi.

Pitoisuuksissa oli vuodenaikaisrytmi, siten että pitoisuudet olivat korkeita keväällä. Ne laskivat alkukesästä ja nousivat myöhemmin kesällä ja syksyllä sateista riippuen. 2,5 metrin syvyydellä natriumpitoisuuden vaihtelut olivat selvästi suurempia kuin luonnontilassa (kuva 44).

4.12 Kalium

4.12.1 Laskeuma

Kaliumin minimi-, mediaani- ja maksimipitoisuudet olivat Kapulasillanmäen laskeumassa < 0,5, 0,6 ja 2,1 mg/l ja Palancenmäessä < 0,5, < 0,5 ja 1,2 mg/l. Alle määritysrajan 0,5 mg/l määrityksistä oli 26 % (17/66). Kaliumlaskeuma oli suurimmillaan 5,3 mg/ m²/vrk (7 vrk) vuoden 1987 kesäkuussa. Laskeuma oli keskimäärin 0,97 mg/m²/ vrk eli kuukaudessa 30 mg/m² [Järvinen (1986) Sipoon Martinkylä 1971 – 1982 16 mg/m²].

4.12.2 Luonnontilainen vajovesi

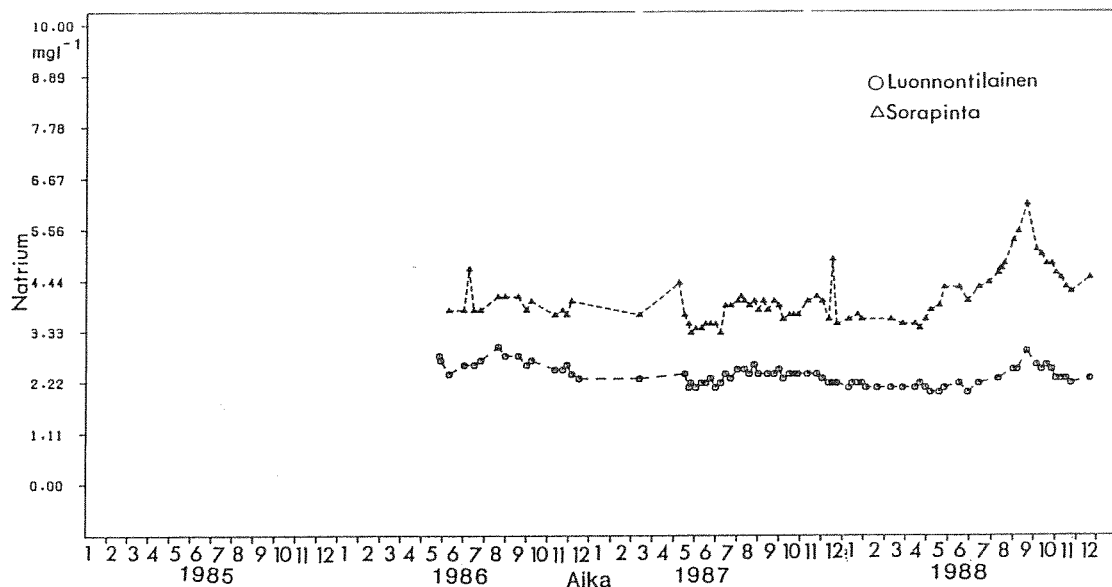
Maanpinnasta alaspäin mentäessä näytteiden kaliumpitoisuus nousi tasaisesti 1,2 metrin syvyyteen asti, jolloin pitoisuus oli noin kaksinkertainen laskeumaan verrattuna. Välillä 1,2 – 2,5 metriä pitoisuus laski takaisin laskeuman tasolle. Pohjavedessä pitoisuus oli hiukan korkeampi kuin 2,5 metrin syvyydessä (kuva 45).

Vajoveden kaliumpitoisuuden vaihtelut olivat varsin samankaltaisia natriumin kanssa. Korkeimmillaan pitoisuus oli 250 mg/l lysimetrissä H336B (0,4 m) vuoden 1987 tammikuussa.

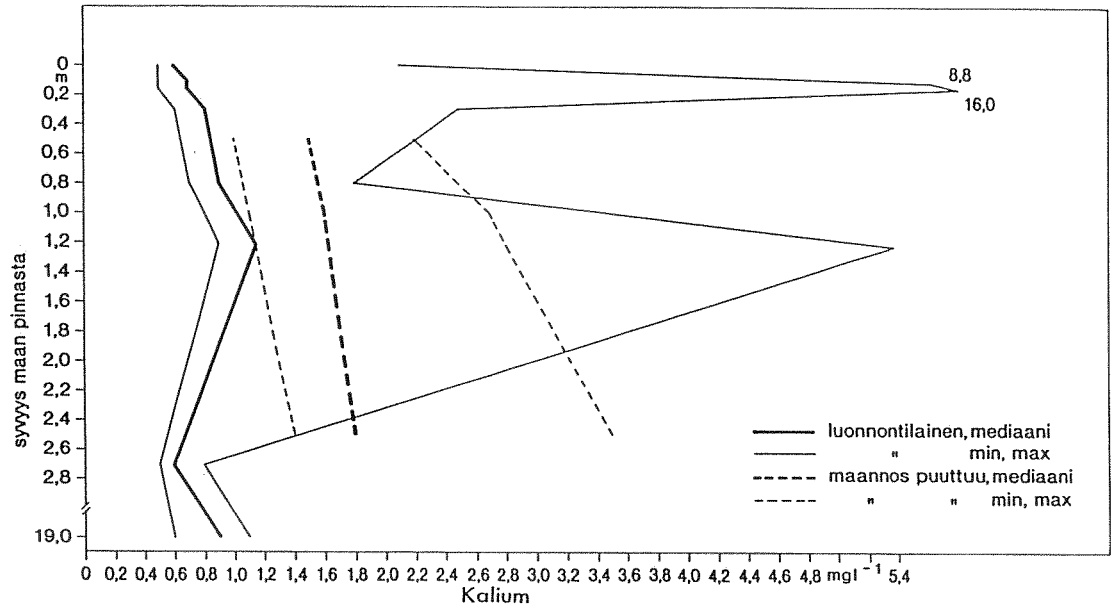
4.12.3 Vajovesi sorapinnan alla

Maannoksen puuttuessa vajoveden kaliumpitoisuus oli kaikilla syvyyksillä selvästi suurempi kuin luonnontilassa ja nousi alaspäin mentäessä tasaisesti.

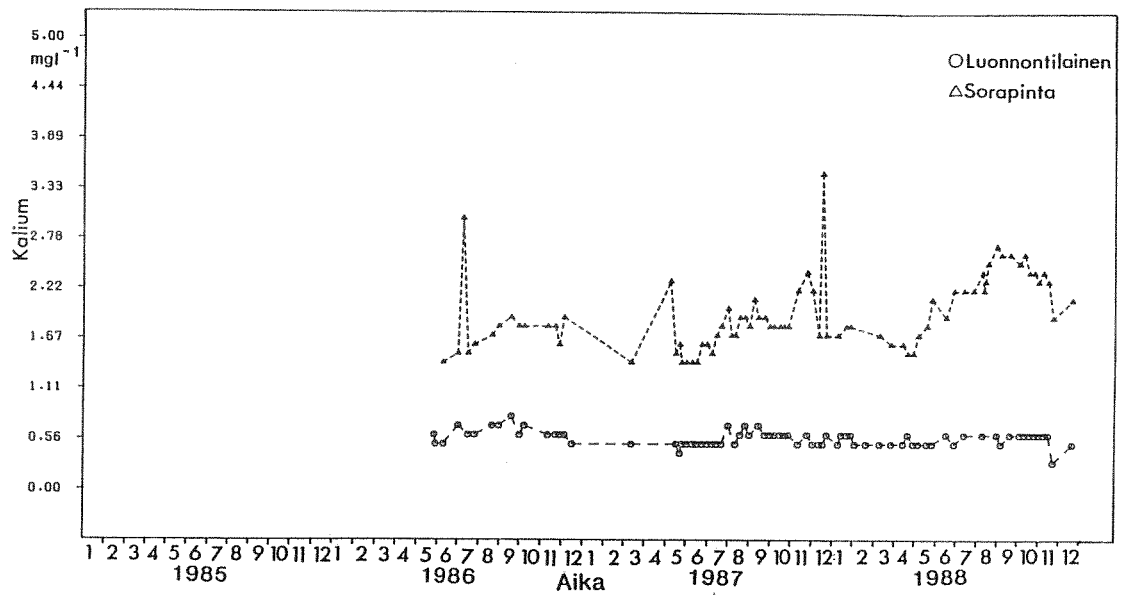
Näytteiden kaliumpitoisuudessa oli selviä vuodenaikaisvaihteluja. Pitoisuudet olivat suurimmillaan loppukesällä tai alkusyksyllä. Sateet vaikuttivat vajoveden kaliumpitoisuutta kohottavasti. Kaliumpitoisuuden vaihtelut olivat 2,5 metrin syvyydessä suuremmat kuin luonnontilassa (kuva 46).



Kuva 44. Vajoveden natriumpitoisuus luonnontilaisessa ja sorapintaaisessa lysimetrissä 2,5 metrin syvyydellä.



Kuva 45. Vajoveden kaliumpitoisuus eri syvyyksillä (0 m = laskeuma, 19 m = pohjavesi).



Kuva 46. Vajoveden kaliumpitoisuus luonnontilaisessa ja sorapintaisessa lysimetrissä 2,5 metrin syvyydellä.

4.13 Rauta

4.13.1. Laskeuma

Laskeuman rautapitoisuuden minimi-, mediaani ja maksimi- arvot Kapulasillanmäessä olivat < 0,05, < 0,05 ja 0,18 mg/l ja Palaneenmäessä < 0,05, < 0,05 ja 0,07 mg/l. Analyyseistä oli alle määrittäysrajan 82 % (54/66).

4.13.2 Vajovesi

Näytteiden rautapitoisuus oli lähes aina alle määrittäysrajan. Luonnontilassa määrittäysrajan ylitykset (max 0,2 mg/l) liittyivät orgaanisen aineksen pitoisuuden nousuun ($r = 0,77$).

Taulukko 4. Raudan määrittäysrajan 0,05 mg/l ylittävien pitoisuuksien osuus (%) näytteistä sekä suurin pitoisuus eri syvyyksillä.

Syvyys	Luonnontila		Paljas pinta	
	%	max	%	max
Laskeuma	19	0,18		
0,11 m	0			
0,16 "	0			
0,30 "	0			
0,50 "	0		2	0,05
0,80 "	0			
1,00 "	0		2	0,08
1,20 "	0			
2,50 "	0		3	0,09
pohjavesi	5	0,10		

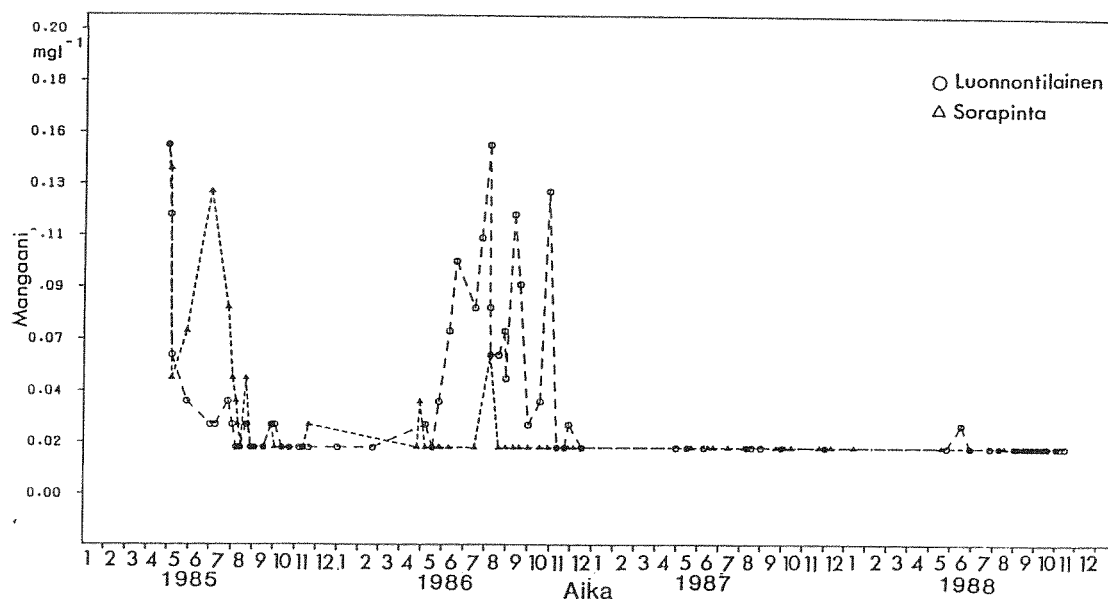
Taulukko 5. Mangaanin määrittäysrajan 0,02 mg/l ylittävien pitoisuuksien osuus (%) näytteistä sekä näytteiden mediaani- ja maksimipitoisuudet eri syvyyksillä.

Syvyys	Luonnontila			Paljas pinta		
	%	md	max	%	md	max
Laskeuma	93	0,05	0,17			
0,11 m	27	<	0,05			
0,16 "	8	<	0,03			
0,30 "	19	<	0,03			
0,50 "				45	<	0,07
0,80 "	38	<	0,04			
1,00 "				34	<	0,97
1,20 "	44	<	0,05			
2,50 "	19	<	0,04	21	<	0,04
pohjavesi	6	<	0,04			

4.14 Mangaani

4.14.1 Laskeuma

Laskeuman mangaanipitoisuuksien mediaani-, minimi- ja maksimiarvot Kapulasil-
lanmäessä olivat < 0,02, 0,04 ja 0,17 mg/l ja Palaneenmäessä < 0,02, < 0,02 ja 0,04
mg/l. Analyyseistä oli 29 % (19/66) alle määritysrajan 0,002 mg/l.



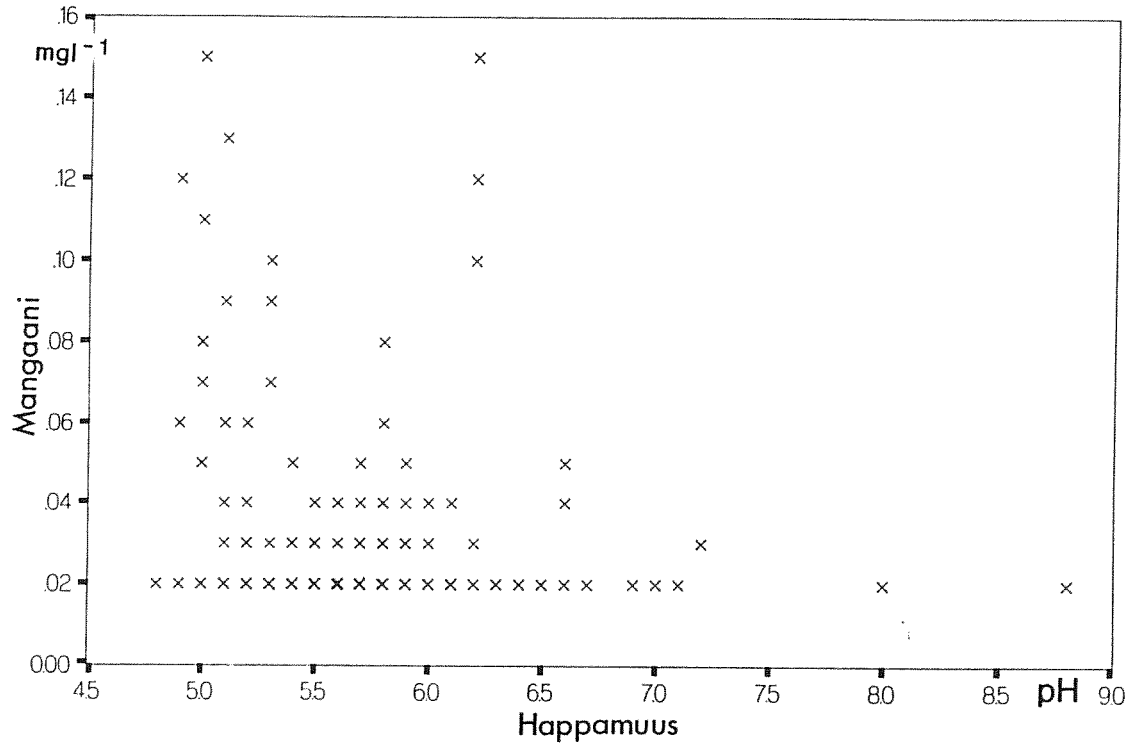
Kuva 47. Vajoveden mangaanipitoisuus luonnontilaisessa ja sorapintaisessa
lysimetrissä 0,4 metrin syvyydellä. Luonnontilassa mangaanipitoisuuden nousu
vuonna 1986 johtui nitraattipitoisuuden nousun aiheuttamasta alhaisesta pH:sta.

4.14.2 Vajovesi

Vajoveden mangaanipitoisuuksien analyyseistä jäi alle määritysrajan (0,02 mg /l)
luonnontilassa 79 % ja paljaan sorapinnan alla 68 %. Luonnontilassa korkeimpiin
mangaaniarvoihin liittyi korkea orgaanisen aineksen pitoisuus (kaliumpermanganaat-
tiluku), mutta vähäisissä määritysrajan ylityksissä vastaavaa yhteyttä ei ollut ($r =$
0,11). Sorapinnan alla mangaanin ja kaliumpermanganaattiluvun välillä oli erittäin
merkittävä korrelaatio ($r = 0,27$).

Nitraattipitoisuuden nousu ja pH:n lasku luonnontilaisessa lysimetrissä H334B
vuonna 1986 aiheuttivat lievän mangaanitason nousun (max 0,15 mg/l) (kuva 47).
Sorapintaisessa lysimetrissä H335Y (1,0 m) mangaanin pitoisuus oli korkea vuonna
1986 mahdollisesti orgaaniseen ainekseen liittyen (kuva 48).

Mangaanilla oli luonnontilassa erittäin merkittävä korrelaatio sinkin ($r = 0,32$), nikkelin ($r = 0,41$), lyijyn ($r = 0,20$), kadmiumin ($r = 0,19$) ja koboltin ($r = 0,54$) kanssa ja sorapinnan alla raudan ($r = 0,29$), nikkelin ($r = 0,41$) ja koboltin ($r = 0,96$) kanssa.



Kuva 48. Vajoveden mangaanipitoisuuden (mg/l) ja pH:n välinen yhteys luonnontilaisissa lysimetreissä.

4.15 Sinkki

4.15.1 Laskeuma

Laskeuman sinkkipitoisuuden minimi-, mediaani- ja maksimiarvot Kapulasillanmäessä olivat < 20 , 30 ja 180 $\mu\text{g/l}$ ja Palaneenmäessä 20, 30 ja 60 $\mu\text{g/l}$. Pitoisuusmäärittämisistä alle määritysrajan oli 18 % (12/66). Laskeuma oli suurimmillaan 396 $\mu\text{g/m}^2/\text{vrk}$ elokuussa 1985 ja keskimäärin 51 $\mu\text{g/m}^2/\text{vrk}$ eli 1,55 mg/m^2 kuukaudessa.

4.15.2 Vajovesi

Sinkkipitoisuus lysimetrinäytteissä oli yleensä pieni (alle 100 $\mu\text{g/l}$). Lysimetrissä H334B (0,4 m) nitraattipitoisuuden noususta johtunut alhainen pH-taso aiheutti

sinkin liukenemista veteen vuonna 1986. Luonnontilaisten näytteiden sinkkipitoisuus oli hivenen suurempi kuin sorapinnan alla (taulukko 6). Sinkillä oli erittäin merkittävä korrelaatio luonnontilassa mangaanin ($r = 0,32$), nikkelin ($r = 0,41$), lyijyn ($r = 0,21$) ja koboltin ($r = 0,27$) kanssa ja sorapinnan alla lyijyn ($r = 0,33$) kanssa.

Taulukko 6. Sinkin määrittämissä rajan 20 $\mu\text{g/l}$ ylittävien pitoisuuksien osuus (%) näytteistä sekä näytteiden mediaani- ja suurimmat pitoisuudet eri syvyyksillä.

Syvyys	Luonnontila			Paljas pinta		
	%	md	max	%	md	max
Laskeuma	84	30	120			
0,11 m	22	<	30			
0,16 "	16	<	80			
0,30 "	44	<	70			
0,50 "				14	<	40
0,80 "	62	20	50			
1,00 "				13	<	30
1,20 "	61	20	100			
2,50 "	12	<	50	9	<	40
pohjavesi		<	60			

4.16 Kupari

4.16.1 Laskeuma

Laskeuman kuparipitoisuuden minimi-, mediaani ja maksimipitoisuudet olivat Kapulasillanmäessä 1,5, 4,5 ja 27,0 $\mu\text{g/l}$ ja Palaneenmäessä 0,7, 2,6 ja 13,0 $\mu\text{g/l}$. Suurimmillaan laskeuma oli 59 $\mu\text{g/m}^2/\text{vrk}$ (7 vrk) vuoden 1988 elokuussa. Laskeuma oli keskimäärin 7,5 $\mu\text{g/m}^2/\text{vrk}$ eli 0,23 mg/m^2 kuukaudessa.

4.16.2 Vajovesi

Näytteiden kuparipitoisuus oli yleensä alle 5 $\mu\text{g/l}$. Pitoisuudet olivat keskimäärin suurimpia luonnontilaisen rikastumishorisontin näytteissä ja paljaan pinnan alla metrin syvyydessä. Huippupitoisuudet saatiin kuitenkin lysimetreistä, jotka olivat lähimpänä maan pintaa. Kuparipitoisuuksilla oli luonnontilassa selvä yhteys orgaaniseen ainekseen ja kloridiin. Paljaan pinnan alla kuparipitoisuudet nousivat orgaanisen aineksen ja bikarbonaatin mukana. Kuparipitoisuudessa näkyi vähäisiä merkkejä

kevätuhutoutumisesta ja runsaat sateet nostivat pitoisuuksia erityisesti syksyisin. 2,5 metrin syvyydessä pitoisuudet olivat paljaan pinnan alla suurempia kuin luonnontilassa vastaavalla syvyydellä (taulukko 7).

Taulukko 7. Kuparin määritysrajan 0,5 µg/l ylittävien pitoisuuksien osuus (%) näytteistä sekä näytteiden mediaani- ja maksimipitoisuudet eri syvyyksillä.

Syvyys	Luonnontila			Paljas pinta		
	%	md	max	%	md	max
Laskeuma	100	4,3	20,0			
0,11 m	100	1,2	37,0			
0,16 "	94	1,7	8,9			
0,30 "	100	2,5	5,5			
0,50 "			100	1,4	7,5	
0,80 "	100	1,6	5,7			
1,00 "	100			1,8	6,3	
1,20 "	100	2,5	6,7			
2,50 "	87	1,0	4,2	100	1,5	6,0
pohjavesi	88	1,1	6,5			

Kuparille oli erittäin merkittävä korrelaatio luonnontilassa raudan ($r = 0,21$), nikkelin ($r = 0,34$) ja lyijyn ($r = 0,23$) kanssa ja sorapinnan alla nikkelin ($r = 0,24$) ja lyijyn ($r = 0,23$) kanssa.

4.17 Nikkeli

4.17.1 Laskeuma

Laskeuman nikkelpitoisuuden minimi-, mediaani- ja maksimi-arvot olivat Kapulasil-lanmäessä < 0,5, 1,3 ja 10,0 µg/l ja Palaneenmäessä < 0,5, 0,6 ja 5,0 µg/l. Laskeuma oli suurimmillaan 18,8 µg/m²/vrk (7 vrk) vuoden 1988 elokuussa keskimäärin 2,5 µg/m²/vrk eli 76 µg/m² kuukaudessa.

4.17.2 Vajovesi

Vajoveden nikkelpitoisuus oli yleensä alle 4 µg/l. Luonnontilassa nikkelillä oli selvä yhteys orgaaniseen ainekseen. Vajovedessä oli nikkeliä melko tasaisesti eri syvyyksillä, eikä luonnontilaisella ja paljaalla sorapinnalla ollut suuria eroja. Korkeimpia nikkelpitoisuuksia oli näytteissä, jotka oli saatu heti humushorisonnin alapuolelta ja yli metrin syvyydestä (taulukko 8).

Taulukko 8. Nikkelin määrittämysrajan 0,5 µg/l ylittävien pitoisuuksien osuus (%) näytteistä sekä näytteiden mediaani- ja maksimipitoisuudet eri syvyyksillä.

Syvyys	Luonnontila			Paljas pinta		
	%	md	max	%	md	max
Laskeuma	95	1,3	10,0			
0,11 m	55	0,5	7,6			
0,16 "	55	0,5	2,2			
0,30 "	94	0,7				
0,50 "			1,2	92	0,7	2,6
0,80 "	77	0,7	1,6			
1,00 "	98	1,8	4,1			
1,20 "	89	1,0	4,6			
2,50 "	97	0,9	3,7	96	1,2	3,2
pohjavesi	43	<	6,2			

Nikkelillä oli erittäin merkittävä korrelaatio luonnontilassa raudan ($r = 0,16$), mangaanin ($r = 0,44$), kuparin ($r = 0,34$), kadmiumin ($r = 0,24$) ja koboltin ($r = 0,65$) kanssa ja sorapinnan alla mangaanin ($r = 0,41$), kuparin ($r = 0,34$) ja koboltin ($r = 0,38$) kanssa.

4.18 Lyijy

4.18.1 Laskeuma

Laskeuman lyijypitoisuuden minimi-, mediaani- ja maksimiarvot Kapulasillanmäessä olivat $< 0,5$, $2,7$ ja $14,0$ µg/l ja Palaneenmäessä $0,5$, $3,1$ ja $12,0$ µg/l. Laskeuma oli suurimmillaan 34 µg/m²/vrk (7 vrk) vuoden 1987 toukokuussa ja keskimäärin $4,1$ µg/m²/vrk vastaten $0,12$ mg/m² kuukaudessa.

4.18.2 Vajovesi

Vajoveden lyijypitoisuus oli yleensä alle 1 µg/l. Tämän ylittävillä pitoisuuksilla oli usein yhteys orgaaniseen ainekseen (korrelaatiokerroin luonnontilassa $r = 0,22$).

Lyijyllä oli erittäin merkittävä korrelaatio luonnontilassa mangaanin ($r = 0,21$) ja kuparin ($0,23$) kanssa ja sorapinnan alla sinkin ($r = 0,33$) ja kuparin ($r = 0,23$) kanssa.

