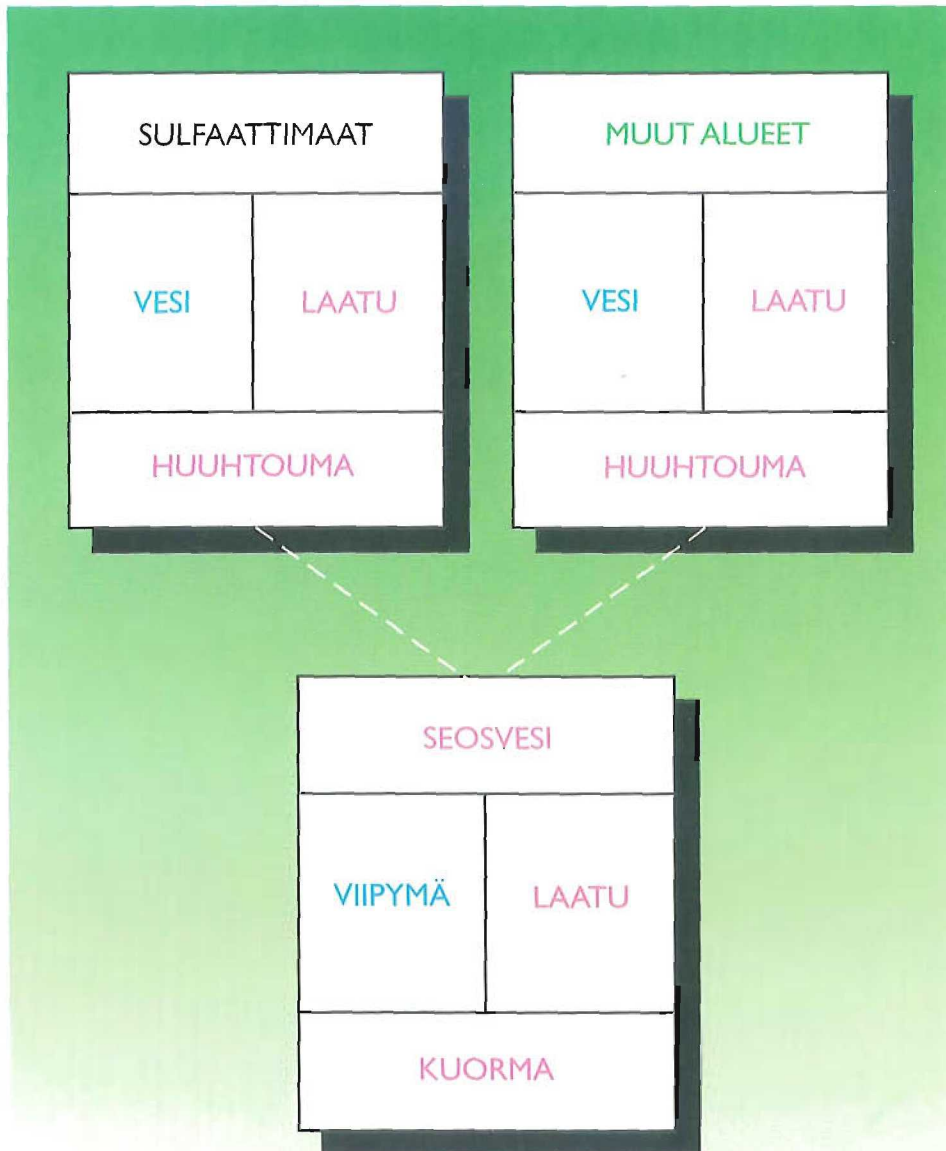


**LUONTO JA
LUONNONVARAT**

Reijo Hutka, Timo Laitinen, Maria Holmberg,
Markku Maunula ja Titta Schultz

Happamien sulfaattimaiden ionivirtausmalli (HAPSU)



Reijo Hutka, Timo Laitinen, Maria Holmberg,
Markku Maunula ja Titta Schultz

Happamien
sulfaattimaiden
ionivirtausmalli
(HAPSU)

HELSINKI 1996

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS

ISSN 1238-7312
ISBN 952-11-0018-4

Painopaikka Oy Edita Ab
Helsinki 1996

Sisällys

1 Johdanto	5
2 Happamat sulfaattimaat	6
3 Malli	11
3.1 Yleiskuvaus	11
3.2 Sulfaattimaa-alue	15
3.2.1 Sade ja lumi	15
3.2.2 Haihdunta	18
3.2.3 Painannesäilyntävarasto, rakoilu ja imeytyminen	20
3.2.4 Maaveden virtaus	23
3.2.5 Maaperän lämpötila, jäätyminen ja sulaminen	25
3.2.6 Jäätyneen ja sulamisen vaikutus veden laatuun	26
3.2.7 Hapen kulkeutuminen	27
3.2.8 Hiilidioksidin muodostuminen ja kulkeutuminen	28
3.2.9 Hapettuminen ja rapautuminen	30
3.2.10 Liuenneiden aineiden kulkeutuminen	31
3.2.11 Maaveden reaktiotasapaino	32
3.2.12 Kuivatusojiin tulevien vesien laatu ja ainevirtaamat	33
3.2.13 Padotus	34
3.2.14 Pellon kalkitus	34
3.3 Sivuvallama-alue	36
3.3.1 Sade ja lumi	36
3.3.2 Haihdunta	36
3.3.3 Valunta	36
3.3.4 Veden laatu ja ainevirtaamat	39
3.4 Seosvesi	39
3.4.1 Kulkeutuminen	39
3.4.2 Sekoittuminen, reaktiotasapaino ja ainevirtaamat	39
3.4.3 Kalkitus	40
3.5 Numeeriset ratkaisumenetelmät	40
3.5.1 Virtaus ja kulkeutuminen maaperässä	40
3.5.2 Kemiallinen reaktiotasapaino	41
4 Kalibrointi	42
4.1 Pajuluoma	42
4.1.1 Havaintoaineisto	42
4.1.2 Menetelmä	44
4.1.3 Tulokset	55
4.2 Haapajyrä	64
4.2.1 Havaintoaineisto	64
4.2.2 Menetelmä	64
4.2.3 Tulokset	72
4.3 Mallin toimivuus	76
4.4 Mallin herkkyys	79
5 Sovellutukset	81
5.1 Tarkoitus	81
5.2 Pitkän ajan simulointi	81
5.3 Padotus	82

5.4	Kalkitus peltoon	87
5.5	Kalkitus seosveteen	87
6	<i>Mallin soveltaminen ja kehittäminen</i>	94
	Yhteenveto	95
	Kirjallisuus	98
	Osa II käyttöohjeet	101
	Kuvailulehdet	151

Johdanto



Tämä on Oy Vesi-Hydro Ab:ssä Vesi- ja ympäristöhallitukselle laadittu HAPSU-projektin loppuraportti. HAPSU-projekti on käsitellyt happamien sulfaattimaiden ionivirtauksien mallintamista. Konsultin tehtävänä on ollut kehittää malli, jolla voidaan laskea happamia sulfaattimaita sisältävältä valuma-alueelta huuhtoutuvia ainevirtaamia. Tässä raportissa osassa I on esitetty HAPSU-mallin yleiskuvaus ja sen kalibrointi ja sovellutuslaskennat. Osassa II on HAPSU-mallin käyttöohjeet.

Kohdassa 2 luodaan lyhyt yleiskuvaus happamiin sulfaattimaihin. Se sisältää mm. happamien sulfaattimaa-alueiden määritelmän, ominaisuudet ja koostumuksen. Lisäksi käsitellään happaman valuman syntyä, happamuuskuormaa ja happamuushaittojen torjuntaa, sekä happamille sulfaattimaille kehitettyjä malleja.

Kohdassa 3 kuvataan happamien maiden kationinvaihtoa kuvaava malli. Kohdassa 3.1 esitetään mallin yleiskuvaus. Alakohdissa malli jakaantuu kolmeen osaan: sulfaattimaa-alueeseen, sivuvaluma-alueeseen ja seosveteen. Näiden alakohdissa puolestaan esitetään kunkin mallin osan jakautumista edelleen pienempiin osiin. Kohdassa 3.5 käsitellään käytettyjä numeerisia ratkaisumenetelmiä.

Kohdassa 4 esitetään mallin parametrien kalibrointimenetelmä ja kalibrointitulokset. Kalibroinnissa tarvittavia ilmasto-, maaperä-, valunta- ja vedenlaatuhavainnot on ollut käytettävissä kahdelta alueelta, jotka ovat Pajuluoma ja Haapajyrä. Virtaamamallin kalibrointi on suoritettu molemmille alueille erikseen. Vedenlaatumallin kalibrointi on tehty Pajuluomalle ja käytetty sieltä saatuja arvoja myös Haapajyrällä. Kohdassa 4.3 on tarkasteltu mallin toimivuutta ja kohdassa 4.4 mallin herkkyyttä.

Kohdassa 5 käydään läpi mallin soveltuvuuden testaamiseksi tehdyt laskennat ja niiden tulokset. Laskentoja ovat pitkän ajan simulointi, pohjaveden padoitus, kalkitus peltoon ja kalkitus seosveteen. Laskennat on tehty lähinnä Pajuluoman alueelle.

Kohdassa 6 arvioidaan mallin jatkokehitystarvetta.

2

Happamat sulfaattimaat

Määritelmä

Suomessa happamiksi sulfaattimaiksi on luettu alueet, joilla hapettuneen kerroksen maanäytteen pH on alle 5,0 ja/tai sulfaattirikkipitoisuus ylittää 100 mg/l maata (Erviö 1975). On esitetty myös, että happamat sulfaattimaat ovat maita, joiden maaprofiilin pH-jakaumassa on selvästi havaittavissa keskikerroksen pH-minimikohta (< 5,0) ja pH:n systemaattinen suureneminen syvempiä pelkistyneitä kerroksia kohti (Puustinen ym. 1994).

Sijainti ja maankäyttömuodot

Suomen happamat sulfaattimaat sijaitsevat Pohjanlahden rannikon alavilla mailla, jossa Litorinameren aikana muodostuneet sedimentit ovat tehokkaassa hapettumisvaiheessa. Litorinameren raja kulkee 30 m mpy Etelä-Suomessa ja 90 m mpy Pohjois-Suomessa. Turun ja Porin sekä Suomen etelärannikon Litorinamerialueella sijaitsevat vanhat peltoalueet ovat pääosin hyvin huuhtoutuneita ja menettäneet happamuuspotentiaalinsa. Osasyynä tähän on se, että peltomaa on alueella tiivistä ja happamuutta aiheuttavan monosulfidin hapettuminen on sen seurauksena hidasta.

Maankäyttömuodoista happamilla sulfaattimailla tunnetaan parhaiten peltojen määrä, koska happaman valuman synnyssä peltojen osuutta on pidetty merkittävänä ja maaperän happamuus on ollut ongelma kasvinviljelyn kannalta. Sen sijaan happamilla sulfaattimailla sijaitsevien soiden ja metsien määrä ja niiden merkitys happaman valuman synnyssä on huonosti tunnettu.

Koko Suomessa on arvioitu olevan 336 000 ha happamilla sulfaattimailla sijaitsevia peltoja (Puustinen ym. 1994). Kyrönjoen valuma-alueella on happamia sulfaattimaita arvioitu olevan n. 50000 ha (Rantala 1991).

Kuivatustila

Happamien sulfaattimaiden kuivatustilaa pidetään yhtenä merkittävänä happaman valuman laatuun ja määrään vaikuttavista tekijöistä. Paikalliskuivatuksen tehostuminen avo-ojituksen tai salaojituksen vaikutuksesta lisää happamuuden vapautumista. Kuivatusojien välittömässä läheisyydessä kuivatus tehostuu, jolloin rikkiyhdisteet luovuttavat happamuutensa. Myös perkausmassojen hapettumisen seurauksena vapautuu happamuutta, ellei massoja kalkita.

Ominaisuudet

Happamille sulfaattimaille on tyypillistä korkea orgaanisen aineksen pitoisuus, suuri elektrolyyttien määrä, runsas rikin määrä ja alhainen pH hapettuneissa kerroksissa. Sisältämänsä suuren orgaanisen aineen määrän vuoksi nämä maat kuuluvat usein liejuihin tai liejuihin maalajiryhmiin ja niistä käytetään nimitystä urpamaa tai ryynisavi.

Urpamaille ja ryynisaville on ominaista mururakenne ja pysyvien kuivumishalkeamien syntyminen. Halkeilleet urpasavimaat vastaavat vedenläpäisevyydeltään soraa ja siksi niillä käytetään huomattavasti harvempaa salaojitusta kuin muilla vastaavan lajitekoostumuksen omaavilla mailla.

Tehokkaan kasvintuotannon harjoittaminen happamilla sulfaattimaille edellyttää maan vesitalouden toimivaa järjestämistä, kunnollista muokkausta ja kalkitusta. Lisäksi viljelykasveiksi on valittava happamuutta sietäviä lajeja ja lajikkeita. Happamuuden haitat kasvien kasvulle johtuvat monista tekijöistä, joiden merkitys eri maalajeilla vaihtelee. Tämän takia kasvit sietävät eri maalajien happamuutta eri tavoin.

Kemiallinen koostumus

Happamissa sulfaattimaissa esiintyviä alkuaineita ovat mm. rikki, alumiini, rauta ja mangaani. Maan kemiallinen koostumus riippuu siitä, millä korkeudella maat sijaitsevat. Tasankojen litorinasavissa on korkean sulfidi- ja sulfaattipitoisuuden lisäksi korkea rautapitoisuus.

Rikin esiintymismuodoista ovat pysyviä pelkistynein ja hapettunein muoto, sulfidi ja sulfaatti. Aerobisissa oloissa sulfaattirikillä on hallitseva osuus, sen sijaan syvempien maakerrosten hapettomissa oloissa rikistä noin kolmasosa on sulfidimuodossa ja noin viidesosa alkuainerikkinä.

Alumiini on maaperän yleisimpiä aineita ja on neutraalissa tai lievästi happamassa maassa huonosti liukenevassa muodossa. Alumiinin hapetusaste kemiallisissa yhdisteissä on aina +3. Alumiinin vahvojen happojen kanssa muodostamat suolat ovat fosfaattia lukuunottamatta vesiliukoisia.

Rauta esiintyy kemiallisissa yhdisteissä hapetusasteella +2 (ferro) ja +3 (ferri), joista molemmat ovat ioneina happamissa olosuhteissa ja hydroksideina alkaalisissa olosuhteissa. Molemmat rautatyypit muodostavat lukuisia yhdisteitä. Ferrisuolat voivat muodostua mm. ferriyhdisteistä pelkistymällä. Ferriyhdisteitä voi muodostua puolestaan ferroyhdisteistä hapettumalla. Aerobisissa olosuhteissa pH:n ollessa yli 3 ferrirauta hapettuu ferriraudaksi pääasiassa mikrobiologisesti. Emäksisissä olosuhteissa ferrirauta saostuu lähes täydellisesti ferrihydroksidina.

Hapan valuma

Pohjaveden pinnan laskun seurauksena rikkipitoiset litorinasedimentit joutuvat ilmakehän hapen kanssa kosketuksiin, jolloin rautasulfidit hapettuvat. Hapettumisen ensimmäisenä välituotteena on alkuainerikki, joka hapettuu edelleen sulfaattirikiksi. Ensimmäistä vaihetta pidetään puhtaasti kemiallisena reaktiona. Se edistyy sitä nopeammin, mitä enemmän happea on käytettävissä. Toinen vaihe on puolestaan pääasiassa mikrobiologinen.

Vaikka happamuutta ja sulfaattia muodostuu samassa reaktiossa, sulfaatti ei aiheuta valumaveden happamuutta. Valumaveden happamuuden aiheuttavat happamasti reagoivat kationit (Fe, Al, H). Sulfaatin suuri pitoisuus liittyy usein happamien kationien runsaaseen esiintymiseen. Vesistöön tullut sulfaattimäärä kuvastaa hapettuneen rautasulfidin määrää, mutta happamuuden määrä riippuu siitä, minkä kationin kanssa sulfaatti on huuhtoutunut. Happaman valuman syntyyn vaikuttavat maaperäprosessit on esitetty kuvassa 1.

Maan puskurireaktiot

Kun maahan tulee runsaasti vetyioneja, alkavat reaktiot, jotka pyrkivät estämään pH:n laskun. Näitä reaktioita ovat maanesteessä olevien emäksisten aineiden neutraloiva vaikutus, kationinvaihtoreaktiot, karbonaattien liukeneminen ja mineraalien vapautuminen.

Maanesteen H^+ -konsentraatio pienenee kationinvaihtoreaktioiden takia. Maan vaihtuvat kationit ovat positiivisesti varautuneita metalli-ioneita kiinnittyneinä maahiukkasten runkoaineeksi negatiivisesti varattuihin osiin. Vaihtuvat pääkationit ovat Ca, Mg, K, H, Al ja Fe. Vaihtuvat kationit pyrkivät tasapainotilaan maanesteessä olevien kationien kanssa. Vaihdon seurauksena maahan tulee lisää vetyioneja ja vastaava metalli-ionimäärä siirtyy liukostilaan ja mahdollisesti huuhtoutuu maasta valumaveden mukana.

Happamuuskuorma

Happamilta sulfaattimailta tulevalla happamuuskuormalla ei ole yksikäsitteistä määritelmää. Pelkkä pH ei kuvaa riittävästi oleellisia tekijöitä kuorman vaikutuksia tarkasteltaessa. Merkittävimmät vaikutukset syntyvät todennäköisimmin juuri pH:n laskusta seuraavasta haitallisten aineiden liukenemisestä.

Happamat sulfaattimaat voivat esiintyä joko potentiaalisina tai todellisina. Potentiaaliset happamat sulfaattimaat eivät ole happamia, mutta voivat muuttua sellaisiksi. Maan potentiaalisen happamuuden määrittämiseksi on tunnettava mm. rikin määrä ja olomuoto maassa. Esimerkiksi orgaanisen rikin osuus saattaa runsaimmin rikkiä sisältävissä kerroksissa olla puolet kokonaisrikistä. Orgaaninen rikki on huomattavissa osin savekseen sitoutuneina komplekseina eikä hapetu helposti.

Happamuuden torjunta

Happamien sulfaattimaiden happamuushaittoja on pyritty torjumaan kuivatuksen jaksottamisella, maan neutraloinnilla ja valumavesien neutraloinnilla. Kuivatus voidaan jaksottaa mm. toteuttamalla valuma-alueen peruskuivatus tai salaojitus useassa vaiheessa osa-alue kerrallaan, kaivamalla tai syventämällä ojat kahdessa vaiheessa ja padottamalla kuivatusojien vedenpinta (säätosalaojitus).

Muokkauskerroksen neutraloinnilla on pyritty lähinnä vähentämään maan happamuutta viljeltävän kasvin kannalta optimitasolle. Maaperän kalkitseminen on osoittautunut suhteellisen tehottomaksi happaman huuhtouman ehkäisyssä, koska maaperään levitetyn kalkin vaikutusta ei voida tehokkaasti kohdentaa suoraan kriittisenä aikana mobilisoituvan happamuuden neutraloimiseen. Voima-

kaskin kalkitus vaikuttaa muokkauskerroksen alapuolisissa kerroksissa vain vähän.

Valumavesien kalkitsemisella ja vesistöalkituksella verrattuna maan neutralointiin on se etu, että neutralointi voidaan kohdistaa suoraan kriittiselle ajalle ja kriittiseen paikkaan. Ongelmana on mm. se, että kalkitusta joudutaan jatkamaan pitkään. Valumaveden suora neutralointi edellyttää suuria kalkkimääriä. Uutena lupaavana keinona tutkitaan kalkkisuotimen käyttöä salaojituksessa.

Happamien sulfaattimaiden malleista

Happamien sulfaattimaiden ympäristövaikutuksia on mallinnettu vasta 1990-luvulla. Julkaistujen mallien lähtökohdat ja ratkaisutavat vaihtelevat staattisesta valuma-alueiden luokittelusta dynaamisiin, prosesseja kuvaaviin malleihin. Happamilla sulfaattimailla vesien laatu määrytyy pitkälti rikkisedimenttien hapettumisesta, joten on olennaista, että malli pystyy kuvaamaan hapen ja veden liikettä maaperässä. Ilma-peräisen happamoitumisen kuvaavissa malleissa (esim. Cosby ym. 1985, de Vries ym. 1989) on voitu tyytyä yksinkertaisiin valuntakuvauksiin. Muut maaperäprosessit, kuten kationinvaihto ja rapautuminen, voidaan happamilla sulfaattimailla kuvata samalla tavalla kuin ilma-peräisen happamoitumisen malleissa.

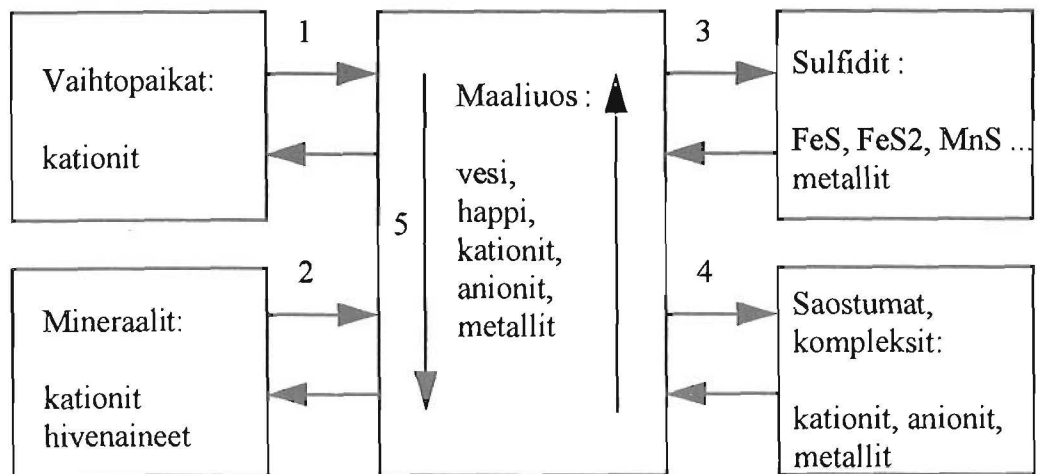
SMASS-malli laskee veden, hapen ja liuosten kulkeutumista maapatsaassa (Bronswijk ym. 1992). Malli sisältää pyriitin hapettumisen, raudan pelkistymisen, mineraalien rapautumisen, kationinvaihdon ja ionien assosioitumisen. Näiden prosessien vaikutuksesta malli laskee maaliuoksen H^+ -, Na^+ -, K^+ -, Ca^{2+} -, Mg^{2+} -, Fe^{2+} , Al^{3+} -, SO_4^{2-} -, HCO_3^- -, Cl^- - ja e^- -pitoisuuksien vaihtelut. Mallin tuloksia on verrattu laboratoriokokeisiin indonesialaisilla ja hollantilaisilla maapatsailla sekä havaintoihin indonesialaisilta valuma-alueilta.

Ruotsalais-vietnamilaisena yhteistyönä on kehitetty malli (Eriksson 1992). Siinä simuloidaan kyllästynyttä ja kyllästymätöntä veden virtausta sekä sulfaatin adsorption ja ioninvaihdon vaikutuksia maaliuoksen SO_4^{2-} -, Al^{3+} - ja emäskationipitoisuuksiin. Tätä mallia on testattu vertaamalla tuloksia laboratoriokokeisiin vietnamilaisilla maapatsailla.

Palko ja Wepping (1994) ovat kehittäneet staattisen ja dynaamisen "black-box"-mallin happamia sulfaattimaa-alueita sisältävien valuma-alueiden vedenlaadun kuvaamiseksi. Mallit kuvaavat pohjavedenpinnan laskun vaikutuksen rikkisedimenttien hapettumiseen ja happamuuden huuhtoutumiseen. Staattinen malli laskee kevyt- ja syystulvien keskimääräisen asiditeetin regressioyhtälöstä, jonka selittävänä muuttujina ovat happamien sulfaattimaiden osuus alueella sekä edeltävän kuivajakson pituus. Rikkisedimenttien hapettumisen mahdollistavan pohjavedenpinnan lasku arvioidaan edeltävän kesän alivirtaamapäivien lukumäärän perusteella. Dynaaminen malli laskee jokiveden päivittäisen asiditeetin. Valunta ja pohjavedenpinnan vaihtelu lasketaan hydrologisella osamallilla (Alasaarela ym. 1993). Mallissa kuvataan aktiivisen happamuusvaraston ajallista kehitystä pohjavedenpinnan vaihtelun ja happamuuden huuhtoutumisen seurauksena.

Tässä työssä kehitetty malli (HAPSU) simuloi SO_4^{2-} -, H^+ -, Ca^{2+} -, Fe - ja Al^{3+} -huuhtoumia happamia sulfaattimaita sisältäviltä valuma-alueilta. Sulfaattimaille malli kuvaa lämmön, veden, hapen ja liuosten kulkeutumista maapatsaassa. Rau-

tamonosulfidin (FeS) ja pyriitin (FeS₂) hapettuminen, raudan hapettuminen ja pelkistyminen, rauta- ja alumiinihydroksidien saostuminen ja liukeneminen, kationinvaihto sekä ionien assosioituminen määräävät mallissa maaliuksen koostumuksen. HAPSU-mallin kehitystyön alkuvaiheessa muita happamien sulfaattimaiden malleja ei oltu vielä julkaistu. Päätettiin kehittää suomalaisiin olosuhteisiin soveltuva malli, eikä siirtää tropiikin maille tarkoitettua kehitysvaiheessa olevaa mallia (SMASS). Mallin rakentamisessa on kuitenkin käytetty hyväksi SMASS-raportin (Bronswijk 1992) käsikirjoituksen maaperäkemiallista teoriaa.



Aineita siirtävät maaperäprosessit:

1. Kationinvaihto
2. Mineraalien rapautuminen
3. Hapetus/pelkistysreaktiot
4. Saostumis/liukenemisreaktiot, kompleksointi
5. Kuljetys

Kationeja: H, K, Na, Ca, Mg, Fe, Al, Mn, Nh₄

Anioneja: SO₄, NO₃, PO₄, Cl, HCO₃

Metalleja: Si, Co, Zn, Cu, Pb, Ni, Cd, Cr, As, Hg

Kuva 1. Happaman sulfaattimaan veden laatuun vaikuttavat maaperäprosessit.

Malli

3.1 Yleiskuvaus

Projektin tavoitteena on ollut aikaansaada malli, jolla voidaan aikasimulointina laskea määrättyltä happamia sulfaattimaita sisältävältä valuma-alueelta huuhtoutuvia ainevirtaamia. Malli sisältää varsinaisia sulfaattimaita käsittelevän osan sekä muita valuma-alueeseen sisältyviä maita käsittelevän osan. Lopulliset valuma-alueelta tulevat ainehuuhtoumat saadaan yhdistämällä osa-alueiden ainevirtaamat. Mallin systeemikuvaus on esitetty kuvassa 2.

Sulfaattimaa voidaan mallissa jakaa edelleen pienempiin osa-alueisiin, mikäli maaperäselvitykset antavat sellaiseen aiheita. Kukin tällainen osa-alue kuvataan yksiulotteisella maaprofiililla, jossa veden virtaus, kemialliset prosessit ja aineiden kulkeutuminen tapahtuvat. Esimerkki maaprofiilista on esitetty kuvassa 3. Maaprofiilia kuvaava malli käsittää seuraavat alamallit:

Hydrologia

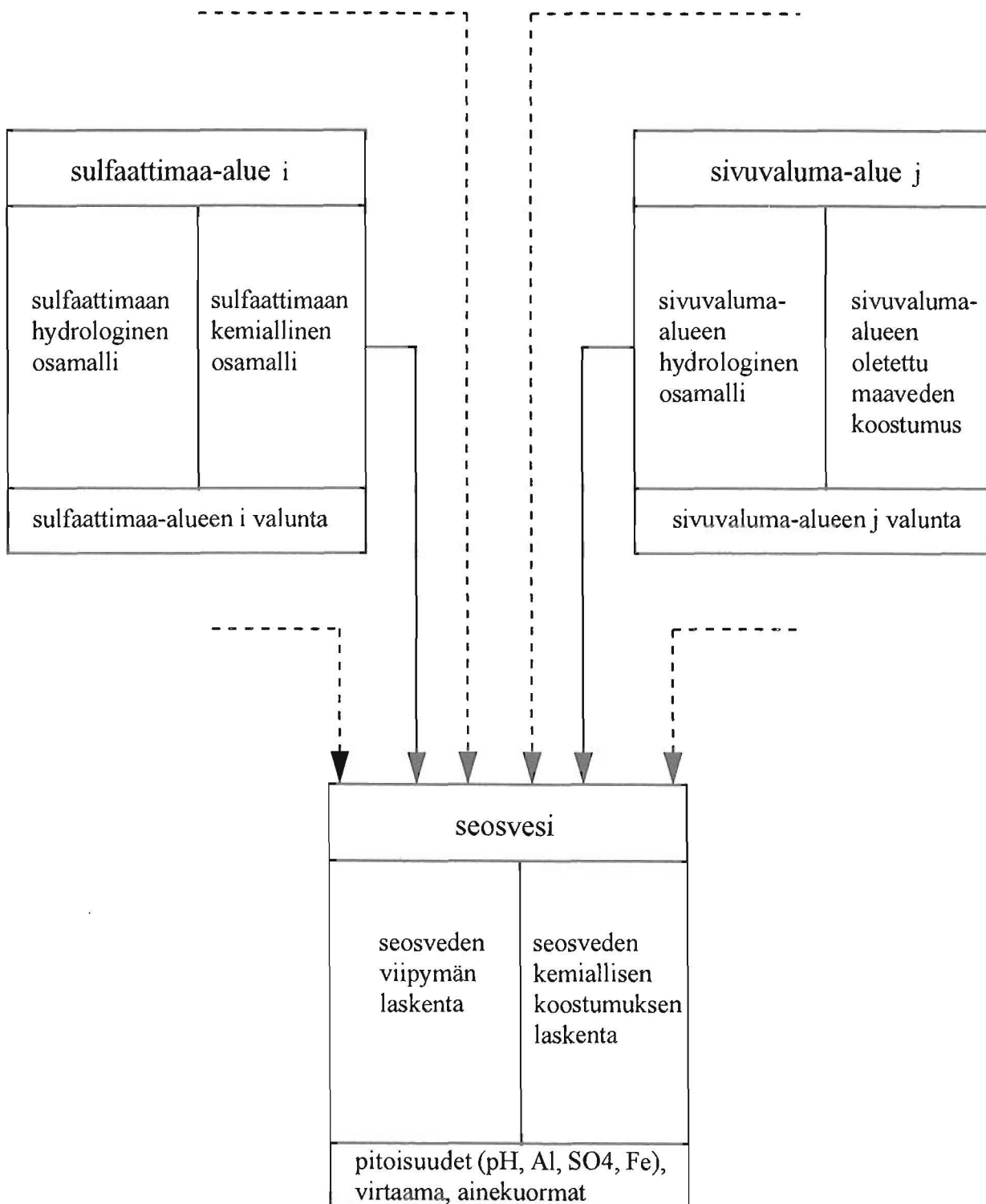
- sade ja lumi
- haihdunta
- painannesäilyntävarasto, rakoilu ja imeytyminen
- maaveden virtaus ja kulkeutuminen kuivatusojiin
- maaperän lämpötila sekä maaveden jäätyminen ja sulaminen
- padotus

Veden laatu

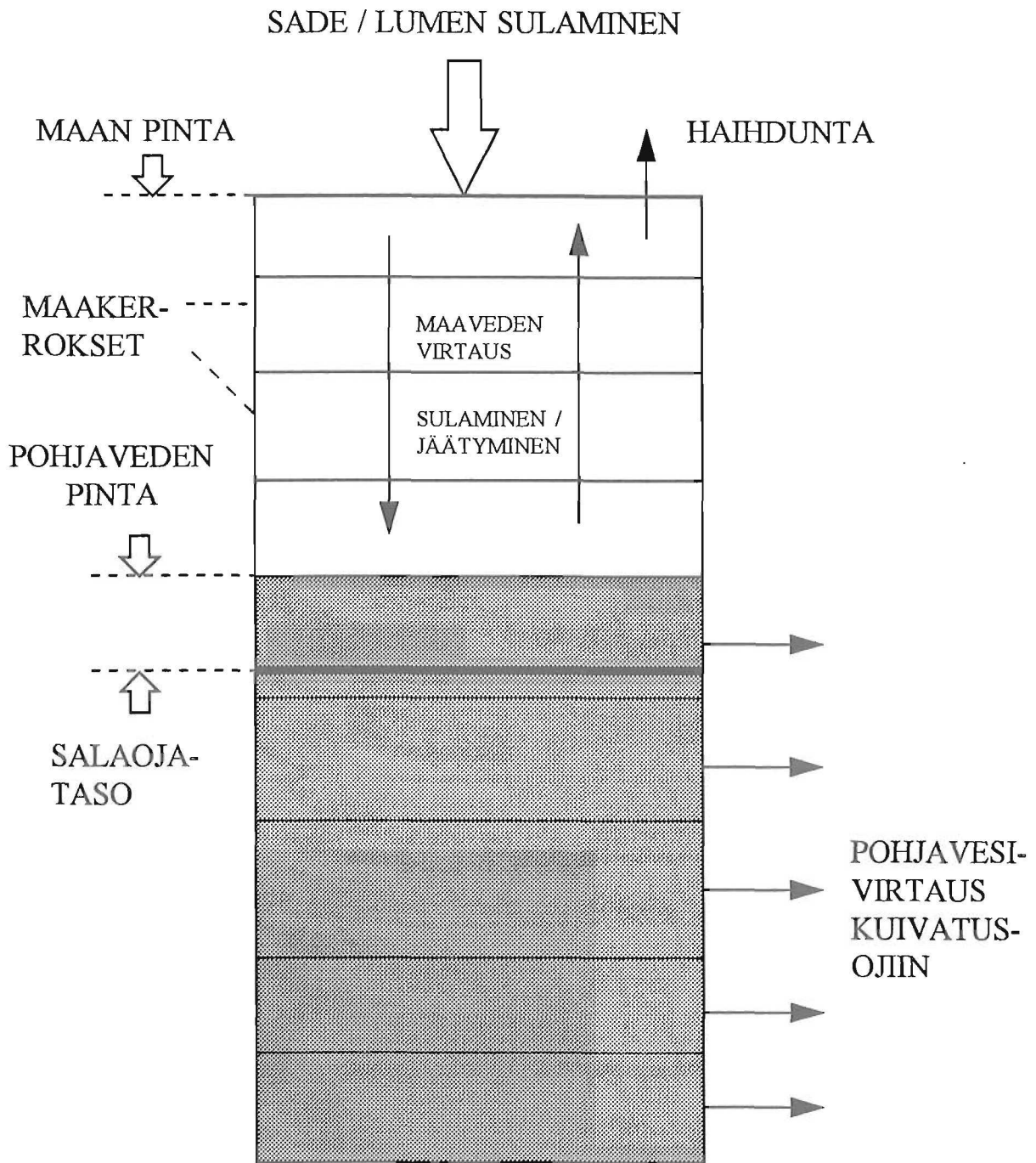
- jäätyneen ja sulamisen vaikutus veden laatuun
- hapen kulkeutuminen
- hiilidioksidin muodostuminen ja kulkeutuminen
- hapettuminen ja rapautuminen
- liuenneiden aineiden kulkeutuminen
- maaveden reaktiotasapaino
- kuivatusojiin tulevien vesien laatu ja ainevirtaamat
- pellon kalkitus

Niitä tarkasteltavan valuma-alueen osia, jotka eivät ole varsinaisia sulfaattimaita, käsitellään suurpiirteisemmin sivuvaluma-alueina. Sadetta ja lunta sekä haihduntaa mallinnetaan kuten sulfaattimaa-alueella. Maaperän hydrologiaa käsitellään konseptuaalisella mallilla, joka koostuu neljästä varastotyypistä. Sivuvaluma-alueen hydrologian kuvaus on esitetty kuvassa 4. Veden laatu on vakio ja se annetaan lähtötietona.

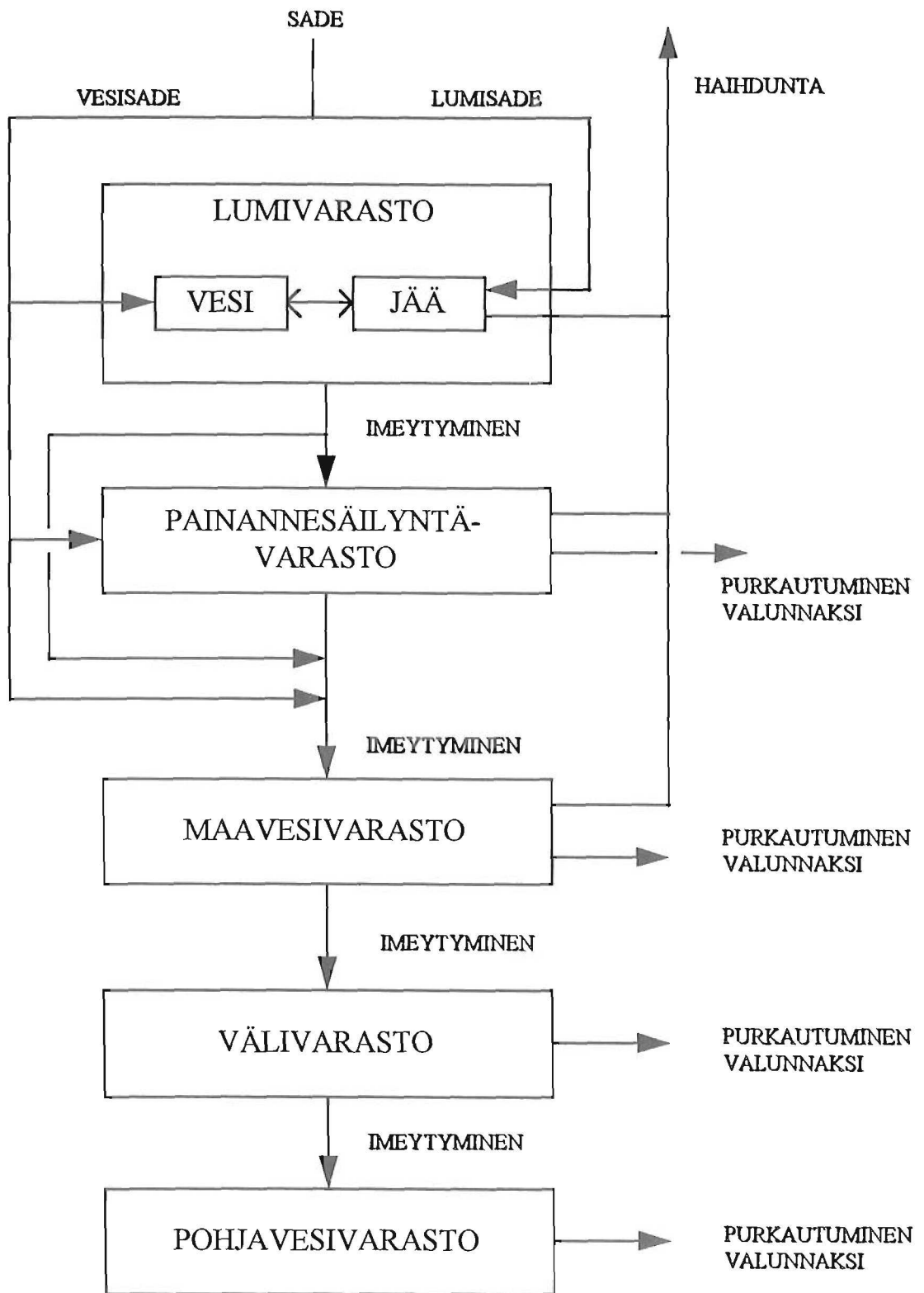
Osa-alueilta tulevat virtaamat sekoitetaan keskenään ja seosvedelle lasketaan kemiallinen reaktiotasapaino. Sen jälkeen on vielä mahdollista tarkastella kalkituksen vaikutusta seosveden laatuun.



Kuva 2. HAPSU - mallin systeemikuvaus.



Kuva 3. Sulfaattimaa-alueen hydrologinen osamalli.



Kuva 4. Sivuvalluma-alueen hydrologinen osamalli.

3.2 Sulfaattimaa-alue

3.2.1 Sade ja lumi

Sade- ja lumimalli perustuu lähteeseen Vehviläinen 1992.

Sadanta

Sadanta muodostuu vesisateesta ja lumisateesta:

$$P = P_w + P_s \quad (1)$$

P = kokonaissadanta (lähtötieto), m/s

P_w = vesisade, m/s

P_s = lumisade, m/s

Sadannan jakautuminen vesisateeksi ja lumisateeksi riippuu ilman lämpötilasta T seuraavasti:

$$P_w = P, \text{ kun } T \geq T_y \quad (2a)$$

$$P_s = P, \text{ kun } T \leq T_a \quad (2b)$$

$$P_w = (T - T_a)P / (T_y - T_a), \text{ kun } T_a < T < T_y \quad (2c)$$

$$P_s = P - P_w, \text{ kun } T_a < T < T_y \quad (2d)$$

T_a ja T_y ovat lähtötiedoissa parametreina annettavia rajalämpötiloja.

Lumivarasto

Lumivaraston ajatellaan muodostuvan jäädä, vedestä ja ilmasta seuraavasti:

$$\theta_{ice} + \theta_w + \theta_a = 1 \quad (3)$$

θ_{ice} = jään tilavuusosuus, m^3/m^3

θ_w = veden tilavuusosuus, m^3/m^3

θ_a = ilman tilavuusosuus, m^3/m^3

Lumen tiheys saadaan em. tilavuusosuuksien perusteella seuraavasti:

$$\rho_{sn} = \theta_{ice}\rho_{ice} + \theta_w\rho_w \quad (4)$$

ρ_{sn} = lumen tiheys, kg/m^3

ρ_{ice} = jään tiheys, kg/m^3

ρ_w = veden tiheys, kg/m^3

Sateena tulevan lumen P_s tiheyttä ρ_{sad} arvioidaan seuraavasti

$$\rho_{sad} = 130 + 13,5T + 0,45T^2 \quad (5)$$

ρ_{sad} = satavan lumen tiheys, kg/m³
 T = ilman lämpötila (lähtötieto), °C

Lumikerroksen ominaisuuksia muuttavat seuraavat prosessit:

- lumi-/vesisade
- lumen sulaminen (jää -> vesi)
- lumessa olevan veden jäätyminen (vesi -> jää)
- haihtuminen
- veden purkautuminen lumessa olevan veden varastosta
- lumen tiivistyminen

Seuraavassa tarkastellaan kunkin prosessin vaikutuksia lumikerroksen vesiarvoon W_{sn} , paksuuteen d_{sn} , jääpitoisuuteen θ_{ice} ja vesipitoisuuteen θ_w . Prosessit lasketaan kullakin aika-askeleella peräkkäin siten, että edellisen prosessin loppuarvoksi saatuja lukuja käytetään seuraavan prosessin alkuarvoina. Aika-askeleen pituus on Δt . Lumen vesiarvon riippuvuus vesi- ja jääpitoisuudesta ja lumen paksuudesta on seuraava:

$$W_{sn} = (\theta_w + \rho_{ice}\theta_{ice}/\rho_w)d_{sn} \quad (6)$$

Lumi-/vesisade

$$W_{sn} = W_{sn}^0 + P\Delta t \quad (7a)$$

$$d_{sn} = d_{sn}^0 + \rho_w P_s \Delta t / \rho_{sad} \quad (7b)$$

$$\theta_{ice} = (d_{sn}^0 \theta_{ice}^0 + \rho_w P_s \Delta t / \rho_{ice}) / d_{sn} \quad (7c)$$

$$\theta_w = (d_{sn}^0 \theta_w^0 + P_w \Delta t) / d_{sn} \quad (7d)$$

Lumen sulaminen

$$W_{sn} = W_{sn}^0 \quad (8a)$$

$$d_{sn} = d_{sn}^0 - (\rho_w / \rho_{ice} - 1) M_{sn} \Delta t \quad (8b)$$

$$\theta_{ice} = (d_{sn}^0 \theta_{ice}^0 - \rho_w M_{sn} \Delta t / \rho_{ice}) / d_{sn} \quad (8c)$$

$$\theta_w = (d_{sn}^0 \theta_w^0 + M_{sn} \Delta t) / d_{sn} \quad (8d)$$

M_{sn} = lumen sulaminen (jää -> vesi), m/s

$$M_{sn} = K_M(T - T_M), \text{ kun } T > T_M \quad (9a)$$

$$M_{sn} = 0, \text{ kun } T \leq T_M \quad (9b)$$

T_M = sulamisen rajalämpötila (parametri), °C

K_M = kerroin, m/s/°C

$$K_M = (K_{Mmax} + K_{Mmin})/2 + (K_{Mmax} - K_{Mmin})\sin(2\pi I/365)/2 \quad (10)$$

K_{Mmax} = K_M :n maksimiarvo (parametri), m/s/°C

K_{Mmin} = K_M :n minimiarvo (parametri), m/s/°C

I = tarkasteltavan päivän järjestysluku, maaliskuun 21. päivänä $I = 1$

Lumessa olevan veden jäätyminen

$$W_{sn} = W_{sn}^0 \quad (11a)$$

$$d_{sn} = d_{sn}^0 - (\rho_w/\rho_{ice} - 1)F_{sn} \quad (11b)$$

$$\theta_{ice} = (d_{sn}^0\theta_{ice}^0 - \rho_w F_{sn}\Delta t/\rho_{ice})/d_{sn} \quad (11c)$$

$$\theta_w = (d_{sn}^0\theta_w^0 + F_{sn}\Delta t)/d_{sn} \quad (11d)$$

F_{sn} = lumessa olevan veden jäätyminen (vesi -> jää), m/s

$$F_{sn} = K_F(T_F - T)^{1/2}, \text{ kun } T < T_F \quad (12a)$$

$$F_{sn} = 0, \text{ kun } T > T_F \quad (12b)$$

T_F = jäätyksen rajalämpötila (parametri), °C

K_F = kerroin (parametri), m/s/°C^{1/2}

Haihtuminen

Haihdunnan määrän laskentaa käsitellään kohdassa 3.2.2.

$$W_{sn} = W_{sn}^0 - E_{sn}\Delta t \quad (13a)$$

$$d_{sn} = d_{sn}^0 - \rho_w E_{sn}\Delta t/\rho_{ice} \quad (13b)$$

$$\theta_{ice} = (d_{sn}^0\theta_{ice}^0 - \rho_w E_{sn}\Delta t/\rho_{ice})/d_{sn} \quad (13c)$$

$$\theta_w = d_{sn}^0\theta_w^0/d_{sn} \quad (13d)$$

Veden purkautuminen lumessa olevan veden varastosta

$$W_{sn} = W_{sn}^0 - Y_{sn}\Delta t \quad (14a)$$

$$d_{sn} = d_{sn}^0 \quad (14b)$$

$$\theta_{ice} = \theta_{ice}^0 \quad (14c)$$

$$\theta_w = \theta_w^0 + Y_{sn}\Delta t/d_{sn} \quad (14d)$$

Y_{sn} = veden purkautuminen, m/s

Vettä purkautuu lumen vesivarastosta vain silloin, kun vesipitoisuus θ_w ylittää maksimipitoisuuden θ_{wmax} :

$$\theta_{wmax} = a_{sn} 0,11(1-\rho_{ice}\theta_{ice}^0/\rho_w) / (1,11-0,11\rho_w\theta_{ice}^0/\rho_{ice}) \quad (15)$$

a_{sn} = kerroin (parametri)

Purkautuminen Y_{sn} aika-askeleen Δt aikana on

$$Y_{sn} = (\theta_w^0 - \theta_{wmax})d_{sn}^0/\Delta t, \text{ kun } \theta_w^0 > \theta_{wmax} \quad (16)$$

Lumen tiivistyminen

$$W_{sn} = W_{sn}^0 \quad (17a)$$

$$\rho_{sn} = \rho_{sn}^0(1 + C_1 W_{sn} \exp(C_3 T - C_2 \rho_{sn}^0) \Delta t) \quad (17b)$$

$$d_{sn} = d_{sn}^0 \rho_{sn}^0 / \rho_{sn} \quad (17c)$$

$$\theta_{ice} = d_{sn}^0 \theta_{ice}^0 / d_{sn} \quad (17d)$$

$$\theta_w = d_{sn}^0 \theta_w^0 / d_{sn} \quad (17e)$$

C_1 = kerroin (parametri), 1/m/s

C_2 = kerroin (parametri), m³/kg

C_3 = kerroin (parametri), 1/°C

Lumen lämmönjohtavuus lasketaan lumen tiheyden perusteella:

$$\lambda_{sn} = 0,026 \exp(0,007 \rho_{sn}) \quad (18)$$

λ_{sn} = lumen lämmönjohtavuus, W/m/°C

3.2.2 Haihdunta

Loka - huhtikuu

Haihdunta tapahtuu

- lumen pinnalta, jos $W_{sn} > 0$
- painannesäilyntävarastosta, jos $W_{sn} = 0$ ja $S_{ps} > 0$
- maasta, jos $W_{sn} = 0$ ja $S_{ps} = 0$

S_{ps} = painannesäilyntävaraston koko, m (kohta 3.2.3)

Lumen pinnalta ja painannesäilyntävarastosta tapahtuva haihdunta lasketaan kaavalla

$$E_{lp} = E_0 + K_E(T-T_0), \text{ kun } T > T_0 \quad (19)$$

E_{lp} = haihdunta, m/s

E_0 = haihdunta (parametri), kun $T = T_0$, m/s

T = ilman lämpötila, °C

T_0 = lämpötila (parametri), jossa $E_{lp} = E_0$, °C

Kerroin K lasketaan kaavalla

$$K_E = (K_{E_{\max}} + K_{E_{\min}})/2 + (K_{E_{\max}} - K_{E_{\min}})\sin(2\pi I/365)/2 \quad (20)$$

$K_{E_{\max}}$ = K_E :n maksimiarvo (parametri), m/s/°C

$K_{E_{\min}}$ = K_E :n minimiarvo (parametri), m/s/°C

I = tarkasteltavan päivän järjestysluku, maaliskuun 21. päivänä $I = 1$

Maasta tapahtuva haihdunta lasketaan kaavalla

$$E_m = K_\theta E_{lp} \quad (21)$$

Tässä E_{lp} lasketaan kuten edellä kaavassa 19. Kerroin K_θ lasketaan ylimmän maakerroksen vesi- ja jääpitoisuuksien summan θ perusteella seuraavasti:

$$K_\theta = 1,0, \text{ kun } \theta \geq 0,40 \quad (22a)$$

$$K_\theta = 0,5 + 0,5\sin((200\theta - 65)\pi), \text{ kun } 0,25 < \theta < 0,40 \quad (22b)$$

$$K_\theta = 0,0, \text{ kun } \theta \leq 0,25 \quad (22c)$$

Maasta oletetaan siis tapahtuvaksi haihduntaa vain, kun $\theta = \theta_w + \theta_{ice}$ on ylimmässä maakerroksessa suurempi kuin 0,25.