Taulukko 9. Lyijyn määritysrajan 0,5 µg/l ylittävien pitoisuuksien osuus (%) näytteistä sekä mediaani- ja maksimipitoisuudet eri syvyyksillä.

Syvyys	Luonnontila			Paljas pinta		
	%	md	max	%	md	max
Laskeuma	95	2,7	14,0			
0,11 m	14	<	3,5			
0,16 "	14	<	2,0			
0,30 "	25	<	0,7			
0,50 "				15	<	1,0
0,80 "	8	<	0,5			
1,00 "				11	<	0,8
1,20 "	33	<	1,5			
2,50 "	5	<	1,4	8	<	1,1
pohjavesi	20	<	1,2			

Taulukko 10. Kadmiumin määritysrajan 0,1 µg/l ylittävien pitoisuuksien osuus (%) näytteistä sekä mediaani- ja suurimmat pitoisuudet eri syvyyksillä.

Syvyys	Luonnontila			Paljas pinta		
	%	md	max	%	md	max
Laskeuma	95	0,2	1,0			
0,11 m	63	0,1	0,4			
0,16 "	45	<	30,0			
0,30 "	94	0,1	0,3			
0,50 "				81	0,1	0,4
0,80 "	85	0,1	0,5			
1,00 "				66	0,1	9,0
1,20 "	94	0,1	0,2			
2,50 "	30	<	0,6	58	0,1	0,6
pohjavesi	34	<	0,3			

4.19 Kadmium

4.19.1 Laskeuma

Laskeuman kadmiumpitoisuuden minimi-, mediaani- ja maksimi-arvot Kapulasillanmäessä olivat < 0,10, 0,20 ja 1,00 µg/l ja Palaneenmäessä < 0,10, 0,15 ja 0,70 µg/l. Laskeuma oli suurimmillaan 3,0 µg/m²/vrk (3 vrk) vuoden 1985 elokuussa, ja laskeuma oli keskimäärin 0,24 µg/m²/vrk vastaten 7,4 µg/ m² kuukaudessa.

4.19.2 Vajovesi

Vajoveden kadmiumpitoisuus oli yleensä alle 0,5 µg/l. Lysimetrissä H334B kadmiumpitoisuuden taso oli vuosina 1985 ja 1986 lievästi kohonnut orgaanisen aineksen pitoisuuden ollessa korkea (1985) ja pH:n alhainen (1986). Korkeimmat kadmiumpitoisuudet olivat yksittäisiä huippuja. Yleensä niihin liittyi suuri kadmiumlaskeuma. Korkein pitoisuus oli 30 µg/l luonnontilaisessa lysimetrissä H335B vuoden 1986 joulukuussa. Korkean pitoisuuden syistä ei ole saatu selvyyttä.

Kadmiumilla oli erittäin merkittävä korrelaatio luonnontilassa mangaanin ($r = 0,19$), nikkelin ($r = 0,24$) ja koboltin ($r = 0,35$) kanssa.

4.20 Kromi

4.20.1 Laskeuma

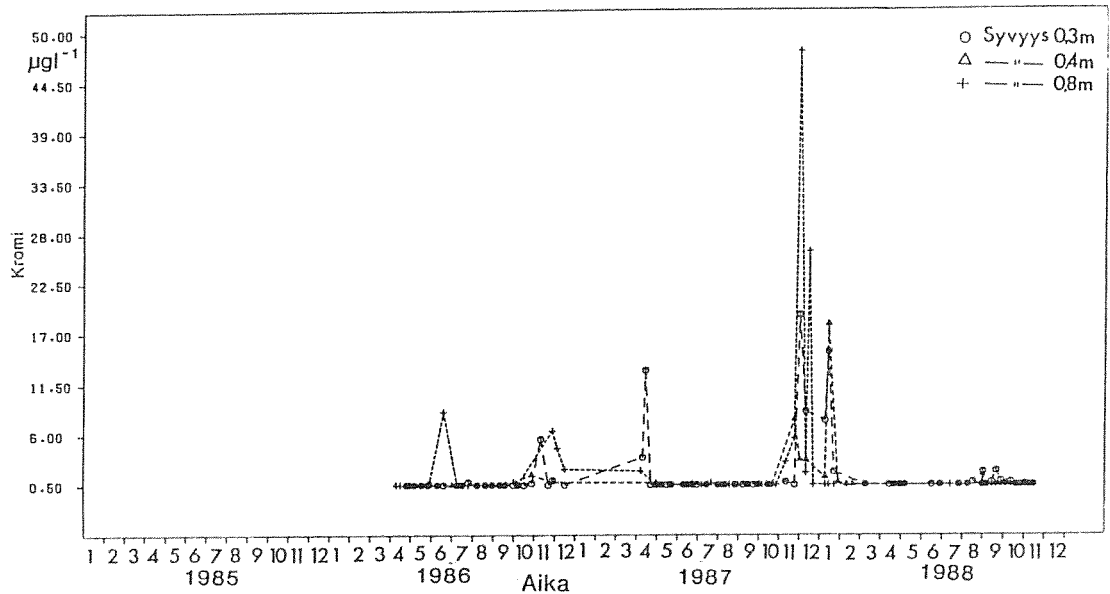
Laskeuman kromipitoisuuden minimi-, mediaani- ja maksimiarvot Kapulasil-
lanmäessä olivat < 0,5, < 0,5 ja 1,3 µg/l ja Palaneenmäessä < 0,5, < 0,5 ja 1,2 µg/l.
Laskeuma oli suurimmillaan 5,0 µg/m²/vrk (7 vrk) vuoden 1987 toukokuussa.

4.20.2 Vajovesi

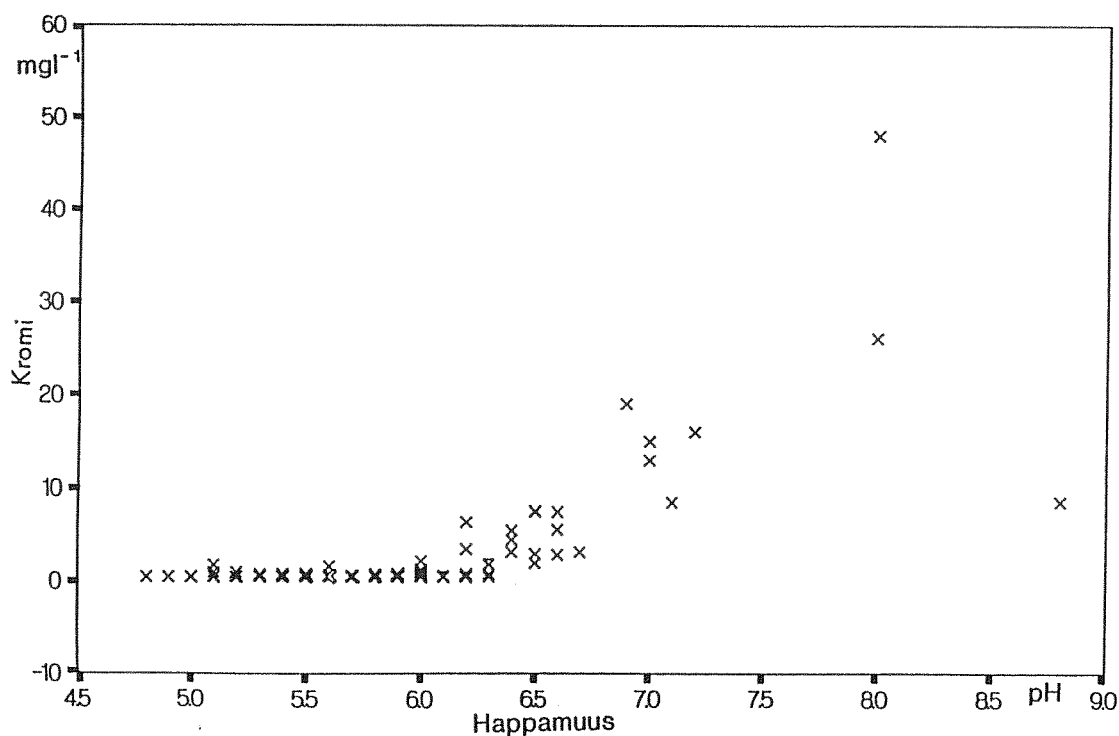
Suurimmassa osassa näytteitä kromipitoisuus oli alle määritysrajan 0,5 µg/l. Osassa näytteitä kromipitoisuus oli kuitenkin varsin korkea. Kromin käyttäytyminen maaperässä riippui voimakkaasti pH-tasosta. Happamissa olosuhteissa veteen voi liueta kolmiarvoista kromia Cr³⁺ ja emäksisissä olosuhteissa kuusiarvoista kromia Cr⁶⁺. Luonnontilassa kromin ja pH:n välillä oli erittäin merkittävä positiivinen korrelaatio ($r = 0,63$). Korkeimmat kromipitoisuudet liittyivät pH:n voimakkaaseen nousuun. Esimerkiksi lysimetrissä H336C (0,8 m) pH oli vuoden 1987 tammikuussa 8,0 ja kromipitoisuus 48 µg/l (kuva 49). Näytteiden kromipitoisuus alkoi nousta jo pH 6,0:n paikkeilla (kuva 50). 2,5 metrin syvyydessä kromipitoisuudet pysyivät määritysrajan tuntumassa tai sen alapuolella. Paljaan sorapinnan alla kromipitoisuuden nousua liittyi sekä pH:n laskuun että nousuun. Korkein pitoisuus 4,0 g/l mitattiin 2,5-metrin syvyydestä. Kromilla oli erittäin merkittävä korrelaatio luonnontilassa koboltin ($r = 0,18$) kanssa.

Taulukko 11. Kromin määrittämissärajien 0,5 µg/l ylittäneiden pitoisuuksien osuus (%) näytteistä sekä mediaani- ja maksimipitoisuudet eri syvyyksillä.

Syvyys	Luonnontila			Paljas pinta		
	%	md	max	%	md	max
Laskeuma	35	<	1,3			
0,11 m	12	<	7,5			
0,16 "	6	<	16,0			
0,30 "	44	<	1,2			
0,50 "				3	<	0,6
0,80 "	8	<	0,6			
1,00 "	11	<	1,0			
1,20 "	17	<	2,9			
2,50 "	3	<	0,5	17	<	4,0
pohjavesi	3	<	0,9			



Kuva 49. Vajoveden kromipitoisuus luonnontilaisessa lysimetrissä. Korkeimmissa pitoisuuksissa pH oli korkea.



Kuva 50. Vajoveden kromipitoisuuden ($\mu\text{g/l}$) ja pH:n välinen yhteys luonnontilaisissa lysimetreissä.

4.21 Koboltti

4.21.1 Laskeuma

Laskeuman kobolttipitoisuuden minimi- mediaani- ja maksimiarvot Kapulasillanmäessä olivat $< 0,5$, $< 0,5$ ja $0,7 \mu\text{g/l}$ ja Palaneenmäessä $< 0,5$, $< 0,5$ ja $0,8 \mu\text{g/l}$.

4.21.2 Vajovesi

Vajoveden kobolttipitoisuus oli yleensä alle määrittäysrajan $0,5 \mu\text{g/l}$ tai lähellä sitä. Luonnontilassa koboltilla oli selvä yhteys mangaaniin ($r = 0,54$) ja nikkeliin ($r = 0,65$). Lievästi kohonneita pitoisuuksia liittyi pH:n laskuun lysimetrissä H334B (0,4 m) vuonna 1986. Paljaan sorapinnan alla kobolttin ja mangaanin yhteys oli vielä selvempi kuin luonnontilassa ($r = 0,96$). Korkeimmat kobolttipitoisuudet (max $13 \mu\text{g/l}$) mitattiin lysimetrissä H335Y juuri mangaaniin liittyen.

Koboltilla oli erittäin merkittävä korrelaatio lisäksi luonnontilassa sinkin ($r = 0,27$), kadmiumin ($r = 0,35$) ja kromin kanssa ($r = 0,18$) ja sorapinnan alla raudan ($r = 0,34$) ja nikkelin ($r = 0,38$) kanssa.

Taulukko 12. Koboltin määrittämissärajien 0,5 µg/l ylittäneiden pitoisuuksien osuus (%) näytteistä sekä mediaani- ja maksimipitoisuudet eri syvyyksillä.

Syvyys	Luonnontila			Paljas pinta		
	%	md	max	%	md	max
Laskeuma	9	<	0,7			
0,11 m	4	<	0,5			
0,16 "	2	<	0,8			
0,30 "	6	<	0,5			
0,50 "				17	<	1,4
0,80 "	15	<	0,8			
1,00 "	32	<	13,0			
1,20 "	0	<	<			
2,50 "	16	<	1,4	11	<	0,9
pohjavesi	3	<	1,2			

4.22 Alumiini

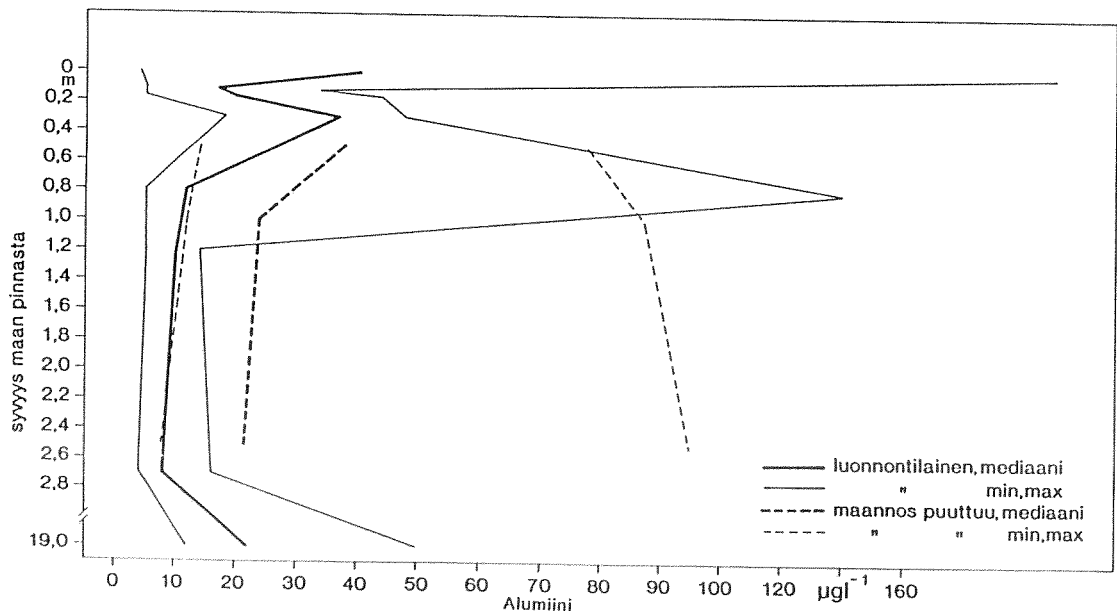
4.22.1 Laskeuma

Laskeuman alumiinipitoisuuden minimi-, mediaani- ja maksimi-arvot Kapulasil-lanmäessä olivat 4,0, 40,5 ja 310,0 µg/l ja Palancenmäessä 7,0, 53,5 ja 240,0 µg/l. Keskimääräinen alumiinilaskeuma oli 82,7 µg/m²/vrk vastaten 2,5 mg/m² kuukau-
dessa.

4.22.2 Luonnontilainen vajovesi

Korkeimmat alumiinipitoisuudet mitattiin näytteistä, jotka oli otettu rikastumisho-
risontin yläosasta noin 0,3 – 0,4 metrin syvyydeltä. Noin metrin syvyyteen asti esiin-
tyi korkeita yksittäisiä, pitoisuustasosta selvästi poikkeavia arvoja. 1,2 metrin syvyy-
dellä ja tämän alapuolella vajoveden alumiinipitoisuudet ja niiden vaihtelu olivat
pieniä (kuva 51). Pohjaveden pitoisuustaso oli noin kaksinkertainen 2,5 metrin
syvyydestä analysoituihin näytteisiin verrattuna. Myös pitoisuuksien vaihteluväli oli
selvästi suurempi.

Rikastumishorisontissa ja sen yläpuolella alumiinipitoisuuksien vaihtelu ja korkeat pitoisuudet olivat selvässä yhteydessä orgaanisen aineksen pitoisuuteen (KMnO_4 -lukuun). Korkeita pitoisuuksia oli jatkuvasti varsinkin lysimetrissä H336A 0,3 metrin syvyydessä (kuva 52). Lysimetriastia on podsolimaannoksen Bh-horisontissa, johon saostui humusta. Selvä pH:n laskuun ilman orgaanista ainesta liittyvä alumiinipitoisuuden nousujakso oli lysimetrissä H334B (0,4 m) vuonna 1986 (kuva 53). Tällöin pitoisuus nousi myös korkeimpaan arvoonsa 1,3 mg/l. Muissa läheltä maanpintaa olevissa lysimetreissä oli yksittäisiä alhaiseen pH-tasoon liittyviä korkeita alumiinipitoisuuksia. Orgaanisen aineksen huuhtoutumiseen liittyvällä pintaosien vajoveden alumiinipitoisuuden nousulla oli selvä yhteys sateisiin. Selviä luonnontilaisen vajoveden alumiinipitoisuuden pitempiäaikaisia muutossuuntia ei tutkimusaikana ollut havaittavissa pH:n jatkuvasta laskusta huolimatta.

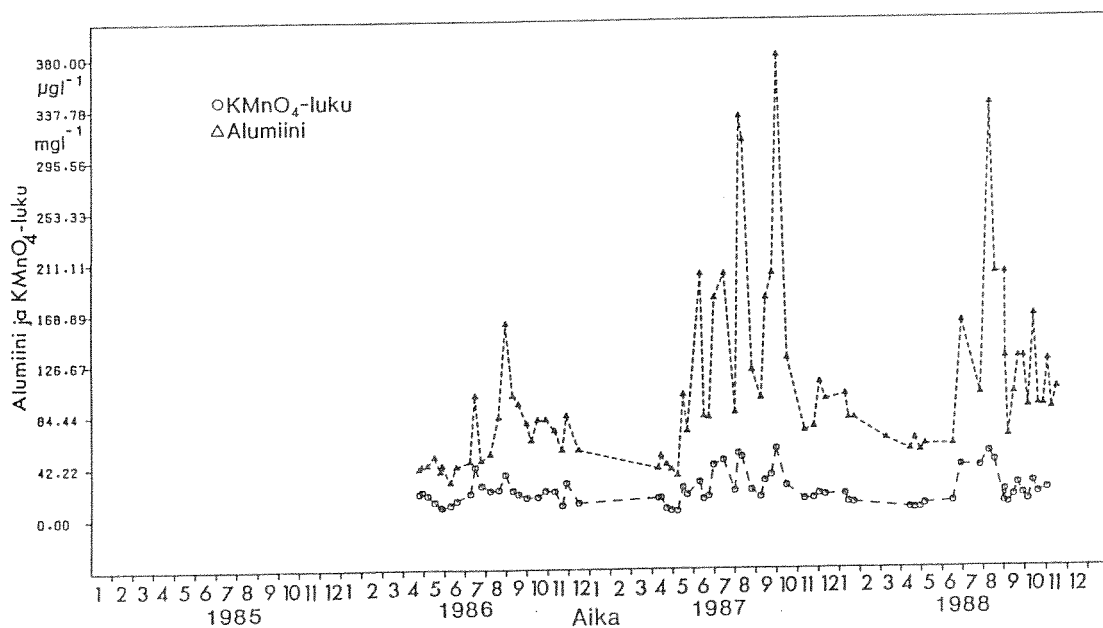


Kuva 51. Vajoveden alumiinipitoisuus eri syvyyksillä (0 m = laskeuma, 19 m = pohjavesi).

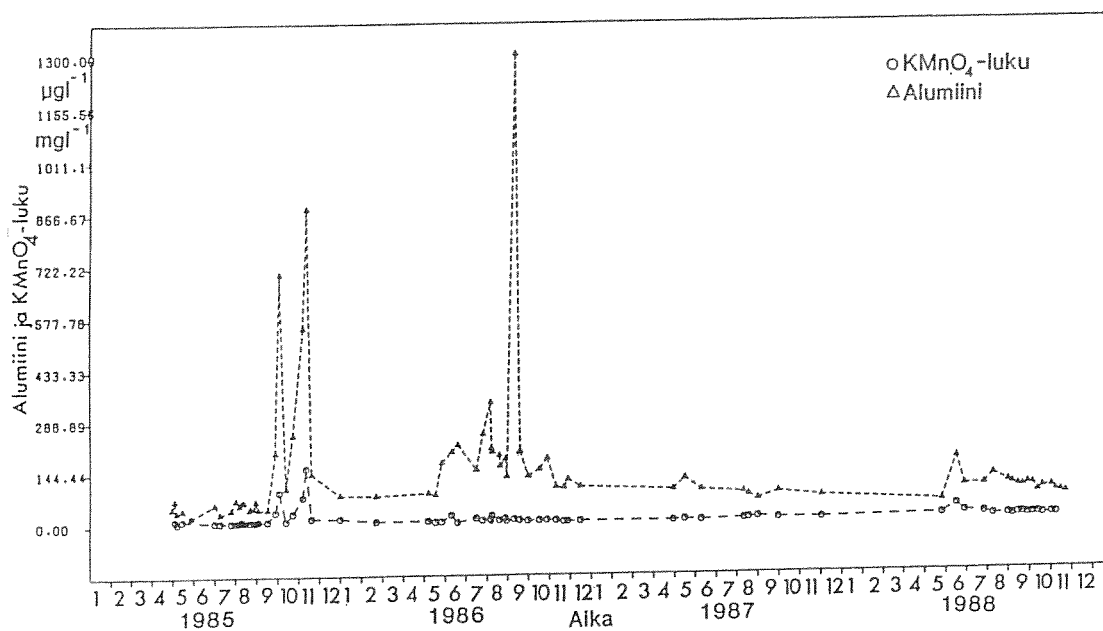
4.22.3 Vajovesi sorapinnan alla

Paljaan sorapinnan alapuolella noin metrin syvyydeltä alaspäin vajoveden alumiinipitoisuuden mediaaniarvo oli noin kaksinkertainen luonnontilaan verrattuna. Maan pintaosissa korkeimmat pitoisuudet olivat pienempiä kuin luonnontilassa, mutta 1,2 metrin syvyydessä ja sen alapuolella suurin luonnontilainen alumiinipitoisuus oli selvästi pienempi kuin mediaaniarvo paljaan pinnan alapuolella.

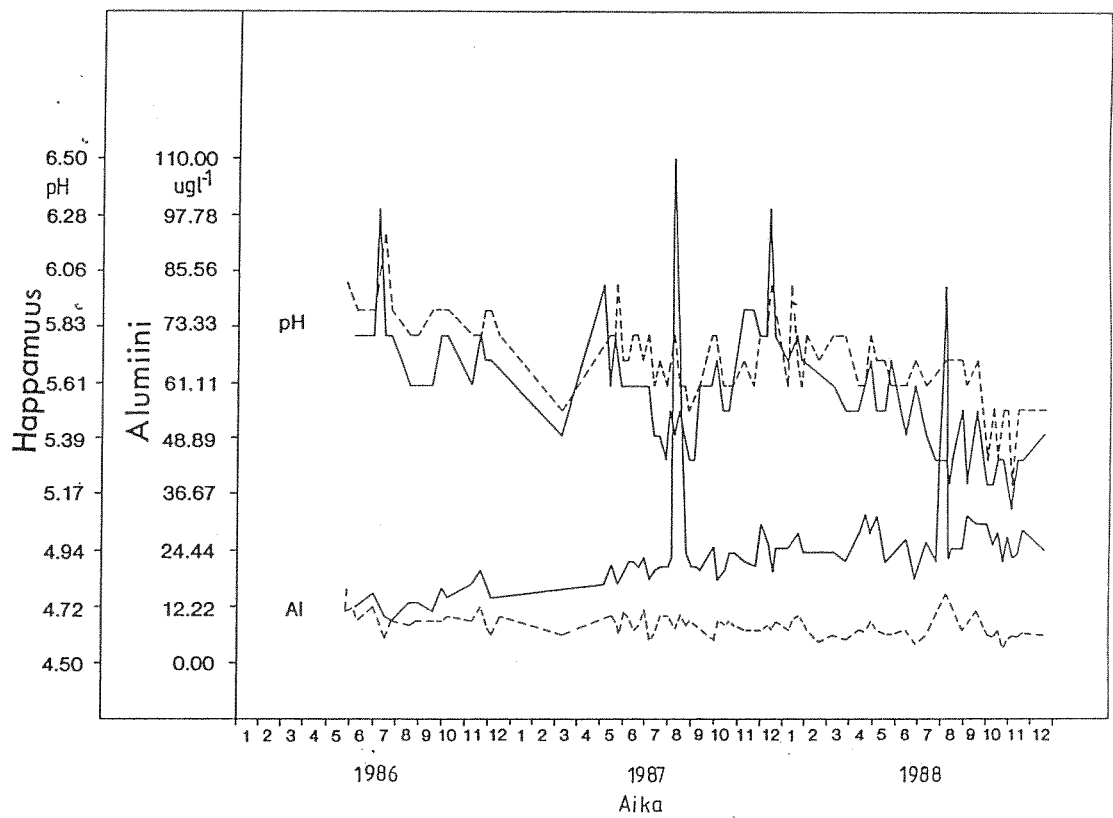
Paljaan sorapinnan alla alumiinipitoisuuden yhteys orgaaniseen ainekseen oli vähäisempi ja pH-tasoon vahvempi kuin luonnontilassa. pH:n laskiessa alumiinipitoisuus eri syvyyksillä nousi jatkuvasti. Kun pitoisuuksien lähtötasot vuonna 1986 olivat luonnontilaisessa ja paljaan sorapinnan alla olevissa lysimetreissä kahden ja puolen metrin syvyydessä samat, oli vuonna 1988 pitoisuus paljaan pinnan alla noin kaksinkertainen luonnontilaan verrattuna (kuva 54). Vajoveden alumiinipitoisuuden ja pH:n välisiä yhteyksiä on kuvissa 55 ja 56.



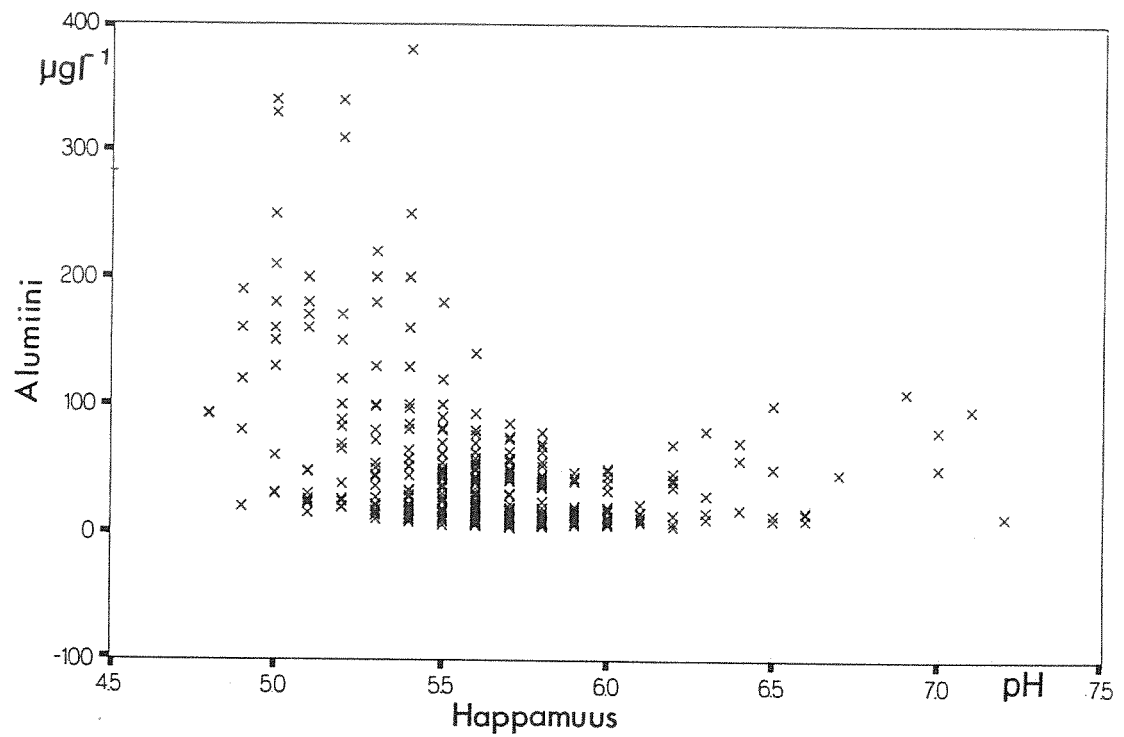
Kuva 52. Vajoveden alumiinipitoisuus ja kaliumpermanganaattiluku luonnontilaisessa lysimetrissä (0,3 m).



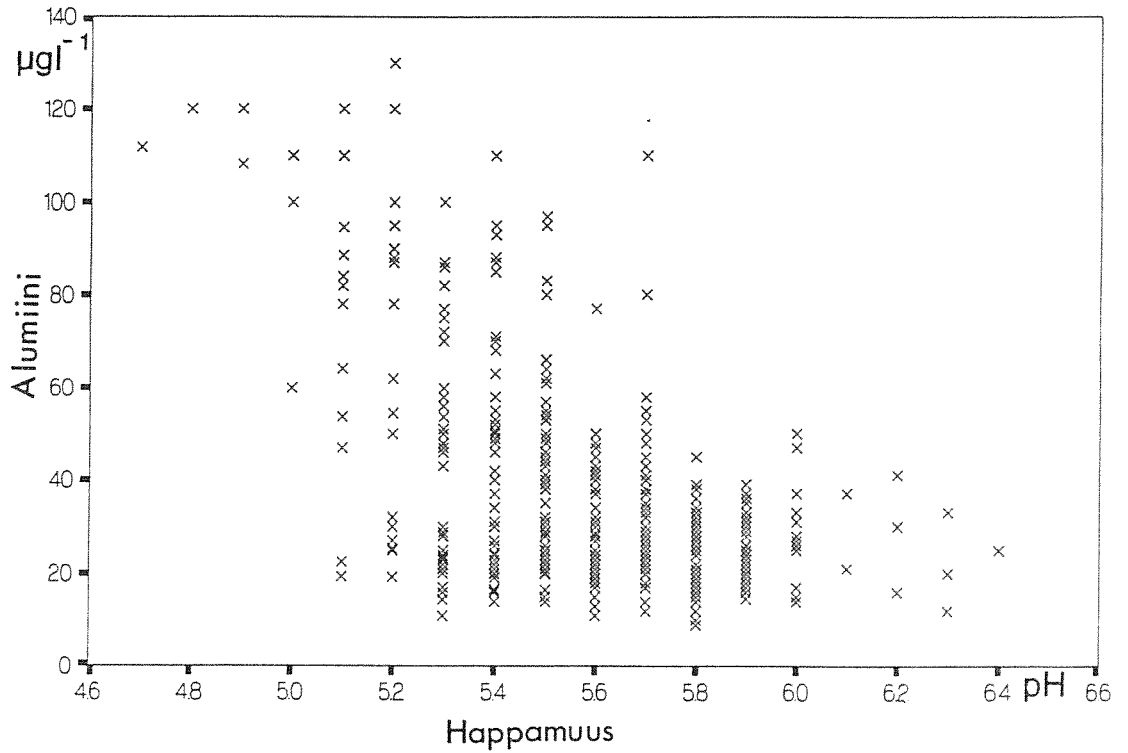
Kuva 53. Vajoveden alumiinipitoisuus ja KMnO₄-luku luonnontilaisessa lysimetrissä (0,4 m). Vuoden 1985 huippuarvoissa KMnO₄-luku oli korkea. Vuonna 1986 KMnO₄-luku ja pH-taso olivat alhaisia.



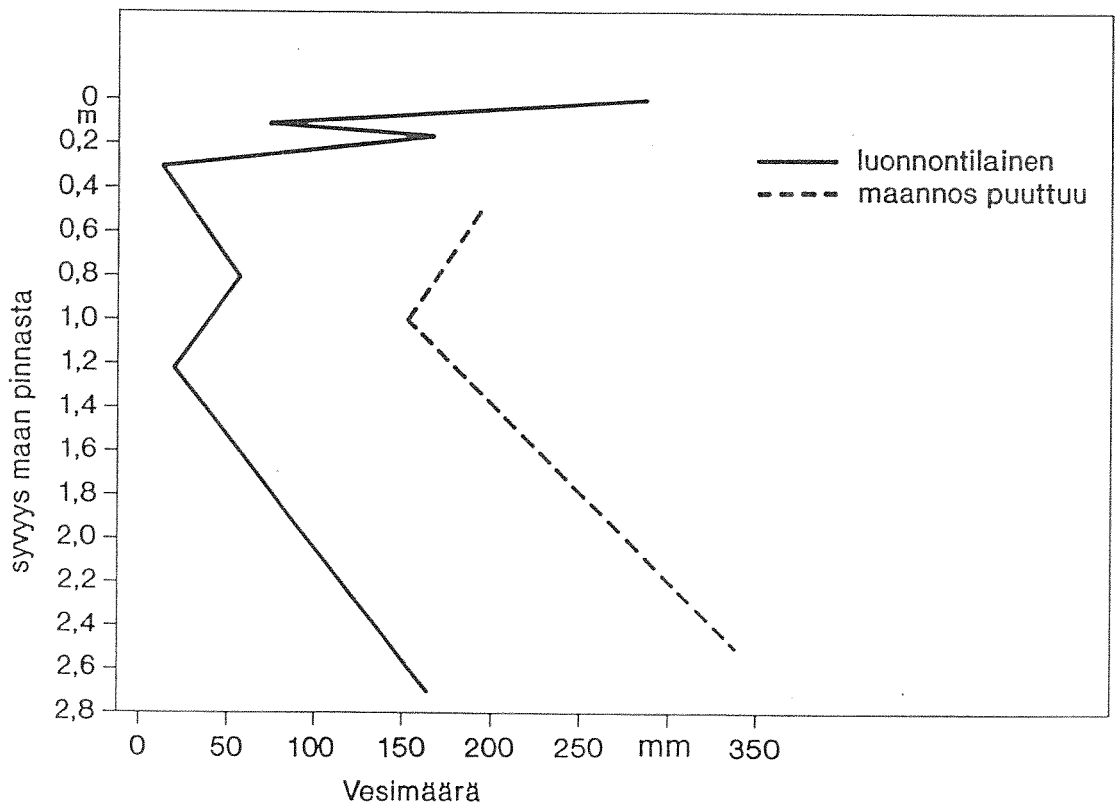
Kuva 54. Vajoveden alumiinipitoisuus ja pH luonnontilaisessa ja sorapintaaisessa lysimetriissä 2,5 metrin syvyydessä.



Kuva 55. Vajoveden alumiinipitoisuuden ($\mu\text{g/l}$) ja pH:n välinen yhteys luonnontilaisissa lysimetreissä.



Kuva 56. Vajoveden alumiinipitoisuuden (ug/l) ja pH:n välinen yhteys sorapintaissa lysimetreissä.



Kuva 57. Vajovesi- ja sadevesimäärät eri syvyyksillä vuoden 1987 kesäkuun alusta lokakuun loppuun.

4.23 Vesimäärät

Vesimäärien mittausta häittäsivät laskeumakerääjien ajoittainen rikkoutuminen ja vajoveden keräysastioiden ylivuodot. Vesimääräarviot on tehty vuoden 1987 kesäkuun alusta lokakuun loppuun, jolloin häiriöitä ei ollut (kuva 57).

Laitteistojen rakenteesta johtuen lysimetriastiat keräävät vettä poikkipinta-alaansa suuremmalta alalta. Lähellä maan pintaa vaikutus on vähäinen, mutta kasvaa syvyyden kasvaessa. 2,5 metrin syvyydessä astia kerää vettä noin 1,7 kertaa pinta-alaansa suuremmalta alalta.

Lysimetrillä saadaan vettä vain silloin, kun vesi virtaa maaperässä vapaasti, ts. vesi virtaa maarakeiden välisissä tyhjissä tiloissa eikä pelkästään rakeiden pintoja pitkin. Veden virtaus riippuu huokos- ja rakosysteemeistä ja vettä adsorboivasta pinta-alasta. Luonnontilassa karike- ja humushorisonttien läpi virtaavasta vedestä osa on maarakeisiin sitoutunutta. Talteen saatiin vesimäärä, joka on noin 25 % sadeveden määrästä. Uuttumishorisontissa vesi virtaa lähes vapaasti ja talteen saatiin noin 60 % sadeveden määrästä. Tämän mukaan heti maan pinnassa haihtui 40 % sadevedestä. Rikastumishorisontissa vesi on voimakkaasti maarakeisiin sitoutunutta. Näytteitä saatiin vain kovien sateiden aikana mahdollisesti sekundäärirakojen täytyessä tai yläpuolisen vesipatsaan painaessa vettä irti maarakeista. Rikastumishorisontin alapuolella vesi virtaa vapaasti ja talteen saatiin vesimäärä, joka on 30 – 40 % sadeveden määrästä. Kasvien käyttöön lähinnä uuttumishorisontista ja rikastumishorisontin yläosasta poistui tämän mukaan noin 20 – 30 % sadeveden määrästä. Luonnontilaisessa lysimetrissä H336 vesimäärät olivat rikastumishorisontissa suurempia kuin H335:ssä. Rikastumishorisontin vedenjohtavuus jonkin verran vaihteli paikasta toiseen (puiden alla suurempi vedenjohtavuus), vaikka maa-aineksen keskimääräisessä rackoossa ei ollut eroja. Eräs tähän vaikuttava tekijä on sekundääristen rakosysteemien (juurikanavat) paikallinen vaihtelu.

Maannoksen puuttuessa paljaalta sorapinnalta haihtui noin 30 – 40 % sadevedestä. Jäljellä oleva vesi, 60 – 70 %, virtasi vapaasti alaspäin. Ero luonnontilaan johtuu kasvien puuttumisesta ja rapautumattoman pohjamaan suuremmasta vedenjohtavuudesta.

5 PERUSTUTKIMUS LAMMI, SALIMÄKI

Lammin lysimetrituloksia käsitellään erillään Tuusulan tuloksista, koska Lammin Salimäen maaperässä on sulfidimineraaleja. Sulfidien hapettuessa syntyy rikkihappoa.

Näkyviä merkkejä rikkihapon muodostumisesta ovat maannoksen voimakas rapautuneisuus, rautasaostumat syvällä maannoksen alapuolella ja kasvillisuus (ks. aluekuvaukset).

Vajovedessä hapon tärkeimmät vaikutukset olivat ajoittain alhaiset pH:n arvot, korkeat sulfaattipitoisuudet, korkeat raskasmetalli- ja alumiinipitoisuudet ja veden eri ominaisuuksien suuret vaihtelut.

pH oli luonnontilassa pintahorisonteissa alhaisimmillaan 15 cm:n syvyydessä 4,0 (vaihteluväli 4,0 – 5,5) ja vielä 1,5 m:n syvyydessä 4,9 (4,9 – 6,6). Paljaspintaisissa lysimetreissä pH oli korkeampi, koska aines oli rapautumatonta perusmaata. 15 cm:n syvyydessä pH vaihteli välillä 4,5 – 6,1 ja 1 m:n syvyydessä 4,9 – 6,2.

Sulfaattipitoisuus vaihteli 15 cm:n syvyydessä luonnontilassa välillä 20 – 120 mg/l ja 1,5 metrin syvyydessä välillä 30 – 52 mg/l. Paljaan sorapinnan alla pitoisuus oli 15 cm:ssä välillä 6,4 – 62 mg/l ja yhdessä metrissä välillä 6,1 – 29 mg/l.

Raskasmetalleista sinkki-, kupari-, nikkeli- ja kobolttipitoisuudet olivat ajoittain varsin korkeita. Sinkkipitoisuuden korkein arvo luonnontilassa oli 530 µg/l (35 cm), kuparipitoisuuden 250 µg/l (15 cm), nikkeli- ja kobolttipitoisuuden 270 µg/l (35 cm) ja kobolttipitoisuuden 130 µg/l (30 cm). Vielä 1,5 metrin syvyydessä vastaavat maksimipitoisuudet olivat sinkkiä 200 µg/l, kuparia 25 µg/l, nikkeliä 68 µg/l ja kobolttia 18 µg/l. Myös keskimääräiset pitoisuustasot olivat korkeita. Lisäksi näytteissä oli runsaasti mangaania ja ajoittain kadmiumia. Paljaan pinnan alla raskasmetallien pitoisuustasot olivat vähän alhaisempia kuin luonnontilassa. Sinkkipitoisuuden huippuarvo oli 160 µg/l, kuparipitoisuuden 140 µg/l, nikkeli- ja kobolttipitoisuuden 140 µg/l ja kobolttipitoisuuden 57 µg/l. Myös mangaani- ja kadmiumipitoisuudet olivat tavallista korkeampia.

Alumiinia oli enimmillään 7,5 mg/l ja pitoisuuksien mediaaniarvot eri lysimetreissä olivat 0,1 – 0,3 mg/l. Alumiinipitoisuuksissa ei ollut juuri eroa luonnontilaisten ja sorapintaisten lysimetrien välillä.

Vajoveden muista ominaisuuksista erityisesti nitraatti- ja kalsiumipitoisuudet olivat korkeita.

Pohjavedessä piihappopitoisuudet olivat korkeita (≈ 15 mg/l) maan pinnan voimakkaan rapautumisen seurauksena. Vedessä oli myös nitraattia, sulfaattia, bikarbonaattia ja kalsiumia enemmän kuin Tuusulan luonnontilaisilla tutkimusalueilla. Veden korkeasta pH:sta (6,1 – 6,7) johtuen raskasmetalleista näkyi vain vähäisiä jälkiä. Alumiinipitoisuuksille tyypillistä oli suuri vaihtelu. Raskasmetallien saostumisesta merkkinä oli näytteitä pumpattaessa havaintoputkesta tullut rautasakka.

6 JÄLKIHOITOKOKEET

6.1 Yleistä

Jälkihoitokokeiden tarkoituksena oli tutkia erilaisten keinotekkoisten pintarakenteiden vaikutusta vajoveden laatuun. Pintarakenteet tehtiin seuraavilla tavoilla:

- Noin metrin syvyyteen sijoitettujen lysimetriastioiden (ks. laitteistot) päälle levitettiin soraa.
- Rakenteessa 1 (H339) pyrittiin jäljittelemään luonnontilaista maannosta. Soran päälle levitettiin noin 20 cm paksu kerros hiekkaa. Hiekan päälle levitettiin läheltä maan pintaa löytynyttä rautapitoista saostumaa noin 15 cm. Saostuman päälle taas levitettiin taas hiekkaa ja sen päälle noin 15 cm paksu kerros humuspitoista pintamaata.
- Rakenne 2 (H338) oli muuten samanlainen kuin rakenne 1, mutta siitä puuttui humuspitoinen pintamaa.
- Rakenteessa 3 (H33A) soran päällä oli pelkkä hiekkakerros.
- Lisäksi soran päälle levitettiin soranpesussa syntynyttä pesulietettä. Tämän kokeen tuloksista kerrotaan omassa luvussaan.
- Eri rakenteisiin istutettiin mäntyjen ja harmaaleppien taimia.

6.2 Kasvillisuus

Rakenteeseen 1 ilmaantui rehevä aluskasvillisuus jo ensimmäisenä kesänä. Muissa rakenteissa aluskasvillisuutta ei juuri ollut. Istutetut taimet näyttivät parempikuntoisilta rakenteessa 1 kuin muissa rakenteissa tutkimusaikana. Tässä työssä ei arvioida yksityiskohtaisesti kasvillisuuden kehitystä.

6.3 Vajovesi

- Rakenteessa 1 sähkönjohtavuusarvot olivat yleensä välillä 4 – 7 mS/m. Muutama korkeampi arvo liittyi nitraattipitoisuuden nousuun rakentamisen jälkeen vuonna 1987. Näitä nitraattihuippuja lukuun ottamatta sähkönjohtavuus pysyi

melko vakaana. Arvot olivat lähellä Kapulasillanmäen luonnontilaisten lysimetrien sähkönjohtavuusarvoja ja alhaisempia kuin sorapintaisissa lysimetreissä.

Rakenteen 2 kahdessa toimivassa lysimetriastiassa veden laatu vaihteli materiaalin epähomogeenisuuden vuoksi. Molemmissa astioissa sähkönjohtavuudet olivat selvästi suurempia kuin rakenteessa 1. Mediaaniarvot olivat 9,5 ja 16,2 mS/m, joista ensimmäinen oli lähellä paljaan sorapinnan arvoja.

Rakenteessa 3 sähkönjohtavuuden arvot olivat vähän korkeampia kuin rakenteessa 1. Arvot kuitenkin vaihtelivat voimakkaasti ja reagoivat herkästi sateisiin. Huippuarvot olivat selvästi suurempia kuin rakenteessa 1. Voimakkaimmoin muutoksiin vaikuttivat bikarbonaatti- ja nitraattipitoisuuksien muutokset. Suolojen rikastuminen maan pintaan alkukesästä näkyi tuloksissa selvästi.

- Kaikissa jälkihoitolysimetreissä bikarbonaattipitoisuudet olivat korkeampia ja vaihtelut suurempia kuin Kapulasillanmäessä luonnontilaisissa ja paljaan sorapinnan lysimetreissä. Eri rakenteista alhaisin bikarbonaattipitoisuus oli rakenteessa 1 ilmeisesti aluskasvillisuuden vaikutuksesta.
- pH:n arvot olivat tutkimusaikana selvässä laskusuunnassa eri lysimetreissä. Rakenteessa 3 pH:n arvot olivat alhaisemmat (min. 5,1) kuin muissa rakenteissa.
- Väriluku oli luonnontilaa jäljittelevässä rakenteessa 1 jatkuvasti alhainen. Rakenteessa 2 oli näytteissä väriä rakentamisen jälkeen, mutta väriluku aleni nopeasti ja pysyi alhaisena. Hiekkapinnan alla rakenteessa 3 vesi oli ajoittain värillistä.
- Kaliumpermanganaattiluvut olivat rakenteen 1 näytteissä selvästi alhaisemmat kuin muissa rakenteissa ja Kapulasillanmäen sorapintaisissa lysimetreissä. Merkittävää on, että tämän rakenteen pinnassa olevasta humuskerroksesta ei tapahtunut mainittavaa huuhtoutumista, vaan rakenne pidatti orgaanista ainesta paremmin kuin muut.
- Kaikista rakenteista huuhtoutui nitraattia heti rakentamisen jälkeen. Pitoisuudet olivat korkeimpia rakenteissa 1 ja 2, joissa rautasakkaan adsorboitunutta nitraattia lähti liikkeelle. Luonnontilaa jäljittelevässä rakenteessa 1 pitoisuudet olivat korkeimmillaan 1,5 – 2 kk rakentamisen jälkeen elo- syyskuussa 1987. Tämän jälkeen pitoisuudet alenivat niin, että 1988 nitraattia oli näytteissä vain vähän ja syksyllä –88 alle määritysrajan 1 mg/l. Rakenteessa 2 rautasakasta irtosi nitraattia ja laskeumasta tuli lisää. Pitoisuudet pysyivät jatkuvasti korkei-

na. Rakenteen 3 hiekkaan oli nitraattia adsorboitunut vähemmän kuin rakenteiden 1 ja 2 rautasakkaan. Hiekka ei kuitenkaan pystynyt pidättämään laskeumasta tulevaa nitraattia ja pitoisuuksissa oli jatkuvia, pulssinomaisia vaihteluja. Vuonna 1988 rakenteen 3 nitraattipitoisuudet olivat selvästi korkeampia kuin rakenteessa 1. Pitoisuuksien huippuarvo oli kesällä 1988.

- Pintarakenteisiin käytetyistä materiaaleista uuttui kloridia vajoveteen heti rakentamisen jälkeen vuonna -87. Kloridipitoisuuden nousu oli voimakkainta luonnontilaista jäljittelevässä rakenteessa 1, jossa kloridia oli adsorboituneena sekä humukseen että rautasakkaan. Vähiten kloridia irtosi rakenteen 3 hiekasta. Vaikka pitoisuusnousut olivat 2 - 4 kertaisia, ne olivat absoluuttisesti melko pieniä (maksimi 6 mg/l). Vuoden 1988 aikana kloridipitoisuudet olivat pieniä kaikissa rakenteissa.
- Vajoveden sulfaattipitoisuudet olivat hyvin eri suuruisia samankin rakenteen eri lysimetriastioissa. Käytetyissä materiaaleissa sulfaatti oli epätasaisesti jakautunut eri kohdissa. Tästä johtuen eri pintarakenteiden välillä ei ollut selkeitä eroja. Rakenteessa 1 sulfaattipitoisuuden mediaaniarvot eri astioissa olivat välillä 5,8 - 18 mg/l, rakenteessa 2 välillä 12,0 - 27,0 mg/l ja rakenteessa 3 välillä 9,7 - 12,0 mg/l. Kapulasillanmäen luonnontilaisessa pohjavedessä sulfaattipitoisuuden mediaaniarvo oli 11,0 mg/l, johon verrattuna materiaaleista irronneet sulfaattipitoisuudet eivät olleet suuria rakenteen 2 toisen lysimetriastian maksimipitoisuutta lukuunottamatta (27,0 mg/l).
- Eri rakenteiden vajoveden piihappopitoisuuksissa ei ollut mainittavia eroja.
- Emäskationien pitoisuudet vajovedessä vaihtelivat bikarbonaatin, nitraatin ja sulfaatin pitoisuusvaihtelujen mukana. Suurimmillaan emäskationien pitoisuudet olivat runsassateisina kuukausina ja hiekkapintaisessa rakenteessa 3 kevään -88 sulamisvesien aikana. Rakennusvaihetta seurannutta nousua lukuun ottamatta pitoisuudet olivat tasaisimmat rakenteessa 1. Selviä merkkejä pitoisuuksien pienenemisestä ei tutkimusaikana havaittu.
- Raskasmetallipitoisuudet olivat eri rakenteiden vajovedessä pieniä. Rakennusvaiheen jälkeen näytteiden rautapitoisuuksissa oli muutamia "piikkejä". Arvot olivat korkeimmat rakenteissa 2 ja 3.
- Alumiini liikkuu maaperässä paitsi liuenneena myös kiinteiden hiukkasten pinnoille löyhästi kiinnittyneenä. Näissä lysimetreissä veden väri oli pääasiassa riippuvaista hienorakeisesta kiinteästä aineksesta. Värin ja alumiinipitoisuuden välillä oli selvä yhteys. Väriluvun noustessa usein myös näytteiden alumiini-

pitoisuus nousi. Tätä kiinteän aineksen mukana kulkeutunutta alumiinia oli kaikkien rakenteiden vajovedessä rakentamisen jälkeen vuonna 1987 kovien sateiden jälkeen. Pitoisuudet olivat korkeimmat rakenteessa 3 ja rakenteen 2 Z-lysimetrissä (1100 – 2000 µg/l). Rakenteen 1 näytteissä maksimipitoisuudet olivat paljon pienempiä (84 – 200 µg/l). Rakenteessa 3 alumiinipitoisuudet olivat vuonna 1988 selvästi muita rakenteita korkeampia. Koko tutkimusajan mediaaniarvot rakenteessa 3 olivat 3 – 5 -kertaisia muihin rakenteisiin verrattuna.