Kesä - elokuu

Haihdunta tapahtuu

- painannesäilyntävarastosta, jos $S_{ps} > 0$

- maasta, jos $S_{ps} = 0$

Haihdunta lasketaan kaavalla

$$E_m = \alpha(h)E_a(a + b\ln(t)) \quad (23)$$

E_a = class A -astialla mitattu haihdunta (lähtötieto), m/s

t = aika päivinä toukokuun alusta (1.5) lähtien
a = kerroin (parametri)
b = kerroin (parametri)

Jos haihdunta tapahtuu painannesäilyntävarastosta, niin silloin $\alpha(h) = 1$.

Maaperässä $\alpha(h)$:n riippuvuus painepotentiaalista h lasketaan seuraavasti:

$$\alpha(h) = 0, \text{ kun } h \leq h_{E1} \text{ tai } h \geq h_{E4} \quad (24a)$$

$$\alpha(h) = (h-h_{E1})/(h_{E2}-h_{E1}), \text{ kun } h_{E1} < h < h_{E2} \quad (24b)$$

$$\alpha(h) = 1, \text{ kun } h_{E2} \leq h \leq h_{E3} \quad (24c)$$

$$\alpha(h) = (h_{E1}-h)/(h_{E4}-h_{E3}), \text{ kun } h_{E3} < h < h_{E4} \quad (24d)$$

h_{E1} , h_{E2} , h_{E3} ja h_{E4} (m) ovat parametreja.

Maaperässä haihdunta E_m jaetaan lähdetermiksi syvyydelle Z_E maan pinnasta lukien eli

$$S_E = E_m/Z_E \quad (25)$$

S_E = haihdunnan lähdetermi, 1/s

Z_E = haihduntasyvyys, m

Z_E määritetään lineaarisesti parametreina annettavien toukokuun alun ja syyskuun lopun syvyyksien välillä.

Toukokuu ja syyskuu

Toukokuun ja syyskuun osalta lasketaan haihdunta kullekin päivälle sekä kaavalla 21 että kaavalla 23. Lopulliseksi haihdunnaksi otetaan suurempi saadusta arvoista.

3.2.3 Painannesäilyntävarasto, rakoilu ja imeytyminen

Rakoilumalli perustuu lähteeseen Bronswijk 1988.

Maan halkeilun mekanismi

Savimaan kosteuden (vesipitoisuuden) muuttuessa myös huokostilavuus muuttuu. Kun kosteus vähenee, pienenee huokostilavuus. Vastaavasti huokostilavuus kasvaa kosteuden lisääntyessä. Näitä muutoksia kuvataan kutistumiskäyrällä ($e(\eta)$ -käyrällä). Kutistumiskäyrää kuvaavat parametrit e ja η määritellään seuraavasti:

$$\eta = (\theta_w + \theta_{ice})/\theta_s \quad (26)$$

$$e = n/\theta_s \quad (27)$$

θ_w = maan vesipitoisuus, m³/m³

θ_{ice} = maan jääpitoisuus, m³/m³

θ_s = maan kiintoainepitoisuus, m³/m³

n = maan huokoisuus, m³/m³

Näin ollen maan huokoisuus n ei ole vakio vaan muuttuu vesipitoisuuden muuttuessa. Sen sijaan maan kiintoainepitoisuus θ_s pysyy vakiona.

Kun maaveden painepotentiaali $h \geq 0$ m, on $\theta_w = \theta_{wmax}$. Tällöin myös $\eta = \eta_{max}$, $e = e_{max}$ ja $n = n_{max}$. Tässä tilanteessa maassa ei ole kutistumisesta aiheutuvia halkeamia (rakoja). Kun maaperän painepotentiaali laskee alle nollan, on $\theta_w < \theta_{wmax}$, $\eta < \eta_{max}$ ja $e < e_{max}$. Tällöin η ja e noudattavat muutoksissaan kutistumiskäyrää. Kutistumisen seurauksena maahan muodostuu rakoja, joiden pinta-ala maan pinnan neliometriä kohti voidaan määrittää kutistumiskäyrän perusteella.

Rakojen pinta-alan laskeminen

Rakojen pinta-ala lasketaan kullakin aika-askeleella erikseen kullekin maakerrokselle (solmupisteelle). Kyseiselle kerrokselle lasketun vesipitoisuuden perusteella lasketaan ensiksi η .

$$\eta = \theta_w/\theta_s \quad (28)$$

Tämän jälkeen saadaan e kutistumiskäyrältä. Seuraavaksi lasketaan kutistumiskerroin k .

$$k = ((1+e)\theta_w)^{1/3} \quad (29)$$

Kutistumiskerroin k ilmaisee maan suhteellisen kutistuman verrattuna tilanteeseen, jossa $e = e_{max}$. Toisin sanoen $k = 1$, kun $e = e_{max}$ ja $k < 1$, kun $e < e_{max}$. Kutistumiskertoimen laskenta perustuu olettamukseen, jonka mukaan kutistuminen on isotrooppista.

Rakojen pinta-ala kyseisessä kerroksessa maan pinnan neliometriä kohti saadaan kutistumiskertoimen perusteella:

$$A_r = 1 - k^2 \quad (30)$$

Painannesäilyntävarasto ja imeytyminen

Jos ylimmän kerroksen rakopinta-ala $A_{r1} = 0$, niin painannesäilyntävaraston taseyhtälö on

$$dS_{ps}/dt = Y - I - E_{ps} - q_{sw} \quad (31)$$

S_{ps} = painannesäilyntävarasto, m

Y = vesisade P_w tai lumessa olevan veden varaston purkautuminen, m/s

I = imeytyminen maahan (infiltraatio), m/s

E_{ps} = haihdunta, m/s

q_{sw} = pintavalunta kuivatusojiin, m/s

Pintavalunta q_{sw} :

$$q_{sw} = 0, \text{ kun } S_{ps} \leq S_{psmax} \quad (32a)$$

$$q_{sw} = dS_{ps}/dt, \text{ kun } S_{ps} > S_{psmax} \quad (32b)$$

S_{psmax} = painannesäilyntävaraston maksimikoko (parametri), m

Jos $A_{r1} > 0$, niin painannesäilyntävaraston oletetaan imeytyvän maahan ja asetetaan $S_{ps} = 0$.

Imeytyminen puolestaan jakaantuu ylimmän kerroksen ja rakojen välille seuraavasti.

Jos ylimmän kerroksen rakopinta-ala $A_{r1} = 0$, vettä ei imeydy rakoihin ollenkaan. Imeytyminen ylimpään maakerrokseen määritetään painannesäilyntävaraston S_{ps} perusteella seuraavasti:

$$S_{ps} > 0$$

$$\text{Infiltraatio } I = \alpha K_y \quad (33a)$$

$$S_{ps} = 0$$

$$\text{Infiltraatio } I = \min(Y, \alpha K_y) \quad (33b)$$

Tässä on

K_y = ylimmän maakerroksen vedenjohtavuus, m/s

α = kerroin (parametri)

Jos ylimmän kerroksen $A_{r1} > 0$, laskentaan imeytyminen seuraavasti:

$$Y \leq \alpha K_y$$

$$I_m = (1-A_{r1})Y \quad (34a)$$

$$I_r = A_{r1}Y = Y - I_m \quad (34b)$$

$$Y > \alpha K_y$$

$$I_m = (1-A_{r1})\alpha K_y \quad (34c)$$

$$I_r = Y - \alpha K_y + A_{r1}\alpha K_y = Y - I_m \quad (34d)$$

Tässä on

I_m = infiltraatio ylimpään maakerrokseen, m/s

I_r = infiltraatio rakoihin, m/s

Rakoihin imeytyvä vesimäärä lisätään alimpaan sellaiseen kerrokseen, johon on katkeamaton rakoilevien kerrosten yhteys ylimmästä kerroksesta alkaen.

3.2.4 Maaveden virtaus

Maaveden virtauksen laskenta perustuu seuraaviin yhtälöihin:

$$\partial\theta_w/\partial t = -\partial q/\partial z - S + S_r \text{ (jatkuvuusyhtälö)} \quad (35)$$

$$q = -K(h)(\partial h/\partial z - 1) \text{ (liikeyhtälö)} \quad (36)$$

$$\partial\theta_w/\partial t = d\theta_w/dh \partial h/\partial t = C(h)\partial h/\partial t \quad (37)$$

$$C(h)\partial h/\partial t = \partial/\partial z (K(h)(\partial h/\partial z - 1)) - S + S_r \quad (38)$$

θ_w = maan vesipitoisuus, m^3/m^3

q = maaveden vuo, m/s

S = poistuvan veden nieluterminen, 1/s

S_r = raoista tulevan veden nieluterminen, 1/s

h = maaveden painepotentiaali, m

$K(h)$ = maan vedenjohtavuus, m/s

Vesipitoisuuden ja painepotentiaalin välinen riippuvuus lasketaan kaavalla

$$\theta_w = n_{\max} \exp(-\mu(\ln(-100h))^2) \quad (39)$$

n_{\max} = maksimihuokoisuus

μ = kerroin (parametri)

Tekijä $C(h)$ lasketaan kaavalla

$$C(h) = d\theta_w/dh = -2\mu \ln(-100h)/h (n_{\max} \exp(-\mu(\ln(-100h))^2)) \quad (40)$$

Kaavoja 39 ja 40 voidaan käyttää, kun $h < -0,01$. Kun $h \geq -0,01$, on $\theta_w = n_{\max}$ ja $C(h)$:n arvoksi asetetaan pieni luku.

Käänteinen riippuvuus $h = h(\theta_w)$ on kaavan 39 perusteella

$$h = -1/100 \exp((-1/\mu \ln(\theta_w/n_{\max}))^{1/2}) \quad (41)$$

Kaava pätee, kun $\theta_w < n_{\max}$.

Jos osa maavedestä on jäänyt, käytetään kaavoissa 39, 40 ja 41 maksimihuokoisuuden sijasta maksimihuokoisuuden ja jääpitoisuuden erotusta $n' = n_{\max} - \theta_{ice}$.

Vedenjohtavuuden riippuvuus vesipitoisuudesta lasketaan kaavalla

$$K = K_s((\theta_w - \theta_{wr}) / (n_{\max} - \theta_{wr}))^{3.5} \quad (42)$$

K = vedenjohtavuus, m/s

K_s = vedellä kyllästetyn maan vedenjohtavuus, m/s

θ_{wr} = rajapitoisuus (parametri), m^3/m^3

Jos osa maavedestä on jäänyt, käytetään n' :a kuten edellä.

Imeytyminen määräytyy kohdassa 3.2.3 esitetyllä tavalla. Jos painepotentiaali h_y maan pinnalla tulee suuremmaksi kuin $h_y = 0$, asetetaan reunaehdoksi $h_y = 0$.

Maan alareunan oletetaan olevan vettä läpäisemätön, jolloin reunaehtona on $q_a = 0$.

Nielutermillä S otetaan huomioon haihdunta sekä veden virtaus kuivatusojiin.

$$S = S_e + S_{gw} \quad (43)$$

S_e = haihdunta, 1/s

S_{gw} = virtaus kuivatusojiin pohjaveden pinnan alapuolelta, 1/s

Haihdunta määräytyy kohdassa 3.2.2 esitetyllä tavalla. Pohjavesipinnan alapuolisista maakerroksista tapahtuva virtaus kuivatusojiin lasketaan kaavalla

$$q_{gw} = (8K_i d_e H + 4K_i H^2) / L^2 \quad (44)$$

q_{gw} = virtaus kuivatusojiin, m/s

L = ojaväli (lähtötieto), m

H = pohjaveden pinnan ja salaojien korkeustason välinen ero, m

d_e = ekvivalenttisyvyys, m

K_i = vedenjohtavuus, m/s, annetaan parametrina kalenterikuukausittain ($i=1,12$)

Ekvivalenttisyvyys d_e lasketaan seuraavasti

Kun $0 < d/L < 0,3$

$$d_e = d / (1 + d/L(8 \ln(d/r) / \pi - a)) \quad (45a)$$

$$a = 3,55 - 1,6d/L + 2(d/L)^2 \quad (45b)$$

Kun $d/L \geq 0,3$

$$d_e = L / (8(\ln(L/r) - 1,15)) \quad (45c)$$

d = vettä läpäisemättömän kerroksen syvyys salaojatasosta mitattuna (lähtötieto), m
 r = salaojaputkien säde (lähtötieto), m

Nielutermin S_{gw} saadaan jakamalla q_{gw} pohjaveden pinnan ja maaprofiilin alareunan välisellä korkeuserolla:

$$S_{gw} = q_{gw}/(z_a - z_{gw}) \quad (46)$$

Lisäksi nielutermin jakautumista pohjaveden pinnan alaisten kerrosten kesken voidaan säätää parametreina annettavilla kerroskohtaisilla painotuskertoimilla.

3.2.5 Maaperän lämpötila, jäätyminen ja sulaminen

Sulan maaprofiilin lämpötilan laskennan perusyhtälö on

$$\partial/\partial t (C_p T) = \partial J_v/\partial z - C_w \rho_w S T \quad (47)$$

T = lämpötila, °C

J_h = lämpövuoto, W/m²

S = maaveden virtausyhtälön nielutermin, 1/s

C_p = maan lämpökapasiteetti, J/m³/°C

C_w = veden lämpökapasiteetti, J/kg/°C

ρ_w = veden tiheys, kg/m³

$$J_h = C_w \rho_w q T - \lambda \partial T/\partial z \quad (48)$$

q = maaveden vuoto, m/s

λ = maan lämmönjohtavuus (parametri), W/m/°C

$$C_p = \theta_w C_w \rho_w + \theta_s C_s \rho_s \quad (49)$$

θ_w = maan vesipitoisuus, m³/m³

θ_s = maan kiintoainepitoisuus, m³/m³

C_s = maa-aineksen lämpökapasiteetti, J/kg/°C

ρ_s = maa-aineksen tiheys, kg/m³

Jos jokin osa maaprofiilin vedestä on jäänyt ($T < 0$), lämpötilan laskenta perustuu energiayhtälöön:

$$\partial E/\partial t = -\partial J_v/\partial z - C_w \rho_w S T \quad (50)$$

E = maan lämpösisältö, J/m³

Näin laskettaessa saadaan sulan maan lämpötila kaavasta

$$T = E/C_p \quad (51)$$

Niissä osissa maaprofiilia, joissa maavesi on kokonaan jäätynyt ($T \leq T_f$), lasketaan lämpötila seuraavasti:

$$T = T_f + (E - E_f)/C_p \quad (52)$$

T_f = lämpötila, jonka alapuolella maavesi on kokonaan jäätynyt, °C

E_f = maan lämpösisältö lämpötilassa T_f , J/m³

C_p = jäätyneen maan lämpökapasiteetti, J/m³/°C

Maaveden ollessa osittain jäätynyt ($T_f < T < 0$), lämpötila lasketaan kaavoista 53a - 53i seuraavasti:

$$w = \theta_i \rho_i + \theta_w \rho_w \quad (53a)$$

$$E_f = (w C_i + \theta_s C_s \rho_s) T_f - w L_f \quad (53b)$$

$$f_{iat} = -w L_f / E_f \quad (53c)$$

$$r = (1 - E / E_f)^{1/2} \quad (53d)$$

$$H = E(1 - f_{iat})(1 - r) \quad (53e)$$

$$\theta_i = -(E - H) / (L_f \rho_i) \quad (53f)$$

$$\theta_w = (w - \theta_i \rho_i) / \rho_w \quad (53g)$$

$$C_p = \theta_i C_i \rho_i + \theta_w C_w \rho_w + \theta_s C_s \rho_s \quad (53h)$$

$$T = H / C_p \quad (53i)$$

w = sulan ja jäätyneen veden kokonaismäärä maan tilavuusyksikköä kohti, kg/m³

θ_i = jäätyneen veden pitoisuus maassa, m³/m³

C_i = jään lämpökapasiteetti, J/kg/°C

L_f = veden sulamislämpö, J/kg

H = maan lämpösisältö vähennettynä sulamislämmöllä, J/m³

Reunaehtona maaprofiilin yläreunalla käytetään ajan funktiona tunnettua lämpötilaa. Jos maassa on lunta, on yläreunan reunaehtona tunnettu lämpötila lumen pinnalla. Maaprofiilin alareunan lämpötila on lähtötietona annettava vakio.

3.2.6 Jäätymisen ja sulamisen vaikutus veden laatuun

Maakerroksen jäätyessä oletetaan, että liuenneet aineet jäävät kerroksen sulana pysyvään osaan. Toisin sanoen jäässä aineiden konsentraatiot ovat nolla. Vastavasti jään sulaessa jäästä ei tule lisää liuennutta ainetta sulaan osaan kerrosta. Laskenta tapahtuu kaavoilla

$$K_{ice} = (\theta_w + \theta_{ice} - \theta_{ice}^0) / \theta_w \quad (54a)$$

$$C = K_{ice}C^0 \quad (54b)$$

K_{ice} = kerroin

θ_w = kerroksen vesipitoisuus aika-askeleen lopussa

θ_{ice} = kerroksen jääpitoisuus aika-askeleen lopussa

θ_{ice}^0 = kerroksen jääpitoisuus aika-askeleen alussa

C^0 = liuenneen aineen konsentraatio aika-askeleen alussa

C = liuenneen aineen konsentraatio aika-askeleen lopussa

3.2.7 Hapen kulkeutuminen

Hapen kulkeutumista maan ilmahuokosissa kuvataan yhtälöllä (Hillel 1980)

$$\partial/\partial t(\theta_a C_a) = \partial/\partial z(\theta_a D_a \partial/\partial z C_a) + \alpha_a \quad (55)$$

C_a = hapen konsentraatio maassa olevassa ilmassa, mol/m³

θ_a = maan ilmapitoisuus, m³/m³

D_a = dispersiokerroin (parametri), m²/s

α_a = lähdetermi, mol/m³/s

Lähdetermillä otetaan huomioon hapen siirtyminen ilman ja veden välillä:

$$\alpha_a = -\beta\theta_w(C_w^k - C_w) \quad (56)$$

C_w^k = hapen kyllästyspitoisuus maavedessä, mol/m³

β = siirtymiskerroin (parametri), 1/s

Maaveden happipitoisuuden laskenta perustuu yhtälöön

$$\partial/\partial t(\theta_w C_w) = -\partial/\partial z(q C_w) + \partial/\partial z(\theta_w D_w \partial/\partial z C_w) + \alpha_w \quad (57)$$

C_w = hapen konsentraatio maavedessä, mol/m³

θ_w = maan vesipitoisuus, m³/m³

q = maaveden vuo, m/s

D_w = dispersiokerroin, m²/s

α_w = lähdetermi, mol/m³/s

Dispersiokerroin D_w riippuu maaveden vuosta q :

$$D_w = a_L q + D^* \quad (58)$$

a_L = kerroin (parametri), m

D^* = kerroin (parametri), m²/s

Lähdetermillä α_w otetaan huomioon hapen siirtyminen ilman ja veden välillä, hapen kulkeutuminen maaprofiiliin (rakoilu), hapen kulkeutuminen pois maaprofiilista (haihtuminen, virtaus kuivatusojiin), rikkiyhdisteiden hapettuminen sekä raudan hapettuminen ja pelkistytminen:

$$\alpha_w = \beta\theta_w(C_w^k - C_w) + S_r C_r - S C_w + \alpha_{FeS} + \alpha_{Fe} \quad (59)$$

S_r = rakoilun nielutermi, 1/s

C_r = rakojen kautta tulevan veden happikonsentraatio, mol/m³

S = virtausyhtälön nielutermi (= $S_e + S_{gw}$), 1/s

α_{FeS} = hapen kuluminen rikkiyhdisteiden hapettumisessa, mol/m³/s

α_{Fe} = hapen kuluminen raudan hapettumisessa, mol/m³/s

Rikkiyhdisteiden hapettumisen sekä raudan hapettumisen ja pelkistymisen laskenta perustuu kohdassa 3.2.9 esitettäviin reaktioihin ja niiden nopeuksiin, jolloin

$$\alpha_{FeS} = d/dt(\theta_w C_w) = -2k_{ox1} C_{FeS} - 7k_{ox2} C_{FeS2}/2 \quad (60)$$

$$\alpha_{Fe} = d/dt(\theta_w C_w) = -\theta_w k_{Fe1} C_{Fe2+} C_w^{1/4} C_{H+}/4 + \theta_w k_{Fe2} C_{Fe3+} \quad (61)$$

C_{FeS} = rautamonosulfidin konsentraatio maassa, mol/m³

C_{FeS2} = pyriitin konsentraatio maassa, mol/m³

C_{Fe2+} = raudan konsentraatio maassa, mol/m³

C_{Fe3+} = raudan konsentraatio maassa, mol/m³

k_{Fe1} = raudan hapettumisnopeuskerroin, 1/s

k_{Fe2} = raudan pelkistymisnopeuskerroin, 1/s

Kertoimet k_{ox1} ja k_{ox2} lasketaan seuraavasti:

$$k_{ox1} = f_1 \exp(g_1 T_w) C_w \quad (62a)$$

$$k_{ox2} = f_2 \exp(g_2 T_w) C_w \quad (62b)$$

k_{ox1} = monosulfidin hapettumisnopeuskerroin, 1/s

k_{ox2} = pyriitin hapettumisnopeuskerroin, 1/s

T_w = veden lämpötilä, °C

Kertoimet f_1 , f_2 , g_1 ja g_2 ovat parametreja.

Kulkeutumisyhtälöiden reunaehdot ovat seuraavat. Hapen kulkeutuminen ilmahuokosissa: yläreunalla tunnettu konsentraatio, alareunalla dispersio nolla. Hapen kulkeutuminen maavedessä: yläreunalla joko tunnettu konsentraatio ($q > 0$) tai vuo on nolla ($q = 0$) ja alareunalla vuo on nolla.

Raudan hapettumis- ja pelkistymisnopeuskertoimien lausekkeet esitetään yhtälöissä 76-79.

3.2.8 Hiilidioksidin muodostuminen ja kulkeutuminen

Hiilidioksidia vapautuu maaveteen mikrobien suorittaman hajoitustoiminnan seurauksena. Vapautumista mallinnetaan seuraavasti:

$$R_{CO2} = f(z)g(T) \quad (63)$$

R_{CO_2} = hiilidioksidin vapautuminen maan tilavuusyksikköä kohti mol/m³/s
 $f(Z)$ = hiilidioksidin vapautumista maan pinnasta mitatun syvyyden funktiona kuvaava suhdeluku, $0 \leq f(Z) \leq 1$

$g(T)$ = hiilidioksidin vapautumisen riippuvuutta lämpötilasta kuvaava funktio, mol/m³/s

$$f(Z) = 1 - kZ, \text{ kun } z \leq 1/k \quad (64a)$$

$$f(Z) = 0, \text{ kun } z > 1/k \quad (64b)$$

$$g(T) = 0, \text{ kun } T \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (65a)$$

$$g(T) = r(\exp(sT)-1), \text{ kun } T > 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (65b)$$

Näissä kaavoissa k , r ja s ovat parametreja.

Hiilidioksidin kulkeutumista maan ilmahuokosissa ja maavedessä mallinetaan samoin kuin hapen kulkeutumista. Hiilidioksidin tapauksessa perusyhtälöiden lähdeterminit ovat seuraavat:

$$\alpha_a = -\beta_{CO_2}\theta_w(C_w^k - C_w) \quad (66)$$

C_w^k = hiilidioksidin kyllästyspitoisuus maavedessä, mol/m³

C_w = hiilidioksidin pitoisuus maavedessä, mol/m³

β_{CO_2} = siirtymiskerroin maahuokosissa olevan ilman ja maaveden välillä (parametri), 1/s

Jos $C_w^k > C_w$ ja maahuokosissa olevan ilman hiilidioksidipitoisuus $C_a = 0$, on $\beta_{CO_2} = 0$.

Kyllästyspitoisuus C_w^k lasketaan maassa olevan ilman hiilidioksidipitoisuuden perusteella:

$$C_w^k = K_{CO_2}C_a \quad (67)$$

K_{CO_2} riippuu lämpötilasta seuraavasti:

$$K_{CO_2} = R(273,15+T)75,7\exp(-0,0342T)/101325 \quad (68)$$

T = tarkasteltavan maakerroksen lämpötila, °C

R = yleinen kaasuvakio, J/mol/K

Maavedessä puolestaan

$$\alpha_w = \beta_{CO_2}\theta_w(C_w^k - C_w) + R_{CO_2} - S C_w + S_r C_w \quad (69)$$

R_{CO_2} = hiilidioksidin vapautuminen maaveteen, mol/m³/s

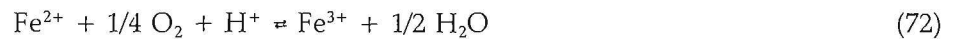
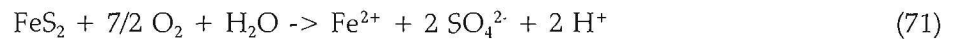
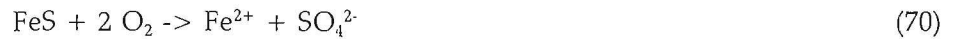
S = virtauksen jatkuvuusyhtälön nielutermi, 1/s

S_r = rakoilun nielutermi, 1/s

C_r = rakojen kautta tulevan veden hiilidioksidipitoisuus, mol/m³

3.2.9 Hapettuminen ja rapautuminen

Monosulfidin ja pyriitin hapettuminen sekä raudan hapettuminen ja pelkistymisen kuvataan seuraavilla yhtälöillä (Stumm ja Morgan 1981):



Kaksiarvoisten emäskationien, joita mallissa nimitetään kalsiumiksi (Ca), oletetaan siirtyvän vakionopeudella maaveteen mineraaliaineksen rapautumisen seurauksena.



Vastaavat konsentraatioiden muutosnopeudet maavedessä lasketaan seuraavasti:

$$d/dt C_{\text{FeS}} = -k_{\text{ox1}} C_{\text{FeS}} \quad (74a)$$

$$d/dt C_{\text{FeS}_2} = -k_{\text{ox2}} C_{\text{FeS}_2} \quad (74b)$$

$$d/dt C_{\text{Fe}^{2+}} = -k_{\text{ox1}}/\theta_w C_{\text{FeS}} + k_{\text{ox2}}/\theta_w C_{\text{FeS}_2} - k_{\text{Fe1}} C_{\text{Fe}^{2+}} C_{\text{O}_2}^{1/4} C_{\text{H}^+} + k_{\text{Fe2}} C_{\text{Fe}^{3+}} \quad (74c)$$

$$d/dt C_{\text{Fe}^{3+}} = k_{\text{Fe1}} C_{\text{Fe}^{2+}} C_{\text{O}_2}^{1/4} C_{\text{H}^+} - k_{\text{Fe2}} C_{\text{Fe}^{3+}} \quad (74d)$$

$$d/dt C_{\text{H}^+} = 2k_{\text{ox2}}/\theta_w C_{\text{FeS}_2} - k_{\text{Fe1}} C_{\text{Fe}^{2+}} C_{\text{O}_2}^{1/4} C_{\text{H}^+} + k_{\text{Fe2}} C_{\text{Fe}^{3+}} \quad (74e)$$

$$d/dt C_{\text{SO}_4^{2-}} = k_{\text{ox1}}/\theta_w C_{\text{FeS}} + k_{\text{ox2}}/\theta_w C_{\text{FeS}_2} \quad (74f)$$

$$d/dt C_{\text{O}_2} = -2k_{\text{ox1}}/\theta_w C_{\text{FeS}} - 7/2 k_{\text{ox2}}/\theta_w C_{\text{FeS}_2} - 1/4 k_{\text{Fe1}} C_{\text{Fe}^{2+}} C_{\text{O}_2}^{1/4} C_{\text{H}^+} + 1/4 k_{\text{Fe2}} C_{\text{Fe}^{3+}} \quad (74g)$$

$$d/dt C_{\text{Ca}^{2+}} = k_{\text{Ca}} \quad (74h)$$

Näissä yhtälöissä on

C = liuenneen aineen konsentraatio maavedessä, mol/vesi-m³

C = maahan sitoutuneen aineen konsentraatio, mol/maa-m³

k_{ox1} = monosulfidin hapettumisnopeuskerroin, 1/s

k_{ox2} = pyriitin hapettumisnopeuskerroin, 1/s

K_{Ca} = kalsiumin rapautumisnopeus (parametri), mol/m³/s

Monosulfidin ja pyriitin hapettumisnopeuksien laskenta on esitetty kohdassa 3.2.7 hapen kulkeutumisen yhteydessä.

Muiden aineiden osalta konsentraatiot lasketaan

$$C = C^0 + (dC/dt)\Delta t \quad (75)$$

C^0 = konsentraatio ennen hapettumista tai rapautumista

C = konsentraatio hapettumisen tai rapautumisen jälkeen

Raudan hapettumis- ja pelkistymisnopeuskertoimien suhde on reaktion 72 tasapainovakion funktio:

$$k_{Fe1}/k_{Fe2} = k^{1/4}_{Fe} \quad (76)$$

$$k_{Fe} = C^4_{Fe3+}/(C^4_{Fe2+} C_{O2} C^4_{H+}) \quad (77)$$

Kerroin k_{Fe1} riippuu lämpötilasta T_w :

$$k_{Fe1} = k_{Fe1}^0 (\exp(-\Delta H^0/R (1/T_w - 1/T_w^0)))^{1/4} \quad (78)$$

k_{Fe1} = kertoimen arvo lämpötilassa T_w

ΔH^0 = reaktion 72 reaktioentalpia, J

R = yleinen kaasuvakio, J/mol/K

T_w^0 = 298,15 K

k_{Fe1}^0 riippuu pH:sta seuraavasti:

$$k_{Fe1}^0 = 10^{(p1 + p2 \cdot pH + p3 \cdot pH \cdot pH)} \quad (79)$$

Kertoimet p_1 , p_2 ja p_3 ovat parametreja.

3.2.10 Liuenneiden aineiden kulkeutuminen

Liuenneiden aineiden kulkeutumista maaperässä mallinnetaan samalla yhtälöllä kuin hapen ja hiilidioksidin kulkeutumista:

$$\partial/\partial t(\theta_w C_w) = \partial/\partial z(q C_w) + \partial/\partial z(\theta_w D_w \partial/\partial z C_w) + \alpha_w \quad (80)$$

C_w = tarkasteltavan aineen konsentraatio maavedessä, mol/m³

θ_w = maan vesipitoisuus, m³/m³

q = maaveden vuo, m/s

D_w = dispersiokerroin, m²/s

∂_w = lähde-termi, mol/m³/s

Tässä lähde-termi on

$$\alpha_w = S_r C_r - S_{gw} C_w \quad (81)$$

S_r = rakoilun nielutermi, 1/s

C_r = rakojen kautta tulevan veden konsentraatio kyseiselle aineelle, mol/m³

S_{gw} = nielutermi pohjavesivirtaukselle salaojaan, 1/s

Maasta ei poistu haihdunnan mukana liuenneita aineita happea ja hiilidioksidia lukuunottamatta. Laskennan reunaehdot ovat samat kuin hapen kulkeutumisen laskennassa.

3.2.11 Maaveden reaktiotasapaino

Maaveden reaktiotasapaino lasketaan erikseen jokaiselle maakerrokselle. Malliin sisältyvät reaktiot ja niitä vastaavat tasapainovakioiden lausekkeet ovat seuraavat:

Kationinvaihtoreaktiot (de Vries ym. 1989)



$$K_{Hal} = C^3_{H+ads} C_{Al^{3+}} / (C^3_{H^+} C_{Al^{3+}ads}) \quad (82b)$$



$$K_{HCa} = C^2_{H+ads} C_{Ca^{2+}} / (C^2_{H^+} C_{Ca^{2+}ads}) \quad (83b)$$

Hiilidioksiditasapaino (Stumm ja Morgan 1981)



$$K_{HCO_3} = C_{H^+} C_{HCO_3^-} / C_{H_2CO_3} \quad (84b)$$

Alumiinin reaktiot (Stumm ja Morgan 1981)



$$K_{gibb} = C_{Al^{3+}} / C^3_{H^+} \quad (85b)$$



$$K_{AlOH} = C_{AlOH^{2+}} C_{H^+} / C_{Al^{3+}} \quad (86b)$$



$$K_{AlSO_4} = C_{AlSO_4^+} / (C_{Al^{3+}} C_{SO_4^{2-}}) \quad (87b)$$

Raudan reaktio (Stumm ja Morgan 1981)



$$K_{FeOH} = C^3_{H^+} / C_{Fe^{3+}} \quad (88b)$$

Reaktioiden tasapainovakioiden arvot lasketaan seuraavasti:

Kationinvaihtoreaktiot (de Vries ym. 1989):

$$K_{\text{HAl}} = 3E-12(\theta_s \rho_s \text{CEC})^2 K_{\text{HAIGT}}^3 \quad (89a)$$

$$K_{\text{HCa}} = 2E-6(\theta_s \rho_s \text{CEC}) K_{\text{HCaGT}} \quad (89b)$$

θ_s = maan kiintoainepitoisuus, m^3/m^3

ρ_s = maan tiheys, kg/m^3

CEC = maan kationinvaihtokapasiteetti, $\text{meq}/\text{maa-kg}$

K_{HAIGT} = Gaines-Thomas tasapainovakio, lähtötieto

K_{HCaGT} = Gaines-Thomas tasapainovakio, lähtötieto

Hiilidioksiditasapaino (Stumm ja Morgan 1981):

$$\log K'_{\text{HCO}_3} = -353,31 - 0,06092T_w + 2183,4/T_w + 126,83 \log T_w - 1684915/T_w^2 \quad (90a)$$

$$K_{\text{HCO}_3} = K'_{\text{HCO}_3} C_{\text{H}_2\text{CO}_3} \quad (90b)$$

T_w = veden lämpötila, K

$C_{\text{H}_2\text{CO}_3}$ = veden hiilihappopitoisuus, mol/m^3

Alumiinin ja raudan reaktiot (Stumm ja Morgan 1981):

$$K = K^0 \exp(-\Delta H^0/R (1/T_w - 1/T_w^0)) \quad (91)$$

K = kertoimen arvo lämpötilassa T_w

K^0 = kertoimen arvo lämpötilassa T_w^0 , lähtötieto

ΔH^0 = reaktion reaktioentalpia, J

R = yleinen kaasuvakio, $\text{J}/\text{mol}/\text{K}$

$T_w^0 = 298,15 \text{ K}$

Maan kiinteiden aineiden ja maaveteen liuenneiden aineiden vuorovaikutus on esitetty kuvassa 5.

3.2.12 Kuivatusojiin tulevien vesien laatu ja ainevirtaamat

Kuivatusojiin tulevien vesien kemiallinen reaktiotasapaino laskettaessa otetaan huomioon edellisen kohdan reaktiot hiilidioksidia lukuun ottamatta. Hiilidioksiditasapainoa laskettaessa oletetaan että veden hiilihappopitoisuus on tasapainossa ilman hiilidioksidin osapaineen kanssa, jolloin

$$K_{\text{CO}_2} = C_{\text{H}^+} C_{\text{HCO}_3} \quad (92a)$$

$$K_{\text{CO}_2} = K'_{\text{HCO}_3} C_{\text{H}_2\text{CO}_3} \quad (92b)$$

$$C_{\text{H}_2\text{CO}_3} = 0,0265 \exp(-0,0342T_w) \quad (92c)$$

T_w = veden lämpötilä, °C

Alumiinin reaktio 85a ja raudan reaktio 88a toimivat vain saostumisen suuntaan. Toisin sanoen rautaa ja alumiinia ei tässä yhteydessä voi liueta. Lisäksi laskentaan sisältyy humuksen karboksyyliiryhmän reaktio:



$$K_{\text{HFA}} = C_{\text{H}^+} C_{\text{FA}^-} / C_{\text{HFA}} \quad (93b)$$

Tasapainovakiassa K_{HFA} ei ole lämpötilariippuvuutta.

Ainevirtaamat saadaan kertomalla seosveden virtaama tasapainolaskennan tuloksena saaduilla konsentraatioilla. Mahdollisesti saostuva rauta lasketaan mukaan raudan kokonaiskonsentraatioon.

3.2.13 Padotus

Padotuksella vaikutetaan maaveden virtaukseen siten, että pohjaveden pinnan taso pysyy keskimäärin korkeammalla kuin ilman padotusta. Laskennoissa padotus toteutetaan asettamalla salaojien korkeustaso lähemmäksi maan pintaa kuin ilman padotusta tehdyissä laskennoissa käytettävä 1,2 m. Malli on sama kuin kohdassa 3.2.4 esitetty.

3.2.14 Pellon kalkitus

Kalkitus mallinnetaan lisäämällä kohdan 3.2.11 maaveden reaktiotasapainon laskentaan ylimmässä maakerroksessa neutralointireaktio:



Vastaava tasapainoyhtälö on

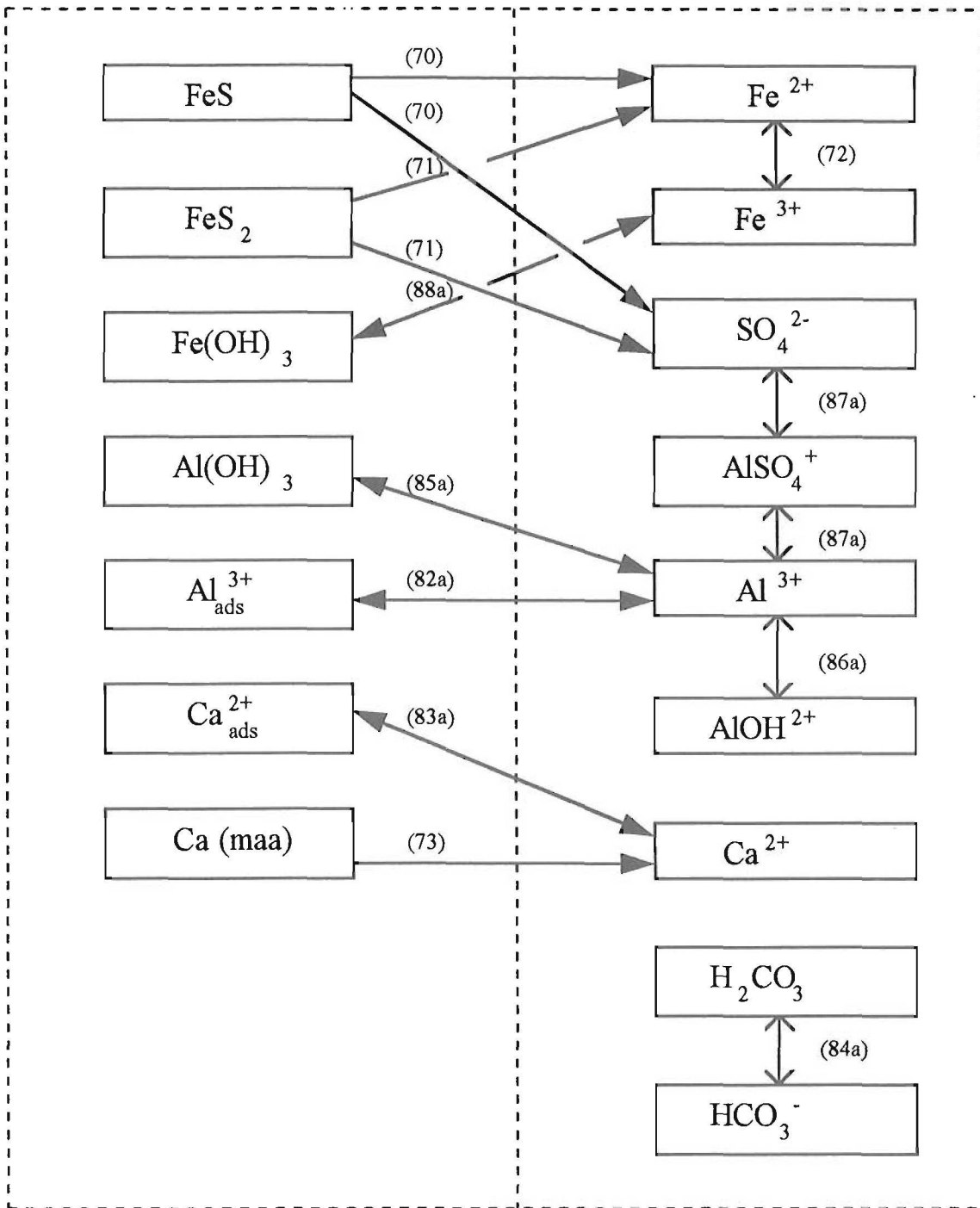
$$K_{\text{CaCO}_3} = C_{\text{Ca}^{2+}} C_{\text{HCO}_3^-} / C_{\text{H}^+} \quad (94b)$$

Reaktioon 94a osallistuvan kalkin määrä on kalkin neutralointikyvyn osoittama osa maahan lisättävän kalkin kokonaismäärästä.

Kalkituksen vaikutuksen eteneminen alempiin kerroksiin tapahtuu liuenneiden aineiden kulkeutumisen ja dispersion seurauksena.

MAA

MAAVESI



Numerot viittaavat kaavojen numerointiin.

Kuva 5. Maaperän kemialliset reaktiot.

3.3 Sivupaluma-alue

3.3.1 Sade ja lumi

Sade- ja lumimalli on sama kuin vastaava sulfaattimaa-alueen malli, joka on esitetty kohdassa 3.2.1.

3.3.2 Haihdunta

Haihduntamalli on pääosin sama kuin vastaava sulfaattimaa-alueen malli, joka on esitetty kohdassa 3.2.2. Erona on sivupaluma-alueen maavesivarastosta tapahtuva haihdunta, joka lasketaan seuraavasti:

$$E_{mv} = K_{E2}E_{lp} \quad (95)$$

E_{mv} = maavesivarastosta tapahtuva haihdunta, m/s

E_{lp} = kohdan 3.2.2 kaavalla 19 laskettava haihdunta, m/s

$$K_{E2} = 0, \text{ kun } S_{mv} \leq S_{mv3} \quad (96a)$$

$$K_{E2} = (S_{mv} - S_{mv3}) / (S_{mv4} - S_{mv3}), \text{ kun } S_{mv3} < S_{mv} < S_{mv4} \quad (96b)$$

$$K_{E2} = 1, \text{ kun } S_{mv} \geq S_{mv4} \quad (96c)$$

S_{mv} = maavesivaraston koko, m

S_{mv3} = maavesivaraston rajakoko (parametri), jonka alapuolella haihdunta = 0

S_{mv4} = maavesivaraston rajakoko (parametri), jonka yläpuolella haihdunta on yhtä suuri kuin lumen pinnasta tai painannesäilyntävarastosta tapahtuva haihdunta, m

3.3.3 Valunta

Sivupaluma-alueen konseptuaalisissa mallissa on lumivaraston lisäksi neljä muuta varastotyyppiä. Nämä ovat ylhäältä alaspäin painannesäilyntävarasto, maavesivarasto, välivarasto ja pohjavesivarasto. Alueelta tuleva kokonaisvirtaama on eri varastoista tulevien virtaamien summa:

$$Q_{sv} = (q_{ps} + q_{vv} + q_{mv} + q_{pv})A_{sv} \quad (97)$$

Q_{sv} = sivupaluma-alueen kokonaisvirtaama, m³/s

q_{ps} = valunta painannesäilyntävarastosta, m/s

q_{mv} = valunta maavesivarastosta, m/s

q_{vv} = valunta välivarastosta, m/s

q_{pv} = valunta pohjavesivarastosta, m/s

A_{sv} = sivupaluma-alueen pinta-ala (lähtötieto), m²

Varastojen muutokset ja valunnat lasketaan yhdellä aika-askeleella peräkkäin seuraavasti. Indeksii ⁰ viittaa aika-askeleen alun arvoihin.

Painannesäilyntävarasto

Painannesäilyntävaraston muutos aika-askeleella Δt on

$$S_{ps} = S_{ps}^0 + (P_{ps} + Y_{sn} - Y_{ps} - q_{ps} - E_{ps})\Delta t \quad (98)$$

S_{ps} = painannesäilyntävarasto, m

P_{ps} = sadanta painannesäilyntävarastoon, m/s

Y_{sn} = purkautuminen lumivarastosta painannesäilyntävarastoon, m/s

Y_{ps} = purkautuminen painannesäilyntävarastosta maavesivarastoon, m/s

q_{ps} = purkautuminen painannesäilyntävarastosta valunnaksi, m/s

E_{ps} = haihdunta painannesäilyntävarastosta, m/s

$$P_{ps} = 0, \text{ kun } W_{sn} = 0 \quad (99a)$$

$$P_{ps} = P_w, \text{ kun } W_{sn} = 0 \text{ ja } S_{ps} > 0 \quad (99b)$$

$$P_{ps} = P_w - I_{mv}, \text{ kun } W_{sn} = 0 \text{ ja } S_{ps} \quad (99c)$$

I_{mv} = imeytyminen maavesivarastoon, m/s

$$Y_{ps} = 0, \text{ kun } S_{ps} = 0 \quad (100a)$$

$$Y_{ps} = I_{mv}, \text{ kun } S_{ps} \leq 0 \quad (100b)$$

$$q_{ps} = 0, \text{ kun } S_{ps} \leq S_{psr} \quad (101a)$$

$$q_{ps} = k_{q1}(S_{ps} - S_{psr}), \text{ kun } S_{ps} > S_{psr} \quad (101b)$$

S_{psr} = painannesäilyntävaraston rajakoko (parametri), m

k_{q1} = purkautumiskerroin (parametri), 1/q1

Maavesivarasto

Maavesivaraston muutos aika-askeleella Δt

$$S_{mv} = S_{mv}^0 + (I_{mv} - I_{vv} - q_{mv} - E_{mv})\Delta t \quad (102)$$

S_{mv} = maavesivarasto, m

I_{mv} = imeytyminen maavesivarastoon, m/s

I_{vv} = imeytyminen välivarastoon, m/s

q_{mv} = purkautuminen maavesivarastosta valunnaksi, m/s

E_{mv} = haihdunta maavesivarastosta, m/s

$$I_{mv} = Y_{sn}, \text{ kun } W_{sn} > 0 \text{ ja } S_{ps} = 0 \quad (103a)$$

$$I_{mv} = I_{mvmax}, \text{ kun } S_{ps} > 0 \quad (103b)$$

$$I_{mv} = P_w, \text{ kun } W_{sn} = 0 \text{ ja } S_{ps} = 0 \text{ ja } P_w < I_{mvmax} \quad (103c)$$

$$I_{mv} = I_{mvmax}, \text{ kun } W_{sn} = 0 \text{ ja } S_{ps} = 0 \text{ ja } P_w \geq I_{mvmax} \quad (103d)$$

$$I_{mvmax} = k_{11}S_{ps} + k_{12}S_{mv} \quad (103e)$$

k_{11} = imeytymiskerroin (parametri), 1/s

k_{12} = imeytymiskerroin (parametri), 1/s

$$I_{vv} = 0, \text{ kun } S_{mv} \leq S_{mv1} \quad (104a)$$

$$I_{vv} = I_{mv}((S_{mv} - S_{mv1}) / (S_{mvmax} - S_{mv1}))^r, \text{ kun } S_{mv} > S_{mv1} \quad (104b)$$

S_{mv1} = maavesivaraston rajakoko (parametri), jonka alapuolella ei tapahdu imeytymistä välivarastoon, m

S_{mvmax} = maavesivarasto maksimikoko (parametri), m

r = potenssiinkorotuskerroin (parametri), m

$$q_{mv} = 0, \text{ kun } S_{mv} \leq S_{mv2} \quad (105a)$$

$$q_{mv} = k_{q2}(S_{mv} - S_{mv2}), \text{ kun } S_{mv} > S_{mv2} \quad (105b)$$

S_{mv2} = maavesivarasto rajakoko (parametri), jonka alapuolella ei tapahdu purkautumista valunnaksi, m

k_{q2} = purkautumiskerroin (parametri), 1/s

Välivarasto

Välivaraston muutos aika-askeleella Δt :

$$S_{vv} = S_{vv}^0 + (I_{vv} - I_{pv} - q_{vv})\Delta t \quad (106)$$

S_{vv} = maavesivarasto, m

I_{pv} = imeytyminen pohjavesivarastoon, m/s

q_{vv} = purkautuminen välivesivarastosta valunnaksi, m/s

$$I_{pv} = k_{13}S_{vv} \quad (107)$$

k_{13} = imeytymiskerroin (parametri), 1/s

$$q_{vv} = k_{q3}S_{vv} \quad (108)$$

k_{q3} = purkautumiskerroin (parametri), 1/s

Pohjavesivarasto

Pohjavesivaraston muutos aika-askeleella Δt :

$$S_{pv} = S_{pv}^0 + (I_{pv} - q_{pv})\Delta t \quad (109)$$

S_{pv} = pohjavesivarasto, m

q_{pv} = purkautuminen pohjavesivarastosta valunnaksi, m/s

$$q_{pv} = k_{qt}S_{pv} \quad (110)$$

k_{qt} = purkautumiskerroin (parametri), 1/s

3.3.4 Veden laatu ja ainevirtaamat

Sivuvaluma-alueen veden laatua ei lasketa vaan se annetaan lähtötietona. Ainevirtaamat saadaan kertomalla virtaama annetuilla konsentraatioilla. Sivuvalluma-alueelta tulevan raudan oletetaan olevan saostuneessa muodossa, joten se ei osallistu seosveden reaktioihin. Alumiini ja sulfaatti ovat liuenneessa muodossa.