7 SORANPESU JA PESULIETE

Kahden lysimetriastian päälle (sorapinnalle) levitettiin soranpesussa syntynyttä lietettä. Liete oli peräisin Nukarin Patamäen soranottoalueelta Nurmijärveltä. Tarkoituksena oli tutkia soveltuuko liete sorakuoppaan levitettäväksi kasvualustaksi. Liete levitettiin noin 20 cm paksuksi kerrokseksi. Lysimetriastiat olivat noin metrin syvyydessä. Pesuliete oli rakeisuudeltaan karkeaa hietaa ($d_{50} = 0,01$, savespitoisuus 1 %). Lietteen levityksen kesäkuussa -87 jälkeen lysimetrinäytteiden laatu muuttui seuraavasti:

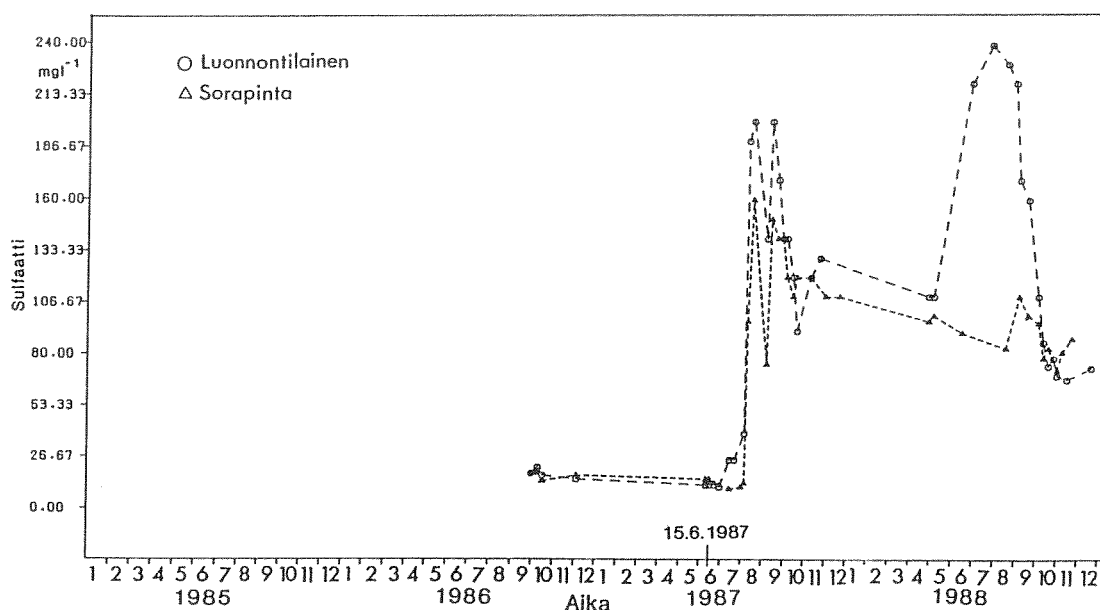
- Sähkönjohtavuus nousi 3 – 6-kertaiseksi alkutilanteeseen verrattuna noin kahdessa kuukaudessa ja pysyi korkealla tasolla koko tutkimusajan.
- Bikarbonaattipitoisuus nousi lähes välittömästi 2 – 4-kertaiseksi. Kun pH samanaikaisesti laski, täytyi vajoveden hiilihappopitoisuuden voimakkaasti nousta. Ilmeisesti pesulietepinta absorboi tehokkaasti ilman hiilidioksidia.
- pH laski keskimäärin 0,3 yksikköä (5,9:stä 5,6:een). Alhaisimmillaan vajoveden pH oli 5,1.
- Kaliumpermanganaattiluku pysyi lähes entisellään (vähäistä nousua).
- Nitraattipitoisuudet nousivat pulssinomaisesti heinä – syyskuussa 1987 (liete levitettiin kesäkuun puolivälissä) ja uudelleen keväällä 1988. Maksimipitoisuus oli 12,5 mg/l.
- Kloridipitoisuudet nousivat myös pulssinomaisesti heti lietteen levityksen jälkeen. Pulssi kesti noin 3,5 kuukautta ja sen maksimiarvo oli 16,5 mg/l. Vuonna 1988 pitoisuudet olivat pieniä.

- Sulfaattipitoisuudet nousivat voimakkaasti 1,5 – 2 kuukautta lietteen levityksen jälkeen. Pitoisuudet olivat 5 – 10-kertaisia alkutilanteeseen verrattuna. Maksimiarvo oli 240 mg/l heinäkuussa 1988 (kuva 58).
- Piihappopitoisuudet nousivat keskimäärin 2 – 3 mg/l.
- Emäskationin pitoisuudet nousivat moninkertaisiksi ja niiden keskinäisissä suhteissa tapahtui muutos. Alkutilanteessa pitoisuuksien runsausjärjestys oli: Ca >> Na ≈ K > Mg

Lietteen levityksen jälkeen järjestys oli:

Ca >> Mg > Na > K

- Raskasmetalleista rauta-, mangaani-, kupari-, lyijy-, kromi- ja kobolttipitoisuudet nousivat lietteen levityksen jälkeen. Metallit liikkuivat osaksi lietteen hienoaineksen mukana. Syksyllä 1987 pitoisuudet olivat alkutilannetta vastaavalla tasolla. Nikkelipitoisuudet olivat selvästi alkutilannetta suurempia koko tutkimusajan. Kadmiumpitoisuuksissa oli pieni pitoisuustason nousu.
- Alumiinia liikkui myös hienoaineksen mukana lietteen levityksen jälkeen. Maksimipitoisuus oli 1700 mg/l. Alumiinin pitoisuustaso jäi myös alkuvaiheen jälkeen hiukan koholle. Pitoisuustaso oli suunnilleen sama kuin hiekkapinta-
taisessa lysimetrirakenteessa 3.



Kuva 58. Vajoveden sulfaattipitoisuus pesulietteellä peitetyssä rakenteessa 0,5 metrin syvyydellä.

8 SUOLAKOE

8.1 Yleistä

Soranottoalueilla käytetään suolaa pölynsidontaan ja jään sulattamiseen. Pölynsidontasuola on kalsiumkloridia (CaCl_2), jota suolapussien sisällöstä on 77 – 80 %. Tekijän havaintojen mukaan suolaa kylvetään maahan usein niin suuria määriä, että maa on kylvön jälkeen paikka paikoin valkoisena. Erään soranottajan arvion mukaan aktiivisen toiminnan soranottoalucella suolamäärä voisi olla suuruusluokkaa 100 – 200 kg/ha (10 – 20 g/m²) vuodessa.

8.2 Koejärjestelyt

Nukarin soralysimetriin levitettiin suolaliuosta siten, että neliömetrille tuli suolaa noin 15 grammaa. Tämän jälkeen lysimetriä sadetettiin 30 mm:n sateella. Tämä vastasi noin 470 mg/l suolapitoisuutta. Jos suola olisi puhdasta kalsiumkloridia vastaisi pitoisuus noin 170 mg/l kalsium- ja 300 mg/l kloridipitoisuutta. Käytetyssä suolassa oli kuitenkin myös muita aineita kuten kalkkia, alkaaliklorideja, magnesiumhydroksidia ja -kloridia ja pieniä määriä raskasmetalleja.

Koejärjestely vastaa tilannetta, jossa tuhlailevan suolankäytön jälkeen sorakuoppaan osuu rankka sadekuuro.

8.3 Tulokset

Lysimetri oli perusteellisesti kasteltu koetta edeltävänä päivänä. Tästä johtuen vesi imeytyi maahan nopeasti, eikä maa-aines pystynyt pidättämään vettä. Neljän metrin syvyydessä virtaus lisääntyi jo noin puoli tuntia sadetuksen aloittamisen jälkeen. Veden virtaus oli maksimissaan alle kahdessa tunnissa.

Osa suolasta kulkeutui voimakkaan sadetuksen johdosta neljän metrin syvyyteen jo ensimmäisenä päivänä. Kloridi- ja kalsiumpitoisuudet nousivat selvästi. Välittömiä pH:n muutoksia ei ollut.

Suolaa huuhtoutui lysimetristä noin kahden kuukauden ajan. Korkeimmillaan kloridipitoisuudet olivat noin kuukauden kuluttua, jolloin maksimipitoisuus oli 130 mg/l. Kationeista yhdessä kloridin kanssa huuhtoutui kalsiumia ja magnesiumia.

Korkein kalsiumpitoisuus oli 43 mg/l ja magnesiumpitoisuus 17 mg/l. Vaikka suolassa oli hiukan myös natriumia, oli sen huuhtoutuminen vähäistä. Korkein natriumpitoisuus oli 4,1 mg/l. Näytteissä oli kaliumia enemmän kuin natriumia. Välittömästi koetta seuranneina päivinä näytteiden pH nousi noin 0,3 yksikköä. Noin kahden viikon kuluttua tapahtui voimakas pH:n lasku. pH laski tasolta 5,7 – 6,0 tasolle 5,2 – 5,5. pH:n nousu kokeen alussa johtuu sitä, että suolaliuos oli vahvasti emäksistä suolassa olevan magnesiumhydroksidin ja kalkin johdosta (pH ≈ 10). pH:n laskun syy oli emäskationien kloridia voimakkaampi kiinnittyminen maaperään, jolloin ioninvaihdossa veden H⁺-pitoisuus lisääntyi ja suolan ilmasta absorboima hiilidioksidi. Myös bikarbonaattipitoisuus nousi.

Suolan vaikutuksesta näytteiden mangaani-, sinkki-, kadmium-, kromi-, koboltti- ja alumiinipitoisuuksissa oli selvä, vaikkakin melko pieni nousu.

Taulukko 13. Järvenpään viemärivereden kemiallisia ominaisuuksia 19.8.1988.

Laatumuuttuja	Yksikkö	Pitoisuus
Sähkönjohtavuus	mS/m	93,8
Bikarbonaatti	mg/l	464,8
pH		6,9
KMnO ₄ -luku	mg/l	179,5
Nitraatti	mg/l	49,0
Kloridi	mg/l	62,0
Sulfaatti	mg/l	52,0
Piihappo	mg/l	19,9
Kalsium	mg/l	34,0
Magnesium	mg/l	17,0
Kokonaiskovuus	dH°	8,67
Natrium	mg/l	46,0
Kalium	mg/l	23,0
Rauta	mg/l	0,30
Mangaani	mg/l	0,18
Sinkki	µg/l	20

9 JÄTEVESIKOE

9.1 Yleistä

Luonnontilaiseen, Nukarin sorapintaiseen ja jälkihoitolysimetreihin sadetettiin elokuussa 1988 viemäriverettä. Kokeen tarkoituksena oli tutkia bakteerien ja jäteveden sisältämien aineiden kulkeutumista maaperässä eri olosuhteissa. Bakteerikokeiden tulokset on julkaistu raportissa: Maa-aineksen oton vaikutus mikrobien pohjaveteen kulkeutumisessa (Kuusinen, 1991). Kokeessa käytettiin Järvenpään kaupungin

viemäriverkosta otettua jätevettä, jota sadetettiin lysimetrien päälle noin 50 l/m². Veden kemialliset ominaisuudet ovat taulukossa 13.

9.2 Tulokset

Luonnontilaisessa lysimetrissä (H335) jäteveden vaikutukset näkyivät selvästi kahdessa ylimmässä lysimetriastiassa (0,11 ja 0,16 m). Ylimmissä astioissa sähkönjohtavuusarvot nousivat yli viisinkertaiseksi kymmenen päivää sadetuksen jälkeen. Kohonneetkin arvot olivat kuitenkin vain 13 – 14 % jäteveden sähkönjohtavuudesta. Tämän jälkeen näytteiden sähkönjohtavuudet laskivat nopeasti. Kokeen päättyessä 2,5 kuukautta myöhemmin arvot olivat noin kaksinkertaisia alkutilanteeseen verrattuna. Näytteiden bikarbonaattipitoisuudessa ei tapahtunut muutosta, vaikka jäteveden pitoisuus oli korkea (465 mg/l). Samoin pH pysyi alhaisena jäteveden korkeasta pH:sta (6,9) huolimatta. Kaliumpermanganaattiluku nousi kahden kuukauden kuluttua viisinkertaiseksi (14 % jäteveden KMnO₄-luvusta). Kloridipitoisuus nousi kymmenessä päivässä 22 – 25-kertaiseksi (35 – 40 %) ja sulfaattipitoisuus 2 – 2,5-kertaiseksi (25 – 35 %). Kaliumpermanganaatti- ja sulfaattipitoisuudet laskivat nopeasti, mutta kloridipitoisuus oli kokeen loppuessa vielä moninkertainen alkutilanteeseen verrattuna. Nitraattipitoisuudessa tapahtui selvä, mutta melko vähäinen nousu (3 – 8 %). Emäskationeista natrium nousi voimakkaasti. Muiden kationien muutokset olivat vähäisempiä. Raskasmetallipitoisuuksissa muutoksia ei ollut havaittavissa. Alumiinipitoisuudet nousivat selvästi.

Alemmissä horisonteissa näytteiden pitoisuuksissa ei tapahtunut suuria muutoksia. 2,5 metrin syvyydessä sähkönjohtavuudella oli selvä huippukohta noin kaksi kuukautta kokeen alkamisesta. Sulfaattipitoisuudessa havaittiin samanaikaiset nousu- ja laskuvaiheet kuin ylimmissä horisonteissa.

Paljaan sorapinnan alla jäteveden imeytyksen vaikutukset olivat selviä. Neljän metrin syvyydessä sähkönjohtavuus alkoi välittömästi hiljalleen nousta. Korkeimmillaan se oli kahden viikon kuluttua noin puolitoistakertainen lähtötasoon verrattuna. Lähtötasolle sähkönjohtavuus palasi noin viidessä viikossa. Eri aineista kloridipitoisuus nousi selvimmin. Korkeimmillaan se oli kahden viikon kuluttua lähellä jäteveden pitoisuutta. Nitraattipitoisuus nousi myös voimakkaasti. Sen maksimiarvo oli lähes 70 % jäteveden pitoisuudesta neljän viikon kuluttua kokeen alkamisesta. Bikarbonaatti- ja sulfaattipitoisuudet sekä kaliumpermanganaattiluku nousivat selvästi metrin syvyydessä, mutta neljässä metrissä ei ollut selviä muutoksia. Emäskationeista natriumia oli jätevedessä eniten. Neljän metrin syvyydessä sen pitoisuus oli korkeimmillaan kuitenkin vain noin 10 % jäteveden pitoisuudesta. Vastaavat prosenttiluvut muille emäskationeille olivat kalsium 74 %, magnesium 54 % ja kalium 19 %. Jätevedessä

kationien keskinäinen suuruusjärjestys oli $\text{Na} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ ja lysimetrinäytteissä $\text{Ca} \gg \text{Mg} > \text{Na} \approx \text{K}$. Näytteiden pH nousi ensin voimakkaasti, mutta laski varsin nopeasti aikaisemmalle tasolle. Raskasmetalleista kadmium-, kromi- ja koboltti-pitoisuuksissa oli vähäistä lisäystä.

Jälkihoitolysimetreihin sadetetut jätevesimäärät olivat pienempiä kuin muihin lysimetreihin. Määrät olivat noin kymmenen litraa neliömetrille eli viidesosa muihin verrattuna. Tämä johtui siitä, että jälkihoitolysimetrikentällä pohjavesi on vain noin neljän metrin syvyydessä ja haluttiin välttää mahdollista pohjaveden kontaminoitumista erityisesti bakteerien ja virusten osalta. Myöhemmin menettely osoittautui varovaiseksi, mutta koetta suoritettaessa jäteveden pitoisuuksista ja eliömääristä ei ollut tietoa.

Luonnontilaista jäljittelevässä rakenteessa 1 (humus, hiekka, rikastumiskerros, hiekka) jäteveden vaikutukset olivat pieniä. Selvimmin vaikutukset näkyivät vähäisinä kloridi- ja natriumpitoisuuksien nousuina. Myös pH nousi ensin, mutta laski myöhemmin. Muita vaikutuksia ovat mahdollisesti bikarbonaattipitoisuuden lasku ja kaliumpermanganaattiluvun, sulfaat- ti-, kalsium-, kupari- ja alumiinipitoisuuksien nousut. Jälkimmäisistä ei kuitenkaan voi varmuudella sanoa, että ne aiheutuvat jätevedestä.

Rakenteen 2 (muuten sama kuin rakenne 1, mutta humuskerros puuttuu) jäteveden vaikutus näkyi rakennetta 1 voimakkaampana kloridipitoisuuden nousuna. Muut vaikutukset peittyivät pitoisuusvaihteluihin, jotka ovat suurempia kuin rakenteessa 1.

Rakenteen 3 (hiekka) vaikutukset peittyivät myös muuhun vaihteluun. Sadetus osui ajankohtaan, jossa kesän aikana maan pintaan rikastuneita suoloja huuhtoutui. Sadetuksen jälkeen havaittiin kuitenkin aineiston korkeimmat nikkeli-, kadmium- ja kromipitoisuudet. Kloridipitoisuudessa ei tapahtunut muutosta. Tämä ei välttämättä johdu siitä, että kloridi olisi pidähtynyt maaperään. Todennäköisemmin kloridi on kulkeutunut niin nopeasti, että kun näytteenotossa on vuoroteltu bakteeri- ja kemiallisten näytteiden kanssa, kloridipitoinen vesi on tyhjennetty lysimetriastiasta bakteerinäytteenotossa.

10 RASKASMETALLIKOE

10.1 Yleistä

Raskasmetallikokeen tarkoituksena oli tutkia eräiden raskasmetallien kulkeutumista maaperässä paljaan sorapinnan alapuolella ja luonnontilassa.

Koe suoritettiin Nukarin sorapintaisessa (H 394) ja Kapulasillanmäen luonnontilaisessa (H 336) lysimetrissä. Lysimetreihin sadetettiin sadeveteen liuotettuja raskasmetallisuoloja. Metallit olivat: mangaani, sinkki, kupari, nikkeli, lyijy, kadmium, kromi ja koboltti. Lyijysuola oli nitraattia, kaikki muut kloridia. Metallipitoisuudet liuoksessa olivat mangaani ja sinkki 10 mg/l ja muut 1 mg/l. Sadetettu vesimäärä oli 30 mm. Nukarissa sadetus tehtiin 16.6.88 ja Kapulasillanmäessä 31.8.88 ja lysimetrinäytteitä otettiin maan jäätymiseen asti.

10.2 Luonnontila

Luonnontilaisessa lysimetrissä lysimetriastiat sijaitsevat uuttumishorisontin alapuolella (H336A 0,3 m), rikastumishorisontissa (H336B 0,4 m) ja näkyvän rikastumishorisontin alapuolella (H336C 0,8 m). Sadetuksen jälkeen vajoveden pääkomponenteissa selviä muutoksia tapahtui vain kloridi- ja emäskationipitoisuuksissa. Ylimmässä lysimetriastiassa kloridipitoisuus nousi välittömästi sadetuksen jälkeen. Pitoisuus oli korkeimmillaan viikon kuluttua 18 mg/l, kun se ennen koetta oli alle 2 mg/l. Kloridipitoisuus pieneni hiljalleen syksyn kuluessa, mutta oli vielä marraskuussa 7 mg/l. Keskimmaisessä astiassa kloridipitoisuus lähti myös välittömästi nousuun, mutta korkeimmillaan 7 – 8 mg/l se oli vasta loka-marraskuussa. Alimmassa astiassa pitoisuus lähti nousuun 2 – 3 viikkoa kokeen jälkeen ja oli korkeimmillaan marras-joulukuussa noin 7 mg/l. Emäskationeista kalsium- ja magnesiumipitoisuuden nousua tapahtui vain ylimmässä astiassa, jossa ne noudattivat kloridin aikataulua. Natrium- ja kaliumipitoisuuksissa oli lyhyt (2 vk) nousukausi noin kolmen viikon kuluttua. Alemmissa horisonteissa kalsium- ja magnesiumipitoisuudet laskivat syksyn aikana yhdessä sulfaattipitoisuuksien kanssa. Natrium- ja kaliumipitoisuuksissa oli lyhytaikaiset huiput 3 – 5 viikkoa kokeen jälkeen. Näytteiden pH:t olivat ylimmässä astiassa 5,0 – 5,3, keskimmaisessä 5,2 – 5,7 ja alimmassa 5,3 – 5,8.

- Mangaanipitoisuus nousi sadetuksen jälkeen vain ylimmässä astiassa. Pitoisuus oli korkeimmillaan koetta seuraavana päivänä 0,35 mg/l. Tämän jälkeen pitoisuus laski alle määritysrajan (0,02 mg/l) noin kolmessa viikossa. Tässä ajassa lysimetrinäytteiden mangaanimäärä oli noin 5,3 % sadetusveden määrästä (pinta-ala huomioon ottaen). Mangaani pidättyi rikastumishorisonttiin. Alemmissa astioissa pitoisuudet olivat alle määritysrajan.
- Sinkkipitoisuuden maksimi (130 µg/l) oli ylimmässä astiassa myös koetta seuraavana päivänä. Pitoisuudet olivat koko syksyn korkeampia kuin koetta edeltäneenä aikana. Sinkistä saatiin talteen 3,0 % sadetusveden määrästä. Myös sinkki pidättyi rikastumishorisonttiin. Alemmissa astioissa pitoisuudet olivat alle määritysrajan (20 µg/l).

- Kuparipitoisuuksissa ei tapahtunut selvää nousua. Pitoisuudet vaihtelivat samoissa rajoissa kuin ennen koetta.
- Nikkelipitoisuus nousi ylimmässä astiassa maksimiarvoonsa 15 µg/l koetta seuranneena päivänä. Tämän jälkeen pitoisuudet hiljalleen laskivat syksyn mittaan, mutta eivät palautuneet koetta edeltäneelle tasolle. Talteen saadun nikkelin määrä oli 3,9 % sadetusveden määrästä. Keskimmaisessä astiassa nikkelpitoisuuksissa oli pieni huippu (3,2 µg/l) noin viiden viikon kuluttua. Nikkelimäärä oli korkeintaan 0,09 % sadetusveden määrästä. Alimmassa astiassa oli myös pieniä merkkejä nikkelistä, mutta ne saattavat kuulua normaaliin pitoisuusvaihteluun.
- Lyijymääritykset olivat kaikki alle määritysrajan (0,5 µg/l).
- Kadmiumpitoisuus nousi ylimmässä astiassa huippuarvoonsa 10 µg/l koetta seuranneena päivänä. Pitoisuus laski syksyn aikana, mutta oli vielä kokeen päättyessä marraskuussa 2,7 µg/l. Ennen koetta vuoden -88 aikana korkein kadmiumpitoisuus oli 0,1 µg/l. Kadmiumia saatiin talteen 2,4 % sadetusveden määrästä. Alemmissa astioissa oli selviä merkkejä kadmiumista loka - marraskuussa. Määrät olivat korkeintaan 0,02 % sadetusveden määrästä.
- Kromipitoisuudessa oli selvät, mutta pienet huippukohdat ylimmässä astiassa koetta seuranneena päivänä ja kolmen viikon kuluttua. Kromipitoisuus oli lievästi kohonneena koko syksyn. Näytteiden kromimäärä oli 0,4 % sadetusveden määrästä. Myös keskimmaisessä astiassa kromipitoisuus nousi koetta seuraavana päivänä. Muuten pitoisuudet olivat alle määritysrajan (0,5 µg/l), kuten alimmassa astiassakin.
- Kobolttipitoisuus nousi vain ylimmässä astiassa. Koetta seuraavana päivänä pitoisuus oli korkea 18 µg/l. Tämän jälkeen pitoisuus laski lähelle määritysrajaa kolmessa - neljässä viikossa. Hiukan kohonneena kobolttipitoisuus pysyi koko loppusyksyn. Koboltin määrä näytteissä oli 2,9 % sadetusveden määrästä.

Tutkituista raskasmetalleista rikastumishorisontin yläpuolelle pidättyi tutkimusaikana täydellisesti lyijy. Myöskään kuparipitoisuuksissa ei havaittu muutoksia, mutta vajovedessä on mineraaliaineksesta liuennutta kuparia pieniä määriä kaikilla syvyyksillä. Mangaani, sinkki ja koboltti pidättyivät rikastumishorisontin yläosaan. Syvemmälle rikastumishorisonttiin tunkeutui pieniä määriä kromia. Rikastumishorisontin alapuolella oli merkkejä nikkelin ja kadmiumin pääsystä horisontin läpi. Rikastumishorisontin yläpuolinen maannos pidätti raskasmetalleja seuraavassa järjestyksessä:

Pb (100 %) > Cu (100 % ?) > Cr (99,6 %) >
 Cd (97,6 %) > Co (97,1 %) > Zn (97,0 %) >
 Ni (96,3 %) > Mn (94,7 %)

Rikastumishorisontti pidätti muut metallit paitsi nikkelin ja kadmiumin. Näiden pidättymisprosentit rikastumishorisonttiin ja sen yläpuolella olivat vähintään Ni 99,93 % ja Cd 99,98 %. Tulos kertoo kuitenkin vain noin kolmessa kuukaudessa tapahtuneen kulkeutumisen. Keväällä 1989 lysimetristä otettiin vielä yhdet näytteet (5.4.–89). Ylimmästä astiasta saadussa näytteessä oli korkea kadmiumpitoisuus (1,9 µg/l).

Taulukko 14. Vajovesi eri syvyyksillä (mediaaniarvoja).

Syvyys m	sähkönjoht. mS/m	HCO ₃ mg/l	pH	väriluku mg Pt/l	KMnO ₄ -luku mg/l
1	21,8	99,4	6,3	15,0	10,1
2	33,6	177,5	6,4	5,0	5,5
3	22,2	155,3	6,4	10,0	5,5
4	19,3	97,0	6,3	5,0	4,1
	NO ₃ mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	SiO ₂ mg/l	Ca mg/l
1	1,8	3,7	26,0	12,0	25,0
2	4,0	7,3	24,5	17,4	37,1
3	2,2	6,1	13,0	14,9	23,0
4	3,6	2,8	13,0	16,8	16,0
	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Al µg/l	vesimäärä mm 17.6–14.11
1	5,3	5,4	4,6	58	172
2	12,0	6,5	5,9	23	337
3	7,3	5,1	4,9	30	494
4	8,9	4,6	4,6	77	94 ylivuotoja

10.3 Paljas sorapinta

Nukarin sorapintaisessa lysimetrissä (H394) vajovesinäytteitä saatiin kolmesta lysimetriastiasta yhden, kahden ja kolmen metrin syvyydestä ja lysimetripussin pohjalta, neljän metrin syvyydestä. Maa-aines pussissa on rakeisuudeltaan karkeata

hiekkaa – soraa. Aines on peräisin Nukarin Patamäen sorakuopasta. Se on syvältä harjasta kaivettua perusmaata, mistä johtuen sen kemialliset ominaisuudet poikkeavat melkoisesti Kapulasillanmäen luonnontilaisesta pintamaasta. Kapulasillanmäkeen verrattuna vajovedessä oli moninkertaiset määrät bikarbonaattia ja emäskationeja (lähinnä kalsiumia ja magnesiumia). pH oli noin yhden yksikön verran korkeampi. Veden laatutiedot ovat taulukossa 14. Vesimäärän kasvu lysimetriastioissa alaspäin mentäessä johtuu siitä, että astia kerää vettä omaa pinta-alaansa suuremmalta alalta ja vaikutus voimistuu syvyyden kasvaessa.

Taulukko 15. Vajoveden mangaanipitoisuuksien $\mu\text{g l}^{-1}$ kuukausittaiset keskiarvot raskasmetallikokeessa Nukarissa.

Syvyys m	16.6*	1 kk	2 kk	3 kk	4 kk	5 kk	Mn mg/m^2	% sadetusveden määrästä
1	15,0	18,8	20,0	27,5	15,0	10,0	3,9	1,3 %
2	13,0	25,0	31,0	35,0	22,0		4,3	1,4 %
3	0	15,0	2,0	2,0	0		0,8	0,3 %
4	0	2,2	4,4	10,0	3,3			
sadem.mm	30	33	148	26	68			

* Koepäivänä otettujen näytteiden keskiarvo.

Tutkittujen raskasmetallien pitoisuuksissa tapahtui kokeen aikana seuraavia muutoksia (taulukko 15) (keskiarvolaskuissa määritysajan alittavat pitoisuudet on merkitty nollassi):

- Mangaanipitoisuudet pysyivät pieninä; välillä $< 20 - 80 \mu\text{g/l}$. Pitoisuudet kuitenkin hiljalleen nousivat kolmen kuukauden ajan, jonka jälkeen ne kääntyivät laskuun. Ilmeisesti mangaanin huuhtoutumista tapahtui sadetuksen seurauksena, vaikka "epänormaalin" korkeita pitoisuuksia ei tavattu.

Kahden metrin syvyydellä saaduissa näytteissä mangaanimäärä oli $4,3 \text{ mg/m}^2$ (Mn $> 20 \mu\text{g/l}$) eli 1,4 % sadetetusta määrästä. Pitoisuuden maksimi oli kahden metrin syvyydessä, jonne mangaania huuhtoutui jo sadetusvaiheessa mahdollisesti hienoaineksen mukana. Vähäisiä merkkejä mangaanista oli vielä neljässä metrissä.

Taulukko 16. Vajoveden sinkkipitoisuuksien $\mu\text{g/l}^{-1}$ kuukausittaiset keskiarvot raskasmetallikokeessa.

Syvyys m	16.6	1 kk	2 kk	3 kk	4 kk	5 kk	Zn mg/m^2	% sadetusveden määrästä
1	32,5	32,5	20,0	10,0	12,5	0	3,7	1,2 %
2	40,0	31,0	40,0	45,0	32,0		5,6	1,8 %
3	7,5	30,0	16,0	5,0	16,0		2,5	0,8 %
4	5,0	7,0	0	0	0			
sadem.mm	30	33	148	26	68			

- Sinkkipitoisuudet (taulukko 16) eivät myöskään nousseet kovin korkeiksi. Korkein pitoisuus oli $70 \mu\text{g/l}$. Sinkkiä huuhtoutui melko paljon jo sadetusvaiheessa. Pieniä määriä kulkeutui neljän metrin syvyyteen. Metrin syvyydessä sinkkipitoisuus alkoi laskea ensimmäisen kuukauden jälkeen. Kahdessa metrissä huippu oli kolmannen kuukauden aikana, ja se näkyi kolmessa metrissä kuukautta myöhemmin.

Taulukko 17. Vajoveden kuparipitoisuuksien ($\mu\text{g/l}^{-1}$) kuukausittaiset keskiarvot raskasmetallikokeessa.

Syvyys m	16.6	1 kk	2 kk	3 kk	4 kk	5 kk	Cu mg/m^2	% sadetusveden määrästä
1	3,1	3,3	2,7	1,6	2,2	6,0	0,4	1,3 %
2	3,5	1,9	2,3	2,0	1,7		0,4	1,3 %
3	3,3	2,0	1,2	1,2	1,3		0,3	1,0 %
4	2,2	2,6	2,6	1,3	2,7			

- Kuparipitoisuudet (taulukko 17) eivät juuri poikenneet tausta-arvoista. Vähäistä huuhtoutumista tapahtui sadetuksen aikana kolmen metrin syvyyteen asti. Pitoisuustaso oli ehkä hiukan korkeampi yhden metrin syvyydessä yhden – kahden kuukauden ajan. 14.11. otetuissa näytteissä kuparipitoisuudet olivat korkeita yhden ($10,4 \mu\text{g/l}$) ja neljän metrin ($10,3 \mu\text{g/l}$) syvyyksillä mahdollisesti merkinä alkavasta huuhtoutumisesta.

Taulukko 18. Vajoveden nikkelpitoisuuksien ($\mu\text{g/l}^{-1}$) kuukausittaiset keskiarvot raskasmetallikokeessa.

Syvyys m	16.6	1 kk	2 kk	3 kk	4 kk	5 kk	Ni mg/m^2	% sadetusveden määrästä
1	0,7	2,0	3,8	1,2	1,3	0,9	0,3	1,0 %
2	0,8	4,6	6,1	6,9	6,1		0,9	3,0 %
3	1,0	3,6	1,9	2,0	1,7		0,3	1,0 %
4	0,2	1,6	2,1	2,3	2,2			

- Nikkelpitoisuuksissa (taulukko 18) tapahtui selvä nousu erityisesti kahden metrin syvyydellä. Metrin syvyydellä pitoisuus oli korkeimmillaan toisen kuukauden aikana (25.7. 15 $\mu\text{g/l}$) ja kahdessa metrissä kolmantena kuukautena (2.8. – 29.8. 6,3 – 9,4 $\mu\text{g/l}$). Kolmessa metrissä oli 29.6. nikkelpitoisuuksien yksittäinen huippuarvo 22,0 $\mu\text{g/l}$.

Taulukko 19. Vajoveden lyijypitoisuuksien ($\mu\text{g/l}^{-1}$) kuukausittaiset keskiarvot raskasmetallikokeessa.

Syvyys m	16.6	1 kk	2 kk	3 kk	4 kk	5 kk	Pb mg/m^2	% sadetusveden määrästä
1	0,06	0	0,08	0	0	0	0,005	0,02 %
2	0	0	0,15	0	0		0,008	0,03 %
3	0	0,06	0	0	0		0,002	0,01 %
4	0,10	0,22	0	0	0			

- Lyijypitoisuuksissa (taulukko 19) oli muutamia yksittäisiä määritysrajan ylityksiä (maksimipitoisuus 2 $\mu\text{g/l}$ havaittiin 4 metrin syvyydellä 30.6.). Selvää lyijyn huuhtoutumista ei tapahtunut.
- Kadmiumin huuhtoutuminen (taulukko 20) oli vähäistä. Pieniä määritysrajan ylityksiä oli eniten ensimmäisen kuukauden aikana. Kahdessa metrissä havaittiin uusi huippu kolmantena kuukautena (maksimi 1,5 $\mu\text{g/l}$ 24.8.). Muilla syvyyksillä pitoisuustason nousua ei ollut selvästi havaittavissa.

Taulukko 20. Vajoveden kadmiumpitoisuuksien ($\mu\text{g/l}^{-1}$) kuukausittaiset keskiarvot raskasmetallikokeessa.

Syvyys m	16.6	1 kk	2 kk	3 kk	4 kk	5 kk	Cd mg/m^2	% sadetusveden määrästä
1	0,03	0,11	0	0,03	0,08	0	0,007	0,02 %
2	0,08	0,17	0,14	0,50	0,15		0,041	0,14 %
3	0,20	0,14	0,07	0,05	0,08		0,014	0,05 %
4	0	0,06	0,02	0,10	0,07			

Taulukko 21. Vajoveden kromipitoisuuksien ($\mu\text{g/l}^{-1}$) kuukausittaiset keskiarvot raskasmetallikokeessa.

Syvyys m	16.6	1 kk	2 kk	3 kk	4 kk	5 kk	Cr mg/m^2	% sadetusveden määrästä
1	0,10	0,09	0,22	0,25	0,20	0	0,021	0,07 %
2	0	0,10	0,50	0,70	1,30		0,056	0,19 %
3	0,10	0,06	0,05	0,18	0,25		0,010	0,03 %
4	0	0	0,14	0	0			

- Kromipitoisuudet (taulukko 21) nousivat selvästi toisen kuukauden aikana. Huippuarvot saavutettiin kahdessa ylimmässä metrissä kolmannen kuukauden aikana ja kolmessa metrissä neljännen kuukauden aikana Korkein pitoisuus oli 3,1 $\mu\text{g/l}$ kahden metrin syvyydessä 5.8.

Taulukko 22. Vajoveden kobolttipitoisuuksien ($\mu\text{g/l}^{-1}$) kuukausittaiset keskiarvot raskasmetallikokeessa.

Syvyys m	16.6	1 kk	2 kk	3 kk	4 kk	5 kk	Co mg/m^2	% sadetusveden määrästä
1	0,28	0,18	0,38	0,53	1,13	1,20	0,084	0,28 %
2	0	0	0,18	0,20	1,00		0,063	0,21 %
3	0	0,07	0	0,45	0,68		0,042	0,14 %
4	0	0	0,08	0	0,38			

- Koboltin (taulukko 22) liikkuminen oli hyvin selkeätä. Pitoisuudet alkoivat nousta metrin syvyydellä ensimmäisen, kahdessa metrissä toisen, kolmessa metrissä kolmannen ja neljässä metrissä neljännen kuukauden aikana. Koboltin pitoisuustasossa tapahtui tutkituista raskasmetalleista selvin nousu. Korkeimmillaan pitoisuus oli 1,8 µg/l metrin syvyydessä 14.11.

OSA III YHTEENVETO

11 LASKEUMA TUUSULAN KAPULASILLANMÄESSÄ JA PALANEENMÄESSÄ

Taulukko 23. Laskeumanäytteiden koostumus Kapulasillanmäessä.

Laatumuuttuja	Yksikkö	Minimi	Mediaani	Maksimi
Sähkönjohtavuus	mS/m	0,80	2,90	10,90
HCO ₃	mg/l	<0,61	3,05	12,81
pH		3,80	4,30	6,00
KMnO ₄ -luku	mg/l	5,1	15,7	40,1
NO ₃	mg/l	<1,0	1,1	7,1
Cl	mg/l	1,0	1,6	3,8
SO ₄	mg/l	1,00	4,05	26,00
SiO ₂	mg/l	0,0	0,2	1,1
Ca	mg/l	<0,5	0,7	6,8
Mg	mg/l	<0,05	0,17	1,6
Na	mg/l	<0,5	0,5	2,1
K	mg/l	<0,5	0,6	2,1
Fe	mg/l	<0,05	<0,05	0,18
Mn	mg/l	<0,02	0,04	0,17
Zn	µg/l	<20	30	180
Cu	µg/l	1,5	4,5	27,0
Ni	µg/l	<0,5	1,3	10,0
Pb	µg/l	<0,5	2,7	14,0
Cd	µg/l	<0,1	0,2	1,0
Cr	µg/l	<0,5	<0,5	1,3
Co	µg/l	<0,5	<0,5	0,7
Al	µg/l	4,0	40,5	310,0

Laskeumalle oli tyypillistä eri ominaisuuksien ajallinen vaihtelu; laskeuman episodimaisuus. Laskeuman pääkomponenttien (suolojen) keskimääräiset laskeumat olivat tutkimusaikana lähellä pitkäaikaisia keskiarvoja Sipoon Martinkylässä vuosilta 1971 – 1982 (Järvinen 1986) kloridia ja kaliumia lukuunottamatta, joiden keskimää-

räiset kuukausilaskeumat olivat noin kaksinkertaisia Järvisen tuloksiin verrattuna. Pääkomponenteista ammoniumia tutkimuksessa ei ole analysoitu.

Laskeuma oli selvästi pitkäaikaisia keskiarvoja happamampaa. Kapulasillanmäessä pH:n keskiarvo oli 4,4 ja Palaneenmäessä 4,2. Sipoon Martinkylässä (Järvinen 1986) pH:n keskiarvo vuosina 1971 – 1982 oli 4,6 eli Tuusulan näytteiden vetyionipitoisuus oli keskimäärin 1,8 – 2,6kertainen. pH-taso ei kuitenkaan ollut poikkeuksellinen.

Laskeumassa oli ajoittain runsaasti orgaanista ainesta ja raskasmetalleja vajo- ja pohjaveteen verrattuna. Useimmilla tutkituista raskasmetalleista oli merkittävä positiivinen korrelaatio nitraatin, kloridin ja sulfaatin kanssa. Laskeuman eri komponenttien pitoisuuksia on taulukossa 23.

12 VAJOVESI TUUSULAN KAPULASILLANMÄESSÄ

12.1 Vesimäärät

Luonnontilassa sadevettä haihtuu puiden lehvästön, aluskasvillisuuden ja karikkeen pinnoilta (evaporaatio) sekä juurivyöhykkeestä pääosin kasvien kautta (transpiraatio). Osa vedestä sitoutuu kasveihin, karikkeeseen ja maannoksen humushorisonttiin. Uuttumishorisontissa vesi virtaa vapaasti, horisontin vedenläpäisevyys on suuri. Tästä horisontista puut saavat pääosan käyttämästään vedestä. Rikastumishorisonttiin saostuneet ainekset muodostavat vettä voimakkaasti adsorboivan pinnan, ja vesi liikkuu horisontissa pääosin veden ja mineraalirakeiden ja saostumien välisten vetovoimien vaikutuksen alaisena. Runsaiden sateiden aikana vettä virtaa horisontin läpi myös vapaasti huokosissa ja sekundääristen rakosysteemien kautta. Rikastumishorisontista ylöspäin vettä voi kuivina aikoina kulkeutua ainakin horisonttiin ulottuvien puiden juurten kautta. Pääosa puiden juurista on kuitenkin uuttumishorisontissa, hyvin lähellä maan pintaa. Kapulasillanmäessä yllä kuvattu maannosprofiili ulottuu silmin näkyvää maannosta paljon syvemmälle, ainakin 1,2 metrin syvyyteen. Maannoksen alapuolella vesi virtaa pääosin vapaasti painovoiman vaikutuksesta alaspäin. Tutkimuksen koejärjestelyissä saatiin maannoksen alapuolelta vesimäärä, joka oli 30 – 40 % sadeveden määrästä aikavälillä kesäkuu – lokakuu 1987. Tämä lienee sama kuin sadevedestä pohjavedeksi imeytyvän veden määrä tutkimusalueella kyseisenä aikana.

Paljaalta sorapinnalta haihtumismekanismi on erilainen kuin luonnontilassa. Vesi haihtuu suoraan mineraalimaarakeiden pinnalta, joiden lämmönvaraus ja muut fysikaaliset ominaisuudet ovat täysin toiset kuin kasvi- ja karikepintojen. Ilmavirtaukset, auringon säteily ja lämpötilamuutokset aiheuttavat paljaalla sorapinnalla

haihtumisolosuhteiden luonnontilaa suurempaa vaihtelua, mistä johtuen evaporaatio on ilmeisesti luonnontilaa suurempi. Kun kuitenkin transpiraatio puuttuu saattaa kokonaishaihdunta jäädä paljonkin pienemmäksi kuin luonnontilassa. Kapulasillanmäessä paljaalta pinnalta haihtui 30 – 40 % sadevedestä aikavälillä kesäkuu – lokakuu 1987 eli pohjavedeksi imeytyi 60 – 70 % sadevedestä. Lysimetriastiosta saatu vesimäärä reagoi myös luonnontilaa herkemmin sateisiin. Sorakuopassa pohjavedeksi imeytyvän veden määrä riippuu kuitenkin voimakkaasti pinnan tiiveydestä, väristä, paikan tuulisuudesta ja monista muista haihtumiseen ja veden imeytymiseen vaikuttavista tekijöistä.

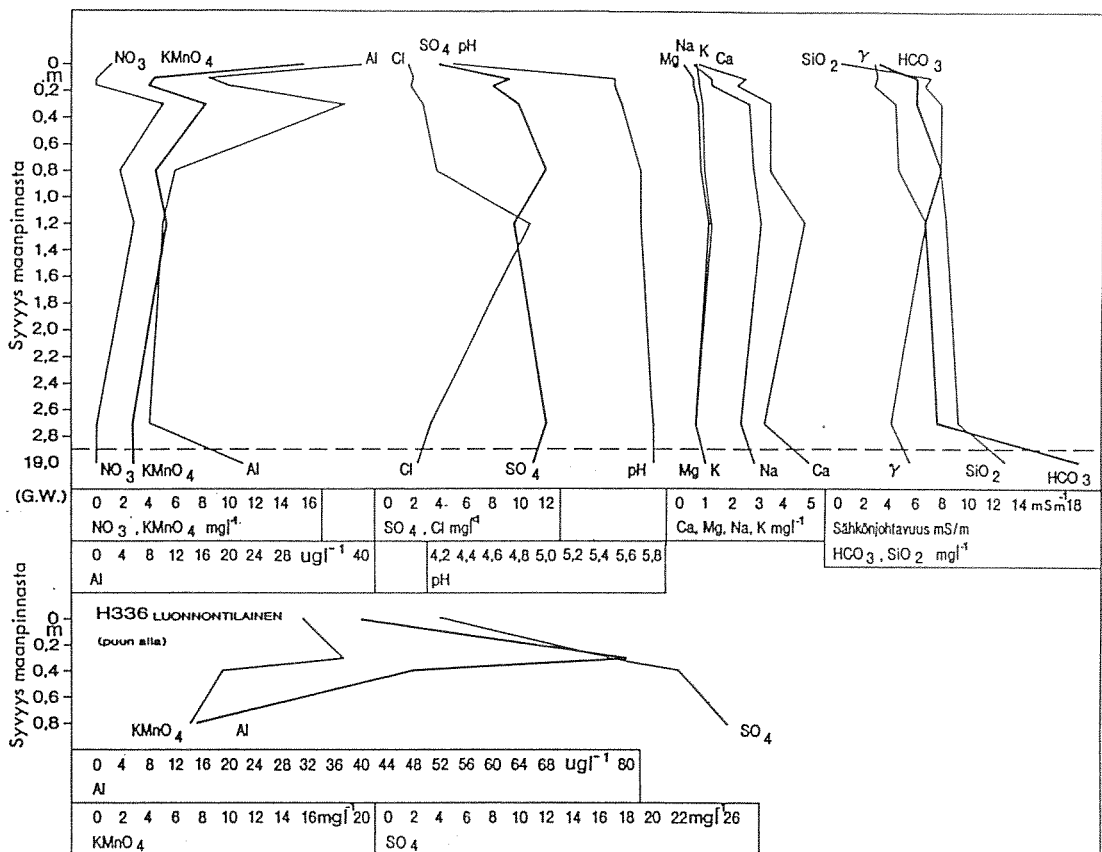
12.2 Vajoveden laatu luonnontilassa

Humushorisontin alla ja uuttumishorisontissa noin 0,2 – 0,3 m:n syvyyteen asti tapahtui seuraavia muutoksia sadeveteen verrattuna (kuva 59).

- Veden bikarbonaattipitoisuus kasvoi keskimäärin noin kaksinkertaiseksi. Bikarbonaattipitoisuuden kasvu johtui siitä, että maaperässä veden hiilihappopitoisuus kasvoi, kun siihen liukeni hajoavista kasvinjätteistä syntyvää ja maaperän ilmakehästä absorboimaa hiilidioksidia. Hiilihapon dissosioitumisessa syntyneen bikarbonaatin pitoisuuden kasvuun vaikutti myös veden pH:n nousu maaperässä.
- pH nousi yli yhden pH-yksikön verran eli laskeuman happojen reagoidessa maa-aineksen kanssa laski vetyionipitoisuus keskimäärin 5 – 8 sadasosaan entisestä.
- Orgaanisen aineksen pitoisuus (kaliumpermanganaattiluvulla mitattuna) pieneni puoleen – kolmasosaan laskeuman pitoisuuteen verrattuna.
- Laskeuman sisältämä nitraatti joutui kasvien käyttöön. Nitraattipitoisuus pieneni. Nitraatin korkeasta määritysrajasta johtuen pitoisuuksia ei kuitenkaan voitu mitata tarpeeksi tarkasti.
- Kloridipitoisuus nousi hiukan haihtumisesta johtuen.
- Sulfaattipitoisuus nousi noin kaksinkertaiseksi. Orgaanisen aineksen hajotessa maaperässä vapautuu sulfaattia ja myös haihtuminen väkevöittää vettä.
- Emäskationeista kalsiumin ja magnesiumin pitoisuudet nousivat noin kolminkertaiseksi, natriumpitoisuus yli kaksinkertaiseksi ja kaliumpitoisuus noin 15

%. Emäskationit ovat peräisin mineraalien rapautumisesta, orgaanisen aineksen hajoamisesta, laskeumasta ja myös haihtuminen nostaa pitoisuuksia.

- Sähkönjohtavuudessa ei tapahtunut suurta muutosta, vaikka nitraattia lukuun ottamatta tutkittujen sähkönjohtavuuteen vaikuttavien elektrolyyttien pitoisuudet nousivat voimakkaasti. Tämä johtuu siitä, että analyysivalikoimasta puuttuu ammonium, yksi laskeuman tärkeä elektrolyytti. Ammoniumpitoisuuden on täytynyt pienetä heti maan pinnassa. Ammonium adsorboituu maaperään voimakkaasti ja se voi joutua myös kasvien käyttöön. Ammoniumin lisäksi myös orgaanisten elektrolyyttien pitoisuudessa tapahtui laskua (vrt. KMnO_4 -luku) tässä horisontissa.
- Alumiinipitoisuus oli näissä pintaosan horisonteissa vajovedessä vain noin puolet laskeuman pitoisuudesta.
- Laskeumaan verrattuna raskasmetallipitoisuudet pienenevät selvästi pintaosan horisonttien vajovedessä.



Kuva 59. Laskeuman (0 m), vajoveden (0–19 m) ja pohjaveden laatu (medi-
aaniarvoja) luonnontilassa lysimetrissä.

Rikastumishorisontissa välillä 0,3 – 1,2 m tapahtui seuraavia muutoksia:

- Sähkönjohtavuus nousi selvästi. Sen mediaaniarvo oli 1,2 m:n syvyydessä yli kaksinkertainen laskeumaan verrattuna. Horisontin seskvi- ja piioksidipinnoille adsorboitui suoloja. Näytteitä horisontin vajovedestä saatiin harvemmin kuin ylemmistä horisonteista, kovien sateiden jälkeen. Tällöin suoloja irtosi maarakeista ja vesi väkevöityi.
- Bikarbonaattipitoisuus oli korkeimmillaan 0,8 m:n syvyydessä, keskimäärin noin 2,5-kertainen laskeumaan verrattuna. Pitoisuuden nousu johtui orgaanisen aineksen hajoamisesta.
- pH nousi noin 0,2 yksikköä ylempiin horisontteihin verrattuna.
- Orgaaniseen aineksen pitoisuus oli korkeimmillaan horisontin yläosassa (0,3 m).
- Vajovedessä oli nitraattia. Sen pitoisuus oli korkeimmillaan 0,3 m:n syvyydessä. Nitraatti oli mahdollisesti osaksi peräisin orgaanisen aineksen hajoamisesta. Myös kilpailu adsorptiopaikoista muiden anionien kanssa saattoi vaikuttaa pitoisuuden kohoamiseen.
- Kloridipitoisuus nousi horisontissa voimakkaasti. Korkeimmillaan pitoisuus oli 1,2 m:n syvyydessä keskimäärin lähes seitsenkertainen laskeumaan verrattuna.
- Sulfaattipitoisuuden maksimikohta oli 0,8 m:n syvyydessä. Pitoisuus oli keskimäärin kolminkertainen laskeumaan verrattuna.
- Piihappopitoisuus nousi horisontin vajovedessä ylempiin horisontteihin verrattuna.
- Emäskationien pitoisuuksien maksimikohta oli 1,2 m:n syvyydessä. Pitoisuudet olivat selvästi suurempia kuin pintahorisonteissa.
- Alumiinipitoisuuden huippukohta oli 0,3 m:n syvyydessä. Alumiini oli useimmiten yhteydessä orgaaniseen ainekseen tällä syvyydellä.
- Raskasmetallipitoisuudet olivat rikastumishorisontin vajovedessä selvästi suurempia kuin pintahorisonteissa.

Edellä mainittujen vajoveden kemiallisten ominaisuuksien perusteella maannos ulottui Kapulasillanmäessä ainakin 1,2 m:n syvyyteen.

Rikastumishorisontin alapuolella vajovesi muuttui pohjaveden kaltaiseksi. Veden laatu oli tutkimusaikana hyvin stabiili, laatuvaihtelut olivat pieniä ylempiin horisontteihin verrattuna. Vajovedessä bikarbonaatti-, sulfaatti ja piihappopitoisuudet kasvoivat rikastumishorisontin alaosaan verrattuna. Orgaanisen aineksen, nitraatin, kloridin, emäskationien ja alumiinin pitoisuudet pienenivät selvästi. Myös veden raskasmetallipitoisuudet pienenivät nikkeliä ja kobolttia lukuun ottamatta.

Matkalla 2,5 metrin syvyydestä pohjavedeksi noin 19 metrin syvyyteen vajovedessä kasvoivat bikarbonaatin, emäskationien, piihapon ja alumiinin pitoisuudet. Raskasmetalleista mangaanin, nikkelin ja kobolttin pitoisuudet pienenivät ja sinkin ja lyijyn pitoisuudet suurenivat.

Tutkimusaikana, vajaassa neljässä vuodessa 1985 – 1988, Kapulasillanmäen vajo- ja pohjavedessä tapahtui merkittävä pH:n lasku. Vajovedessä lasku oli suurimmillaan 0,5 pH-yksikköä (0,4 m:n syvyydessä). Pohjavedessä, jonka pinta on tutkimuspisteessä noin 19 metrin syvyydessä, pH laski samanaikaisesti yli 0,3 pH-yksikköä (ks. Hyyppä, Penttinen 1991). pH:n laskun syynä olivat ilmansaasteiden vaikutukset kasvillisuuteen ja maaperään. Kehitystä ovat ilmeisesti edesauttaneet otolliset kosteus (sateisuus) ja lämpötilaolosuhteet. Pohjaveden hiilidioksidipitoisuus suureni ja happipitoisuus pieneni. Vajovedessäkin oli välillisesti merkkejä korkeista hiilidioksidipitoisuuksista (hiilidioksidia ei ole analysoitu). Hiilidioksidin lisääntymisen syitä voivat olla 1. muualta tuleva hiilidioksidi oli lisääntynyt Kapulasillanmäen ilmassa, 2. kasvit käyttivät hiilidioksidia entistä vähemmän ilmansaasteiden heikentäessä niiden kuntoa, 3. orgaanisen aineksen hajoaminen maaperässä oli kiihtynyt laskeuman vahvojen happojen, otsonin ja edullisten kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden johdosta, samalla hajoamisessa happea oli kulunut. Lisääntynyt hiilidioksidi aiheutti veden happamoitumista. Suoranaista vahvojen happojen aiheuttamaa happamoitumista tapahtui vain maaperän pintaosissa. Erityisesti ajoittainen nitraattipitoisuuden nousu pintaosien vajovedessä aiheutti pH:n jyrkän laskun. Nitraatti on peräisin laskeumasta, mutta laskeuma-analyyseissä ei havaittu nitraattipitoisuuden kasvua. Nitraattipitoisuuden nousujaksot vajovedessä johtuivat luultavasti orgaanisen aineksen hajoamisesta ja voivat selittyä myös sillä, että kasvit eivät pystyneet käyttämään nitraattia kasvuunsa.