3.4 Seosvesi

3.4.1 Kulkeutuminen

Seosvesi muodostuu sulfaattimaa-alueilta ja sivuvalluma-alueilta tulevista virtaamista. Seosveden viipymä mahdollisessa altaassa on

$$t_v = V/Q \quad (111)$$

t_v = veden viipymä altaassa, s

V = altaan tilavuus (lähtötieto), m³

Q = virtaama, m³/s

3.4.2 Sekoittuminen, reaktiotasapaino ja ainevirtaamat

Vedessä oleville aineille lasketaan aluksi virtaamalla painotettu keskiarvo. Sen jälkeen lasketaan seosveden tasapaino vastaavasti kuin kuivatusojjiin tuleville vesille kohdassa 3.2.12. Ainevirtaamat saadaan kertomalla seosveden virtaama tasapainolaskennan tuloksena saaduilla konsentraatioilla. Sulfaatin, alumiinin ja raudan ainevirtaamiin sisältyvät kaikki mallissa mukana olevat ko. aineen liuenneet yhdisteet. Sen lisäksi raudan ainevirtaamassa on mukana sivuvalluma-alueelta tuleva saostunut rauta, sulfaattimaa-alueelta tuleva saostunut rauta ja seosvedessä saostunut rauta.

3.4.3 Kalkitus

Seosveden neutraloinnissa käytettävä kalkkimäärä suhteutetaan veden asiditeettiin, joka tässä määritellään seuraavasti

$$\begin{aligned} \text{Acy} = & C_{\text{H}^+} + C_{\text{Al}^{3+}} + 2C_{\text{AlOH}^{2+}} + 3C_{\text{AlSO}_4^+} + 3C_{\text{Fe}^{3+}} \\ & + 2C_{\text{Fe}^{2+}} + C_{\text{HFA}} \end{aligned} \quad (112)$$

Tässä C:t ovat seosveden tasapainolaskennan jälkeisiä konsentraatioita. Neutraloinnissa käytettävä kalkkimäärä on

$$C_{\text{CaCO}_3} = K_N \text{Acy}/2 \quad (113)$$

K_N = kerroin (lähtötieto)

Tämän jälkeen lasketaan uusi reaktiotasapaino, jossa on mukana yhtälö



Vastaava tasapainoyhtälö on

$$K_{\text{CaCO}_3} = C_{\text{Ca}^{2+}} C_{\text{HCO}_3^-} / C_{\text{H}^+} \quad (114b)$$

Tasapainon jälkeen lasketaan seosvedelle raudan hapettuminen vastaavasti kuin kohdassa 3.2.9 ja sen jälkeen vielä kerran reaktiotasapaino.

3.5 Numeeriset ratkaisumenetelmät

3.5.1 Virtaus ja kulkeutuminen maaperässä

Virtaus- ja kulkeutumisyhtälöt on mallissa diskretoitu jakamalla tarkasteltava maaprofiili kerroksiin ja integroimalla yhtälöt implisiittisesti kerrosten muodostamien control-boxien yli. Esimerkiksi yhtälön 80 diskretoitu muoto on seuraava (liuennan aineen kulkeutuminen maavedessä):

$$r_M C_M = r_E C_E + r_B C_B + r_M^0 C_M^0 + d \quad (115a)$$

$$r_E = q_E / (\exp(P_E) - 1) \quad (115b)$$

$$r_B = q_B (1 + 1/(\exp(P_B) - 1)) \quad (115c)$$

$$r_M^0 = \theta_M^0 \Delta Z_M / \Delta t \quad (115d)$$

$$r_M = r_E + r_B + r_M^0 + (S_{rM} - S_{eM}) \Delta Z_M \quad (115e)$$

$$d = S_{rM} C_{rM} \Delta Z \quad (115f)$$

Tässä alaindeksi M tarkoittaa tarkasteltavaa kerrosta, B sen yläpuolista ja E sen alapuolista kerrosta. Z_M on kerroksen M paksuus. C on konsentraatio aika-askeleen alussa (tunnettu konsentraatio). P_b ja P_E ovat Peclet'in luvut kerroksen M ylä- ja alareunalla. $S_{eM}\Delta Z_M$ on haihdunta kerroksesta M ja $S_{rM}\Delta Z$ rakoilun vaikutus. C_{rM} on raoista tulevan veden konsentraatio.

Diskretoinnin tuloksena syntyy yhtälöryhmä, josta tuntemattomien arvot voidaan ratkaista. Mallissa ratkaisu suoritetaan Thomas-algoritmilla.

3.5.2 Kemiallinen reaktiotasapaino

Kemiallisen tasapainon numeerisena esimerkkinä käsitellään maaveden tasapainon laskentaa. Reaktioyhtälöiden perusteella saadaan peruskomponenteiksi valittujen ionien H^+ , H^+_{ads} , Al^{3+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} ja Fe^{3+} kokonaiskonsentraatioille seuraavat lausekkeet:

$$C_{H^+}^T = C_{H^+} + C_{H^+}^{M1} + C_{H^+}^{M2} - 3C_{Al^{3+}ads}/\theta_w - 2C_{Ca^{2+}ads}/\theta_w - C_{HCO_3^-} - C_{AlOH_2^+} \quad (116a)$$

$$C_{H^+ads}^T = C_{H^+ads} + 3C_{Al^{3+}ads} + 2C_{Ca^{2+}ads} \quad (116b)$$

$$C_{Al^{3+}}^T = C_{Al^{3+}} - C_{H^+}^{M1}/3 + C_{Al^{3+}ads}/\theta_w + C_{AlOH_2^+} + C_{AlSO_4^+} \quad (116c)$$

$$C_{Ca^{2+}}^T = C_{Ca^{2+}} + C_{Ca^{2+}ads}/\theta_w \quad (116d)$$

$$C_{SO_4^{2-}}^T = C_{SO_4^{2-}} + C_{AlSO_4^+} \quad (116e)$$

$$C_{Fe^{3+}}^T = C_{Fe^{3+}} - C_{H^+}^{M2} \quad (116f)$$

Näissä lausekkeissa ovat $C_{H^+}^{M1}$ ja $C_{H^+}^{M2}$ apumuuttujia, jotka kuvaavat reaktioissa 85a ja 88a saostuvia ainemääriä.

Kokonaiskonsentraatiot voidaan esittää peruskomponenttien konsentraatioiden funktioina, kun lausekkeisiin 116a ... 116f sijoitetaan tasapainovakioiden yhtälöt komponenttien konsentraatioiden suhteen ratkaistuina. Kun kokonaiskonsentraatiot tunnetaan tasapainolaskennan alkaessa, voidaan komponenttien konsentraatiot ratkaista kokonaiskonsentraatioiden lausekkeista. Tämän jälkeen muut konsentraatiot saadaan tasapainovakioiden yhtälöistä.

4

Kalibrointi

4.1 Pajuluoma

4.1.1 Havaintoaineisto

Kalibrointilaskennoissa on käytetty Pajuluoman alueen ilmasto-, maaperä-, valunta- ja vedenlaatuhavaintoja aikaväliltä maaliskuusta -90 toukokuuhun -92. Lisäksi havaintoja on ollut käytettävissä vuoden 94 huhtikuusta elokuuhun.

Alueella on havaittu sadanta (mm/d) ja lämpötila (°C) päivittäin. Ne sekä kumulatiivinen sadanta (m) vuosille 90-94 on esitetty kuvassa 6. Välin toukokuusta -92 huhtikuuhun -94 sadanta ja lämpötila on saatu Ylistaron säähavaintoaseman tilastoista. Astiahaidunnat (mm) on havaittu Ylistarossa touko-syyskuun välisiltä ajoilta viiden päivän jaksoina. Haihdunnat on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Havaitut astiahaidunnat (mm) viiden päivän jaksoina Ylistarossa.

VUOSI 1990

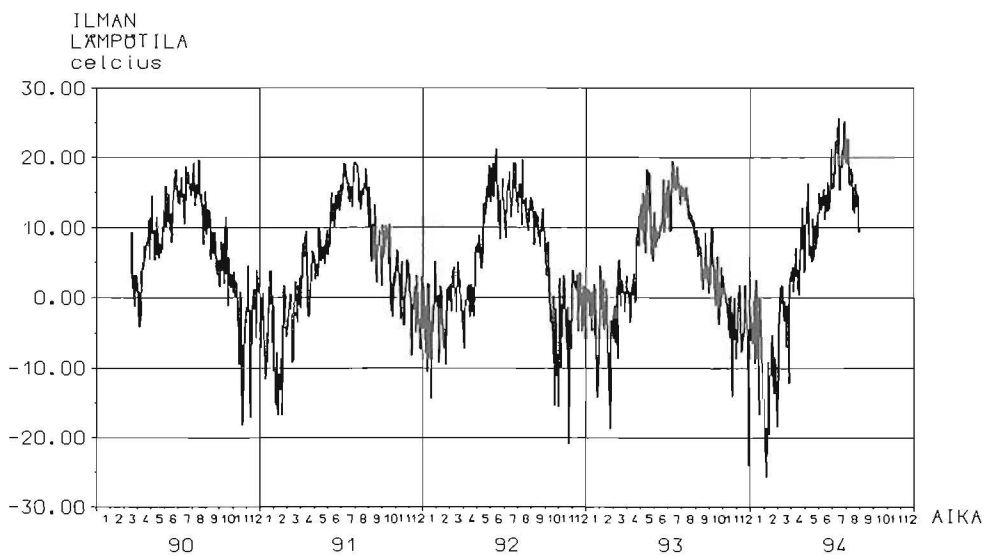
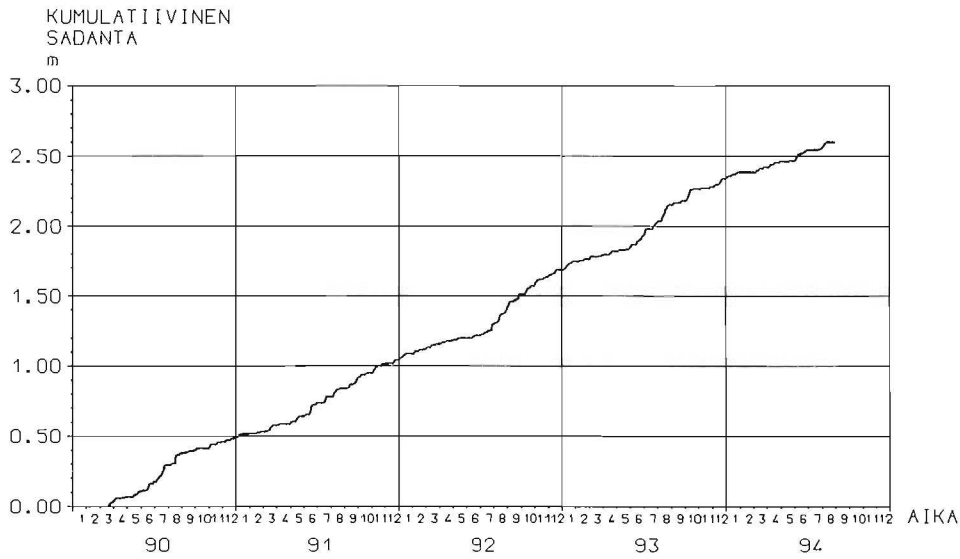
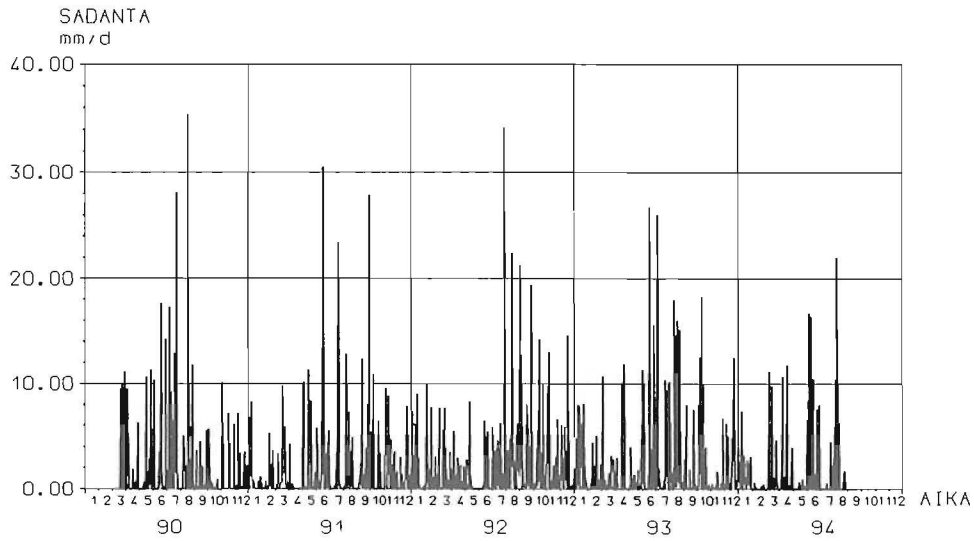
Toukokuu	33	28	29	22	8	27
Kesäkuu	21	30	27	11	29	27
Heinäkuu	22	17	9	13	18	27
Elokuu	25	16	15	16	13	10
Syyskuu	12	8	7	7	4	3

VUOSI 1991

Toukokuu	8	17	17	11	14	24
Kesäkuu	12	21	10	21	20	15
Heinäkuu	25	34	21	16	16	27
Elokuu	19	15	13	8	14	19
Syyskuu	19	6	6	7	5	5

VUOSI 1992

Toukokuu	12	17	29	29	30	45
Kesäkuu	39	38	32	24	25	34
Heinäkuu	17	27	19	11	28	25
Elokuu	19	15	9	7	9	8
Syyskuu	4	9	6	5	6	5



Kuva 6. Pajuluoman / Ylistaron havaittu sadanta (mm/d), kumulatiivinen sadanta (m) ja lämpötila (°C). Vuodet 90-94.

Laskentojen alkutilanteen muodostamiseksi on maaperästä tarvittu havainnot rikistä (S), alumiinista (Al^{3+}_{ads}), kalsiumista (Ca^{2+}_{ads}) ja magnesiumista (Mg^{2+}_{ads}). Näiden aineiden konsentraatiot on laskettu kuudelta havaintopaikalta saatujen konsentraatioiden keskiarvona. Arvot niiltä syvyyksiltä, joilta ei ole ollut havainnotoja, on laskettu interpoloimalla syvyyden suhteen lineaarisesti kahden lähimmän havaitun arvon väliltä. Laskennassa rikin kokonaismäärä on jaettu raudan suhteen tasan rautamonosulfidin (FeS) ja pyriitin (FeS_2) kesken. Kalsiumin ja magnesiumin määrät on laskettu yhteen ja sijoitettu kalsiumin arvoksi. Aineiden alkukonsentraatiot (mol/m^3) syvyyden funktiona on esitetty kuvassa 7.

Tarkasteltavana ajanjaksona Pajuluoman pumppaamolla pumpatut vesimäärät (m^3/d) ja niistä summaamalla saatu kumulatiivinen vesimäärä (m^3) on esitetty kuvassa 8.

Pajuluoman pumppaamon altaan veden laadun havainnot on esitetty kuvassa 9. Aineet ovat pH, alumiini (Al, mg/l), sulfaatti (SO_4 , mg/l) ja rauta (Fe, ug/l).

Pumppaamon ainekuormat on generoitu vesimäärähavainnoista ja veden laadun havainnoista. Pumppauspäivän vesimäärä on kerrottu saman päivän konsentraatiolla. Jos ko. päivänä ei ole havaittu veden laatua, on se laskettu lineaarisena interpolointina kahdesta lähimmästä havainnosta. Kumulatiiviset ainekuormat on saatu summaamalla pumppauspäivien ainekuormat. Kumulatiiviset kuormat on esitetty kohdan 4.1.3 kalibrointilaskentojen tuloskuvassa 13.

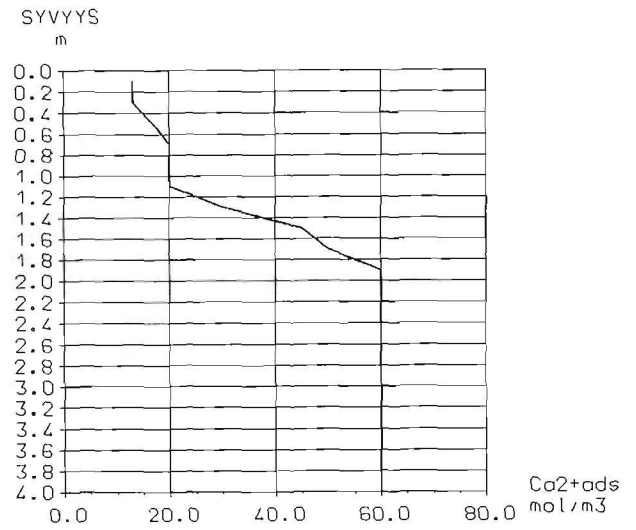
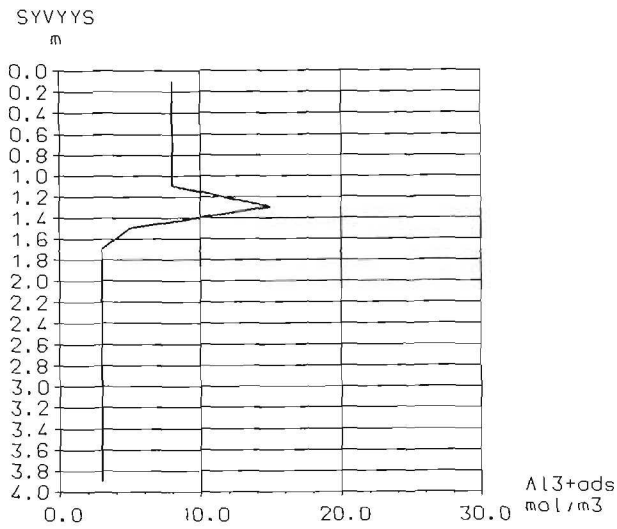
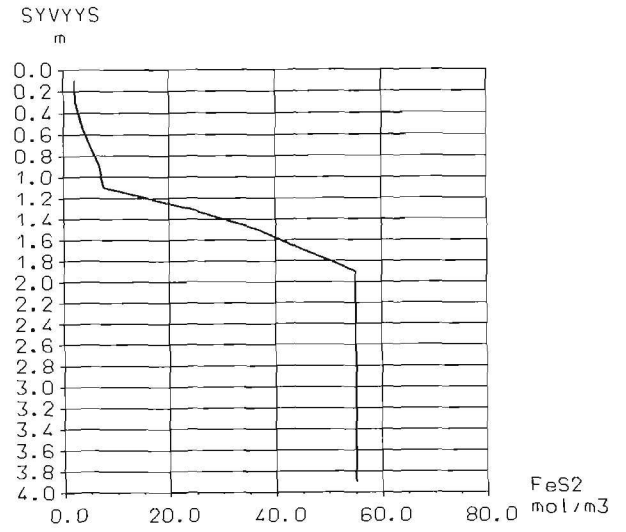
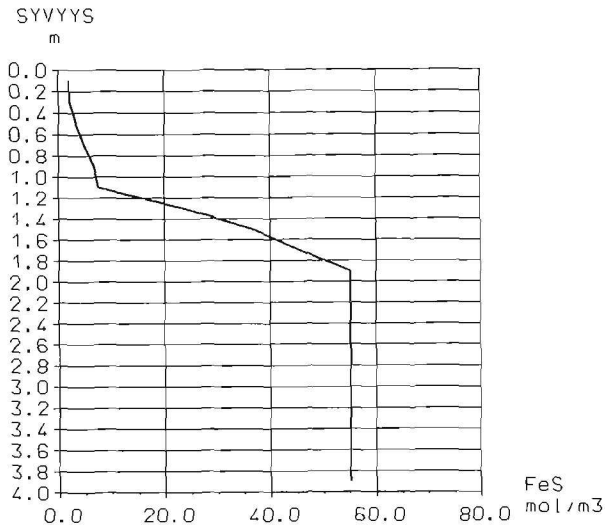
Virtaama- ja vedenlaatu havainnot vuoden 94 huhtikuusta elokuuhun on esitetty kuvissa 10 ja 11.

4.1.2 Menetelmä

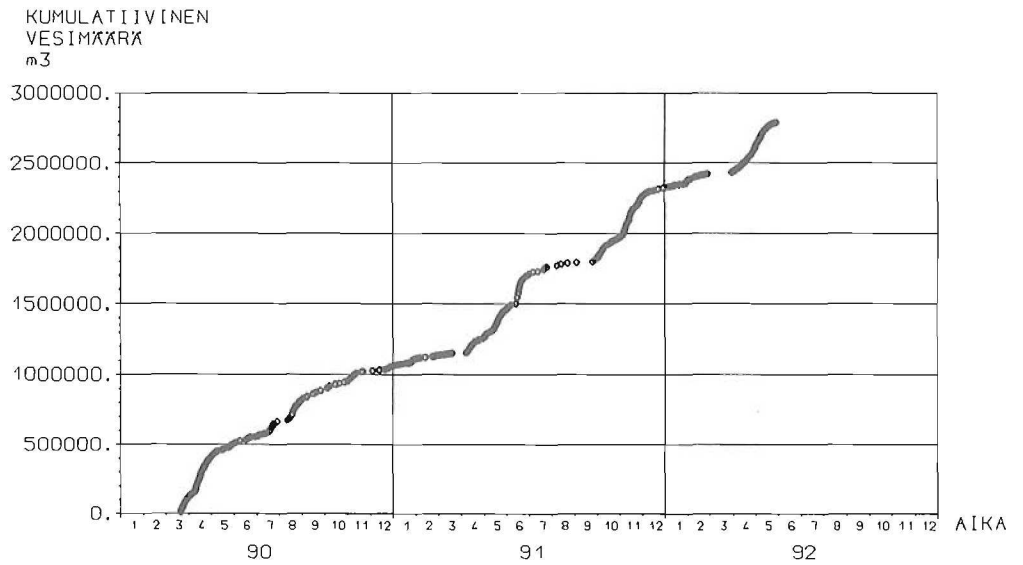
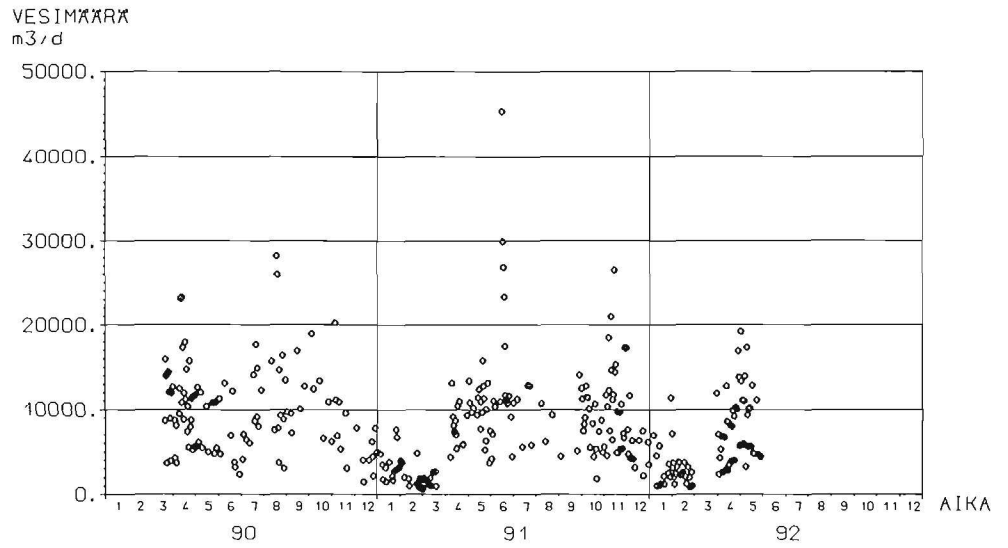
Pajuluoman valuma-alue $7,7 km^2$ on laskennoissa jaettu kahteen osaan. Peltoja kuvaavan sulfaattimaa-alueen pinta-ala on $4,1 km^2$ eli 53 % koko alasta. Loput $3,6 km^2$ eli 47 % koko alasta on sivuvaluma-alueita. Laskenta-ajankohta on 19.03.90 - 17.05.92 eli 790 päivää. Aika-askeleena on yksi päivä.

Kalibrointilaskennat on suoritettu kahdessa vaiheessa. Ensin on kalibroitu erikseen molempien osa-alueiden virtaamamallin parametrit olettamalla, että simulointiaikana pumppaamolle tuleva vesimäärä kertyy osa-alueilta niiden pinta-aloja vastaavasti. Vertailu on tehty alueittain kumulatiivisille vesimäärille (m^3).

Toisessa vaiheessa on kalibroitu veden laatumallin parametrit siten, että lasketut kumulatiiviset ainekuormat on saatu mahdollisimman hyvin vastaamaan pumppaamon havaittuja ainekuormia. Sivuvaluma-alueelta tulevan veden konsentraatiot ovat olleet vakioita, joten laatumallin parametrien kalibrointi on koskenut vain sulfaattimaa-alueita.

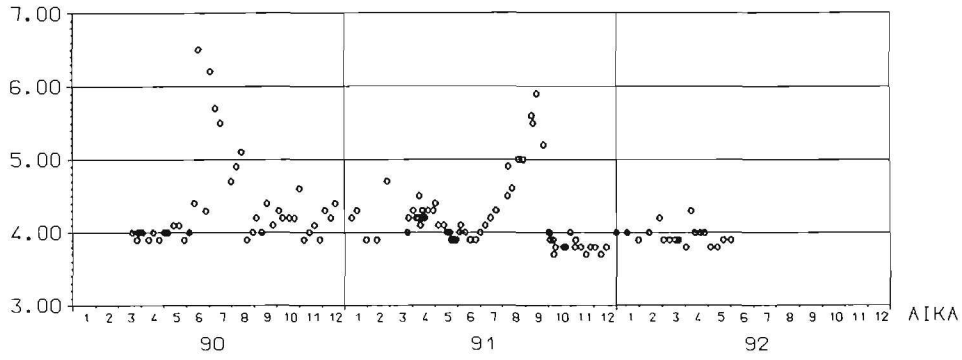


Kuva 7. Pajuluoman maaperän aineiden alkukonsentraatiot: rautamonosulfidi (mol/m^3), pyriitti (mol/m^3), vaihtuva alumiini (mol/m^3) ja vaihtuva kalsium (mol/m^3).

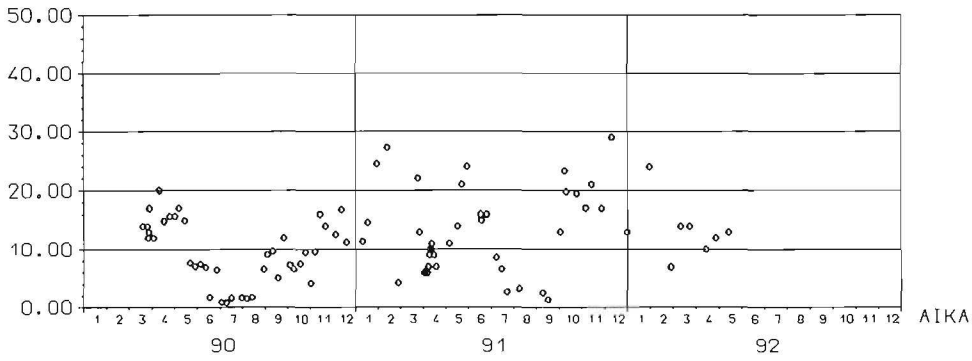


Kuva 8. Pajuluoman havaittu pumpattu vesimäärä (m³/d) ja kumulatiivinen vesimäärä (m³). Vuodet 90-92.

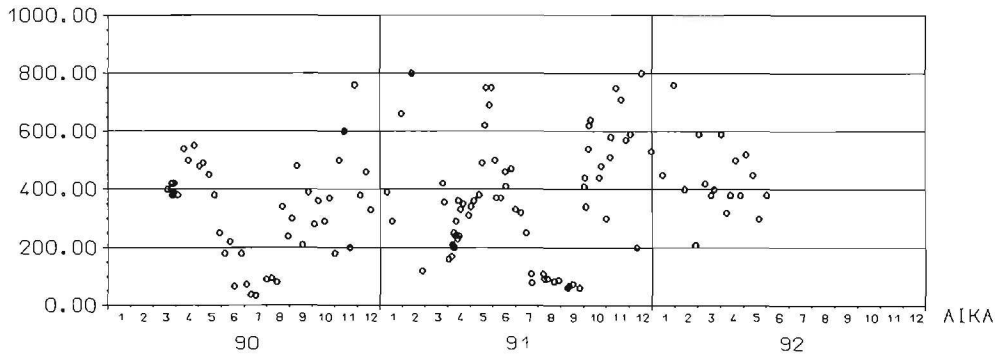
pH



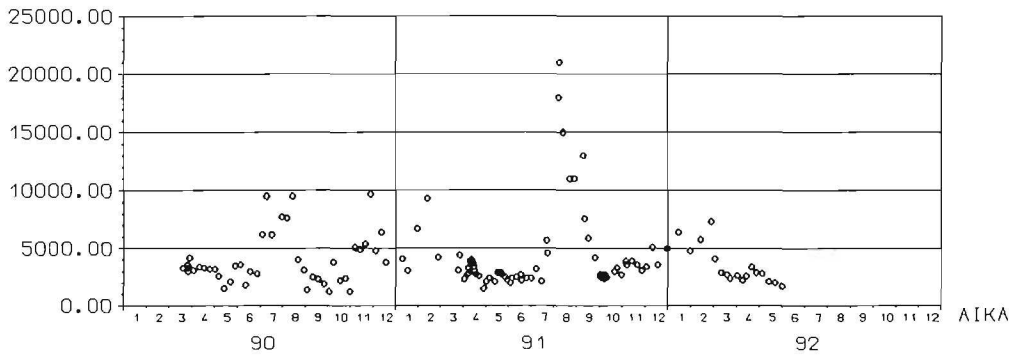
ALUMIINI
mg/l



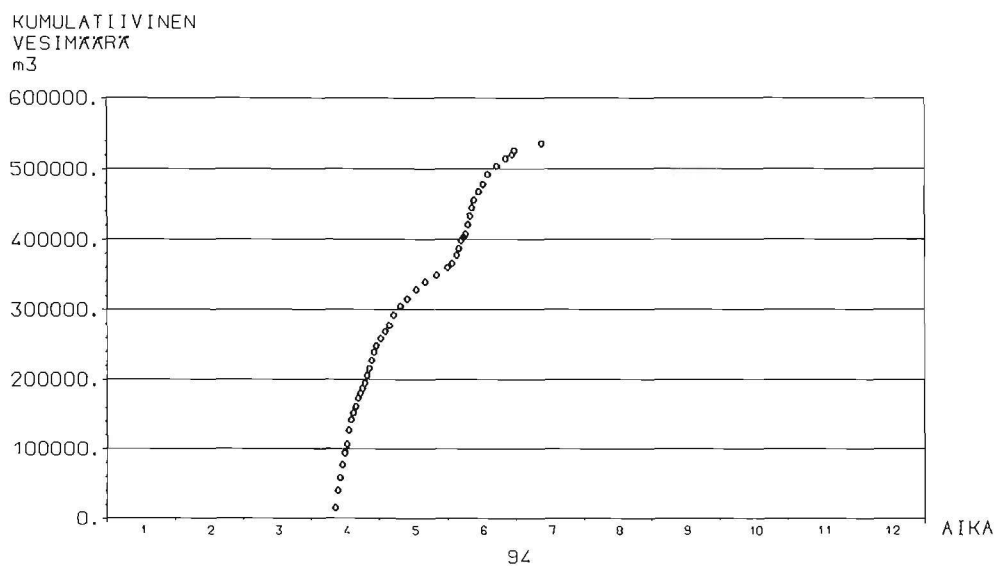
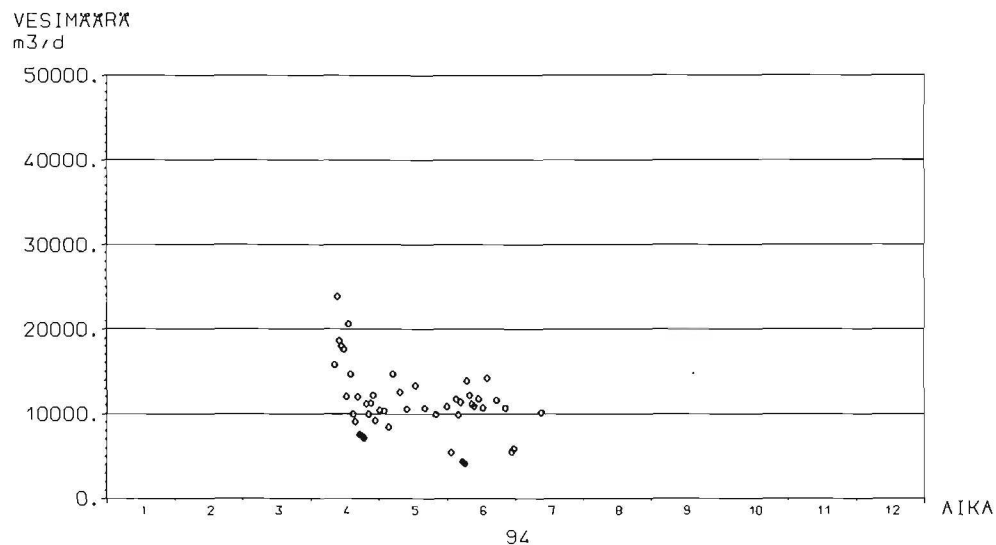
SULFAATTI
mg/l



RAUTA
ug/l

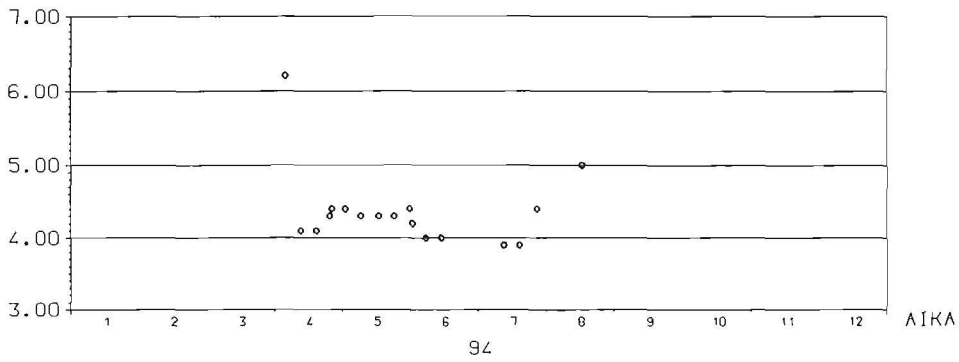


Kuva 9. Pajuluoman pumppaamon veden laadun havainnot: pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta (ug/l). Vuodet 90-92.

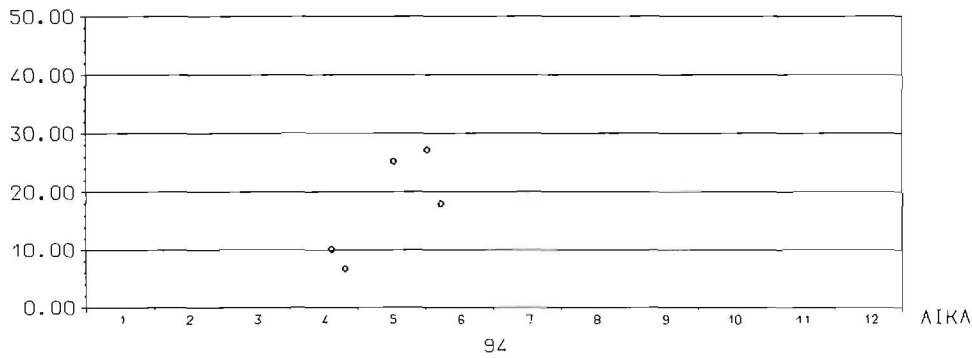


Kuva 10. Pajuluoman havaittu pumpattu vesimäärä (m³/d) ja kumulatiivinen vesimäärä (m³). Vuosi -94.

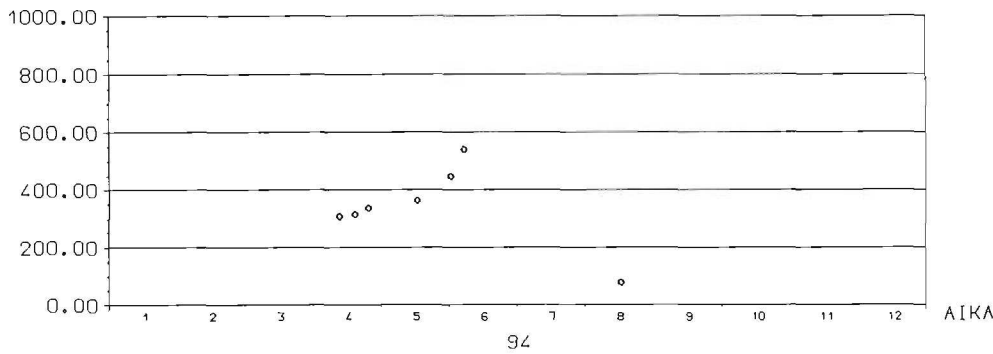
pH



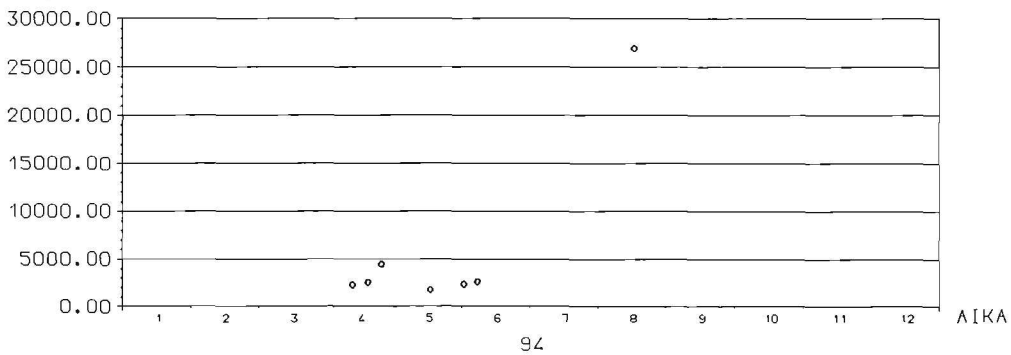
ALUMIINI
mg/l



SULFAATTI
mg/l



RAUTA
ug/l



Kuva 11. Pajuluoman pumppaamon veden laadun havainnot: pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta (ug/l). Vuosi -94.

Sulfaattimaa-alueen virtaama

Sulfaattimaa-alueen maaprofiili on laskentoja varten jaettu 20:een 0,20 m paksuun maakerrokseen eli kokonaissyvyys on ollut 4,0 m. Salaojasyvyudeksi on laskennoissa asetettu 1,2 m. Muut salaojiin liittyvät vakiot on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Laskennoissa käytetyt salaojiin liittyvät vakiot.

L	20,0	m
d	2,8	m
r	0,02	m

Maan kiintoainepitoisuudeksi on asetettu koko maaprofiilissa 0,34, maan tiheydeksi 2700 kg/m³ ja kutistumiskäyränä on käytetty taulukon 3 mukaista käyrää.

Taulukko 3. Laskennoissa käytetty kutistumiskäyrä.

η	e
0	0,7
0,50	0,8
1,0	1,0
1,94	1,94

Haihduntasyvyys on laskennoissa ollut 0,2 m eli haihdunta on ulottunut ylämpään maakerrokseen. Salaojaan tulevan virtaaman on oletettu jakaantuvan kerrospaksuuksien suhteessa kaikille pohjaveden pinnan alaisille kerroksille. Pohjaveden lämpötila maakerroksen pohjalla on ollut 3 °C. Lämpötilamallissa käytettyjen vakioiden arvot on koottu taulukkoon 4.

Taulukko 4. Lämpötilamallin vakioiden arvot.

C_w	4200	J/kg/°C
ρ_w	1000	kg/m ³
C_i	2115	J/kg/°C
ρ_i	917	kg/m ³
C_s	800	J/kg/°C
T_f	-5,0	°C
L_f	334000	J/kg

Kalibroinnin kannalta tärkeimmät sulfaattimaa-alueen virtaamamallin parametrit ovat liittyneet haihduntaan, veden kulkeutumisenopeuteen maaperässä ja salaojiin poistuvan veden määrään. Simulointiajan sadantaa ja pumpattuja vesimääriä vertaamalla on todettu, että noin 30 % sataneesta vesimäärästä on tullut pumppamolle, loput on haihtunut. Salaojiin poistuvan veden määrää on säädetty salaojien kalenterikuukausittaisilla vedenläpäisevyyksillä ja veden

kulkeutumista maaperässä maan vedenjohtavuudella ja rakoilulla. Muut tekijät kuten lumi ja jäätyminen ovat vaikuttaneet osaltaan kulkeutumiseen ja pohjaveden pinnan vaihteluihin mutta eivät niinkään veden kokonaisuuteen.

Maaperän hydrologinen alkutilanne sekä mahdollinen lumitilanne laskennan alussa on arvioitu käytettävissä olevien havaintojen perusteella. Laskennoissa käytetty lumen alkutilanne on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. Lumen alkutilanne laskennoissa.

W_{sn}	0,07	m
d_{sn}	0,23	m
θ_{ice}	0,25	
θ_w	0,07	

Hydrologisella alkutilanteella tarkoitetaan kerroksittain painepotentiaalia, lämpötilaa ja jääpitoisuutta. Painepotentiaali on pohjaveden pinnalla nolla, siitä alaspäin kerrospaksuuksia vastaavasti positiivinen ja ylöspäin negatiivinen. Alkutilanne on ollut osittain kalibroitu siten, että laskennan alkupäivinä on saatu maasta kuivatusojiin tulemaan havaintoja vastaavat vesimäärät. Laskennan alkutilanne on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Laskennan alkutilanne sulfaattimaa-alueella: painepotentiaali (m) ja maaveden lämpötila (°C)

Syvyys (m)	h (m)	T (°C)
0,1	-1,0	0,1
0,3	-0,8	0,2
0,5	-0,6	0,4
0,7	-0,4	0,6
0,9	-0,2	0,8
1,1	0,0	1,0
1,3	0,2	1,2
1,5	0,4	1,4
1,7	0,6	1,6
1,9	0,8	1,8
2,1	1,0	2,0
2,3	1,2	2,1
2,5	1,4	2,2
2,7	1,6	2,3
2,9	1,8	2,4
3,1	2,0	2,5
3,3	2,2	2,6
3,5	2,4	2,7
3,7	2,6	2,8
3,9	2,8	2,9

Sivuvaluma-alueen virtaama

Sivuvaluma-alueen virtaamamallin parametrien kalibrointi on koskenut haihduntaa, purkautumista eri varastotyypeistä ja imeytymistä varastotyyppien välillä. Haihdunnalla on säädetty maaperään tulevan veden määrää kuten sulfaattimaa-alueellakin. Maasta poistuvan veden määrää ja jakautumista eri varastotyyppien kesken on säädetty purkautumiskertoimilla ja -rajoilla. Veden kulkeutumisen viivettä on säädetty imeytymiskertoimilla ja -rajoilla. Lumimallissa on käytetty samoja parametrien arvoja kuin sulfaattimaa-alueella.

Sivuvaluma-alueen maaperän hydrologinen alkutilanne on muodostunut eri varastotyyppien koosta (m). Alkutilanne on pyritty kalibroimaan sellaiseksi, että alueelta laskennan ensimmäisinä päivinä tuleva vesimäärä on vastannut havaittuja arvoja. Alkutilanne on esitetty taulukossa 7. Lumutilanne on asetettu samaksi kuin sulfaattimaa-alueella.

Taulukko 7. Laskennan alkutilanne sivuvaluma-alueella.

S_{ps}	0,0	m
S_{mv}	0,20	m
S_{vw}	0,39	m
S_{pv}	0,59	m

Sulfaattimaa-alueen veden laatu

Veden laadun kannalta hieman yli kahden vuoden simuloinnin on laskennoissa havaittu olevan lyhyt aika. Maan vesivarasto ei ole ehdinyt simulointiaikana vaihtua kuin osittain. Tällöin maaperässä tapahtuvat prosessit eivät ole kokonaisuudessaan näkyneet kuivatusojiin tulevassa vedessä vaan vaikutus on jäänyt pääosin maaveteen. Tämän vuoksi lyhyessä simuloinnissa on korostunut maaveden liuenneiden aineiden alkukonsentraatioiden valinta.

Laskennan lähtötilanteeksi on annettu maakerroksittain pH, alumiini, sulfaatti, rauta, hiilidioksidi ja happi. Ne on valittu siten, että laskennan alussa pumppaamolle tulevan veden konsentraatiot ovat keskimäärin vastanneet havaittuja arvoja. Liuenneiden aineiden jakautumisesta syvyyden funktiona ei ole kaikkien aineiden osalta ollut täsmällistä tietoa. Alkutilanteeksi on asetettu happea ja pH:ta lukuunottamatta vakiokonsentraatiot läpi maaprofiilin. Alkukonsentraatiot on esitetty taulukossa 8. Maaperän kiinteiden aineiden konsentraatiot ovat kohdan 4.1.1 kuvan 7 mukaiset. Niiden lisäksi $Fe(OH)_3$:n konsentraatioksi on asetettu 10 mol/m^3 ja $Al(OH)_3$:n konsentraatioksi 0 mol/m^3 kaikissa kerroksissa.

Taulukko 8. Maaperän liuenneiden aineiden alkukonsentraatiot (mol/m^3).

Syvyys (m)	pH	Al	SO4	Fe	H ₂ CO ₃	O ₂
0,1	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	0,20
0,3	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	0,20
0,5	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	0,20
0,7	3,9	0,9	8,2	0,09	0,025	0,20

Syvyys (m)	pH	Al	SO4	Fe	H ₂ CO ₃	O ₂
0,9	3,7	0,9	8,2	0,09	0,025	0,20
1,1	3,6	0,9	8,2	0,09	0,025	0,10
1,3	3,5	0,9	8,2	0,09	0,025	0,01
1,5	3,6	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-2
1,7	3,7	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-3
1,9	3,8	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-4
2,1	3,9	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-5
2,3	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-6
2,5	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-10
2,7	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-10
2,9	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-10
3,1	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-10
3,3	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-10
3,5	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-10
3,7	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-10
3,9	4,0	0,9	8,2	0,09	0,025	1E-10

Veden laatumallin kalibroinnissa tärkeimmät parametrit ovat liittyneet rikkiyhdisteiden ja raudan hapettumisen nopeuden säätöön. Osaltaan hapettumiseen ovat vaikuttaneet virtaamamallin puolelta pohjaveden pinnan taso ja maaperän lämpötila. Rikkiyhdisteiden hapettumisen nopeuden säädössä lähtökohtana on ollut sulfaatin määrä. Sulfaattia ei ole muodostunut eikä kulunut merkittävästi muissa prosesseissa. Happamien maiden teoriasta on käytetty tietoa siitä, että kuivatusojiin tulevan veden sulfaattikonsentraatio on ajan myötä hieman laskeva. Vastaavasti raudan hapettumista on pyritty säätämään siten, että maasta ulos tuleva rautakonsentraatio vastaa keskimäärin havaittuja arvoja.

Maakerrosten kemiallisen reaktiotasapainon laskennassa käytetyt tasapainovakioiden arvot lämpötilassa 25 °C sekä reaktioentalpiat on esitetty taulukossa 9. Yleisen kaasuvakion R arvo on 8,314 J/mol/k ja maan kationinvaihtokapasiteetin CEC arvo 88,0 meq/maa-kg.

Taulukko 9. Tasapainovakioiden arvot lämpötilassa 25 °C ja reaktioentalpiat (J).