Maaperän pintaosien vajovedessä havaittiin ajanjaksoja, jolloin eri aineiden pitoisuustasot nousivat moninkertaisiksi. Esimerkiksi lysimetrissä H334 B 0,4 m:n syvyydessä nousi kaliumpermanganaattiluku (orgaaninen aines) 15 – 20-kertaiseksi syksyllä 1985 normaalitasoon verrattuna. Samanaikaisesti nousivat kloridin, sulfaatin,

emäskationien, alumiinin ja eräiden raskasmetallien pitoisuudet. Tätä seurasi vuonna 1986 nitraattipitoisuuden voimakas kasvu ja pH:n lasku. pH:n lasku aiheutti alumiinin ja raskasmetallien liukenemista veteen. pH:n lasku jatkui vuonna 1988 ja samanaikaisesti emäskationien pitoisuudet pienenivät. Toinen esimerkki on puun alla sijaitseva lysimetri H336 (0,3 – 0,8 m), jossa syksyllä 1987 näytteiden pH, bikarbonaatti-, sulfaatti-, piihappo-, natrium- ja kaliumpitoisuudet nousivat voimakkaasti (kuva 60). Ilmiöön liittyi myös erittäin toksisena pidetyn kromin pitoisuuden merkittävä nousu. Tämä johtui ilmeisesti siitä, että vedessä oli runsaasti hiilihappoa, joka reagoi mineraaliaineksen kanssa. Pitoisuuksien nousuista osa voi selittyä sillä, että maan pinnan kapasiteetti kyseisten aineiden pidättämiseen ylittyi, jolloin ne vajosivat alempiin horisontteihin.

Merkittävää on, että edellä kuvattuja maaperän pintaosien reaktioita ei ollut pH:n laskua lukuun ottamatta 2,5 metrin syvyydellä. Maaperän rikastumishorisontti toimii siten suotimena, joka estää tai ainakin hidastaa haitallisten aineiden pääsyä syvemmälle maaperässä. Hiilidioksidin kulkeutumista se ei ilmeisesti estä. Pitoisuuksien nousuilmioilla on suuri merkitys kasvien kannalta, saavathan ne pääosan käyttämässään vedestä läheltä maan pintaa.

12.3 Vajoveden laatu paljaan sorapinnan alapuolella

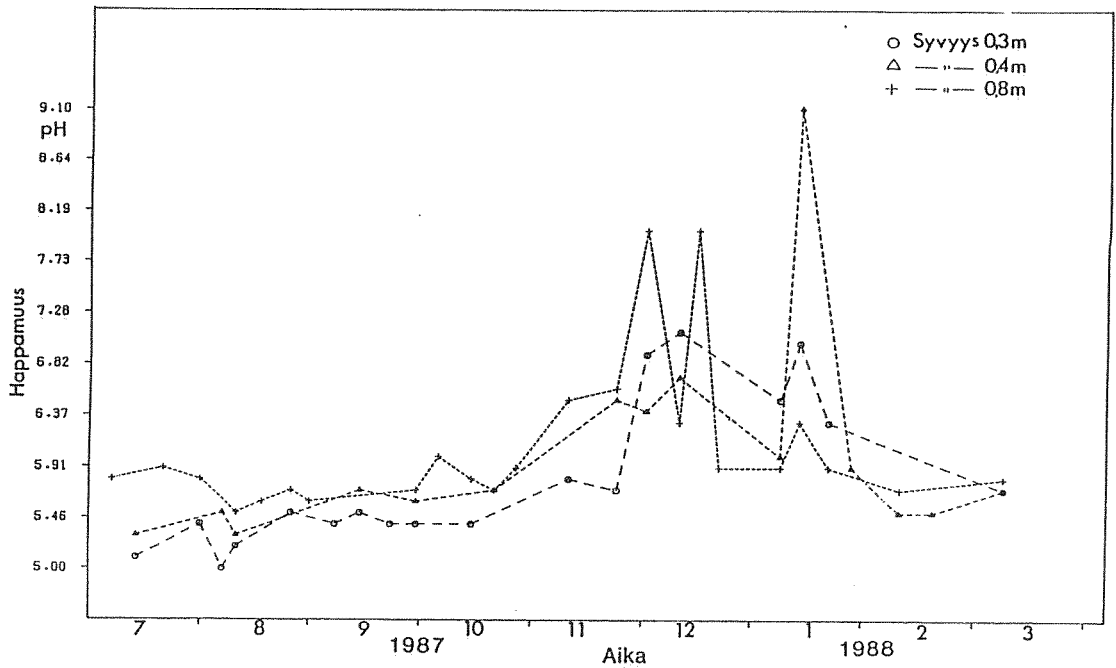
Koejärjestelyissä vesi imeytyi paljaan sorapinna läpi maaperän nopeammin ja haihtuminen oli vähäisempää kuin luonnontilassa. Maaperästä puuttui maannos, jonka suuri merkitys vajoveden laadun muokkaajana on edellä todettu. Veden laatu muuttui seuraavasti luonnontilaan verrattuna (kuva 61):

- Paljaan pinnan alla vajoveden pH oli alhaisempi kuin luonnontilassa. Sadeveden pH nousi maaperässä vain noin puolen metrin syvyyteen asti. 2,5 metrin syvyydellä pH:n mediaaniarvo oli 0,2 yksikköä alhaisempi kuin luonnontilassa.
- Vajoveden mukana huuhtoutui orgaanista ainesta enemmän kuin luonnontilassa. 2,5 metrin syvyydessä kaliumpermanganaattiluvun mediaaniarvo oli noin kaksinkertainen luonnontilaan verrattuna.
- Vajoveden nitraattipitoisuus riippuu kasvien ja maaperän kyvystä sitoa laskeuman nitraattia, paljaan sorapinnan alla vain jälkimmäisestä. Vajovedessä havaittiin sekä nitraatin pulssinomaista vaihtelua, joka johtui ehkä nitraatin pitkäaikaisesta adsorboitumisesta ja sen voimakkaasta vapautumisesta. Luonnontilassa 2,5 metrin syvyydessä ei havaittu määritysrajan 1 mg/l ylittäviä pitoisuuksia. Paljaan sorapinnan alla samalla syvyydellä yli vuoden kestäneen

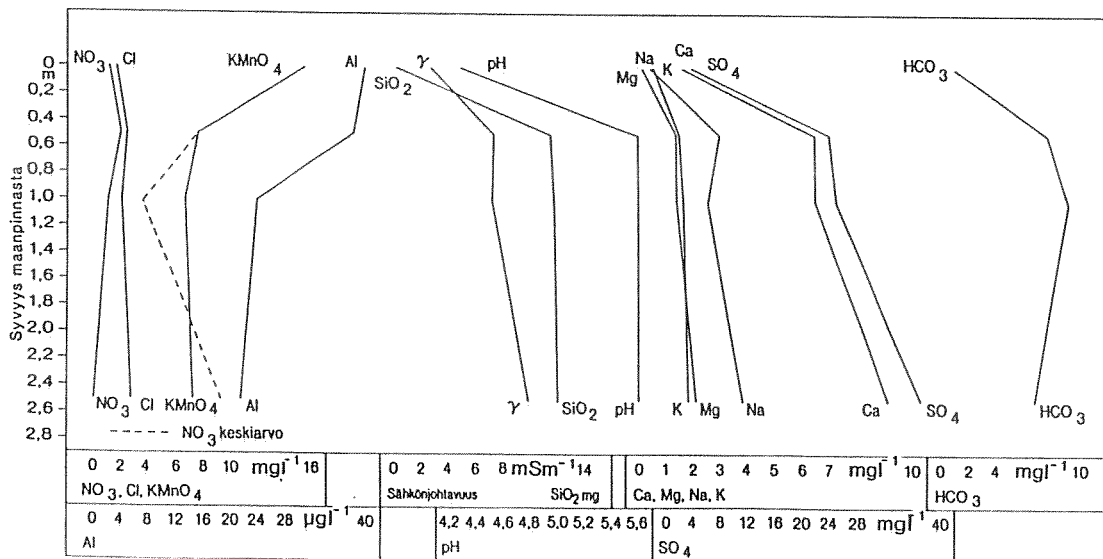
pidätysjakson jälkeen alkaneessa voimakkaassa huuhtoutumisjaksossa nitraattipitoisuus oli korkeimmillaan 69 mg/l.

- Maannoksen puuttuminen ja lisääntynyt vajovesimäärä aiheuttivat maaperään adsorboituneen sulfaatin voimakasta huuhtoutumista. Vajoveden sulfaattipitoisuuden mediaaniarvo oli 2,5 metrin syvyydessä noin kolminkertainen luonnontilaan verrattuna. Sulfaattipitoisuus myös kasvoi ylhäältä alaspäin mentäessä. Sulfaatin määrä näytteissä oli monin kertainen laskeumaan verrattuna, kun se luonnontilassa oli suurin piirtein sama. pH-tason laskusta johtuen sulfaattipitoisuudet pienenevät tutkimusaikana eli pH:n las-kiessa maaperään adsorboitui sulfaattia.
- Vajoveden piihappopitoisuus oli selvästi suurempia kuin luonnontilassa merkinä voimakkaammasta rapautumisesta.
- Emäskationipitoisuudet olivat suurempia kuin luonnontilassa ja kasvoivat alaspäin mentäessä. Kalsiumin osuus kationeista kasvoi luonnontilaan verrattuna. Emäskationien huuhtoutuminen liittyy rapautumiseen ja happamoitumiseen.
- Vajoveden alumiinipitoisuus oli paljaan pinnan alla suurempi kuin luonnontilassa noin metrin syvyydeltä alaspäin. Veden alumiinipitoisuus nousi pH-tason laskun myötä. 2,5 metrin syvyydessä alumiinipitoisuudet olivat keväällä 1986 samalla tasolla kuin luonnontilassa. Vuonna 1988 sorapinnan alla alumiinipitoisuustaso oli noussut noin kaksinkertaiseksi luonnontilaan verrattuna.
- Raskasmetalleista kadmiumia ja kromia oli sorapinnan alla 2,5 metrin syvyydessä enemmän kuin luonnontilassa. Erot olivat kuitenkin pieniä.
- Muiden vajoveden ainespitoisuuksien suhteen erot luonnontilaisen ja sorapinnan välillä olivat vähäisiä. Lisääntyneen vajovesimäärän johdosta aineiden määrissä oli kuitenkin selvä ero.

Maaperän pintakerroksen, kasvillisuuden ja maannoksen, poistaminen aiheuttaa tämän tutkimuksen havaintojen mukaan eri aineiden voimakasta huuhtoutumista vajoveden mukana maakerrosten läpi. Monet maaperään aikojen kuluessa kiinnittyneet suolat, saostumat ja rapaumat lähtevät liikkeelle. Rapautuminen voimistuu ja laskeuman ainekset pääsevät tunkeutumaan syvemmälle maaperään kuin luonnontilassa. Maaperä happamoituu.



Kuva 60. Vajoveden pH luonnontilaisessa lysimetrissä syksyllä 1987. Veteen on liennut runsaasti hiilidioksidia. Näin syntynyt hiilihappo on reagoinut mineraaliaineksen kanssa, jolloin veteen on liennut suurina pitoisuuksina emäksisiä natrium- ja kalium-ioneja.



Kuva 61. Vajoveden laatu (mediaaniarvoja) sorapintaisessa lysimetrissä.

13 VAJOVEDEN LAATU LAMMIN SALIMÄESSÄ

Lammin Salimäessä maa-aineksen mineraalikoostumus aiheuttaa sen, että vajoveden laatu on erilainen Kapulasillanmäkeen verrattuna. Salimäen maaperässä on tuloksista päätellen sulfidipitoisia mineraaleja. Sulfidien hapettuessa syntyy rikkihappoa.

Maaperässä näkyviä merkkejä haposta ovat rautasaostumat ja maannoksen rapautuneisuus. Rapauamat muodostavat maan pintaan hienorakeisen, hyvin vettä pidättävän kerroksen, mistä johtuu puuston kuusi- ja aluskasvillisuuden heinävaltaisuus.

Vajovedessä tärkeimmät merkit rikkihaposta olivat ajoittain alhaiset pH:n arvot pintahorisonteissa, korkeat sulfaatti-, kalsium-, piihappo-, raskasmetalli- ja alumiinipitoisuudet. Vajovedessä oli myös paljon nitraattia. Raskasmetalleista erityisesti sinkki-, kupari-, nikkeli- ja kobolttipitoisuudet olivat korkeita.

Pohjavedessä oli erityisesti piihappoa paljon merkinä voimakkaasta rapautumisesta pintahorisonteissa. Myös nitraatti-, sulfaatti, bikarbonaatti-, kalsium- ja alumiinipitoisuudet olivat suurempia kuin Tuusulan Kapulasillanmäessä. Veden korkeasta pH:sta johtuen raskasmetalleista näkyi vain vähäisiä merkkejä. Näytteitä pumpattaessa havaintoputkesta tuli veden mukana rautasakkaa.

14 JÄLKIHOITOKOKEET

Jälkihoitokokeiden tarkoituksena oli tutkia erilaisten keinotekkoisten pintarakenteiden vaikutusta vajoveden laatuun.

Luonnontilaista maannosta jäljittelevässä rakenteessa soran päälle levitettiin hiekkaa, hiekan päälle rautapitoista saostumaa ja sen päälle taas hiekkaa sekä ylimmäksi humuspitoista pintamaata. Rakenteen pintaan ilmaantui rehevä aluskasvillisuus jo ensimmäisenä kesänä. Vajoveden laatu rakenteessa oli useimpien ominaisuuksien osalta lähellä luonnontilaista vajovettä. Heti rakentamisen jälkeen materiaaleista huuhtoutui nitraattia, kloridia, kalsiumia, rautaa ja alumiinia. Pitoisuudet kuitenkin laskivat nopeasti. Kasvillisuuden nitraattia pidättävä vaikutus näkyi selvästi. Pysyviä eroja luonnontilaiseen vajoveteen verrattuna olivat korkeammat bikarbonaatti- ja sulfaattipitoisuudet.

Toinen rakenne oli muuten samanlainen kuin luonnontilaista jäljittelevä, mutta siitä puuttui humuspitoinen pintamaa. Tähän rakenteeseen ei juuri aluskasvillisuutta ilmaantunut. Vajoveden suolapitoisuudet olivat selvästi korkeampia kuin luonnontilaista jäljittelevässä. Rakenteen läpi ja materiaaleista huuhtoutui orgaanista ainesta, bikarbonaattia, nitraattia, sulfaattia ja kalsiumia. Rakennusvaiheen häiriöitä olivat lisäksi kloridi-, rauta- ja alumiinipitoisuuksien lyhytaikaiset nousut.

Kolmannessa rakenteessa oli soran päällä pelkkä hiekkakerros. Myöskään tähän rakenteeseen ei juuri aluskasvillisuutta tullut. Vajoveden laadulle olivat suuret suolapitoisuuksien vaihtelut tyypillisiä. Erityisesti bikarbonaatti- ja nitraattipitoi-

suudet vaihtelivat ja olivat ajoittain varsin korkeita. Vajoveden pH oli alhaisempi kuin muissa rakenteissa ja alumiinipitoisuus selvästi korkeampi. Vesi oli ajoittain väriä hienoainekseen huuhtoutumisesta johtuen.

15 SORANPESU JA PESULIETE

Sorapesussa syntyneen pesulietteen ominaisuuksia tutkittiin lysimetrien avulla. Tarkoituksena oli tutkia soveltuuko liete pohjavesialueella säilytettäväksi ja sora-kuopan pohjalle levitettäväksi. Liette oli peräisin Nukarin Patamäestä ja se levitettiin Kapulasillanmäen jälkihoitolysimetrien päälle.

Kokeissa havaittiin, että pesulietepinnan (noin 20 cm paksu) läpi kulkenessa vajovedessä eri suolojen pitoisuudet nousivat. Nitraatti- ja kloridipitoisuuksien nousut olivat pulssinomaisia ja kestivät muutamia kuukausia. Bikarbonaatti-, sulfaatti- ja emäskationipitoisuudet pysyivät korkeina koko tutkimusajan noin puolitoista vuotta. Erityisen paljon lietteestä huuhtoutui sulfaattia 100–200 mg/l. Vajovedessä tapahtui myös pH-tason laskua ja raskasmetalli- ja alumiinipitoisuuksien nousua.

- Raskasmetalleista rauta-, mangaani-, kupari-, lyijy-, kromi- ja kobolttipitoisuudet nousivat lietteen levityksen jälkeen. Metallit liikkuivat osaksi lietteen hienoainekseen mukana. Syksyllä 1987 pitoisuudet olivat alkutilannetta vastaavalla tasolla. Nikkelipitoisuudet olivat selvästi alkutilannetta suurempia koko tutkimusajan. Kadmiumpitoisuuksissa oli pieni pitoisuustason nousu.
- Alumiinia liikkui myös hienoainekseen mukana lietteen levityksen jälkeen. Maksimipitoisuus oli 1 700 mg/l. Alumiinin pitoisuustaso jäi myös alkuvaiheen jälkeen hiukan koholle. Pitoisuustaso oli suunnillen sama kuin hiekkapintaisessa lysimetrirakenteessa.

Pesulietteen ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä voivat olla:

1. Nukarista tuodun pesulietteen mineraalikoostumus oli erilainen Palaneenmäen soraan verrattuna. Tähän viittaa emäskationien keskinäisten suhteiden erilaisuus. Mineraalikoostumus voi vaikuttaa sulfaattipitoisuuteen. Rikkipitoisia mineraaleja pesulietteestä ei kuitenkaan löytynyt.
2. Pesuprosessin aikana lietteeseen adsorboitui pohjavedestä eri aineita. Nukarin Patamäen pohjavedessä nitraat-ti-, kloridi- ja sulfaattipitoisuudet olivat kor-

keammalla tasolla kuin Tuusulan harjujaksolla yleensä. Nitraatin pääasialliset lähteet alueella ovat ilmeisesti peltolannoitus ja nitraattia käyttävän kasvillisuuden puute sorakuopassa. Kloridi on pääasiassa peräisin tie- ja pölynsidon-tasuoloista. Sulfaatin lisääntymiselle ei löydy mitään ulkopuolista lähdettä. Se on peräisin ilmasta tulevasta laskeumasta, joka on saman suuruinen kuin muillakin lähialueilla. Pesulietteestä uuttuvan nitraatin ja kloridin määrät eivät eroa muista pintarakenteista irtoavista määristä. Sulfaatin määrä sen sijaan on moninkertainen.

3. Pesuprosessi rikasti sulfaattia pesulietteeseen ja Patamäen pohjaveteen. Pesuprosessissa harjuaineksesta erotetaan aineksen hienorakeisin osa. Huuhtelun aikana harjuainekseen adsorboitunutta sulfaattia irtoaa pesuveteen. Rikastunut pesuvesi ja hienorakeinen aines ohjataan suuriin selkeytysaltaisiin. Mikäli hienorakeisessa aineksessa on vapaata adsorptiotilaa, vedestä siirtyy sulfaattia lietteeseen. Kesällä altaissa tapahtuva voimakas haihtuminen väkevöittää vettä. Kun vettä kierrätetään prosessissa, väkevöityy se joka kierroksella ja lietteeseen siirtyy sulfaattia niin paljon kuin se pystyy adsorboimaan. Vesi kierrätetään pohjaveden kautta tai ainakin se jossain vaiheessa joutuu pohjaveteen, jolloin pohjaveden sulfaattipitoisuus kasvaa. Kun liete siirretään altaista suuriksi kasoiksi, jatkuu kasojen sisältämän veden väkevöityminen voimakkaan haihtumisen johdosta (kasat ovat väriltään tummia). Sama kierto koskee periaatteessa myös muita harjuainekseen löyhästi adsorboituneita aineita.

Osmo Seppinen (1989 julkaisematon raportti) tutki projektin yhteydessä pesulietteiden ominaisuuksia kuudessa paikassa. Tutkimuspaikat olivat Nurmijärvellä Patamäki, Hyvinkäällä Suomies, Jokioisissa Kukonharju, Porvoon mlk:ssa Vessölandet, Jyväskylän mlk:ssa Vesanka ja Jurvassa Porokangas.

Lietteet olivat ainestyyppiltään hienosta hiedasta karkeaan hietaan ja savespitoisuus oli 0–15 %. Lietenäytteitä uutettiin tislattulla vedellä ja uutoksesta mitattiin 17 kemiallista ominaisuutta ja pitoisuutta.

Lietekasoista ja -selkeytysaltaista analysoitiin uutoksista ja pesuvedestä taulukossa 24 esitettyjä sulfaattipitoisuuksia (mS/m 25 C). Tulokset antavat aiheen olettaa, että Porokangasta lukuun ottamatta tutkituissa lietteissä sulfaattimäärä oli vähintään samaa suuruusluokkaa kuin Patamäessä. Vesangan pesulietealtaasta otetusta näytteestä puuttui sulfaattimääritys, mutta näytteen sähkönjohtavuus oli noin puolitoistakertainen Patamäen altaaseen verrattuna.

Taulukko 24. Sulfaattipitoisuuksia (mg/l) soranpesulietteessä ja pesuvedessä.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
0 m	9,1	6,8	7,8	6,9	5,7	20
1 m	24	24	13	65		
2 m	78			47		

- 1 = Patamäki, lietekasa
 2 = Kukonharju, lietekasa
 3 = Porokangas, lietekasa
 4 = Vessölandet, lietekasa
 5 = Patamäki, selkeytysallas
 6 = Suomies

Vessölandetissa soraa pestiin merivedellä. Näytteen natriumpitoisuus yhden metrin syvyydellä oli 180 mg/l, mikä oli yli kaksikymmenkertainen muiden paikkojen suurimpaan arvoon verrattuna. Kloridia ei näytteistä valitettavasti analysoitu. Pesulietteeseen oli kiinnittynyt (adsorboituneena ja huokosvedessä) merisuolaa.

Patamäen sorakuoppaan levitetystä lietteestä ja maaperästä sen alta otettiin näytteitä 70 cm:n syvyyteen asti. Näytteissä useiden raskasmetallien ja alumiinin pitoisuudet olivat korkeampia kuin paljaan sorapinnan alta otetuissa näytteissä. Erityisesti 70 cm:n syvyydessä pitoisuudet olivat korkeita. Näitä aineita olivat rauta, kupari, nikkeli, kromi, koboltti, alumiini ja vähäisemmin lyijy. Aineet olivat rikastuneet liettepinnan alapuolella luultavasti osaksi lietteestä huuhtoutuvan hienoaineksen mukana.

Soranpesuprosessissa erotetaan sorasta hienoaines, johon on kiinnittynyt suoloja, raskametalleja ja alumiinia. Itse prosessi vielä rikastaa näitä aineita lietteeseen ja mahdollisesti suoloja myös pohjaveteen. Soranpesu ja pesulietteen levitys ja läjitys pohjavesialueella saattaa aiheuttaa pohjaveden laadun heikkenemistä.

16 SUOLAKOE

Soranottoalueilla käytetään suolaa pölynsidontaan ja jään sulattamiseen. Pölynsidontasuola on kalsiumkloridia (CaCl_2), jonka pH on nostettu noin pH 10:een. Suolakokeen tarkoituksena oli tutkia suolan liikkumista ja sen vaikutusta vajoveden laatuun.

Koe tehtiin sorapintaaisessa lysimetrissä, josta näytteitä saatiin yhden ja neljän metrin syvyyksiltä. Suolaliuosta levitettiin lysimetrin päälle ja seurattiin vajoveden laatua.

Vajoveden suolapitoisuus nousi neljän metrin syvyydessä jo ensimmäisenä koepäivänä. Suurimmillaan pitoisuus (kloridi) oli noin kuukauden kuluttua. Kaikkiaan suolaa huuhtoutui noin kahden kuukauden ajan. Huuhtoutuvat aineet olivat kloridi, kalsium, magnesium ja myöhäisemmässä vaiheessa sulfaatti. Lisäksi suola absorboi ilmasta hiilidioksidia, mistä johtuen vajoveden bikarbonaattipitoisuus nousi. Suolaliuoksen korkeasta pH:sta johtuen myös vajoveden pH aluksi nousi noin 0,3 yksikköä. Noin kahden viikon kuluttua tapahtui kuitenkin voimakas pH:n lasku, koetta edeltäneeltä tasolta noin 0,5 – 0,8 yksikköä. pH:n lasku johtui suolan absorboimasta hiilidioksidista ja/tai kloridin emäskationeja nopeammasta liikkumisesta maaperässä. Vajovedessä myös eräät raskasmetalli- ja alumiinipitoisuudet nousivat.

Tutkimuksen havaintojen perusteella voidaan päätellä, että runsas suolan käyttö soranottoalueella aiheuttaa pohjaveden suolapitoisuuden nousua ja veden happamoitumista.

17 JÄTEVESIKOE

Jätevesikokeen tarkoituksena oli tutkia bakteerien ja veden sisältämien aineiden kulkeutumista maaperässä eri olosuhteissa. Bakteerien osalta tulokset on julkaistu erillisessä raportissa (Kuusinen 1991). Kokeessa käytettiin Järvenpään kaupungin viemäriverettä, jota sadetettiin eri lysimetrien päälle.

Luonnontilassa jäteveden sisältämät aineet suodattuivat maannoksen rikastumishorisontin yläosaan sekä joutuivat kasvien käyttöön. Selviä muutoksia vajoveden laadussa havaittiin vain 11 ja 16 cm:n syvyydessä. Tärkeimmät muutokset olivat kaliumpermanganaattiluvun (orgaaninen aines) ja kloridi-, sulfaatti- ja natriumpitoisuuksien nousu. Sen sijaan pH ja bikarbonaattipitoisuus eivät näytteissä muuttuneet, vaikka ne jätevedessä olivat korkeita. Nitraattipitoisuus nousi vain lievästi.