Tasapainovakio	Arvo	Entalpia (J)
K_{HAIGT}	28,6	
K_{HCaGT}	9,5	
K_{gibb}	316	-106 190
K_{AlOH}	0,0107	90530
K_{AlSO4}	0,001	9588
K_{Fe}	1,1E 16	-409 260
K_{FeOH}	109,6	82407
K_{HFA}	0,3	

Tasapainovakioista K_{gibb} :lle ja K_{AlSO4} :lle on kirjallisuudessa annettu vaihteluvälit, mutta niillä ei näissä laskennoissa ole ollut merkitystä.

Maahan imeytyvälle sade- tai sulamisvedelle on laskennassa asetettu vakio-konsentraatiot, taulukko 10.

Taulukko 10. Laskennassa käytetyt sadeveden pitoisuudet (mol/m³).

pH	4,7
Ca ²⁺	0,011
SO ₄ ²⁻	0,025

Imeytymisveden happi- ja hiilidioksidipitoisuus on ollut tasapainossa ilman vastaavien pitoisuuksien kanssa. Hapen ja hiilidioksidin kulkeutumisen parametrit on säädetty siten, että happi ja hiilidioksidi kulkeutuvat nopeasti maakerrosten ilmahuokosissa. Samoin siirtyminen maaveden ja ilmahuokosten välillä on ollut nopeaa.

Salaojaveden tasapainolaskennassa on käytetty samoja tasapainovakioiden arvoja kuin maaveden tasapainolaskennassa, taulukko 9.

Sivuvaluma-alueen veden laatu

Sivuvaluma-alueen veden laadun vakioarvot on koottu taulukkoon 11.

Taulukko 11. Sivuvalluma-alueen vakio-konsentraatiot (mol/m³).

pH	5,07
Al	0,018
SO ₄	0,032
Fe	0,031

Taulukon 11 konsentraatiot on saatu laskemalla keskiarvot Pajuluoman suoalueen Paukanevan havainnoista simulointiajalta. Sivuvalluma-alueelta tulevat ainekuormat ovat laskentojen perusteella vetyionien, alumiinin ja sulfaatin osalta pieniä verrattuna sulfaattimaa-alueelta tuleviin kuormiin. Sen sijaan raudan kumulatiivisesta kuormasta noin kolmannes on tullut sivuvalluma-alueelta.

Seosvesi

Pajuluoman pumppaamon altaan tilavuus on laskennoissa ollut 6500 m³. Seosvedessä ei ole virtaamamallin osalta kalibroitavia parametreja.

Seosveden kemiallinen reaktiotasapainon laskennassa on käytetty samoja tasapainovakioiden arvoja kuin salaojaveden ja maaveden tasapainon laskennassa, taulukko 9.

Vuosi -94

Edellä kuvatun lisäksi on varsinaisen kalibroinnin jälkeen suoritettu laskenta, jossa simulointia on jatkettu yhtäjaksoisesti vuoden -94 elokuun loppuun asti. Tässä laskennassa on vertailtu havaittuja ja laskettuja arvoja vuoden 94 huhti-

kuusta heinäkuuhun. Tätä aikaväliä ei ole kuitenkaan käytetty kalibroinneissa sen lyhyden vuoksi.

4.1.3 Tulokset

Kumulatiiviseksi vesimääräksi pumppaamalla koko laskenta-ajalta on saatu 2 860 207 m³, joka on 111 149 m³ eli 4 % suurempi kuin vastaava havaittu vesimäärä. Laskettujen ja havaittujen kumulatiivisten vesimäärien eroa on syntynyt syksyisin siten, että lasketut vesimäärät ovat olleet pienempiä kuin havaitut. Keväisin tilanne on ollut päin vastoin eli lasketut vesimäärät ovat olleet havaittujen suurempia, jolloin kumulatiiviset vesimäärät ovat tasoittuneet. Laskenta-ajan suurin ero on ollut noin 210 000 m³ marraskuussa -91, jolloin laskettu määrä on ollut havaittua pienempi.

Sulfaattimaa-alueen kumulatiivinen vesimäärä koko laskenta-ajalta on ollut suunnilleen sama kuin alueen pinta-alaa vastaava osa pumppaamon havaitusta kokonaisuudesta. Tällöin pumppaamon liian suuri vesimäärä on kertynyt sivuvaluma-alueelta. Molemmilla alueilla lasketut vesimäärät ovat olleet syksyisin pienempiä ja keväisin suurempia kuin havaitut vesimäärät. Sulfaattimaa-alueen laskettu kumulatiivinen vesimäärä on ollut lähes koko laskenta-ajan havaittua määrää pienempi tai yhtä suuri.

Vesimäärän kalibroititulos on esitetty kuvassa 12. Ylimmässä kuvassa on verrattu sulfaattimaa-alueelta tulevaa kumulatiivista vesimäärää (m³) vastaavaan vertailukäyrään. Keskimmaisessä kuvassa on tehty sama vertailu koskien sivuvaluma-alueita. Alimmassa kuvassa on verrattu pumppaamon laskettuja ja havaittujen kumulatiivisia vesimääriä (m³).

Sulfaattimaa-alueen kalibroituja parametrien arvot virtaamamallin osalta on koottu taulukkoon 12.

Taulukko 12. Sulfaattimaa-alueen virtaamamallin parametrien kalibroidut arvot.

Maaveden virtaus ja lämpötila

α	2,0	
S_{PSmax}	500	mm
μ	0,015	
θ_{wr}	0,10	
K_s	0,05	m/d
K_i	0,1 (i=1-4)	m/d
	0,2 (i=5)	
	0,25 (i=6-9)	
	0,3 (i=10-12)	
λ	1,5	W/ m/°C

Sade, lumi ja haihdunta

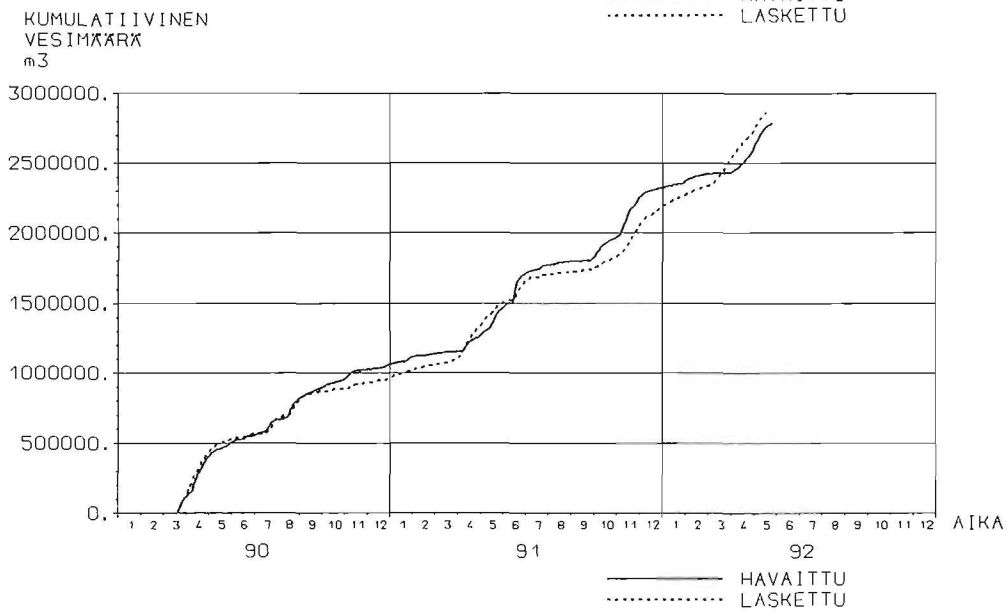
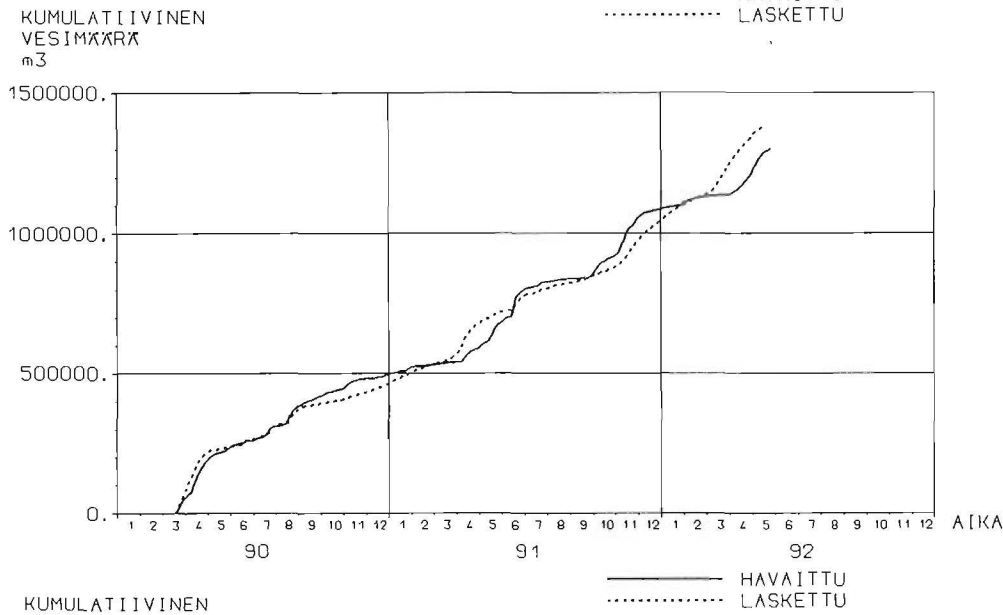
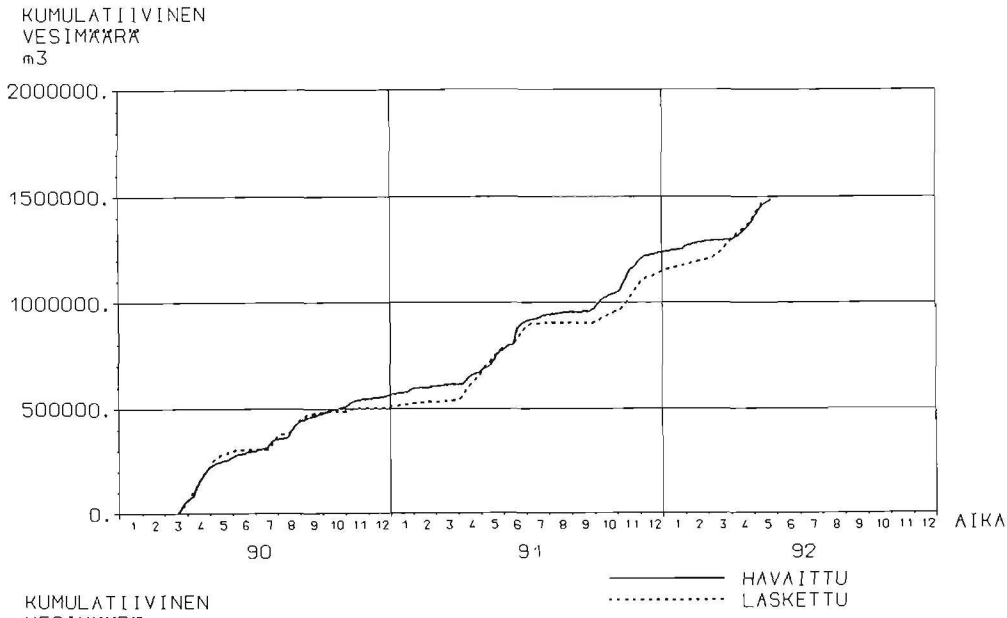
T_a	3,0	°C
T_y	-1,0	°C
T_m	0,8	°C
K_{Mmax}	2,8	mm /°C/d
K_{Mmin}	0,9	mm/°C/d
T_f	-1,9	°C
K_f	2,0	mm /°C ^{1/2} /d
a_{sn}	0,2	
C_1	0,001	l/m/s
C_2	0,021	m ³ /kg
C_3	0,08	l/°C
E_0	0,20	mm/d
T_0	-2,0	°C
K_{Emax}	0,2	mm/°C/d
K_{Emin}	0,03	mm/°C/d
a	0,05	
b	0,135	
h_{E1}	0,0	m
h_{E2}	-0,1	m
h_{E3}	-10	m
h_{E4}	-150	m

Sivuvaluma-alueen virtaamamallin kalibroitujen parametrien arvot on puolestaan koottu taulukkoon 13.

Taulukko 13. Sivuvalluma-alueen kalibroidut parametrit.

S_{mv1}	0,19	m
S_{mv2}	0,19	m
S_{mv3}	0,10	m
S_{mv4}	0,16	m
S_{mvmax}	0,30	m
r	1,0	
k_{i1}	3E-7	l/s
k_{i2}	3E-7	l/s
k_{i3}	2E-9	l/s
k_{q1}	5E-7	l/s
k_{q2}	4E-7	l/s
k_{q3}	2E-9	l/s
k_{q4}	1E-9	l/s
a	0,05	
b	0,135	
E_0	0,21	mm/d

Laskennassa pumppaamon kumulatiiviseksi vetyionimääräksi on saatu 0,032 mol/m², joka on 0,006 mol/m² eli 15 % pienempi kuin vastaava havaittu määrä.



Kuva 12. Pajuluoman havaittujen ja laskettujen kumulatiivisten vesimäärien (m³) vertailu. Sulfaattimaa-alue, sivuvaluma-alue ja koko valuma-alue. Vuodet 90-92.

Havaitun ja lasketun määrän ero on syntynyt enimmäkseen syksyllä -91. Ero on ollut suurimmillaan noin 0,006 mol/m² joulukuussa -91 ja laskennan lopussa, jolloin laskettu määrä on ollut havaittua pienempi.

Pumppaamon kumulatiiviseksi alumiinimääräksi on saatu 4,52 g/m², joka on 0,31 g/m² eli 6 % pienempi kuin vastaava havaittu määrä. Havaitun ja lasketun määrän eroa on syntynyt loppukesällä -90 ja keväällä -91, jolloin laskettu määrä on ollut liian suuri, sekä kesällä ja syksyllä -91, jolloin laskettu määrä on puolestaan ollut liian pieni. Ero on ollut suurimmillaan noin 0,6 g/m² helmikuussa -92, jolloin laskettu määrä on ollut havaittua pienempi.

Pumppaamon kumulatiiviseksi sulfaattimääräksi on saatu 148,6 g/m², joka on 5,9 g/m² eli 4 % pienempi kuin vastaava havaittu määrä. Havaitun ja lasketun määrän eroa on syntynyt loppukesällä -90 ja keväällä -91, jolloin laskettu määrä on ollut liian suuri, sekä kesällä ja syksyllä -91, jolloin laskettu määrä on puolestaan ollut liian pieni. Ero on ollut suurimmillaan noin 12 g/m² helmikuussa -92, jolloin laskettu määrä on ollut havaittua pienempi. Sulfaatin osalta erot ovat olleet hyvin samantyyppisiä kuin alumiinilla.

Pumppaamon kumulatiiviseksi rautamääräksi on saatu 1394 mg/m², joka on 87 mg/m² eli 7 % suurempi kuin vastaava havaittu määrä. Havaitun ja lasketun määrän eroa on syntynyt syksyllä -90 ja -91, jolloin laskettu määrä on ollut liian pieni, sekä keväällä -91, jolloin laskettu määrä puolestaan on ollut liian suuri. Ero on ollut suurimmillaan noin 110 mg/m² maaliskuussa -91, jolloin laskettu määrä on ollut havaittua pienempi.

Veden laadun laskentatulokset kumulatiivisina ainemäärinä pumppaamolla on esitetty kuvassa 13. Aineet ovat ylhäältä lukien vetyionit (mol/m²), alumiini (g/m²), sulfaatti (g/m²) ja rauta (mg/m²). Kussakin kuvassa on verrattu havaittuja ja laskettuja arvoja.

Laskennassa pumppaamon veden päivittäisten pH arvojen mediaani on ollut 4,14, joka on 0,14 suurempi kuin havaittujen pH arvojen mediaani. Laskennassa pH minimi on ollut 3,83 ja maksimi 4,98. Minimi on 0,13 suurempi ja maksimi 1,52 pienempi kuin vastaavat havaitut arvot. Laskennassa pH arvoista neljäsosa on ollut pienempiä kuin 4,01 ja neljäsosa on ollut suurempia kuin 4,45. Havaintojen vastaavat arvot ovat 3,90 ja 4,30. Laskettuja arvoja on ollut 789 ja havaittuja 124.

Laskennassa pumppaamon veden päivittäisten alumiinikonsentraatioiden mediaani on ollut 10,3 mg/l, joka on 0,7 mg/l pienempi kuin havaittujen alumiinikonsentraatioiden mediaani. Laskennassa alumiinikonsentraatioiden minimi on ollut 0,4 mg/l ja maksimi 22,4 mg/l. Minimi on 0,4 mg/l pienempi ja maksimi 6,6 mg/l pienempi kuin vastaavat havaitut arvot. Laskennassa alumiinikonsentraatioista neljäsosa on ollut pienempiä kuin 4,1 mg/l ja neljäsosa on ollut suurempia kuin 14,3 mg/l. Havaintojen vastaavat arvot ovat 6,9 mg/l ja 15,7 mg/l. Laskettuja arvoja on ollut 789 ja havaittuja 87.

Laskennassa pumppaamon veden päivittäisten sulfaattikonsentraatioiden mediaani on ollut 343 mg/l, joka on 27 mg/l pienempi kuin havaittujen sulfaattikonsentraatioiden mediaani. Laskennassa sulfaattikonsentraatioiden minimi on ollut 3 mg/l ja maksimi 720 mg/l. Minimi on 31 mg/l pienempi ja maksimi 80 mg/l pienempi kuin vastaavat havaitut arvot. Laskennassa sulfaattikonsentraatioista neljäsosa on ollut pienempiä kuin 125 mg/l ja neljäsosa on ollut suurempia kuin 473 mg/l. Havaintojen vastaavat arvot ovat 210 mg/l ja 490 mg/l. Laskettuja arvoja on ollut 789 ja havaittuja 123.

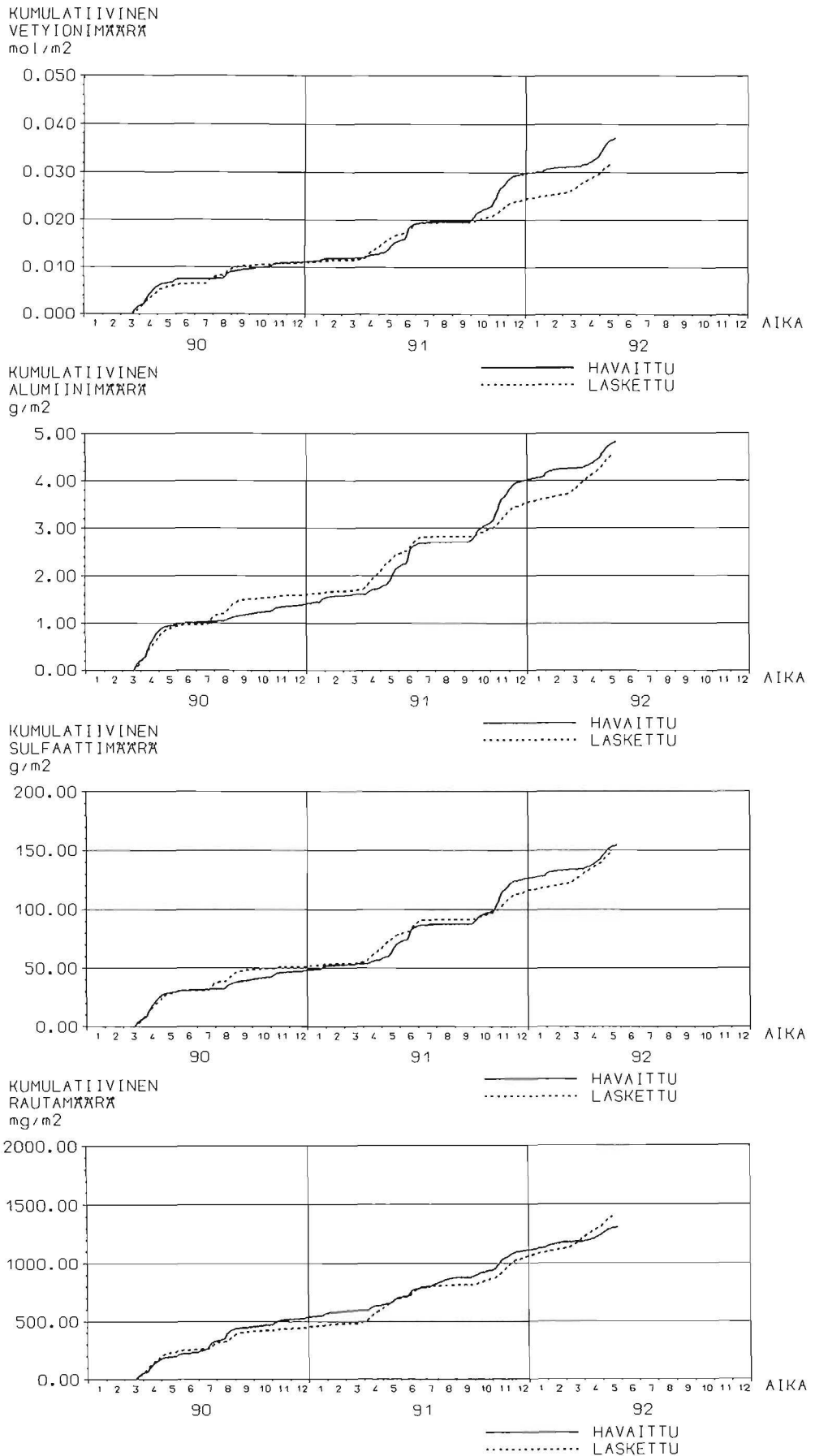
Laskennassa pumppaamon veden päivittäisten rautakonsentraatioiden mediaani on ollut 3520 $\mu\text{g/l}$, joka on 320 $\mu\text{g/l}$ suurempi kuin havaittujen rautakonsentraatioiden mediaani. Laskennassa rautakonsentraatioiden minimi on ollut 1740 mg/l ja maksimi 5200 mg/l . Minimiksi on 540 $\mu\text{g/l}$ suurempi ja maksimi 15800 $\mu\text{g/l}$ pienempi kuin vastaavat havaitut arvot. Laskennassa rautakonsentraatioista neljäsosa on ollut pienempiä kuin 2320 mg/l ja neljäsosa on ollut suurempia kuin 4160 mg/l . Havaintojen vastaavat arvot ovat 2500 mg/l ja 4200 mg/l . Laskettuja arvoja on ollut 789 ja havaittuja 124.

Laskettujen ja havaittujen tilastollisten tunnuslukujen vertailu on esitetty kuvassa 14. Aineet ovat ylhäältä vasemmalta lukien pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta ($\mu\text{g/l}$). Tunnuksluvut ovat suuruusjärjestyksessä alhaalta ylöspäin minimi, 25 % eli alimman neljänneksen raja, mediaani, 75 % eli ylimmän neljänneksen raja ja maksimi.

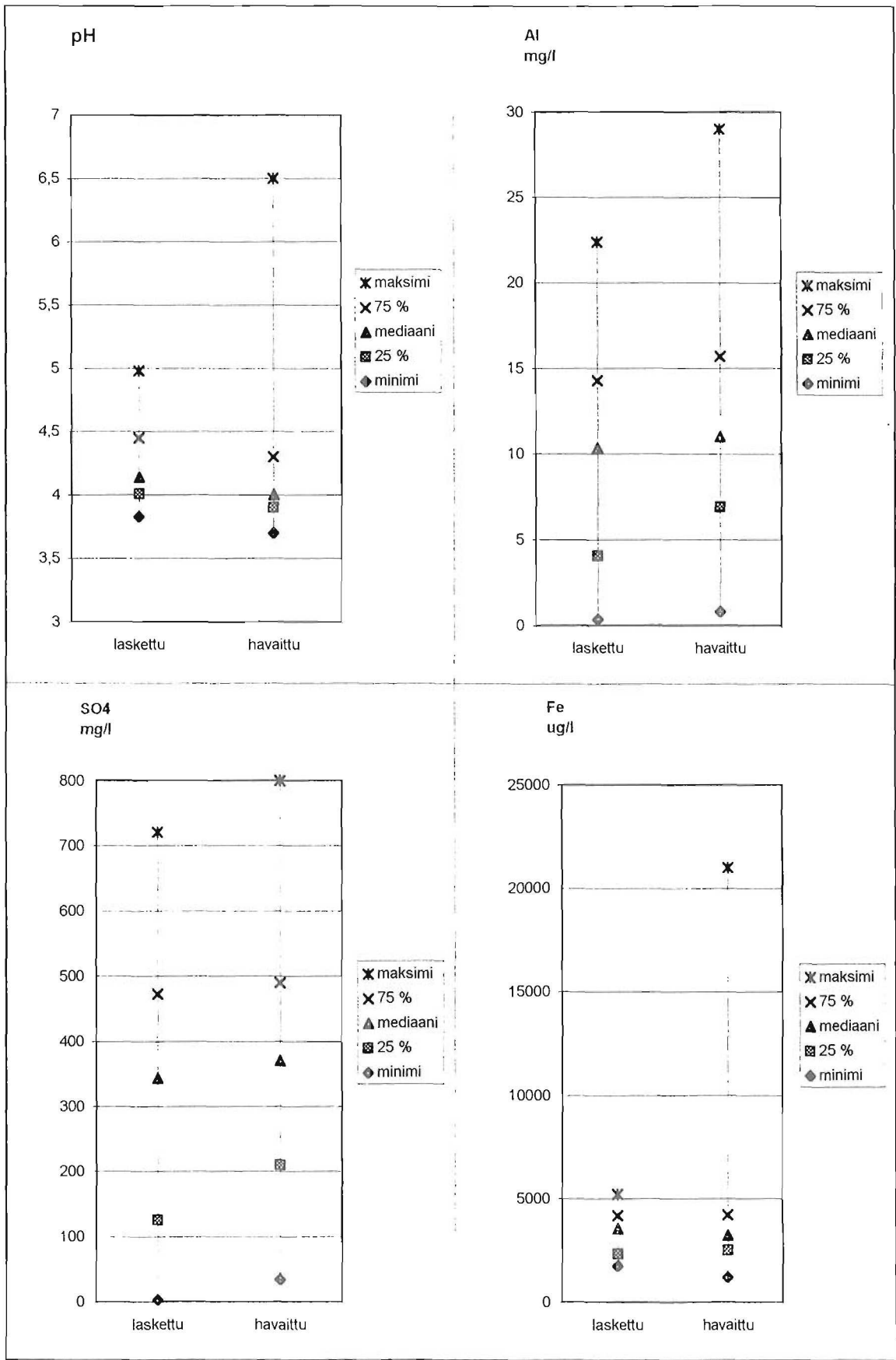
Sulfaattimaa-alueen veden laatumallin kalibroittujen parametrien arvot on koottu taulukkoon 14.

Taulukko 14. Sulfaattimaa-alueen parametrien kalibroidut arvot, veden laadun laskenta.

Liuenneiden aineiden dispersio		
a_L	1,0	m
D^*	0,0	m^2/s
Hapen kulkeutuminen		
D_s	10^{-6}	m^2/s
β	10^{-5}	1/s
Hiilidioksidin kulkeutuminen		
k	1,66	m
r	10^{-8}	
s	0,139	$1/^\circ\text{C}$
β	10^{-5}	1/s
Hapettuminen ja rapautuminen		
f_1	$1,8 \times 10^{-9}$	$\text{m}^3/\text{mol/s}$
f_2	$1,8 \times 10^{-9}$	$\text{m}^3/\text{mol/s}$
g_1	0,0693	$1/^\circ\text{C}$
g_2	0,0693	$1/^\circ\text{C}$
k_{Ca}	10^{-12}	$\text{mol}/\text{m}^3/\text{s}$
p_1	-7,60	
p_2	-0,50	
p_3	0,12	

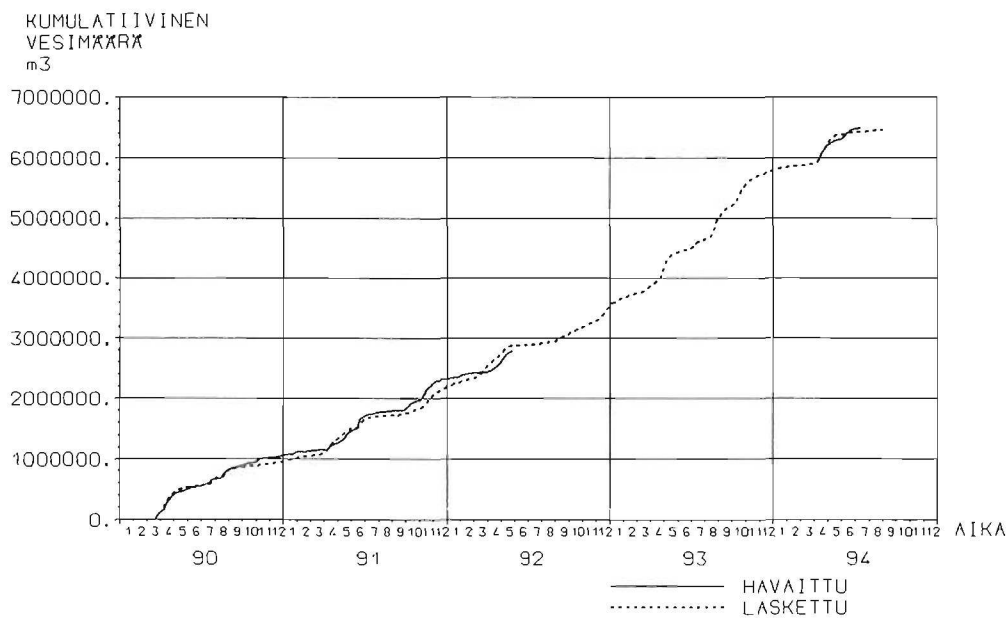


Kuva 13. Pajuluoman havaittujen ja laskettujen ainekuormien vertailu: vetyionit (mol/m²), alumiini (g/m²), sulfaatti (g/m²) ja rauta (mg/m²). Vuodet 90-92.



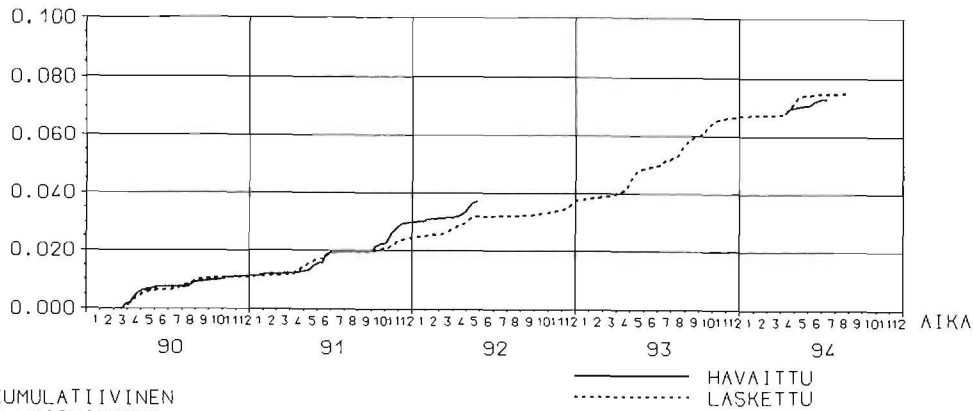
Kuva 14. Pajuluoman lasketuista ja havaituista konsentraatioista saatujen tilastollisten tunnuslukujen vertailu. pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta (µg/l).

Vuoden 94 elokuun loppuun ulottuvan laskennan tulokset on esitetty kuvissa 15 ja 16 siten, että vertailu on tehty erikseen aikaväleille 3/90-5/92 ja 4/94-7/94. Kuten edellisessä kohdassa 4.1.2 todettiin, aikaväliä vuoden 94 huhtikuusta heinäkuuhun ei ole käytetty kalibroinneissa.

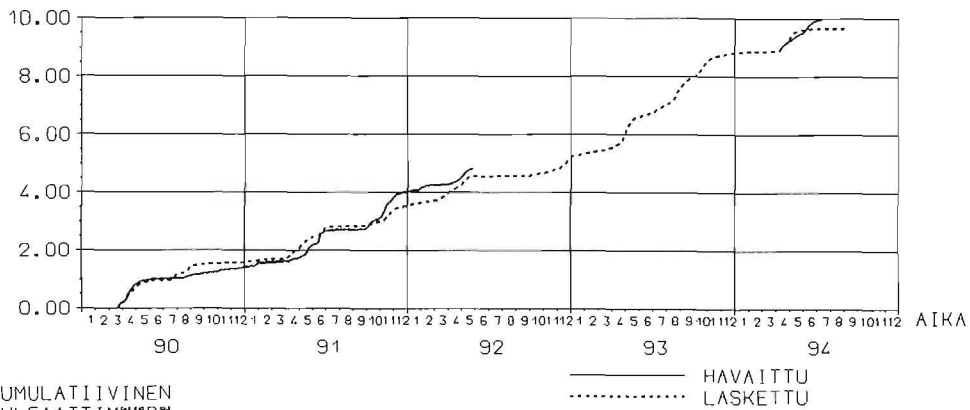


Kuva 15. Pajuluoman havaittujen ja laskettujen kumulatiivisten vesimäärien (m³) vertailu. Koko valuma-alue. Aikavälit 3/90-5/92 ja 4/94-7/94.

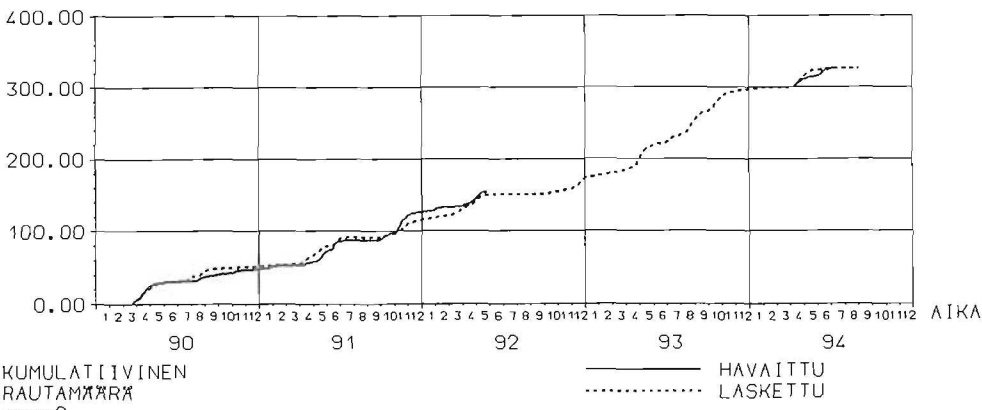
KUMULATIIVINEN
VETYIONIEMÄÄRÄ
mol/m²



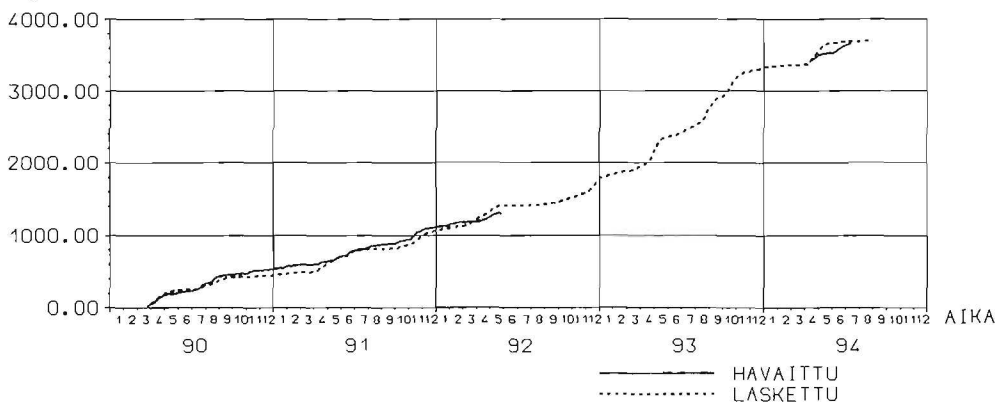
KUMULATIIVINEN
ALUMIINIEMÄÄRÄ
g/m²



KUMULATIIVINEN
SULFAATTIEMÄÄRÄ
g/m²



KUMULATIIVINEN
RAUTAMÄÄRÄ
mg/m²



Kuva 16. Pajuluoman havaittujen ja laskettujen ainekuormien vertailu: vetyionit (mol/m²), alumiini (g/m²), sulfaatti (g/m²) ja rauta (mg/m²). Aikavälit 3/90-5/92 ja 4/94-7/94.

4.2 Haapajyrä

4.2.1 Havaintoaineisto

Kalibrintilaskennoissa on käytetty Haapajyrän alueen ilmasto-, maaperä-, valunta- ja vedenlaatuhavainnoita aikaväliltä maaliskuusta -90 toukokuuhun -92.

Aluella on havaittu sadanta (mm/d) ja lämpötila (°C) päivittäin. Ne sekä kumulatiivinen sadanta (m) on esitetty kuvassa 17. Astiahaihduntoina on käytetty samoja arvoja kuin Pajuluomassa laskennassa, edellisen kohdan taulukko 1.

Maaperästä on havaittu samoja aineita kuin Pajuluomassa. Haapajyrän neljästä havaintopaikasta on muodostettu laskentoja varten kolme kokonaisuutta. Havaintoputket 5 ja 6 muodostavat kumpikin oman alueensa. Havaintoputkista 1 ja 3 on muodostettu yksi alue ottamalla niiden havainnoista keskiarvot. Kolmi-jako on todettu tarpeelliseksi, koska eri alueiden havainnot poikkeavat merkittävästi toisistaan. Lisäksi pohjaveden pinnan taso on havaintoputken 5 alueella selvästi lähempänä maan pintaa kuin muilla alueilla. Aineiden konsentraatiot (mol/m^3) syvyyden funktiona on esitetty alueittain kuvissa 18, 19 ja 20.

Tammikuusta -90 syyskuuhun -92 Haapajyrän mittapadolla havaitut vesimäärät (m^3/d) ja niistä summaamalla saatu kumulatiivinen vesimäärä (m^3) on esitetty kuvassa 21. Summaus on tehty maaliskuusta -90 toukokuuhun -92.

Mittapadon veden laadun havainnot samoille aineille kuin Pajuluomassa on esitetty kuvassa 22.

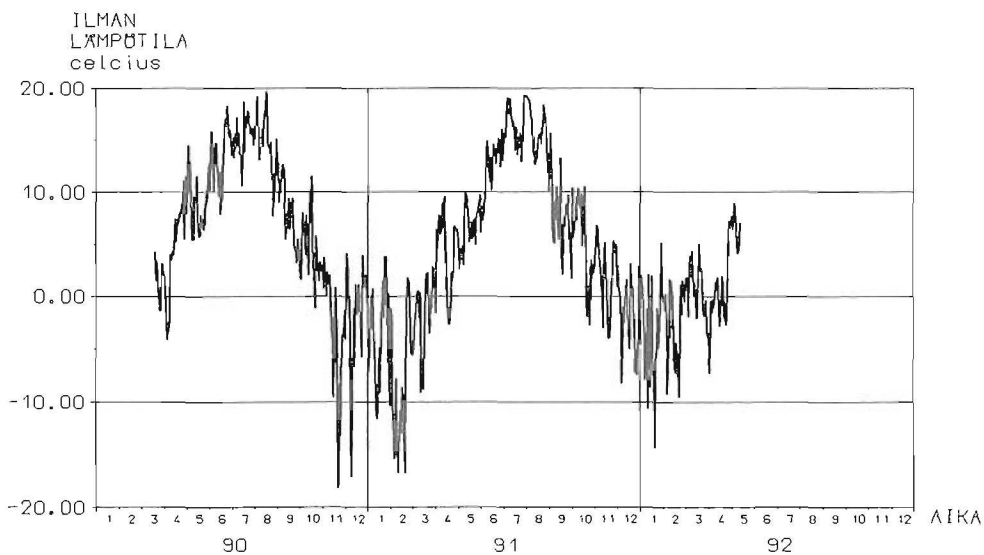
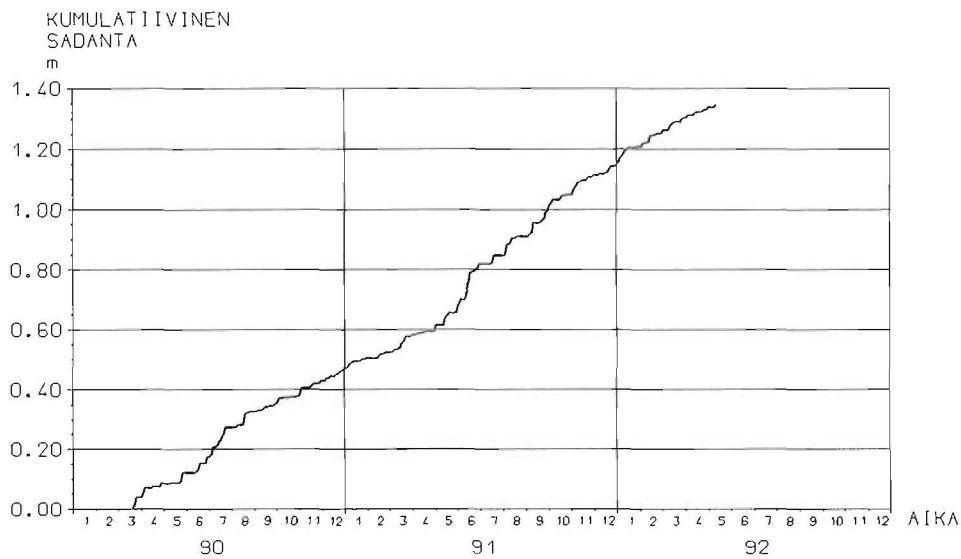
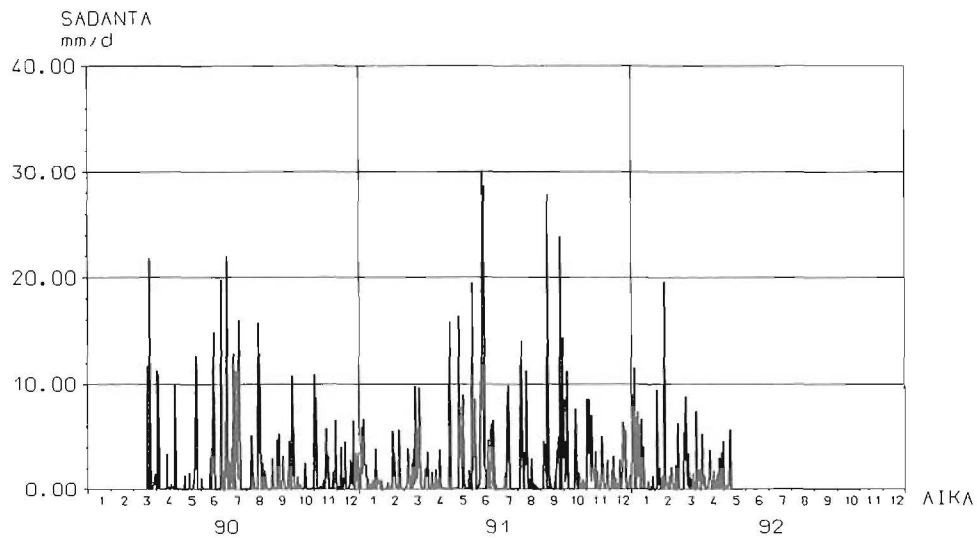
Mittapadon ainekuormat on generoitu havaituista vesimääristä ja veden laadusta kuten Pajuluomassa. Kumulatiiviset ainekuormat on esitetty kohdan 4.2.3 tuloskuvassa 24.

4.2.2 Menetelmä

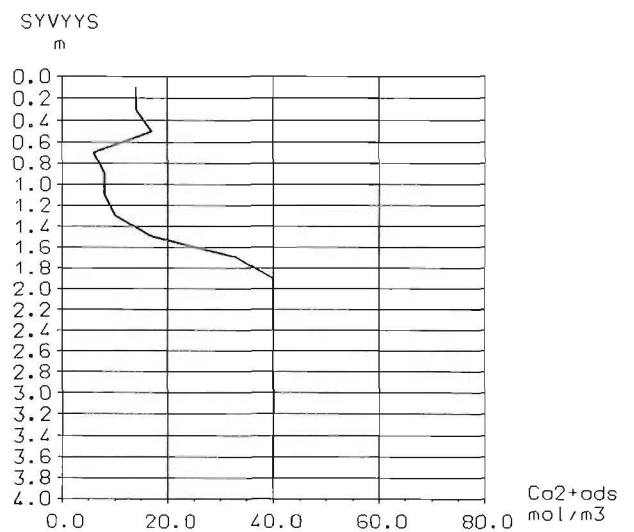
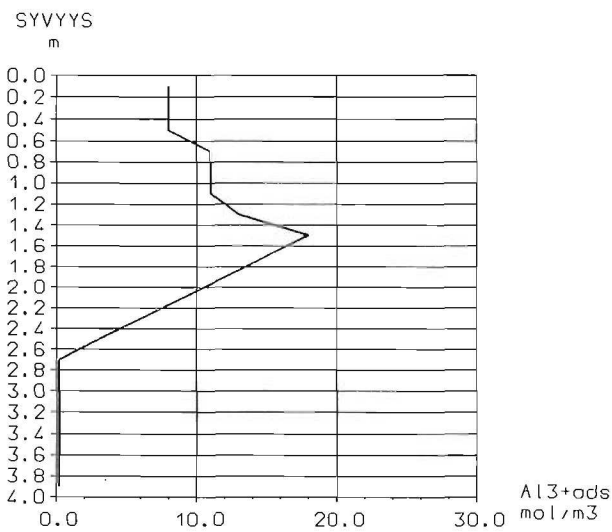
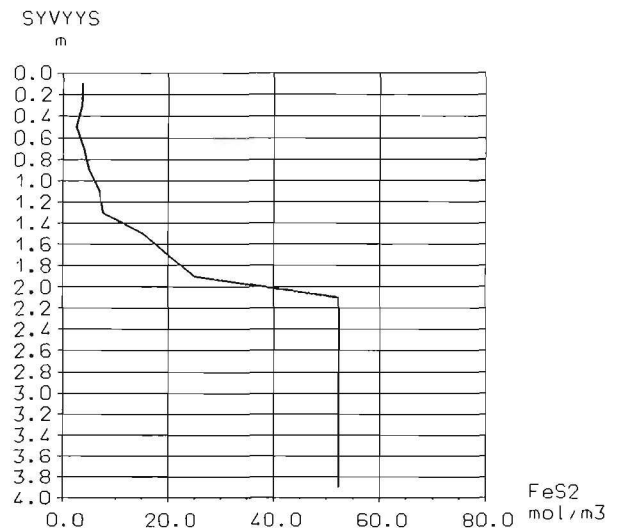
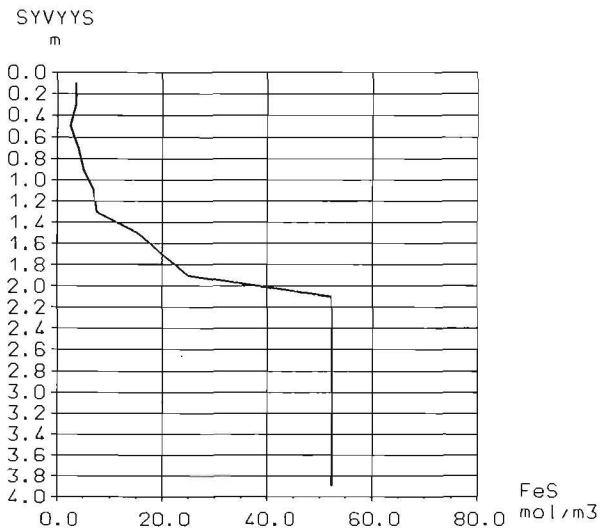
Haapajyrän valuma-alue $6,09 \text{ km}^2$ on laskennoissa jaettu neljään osaan. Peltoja kuvaavia sulfaattimaa-alueita on kolme. Jako on tehty edellisessä kohdassa esitetyin perusteluin. Pinta-alat on määritetty alueen peruskartasta maaston topologian perusteella. Alueiden pinta-alat ovat $0,58 \text{ km}^2$ (havaintoputket 1 ja 3), $0,42 \text{ km}^2$ (havaintoputki 5) ja $1,13 \text{ km}^2$ (havaintoputki 6). Sulfaattimaa-alueiden kokonaispinta-ala on $2,13 \text{ km}^2$ eli 35 % koko alasta. Loput $3,96 \text{ km}^2$ eli 65 % koko alasta on sivuvaluma-aluetta. Laskenta-ajankohta on 20.03.90 - 14.05.92 eli 786 päivää. Aika-askeleena on yksi päivä.

Haapajyrällä on ollut tarpeen kalibroida virtaamallin parametrit. Laatumallin parametreja ei ole kalibroitu vaan on käytetty Pajuluoman kalibroinnista saatuja arvoja. Tämä on perusteltua, koska Haapajyrän ja Pajuluoman pellot ovat saman tyyppisiä happamia sulfaattimaita ja sijaitsevat maantieteellisesti lähellä toisiaan Kyrönjoen varrella.