Paljaan sorapinnan alapuolella jätevesi tunkeutui nopeasti neljän metrin syvyyteen. Kloridipitoisuus nousi lähelle jäteveden pitoisuutta noin kahdessa viikossa. Nitraatti liikkui hitaammin. Sen maksimiarvo oli noin 70 % jäteveden pitoisuudesta noin neljän viikon kuluttua. Bikarbonaatti- ja sulfaattipitoisuudet sekä kaliumpermanganaattiluku nousivat metrin syvyydessä, mutta neljän metrin syvyydessä ei ollut muutosta. Emäskationeista jäteveden natrium liikkui hitaasti ja korvautui kalsiumilla ja magnesiumilla. Vajoveden pH nousi ensin, mutta laski nopeasti aikaisemmalle tasolleen. Vajovedessä havaittiin myös vähäistä raskasmetallipitoisuuksien lisääntymistä.

Tutkimuksen havaintojen perusteella voidaan päätellä, että luonnontilainen maaperä estää tai hidastaa useiden viemäriveden sisältämien ainesosien pääsyä maannoksen alapuolisiin maakerroksiin.

18 RASKASMETALLIKOE

Raskasmetallikokeessa tutkittiin raskasmetallien kulkeutumista luonnontilaisessa maaperässä ja paljaan sorapinnan alapuolella. Tutkitut metallit olivat: mangaani, sinkki, kupari, nikkeli, lyijy, kadmium, kromi ja koboltti. Metallit liuotettiin sadeveteen kloridisuoloina lyijyä lukuun ottamatta, joka oli nitraattia ja sadetettiin (30 mm) maahan lysimetrien päälle. Metallipitoisuudet liuoksessa olivat mangaani ja sinkki 10 mg/l ja muut 1 mg/l.

Luonnontilassa kaikkia muita tutkittuja metalleja paitsi lyijyä ja mahdollisesti kuparia kulkeutui pieniä määriä 0,3 m:n syvyyteen. Kuparin osalta tulos on epäselvä, koska kuparipitoisuus luonnontilaisessa vajovedessä on yleensä määritysrajan yläpuolella ja vaihtelee paljon. 0,4 m:n syvyydessä havaittiin kromia, nikkeliä ja kadmiumia. Näkyvän rikastumishorisontin alapuolelle pääsi pieniä määriä nikkeliä ja kadmiumia. Tutkimusaikana, noin kolme kuukautta, välille 0 – 0,3 m metallit pidättyivät seuraavassa järjestyksessä:

Pb (100 %) > Cu (100 % ?) > Cr (99,6 %) > Cd (97,6 %) > Co (97,1 %) > Zn (97,0 %) > Ni (96,3 %) > Mn (94,7 %).

Välillä 0 – 0,8 luvut ovat:

Pb (100 %) = Cu (100 % ?) = Cr (100 %) = Co (100 %)
= Zn (100 %) = Mn (100 %) > Cd (99,98 %) > Ni (99,93 %).

0,3 m:n syvyydessä metallipitoisuudet olivat huippuarvoissaan jo heti koetta seuranneen päivän näytteissä.

Paljaan sorapinnan alla metallit kulkeutuivat selvästi syvemmälle kuin luonnontilassa, vaikka vajoveden pH oli noin yhden yksikön korkeampi. Pieniä määriä metalleja kulkeutui jopa neljän metrin syvyyteen. Pidättymisprosentit eri syvyyksillä olivat:

	Mn	Zn	Cu	Ni	Co	Cr	Cd	Pb
1 m	98,7	98,8	98,7	99,0	99,72		99,93	99,98
2 m	98,6	98,1	98,7	97,0	99,79		99,81	99,97
3 m	99,7	99,2	99,0	99,0	99,86		99,87	99,99

Tuntemattomasta syystä metallipitoisuuksien maksimikohta oli kahden metrin syvyydessä. Neljän metrin syvyydestä prosenttilukuja ei voitu laskea keräysastian ylivuotojen johdosta.

Eri metallien keskinäinen pidättymisjärjestys eri syvyyksillä oli seuraava:

1 m Pb = Cd > Cr > Co > Ni > Cu > Zn > Mn

2 m Pb > Cd > Cr > Co > Cu > Mn > Zn > Ni

3 m Pb > Cd > Cr > CO > Mn > Zn > Cu = Ni

Tuloksia arvioitaessa täytyy huomioda se, että tutkimusaika oli noin kaksi kuukautta pidempi kuin luonnontilaisessa lysimetrissä. Ero metallien kulkeutumisessa oli kuitenkin selvä.

Luonnontilainen maaperän pintakerros ja erityisesti maannoksen rikastumishorisontti estää suurina pitoisuuksina maaperään sadetettujen raskasmetallien kulkeutumista syvälle maaperään tehokkaammin kuin paljas sorapinta.

OSA IV JOHTOPÄÄTÖKSET

19 LOPPUTIIVISTELMÄ JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Vajo- ja pohjaveden laatua tutkittiin lysimetriasemilla Tuusulassa, Nurmijärvellä ja Lammilla vuosina 1985 – 1988. Vajoveden laatua ja määrää tutkittiin eri syvyyksiltä sekä luonnontilassa että paljaan sorapinnan alapuolelta. Vajovettä tutkittiin erilaisten keinotekoisien pintarakenteiden alapuolelta soranottoalueiden jälkihoitoa silmälläpitäen. Lisäksi selvitettiin soranpesussa syntyvän lietteen ominaisuuksia, suolausten vaikutuksia ja jätevesi- ja raskasmetallipäästöjen kulkeutumista maaperässä.

Tutkimuksen päätulokset ja johtopäätökset ovat seuraavia:

Vajovesi luonnontilassa ja paljaan sorapinnan alapuolella Tuusulan Kapulasillanmäessä

1. Luonnontilainen vajovesi erosi selvästi sekä määrällisesti että laadultaan paljaan sorapinnan alaisesta vajovedestä. Luonnontilassa vajoveteen vaikuttavat kasvillisuus ja maaperän maannosrakenne ns. podsolimaannos, jotka paljaalta pinnalta puuttuvat.

2. Paljaan sorapinnan alapuolella vajoveden määrä oli selvästi suurempi kuin luonnontilassa, ja määrä reagoi herkemmin sateisiin. Tämä johtui ensiksi erilaisista veden haihtumis- ja imeytymismekanismeista. Haihduttavat pinnat ovat fysikaalisilta ominaisuuksiltaan erilaisia, luonnontilassa kasvi- ja karikkepinnat ja paljaalla pinnalla mineraalimaa. Luonnontilassa kasvien kautta haihtuu suuri osa vedestä (transpiraatio). Toiseksi maannoksen humus- ja rikastumishorisontit tasaavat veden virtausta alaspäin maaperässä ja pienentävät maaperän vedenjohtavuutta.
 3. Luonnontilassa havaittiin vajoveden laadussa suuria vaihteluja lähellä maan pintaa, maannoshorisonteissa. Kemiallisesti maannoksen voitiin katsoa ulottuvan ainakin 1,2 m:n syvyyteen (välille 1,2 - 2,5 m). Havaittiin ajanjaksoja, jolloin joidenkin aineiden pitoisuudet vajovedessä nousivat moni-, jopa monikymmenkertaisiksi. Näitä jaksoja olivat mm:
 - Orgaanisen aineksen pitoisuuden nousu, johon liittyi kloridi-, sulfaatti-, emäskationi-, alumiini- ja raskasmetallipitoisuuksien nousu.
 - Nitraattipitoisuuden nousu, johon liittyi pH:n voimakas lasku ja emäskationi-, alumiini ja raskasmetallipitoisuuksien nousu.
 - Bikarbonaattipitoisuuden nousu, johon liittyi korkea pH ja sulfaatti-, piihappo-, natrium- ja kaliumpitoisuuksien nousu ja raskasmetalleista erityisesti korkea kromipitoisuus. Tämän tapahtuman perussyy oli todennäköisesti vajoveden korkea hiilihappopitoisuus ja hiilihapon reagointi mineraaliaineksen kanssa.
- Näiden tapahtumien syynä olivat ainakin osaksi ilmansaasteiden vaikutukset kasvillisuuteen ja maaperään.
4. Syvemmällä maaperässä, maannoksen alapuolella, veden laatu oli pintahorisontteihin verrattuna stabiilia, lähellä pohjaveden ominaisuuksia.
 5. Paljaan sorapinnan alapuolella useiden vajoveden pääkomponenttien pitoisuustasot olivat selvästi korkeampia kuin luonnontilassa eri syvyyksillä. Vajoveden mukana huuhtoutui sekä laskeumassa tulleita, että maa-ainekseen aiemmin kiinnittyneitä suoloja ja orgaanista ainesta. Mm. vajoveden nitraatti- ja sulfaattipitoisuudet olivat ajoittain korkeita.
 6. Kapulasillanmäessä havaittiin voimakas happamuuden lisääntyminen (pH:n lasku) vajovedessä eri syvyyksillä ja samanaikaisesti pohjavedessä paksujen maapeitteiden alla (tutkimuspisteessä noin 19 metrin syvyydessä). Tähän olivat

syynä ilmansaasteiden vaikutukset maaperän pintaosiin ja kasvillisuuteen, mistä johtuen hiilihapon määrä lisääntyi vajo- ja pohjavedessä syvemmällä maaperässä. Happamoitumiskehitys oli paljaan sorapinnan alla voimakkaampaa kuin luonnotilassa ja siihen liittyi 2,5 metrin syvyydessä vajoveden alumiinipitoisuuden kaksinkertaistuminen tutkimusaikana.

Vajovesi Lammin Salimäessä

7. Salimäen vajovedessä havaittiin merkkejä rikkihapon muodostumisesta maaperässä mineraaliaineksen rapautuessa. Tästä seurauksena olivat vajoveden ajoittain alhaiset pH:n arvot, korkeat sulfaatti- alumiini- ja raskasmetallipitoisuudet. Raskasmetalleista erityisen korkeita olivat sinkki-, kupari-, nikkeli- ja kobolttipitoisuudet.

Jälkihoitokoe

8. Jälkihoitokokeessa tutkituista kolmesta erilaisesta pintarakenteesta parhaat tulokset saatiin luonnotilaista maannosta jäljittelevästä rakenteesta. Kaikilla maannoksen horisonteilla ja aineksilla on merkitystä pohjavettä suojaavana kerroksena maan pinnalla. Erityisesti humus- ja rikastumishorisontit sekä (alus-)kasvillisuus ovat tärkeitä.

Soranpesu

9. Soranpesussa syntyvään lietteeseen havaittiin kiinnittyneen suuria määriä suoloja erityisesti sulfaattia. Maahan levitetystä lietteestä suoloja huuhtoutui vajoveteen suurina pitoisuuksina. Maaperänäytteissä ja vajovedessä havaittiin myös eräiden raskasmetallien kulkeutumista maaperässä lietteen alapuolella. Itse pesuprosessi saattaa aiheuttaa suolojen lisääntymistä pohjavedessä.

Suolakoe

10. Suolakokeessa havaittiin pölynsidontaan yleisesti käytetyn suolan, kalsiumkloridin, aiheuttavan paljaalle sorapinnalle levitettynä vajoveden happamoitumista, suolapitoisuuksien nousua ja myös vähäistä raskasmetallipitoisuuksien nousua. Suola absorboi ilmasta hiilidioksidia, mikä näkyi vajoveden bikarbonaattipitoisuuden nousuna.

Jätevesi- ja raskasmetallikokeet

11. Jätevesi- ja raskasmetallikokeissa havaittiin luonnontilaisen maannoksen suojaava vaikutus. Voimakkaan jätevesi- ja raskasmetallisaastumisen vaikutukset näkyivät luonnontilassa pääosin vain noin 0,2 – 0,3 m:n syvyyteen asti rikastumishorisontin yläosassa. Paljaan sorapinnan alapuolella jätevesi kulkeutui nopeasti neljän metrin syvyyteen. Raskasmetallikokeessa havaittiin metallien kulkeutumista ainakin kolmen metrin syvyyteen.

Soranottoa koskevat päätelmät

12. Pohjaveden likaantumisen estämiseksi jätetään maa-aineksen ottoalueilla pohjaveden suojaksi yleensä yksi, kaksi metriä paksu suojakerros.

Tutkimuksessa on saatu selviä osviittoja siitä, että tätä paksumpikaan (tässä 2,5 – 4 m) suojakerros ei estä laskeumassa tulevien ja maaperään aiemmin kiinnittyneiden suolojen huuhtoutumista pohjaveteen. Yhden, kahden metrin paksuinen suojakerros estää laskeumassa yleensä maanpintaan tulevien raskasmetallien kulkeutumista pohjaveteen, mutta sen tarjoama suoja voimakkaan raskasmetalli- tai muun saastumisen vaikutuksilta on selvästi heikompi kuin luonnontilaisen maaperän. Lisäksi vesi paljaan sorapinnan alla voi happamoitua herkemmin kuin luonnontilassa, mistä on seurauksena mm. veden alumiinipitoisuuden lisääntyminen.

Suojakerrosta määritettäessä lähtökohtana tulee olla:

- a. Pohjaveden pinnan yläpuolelle jätetään tarvittava paksuus maannoksen muodostumisesta varten. Tuusulan Kapulasillanmäessä maannoksen paksuus oli jossain välillä 1,2 – 2,5 m.
- b. Maan pintaan kasvaa nopeasti kattava kasvipeite.
- c. Tarvittaessa maannoksen ja kasvillisuuden kehitystä edesautetaan jälkihoitotoimenpiteillä. Tällöin vaativissa kohteissa voidaan kiinnittää huomiota seuraaviin seikkoihin:
 - Veden viipymää maan pintaosissa pidennetään, jolloin estetään nopean virtauksen huuhtova vaikutus ja turvataan kasvien vedensaanti.
 - Maan pintaan levitetään humuspitoista mineraaliainesta, joka suodattaa vedestä haitallisia ainesosia ja toimii kasvien ravinnonlähteenä. Tässä on ehkä mahdollista käyttää sivuun siirrettyjä pintamaita, jolloin myös vettä suodattavan rikastumishorisontin ainesosat ovat käytössä.
 - Maan pintaa rikkova eroosio estetään.

- Suojakerroksen paksuutta määritettäessä tulee huomioida se, että paksuus lasketaan pohjaveden pinnan ylimmästä tasosta. Ottoalueilla pohjaveden pinnan vaihtelut saattavat kasvaa ja ylin pinnan taso nousta ottoa edeltäneeseen tilanteeseen verrattuna.
- 13. Maan pinnan ja kasvillisuuden säilyttämisellä koskemattomana on suuri merkitys pohjaveden suojaamisessa. Tästä syystä tulisi kokonaisia pohjaveden muodostumisalueita säästää soranotolta ja ohjata ottoa alueille, jotka ovat vähemmän tärkeitä pohjaveden suojaamisen kannalta. Näillä alueilla voitaisiin maa-ainesvarat mahdollisesti käyttää nykyisin totuttua tarkemmin.
- 14. Soranotto saattaa joissakin tapauksissa aiheuttaa pohjaveden suoranaisen pilaantumisen. Tästä saatiin viitteitä Lammin tutkimusalueella. Mineraali-aineksen rapautumisessa syntyvä rikkihappo voi aiheuttaa pohjaveden pysyvän happamoitumisen ja korkeita raskasmetallipitoisuuksia, mikäli kaivu tällaisella alueella ulotetaan lähelle pohjaveden pintaa tai sen alle.
- 15. Tutkimuksessa saatiin viitteitä siitä, että soranpesu saattaa olla haitallista pohjaveden laadun kannalta. Soranpesussa syntyvää lietettä ei tule levittää maan pintaan pohjavesialueilla.
- 16. Suolojen suurimittaista käyttöä tulee välttää pohjavesialueilla soranoton yhteydessä.
- 17. Maa-ainesten läjityksissä, massojen vaihdoissa ja levityksissä tulee huomioida se, että ainekseen saattaa olla kiinnittyneenä laskeuman mukana tulleita suoloja, erityisesti sulfaattia, jotka voivat kulkeutua pohjaveteen.

20 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSIA

1. Lysimetriasemilla ja projektin aluetutkimusten yhteydessä (Hyypä, Penttinen 1991) Tuusulan harjujaksolla ja Lammilla havaitun vajo- ja pohjaveden nopean happamoitumiskehityksen syyt ja happamoituvan alueen laajuus tulisi pikaisesti selvittää. Mahdollisuus pohjaveden laadun heikkenemiseen on alueilla ilmeinen.
2. Maaperän happamoitumistutkimusten painopiste on siirtymässä emäskationien tutkimisesta anionien erityisesti nitraatti- ja sulfaatti-ionien tutkimiseen. Niiden liikkumisesta ja varastoitumisesta maaperään on vielä liian vähän tietoa. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että maaperään varastoitunut sulfaatti

saattaa olla aikapommi, joka muodostaa vakavan uhan pohjavedelle. Samoin nitraatin huuhtoutuminen saattaa aiheuttaa voimakasta happamoitumista, jos kasvillisuudessa ja ilmastossa tapahtuu muutoksia. Hiilidioksidin ja mahdollisesti otsonin lisääntyminen ilmassa voi myös uhata pohjavesivaroja. Näiden asioiden perustutkimusta tulisi jatkaa projektin jo saavuttamista lähtökohdista.

3. Projektissa kehitetyllä lysimetrialitteistolla pystytään keräämään vajovettä halutulta syvyydeltä. Laitteistolla on mm. seuraavia etuja perinteisiin menetelmiin verrattuna:
 - lysimetriastian yläpuolinen maakerros pysyy häiriintymättömänä
 - näytteet saadaan siitä vedestä, joka maaperässä liikkuu ja jota kasvit käyttävät. Veden laatua ei tarvitse päätellä maa-aineksen ominaisuuksista
 - näytteitä saadaan jatkuvasti samasta kohdasta vaikka viikon välein, jolloin ympäristön tilan seurantaan eivät vaikuta satunnaiset vaihtelut, kuten otettaessa maaperänäytteitä.

Laitteistoja voidaan käyttää esimerkiksi happamoitumis-, metsän- ja maannostutkimuksissa.

Esitämme, että laitteiston käyttömahdollisuuksia selvitetään.

4. Maa-ainesten otossa ja muussa kaivutoiminnassa on usein tilanteita, jolloin olisi syytä selvittää aineksen kemiallisia ominaisuuksia mahdollisten pohjavesihaittojen ehkäisemiseksi. Näitä ominaisuuksia ovat mm. aineksen sulfidipitoisten mineraalien määrä, aineksen puskurikyky happamoitumista vastaan sekä aineksen löyhästi sitoutuneiden suolojen (sulfaatti, nitraatti, kloridi) ja muiden haitallisten aineiden määrä. Näiden seikkojen tutkimiseksi tulisi kehittää rutiininomaiset kenttä- ja laboratoriomääritysmenetelmät.
5. Maa-ainesten ottoalueiden jälkihoidon (pintarakenteiden) hyödyllisyydestä saatiin tässä tutkimuksessa osviittoja pienoismallimitakaavassa. Näitä kokemuksia hyväksi käyttäen tulisi aloittaa täysimittainen ottoalueiden jälkihoidotutkimus.
6. Soranpesusta sekä pölynsidonta-, ja tiesuolauksista pohjavedelle mahdollisesti aiheutuvien haittojen ehkäisyä tulisi selvittää.
7. Maa-ainesten läjitysten, levitysten ja massojen vaihdon haittavaikutuksia tulisi selvittää.

8. Vajo- ja pohjaveden laadun seuranta tulisi jatkaa lysimetriasemilla. Tähän mennessä saatu tutkimusaineisto kattaa suhteellisen lyhyen ajanjakson. Saadut tulokset osoittavat kuitenkin, että vajoveden laatua seuraamalla saadaan tärkeää tietoa ympäristön tilasta.

KIRJALLISUUS

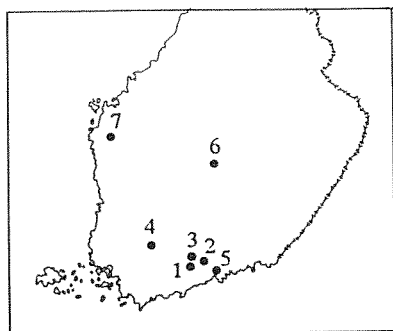
- Anon 1969. Juoma- ja talousveden tutkimusmenetelmät. Elintarviketutkijain Seura r.y. Helsinki.
- Anon 1980. Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. Am. Publ. Heath Assoc. Washington.
- Hyyppä, J. & Penttinen, H. 1993. Soranoton vaikutus pohjaveteen. Tutkimusraportti II. Alueelliset pohjavesitutkimukset. Helsinki. Vesi- ja ympäristöhallitus. Osa A. Tutkimustulokset. 214 s. Osa B. Tutkimustulosten tarkastelu. 135 s. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja nro 329. ISBN 951-47-4692-9, ISSN 0783-3288.
- Järvinen, O., 1986. Laskeuman laatu Suomessa 1971 – 1982. Vesihallituksen monistesarja nro 408.
- Kuusinen, K., 1993. Soranoton vaikutus pohjaveteen. Tutkimusraportti IV. Mikrobin kulkeutuminen maaperässä ja pohjavedessä. Helsinki. Vesi- ja ympäristöhallitus. 65 s. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja nro 331. ISBN 951-4-4694, ISSN 0783-3288.
- Seppinen, O., 1989. Pesulieteselvitys. Julkaisematon (LIITE 1).

LIITE 1. SORAN PESULIETTEEN KOOSTUMUS

Osmo Seppinen, 1989

1. Tutkimusalueet ja näytteiden otto.

Soran pesussa syntyvän lieteen koostumuksen selvittämiseksi otettiin maanäytteitä yhteensä 34 kpl Etelä-, Länsi- ja Keski-Suomesta sijaitsevilta soranottoalueilta, joilla pestiin soraa (kuva 1).



1. Patamäki, Nurmijärvi
2. Palancenmäki, Tuusula
3. Suomies, Hyvinkää
4. Kukonharju, Jokioinen
5. Vessölandet, Porvoon mlk
6. Vesanka, Jyväskylän mlk
7. Poronkangas, Jurva

Kuva 1. Tutkimusalueet

Näytteitä otettiin Etelä-Suomesta Nurmijärveltä ja Tuusulasta (25 kpl), Hyvinkäältä (1 kpl), Jokioisista (2 kpl) ja Porvoon maalaiskunnasta (3 kpl). Vesangalta Keski-Suomesta otettiin yksi näyte ja Jurvasta Vaasan läänistä otettiin kaksi näytettä.

Maanäytteitä otettiin usealta syvyydeltä seuraavista kohteista:

- pesulietteen läjityskasoista,
- sorakuopan pohjalta, jonne oli levitetty pesulietettä
- pesulietelammikoiden pinnasta,
- sorakuopan pohjalta soranäyte (vertailunäyte),
- vertailunäyte pellolta

Maanäytteet uutettiin tislatulla vedellä ja uutoksenesteestä mitattiin pH ja sähkönjohtavuus sekä analysoitiin 17 alkuaineen ja yhdisteen pitoisuudet. Lisäksi maanäytteistä tehtiin raesuuruusanalyysit ja tutkittiin humuspitoisuudet. Muutamista maanäytteistä määritettiin mineraalikoostumus ja kokonaisrikkipitoisuudet. Kaikki analyysit tehtiin Geologian tutkimuskeskuksessa. Tutkimustulokset on esitetty taulukoissa 1-7 ja kuvissa 1-6.

Taulukko 1. Maanäytteiden raesuuruudet.

Alue	Ainestyyppi	saves% %	d50 mm
1. Nurmijärvi, Patamäki			
– pesulietteen läjityskasa	savinen hieta	15	0,03
– levitetty pesuliete	karkea hieta	5	0,07
– söra pesulietteen alla	sorainen hiekka	3	0,87
2. Tuusula, Palaneenmäki			
– levitetty pesuliete (lysimetri)	karkea hieta	1	0,10
3. Jokioinen, Kukonharju			
– pesuliete	hieta	5	0,05
4. Jurva, Poronkangas			
– pesuliete	savinen hieta	n. 10	0,03
5. Porvoon mlk, Vessölandet			
– pesuliete	karkea hieta	0	0,12
6. Jyväskylän mlk, Vesanka			
– pesuliete	hieno hieta	6	0,03

2. Tutkimusmenetelmät ja lietteen raesuuruus

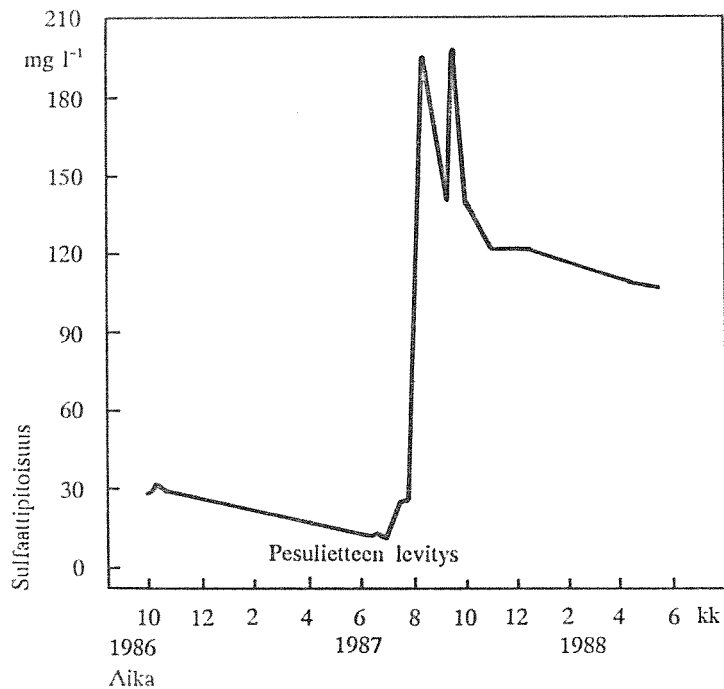
Maanäytteet otettiin näytepaikoilta litran muovipusseihin. Laboratoriossa 250 ml maa-ainesta ja sama määrä tislattua vettä uutettiin litran kannellisessa muoviasiassa. Astiassa ainekset sekoitettiin uuttamisen aikana kaksi kertaa ravistamalla (1 ja 23 tuntia uuttamisen aloittamisesta). Aines suodatettiin 0,45 µm membraanifiltterin (Versapor 450) läpi noin vuorokauden uuttamisen jälkeen.