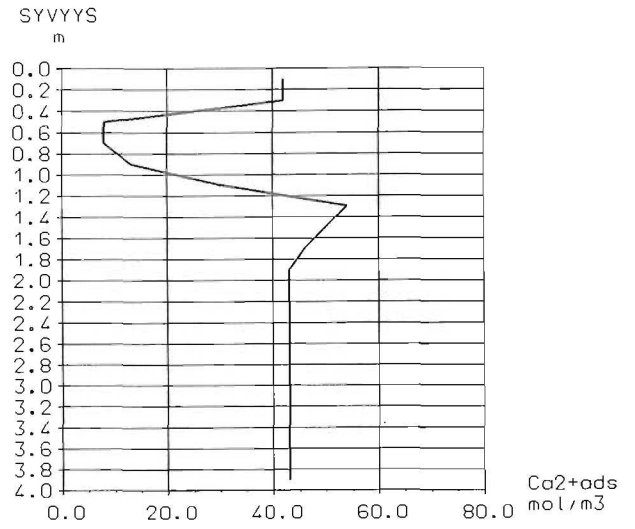
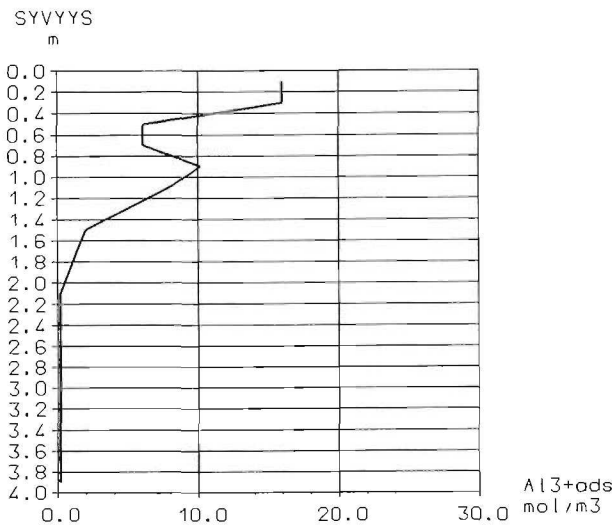
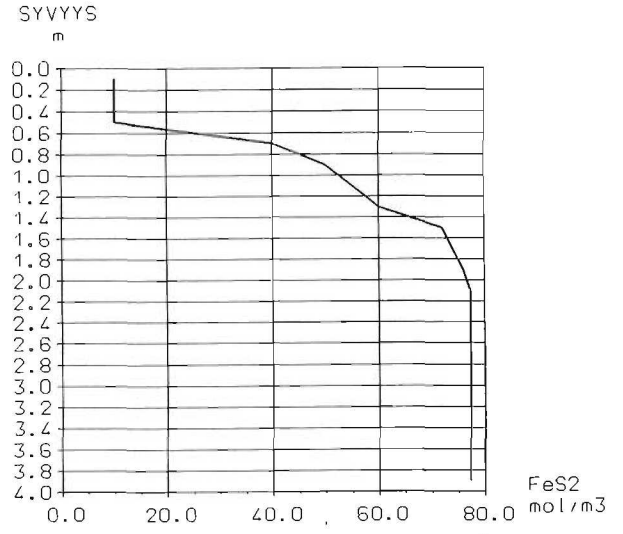
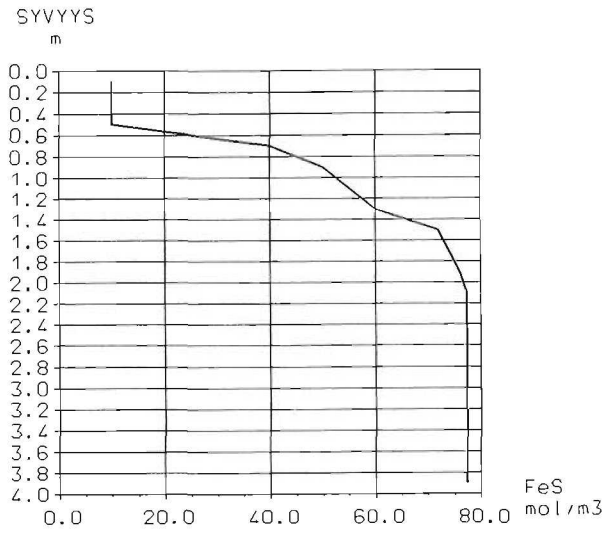
Virtaamallin parametrien kalibroinnissa on ollut sama lähtökohta kuin Pajuluomassa. Tässäkin mittapadolle tulevan vesimäärän on oletettu kertyvän osa-alueilta niiden pinta-aloja vastaavasti. Vertailu on suoritettu alueittain kumulatiivisille vesimäärille (m^3).



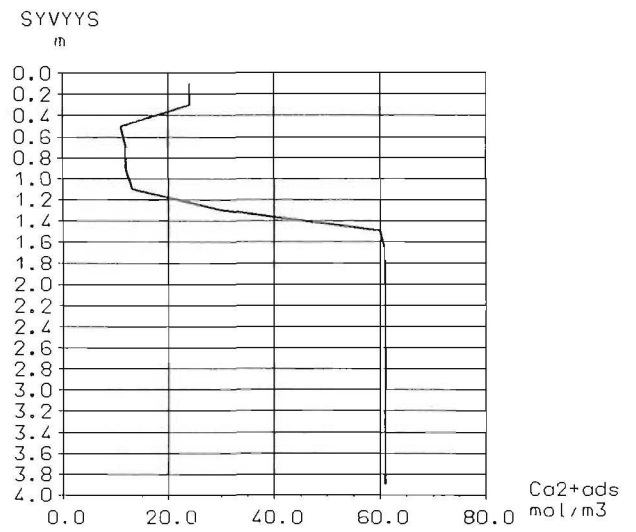
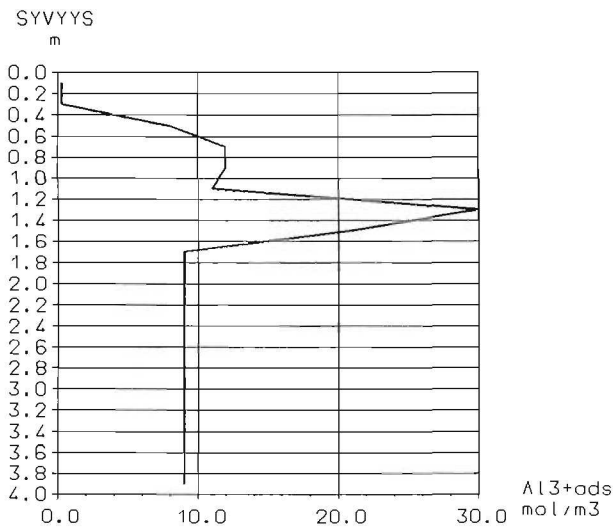
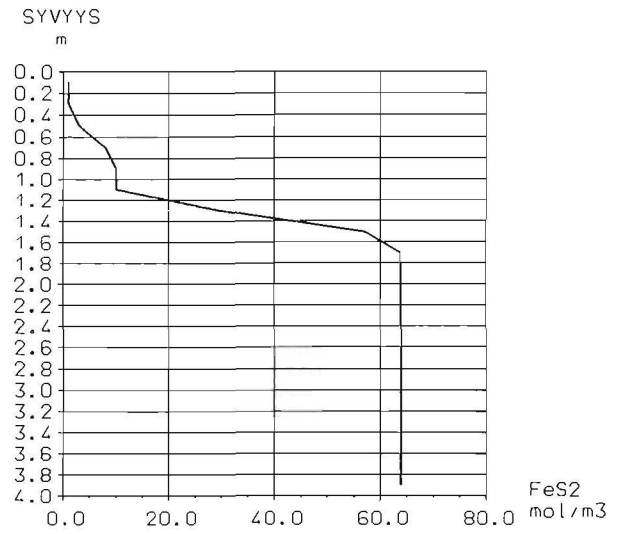
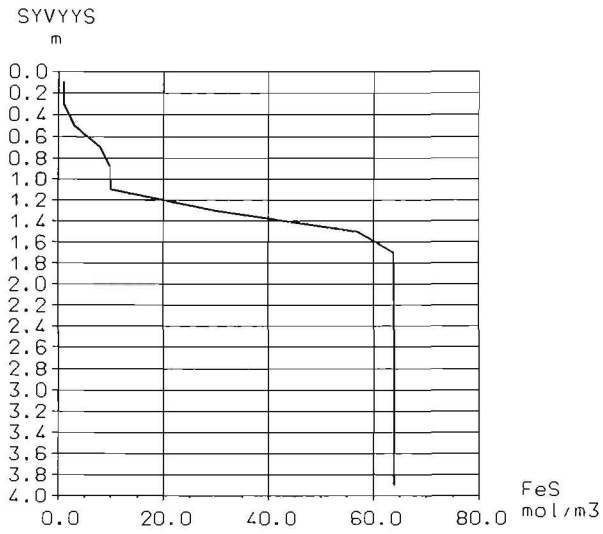
Kuva 17. Haapajyrän havaittu sadanta (mm/d), kumulatiivinen sadanta (m) ja lämpötila (°C). Vuodet 90-92.



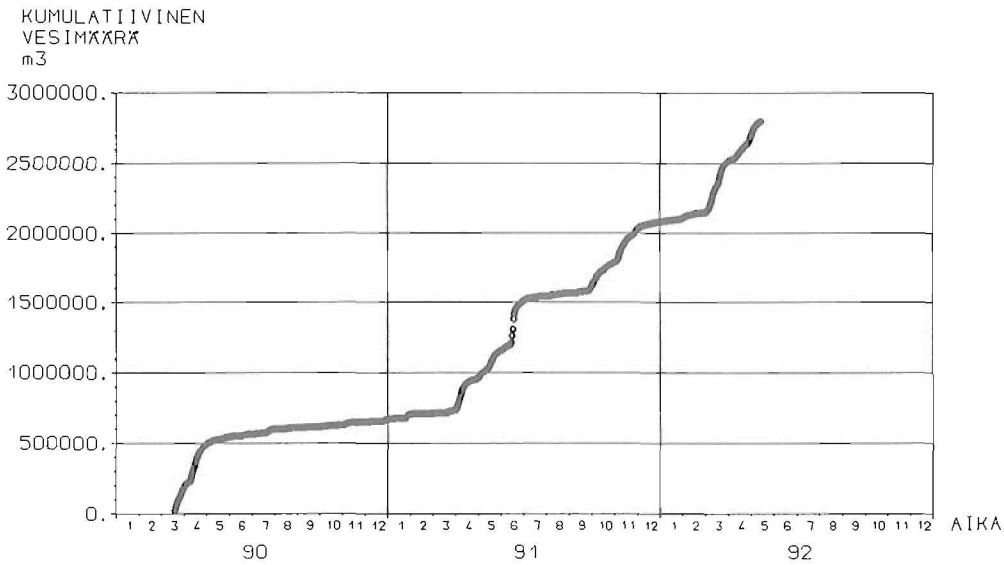
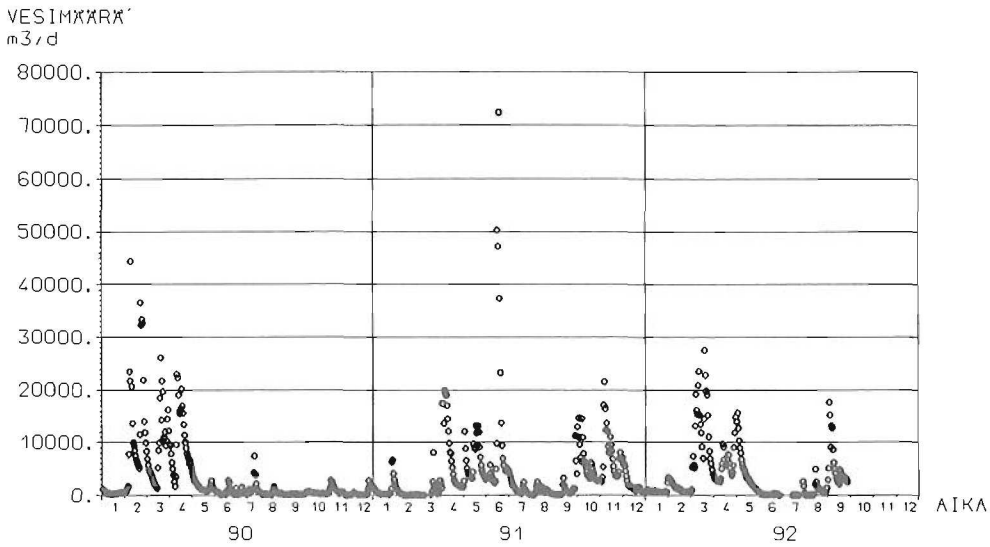
Kuva 18. Haapajyrän maaperän aineiden alkukonsentraatiot, havaintoputket 1+3: rauta-monosulfidi (mol/m³), pyriitti (mol/m³), vaihtuva alumiini (mol/m³) ja vaihtuva kalsium (mol/m³).



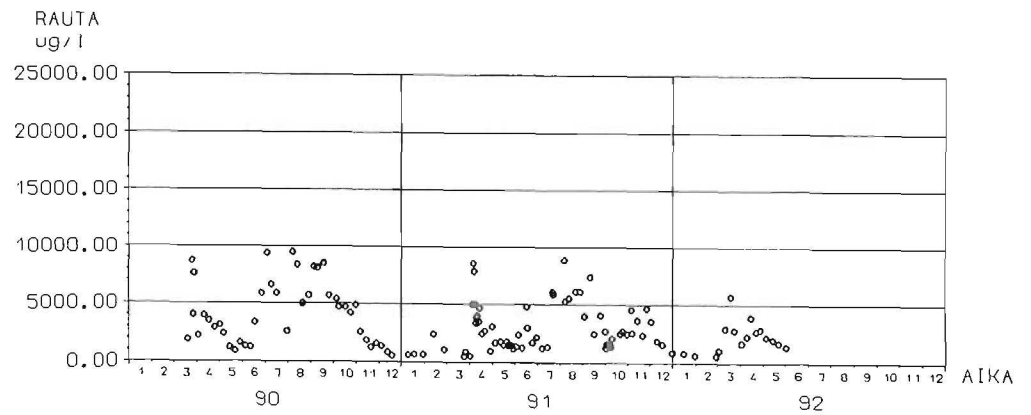
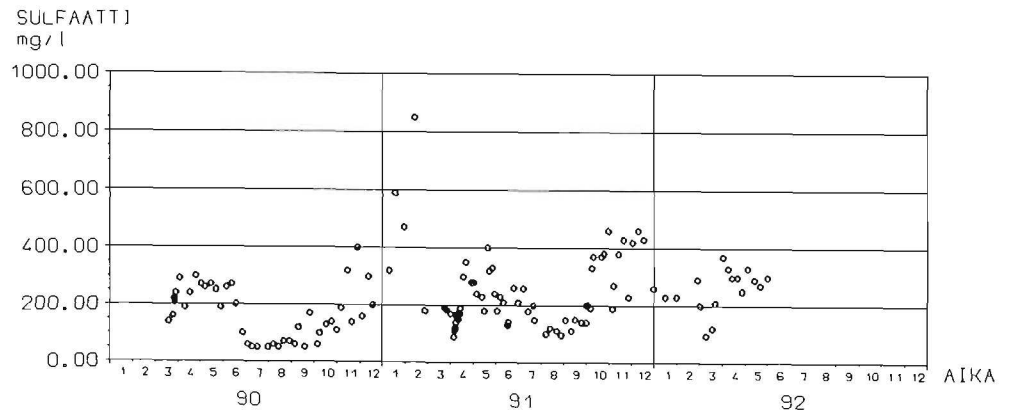
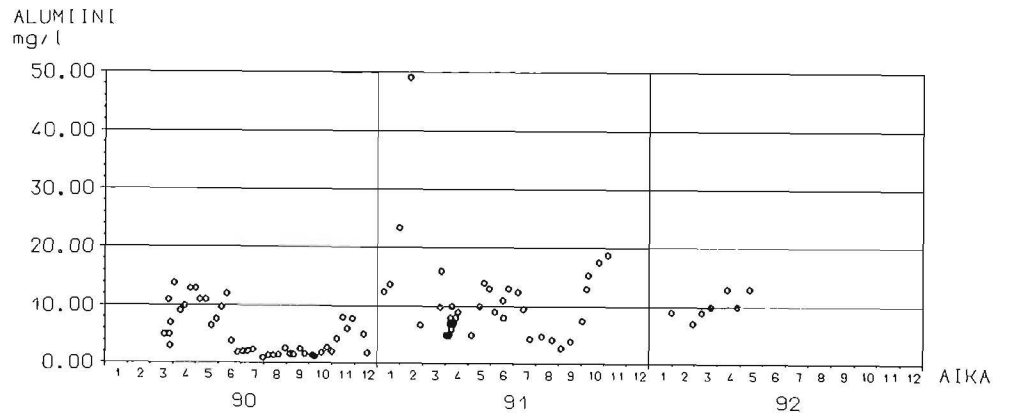
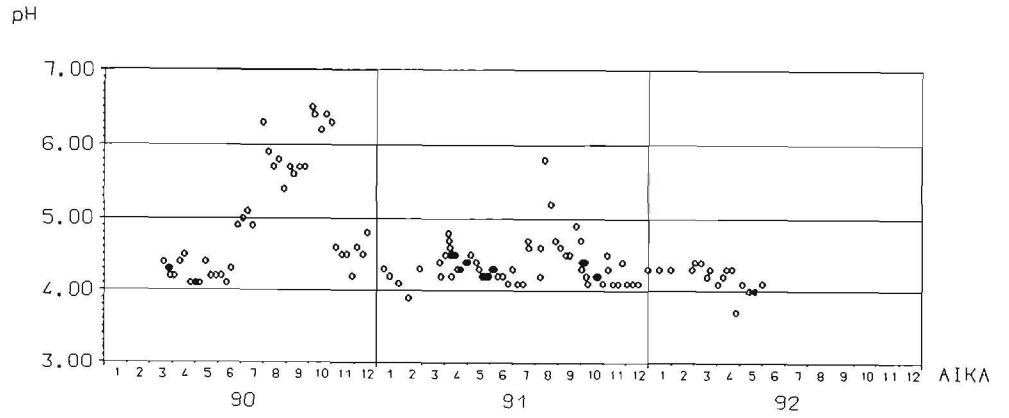
Kuva 19. Haapajyrän maaperän aineiden alkukonsentraatiot, havaintoputki 5: rautamonosulfidi (mol/m³), pyriitti (mol/m³), vaihtuva alumiini (mol/m³) ja vaihtuva kalsium (mol/m³).



Kuva 20. Haapajyrän maaperän aineiden alkukonsentraatiot, havaintoputki 6: rautamonosulfidi (mol/m³), pyriitti (mol/m³), vaihtuva alumiini (mol/m³) ja vaihtuva kalsium (mol/m³).



Kuva 21. Haapajyrän mittapadon havaittu vesimäärä (m³/d) ja kumulatiivinen vesimäärä (m³). Vuodet 90-92.



Kuva 22. Haapajyrän mittapadon veden laadun havainnot: pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta (ug/l). Vuodet 90-92.

Haapajyrän kolme sulfaattimaa-alueita ovat laskennoissa maaperältään ja ominaisuuksiltaan olleet samanlaisia kuin Pajuluoman vastaava alue. Poikkeuksena on ollut havaintoputken 5 alue, jossa salaoja on laskennoissa asetettu tasoon 0,7 m, kun se muilla alueilla on ollut 1,2 m. Tämä on aiheuttanut sen, että kyseisen alueen laskennan alkutilanne on ollut erilainen kuin kahden muun alueen. Muutoin on ollut riittävää kalibroida vain yhden sulfaattimaa-alueen parametrit ja käyttää näin saatuja parametrien arvoja myös kahdella muulla alueella. Lämpötilamallin vakioiden arvot ovat laskennoissa olleet kaikilla alueilla samat kuin Pajuluomassa.

Haapajyrässä ei ole ollut pumppaamoja ja sen allasta kuten Pajuluomassa. Tämä on laskennoissa käsitelty siten, että altaan tilavuudeksi on asetettu 1 m^3 , jolloin allas ei ole aiheuttanut viivettä.

Kalibroinneissa on aluksi laskettu kokeilumielessä Haapajyrän hydrologia kokonaisuudessaan Pajuluomasta saaduilla parametreilla. Laskennat ovat osoittaneet, että parametreihin ja alkutilanteeseen on tarvittu vain pieniä muutoksia Pajuluomaan verrattuna. Tämä on koskenut mallin kaikkia osa-alueita.

Laskennan alkutilanne on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Laskennan alkutilanne sulfaattimaa-alueilla: painepotentiaali (m) alueilla 1+3 ja 6, alueella 5 sekä maaveden lämpötila (°C) kaikilla alueilla.

Syvyys (m)	$h_{1+3,6}$	h_5 (m)	T (°C)
0,1	-0,9	-0,6	0,1
0,3	-0,7	-0,4	0,2
0,5	-0,5	-0,2	0,4
0,7	-0,3	0,0	0,6
0,9	-0,1	0,2	0,8
1,1	0,1	0,4	1,0
1,3	0,3	0,6	1,2
1,5	0,5	0,8	1,4
1,7	0,7	1,0	1,6
1,9	0,9	1,2	1,8
2,1	1,1	1,4	2,0
2,3	1,3	1,6	2,1
2,5	1,5	1,8	2,2
2,7	1,7	2,0	2,3
2,9	1,9	2,2	2,4
3,1	2,1	2,4	2,5
3,3	2,3	2,6	2,6
3,5	2,5	2,8	2,7
3,7	2,7	3,0	2,8
3,9	2,9	3,2	2,9

Maaperän kiinteiden aineiden konsentraatiot alueittain ovat olleet edellisen kohdan kuvien 18, 19 ja 20 mukaiset. Niiden lisäksi $\text{Fe}(\text{OH})_3$:n konsentraatioksi on asetettu 10 mol/m^3 ja $\text{Al}(\text{OH})_3$:n konsentraatioksi 0 mol/m^3 kaikissa kerroksissa.

Sivuvaluma-alueelta tulevan veden laatu ja sadeveden laatu ovat olleet samat kuin Pajuluomassa.

Sulfaattimaa-alueiden maaperän liuenneiden aineiden alkukonsentraatioiden arvot on päätelty vastaavasti kuin Pajuluomassa. Arvot on koottu taulukkoon 16.

Taulukko 16. Maaperän liuenneiden aineiden alkukonsentraatiot kaikilla alueilla (mol/m³).

Syvyys (m)	pH	Al	SO ₄	Fe	H ₂ CO ₃	O ₂
0,1	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	0,20
0,3	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	0,20
0,5	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	0,20
0,7	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	0,20
0,9	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	0,20
1,1	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	0,10
1,3	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	0,01
1,5	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-2
1,7	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-3
1,9	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-4
2,1	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-5
2,3	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-6
2,5	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-10
2,7	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-10
2,9	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-10
3,1	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-10
3,3	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-10
3,5	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-10
3,7	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-10
3,9	4,0	0,8	6,7	0,10	0,025	1E-10

4.2.3 Tulokset

Kumulatiiviseksi vesimääräksi mittapadolla koko laskenta-ajalta on saatu 2 766 622 m³, joka on 33 534 m³ eli 1 % pienempi kuin vastaava havaittu vesimäärä. Laskettujen ja havaittujen kumulatiivisten vesimäärien eroa on syntynyt lähinnä vuoden -92 talvella siten, että lasketut vesimäärät ovat olleet suurempia kuin havaitut. Keväällä -92 tilanne on ollut päin vastoin eli lasketut vesimäärät ovat olleet havaittuja pienempiä, jolloin kumulatiiviset vesimäärät ovat tasoittuneet. Laskenta-ajan suurin ero on ollut noin 90 000 m³ helmikuussa -92, jolloin laskettu määrä on ollut havaittua suurempi.

Sulfaattimaa-alueiden ja sivuvaluma-alueen kumulatiivinen vesimäärä koko laskenta-ajalta on ollut noin prosentin pienempi kuin alueiden pinta-alaa vastaava osa pumppaamon havaitusta kokonaismäärästä. Sulfaattimaa-alueilla suurimmat erot laskettujen vesimäärien ja vastaavien vertailumäärien välillä ovat olleet keväällä -92, jolloin lasketut vesimäärät ovat olleet liian pieniä, sekä keväällä -90 ja talvella -92, jolloin lasketut vesimäärät ovat olleet liian suuria. Sivuvalluma-alueella vastaavat suurimmat erot osuvat samoihin ajankohtiin ja samaan

suuntaan kuin sulfaattimaa-alueilla lukuunottamatta kevättä -90, jolloin lasketut vesimäärät ovat olleet liian pieniä.

Vesimäärän kalibrointitulokseksi on esitetty kuvassa 23. Ylimmässä kuvassa on verrattu havaintoputken 6 sulfaattimaa-alueelta tulevaa kumulatiivista vesimäärää (m^3) vastaavaan vertailukäyrään. Keskimmaisessa kuvassa on tehty sama vertailu koskien sivuvaluma-aluetta. Alimmassa kuvassa on verrattu mittapadon laskettuja ja havaittuja kumulatiivisia vesimääriä (m^3).

Sulfaattimaa-alueiden niiden parametrien arvot, jotka poikkeavat Pajuluoman vastaavista arvoista, on koottu taulukkoon 17.

Taulukko 17. Sulfaattimaa-alueiden niiden parametrien arvot, jotka poikkeavat Pajuluoman vastaavista arvoista.

b	0,138	
K_i	0,15 ($i=1-3$)	m/d
	0,2 ($i=4$)	
E_0	0,30	mm/d

Sivuvaluma-alueen virtaamamallin parametrien arvot ovat samat kuin Pajuluomassa. Ainoastaan yksi alkuarvo poikkeaa Pajuluoman vastaavasta: $S_{mv} = 0,20$ m.

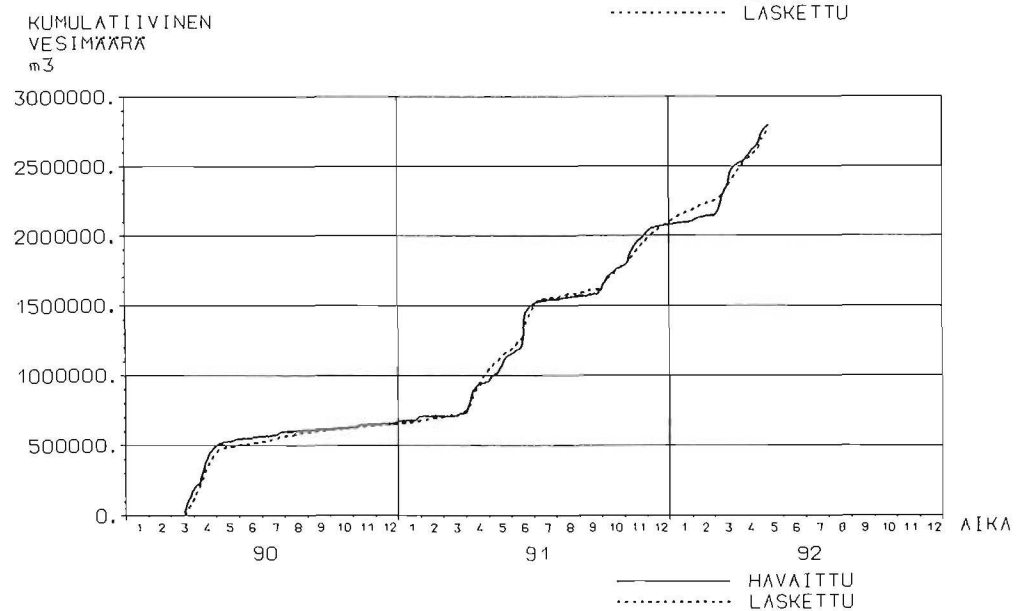
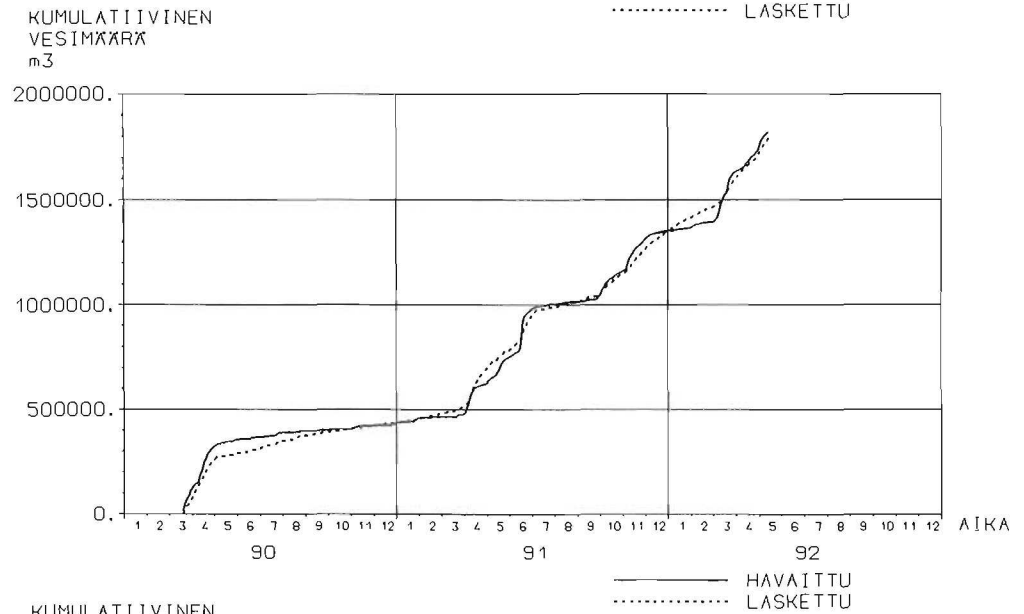
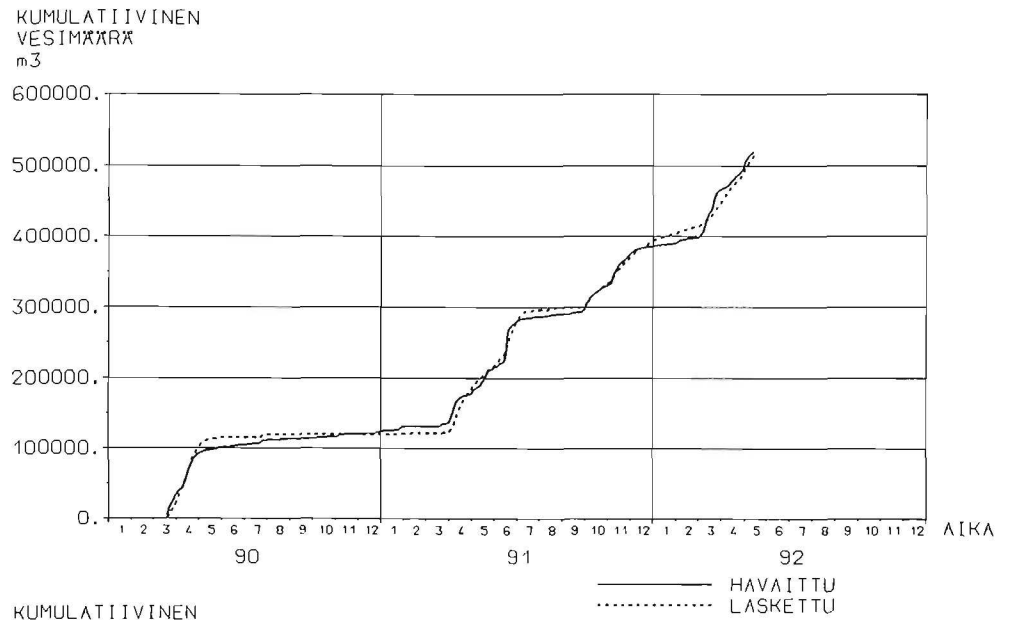
Laskennassa kumulatiiviseksi vetyionimääräksi mittapadolla on saatu $0,023$ mol/ m^2 , joka on $0,002$ mol/ m^2 eli 8 % pienempi kuin vastaava havaittu määrä. Havaitun ja lasketun määrän eroa on syntynyt lähinnä laskennan viimeisenä kuukautena, jolloin laskettu määrä on ollut liian pieni. Ero on ollut suurimmillaan juuri laskennan lopussa.

Kumulatiiviseksi alumiinimääräksi mittapadolla on saatu $4,27$ g/ m^2 , joka on $0,55$ g/ m^2 eli 11 % pienempi kuin vastaava havaittu määrä. Havaitun ja lasketun määrän eroa on syntynyt syksyllä -91, jolloin laskettu määrä on ollut liian pieni. Ero on ollut tässäkin suurimmillaan laskennan lopussa, jolloin laskettu määrä on ollut havaittua pienempi.

Kumulatiiviseksi sulfaattimääräksi mittapadolla on saatu $101,5$ g/ m^2 , joka on $4,3$ g/ m^2 eli 4 % pienempi kuin vastaava havaittu määrä. Havaitun ja lasketun määrän eroa on syntynyt kesällä -91, jolloin laskettu määrä on ollut liian suuri, sekä syksyllä -91, jolloin laskettu määrä on puolestaan ollut liian pieni. Ero on ollut suurimmillaan noin 7 g/ m^2 kesäkuussa -91, jolloin laskettu määrä on ollut havaittua suurempi.

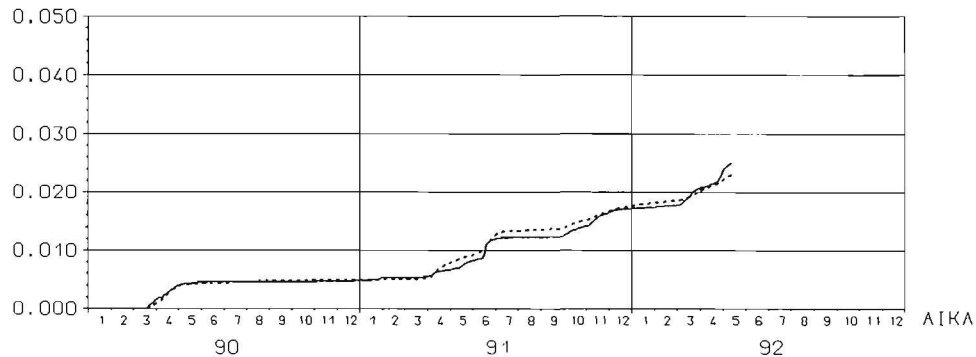
Kumulatiiviseksi rautamääräksi mittapadolla on saatu 1694 mg/ m^2 , joka on 259 mg/ m^2 eli 18 % suurempi kuin vastaava havaittu määrä. Havaitun ja lasketun määrän eroa on syntynyt keväällä -90, jolloin laskettu määrä on ollut liian pieni, sekä talvella -92, jolloin laskettu määrä puolestaan on ollut liian suuri. Ero on ollut suurimmillaan noin 220 mg/ m^2 helmikuussa -92, jolloin laskettu määrä on ollut havaittua suurempi.

Veden laadun laskentatulokset kumulatiivisina ainemäärinä mittapadolla on esitetty kuvassa 24. Aineet ovat ylhäältä lukien vetyionit (mol/ m^2), alumiini (g/ m^2), sulfaatti (g/ m^2) ja rauta (mg/ m^2). Kussakin kuvassa on verrattu havaittuja ja laskettuja arvoja.

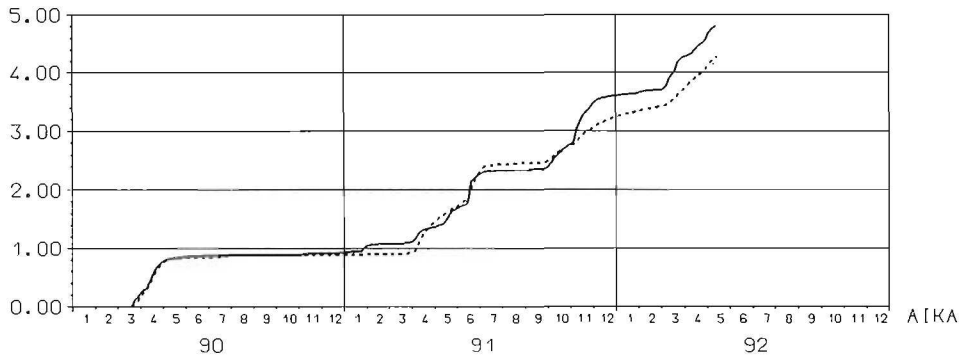


Kuva 23. Haapajyrän havaittujen ja laskettujen kumulatiivisten vesimäärien (m³) vertailu. Sulfaattimaa-alue '6', sivuvaluma-alue ja koko valuma-alue. Vuodet 90-92.

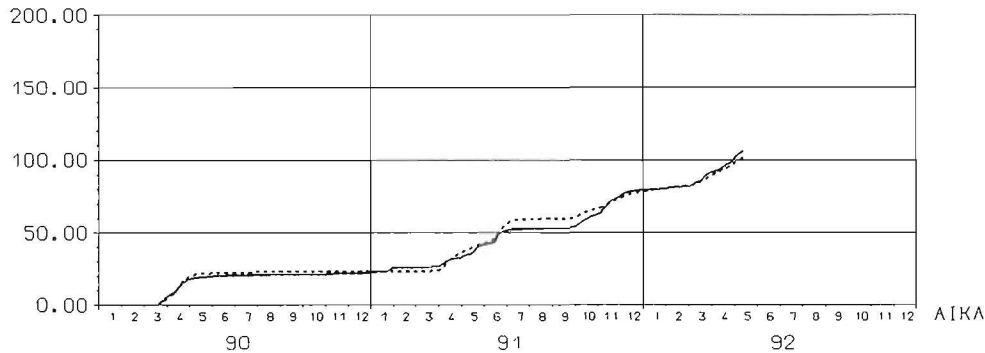
KUMULATIIVINEN
VETYIONIIMÄÄRÄ
mol/m²



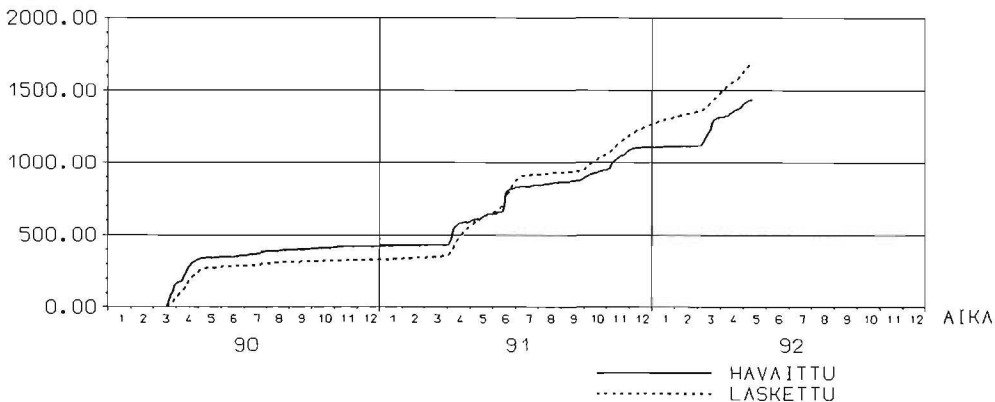
KUMULATIIVINEN
ALUMIINIIMÄÄRÄ
g/m²



KUMULATIIVINEN
SULFAATTIIMÄÄRÄ
g/m²



KUMULATIIVINEN
RAUTAMÄÄRÄ
mg/m²



Kuva 24. Haapajyrän havaittujen ja laskettujen ainekuormien vertailu: vetyionit (mol/m²), alumiini (g/m²), sulfaatti (g/m²) ja rauta (mg/m²). Vuodet 90-92.

Laskennassa mittapadon veden päivittäisten pH arvojen mediaani on ollut 4,41, joka on 0,11 suurempi kuin havaittujen pH arvojen mediaani. Laskennassa pH minimi on ollut 3,99 ja maksimi 4,98. Minimi on 0,29 suurempi ja maksimi 1,52 pienempi kuin vastaavat havaitut arvot. Laskennassa pH arvoista neljäsosa on ollut pienempiä kuin 4,27 ja neljäsosa on ollut suurempia kuin 4,78. Havaintojen vastaavat arvot ovat 4,20 ja 4,60. Laskettuja arvoja on ollut 786 ja havaittuja 122.

Laskennassa mittapadon veden päivittäisten alumiinikonsentraatioiden mediaani on ollut 6,9 mg/l, joka on 0,1 mg/l pienempi kuin havaittujen alumiinikonsentraatioiden mediaani. Laskennassa alumiinikonsentraatioiden minimi on ollut 0,4 mg/l ja maksimi 19,5 mg/l. Minimi on 0,5 mg/l pienempi ja maksimi 29,7 mg/l pienempi kuin vastaavat havaitut arvot. Laskennassa alumiinikonsentraatioista neljäsosa on ollut pienempiä kuin 0,5 mg/l ja neljäsosa on ollut suurempia kuin 10,4 mg/l. Havaintojen vastaavat arvot ovat 3,0 mg/l ja 11,0 mg/l. Laskettuja arvoja on ollut 786 ja havaittuja 85.

Laskennassa mittapadon veden päivittäisten sulfaattikonsentraatioiden mediaani on ollut 162 mg/l, joka on 38 mg/l pienempi kuin havaittujen sulfaattikonsentraatioiden mediaani. Laskennassa sulfaattikonsentraatioiden minimi on ollut 3 mg/l ja maksimi 479 mg/l. Minimi on 47 mg/l pienempi ja maksimi 371 mg/l pienempi kuin vastaavat havaitut arvot. Laskennassa sulfaattikonsentraatioista neljäsosa on ollut pienempiä kuin 3 mg/l ja neljäsosa on ollut suurempia kuin 248 mg/l. Havaintojen vastaavat arvot ovat 140 mg/l ja 290 mg/l. Laskettuja arvoja on ollut 786 ja havaittuja 120.

Laskennassa pumppaamon veden päivittäisten rautakonsentraatioiden mediaani on ollut 3240 µg/l, joka on 640 µg/l suurempi kuin havaittujen rautakonsentraatioiden mediaani. Laskennassa rautakonsentraatioiden minimi on ollut 1740 mg/l ja maksimi 5780 mg/l. Minimi on 1210 µg/l suurempi ja maksimi 3720 µg/l pienempi kuin vastaavat havaitut arvot. Laskennassa rautakonsentraatioista neljäsosa on ollut pienempiä kuin 1740 µg/l ja neljäsosa on ollut suurempia kuin 3950 µg/l. Havaintojen vastaavat arvot ovat 1500 µg/l ja 4700 µg/l. Laskettuja arvoja on ollut 786 ja havaittuja 121.

Laskettujen ja havaittujen tilastollisten tunnuslukujen vertailu on esitetty kuvassa 25. Aineet ovat ylhäältä vasemmalta lukien pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta (µg/l). Tunnusluvut ovat suuruusjärjestyksessä alhaalta ylöspäin minimi, 25 % eli alimman neljänneksen raja, mediaani, 75 % eli ylimmän neljänneksen raja ja maksimi. Sulfaatin ja raudan osalta laskettujen arvojen minimi ja alimman neljänneksen raja ovat samat. Tämä johtuu siitä, että koko laskentajakajasta yli neljäsosan ajan on mittapadolle tullut vettä vain sivuvaluma-alueelta, ei sulfaattimaa-alueilta.

4.3 Mallin toimivuus

Mallin toimivuutta tarkastellaan kalibrointitulosten pohjalta. Tuloksia arvioitaessa on syytä huomioida, että vertailukohtana oleviin havaintoihin ja niistä muodostettuihin kumulatiivisiin vertailuarvoihin liittyy havainnointiin kuuluva epätarkkuus, jota ei tässä erikseen tarkastella.

Sulfaattimaa-alueen hydrologinen malli toimi kalibrointitulosten perusteella siten, että laskettu kumulatiivinen vesimäärä koko simulointi-ajalta oli alle kahden prosentin tarkkuudella oikein sekä Pajuluomalla että Haapajyrällä. Suurimmat suhteelliset erot laskettujen ja havaittujen vesimäärien välillä syntyivät Pajuluomalla syksyisin ja keväisin siten, että lasketut vesimäärät olivat syksyisin havaittuja pienempiä ja keväisin havaittuja suurempia. Haapajyrällä erot olivat Pajuluomaa pienempiä.

Sivuvaluma-alueen hydrologinen malli puolestaan toimi kalibrointitulosten perusteella siten, että laskettu kumulatiivinen vesimäärä koko simulointiajalta oli Pajuluomalla noin 7 % suurempi kuin vastaava havaittu määrä ja Haapajyrällä alle kahden prosentin tarkkuudella oikea. Erojen synnystä ei ole selkeästi pääteltävissä riippuvuutta vuodenaikojen suhteen.

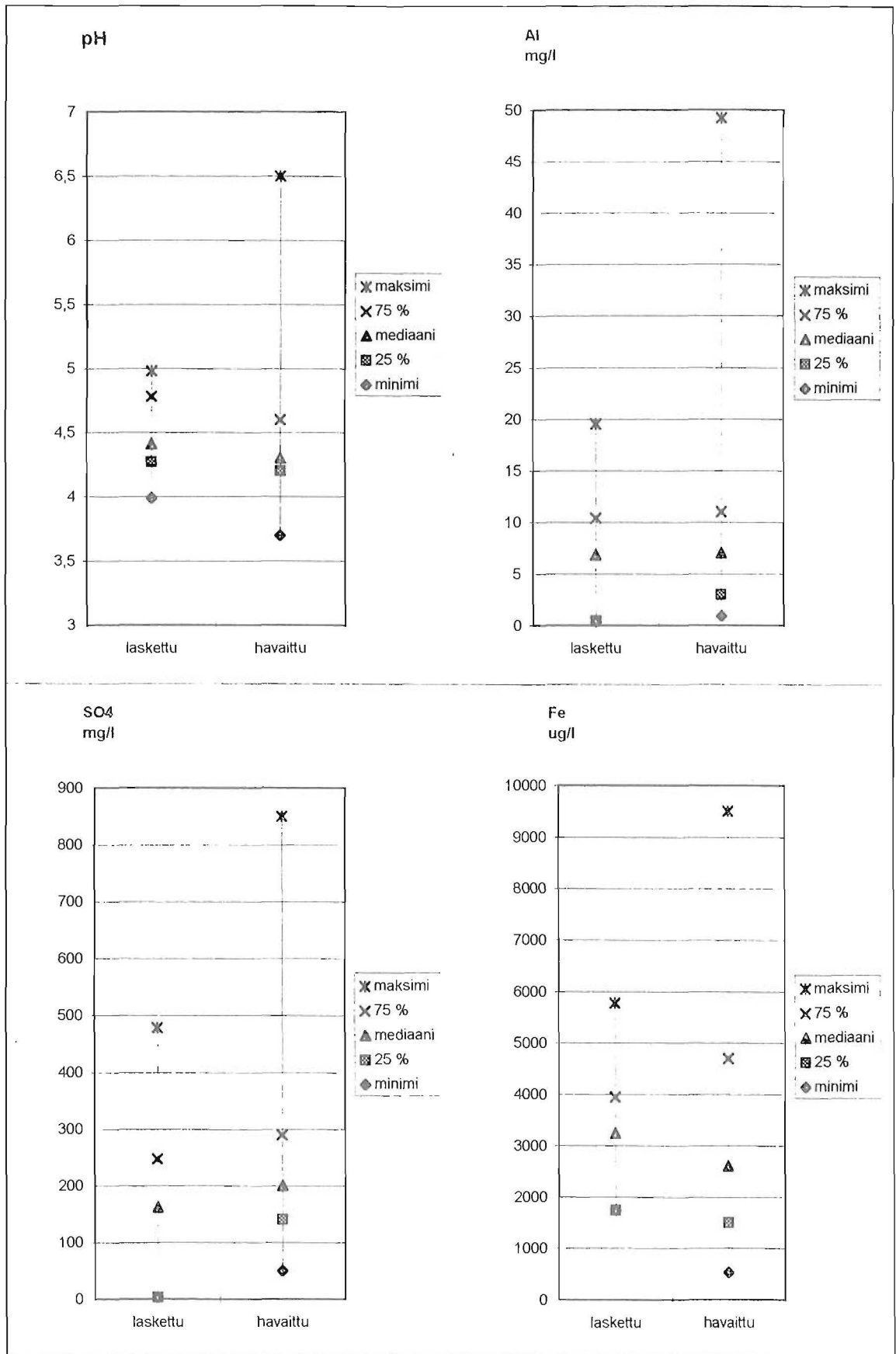
Hydrologisten mallien muodostama kokonaisuus toimi kalibrointitulosten perusteella siten, että laskettu kumulatiivinen vesimäärä koko simulointiajalta oli Pajuluomalla 4 % suurempi ja Haapajyrällä 1 % pienempi kuin vastaavat havaitut määrät. Suurimmat erot laskettujen ja havaittujen vesimäärien välillä syntyivät Pajuluomalla syksyisin ja keväisin siten, että lasketut vesimäärät olivat syksyisin havaittuja pienempiä ja keväisin havaittuja suurempia. Suurin ero oli noin 210 000 m³ marraskuussa -91. Haapajyrällä erot olivat Pajuluomaa pienempiä ja suurin ero oli 90 000 m³ helmikuussa -92.

Kalibrointilaskentojen perusteella kumulatiivinen vetyionimäärä koko simulointiajalta oli Pajuluomalla 15 % pienempi ja Haapajyrällä 8 % pienempi kuin vastaava havaittu määrä. Suurimmat erot laskettujen ja havaittujen kumulatiivisten määrien välillä olivat Pajuluomalla noin 0,006 mol/m² joulukuussa -91 ja Haapajyrällä noin 0,002 mol/m² toukokuussa -92. Laskettujen päivittäisten pH arvojen mediaani oli Pajuluomalla 0,14 suurempi ja Haapajyrällä 0,11 suurempi kuin vastaava havaintojen mediaani.

Kalibrointilaskentojen perusteella kumulatiivinen alumiinimäärä koko simulointiajalta oli Pajuluomalla 6 % pienempi ja Haapajyrällä 11 % pienempi kuin vastaava havaittu määrä. Suurimmat erot laskettujen ja havaittujen kumulatiivisten määrien välillä olivat Pajuluomalla noin 0,6 g/m² helmikuussa -92 ja Haapajyrällä noin 0,4 g/m² toukokuussa -92. Laskettujen päivittäisten alumiinikonsentraatioiden mediaani oli Pajuluomalla 0,7 mg/l pienempi ja Haapajyrällä 0,1 mg/l pienempi kuin vastaava havaintojen mediaani.

Kalibrointilaskentojen perusteella kumulatiivinen sulfaattimäärä koko simulointiajalta oli Pajuluomalla 4 % pienempi ja Haapajyrällä 4 % pienempi kuin vastaava havaittu määrä. Suurimmat erot laskettujen ja havaittujen kumulatiivisten määrien välillä olivat Pajuluomalla noin 12 g/m² helmikuussa -92 ja Haapajyrällä noin 7 g/m² kesäkuussa -91. Laskettujen päivittäisten sulfaattikonsentraatioiden mediaani oli Pajuluomalla 27 mg/l pienempi ja Haapajyrällä 38 mg/l pienempi kuin vastaava havaintojen mediaani.

Kalibrointilaskentojen perusteella kumulatiivinen rautamäärä koko simulointiajalta oli Pajuluomalla 7 % suurempi ja Haapajyrällä 18 % suurempi kuin vastaava havaittu määrä. Suurimmat erot laskettujen ja havaittujen kumulatiivisten määrien välillä olivat Pajuluomalla noin 110 mg/m² maaliskuussa -91 ja Haapajyrällä noin 220 mg/m² helmikuussa -92. Laskettujen päivittäisten sulfaattikonsentraatioiden mediaani oli Pajuluomalla 320 µg/l suurempi ja Haapajyrällä 640 µg/l suurempi kuin vastaava havaintojen mediaani.



Kuva 25. Haapajyrän lasketuista ja havaituista konsentraatioista saatujen tilastollisten tunnuslukujen vertailu. pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta (µg/l).

Veden laatumallin toimivuutta arvioitaessa on syytä huomioida, että laskenta-ajan lyhyydestä johtuen maaperässä tapahtuvat muutokset eivät ole laskennoissa ehtineet kokonaisuudessaan näkyä kuivatusojien kautta pumppaamolle tai mittapadolle tulevassa vedessä. Tällöin laskentatulokset ovat paljolti riippuneet laskennan alkutilanteesta maaperässä. Tämän huomioiden laatumalli vaikuttaa keskiarvoistavalta siten, että lasketut veden laadun vaihtelut ovat pienempiä kuin havaitut. Lasketut konsentraatiot ovat kuitenkin oikeata tasoa. Yhteenvedo- arvio on, että mallilla voidaan hyvin laskea sulfaattimailta tulevia ainekuormia.

Tarkasteltaessa laatumallin parametrien verifiointin onnistumista Haapajyrälä on muistettava alkutilanteen merkittävyys. Sen huomioiden verifiointi vaikuttaa lupaavalta, koska Haapajyrän tulos ei oleellisesti eroa Pajuluoman tuloksesta. Mallin jatkokäyttöä ajatellen tämä on hyvä asia.

4.4 Mallin herkkyyks

Kalibrointilaskentojen perusteella ovat mallista erottuneet ne osa-alueet, joissa tehtävät parametrien arvojen muutokset aiheuttavat suurimmat vaihtelut laskennan lopputulokseen. Nämä liittyvät sekä hydrologian laskentaan että veden laadun laskentaan. Peruslähtökohta on kuitenkin se, että vesimäärän kalibrointi täytyy saada ensin kohdalleen, jotta ainekuormien kalibroinnissa olisi mahdollisuuksia onnistua.

Hydrologian laskennassa vesimäärien suuruusluokan ratkaisee haihdunnan määrä. Tämä koskee sekä sulfaattimaa- aluetta että sivuvaluma- aluetta. Laskentojen perusteella yli kaksi kolmasosaa satavasta vedestä haihtuu ja vain noin kolmannes tulee kuivatusojiin. Liian pieni haihdunta johtaa maaperän vesipitoisuuden kasvamiseen ja pohjaveden pinnan korkeaan tasoon. Toisaalta liian suuri haihdunta kuivattaa maaperän.

Toinen päätekijä hydrologiassa on maaperästä kuivatusojiin tulevan vesimäärän säätäminen. Vettä tulee vain silloin kun pohjaveden pinta on salaajaputkien tason yläpuolella. Säätö on sulfaattimaa- alueen mallissa tehty kalenterikuukausittaiseksi. Liian suuri johtavuus aiheuttaa sen, että pohjaveden pinnan taso ei juuri nouse yli salaajaputkien tason ja että virtaamavaihtelut kuivatusojissa ovat suuria. Liian pieni johtavuus puolestaan estää veden tulon ulos maaperästä, minkä johdosta maaperä täyttyy ajan mittaan vedellä.

Veden laadun kannalta tärkein tekijä on hapettuminen. Happitasapainon laskennassa säädetään hapen kulkeutumista maanperän ilmahuokosissa sekä hapen siirtymistä maaveden ja ilmarakojen välillä. Hapen kulkeutuminen ja siirtyminen on kalibrointilaskentojen perusteella syytä asettaa nopeaksi. Mahdollinen kulkeutumisen ja siirtymisen hitaus aiheuttaa hapen puutetta myös pohjaveden pinnan yläpuolella ja näin estää hapettumisen. Tällöin aineiden konsentraatiot maavedessä jäävät liian pieniksi.

Toinen osatekijä hapettumisessa on hapettumisen suuruuden säätäminen siellä missä happea on. Liian hidas hapettuminen aiheuttaa vastaavan tilanteen kuin happivaje. Liian nopea hapettuminen taas johtaa maaperän rikkimäärän nopeaan loppumiseen ja suuriin konsentraatioihin maavedessä.

Tarkasteltavista aineista rauta on osoittautunut mallinnuksen kannalta ongelmallisimmaksi ja parametrien muutoksille herkimmäksi aineeksi. Laskentojen perusteella hapettumisessa syntyy rautaa monikertainen määrä verrattuna salaojista ulos tuleviin määriin. Tällöin valtaosan raudasta täytyy saostua maaperään mallin mukaisesti kolmiarvoisena rautana. Mallissa kaksiarvoisen raudan hapettumisnopeus kolmiarvoiseksi raudaksi on säädettävissä. Liian pieni nopeus johtaa liian suuriin rautakonsentraatioihin maavedessä. Vastaavasti liian suuri nopeus johtaa liialliseen saostumiseen ja alhaisiin konsentraatioihin maavedessä.

Sovellutukset

5.1 Tarkoitus

Sovellutuslaskentojen tarkoituksena on ollut testata mallin soveltuvuutta kalibrointilaskentoja laajemmin. Laskennat ovat pitkän ajan simulointi, pohjaveden padotus, kalkitus peltoon ja kalkitus seosveteen. Näistä pitkän ajan simulointi on tehty sekä Pajuluomalla että Haapajyrällä, muut Pajuluomalla. Laskentatuloksille ei ole ollut vertailukohtaa havaittuihin arvoihin, joten kaikki johtopäätökset perustuvat vain laskentoihin.

5.2 Pitkän ajan simulointi

Pitkän ajan simulointina on tarkasteltu 30 vuoden pituista laskentaa. Tarkoitus on ollut selvittää sulfaattimaa-alueelta tulevan veden laadun kehitys pitkällä aikavälillä. Laskennat on tehty sekä Pajuluoman että Haapajyrän alueille.

30 vuoden simuloinnissa tarvittava säätila on muodostettu kalibrointilaskentojen säätilaa toistamalla. Kahden vuoden jaksoa maaliskuusta -90 maaliskuuhun -92 on toistettu 15 kertaa. Säätilalla tarkoitetaan tässä sadantaa, ilman lämpötilaa ja astiahaihduntaa. Säätilan toistuminen säännöllisenä johtaa siihen, että pohjaveden pinnan korkeuden vaihtelut ja kuivatusojiin tuleva vesimäärä toistuvat kahden vuoden jaksoissa.

Mallin parametrien arvot ovat kaikilta osin olleet ne, joihin päädyttiin mallin kalibroinnissa (luku 4). Niinikään laskennan alkutilanne on ollut sama kuin kalibrointilaskennoissa.

Laskennan tulosten perusteella hapettumisessa vapautuvat ainemäärät pienenevät maaperän rikkipitoisuuden vähentyessä ja kuivatusojiin tulevan veden sulfaattipitoisuus pienenee. Sulfaattipitoisuus on ollut laskennan alussa tasolla 780 mg/l ja laskennan lopussa tasolla 290 mg/l. Loppupitoisuus on 37 % alkupitoisuudesta. Veden pH laskee hieman ajan funktiona. pH on laskennan alussa tasolla 3,85 ja laskennan lopussa tasolla 3,70. Laskennan lopun pH on 96 % laskennan alun pH:sta. pH:n laskeminen johtuu siitä, että vielä laskennan lopussakin hapettumisessa vapautuva vetyionimäärä on suurempi kuin maasta ulos tuleva vetyionimäärä. Valtaosa laskennan aikana vapautuneista vetyioneista sitoutuu maaperään.

Veden alumiinipitoisuus pienenee ajan funktiona maaperän alumiinipitoisuuden vähentyessä. Alumiinipitoisuus on ollut laskennan alussa tasolla 24 mg/l ja lopussa tasolla 8 mg/l. Loppupitoisuus on 33 % alkupitoisuudesta. Veden rautakonsentraatio puolestaan on ensimmäiset 5 vuotta hieman nouseva ja sen jälkeen tasaisesti laskeva. Rautapitoisuus on ollut laskennan alussa tasolla

5000 $\mu\text{g/l}$ ja lopussa tasolla 4500 $\mu\text{g/l}$. Loppupitoisuus on 90 % alkupitoisuudesta. Raudan osalta tilanne on samankaltainen kuin vetyioneilla. Vielä laskennan lopussa hapettumisessa vapautuva rautamäärä on suurempi kuin maasta ulos tuleva rautamäärä. Valtaosa vapautuneesta raudasta saostuu maaperään.

Maaperän aineista rikkiyhdisteet FeS ja FeS_2 pienenevät voimakkaimmassa hapettumiskohdassa hieman salaojasyvyyden yläpuolella eli syvyydellä 1,1 m noin kolmanneksen tasolta 8 mol/m^3 tasolle 5 mol/m^3 . Samoin käy maaperän alumiinille, joka vastaavalla syvyydellä pienenee tasolta 15 mol/m^3 tasolle 10 mol/m^3 . Maaperän kalsium ei kokonaisuutena juurikaan muutu. Salaojatason yläpuolella eli syvyydellä 0-1,2 m H^+_{ads} kasvaa tasolta 1-5 mol/m^3 tasolle 9-12 mol/m^3 ja $\text{Fe}(\text{OH})_3$ kasvaa arvosta 10 mol/m^3 tasolle 12-14 mol/m^3 .

Pajuluoman pitkän ajan laskennat tulokset on esitetty kuvissa 26-29. Kuvassa 26 on Pajuluoman sulfaattimaa-alueen veden laatu ajan funktiona. Vastaava kuva Pajuluoman pumppaamolle on kuvassa 27. Kuvissa 28 ja 29 puolestaan on esitetty maaperän kiinteiden aineiden konsentraatiot syvyyden funktiona laskennan alussa ja lopussa.

Haapajyrän 30 vuoden simuloinnin tulokset vahvistavat Pajuluoman laskennasta saadut tulokset. Konsentraatioiden muutokset ajan funktiona ovat saman suuntaisia ja samaa suuruusluokkaa kuin Pajuluomalla. Haapajyrän tuloksia ei sen vuoksi tässä erikseen esitetä.

5.3 Padotus

Padotusta on tarkasteltu toistamalla edellisessä kohdassa 5.2 kuvattu 30 vuoden laskenta Pajuluoman sulfaattimaa-alueella siten, että veden pintaa on padottu koko laskennan ajan luonnontilaa korkeammalle. Laskennassa padotus on toteutettu asettamalla salaojaputkien korkeustaso 0,6 metrin korkeuteen maan pinnalta lukien normaalin 1,2 metrin sijasta. Kyseessä ei kuitenkaan ole ns. kasteleva padotus eli kuivatusojista ei missään vaiheessa tule vettä salaojien kautta maaperään.

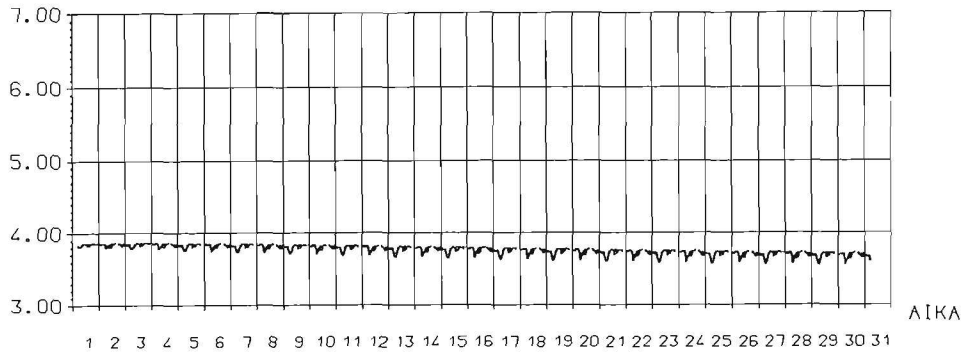
Laskennan tuloksen perusteella padotus pitää pohjaveden pinnan keskimäärin korkeammalla kuin luonnontilassa. Tästä seuraa, että hapettumista ei pääse tapahtumaan niin syvältä kuin luonnontilassa ja siten hapettumisessa vapautuvat ainemäärät ovat vastaavasti pienempiä. Tämä näkyy maasta ulos tulevan veden sulfaatti-, alumiini- ja rautakonsentraatioiden nopeampana pienenemisenä kuin luonnontilaisessa laskennassa. pH puolestaan on ajan myötä lievästi kohoava.

Sulfaattimaa-alueelta tulevat ainevirtaamat padotuslaskennassa verrattuna luonnontilaiseen laskentaan ovat taulukossa 18.

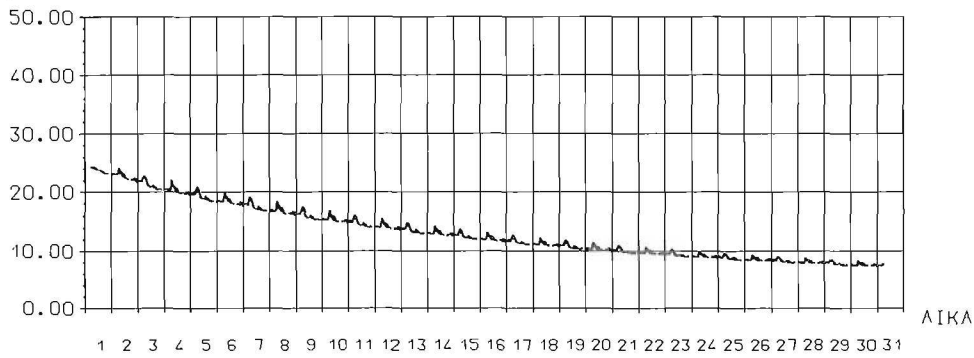
Taulukko 18. Padotun tilan ja luonnontilan ainekuormien vertailu.

	Luonnontila	Padotus
Vetyionit	100 %	77 %
Sulfaatti	100 %	86 %
Alumiini	100 %	85 %
Rauta	100 %	67 %

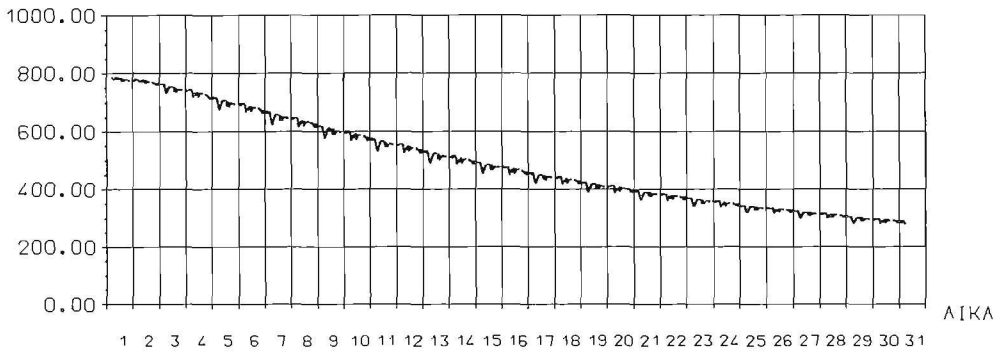
pH



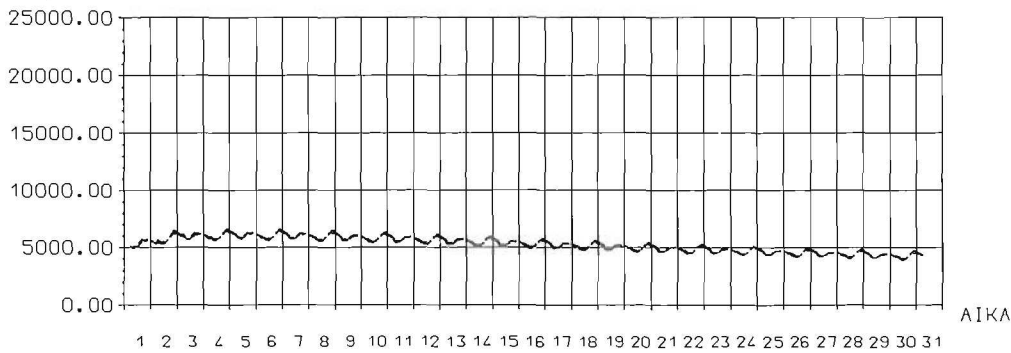
ALUMIINI
mg/l



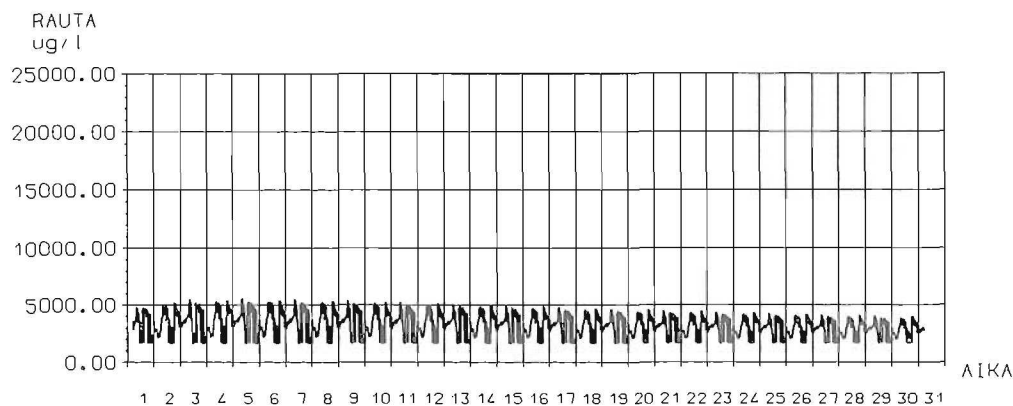
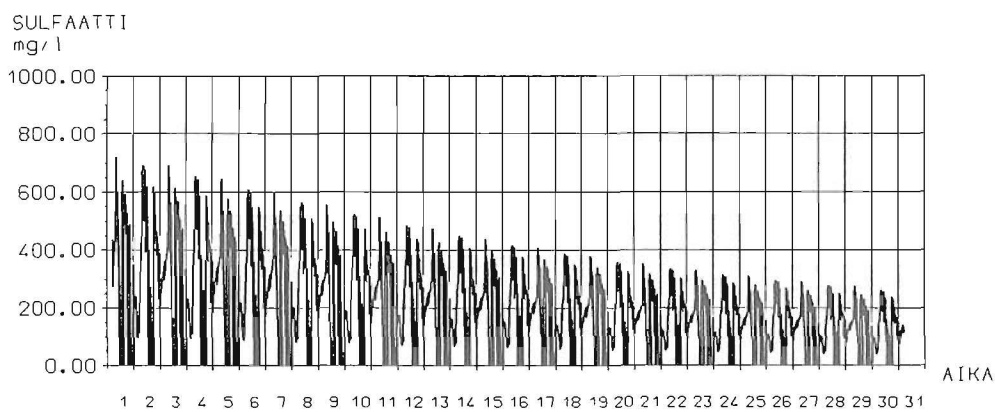
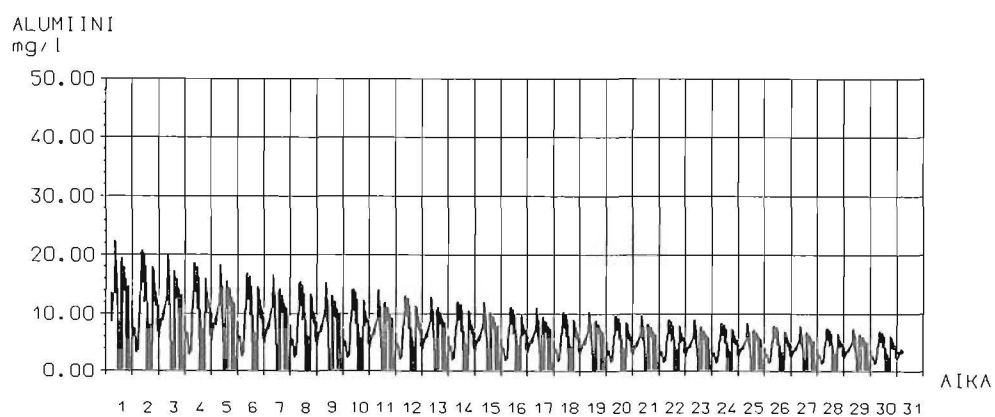
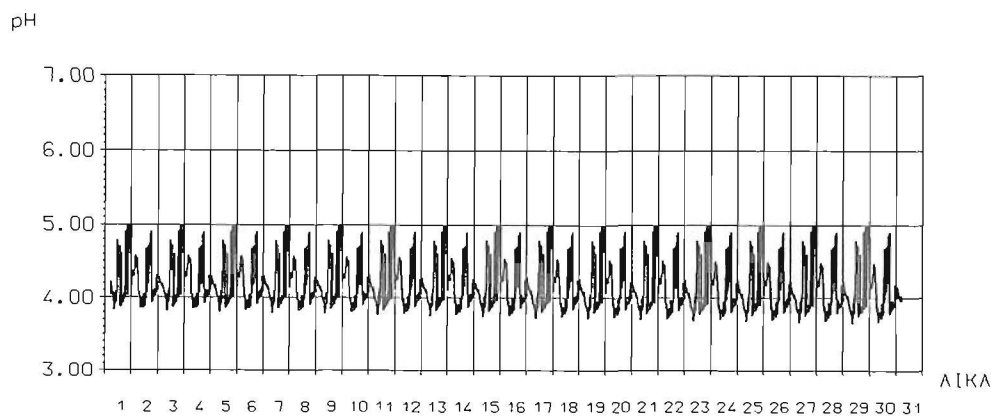
SULFAATTI
mg/l



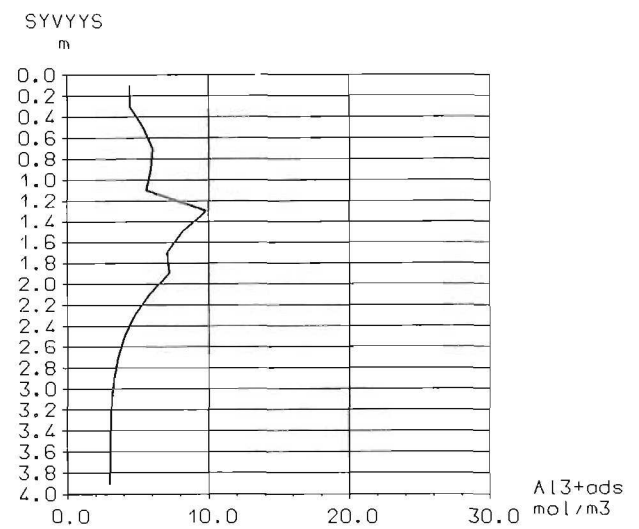
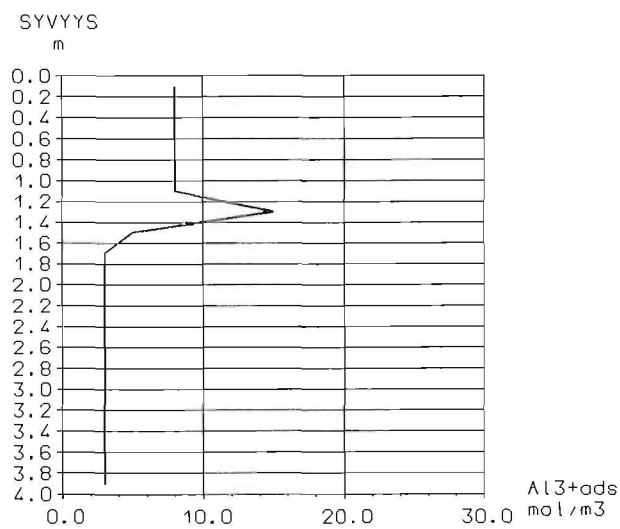
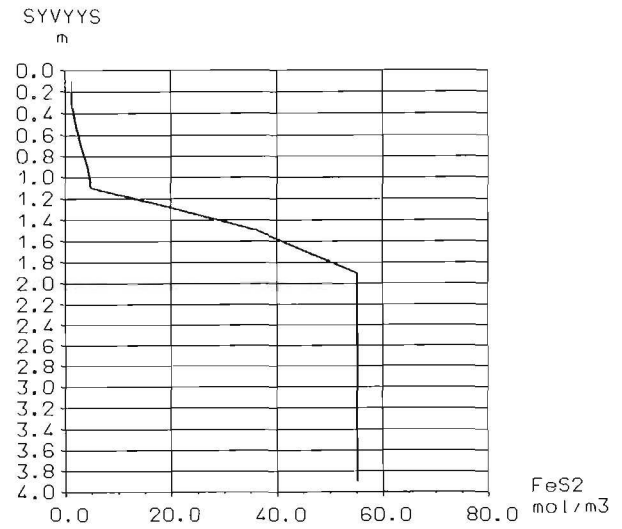
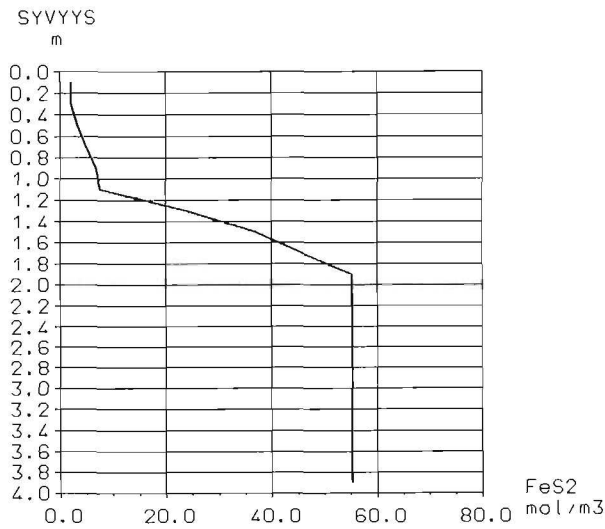
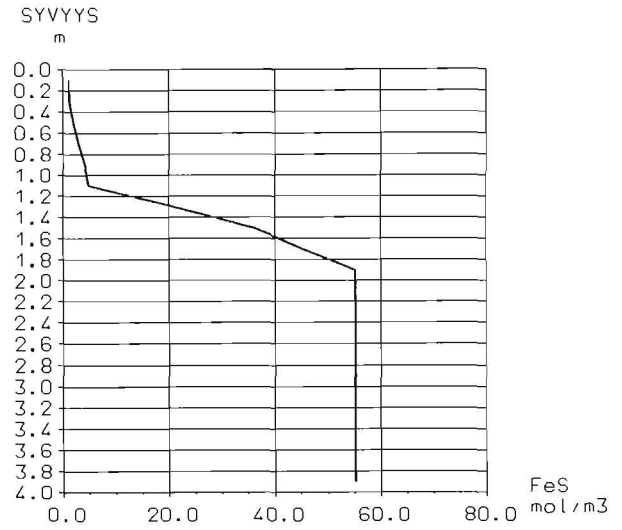
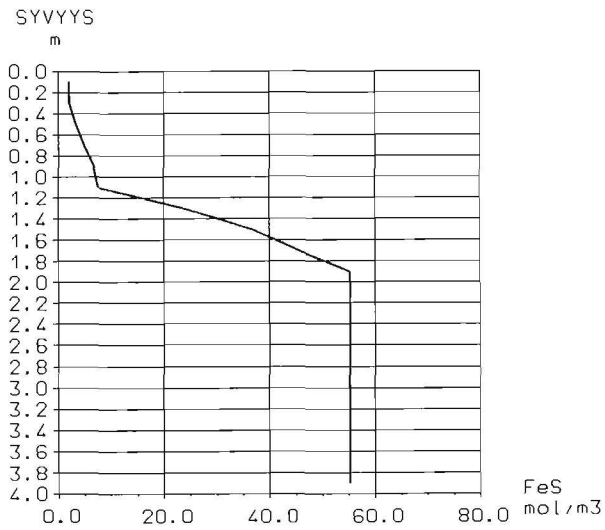
RAUTA
ug/l



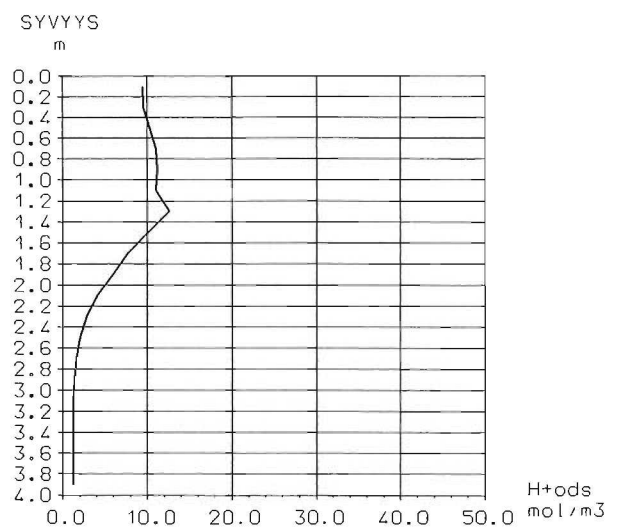
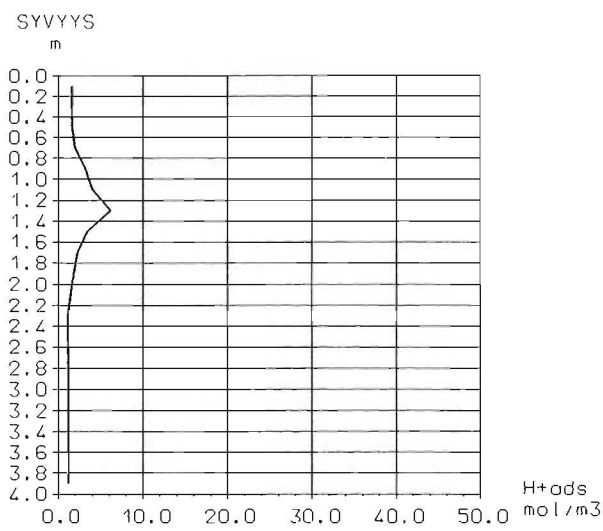
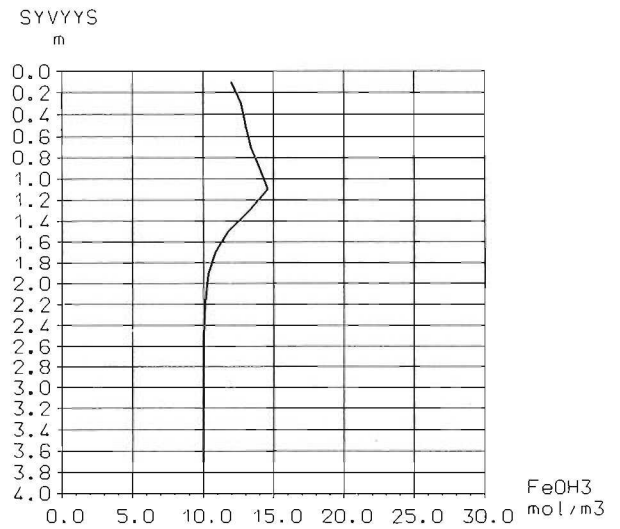
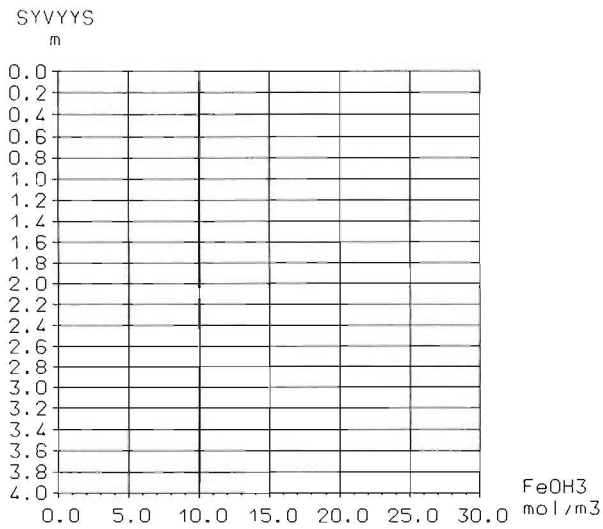
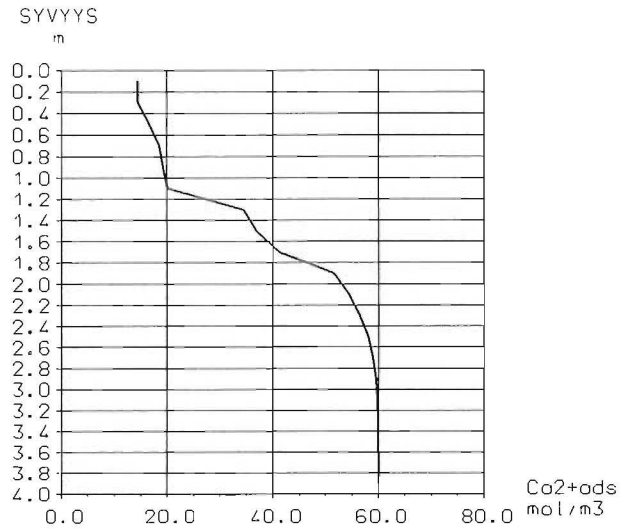
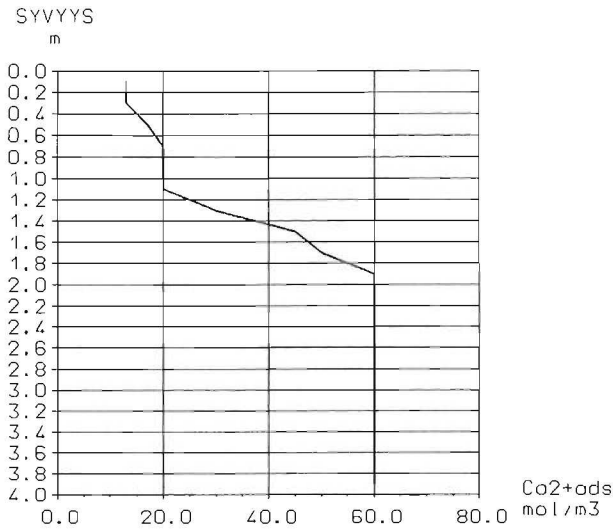
Kuva 26. Pajuluoman sulfaattimaa-alue, 30 vuoden simulointi. Veden laatu ajan funktiona: pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta ($\mu\text{g/l}$).



Kuva 27. Pajuluoman pumppaamo, 30 vuoden simulointi. Veden laatu ajan funktiona: pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta (µg/l).



Kuva 28. Pajuluoman sulfaattimaa-alue, 30 vuoden simulointi. Maaperän kiinteiden aineiden alku- ja loppukonsentraatiot: rautamonosulfidi (mol/m^3), pyriitti (mol/m^3) ja vaihtuva alumiini (mol/m^3).



Kuva 29. Pajuluoman sulfaattimaa-alue, 30 vuoden simulointi. Maaperän kiinteiden aineiden alku- ja loppukonsentraatiot: vaihtuva kalsium (mol/m^3), rautahydroksidi (mol/m^3) ja vetyionit (mol/m^3).

Laskennan tulos on esitetty kuvassa 30, jossa on Pajuluoman sulfaattimaa-alueelta tulevan veden laatu ajan funktiona. Edellisen kohdan vastaava kuva on 26.

5.4 Kalkitus peltoon

Pellon kalkitusta on tarkasteltu toistamalla kohdassa 5.2 kuvattu 30 vuoden laskenta Pajuluoman sulfaattimaa-alueella siten, että peltoa on kalkittu joka vuosi lähtötietona annettavalla kalkkimäärällä. Laskennassa vuoden kalkkimäärä lisätään ylimpään maakerrokseen jakamalla se tasaisesti joka päivälle toukokuun alusta syyskuun loppuun.

Ensimmäisessä laskennassa kalkin määrä on ollut 710 kg/ha/a. Tämä vastaa Pajuluoman alueen keskimääräistä kalkitusta vuosina 88-92. Kalkin neutralointikyky on ollut 30 %.

Laskennan tuloksen perusteella kalkituksella ei ole merkittävää vaikutusta kuivatusojiin tulevan veden laatuun. Vetyionikuorma pienenee noin viisi prosenttia ja rautakuorma kasvaa noin kuusi prosenttia verrattuna kalkitsemattomaan tilanteeseen. Sulfaatti- ja alumiinikuormat muuttuvat alle prosentin. Maaperässä kalkitus näkyy lähinnä ylimmän maakerroksen pH:n kohoamisena.

Laskennan tulos on esitetty kuvassa 31, jossa on veden laatu ajan funktiona. Kohdan 5.2 vastaava kuva on 26.

Toisessa laskennassa kalkin määrä on ollut viisinkertainen normaalikalkitukseen verrattuna eli 3550 kg/ha/a. Kalkin neutralointikyky on edelleen ollut 30 %.

Laskennan tuloksen perusteella tällainenaan kalkitus ei merkittävästi vaikuta kuivatusojiin tulevan veden laatuun. Vetyionikuorma ja alumiinikuorma pienenevät noin seitsemän prosenttia ja rautakuorma kasvaa noin kymmenen prosenttia verrattuna kalkitsemattomaan tilanteeseen. Sulfaattikuorma ei muutu. Maaperässä kalkituksen neutralointivaikutus ehtii edetä noin 0,6 m syvyyteen. Kalkituksen vaikutusta vähentää se, että kaikki lisättävä kalkki ei enää liukenene ylimmän maakerroksen neutraloiduttua riittävästi.

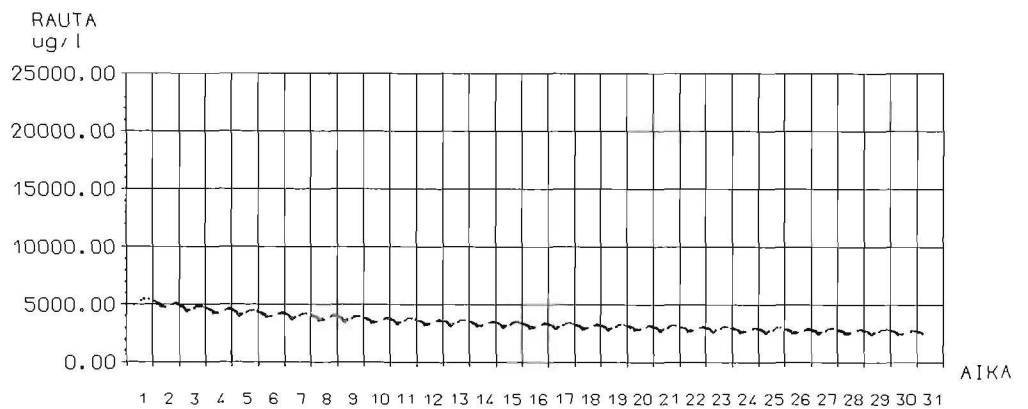
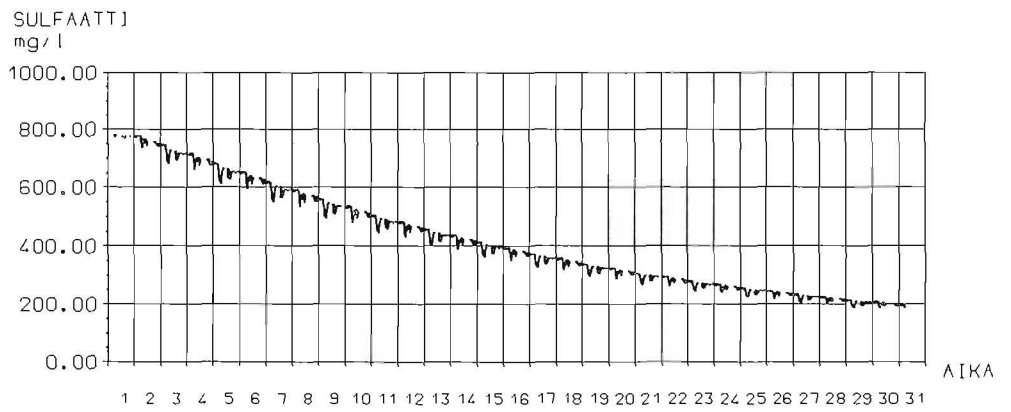
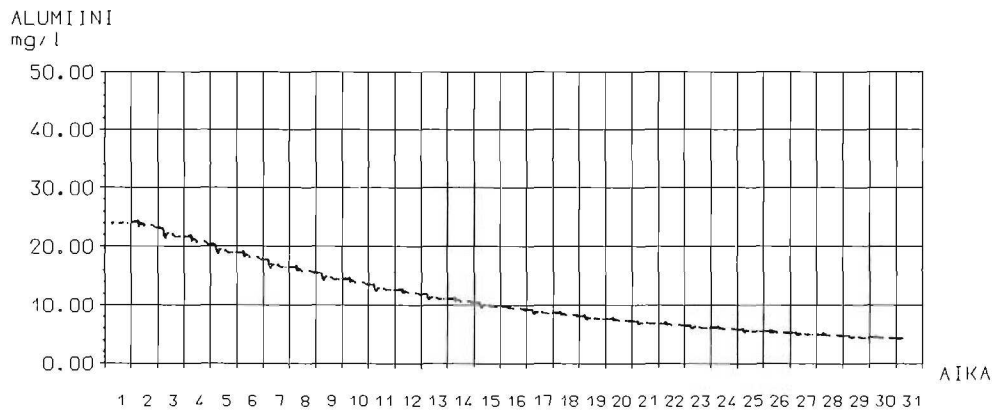
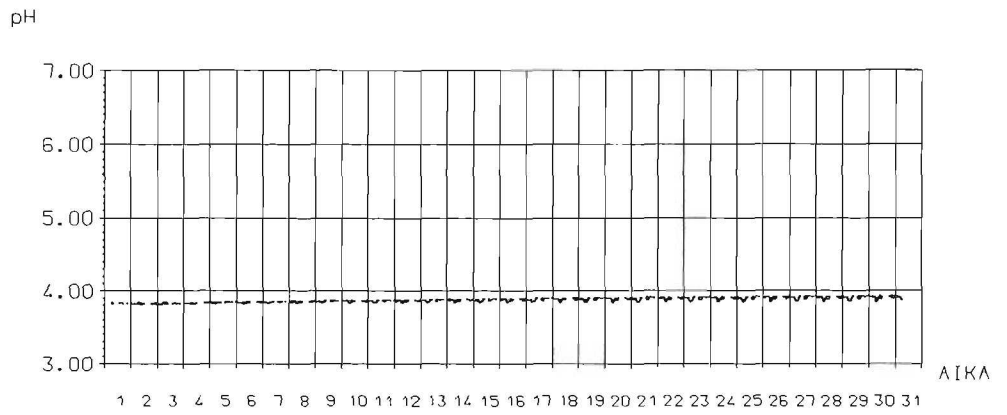
Laskennan tulos on esitetty kuvassa 32, jossa on veden laatu ajan funktiona. Kohdan 5.2 vastaava kuva on 26.

5.5 Kalkitus seosvedeen

Seosveden kalkitusta on tarkasteltu Pajuluoman pumppaamolla kalibrointilaskentaa vastaavassa laskennassa aikavälillä maaliskuusta -90 toukokuuhun -92. Laskennan säätila, parametrien arvot ja alkutilanne ovat samat kuin kalibrointilaskennassa. Tasapainovakion K_{CaCO_3} arvo on ollut $10^{5.1}$.

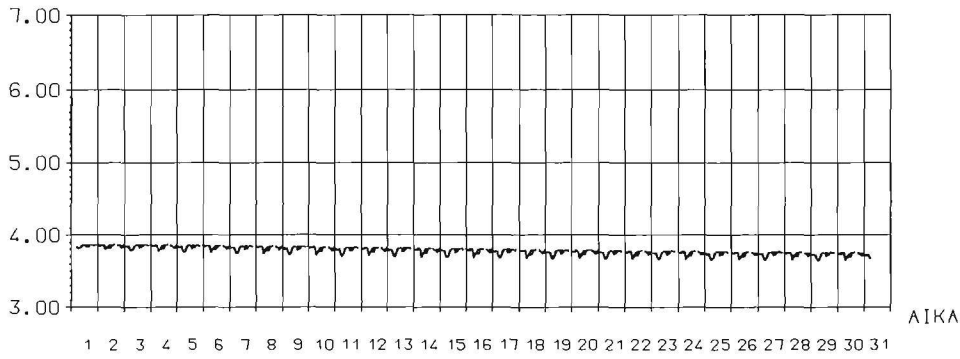
Ensimmäisessä laskennassa kalkituksen määrää asiditeetin perusteella säätävä kerroin (vrt. kohta 3.4.3) on asetettu arvoon 1 ja aika, jonka kalkitus ehtii vaikuttaa, on asetettu arvoon 10 d.

Laskennan tulosten perusteella riittävä seosveden kalkitus neutraloi veden ja saostaa alumiinin ja raudan. Tässä laskennassa neutraloivan kalkin määrä on ollut 88 000 kg koko laskenta-aikana eli maaliskuusta -90 toukokuuhun -92. Jos kalkin neutralointikyky on 30 %, tulee lisätyn kalkin kokonaismääräksi n. 295 000 kg. Veden pH on ollut välillä 5,6-6,1 kun se ilman kalkitusta oli välillä 3,8-5,0.

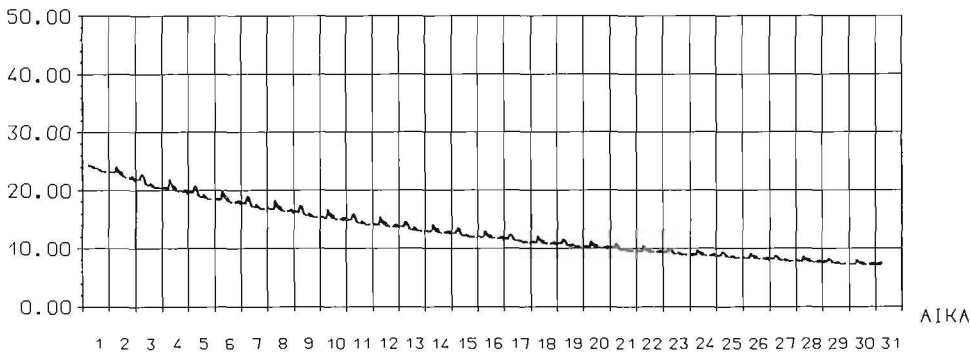


Kuva 30. Pajuluoman sulfaattimaa-alue, 30 vuoden simulointi, padotus tasoon 0,6 m. Veden laatu ajan funktiona: pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta ($\mu\text{g/l}$).