Suodatetusta uutostesteestä otettiin 50 ml näytettä raskasmetalli- ja muuta kationianalyysiä varten. Näyte analysoitiin atomiabsorptiolaitteistolla. Kloridipitoisuudet analysoitiin titraamalla ja piihappopitoisuudet spektrofotometrisesti. pH ja sähkönjohtavuus mitattiin WTW-mittareilla. Maa-ainenäytteistä mineraalimääritykset tehtiin röntgendiffraktiomenetelmällä.

3. Tutkimustulokset ja niiden tarkastelu

3.1 Jälkihoitolysimetri Tuusulassa

Tuusulan Palaneenmäen tutkimusalucella levitettiin vuonna 1987 heinäkuun alussa kahden lysimetrin pintakerrokseksi soranpesulietettä (noin 20 cm), joka otettiin Oy Lohja Ab:n Nukarin (Patamäki) sorakuopasta lietealtaan viereisestä läjityskasasta läheltä sen pintaa. Lietteestä veteen liuenneiden aineiden pitoisuuksien kasvua ilmeni aineesta riippuen 1–2 kk:n kuluttua lietteen levityksestä. Selvästi nousivat ainakin kalsium-, magnesium-, natrium-, kalium-, bikarbonaatti- ja sulfaattipitoisuudet (kuva 2) sekä sähkönjohtavuus. Ajoittaista kohoamista oli myös rauta-, mangaani-, kupari-, nikkeli- ja kobolttipitoisuuksissa. Alumiinipitoisuuksissa oli muutama varsin korkea arvo ja keskimääräinen pitoisuus oli noussut jonkin verran.



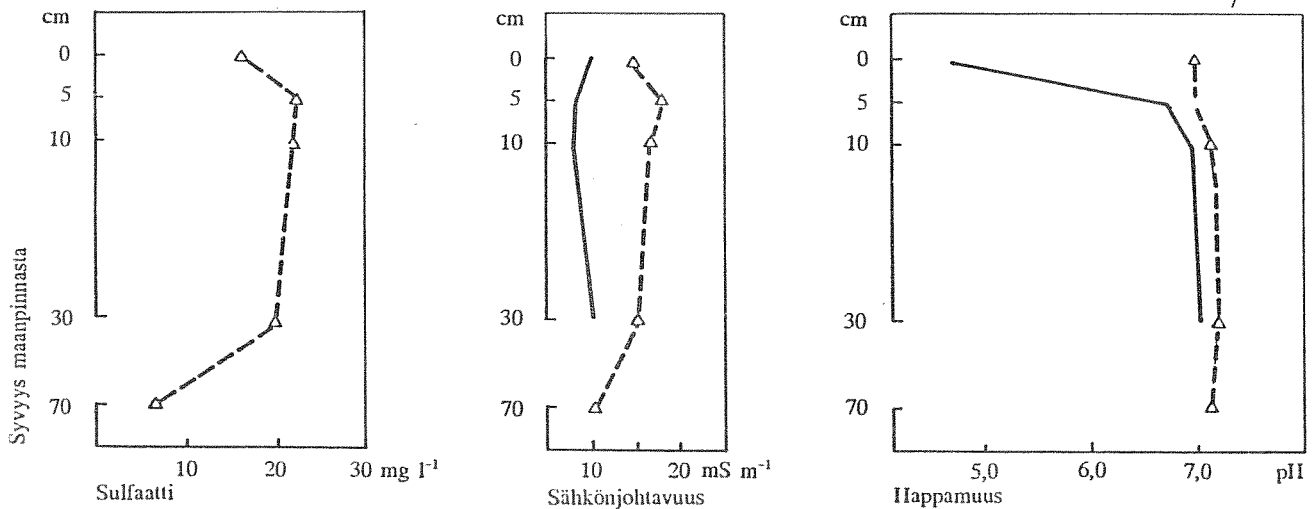
Kuva 2. Sulfaattipitoisuus mg/l jälkihoitolysimetrissä, jonka pintakerros on rakennettu soranpesussa syntyneestä lietteestä (Sandborg 1992).

3.2 Uutostuloksia sorakuoppaan levitetystä pesulietteestä

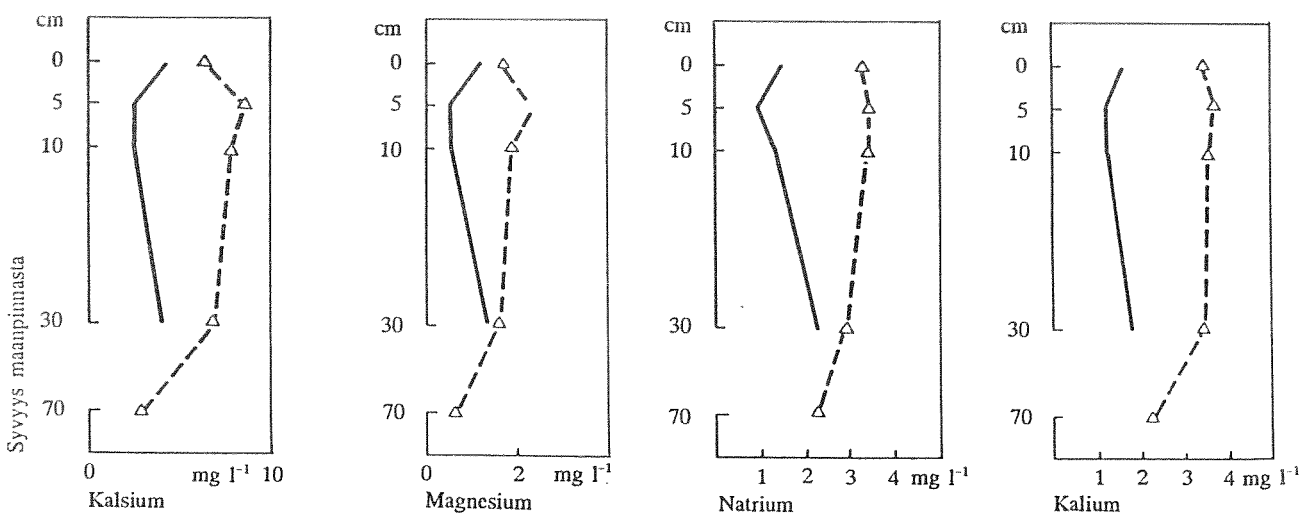
Näytteitä levitetystä pesulietteestä otettiin kahdesta paikkaa Patamäeltä (viideltä eri syvyydeltä) sekä yksi näyte lysimetrien pinnalle levitetystä pesulietteestä. Patamäen pesulietteen uutostuloksissa kalsium-, magne-sium-, natrium- ja kaliumpitoisuudet olivat noin 2–3 kertaiset verrattuna soranäytteiden vastaaviin pitoisuuksiin. Lysimetrikentän

näytteiden uutosnesteiden Ca-, Mg- ja K-pitoisuudet olivat korkeampia kuin Patamäen levitetyn pesulietteen vastaavat pitoisuudet. Patamäen levitetyn pesulietteen sulfaattipitoisuudet vaihtelivat 11 mg/l ja 30 mg/l välillä kun taas lysimetrikentän pesulietteen uutosnesteiden sulfaattipitoisuus oli 48 mg/l.

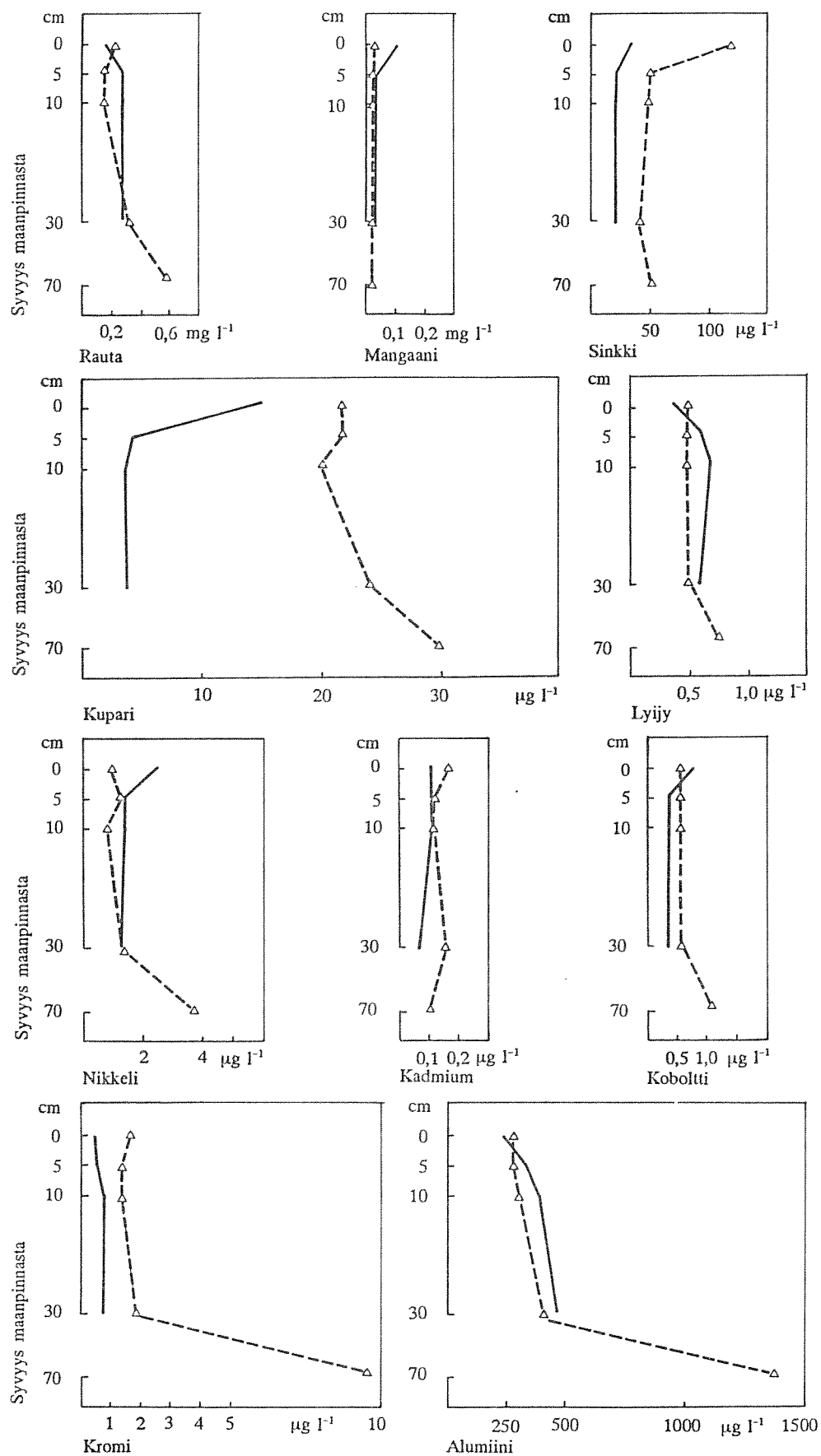
Patamäellä pesulietekerroksen alapuolisessa sorassa tiettyjen metallien uutospitoisuudet kasvoivat huomattavan suuriksi. Näitä metalleja ovat rauta, alumiini, kromi ja nikkeli sekä vähäisemmässä määrin myös kupari, sinkki ja koboltti. Cr^{3+} , Fe^{3+} ja Al^{3+} -ionit muistuttavat geokemiallisesti toisiaan.



Kuva 3. Uutosnesteiden sulfaattipitoisuus-, sähkönjohtavuus- ja pH-arvoja sorakuopan pohjalta sorasta (yhtenäinen viiva) ja alueelta, jonne on levitetty soran päälle pesulietettä (katkoviiva). Patamäen pohjavesialue Nurmijärvellä.



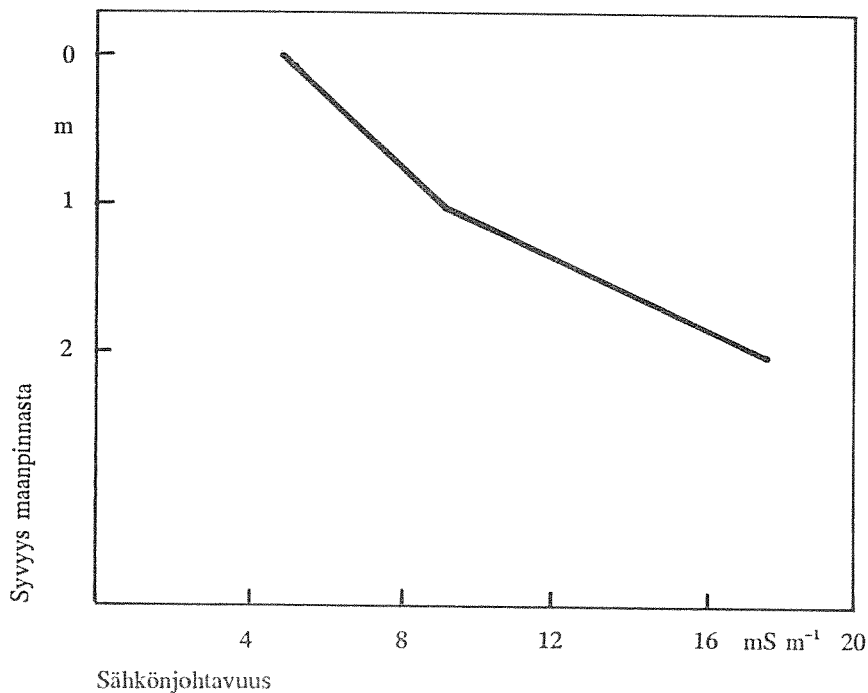
Kuva 4. Uutosnesteiden kalsium-, magnesium-, natrium- ja kaliumpitoisuuksia sorakuopan pohjalta sorasta (yhtenäinen viiva) ja alueelta, jonne on levitetty soran päälle pesulietettä (katkoviiva). Patamäen pohjavesialue Nurmijärvellä.



Kuva 5. Uutosnesteen eräiden raskametallien pitoisuuksia sorakuopan pohjalta sorasta (yhtenäinen viiva) ja alueelta, jonne on levitetty soran päälle pesulietettä (katkoviiva).

3.3 Uutostuloksia pesulietteen läjityskasoista

Maanäytteitä otettiin pesulietteen läjityskasoista neljästä eri paikasta, joista Vessölandetin tulokset poikkeavat muista pesussa käytettävän meriveden takia. Läjityskasojen pintaosista on liuennut runsaasti suoloja syvempiin kerroksiin, joten useiden alkuaineiden pitoisuudet kohoavat voimakkaasti läjityskasan pohjaosiin päin.



Kuva 6. Uutosnesteiden sähkönjohtavuudet läjityskasan eri syvyyksillä. Patamäen pohjavesialue Nurmijärvellä.

Läjityskasojen pintaosista syvemmelle olivat merkittävästi liuenneet SO_4^- , Ca^- , Mg^- , Na^- ja K^- ionit. Raskasmetallien korkeimmat uutospitoisuudet tavattiin sen sijaan läjityskasojen pintanäytteistä.

Kolmesta maanäytteestä analysoitiin mineraalit ja kokonaisrikkipitoisuus, jotta saataisiin selville sisältääkö Patamäen kiviaines runsaasti rikkiä sisältäviä mineraaleja. Sekä mineraali- että kiviaines- että kokonaisrikkipitoisuusmääritykset osoittivat että kiviaines sisältää merkittäviä määriä rikkiä sisältäviä mineraaleja.

Pesulietteessä on todennäköisesti mineraaliaineksen pinnassa ja huokosvedessä aineksia, jotka liukenevat uutoksissa käytettyyn tislattuun veteen ja lysimetreissä sadeveteen. Lietekasoissa on tapahtunut uutumista pinnasta alaspäin ja levitetystä lietteestä sen alapuolelle olevaan sora-ainekseen. Määrät ovat merkittäviä sulfaatin ja alumiinin

osalta. Nämä ionit saattavat kulkeutuessaan pohjaveteen saakka ylittää talousvedelle sallitut pitoisuudet. Ajan kuluessa sadeveden uuttaessa pesulietettä liuenneiden aineiden pitoisuudet pyrkivät laskemaan. Uutuskokeiden tulokset on esitetty taulukoissa 3–7.

Taulukko 2. Maanäytteiden kokonaisrikkipitoisuuksia

Maanäyte	S%
Palaneenmäen pesulietenäyte (lysimetrin pinta)	0,01
Patamäen soran seasta hienoainesta	< 0,01
Patamäen harjun hietalinssin hietaa	< 0,01

Taulukko 3. Juomaveden suositusraajat ja maanäytteiden, uutosnesteen sekä pesulietelammikon vaikutuspiirissä olevan pohjaveden maksimi ja minimipitoisuuksia.

	1	O	A	B	C	2
pH	6,5–8,8	4,7–7,0	5,9–6,9	6,7–7,0	6,8–7,2	6,4
v_{25} mS/m		2,9–5,0	20–24	49–177	8,5–14	9,0
Cl mg/l	100	1,0–2,2	17–26			7,5
SiO ₂ mg/l		7,9–8,6	12–14			13,5
SO ₄ mg/l			19–35	9,1–78	11–30	7,2
Ca mg/l		2,4–4,3	16–23	2,9–13	5,4–11	8,1
Mg mg/l		0,59–1,3	4,4–5,1	1,0–7,2	1,5–2,8	3,2
Na mg/l		0,9–2,1	7,5–14	1,9–8,1	2,4–4,0	
K mg/l		1,3–1,8	1,8–2,1	1,9–3,3	2,9–4,4	
Fe mg/l	0,2	0,16–0,26	<0,5	0,14–0,58	0,12–0,25	0,11
Mn mg/l	0,1	0,02–0,1	<0,02–0,05	<0,02–0,02	<0,02–0,02	0,05
Cu µg/l	300	3,5–15	0,9–2,7	21–42	17–24	
Ni µg/l	50	1,2–2,5	0,5–1,8	0,6–2,5	0,7–1,4	
Pb µg/l	50	<0,5–0,6	<0,5–0,6	<0,5–1,5	<0,5	
Cr µg/l	50	<0,5–0,7	<0,5–0,5	<0,5–1,2	0,8–1,9	
Co µg/l		<0,5–0,7	<0,5	<0,5	<0,5	
Al µg/l	200		6,0–28	150–560	230–320	

1 = Talousveden terveydelliset laatuvaatimukset ja -tavoitteet (Lääkintöhallitus 1990)

O = Patamäen soranäytteen uutosnesteen minimi- ja maksimiarvot

A = Patamäen kuilukaivon minimi ja maksimiarvot (Hyypä ja Penttinen 1992)

B = Patamäen pesulietteen uutosnesteen minimi- ja maksimiarvot

C = Patamäen levitetyn pesulietteen minimi- ja maksimiarvot

2 = Harjualueiden pohjavesiesiintymien veden laatu (med.n > 300) (Vesihallitus 1982)

Taulukko 4. Maanäytteiden analyysitulokset pesulietteen läjituskasasta

Näytteenottopaikka		v_{25} mS/m	pH	SO ₄ mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l		
Patamäki	pinta	4,9	6,7	9,1	2,9	0,96	1,9	1,9	0,58	0,02		
	1 m	9,3	7,0	24	6,4	2,6	5,5	2,8	0,35	<0,02		
	2 m	17,7	6,8	78	13	7,2	8,1	3,3	0,14	<0,02		
Kukonharju	pinta	4,7	6,8	6,8	2,6	0,75	3,4	3,0	1,1	0,04		
	1 m	11,7	7,1	24	9,4	3,4	7,0	4,2	0,38	0,03		
Porokangas	pinta	3,1	6,7	7,8	1,1	0,40	2,7	1,2	0,06	0,02		
	1 m	5,0	6,4	13	1,8	0,75	3,8	1,6	0,08	0,14		
Vessölandet	pinta	7,2	7,5	6,9	0,5	0,07	15	1,0	0,46	0,02		
	1 m	99,6	6,7	65	5,5	5,3	180	8,6	0,15	0,08		
	2 m	90,8	6,3	47	5,5	5,4	160	8,7	0,12	0,11		

		Zn µg/l	Cu µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Cd µg/l	Cr µg/l	Co µg/l	Al µg/l	Sa %	Si %	d50
Patamäki	pinta	140	42	2,5	1,5	0,1	1,2	<0,5	560	12	55	0,055
	1 m	50	21	0,8	<0,5	<0,1	0,8	<0,5	320	18	67	0,027
	2 m	30	21	0,6	<0,5	<0,1	<0,5	<0,5	150	16	68	0,030
Kukonharju	pinta	40	49	1,2	1,3	<0,1	1,2	1,4	820	5	56	0,053
	1 m	40	31	0,7	0,6	0,1	1,2	<0,5	280	7	59	0,048
Porokangas	pinta	20	19	0,7	<0,5	<0,1	<0,5	<0,5	21	3	50	0,059
	1 m	20	23	2,5	<0,5	0,1	<0,5	2,0	29	11	78	0,025
Vessölandet	pinta	20	14	1,0	0,9	<0,1	0,5	<0,5	440	0	25	0,104
	1 m	40	10	1,2	<0,5	<0,1	<0,5	0,6	130	0	22	0,128
	2 m	30	7,2	1,1	<0,5	<0,1	<0,5	<0,5	130	0	20	0,124

Taulukko 5. Maanäytteiden analyysitulokset sorakuopan pohjalta, minne on levitetty pesulietettä.

Näytteenottoaika		Analyysit										
		v_{25} mS/m	pH	SO ₄ mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l		
Patamäki	1. pinta	8,5	6,9	11	5,8	1,5	2,7	2,9	0,25	0,02		
	5 cm	8,5	6,8	14	5,7	1,8	2,4	2,9	0,17	<0,02		
	10 cm	8,2	7,1	12	5,4	1,7	2,4	2,9	0,22	<0,02		
	30 cm	11,8	7,2	23	9,3	2,4	2,7	3,7	0,19	<0,02		
	70 cm	4,2	7,1	6,2	2,2	0,48	2,2	2,0	0,73	<0,02		
Patamäki	2. pinta	10,4	7,0	20	7,6	2,0	3,5	3,7	0,15	<0,02		
	5 cm	14,4	7,1	30	11	2,8	4,3	4,4	0,16	<0,02		
	10 cm	12,7	7,1	29	9,4	2,2	4,0	4,1	0,12	<0,02		
	30 cm	7,7	7,1	16	4,7	1,1	2,9	3,1	0,29	<0,02		
	70 cm	5,0	7,2	7,3	2,9	0,60	2,2	2,4	0,43	<0,02		
		Zn µg/l	Cu µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Cd µg/l	Cr µg/l	Co µg/l	Al µg/l	Sa %	Si %	d50
Patamäki	1. pinta	190	24	1,0	<0,5	0,2	1,9	<0,5	270	6	39	0,076
	5 cm	80	23	1,4	<0,5	<0,1	0,9	<0,5	270	4	36	0,080
	10 cm	80	23	0,9	<0,5	<0,1	1,3	<0,5	320	7	41	0,073
	30 cm	40	20	1,1	<0,5	0,1	1,4	<0,5	250	1	33	0,083
	70 cm	70	36	5,7	1,0	0,1	4,0	1,3	2200	5	19	0,734
Patamäki	2. pinta	40	22	0,8	<0,5	<0,1	1,0	<0,5	260	4	43	0,069
	5 cm	20	20	0,9	<0,5	<0,1	1,3	<0,5	250	5	46	0,066
	10 cm	20	17	0,7	<0,5	<0,1	0,8	<0,5	230	5	44	0,069
	30 cm	40	28	1,3	<0,5	0,2	2,3	<0,5	350	3	18	0,863
	70 cm	30	24	1,6	0,5	<0,1	15	0,7	560	3	16	0,879

Taulukko 6. Maanäytteiden analyysitulokset pesulietelammikoiden pinnalta otettaista näytteistä.

Näytteenottoaikka		Analyysit									
		v_{25} mS/m	pH	SO ₄ mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	
Patamäki	pinta	4,3	6,9	5,7	3,8	0,93	1,3	2,5	0,34	0,02	
Suomies	pinta	10,4	7,0	20	9,1	1,5	4,7	6,3	<0,05	0,05	
Vesanka	pinta	7,2	7,5		0,9	0,20	3,4	2,3	0,43	0,02	

		Zn	Cu	Ni	Pb	Cd	Cr	Co	Al	Sa	Si	d50
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	%	%		
Patamäki	pinta	20	20	1,2	<0,5	<0,1	0,5	<0,5	360	1	72	0,041
Suomies	pinta	<20	9,0	0,8	0,5	0,1	<0,5	<0,5	62			
Vesanka	pinta	30	30	0,8	0,5	0,2	0,7	<0,5	360	6	78	0,033

Taulukko 7. Vertailunäytteiden analyysitulokset

Näytteenottoaikka		Analyysit										
		$\sqrt{25}$ mS/m	pH	SO4 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l		
Salmela peltonäytteet	pinta	58,1	7,3	28	58	12	11	30	3,0	7,0		
	5 cm	45,5	6,2	9,5	49	9,2	11	21	13	7,8		
	10 cm	20,1	6,9	9,5	15	2,6	12	5,4	2,6	2,4		
	30 cm	10,4	7,3	18	2,1	0,31	14	1,2	0,76	0,13		
Palaneenmäki, pesuliete 0–10 cm (lysimetri)		14	6,4	48	16	3,5	2,2	3,6	0,12	0,10		
Patamäki, sora, jossa hienoainesta		8,1	6,7	17	6,2	1,2	5,8	25	<0,05	0,03		
Patamäki, hieta		2,5	6,5	4,8	1,6	0,40	1,9	1,1	<0,05	0,04		
		Zn µg/l	Cu µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Cd µg/l	Cr µg/l	Co µg/l	Al µg/l	Sa %	Si %	d50
Salmela peltonäytteet	pinta	120	25	3,4	0,5	0,4	2,9	37	390	18	62	0,030
	5 cm	390	37	7,7	0,6	0,4	4,9	49	240	16	58	0,039
	10 cm	110	35	4,1	0,6	0,8	1,8	15	300	15	54	0,052
	30 cm	60	29	1,4	0,6	0,2	1,4	1,1	80	16	58	0,041
Palaneenmäki, pesuliete 0–10 cm (lysimetri)		130	26	2,7	<0,5	0,2	<0,5	<0,5	130	0,6	25	0,10
Patamäki, sora, jossa hienoainesta		100	15	1,2	<0,5	0,1	<0,5	<0,5	200	0,5	13	1,9
Patamäki, hieta		180	30	1,8	<0,5	0,2	<0,5	<0,5	42	0,2	29	0,089