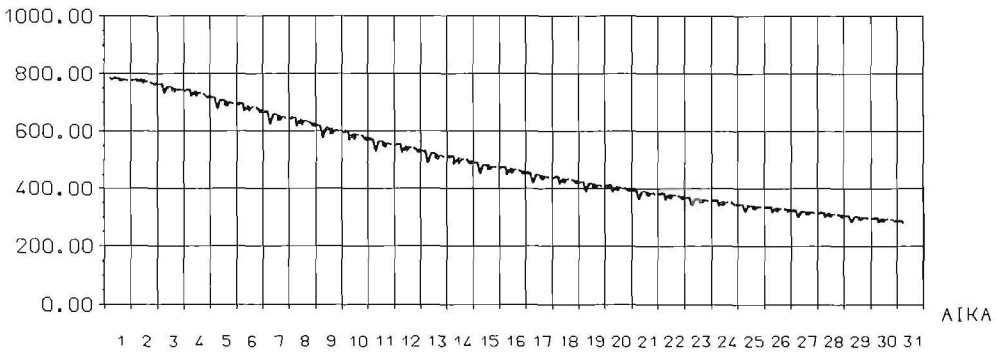
pH



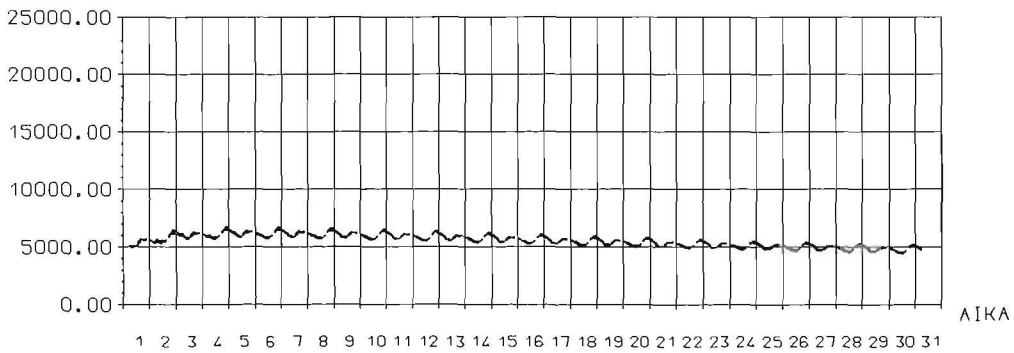
ALUMIINI
mg/l



SULFAATTI
mg/l



RAUTA
ug/l



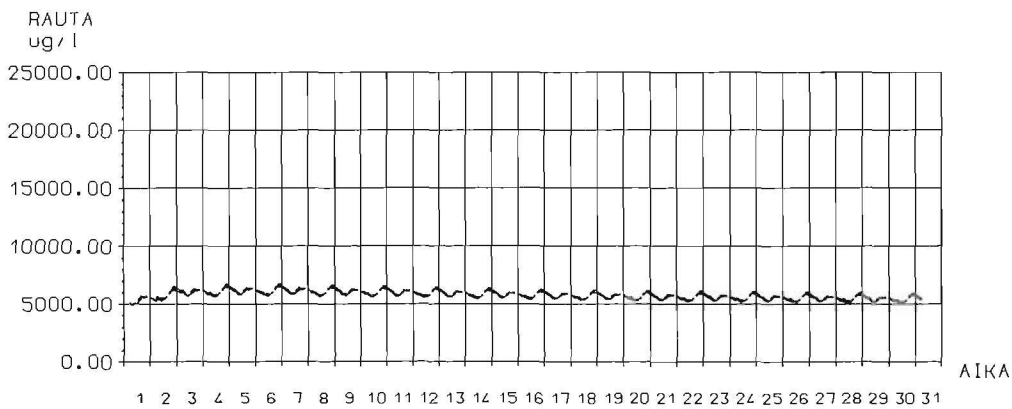
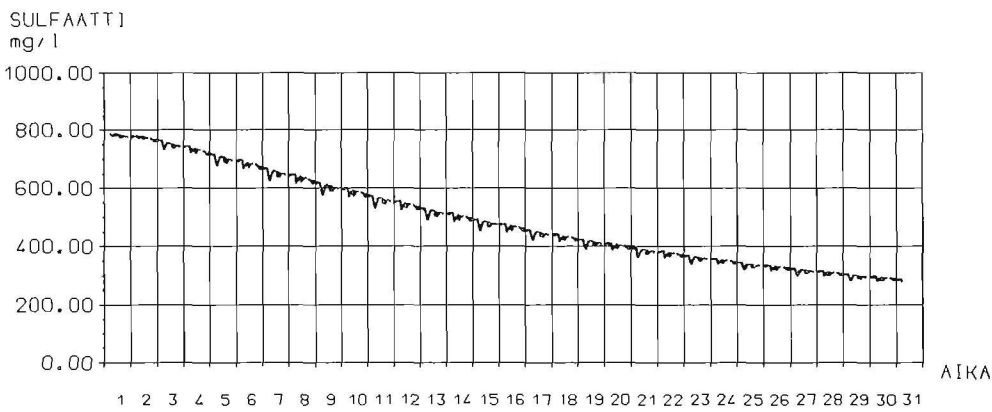
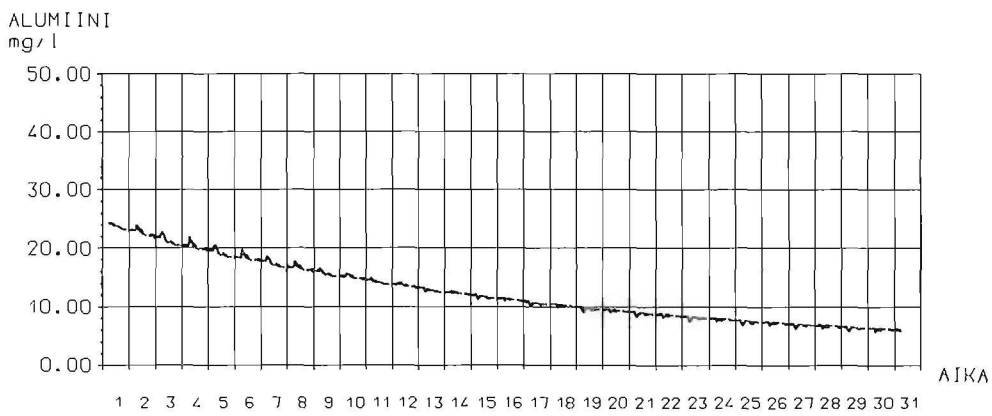
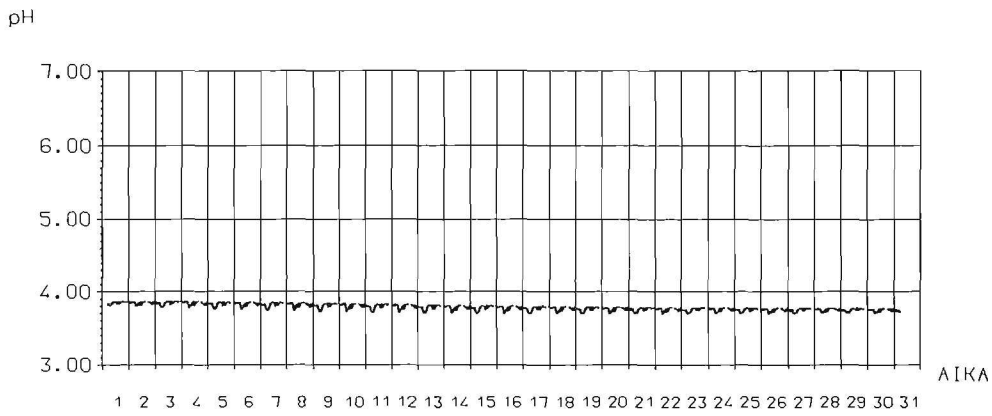
Kuva 31. Pajuluoman sulfaattimaa-alue, 30 vuoden simulointi, kalkitus peltoon 710 kg/haja. Veden laatu ajan funktiona: pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta ($\mu\text{g/l}$).

Laskenta-aikana saostuvan alumiinin määrä on n. 35 000 kg ja saostuvan raudan määrä on n. 8 000 kg. Sulfaattiin kalkitus ei ole vaikuttanut.

Laskennan tulos on esitetty kuvassa 33. Siinä on tarkasteltavien aineiden ainekuormat neutraloinnin jälkeen. Kuvan havaitut vertailuarvot koskevat kalkitsematonta tilannetta. Vastaava kuva kalibrointien yhteydessä oli kuva 13. Toisessa laskennassa kalkituksen määrää asiditeetin perusteella säätävä kerroin (vrt. kohta 3.4.3) on asetettu arvoon 0,5 ja aika, jonka kalkitus ehtii vaikuttaa, on edelleen ollut 10 d.

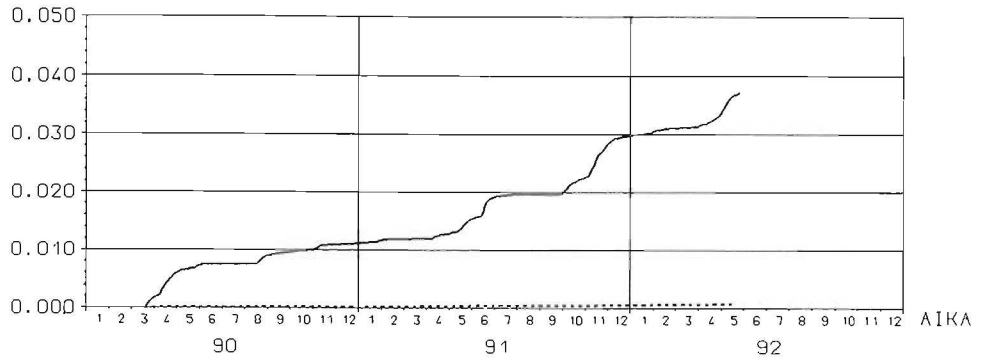
Laskennan tulosten perusteella tällainen seosveden kalkitus kohottaa veden pH:ta vain vähän ja saostaa alumiinin ja raudan osittain. Tässä laskennassa neutraloivan kalkin määrä on ollut 44 000 kg koko laskenta-aikana eli maaliskuusta -90 toukokuuhun -92. Jos kalkin neutralointikyky on 30 %, tulee lisätyn kalkin kokonaismääräksi n. 145 000 kg. Veden pH on ollut välillä 4,0-5,1. Laskenta-aikana saostuvan alumiinin määrä on n. 18 000 kg ja saostuvan raudan määrä on n. 3 000 kg. Sulfaattiin kalkitus ei ole vaikuttanut.

Laskennan tulos on esitetty kuvassa 34. Siinä on tarkasteltavien aineiden ainekuormat neutraloinnin jälkeen. Kuvan havaitut vertailuarvot koskevat kalkitsematonta tilannetta. Vastaava kuva kalibrointien yhteydessä oli kuva 13.

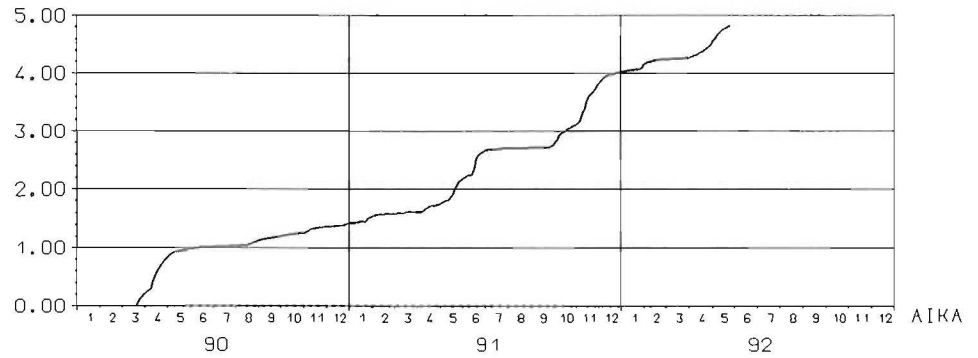


Kuva 32. Pajuluoman sulfaattimaa-alue, 30 vuoden simulointi, kalkitus peltoon 3550 kg/ha/a. Veden laatu ajan funktiona: pH, alumiini (mg/l), sulfaatti (mg/l) ja rauta ($\mu\text{g/l}$).

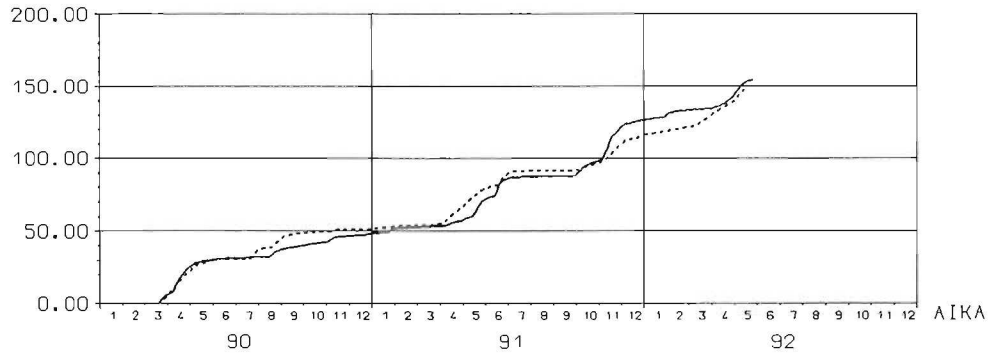
KUMULATIIVINEN
VETYIONIEMÄÄRÄ
mol/m²



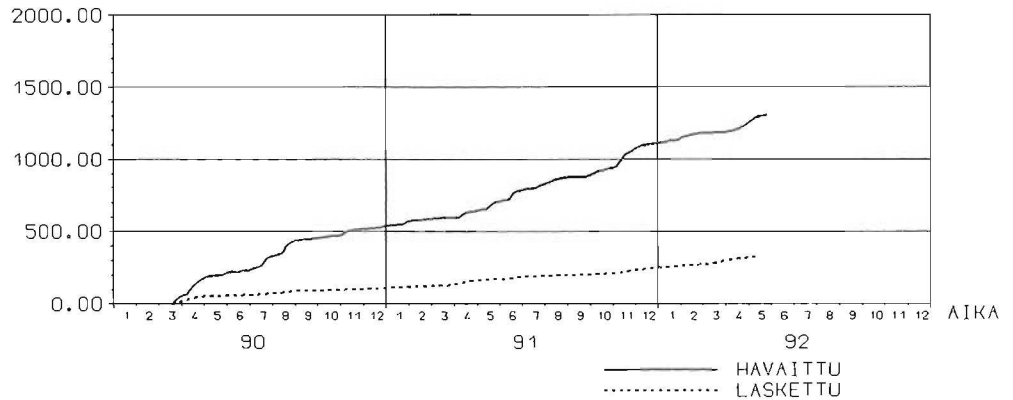
KUMULATIIVINEN
ALUMIINIEMÄÄRÄ
g/m²



KUMULATIIVINEN
SULFAATTIEMÄÄRÄ
g/m²

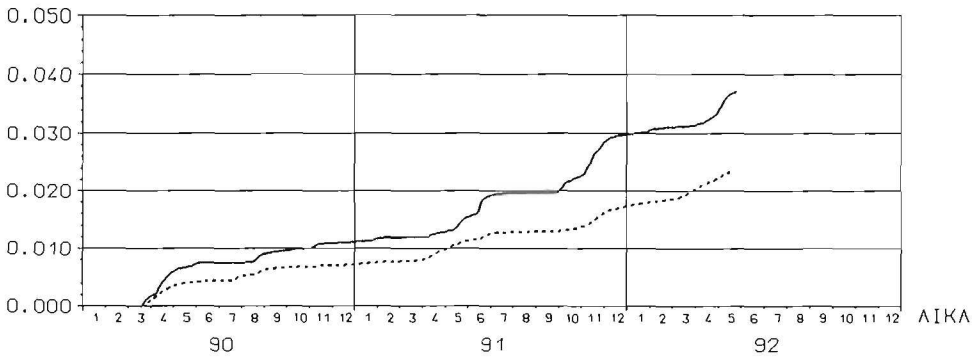


KUMULATIIVINEN
RAUTAMÄÄRÄ
mg/m²

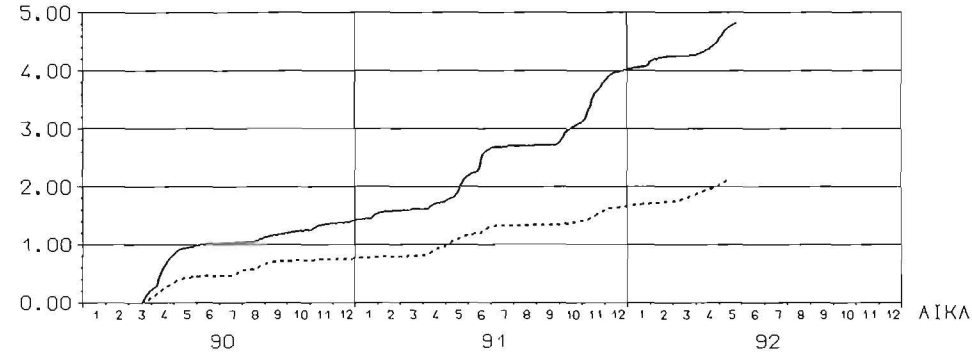


Kuva 33. Kalkitus seosveteen Pajuluoman pumppaamolla. Lisätyn kalkin kokonaismäärä noin 295 000 kg. Vertailu kalkitsemattomaan havaittuun tilanteeseen: vetyionit (mol/m²), alumiini (g/m²), sulfaatti (g/m²) ja rauta (mg/m²). Vuodet 90-92.

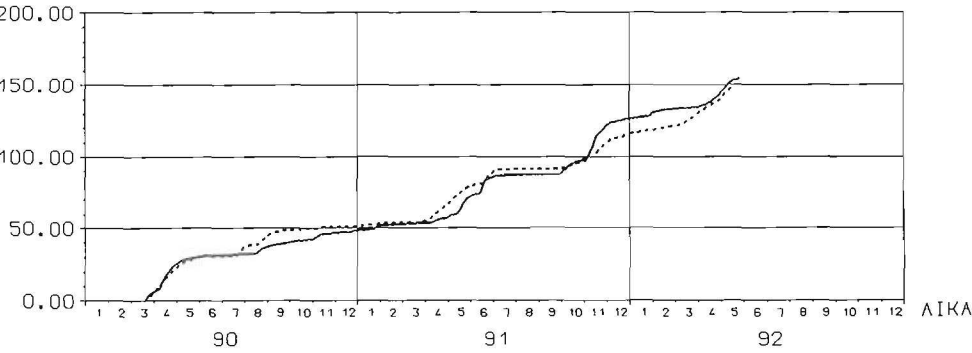
KUMULATIIVINEN
VETYIONIMÄÄRÄ
mol/m²



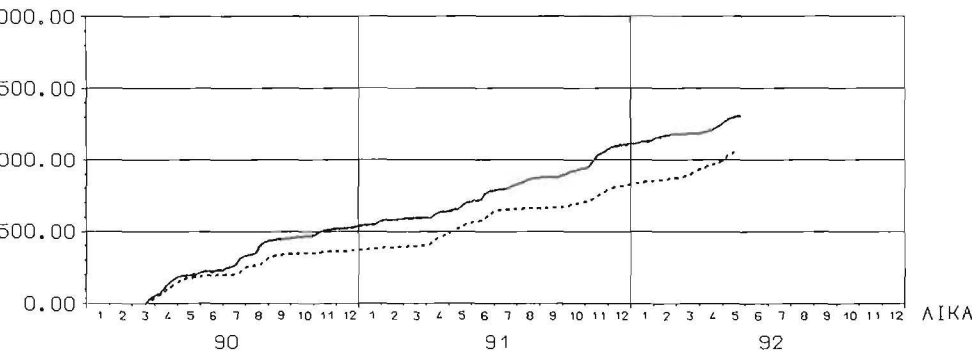
KUMULATIIVINEN
ALUMIINI-MÄÄRÄ
g/m²



KUMULATIIVINEN
SULFAATTI-MÄÄRÄ
g/m²



KUMULATIIVINEN
RAUTAMÄÄRÄ
mg/m²



Kuva 34. Kalkitus seosveteen Pajuluoman pumppaamolla. Lisätyn kalkin kokonaismäärä noin 145 000 kg. Vertailu kalkitsemattomaan havaittuun tilanteeseen: vetyionit (mol/m²), alumiini (g/m²), sulfaatti (g/m²) ja rauta (mg/m²). Vuodet 90-92.

6

Mallin soveltaminen ja kehittäminen

Mallin jatkokehittämisen kannalta olisi ensin saatava nykyistä laajempi käsitys mallin toimivuudesta. Tämä tarkoittaa sitä, että mallia olisi käytettävä mahdollisimman monella muullakin alueella kuin Pajuluomalla ja Haapajyrällä. Tällöin nähtäisiin kuinka paljon esim. virtaamamallin kalibroinnit eri alueilla poikkeaisivat toisistaan ja kuinka yleispätevinä laatumallin parametrien arvoja voitaisiin pitää. Edelleen tarkasteltavalta alueelta tulisi olla ainekuormien vertailuun tarvittavia havaintoja mahdollisimman pitkältä yhtenäiseltä aikajaksolta, jotta laskennan alkutilanteen vaikutus tuloksissa jäisi tässä raportissa kuvattuja tapauksia vähäisemmäksi. Mallia olisi syytä testata myös ilmaperäisen laskeuman vaikutusten kuvaamiseen esim. metsäisillä valuma-alueilla.

HAPSU-mallia voidaan kehittää soveltuvaksi myös muiden vedenlaatuksymysten tarkasteluun, erityisesti typen ja fosforin huuhtoutumisen kuvaamiseen. Tällöin maaperäkemialliseen osamalliin pitäisi lisätä mineralisaatiota ja nitrifikaatiota sekä fosforin adsorptioreaktioita kuvaavia osia.

Yhteenveto

HAPSU-projektissa kehitetty malli simuloi SO_4^- , H^+ , Fe - ja Al -huuhtoutumien aikakehitystä happamia sulfaattimaita sisältäviltä valuma-alueilta. Sulfaattimaille malli kuvaa lämmön, veden, hapen ja liuosten kulkeutumisen maapatsaassa. Rautamonosulfidin (FeS) ja pyriitin (FeS_2) hapettuminen, raudan hapettuminen ja pelkistyminen, rauta- ja alumiinihydroksidien saostuminen ja liukeneminen, kationinvaihto sekä ionien assosioituminen määräävät mallissa sulfaattimaiden maaliuoksen koostumuksen.

Malli sisältää varsinaisia sulfaattimaita käsittelevän osan sekä muita valuma-alueeseen sisältyviä maita käsittelevän osan. Lopulliset valuma-alueelta tulevat ainehuuhtoumat saadaan yhdistämällä osa-alueiden ainevirtaamat.

Sulfaattimaa voidaan mallissa jakaa edelleen pienempiin osa-alueisiin, mikäli maaperäselvitykset antavat sellaiseen aiheita. Kukin tällainen osa-alue kuvataan yksiulotteisella maaprofiililla, jossa veden virtaus, kemialliset prosessit ja aineiden kulkeutuminen tapahtuvat. Maaprofiilia kuvaava malli käsittää seuraavat alamelit:

Hydrologia

- sade ja lumi
- haihdunta
- painannesäilyntävarasto, rakoilu ja imeytyminen
- maaveden virtaus ja kulkeutuminen kuivatusojiin
- maaperän lämpötila sekä maaveden jäätyminen ja sulaminen
- padotus

Veden laatu

- jäätyminen ja sulamisen vaikutus veden laatuun
- hapen kulkeutuminen
- hiilidioksidin muodostuminen ja kulkeutuminen
- hapettuminen ja rapautuminen
- liuenneiden aineiden kulkeutuminen
- maaveden reaktiotasapaino
- kuivatusojiin tulevien vesien laatu ja ainevirtaamat
- pellon kalkitus

Niitä tarkasteltavan valuma-alueen osia, jotka eivät ole varsinaisia sulfaattimaita, käsitellään suurpiirteisemmin. Valumat lasketaan konseptuaalisella mallilla.

Valumavesien laatu arvioidaan havaintojen tai vertailualueilta saatavien tietojen perusteella ja annetaan malliin lähtötietoina.

Osa-alueilta tulevat virtaamat sekoitetaan keskenään ja seosvedelle lasketaan kemiallinen reaktiotasapaino. Sen jälkeen on vielä mahdollista tarkastella kalkituksen vaikutusta seosveden laatuun.

Malli on kalibroitu Kyrönjoen vesistöalueella oleville Pajuluoman ja Haapajyrän alueille aikavälillä maaliskuusta -90 toukokuuhun -92. Pajuluoma on 1970-luvulla toteutettu pengerrysalue, kun taas Haapajyrä on yksi Vesi- ja ympäristöhallituksen tarkkailuohjelmaan sisältyvistä pienistä valuma-alueista. Pajuluoman pengerryspumppaamon valuma-alue on 7,7 km², josta happamiksi sulfaattimaiksi katsottujen peltojen osuus on 4,1 km². Haapajyrän valuma-alue mittapadolla on 6,1 km². Tästä on happamien sulfaattimaiden arvioitu osuus noin 2,1 km².

Kalibrointilaskennoissa käytetyt tiedot on kerätty HAPSU-projektin yhteydessä vuosina 1990-1992. Kalibrointi suoritettiin ensin Pajuluoman osalta. Sen jälkeen kalibroitiin Haapajyrän hydrologinen malli. Haapajyrän kemiallisessa mallissa käytettiin parametreille samoja arvoja kuin Pajuluoman mallissa, joten Haapajyrän kemiallista osaa voidaan pitää mallin verifiointitarkasteluna.

Kalibrointituloksista ajalta 3/90-5/92 on koottu tiivistelmä alla olevaan taulukkoon. Siinä on verrattu Pajuluoman ja Haapajyrän laskettuja arvoja vastaaviin havaittuihin arvoihin. Vertailukohtina ovat kumulatiiviset vesimäärät ja kumulatiiviset ainemäärät koko simulointiajalta sekä päivittäisistä konsentraatioista lasketut mediaanit. Havaittujen ja laskettujen konsentraatioiden mediaaneja määritettäessä oli havaittuja arvoja noin 120 ja laskettuja noin 790. Positiivinen etumerkki tarkoittaa sitä, että laskettu arvo on ollut havaittua suurempi ja negatiivinen etumerkki sitä, että laskettu arvo on ollut havaittua pienempi.

Kumulatiivisten määrien erot	Pajuluoma	Haapajyrä
Vesi	+4 %	-1 %
H ⁺	-15 %	-8 %
Al	-6 %	-11 %
SO ₄	-4 %	-4 %
Fe	+7 %	+18 %

Pitoisuuksien mediaanien erot	Pajuluoma	Haapajyrä
pH	+0,14	+0,11
Al (mg/l)	-0,7	-0,1
SO ₄ (mg/l)	-27	-38
Fe (mg/l)	+0,32	+0,64

Taulukon tulokset on esitetty graafisesti raportin kuvissa 12 ja 23 (vesimäärät), kuvissa 13 ja 24 (ainemäärät) sekä kuvissa 14 ja 25 (tilastolliset tunnusluvut).

Suurimmat erot laskettujen ja havaittujen kumulatiivisten vesimäärien välillä syntyivät Pajuluomalla keväisin ja syksyisin siten, että lasketut vesimäärät olivat keväisin havaittuja suurempia ja syksyisin havaittuja pienempiä. Haapajyrällä vastaavat erot vuodenaikojen suhteen olivat pienempiä kun Pajuluomalla. Simu-

lointiajan lyhydestä johtuen maaperässä tapahtuvat veden laadun muutokset eivät kalibrointilaskennoissa kokonaisuudessaan ehtineet näkyä kuivatusojien kautta pumppaamolle tai mittapadolle tulevassa vedessä. Tällöin laskentatulokset riippuivat laskennan alkutilanteesta maaperässä. Lisäksi havaintoihin ja niistä laskettuihin vertailuarvoihin liittyi havainnointiin normaalisti kuuluva epätarkkuus, jota ei tässä yhteydessä erikseen arvioitu.

Kalibrointilaskentojen jälkeen tehtiin mallin soveltuvuuden testaamiseksi lisälaskentoja, joita olivat pitkän ajan simulointi, pohjaveden padotus, kalkitus peltoon ja kalkitus seosveteen. Näille laskennoille ei ollut vertailukohtana havaittuja arvoja.

Pitkän ajan simuloinnin perusteella maasta tulevan veden pH oli 30 vuoden kuluessa hieman laskeva. Pohjaveden padotuslaskennan perusteella padotus vähensi sulfaattimailta tulevia ainekuormia, koska hapettuminen ei päässyt tapahtumaan niin syvältä kuin luonnontilassa. Kalkituslaskennat puolestaan näyttivät, että pellon kalkitus ei suurillakaan kalkkimäärillä merkittävästi neutraloinut valumavesiä, vaan vaikutus kohdistuu lähinnä pellon pintakerrokseen. Riittävä seosveden kalkitus sen sijaan neutraloi veden.

Kalibrointi- ja verifiointitulosten perusteella arvioituna mallilla voidaan hyvin laskea happamilta sulfaattimailta tulevia ainekuormia. Mallin jatkokäyttöä ajatellen saatu tulos vaikuttaa lupaavalta.

Projektin suunnittelu Vesi- ja ympäristöhallituksessa ja havainnointi Vaasan vesi- ja ympäristöpiirissä alkoivat vuonna 1990. Mallin kehittämistä vastasivat vuodesta 1992 Reijo Hutka ja Timo Laitinen (Vesi-Hydro). Markku Maunula (VYH) johti projektia, Maria Holmberg (VYH) osallistui mallin kehittämiseen ja projektin suunnitteluun. Projektiryhmään kuuluivat eri vaiheissa lisäksi Juha Kämäri (VYH), Titta Schultz (VYH) ja Ismo Tiainen (Vesi-Hydro). Martti Kujanpää, Jouko Nisula, Kari Kallio ja Lauri Peltola (Vavy) vastasivat havainnoinnista. Pertti Sevola ja Marjatta Hämäläinen (Vavy) vastasivat vedenlaatuanalyyseistä. Jukka Palko (Oulun vesi- ja ympäristöpiiri) vastasi maaperänäytteiden kemiallisista analyyseistä, jotka tehtiin Suomen Geotutkimus Oy:ssä. Työhön osallistuivat projektin eri vaiheissa myös Jussi Hautala (Maatalouden tutkimuskeskus) ja Tuomo Karvonen (Helsingin yliopisto) sekä Kirsti Granlund, Ahti Lepistö, Jaana Roos ja Sirkka Tattari (VYH).

Kirjallisuus



- ALASAARELA, E., KARVONEN, T., KOKKILA, T., KOPONEN, J., KOUVALAINEN, S., LAURI, H., VIRTANEN, M. 1993. Maankäytön vaikutuksia kuvaava vesistömalli. Vesi- ja ympäristöhallitus. Käsikirjoitus.
- BRONSWIJK, J.J.B. 1988. Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. *Journal of hydrology* 97(1988). Netherlands. ss. 199-212.
- BRONSWIJK, J.J.B., GROENBERGER, J.E., NUGROHO, K. 1992. Acid Sulphate Soil Model. Teoksessa: Acid Sulphate Soils on the Humid Tropics. AARD & LAWOO, Jakarta, Wageningen. 284 s.
- COSBY, B.J., HORNBERGER, G.M., GALLOWAY, J.N., WRIGHT, R.F. 1985. Modeling the Effects of Acid Deposition: Assessment of a Lumped Parameter Model of Soil Water and Steamwater Chemistry.
- de VRIES, W., POSCH, M., KÄMÄRI, J. 1989. Simulation of the long-term soil response to acid deposition in various buffer ranges. *Water Air and Soil Pollution* 48:349-390.
- ERIKSSON, E. 1992. Modelling flow of water and dissolved substances in acid sulphate soils. In Proc. 4th Int. Symp. on Acid Sulphate Soils, Ho Chi Minh City, Vietnam. ss. 369-380.
- ERVIÖ, R. 1975. Kyrönjoen vesistöalueen rikkipitoiset viljelysmaat. *Maataloustieteellinen Aikakauskirja* 47, ss. 550-561
- HILLEL, D. 1980. Fundamentals of Soil Physics. Academic Press, New York, 413 s.
- PALKO, J., WEPPLING, K. 1994. Modelling the Effects of Acid Sulphate Soils on River Acidity in Finland. *Nordic Hydrology*.
- PUUSTINEN, M., MERILÄ, E., PALKO, J., SEUNA, P. 1994. Kuivatustila, viljelykäytäntö ja vesistökuormitukseen vaikuttavat ominaisuudet Suomen pelloilla. *Kuvailulehti joulukuu 1994*. Helsinki. ss. 101-102.
- RANTALA, A. 1991. Vesistöjen kalkitus happamien sulfaattimaiden vaikutusalueella. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja-sarja A. nro 78. Helsinki. s. 53.
- STUMM, W., MORGAN, J.J. 1981. *Aquatic Chemistry*. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc. New York. 767 s.
- VEHVILÄINEN, B. 1992. Snow cover models in operational watershed forecasting. Valtion painatuskeskus. Helsinki. 112 s.

Muuta aiheeseen liittyvää kirjallisuutta

- KIVINEN, A., MÄKITIE, O. 1981. *Kemia*. Kolmas painos. Kustannusosakeyhtiö Otavan painolaitokset. Keuruu. 444 s.
- LÄHETKANGAS, S. 1994. Kyrönjoen happamoituminen ja happamuuden vähentäminen. Diplomityö, Oulun Yliopisto. Oulu. 68 s.
- PALKO, J. 1994. Acid sulphate soils and their agricultural and environmental problems in Finland. University of Oulu. Printing center. Oulu. 52 s.
- PALKO, J., MERILÄ, E. ja HEINO, S. 1988. Maankuivatuksen suunnittelu happamilla sulfaattimailla. Vesi- ja ympäristöhallituksen julkaisuja 21. 60 s.
- PALKO, J., YLI-HALLA, M. 1990. Solubility of Al, Cr, Cu and Zn in Soils from a Finnish Acid Sulphate Soil Area. *Acta Agriculturae Scandinavia*. Vol. XXXX:2. Stockholm. ss. 117-122.

- PALKO, J., YLI-HALLA, M. 1992. Assessment and management of acidity released upon drainage of acid sulphate soils in Finland. Proc. 4th International Symposium of Acid Sulphate Soils, Vietnam. 12 s.
- TALVITIE, J. 1992. Alunamaat ja niiden valumavesien neutralointi. Diplomityö. Oulun Yliopisto. Oulu. 128 s.
- TIITINEN, R. 1981. Vesien happamuuteen vaikuttavista tekijöistä alunamaa-alueilla. Vesihallituksen monistesarja 1981:69. Vaasa. 56 s.
- OY VESI-HYDRO AB. 1993. Alunamaiden erityiskysymykset, tutkimustarpeiden kartoitus. Työ 14174. Helsinki. 38 s.
- VESIYHDISTYS r.y. 1986. Sovellettu Hydrologia. Mäntän Kirjapaino Oy. Mänttä. 503 s.
- YLI-HALLA, M. 1983. Happamien sulfaattimaiden ominaisuuksista, analytiikasta, käytöstä ja ympäristövaikutuksesta. Vesihallituksen monistesarja 1983:191. Helsinki. 64 s.

Reijo Hutka, Timo Laitinen, Maria Holmberg,
Markku Maunula ja Titta Schultz

Happamien
sulfaattimaiden
ionivirtausmalli
(HAPSU)

Osa II käyttöohjeet

HELSINKI 1996

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS

Sisällys

1 Johdanto	105
2 Malli	106
3 Mallin käyttö	111
3.1 Asennus	111
3.2 Ohjelmat	111
3.3 Lähtötiedot	111
3.4 Tulostiedot	112
3.5 Ohjelmien ajo	113
3.6 Tulosten piirtäminen	114
4 Laskennan analysointi	115
4.1 Sulfaattimaa-alue	115
4.2 Sivuvalluma-alue	117
4.3 Seosvesi	118
4.4 Rajoitukset ja virhetilanteet	118
Liitteet	120
Liite A: Lähtötiedostot	120
Liite B: Aakkosellinen luettelo lähtötiedoista	134
Liite C: Tulostiedostot	138
Liite D: Tulostuksen yhteenvetotiedostot	141
Liite E: Pääohjelmien rakenne	143
Liite F: Aliohjelmien kutsukaaviot	147
Kuvailulehdet	151

Johdanto



Tämä on Oy Vesi-Hydro Ab:ssä laadittu HAPSU-malliin perustuvan tietokoneohjelmiston käyttöohje. Varsinainen malli, sen kalibrointi ja sovellutuslaskennat on käsitelty tämän julkaisun I osassa. Tässä raportissa kuvataan ohjelmiston käyttö, analysoidaan parametrien vaikutusta laskentaan ja esitetään ohjelmiston rakenne. Ohjelmisto on koodattu FORTRAN:illa ja sitä on käytetty VAX-tietokoneessa VMS-käyttöjärjestelmän alaisuudessa.

Kohdassa 2 luodaan lyhyt yleiskuvaus malliin.

Kohdassa 3 kuvataan ohjelmiston käyttö sekä lähtö- ja tulostiedot. Ohjelmisto koostuu kolmesta erillisestä ohjelmasta, joilla lasketaan ainevirtaamat sulfaattimaa-alueella, sivuvaluma-alueella ja seosvedessä. Esimerkit kommentoiduista lähtötiedostoista on koottu liitteeseen A ja aakkosellinen luettelo lähtötiedoista liitteeseen B. Tulostiedostojen selitykset on koottu liitteeseen C ja esimerkit simuloinnin yhteenvetotiedostoista liitteeseen D.

Kohdassa 4 analysoidaan laskentaa ja tärkeimpiä laskentatulokseen vaikuttavia parametreja. Analysoinnin tarkoituksena on luoda käyttäjälle kuva mallin toiminnasta ja siten helpottaa mallin käyttöä. Parametrien osalta on tarkasteltu niiden vaihteluvälejä ja eri arvojen vaikutusta lopputulokseen.

Liitteessä E on kuvattu ohjelmiston pääohjelmien rakenne ja liitteeseen F on koottu aliohjelmien kutsukaaviot.

2

Malli

HAPSU-projektissa on kehitetty malli, jolla voidaan aikasimulointina laskea happamia sulfaattimaita sisältävältä valuma-alueelta huuhtoutuvia ainevirtaamia. Malli sisältää varsinaisia sulfaattimaita käsittelevän osan sekä muita valuma-alueeseen sisältyviä maita käsittelevän osan. Lopulliset valuma-alueelta tulevat ainehuuhtoumat saadaan saadaan yhdistämällä osa-alueiden ainevirtaamat. Mallin systeemikuvaus on esitetty kuvassa 1.

Sulfaattimaa voidaan mallissa jakaa edelleen pienempiin osa-alueisiin, mikäli maaperäselvitykset antavat sellaiseen aihetta. Kukin tällainen osa-alue kuvataan yksiulotteisella maaprofiililla, jossa veden virtaus, kemialliset prosessit ja aineiden kulkeutuminen tapahtuvat. Esimerkki maaprofiilista on esitetty kuvassa 2 ja maaperän kemialliset reaktiot kuvassa 3. Maaprofiilia kuvaava malli käsittää seuraavat alamallit:

Hydrologia

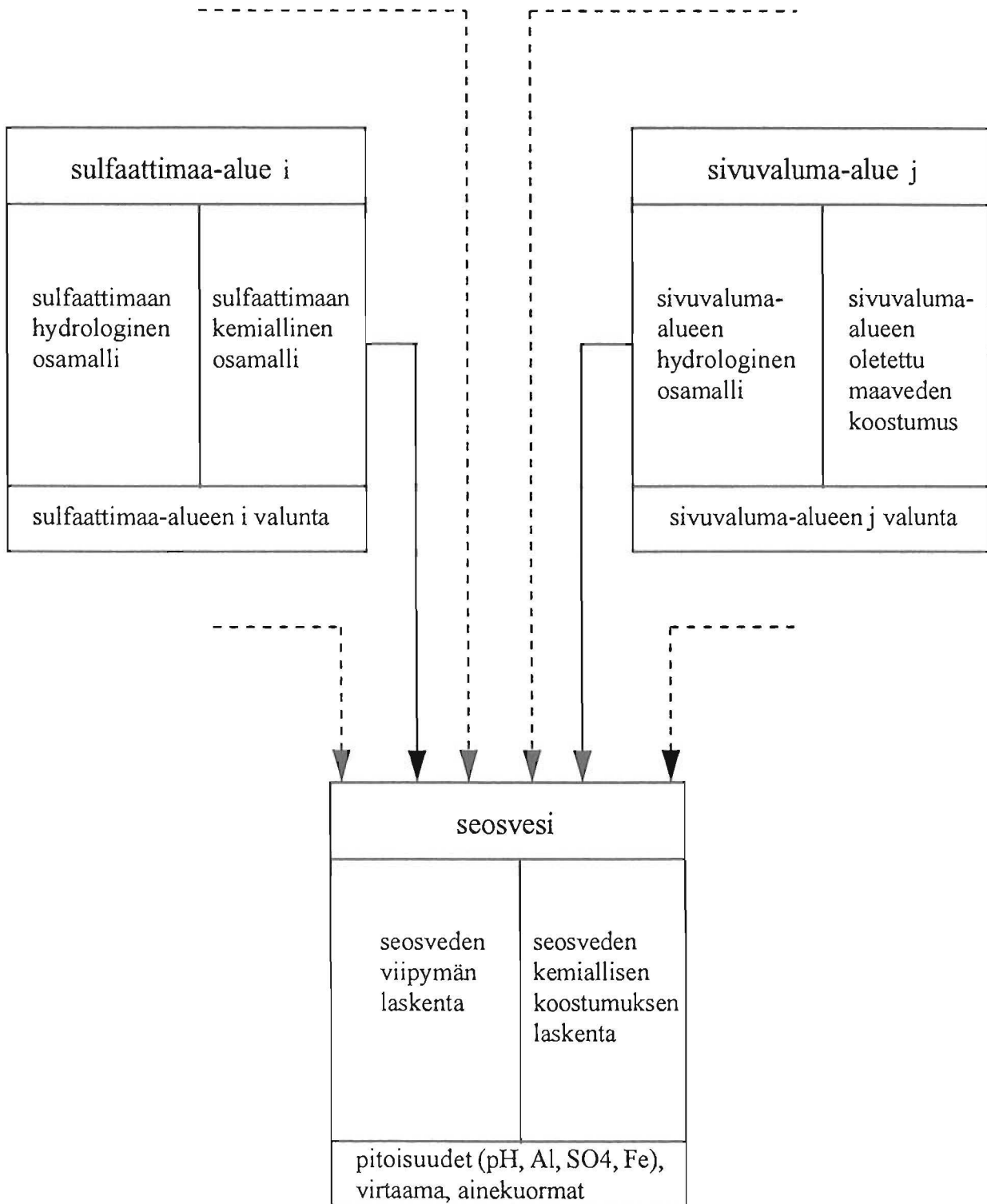
- sade ja lumi
- haihdunta
- painannesäilyntävarasto, rakoilu ja imeytyminen
- maaveden virtaus ja kulkeutuminen kuivatusojiin
- maaperän lämpötila sekä maaveden jäätyminen ja sulaminen
- padotus

Veden laatu

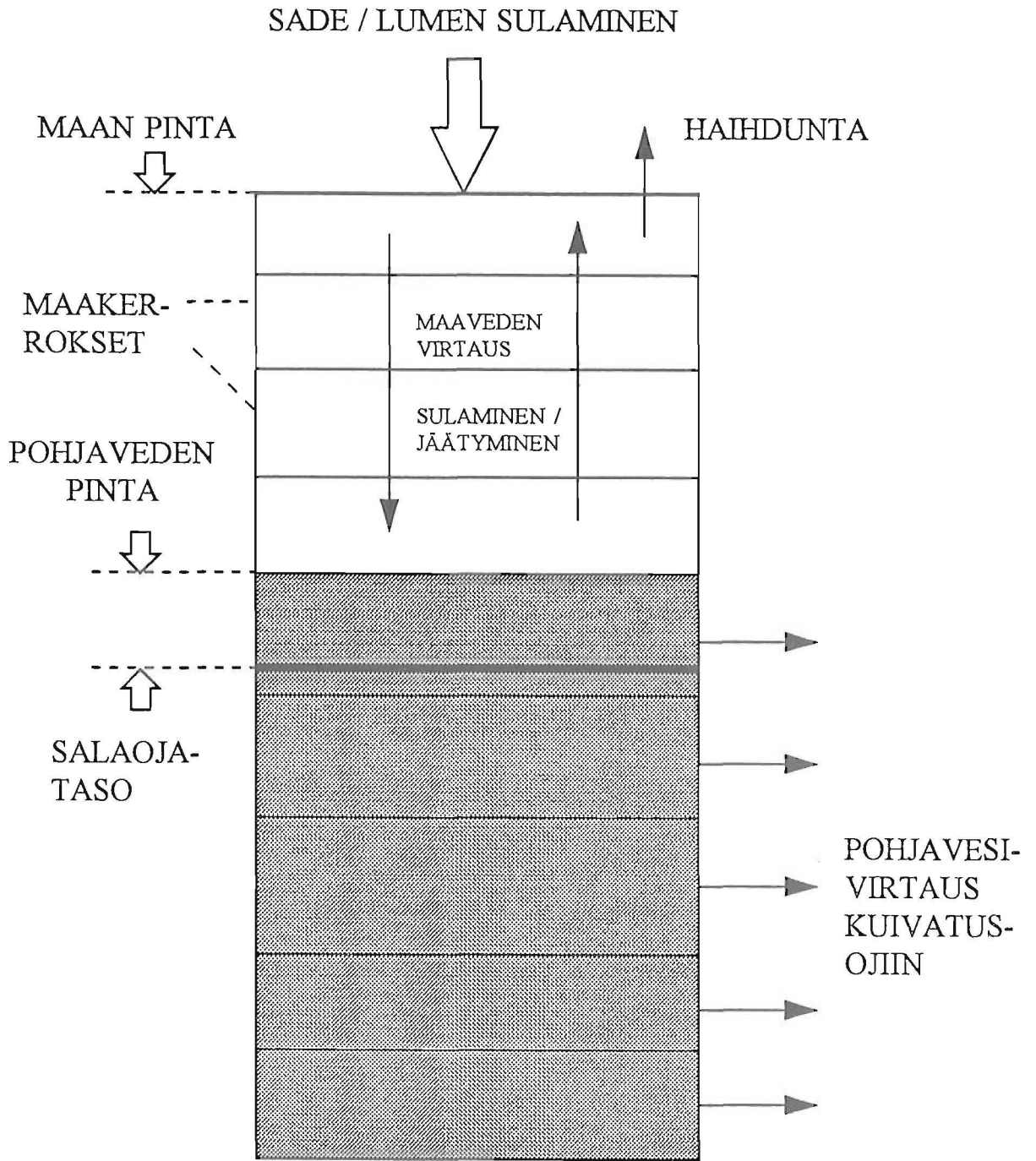
- jäätyminen ja sulamisen vaikutus veden laatuun
- hapen kulkeutuminen
- hiilidioksidin muodostuminen ja kulkeutuminen
- hapettuminen ja rapautuminen
- liuenneiden aineiden kulkeutuminen
- maaveden reaktiotasapaino
- kuivatusojiin tulevien vesien laatu ja ainevirtaamat
- pellon kalkitus

Niitä tarkasteltavan valuma-alueen osia, jotka eivät ole varsinaisia sulfaattimaita, käsitellään suurpiirteisemmin sivuvaluma-alueina. Sadetta ja lunta sekä haihduntaa mallinnetaan kuten sulfaattimaa-alueella. Maaperän hydrologiaa käsitellään konseptuaalisella mallilla, joka koostuu neljästä varastotyyppistä. Sivuvaluma-alueen hydrologian kuvaus on esitetty kuvassa 4. Veden laatu on vakio ja se annetaan lähtötietona.

Osa-alueilta tulevat virtaamat sekoitetaan keskenään ja seosvedelle lasketaan kemiallinen reaktiotasapaino. Sen jälkeen on vielä mahdollista tarkastella kalkituksen vaikutusta seosveden laatuun.



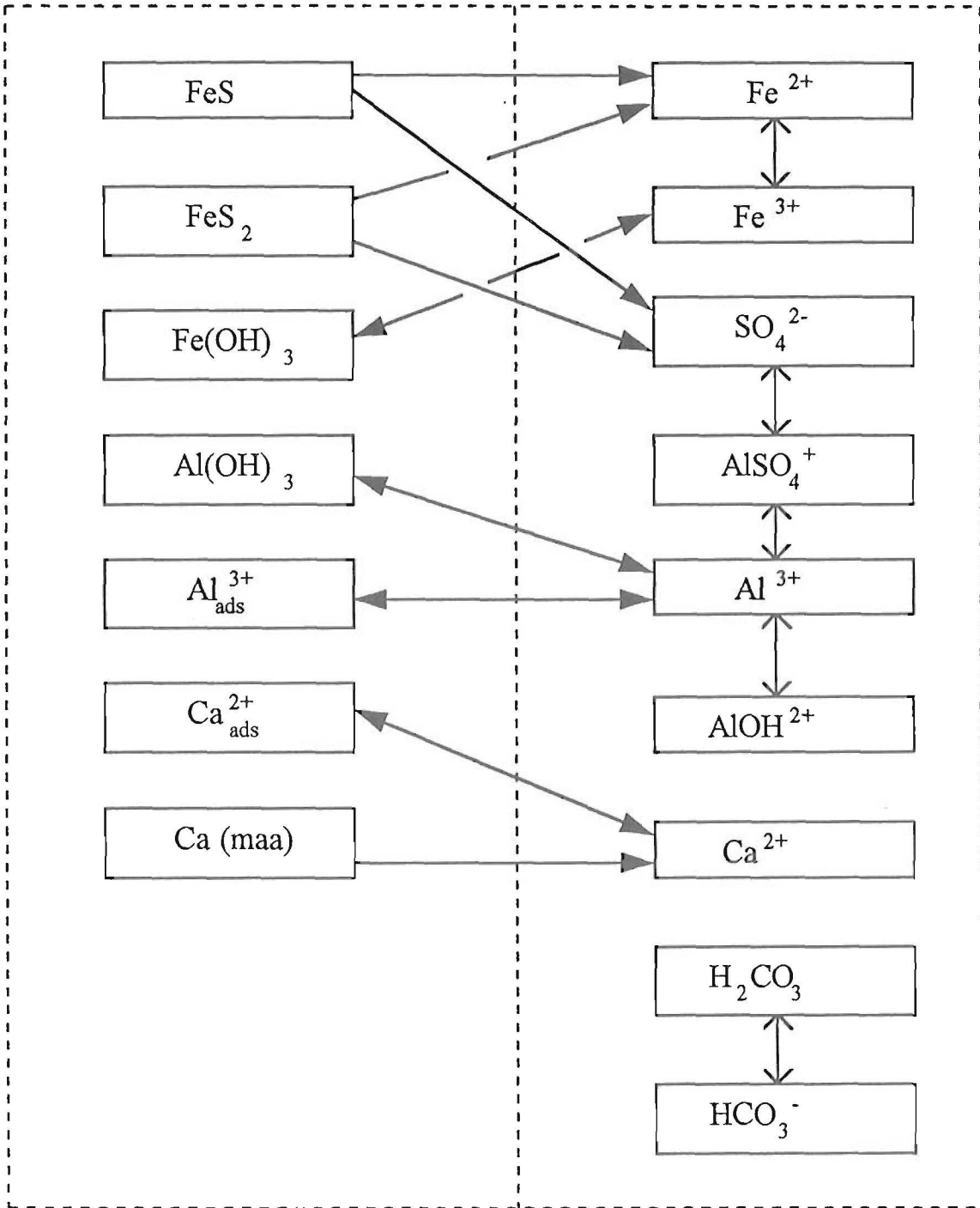
Kuva 1. HAPSU - mallin systeemikuvaus.



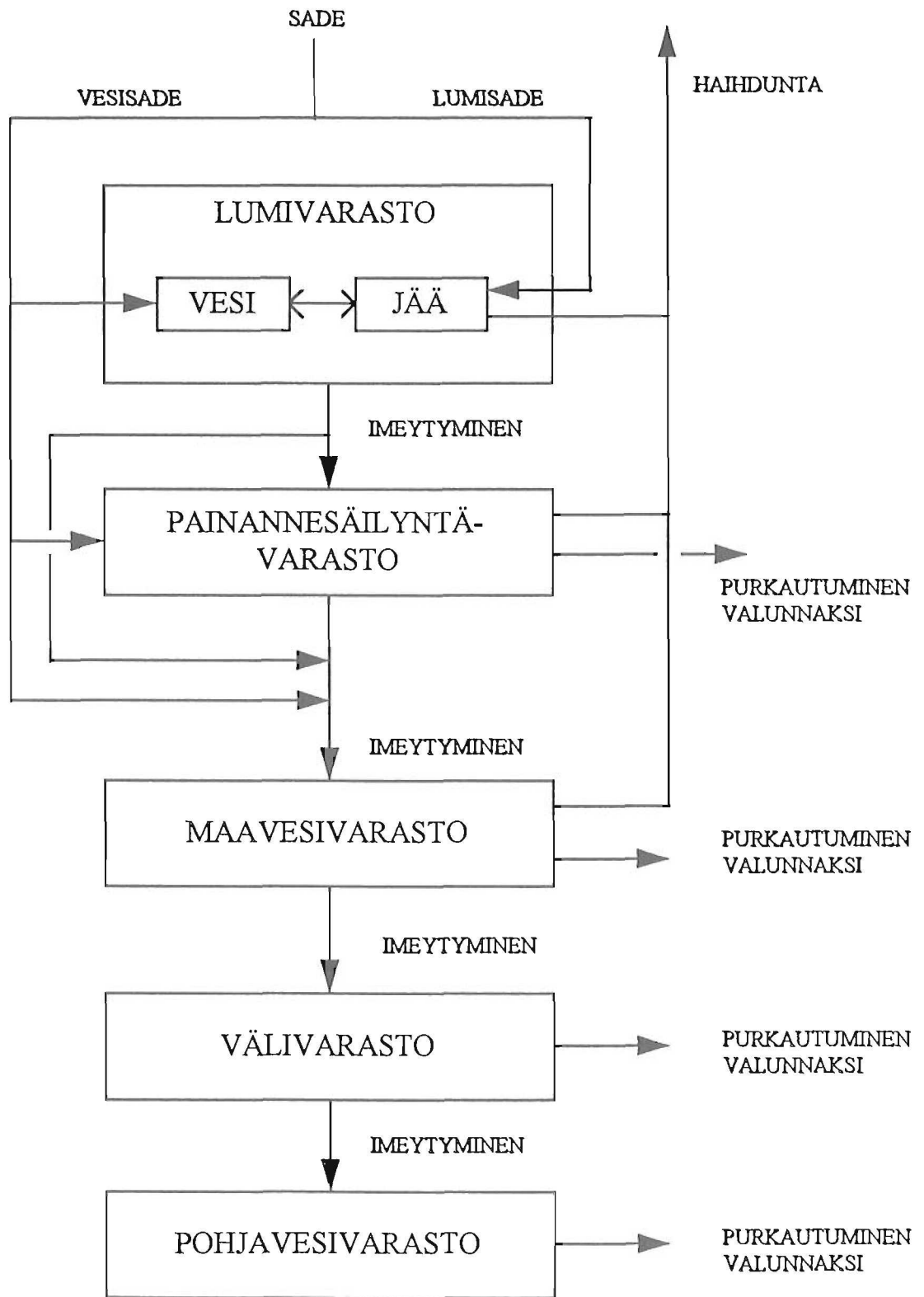
Kuva 2. Sulfaattimaa-alueen hydrologinen osamalli.

MAA

MAAVESI



Kuva 3. Maaperän kemialliset reaktiot.



Kuva 4. Sivuvalluma-alueen hydrologinen osamalli.

Mallin käyttö

3.1 Asennus

Mallin asennus tapahtuu kopioimalla asennuslevykkeellä (PC-levyke HD 1.44 MB) olevat tiedostot haluttuun hakemistoon VAX-tietokoneelle. Kopiointi edellyttää yhteyttä mikrotietokoneesta VAX:iin. Levykkeellä olevat kolme ajotiedostoa (*.EXE) toimivat VAX-tietokoneessa VMS-käyttöjärjestelmän alaisuudessa. Ne eivät toimi mikrotietokoneessa.

3.2 Ohjelmat

Malli on toteutettu kolmena ohjelmana SULFA.EXE, SIVU.EXE ja HAPSU.EXE. Ohjelma SULFA laskee sulfaattimaa-alueen ainevirtaamat, ohjelma SIVU laskee sivuvaluma-alueen ainevirtaamat ja ohjelma HAPSU laskee koko valuma-alueen ainevirtaamat osa-alueiden laskentatulosten pohjalta.

3.3 Lähtötiedot

Ohjelmien lähtötiedot annetaan lähtötiedostoissa täsmällisesti määritellyssä rivimuodossa. Lähtötiedostojen muodostamiseksi on oltava käytettävissä editori. Ohjelmalla SULFA on viisi lähtötiedostoa, ohjelmalla SIVU neljä lähtötiedostoa ja ohjelmalla HAPSU kaksi lähtötiedostoa. Lähtötiedostojen nimet ovat kullekin alueelle muotoa *1.DAT, *2.DAT jne., jossa * on käyttäjän nimeämä (esimerkiksi sulfaattimaa-alueelle *=SULFA, sivuvaluma-alueelle *=SIVU ja seosvedelle *=HAPSU). Lisäksi ohjelman HAPSU lähtötietoina on 1 tiedosto kutakin sulfaattimaa-aluetta kohti (esim. SULFA.LIS) ja 1 tiedosto kutakin sivuvaluma-aluetta kohti (esim. SIVU.LIS).

Kommentoidut lähtötiedostoesimerkit on koottu liitteeseen A. Niistä käy ilmi, mitä lähtötietoja käyttäjän täytyy antaa ja missä muodossa. Liitteen esimerkki on Pajuluoman alueen kalibrointitulos aikaväliltä 90-92. Esimerkissä on yksi sulfaattimaa-alue ja yksi sivuvaluma-alue. Lähtötiedot on jaettu tiedostoihin seuraavasti:

Sulfaattimaa-alue

SULFA1.DAT -	simuloinnin ohjaustiedot, maaveden virtauksen parametrit, haihdunta
SULFA2.DAT -	päivittäinen sadanta ja lämpötila
SULFA3.DAT -	lumimallin ja maan lämpötilamallin parametrit
SULFA4.DAT -	laatumallin parametrit

SULFA5.DAT - konsentraatioiden alkuarvot

Sivuvaluma-alue

SIVU1.DAT - simuloinnin ohjaustiedot, haihdunta
SIVU2.DAT - päivittäinen sadanta ja lämpötila
SIVU3.DAT - virtaamamallin parametrit
SIVU4.DAT - konsentraatiot

Seosvesi

HAPSU1.DAT - simuloinnin ohjaustiedot ja kalkitustiedot
HAPSU2.DAT - päivittäinen sadanta ja lämpötila

Liitteeseen B on koottu aakkosellinen luettelo lähtötiedoista. Kullekin lähtötiedolle on luetteloitu nimi, yksikkö, tiedosto (tai tiedostot) jossa sitä käytetään ja viite liitteen A kommentteihin.

3.4 Tulostiedot

Ohjelmat tulostavat tulostiedostoihin ajan funktiona seuraavassa esitettävät tiedot siten, että kullakin aika-askeleella tulostuu yksi rivi. Poikkeuksena ovat sulfaattimaa-alueen tulostiedostot 2 ja 4, joiden muoto määräytyy käyttäjän valinnan mukaan, sekä yhteenvetotiedostot. Tulostiedostoista on yksityiskohtainen selvitys liitteessä C ja yhteenvetotiedostoista on esimerkki liitteessä D.

Tulostiedoissa aika on ilmaistu päivinä simuloinnin aloitusvuoden alusta lukien. Tulostiedostojen nimet ovat kullekin ohjelmalle muotoa *1.LIS, *2.LIS jne., missä * on automaattisesti sama kuin vastaavien lähtötiedostojen nimi (esim. SULFA, SIVU tai HAPSU).

Tulostiedot on jaettu tiedostoihin seuraavasti:

Sulfaattimaa-alue

SULFA1.LIS - sadanta, lämpötila, haihdunta, lumi, pohjaveden pinta ja virtaus kuivatusojiin
SULFA2.LIS - maaperän vesipitoisuus, jääpitoisuus ja maaveden lämpötila
SULFA3.LIS - alueen kumulatiivinen vesimäärä
SULFA4.LIS - aineiden konsentraatiot maaperässä ja maavedessä
SULFA5.LIS - salaojaveden konsentraatiot
SULFA6.LIS - alueen kumulatiiviset ainekuormat
SULFA7.LIS - simuloinnin yhteenveto
SULFA.LIS - binäärimuotoinen tiedosto, joka on lähtötietona seosveden laskennassa

Sivuvaluma-alue

- SIVU1.LIS - sadanta, lämpötila, haihdunta ja lumi
- SIVU2.LIS - varastojen koot ja virtaamat varastoista, kokonaisvirtaama
- SIVU3.LIS - alueen kumulatiivinen vesimäärä
- SIVU4.LIS - alueen kumulatiiviset ainekuormat
- SIVU5.LIS - simuloinnin yhteenveto
- SIVU.LIS - binäärimuotoinen tiedosto, joka on lähtötietona seosveden laskennassa

Seosvesi

- HAPSU1.LIS - seosveden kumulatiivinen vesimäärä
- HAPSU2.LIS - seosveden konsentraatiot
- HAPSU3.LIS - seosveden kumulatiiviset ainekuormat
- HAPSU4.LIS - simuloinnin yhteenveto

3.5 Ohjelmien ajo

Sulfaattimaa-alueen laskentaohjelma ajetaan työhakemistossa komennolla RUN SULFA. Vastaavasti sivuvaluma-alueen laskentaohjelma ajetaan työhakemistossa komennolla RUN SIVU ja seosveden laskentaohjelma ajetaan työhakemistossa komennolla RUN HAPSU. Työhakemistolla tarkoitetaan tässä sitä hakemistoa, jossa ajettavan ohjelman lähtötiedostot ovat. Jos ohjelmien ajotiedostot (*.exe) eivät ole työhakemistossa, annetaan ajokomentoon hakemistopolku, joka osoittaa missä hakemistossa ajotiedostot ovat. Jos sulfaattimaa-alueita tai sivuvaluma-alueita on enemmän kuin yksi, ajetaan vastaava ohjelma kullekin alueelle erikseen.

Kukin ohjelma kysyy laskennan aluksi lähtötiedoston nimeä, joka annetaan ilman ekstensiota. Ohjelmat olettavat, että työhakemistosta löytyvät annettua nimeä vastaavat lähtötiedostot (muotoa *.DAT), joita käsiteltiin kohdassa 3.3 ja liitteessä A. Lisäksi ohjelma HAPSU kysyy alueilta tulevien tulostiedostojen nimet, jotka annetaan yksi kerrallaan järjestyksessä siten, että ensin tulevat sulfaattimaa-alueet ja sitten sivuvaluma-alueet. Ohjelma olettaa, että nämä tiedostot ovat muotoa *.LIS. Nimet annetaan ilman ekstensiota.

Ajon aikana ohjelmat tulostavat päätteelle päivämäärän, josta käyttäjä voi seurata, missä vaiheessa laskenta etenee. Päivämäärän muoto on: laskentavuosi (1,2, ...), päivä laskentavuoden alusta lukien, kuukaudenpäivä ja kuukausi. Laskentavuosi vaihtuu kalenterivuoden vaihtuessa. Ohjelmat muodostavat ajon aikana kohdassa 3.4 ja liitteessä C käsitellyt tulostiedostot. Liitteen D yhteenveto-tiedostot muodostuvat varsinaisen simuloinnin lopuksi.

3.6 Tulosten piirtäminen

Mallin ohjelmiin ei sisälly piirto-ohjelmia mutta tulostuksessa on varauduttu piirtämiseen. Tulostiedostoissa on kohdassa 3.4 esitetyllä tavalla kunkin rivin ensimmäisenä arvona aika päivinä ensimmäisen laskentavuoden alusta. Tällöin tulostiedot ovat piirrettävissä ajan funktiona esim. mikrotietokoneen taulukkolaskenta- tai piirto-ohjelmilla.

Laskennan analysointi

4.1 Sulfaattimaa-alue

Virtaus

Virtauslaskennassa vesimäärien suuruusluokan ratkaisee haihdunnan määrä. Mallin kalibrointilaskentojen perusteella noin kaksi kolmasosaa satavasta vedestä haihtuu ja vain noin kolmannes tulee kuivatusojiin. Liian pieni haihdunta johtaa maaperän vesipitoisuuden kasvamiseen ja pohjaveden pinnan korkeaan tasoon. Toisaalta liian suuri haihdunta kuivattaa maaperän.

Toinen päätekijä hydrologiassa on maaperästä kuivatusojiin tulevan vesimäärän säätäminen. Vettä tulee vain silloin kun pohjaveden pinta on salaojaputkien tason yläpuolella. Sääto on sulfaattimaa-alueen mallissa tehty kalenterikuukausittaiseksi. Liian suuri johtavuus aiheuttaa sen, että pohjaveden pinnan taso ei juuri nouse yli salaojaputkien tason ja että virtaamavaihtelut kuivatusojissa ovat suuria. Liian pieni johtavuus puolestaan estää veden tulon ulos maaperästä, minkä johdosta maaperä täyttyy ajan mittaan vedellä.

Muut tekijät kuten lumen muodostuminen ja sulaminen, maan lämpötila ja maan jäätyminen vaikuttavat osaltaan veden kulkeutumiseen maaprofiilin läpi mutta eivät merkittävästi vaikuta veden määrään.

Veden laatu

Veden laadun kannalta tärkein tekijä on hapettuminen. Happitasapainon laskennassa säädetään hapen kulkeutumista maanperän ilmahuokosissa sekä hapen siirtymistä maaveden ja ilmarakojen välillä. Hapen kulkeutuminen ja siirtyminen on kalibrointilaskentojen perusteella syytä asettaa nopeaksi. Mahdollinen kulkeutumisen ja siirtymisen hitaus aiheuttaa hapen puutetta myös pohjaveden pinnan yläpuolella ja näin estää hapettumisen. Tällöin aineiden konsentraatiot maavedessä jäävät liian pieniksi.

Toinen osatekijä hapettumisessa on hapettumisen suuruuden säätäminen siellä missä happea on. Liian hidaskulkeutuminen aiheuttaa vastaavan tilanteen kuin happivaje. Liian nopea hapettuminen taas johtaa maaperän rikkimäärän nopeaan loppumiseen ja suuriin konsentraatioihin maavedessä.

Ylimmän kerroksen ja pohjaveden pinnan tasolla olevan kerroksen veden laatuun vaikuttaa reunaehtona annettava sadeveden laatu. Pohjaveden pinnan alapuolisissa kerroksissa veden laatu määräytyy lähinnä reaktiotasapainon perusteella ja muutokset tapahtuvat sitä hitaammin mitä syvemmälle mennään.

Kalibrointilaskentojen perusteella rikkiyhdisteiden hapettumisessa syntyy rautaa monikertainen määrä verrattuna salaojista ulos tuleviin määriin. Tällöin valtaosan raudasta täytyy saostua maaperään mallin mukaisesti kolmiarvoisena rautana. Mallissa kaksiarvoisen raudan hapettumisnopeus kolmiarvoiseksi raudaksi on säädettävissä. Liian pieni nopeus johtaa liian suuriin rautakonsentraatioihin maavedessä. Vastaavasti liian suuri nopeus johtaa liialliseen saostumiseen ja alhaisiin konsentraatioihin maavedessä.

Seuraavassa tarkastellaan tärkeimpiä laskentatulokseen vaikuttavia parametreja ja muita lähtötietoja. Viittaukset ovat liitteen A lähtötiedostoihin ja niiden kommenttien numerointiin.

Tiedosto SULFA1.DAT

- 6. haihdunta touko-syyskuussa, $E_m = \alpha(h)E_a(a+b\ln(t))$,
 $a = 0,05$, $0,10 < b < 0,16$, b :n kasvattaminen lisää haihduntaa
- 8. veden ohjaus infiltraationa maan pintaan tai rakoihin, maahan $I_m = (1 - A_{r1})\alpha K_y$, loput rakoihin, jos α on pieni (0,01), vesi ohjautuu rakoihin, jos α on suuri (1-10), vesi infiltroituu enimmäkseen maan pintakerrokseen
- 12. pohjavesivirtaus kuivatusojiin, kuukausittaiset johtavuudet (m/d), talvella käytetään pieniä arvoja (0,05-0,1) ja kesällä talvea suurempia arvoja (0,1-0,5), kertoimet säätävät kuivatusojiin menevän veden määrää
- 15. maakerrosten vedenjohtavuus (m/d), pienillä johtavuuksilla (0,01) maavesi etenee hitaasti ja pysyy kauan ylimmissä kerroksissa, suuremmilla johtavuuksilla (0,1) maavesi etenee nopeasti pohjaveteen

Tiedosto SULFA3.DAT

- 5. haihdunta loka-huhtikuussa, haihduntaa lisätään minimi- ja maksimiarvoa kasvattamalla tai lämpötilarajaa alentamalla
- 7. haihdunta loka-huhtikuussa, haihduntaa kasvatetaan E_0 :aa kasvattamalla
- 8. purkautumiskerroin a_{sn} lumessa olevan vedelle, saa arvoja väliltä 0,1-1, kertoimen pienentäminen alentaa purkautumisrajaa
- 10. laskennan alkutilanne, painepotentiaali (m) asetetaan pohjaveden pinnalla arvoon 0, siitä alaspäin se kasvaa kerrospaksuuksia vastaavasti (positiiviset arvot) ja ylöspäin pienenee kerrospaksuuksia vastaavasti (negatiiviset arvot)

Tiedosto SULFA4.DAT

- 5. dispersiokerroin (m^2/s) maan ilmaraoissa hiilidioksidille ja hapelle, jos D_a on suuri ($1.E-6$ - $1.E-4$) niin leviäminen on nopeaa ja konsentraatiot eri kerroksissa ovat suunnilleen samat kuin vastaavat konsentraatiot ilmassa, pienillä arvoilla ($1.E-8$ - $1.E-7$) leviäminen on hidasta
- 5. hapen siirtymiskerroin, pienillä arvoilla ($1.E-7$) ei siirtymistä juuri tapahdu, suurilla arvoilla ($1.E-5$) siirtyminen on nopeaa
- 6. hiilidioksidin siirtymiskerroin vastaavasti kuin hapelle (ed. kohta)

- 8. tasapainovakioista vaihteluvaraa on kahdessa
 $K_{\text{gibb}} = 10^{2,5} - 10^{4,8}$
 $K_{\text{AlSO}_4} = 10^{-3,03} - 10^{0,21}$
- 10. raudan hapettumista muodosta Fe^{2+} muotoon Fe^{3+} säättävät kertoimet kaavan $k_{\text{Fe}^{1+}}^0 = 10^{(p_1 + p_2 \cdot \text{pH} + p_3 \cdot \text{pH} \cdot \text{pH})}$ mukaisesti, kertoimet p_1 , p_2 ja p_3 muodostavat lausekkeelle $\log_{10}(k_{\text{Fe}^{1+}}^0)$ paraabelin, jonka muuttujana on pH, paraabelin muoto tulee olla suunnilleen liitteessä A annetun esimerkin mukainen
- 11. monosulfidin ja pyriitin hapettumista säädetään lähinnä tekijöiden f_1 ja f_2 arvoja muuttelemalla, kasvattaminen lisää hapettumista

4.2 Sivuvalluma-alue

Virtaus

Sivuvalluma-alueella haihdunnan merkitys maahan tulevan vesimäärän säätäjänä on yhtä tärkeä kuin sulfaattimaa-alueella. Maasta ulos purkautuvaa virtausta säädetään varastotyyppien purkautumiskertoimilla ja -rajoilla. Varastojen välistä virtausta puolestaan säädetään imeytymiskertoimilla -ja rajoilla.

Veden laatu

Veden laatu on lähtötietona annettava vakio.

Tiedosto SIVU1.DAT

- 4. haihdunta vastaavasti kuin sulfaattimaa-alueella

Tiedosto SIVU3.DAT

- 1. varastotyyppien alkuarvot, S_{ps} :lle annetaan pieni arvo (0 - 0,05 m), muut varastotyyppit asetetaan suunnilleen $S_{mv}:S_{vv}:S_{mv} = 1:2:3$, esimerkissä $S_{mv} = 0,20$ m ; S_{ps} ja S_{mv} vaihtelevat paljon ja nopeasti, muut vähän ja hitaasti
- 7. raja painannesäilyntävaraston purkautumiselle, arvo 0 m reagoi nopeasti sateeseen, suurempi arvo (0,05 m) kerää vettä ennen purkautumista
- 8. purkautumiskertoimet, arvon suurentaminen purkaa nopeasti ja pienentäminen hitaasti
- 9. imeytymiskertoimet, suuri kerroin merkitsee nopeaa imeytymistä ja pieni kerroin hidasta imeytymistä
- 10. maavesivaraston rajakoot, näillä säädetään imeytymisen ja purkautumisen alkamista maavesivarastosta
- 12., 13. ja 14. talvihaihdunta ja lumessa olevan veden purkautuminen kuten sulfaattimaa-alueella

4.3 Seosvesi

Virtaus

Valuma-alueelta tulevan seosveden viiveen mahdollisessa altaassa määrää altaan tilavuus. Jos allasta ei ole, asetaan tilavuudeksi 1 m³. Varsinaisia kalibroituja parametreja ei ole.

Veden laatu

Seosvedelle laskettavassa reaktiotasapainossa tulee käyttää samoja tasapainovakioiden arvoja kuin sulfaattimaan salaojavedelle. Laskennassa oletetaan, että veden happi ja hiilidioksidi ovat tasapainossa ilman hapen ja hiilidioksidin kanssa. Seosveden kalkituksessa annetaan lähtötietona kalkituksen suuruuden määräävä kerroin ja viive, jonka ajan kalkitus ehtii vaikuttaa.

Tiedosto HAPSU1.DAT

- 7. tasapainovakiot kuten sulfaattimaa-alueella
- 9. neutraloinnin määrän ja viiveen säätäminen
- 10. raudan hapettumisen kertoimet p_1 , p_2 ja p_3 vastaavasti kuin sulfaattimaa-alueella

4.4 Rajoitukset ja virhetilanteet

Ohjelmien käyttöön liittyy seuraavat rajoitukset:

- simuloinnin aika-askeleen pituus on yksi vuorokausi eli 24 h tai jokin sen tasan jaollinen osa tunteina (1,2,3,4,6,8 tai 12 h) ; käytännössä 24 h on luontevin pituus, koska säätö annetaan vuorokausittain
- simuloinnin aika-askeleen maksimimäärä on 20 000 askelta eli 24 h askeleella simulointiajan maksimi on 54 vuotta
- aika-askeleen pituus ja askelten lukumäärä tulee olla sama kaikilla alueilla
- sulfaattimaan maaprofiilin kerrosten minimimäärä on 3 ja maksimimäärä on 20
- sulfaattimaa-alueiden ja sivuvaluma-alueiden yhteismäärän maksimi on 6 aluetta

Ohjelma laskee numeerisesti iteroimalla sulfaattimaan painepotentiaalit, maaveden lämpötilan, hiilidioksidin kulkeutumisen, hapen kulkeutumisen, maaveden reaktiotasapainon sekä salaojaveden ja seosveden reaktiotasapainot. Näiden iterointien lopetusehdot ja osalle iterointijarrut voidaan asettaa liitteen A esimerkklaskennan mukaisiksi.

Mahdollisia virhetilanteita on eri tyyppisiä. Ensinnäkin lähtötietojen antaminen jollain muulla kuin ohjeissa kuvatulla tavalla johtaa yleensä siihen, että ohjelman suoritus päättyy lähtötietojen lukemisvirheeseen ennen varsinaisen

laskennan alkua. Toisekseen jonkin lähtötiedon antaminen muodollisesti oikein mutta itse laskennan kannalta virhellisesti (esim. negatiivinen alkukonsentraatio) johtaa yleensä laskennan päättymiseen simuloinnin alkupuolella. Laskentaohjelmat eivät tarkista lähtötietojen 'mielekkyttä' vaan käyttäjän on huolehdittava siitä, että lähtötietojen muodostama kokonaisuus on toimiva.

Kolmas virhetyyppi on laskennan päätyminen ennen simuloinnin loppua siihen, että numeerinen iterointi ei onnistu. Ohjelma antaa virheilmoituksen siitä, mistä iteroinnista on kyse. Tällöin joudutaan yleensä kokeilemaan iterointijarrulle ja iteroinnin lopetusehdolle sopivaa yhdistelmää, jolla laskenta saadaan toimimaan. Laskennan päättymisen yhteydessä on syytä huomata, että laskennan tulostus tehdään aika-askelittain laskennan edetessä. Tällöin voidaan tarkastella tuloksia laskennan päättymiseen asti ja tehdä niistä johtopäätöksiä virhetilanteen synnystä.

Liite A.

Ohjelman SULFA kommentoidut lähtötiedostot 1-5

Ohjelman SIVU kommentoidut lähtötiedostot 1-4

Ohjelman HAPSU kommentoidut lähtötiedostot 1 ja 2

Esimerkki ohjelman SULFA lähtötiedostosta SULFA1.DAT selityksineen.
 Sarakkeiden maksimäärä yhdellä rivillä on 72.
 Luvut erotetaan toisistaan välilyönnillä.
 Puolipisteet, niiden jälkeinen teksti ja viitenumerot 1-18
 eivät ole lähtötietoja.

```

-----
HAPSU -PROJEKTI
PAJULUOMA, SULFAATTIMAA-ALUE 4.1 km2                               1.
VUODET 1990 - 1992
KALIBROINTILASKENTA
20 790 1 24. 78 3           ; NZ, NSTEP (d), NOSA, DT (h), DAY (d), NVU   2.
1.E-3 0.1 0.1 0.015        ; RAJA (m), JAR1 (maav.), JAR2 (ltila), MYY   3.
0 4.1                       ; ISADE (sad. jak., O/1), PALA (km2)   4.
0.2 0.2 1.2                 ; ZE1 ja ZE2(m), ZSO (m)   5.
0.05 0.135                  ; HAIA, HAIB   6.
0. 0.1 10. 150.            ; HH4(1-4) (m)   7.
2.                           ; ALFA   8.
20.0 0.02 2.8              ; KUIL (m), KUIR (m), KUID (m) ; kuivatusojat 9.
0 0.6                       ; IPAD (1/0), ZPAD (m) maan pinnalta lukien 10.
3.5 0.10                    ; KKE, THWR (m3/m3)   11.
0.1 0.1 0.1 0.1 0.2 0.25 0.25 0.25 0.25 0.3 0.3 0.3 ; KI (1-12, m/d) 12.
1                             ; FLDAY (d), tulostuksen aloituspäivä 13.
7 10                        ; NTHE (ker. lkm), NTHETU (tul. väli päivinä) 14.
1 0.2 0.05 0.34 1.0 2700. ; KER, DZ(m), KS(m/d), THS(m3/m3),PAINO,ROO(kg/m3)
2 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
3 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
4 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
5 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
6 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
7 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
8 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
9 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
10 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.                               15.
11 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
12 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
13 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
14 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
15 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
16 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
17 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
18 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
19 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
20 0.2 0.05 0.34 1.0 2700.
33 28 29 22 8 27         ; EA (mm/5 pv) touko (1-6), VUOSI 1 (-90)
21 30 27 11 29 27        ; kesä
22 17 9 13 18 27         ; heinä
25 16 15 16 13 10        ; elo
12 8 7 7 4 3             ; syys
8 17 17 11 14 24         ; EA (mm/5 pv) touko (1-6), VUOSI 2 (-91)
12 21 10 21 20 15        ; kesä
25 34 21 16 16 27        ; heinä                               16.
19 15 13 8 14 19         ; elo
19 6 6 7 5 5             ; syys
12 17 29 29 30 45        ; EA (mm/5 pv) touko (1-6), VUOSI 3 (-92)
39 38 32 24 25 34        ; kesä
17 27 19 11 28 25        ; heinä
19 15 9 7 9 8            ; elo
4 9 6 5 6 5              ; syys
4                           ; NKUT                               17.
0.      0.7               ; kutistumiskäyrä (ETA,E -parit)   18.
0.5     0.8
1.0     1.0
1.942   1.942
-----

```

1. Otsikkotiedot neljällä rivillä. Jos tekstiä on vähemmän kuin 4 riviä, laitetaan puuttuvien rivien tilalle tyhjiä rivejä.
2. Maakerrosten lukumäärä (NZ), simuloinnin kokonaisaika (d), aika-askel osina vuorokaudesta (1, 2, 3, ...), aika-askel (h), laskennan aloituspäivä (päivää vuoden alusta), monelleko kalenterivuodelle laskenta ulottuu (NVU).
3. Iteroinnin lopetusehto maaveden painepotentiaalin laskennassa (m), iteraattijarru eo. laskennassa, iteraatiojarru maaveden lämpötilan laskennassa, kerroin vesipitoisuuden ja painepotentiaalin välisessä riippuvuudessa.
4. Vuorokauden sadannan jakautuminen (0=tasaisesti koko vuorokaudelle, 1=vuorokauden sadanta tulee vuorokauden ensimmäisellä aika-askeleella), sulfaattimaa-alueen pinta-ala (km²).
5. Haihduntasyvyys maan pinnalta lukien (m) toukokuun alussa ja syyskuun lopussa, salaojan syvyys maan pinnalta lukien (m).
6. Potentiaalisen haihdunnan kertoimet a ja b .
7. Potentiaalisen haihdunnan alfa-termin riippuvuus painepotentiaalista: potentiaalien 1-4 (m) vastaluvut (tässä positiivisina arvoina).
8. Infiltraation alfa-kerroin.
9. Ojaväli (m), salaojaputkien säde (m), vettäläpäisemättömän kerroksen syvyys salaojatasosta mitattuna (m).
10. Padotukseen liittyvät tiedot: padotaanko vai ei (1/0), padotussyvyys (m) maan pinnalta lukien.
11. Maan vedenjohtavuuden riippuvuus vesipitoisuudesta: potenssiinkorotuskerroin, vedenjohtavuuden rajapitoisuus (m³/m³).
12. Kuivatusojiin virtaava vesimäärä: vedenjohtavuus (m/d) kalenterikuukausittain (tammi, helmi, ..., joulukuu ; 1-12).
13. Laskennan tulostuksen aloitusvuorokausi (vuorokausina laskennan alusta).
14. Vesi- ja jääpitoisuuden sekä maaveden lämpötilan tulostus: kerrosten lukumäärä (N ylintä kerrosta), tulostusväli vuorokausina (d).
15. Seuraavat NZ riviä (maakerroksittain): kerroksen numero, kerrospaksuus (m), vedenjohtavuus (m/d), kiintoainepitoisuus (m³/m³), painotuskerroin pohjavesivirtauksen jakamiseen kerrosten kesken ja maa-aineksen tiheys (kg/m³).
16. Haihdunta, seuraavat vuosikokonaisuudet vuosille 1-NVU (5 riviä/vuosi):
 - kuukaudet touko-syys, 1 rivi / kuukausi, rivin muoto:
 - haihdunta (mm/5 vrk), kuukauden 3.,8.,13.,18.,23., ja 28 päivä.
17. Kutistumiskäyrän lukuparien lukumäärä (NKUT).
18. Kutistumiskäyrä lukupareina (NKUT riviä).

Esimerkki ohjelman SULFA lähtötiedostosta SULFA2.DAT selityksineen.
 Sarakkeiden maksimäärä yhdellä rivillä on 72.
 Luvut erotetaan toisistaan välilyönnillä.
 Viitenumerot 1-2 eivät ole lähtötietoja.

```

-----
DAY   RAD   TEMP (cel.)  PREC (mm/d)      1.
 78   7.177  9.30  1.20           2.
 79   7.325  4.20  0.00
 80   7.474  1.40  6.80
 81   7.624  3.30  0.00
 82   7.775  2.80  0.00
 83   7.927  0.20  7.20
      .
      .
      .
-----

```

1. Otsikkorivi (ei merkitystä, mutta annettava).

2. Laskennan jokaiselle vuorokaudelle (1 rivi/ vuorokausi):
 - päivä (ei merkitystä, mutta annettava), säteily (ei merkitystä,
 mutta annettava), lämpötila (celcius), sadanta (mm/d)

Esimerkki ohjelman SULFA lähtötiedostosta SULFA3.DAT selityksineen.
 Sarakkeiden maksimäärä yhdellä rivillä on 72.
 Luvut erotetaan toisistaan välilyönnillä.
 Puolipisteet, niiden jälkeinen teksti ja viitenumerot 1-11
 eivät ole lähtötietoja.

```

-----
0.07 0.23 0.25 0.07 0. ; WSN (m), DSN (m), THIS, THWS, SPS (m) 1.
3. -1. ; TYLA, TALA (celcius) 2.
2. -1.9 ; KF (mm/d/sqrt(celcius)), TF (celcius) 3.
0.9 2.8 0.8 ; KMMIN, KMMAX (mm/celcius/d), TM (celcius) 4.
0.03 0.2 -2.0 ; KEMIN, KEMAX (mm/celcius/d), TO (celcius) 5.
0.001 0.021 0.08 ; CC1 (1/m/s), CC2 (m3/kg), CC3 (1/celcius) 6.
0.20 500. ; EO (mm/d), SPSMAX (mm) 7.
0.2 ; ASN 8.
4200. 800. 334000. -5.0 0.5 3. ; CW,CSOI,LF,TFF(ce.),APAR,TEND(ce.) 9.
1 0.1 -1.0 0.0 ; KER, TG (celcius), HHO (m), THICE 10.
2 0.2 -0.8 0.0
3 0.4 -0.6 0.0
4 0.6 -0.4 0.0
5 0.8 -0.2 0.0
6 1.0 0.0 0.0
7 1.2 0.2 0.0
8 1.4 0.4 0.0
9 1.6 0.6 0.0
10 1.8 0.8 0.0
11 2.0 1.0 0.0
12 2.1 1.2 0.0
13 2.2 1.4 0.0
14 2.3 1.6 0.0
15 2.4 1.8 0.0
16 2.5 2.0 0.0
17 2.6 2.2 0.0
18 2.7 2.4 0.0
19 2.8 2.6 0.0
20 2.9 2.8 0.0
1 1.5 ; REUNAT, LAMBDA (1-21, W/m/celcius) 11.
2 1.5
3 1.5
4 1.5
5 1.5
6 1.5
7 1.5
8 1.5
9 1.5
10 1.5
11 1.5
12 1.5
13 1.5
14 1.5
15 1.5
16 1.5
17 1.5
18 1.5
19 1.5
20 1.5
21 1.5
-----
    
```

1. Alkuarvot: lumen vesiarvo (m), lumen paksuus (m), lumen jääpitoisuus (m³/m³), lumen vesipitoisuus (m³/m³), painannesäilyntävarasto (m).
2. Vesisateen lämpötilaraja (celcius), lumisateen lämpötilaraja (celcius).

3. Veden jäätyamisen kerroin ($\text{mm/d}/\sqrt{\text{celcius}}$),
lämpötilaraja jäätymiselle (celcius).
4. Sulamiskertoimen minimiarvo ($\text{mm/d}/\text{celcius}$), vastaava maksimi-
arvo ($\text{mm/d}/\text{celcius}$), lämpötilaraja sulamiselle (celcius).
5. Haihtumiskertoimen minimiarvo ($\text{mm/d}/\text{celcius}$), vastaava maksimi-
arvo ($\text{mm/d}/\text{celcius}$), lämpötilaraja haihtumiselle (celcius).
6. Lumen tiivistymisen kertoimet 1 ($1/\text{m/s}$), 2 (m^3/kg) ja 3 ($1/\text{celcius}$).
7. Haihdunnan vakiotermin (mm/d), painannesäilyntävaraston maksimikoko (mm).
8. Veden purkautumisen kerroin lumesta.
9. Veden lämpökapasiteetti ($\text{J/kg}/\text{celcius}$), maan lämpökapasiteetti
($\text{J/kg}/\text{celcius}$), veden sulamislämpö (jäätyminen ja sulaminen, J/kg),
lämpötila jonka alapuolella maa on täysin jäässä (celcius),
lämpötilalaskennan termin r laskentakaavan potenssiinkorotuskerroin,
maaveden lämpötila maaprofiilin alareunalla (celcius).
10. Maakerroksittain (NZ riviä):
 - kerroksen numero, maan lämpötila laskennan alussa (celcius),
paineenergia laskennan alussa (m), jääpitoisuus laskennan
alussa (m^3/m^3)
11. Kerrosväleittäin (NZ+1 riviä):
 - kerroksen numero (viittaa yläreunaan), lämmön johtumisvakio
($\text{W/m}/\text{celcius}$)

Esimerkki ohjelman SULFA lähtötiedostosta SULFA4.DAT selityksineen.
 Sarakkeiden maksimäärä yhdellä rivillä on 72.
 Luvut erotetaan toisistaan välilyönnillä.
 Puolipisteet, niiden jälkeinen teksti ja viitenumerot
 1-13 eivät ole lähtötietoja.

```

-----
1                ; FLLAA (1/0) , lasketaanko laatu vai ei      1.
100              ; NTUL (ker. kons. tul. väli päivinä)        2.
1.0 0. 1.E-7 1.E-8 ; AL (m), D* (m2/s), RAJA1 (maav.), RAJA2 (so.) 3.
1.E-10 1.E-5      ; RAJA3 (happi, mol/m3), RAJA4 (hiili, mol/m3) 4.
1.E-6 1.E-5 9.37  ; DAIR (m2/s), BETA (1/s), CRO2 (ilma, mol/m3) 5.
1.E-5 0.015       ; BECO2 (1/s), CRCO2 (ilma, mol/m3)          6.
1.66 1.E-8 0.139  ; HIIK (m), HIIR, HIIS (1/celcius)                7.
316. 0.0107 1.E-3 1.1E16 109.6 0.3 28.6 9.5 ; KO:t          8.
1.26E5           ; KCACO3                                     9.
-7.60 -0.50 0.12 ; P1, P2 ja P3                                 10.
1.8E-9 0.0693 1.8E-9 0.0693 1.E-12 ; KOX1F, KOX1G, KOX2F, KOX2G ja KCA 11.
0 710. 30.       ; IKAL (1/0), XKAL (kg/ha/a), XNEU (%)       12.
4.7 0.011 0.025 ; CR:t (mol/m3, vakiot), pH, Ca2+, SO42-      13.
-----

```

1. Merkki, joka osoittaa, suoritetaanko laatulaskenta (arvo 1) vai ei (arvo 0). Jos ei suoriteta, jatkorivejä ei tarvita.
2. Maakerrosten kaikkien konsentraatioiden tulostusväli vuorokausina.
3. Dispersiokertoimen laskentakaava $D = AL U + D^*$ kertoimet AL (m) ja D^* (m²/s), maaveden reaktiotasapainon iteraation lopetusraja, salaojaveden reaktiotasapainon iteraation lopetusraja.
4. Happitasapainon iteroinnin lopetusraja (mol/m³), hiilidioksiditasapainon lopetusraja (mol/m³).
5. Dispersiokerroin ilmaraoille (m²/s), hapen kulkeutumisen lähdetermin beta-kerroin (1/s), ilman happikonsentraatio (mol/m³).
6. Hiilidioksidin kulkeutumisen lähdetermin beta-kerroin (1/s), ilman hiilidioksidikonsentraatio (mol/m³).
7. Hiilidioksidin muodostumisen kertoimet k (m), r ja s (1/celcius).
8. Tasapainovakioiden arvot lämpötilassa 25 celciusta, järjestys: Kgibb, KAlOH, KAlSO₄, KFe, KFeOH, KHFA, KHA1, KHCa
9. Tasapainovakio kalkituslaskentaa varten.
10. Raudan hapettumisen kertoimet.
11. Hapettumiskertoimien parametrit rautamonosulfidille (m³/mol/s ja 1/celcius), pyriitille (m³/mol/s ja 1/celcius) ja rapautumiskerroin (mol/m³/s).
12. Kalkitus peltoon: kalkitaanko vai ei (1/0), kalkitusmäärä (kg/ha/a), neutralointikyky (%)
13. Konsentraatioiden reunaehto (sadevesi, vakio koko simuloinnin ajan) järjestyksessä: pH, Ca²⁺, SO₄²⁻ (mol/m³)

Esimerkki ohjelman SULFA lähtötiedostosta SULFA5.DAT selityksineen.
 Sarakkeiden maksimäärä yhdellä rivillä on 72.
 Luvut erotetaan toisistaan välilyönnillä.
 Puolipisteet, niiden jälkeinen teksti ja viitenumerot 1-3
 eivät ole lähtötietoja.

1	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	0.20	9.37			
2	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	0.20	9.37			
3	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	0.20	9.37			
4	3.9	0.9	8.2	0.09	0.025	0.20	9.37			
5	3.7	0.9	8.2	0.09	0.025	0.20	9.37			
6	3.6	0.9	8.2	0.09	0.025	0.10	9.37			
7	3.5	0.9	8.2	0.09	0.025	0.01	9.37			
8	3.6	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-2	9.37			
9	3.7	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-3	9.37			
10	3.8	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-4	9.37			
11	3.9	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-5	9.37			
12	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-6	9.37			
13	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-10	9.37			
14	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-10	9.37			
15	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-10	9.37			
16	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-10	9.37			
17	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-10	9.37			
18	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-10	9.37			
19	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-10	9.37			
20	4.0	0.9	8.2	0.09	0.025	1E-10	9.37			

1	8.0	13.	2.16	2.16	10.	0.				
2	8.0	13.	2.16	2.16	10.	0.				
3	8.0	17.	3.25	3.25	10.	0.				
4	8.0	20.	4.90	4.90	10.	0.				
5	8.0	20.	6.75	6.75	10.	0.				
6	8.0	20.	7.60	7.60	10.	0.				
7	15.0	30.	23.9	23.9	10.	0.				
8	5.0	45.	36.8	36.8	10.	0.				
9	3.0	50.	45.6	45.6	10.	0.				
10	3.0	60.	55.2	55.2	10.	0.				
11	3.0	60.	55.2	55.2	10.	0.				
12	3.0	60.	55.2	55.2	10.	0.				
13	3.0	60.	55.2	55.2	10.	0.				
14	3.0	60.	55.2	55.2	10.	0.				
15	3.0	60.	55.2	55.2	10.	0.				
16	3.0	60.	55.2	55.2	10.	0.				
17	3.0	60.	55.2	55.2	10.	0.				
18	3.0	60.	55.2	55.2	10.	0.				
19	3.0	60.	55.2	55.2	10.	0.				
20	3.0	60.	55.2	55.2	10.	0.				

1. Kerroksittain konsentraatioiden alkuarvot (mol/m³, paitsi pH), järj.:
 Kerroksen numero, pH, Al, SO₄, Fe, H₂CO₃, O₂ (vesi), O₂ (ilmahuokokset)
2. Tyhjä rivi (annettava).
3. Kerroksittain konsentraatioiden alkuarvot (mol/m³), järjestys:
 Kerroksen numero, Al₃+ads, Ca₂+ads, FeS, FeS₂, FeOH₃, AlOH₃

Esimerkki ohjelman SIVU lähtötiedostosta SIVU1.DAT selityksineen.
 Sarakkeiden maksimäärä yhdellä rivillä on 72.
 Luvut erotetaan toisistaan välilyönnillä.
 Puolipisteet, niiden jälkeinen teksti ja viitenumerot 1-5
 eivät ole lähtötietoja.

```

-----
HAPSU - PROJEKTI
PAJULUOMA, SIVUVALUMA-ALUE 3.6 km2
VUODET 1990 - 1992
KALIBROINTILASKENTA
790 1 24. 78 3 0 ; NSTEP (d), NOSA, DT (h), DAY (d), NVU,ISADE 2.
3.6 ; ASV (km2) 3.
0.05 0.135 ; HAIA, HAIB 4.
33 28 29 22 8 27 ; EA (mm/5 pv) touko (1-6), VUOSI 1 (-90) 5.
21 30 27 11 29 27 ; kesä
22 17 9 13 18 27 ; heinä
25 16 15 16 13 10 ; elo
12 8 7 7 4 3 ; syys
8 17 17 11 14 24 ; EA (mm/5 pv) touko (1-6), VUOSI 2 (-91)
12 21 10 21 20 15 ; kesä
25 34 21 16 16 27 ; heinä
19 15 13 8 14 19 ; elo
19 6 6 7 5 5 ; syys
12 17 29 29 30 45 ; EA (mm/5 pv) touko (1-6), VUOSI 3 (-92)
39 38 32 24 25 34 ; kesä
17 27 19 11 28 25 ; heinä
19 15 9 7 9 8 ; elo
4 9 6 5 6 5 ; syys
-----

```

1. Otsikkotiedot neljällä rivillä. Jos tekstiä on vähemmän kuin 4 riviä, laitetaan puuttuvien rivien tilalle tyhjiä rivejä.
2. Simuloinnin kokonaisaika (d), aika-askel osina vuorokaudesta (1, 2, 3, ...), aika-askel (h), laskennan aloituspäivä (päivää vuoden alusta), monelleko kalenterivuodelle laskenta ulottuu (NVU), vuorokauden sadannan jakautuminen (0=tasaisesti koko vuorokaudelle, 1=vuorokauden sadanta tulee vuorokauden ensimmäisellä aika-askeleella),
3. Sivuvalluma-alueen pinta-ala (km²).
4. Potentiaalisen haihdunnan kertoimet a ja b .
5. Haihdunta, seuraavat vuosikokonaisuudet vuosille 1-NVU (5 riviä/vuosi):
 - kuukaudet touko-syys, 1 rivi / kuukausi, rivin muoto:
 - haihdunta (mm/5 vrk), kuukauden 3.,8.,13.,18.,23., ja 28 päivä.

Esimerkki ohjelman SIVU lähtötiedostosta SIVU2.DAT selityksineen.
 Sarakkeiden maksimäärä yhdellä rivillä on 72.
 Luvut erotetaan toisistaan välilyönnillä.
 Viitenumerot 1-2 eivät ole lähtötietoja.

```

-----
DAY    RAD  TEMP (cel.)  PREC (mm/d)      1.
 78    7.177  9.30  1.20          2.
 79    7.325  4.20  0.00
 80    7.474  1.40  6.80
 81    7.624  3.30  0.00
 82    7.775  2.80  0.00
 83    7.927  0.20  7.20
      .
      .
      .
-----

```

1. Otsikkorivi (ei merkitystä, mutta annettava).

2. Laskennan jokaiselle vuorokaudelle (1 rivi/ vuorokausi):
 - päivä (ei merkitystä, mutta annettava), säteily (ei merkitystä,
 mutta annettava), lämpötila (celcius), sadanta (mm/d)

Esimerkki ohjelman SIVU lähtötiedostosta SIVU3.DAT selityksineen.
 Sarakkeiden maksimäärä yhdellä rivillä on 72.
 Luvut erotetaan toisistaan välilyönnillä.
 Puolipisteet, niiden jälkeinen teksti ja viitenumerot 1-14
 eivät ole lähtötietoja.

0.0 0.20 0.39 0.59	; SPS, SMV, SVV, SPV (m), alkuarvot	1.
0.07 0.23 0.25 0.07	; WSN (m), DSN (m), THIS, THWS	2.
3. -1.	; TYLA, TALA (celcius)	3.
0.9 2.8 0.8	; KMMIN, KMMAX (mm/celcius/d), TM (celcius)	4.
2.0 -1.9	; KF (mm/d/sqrt(celcius)), TF (celcius)	5.
0.001 0.021 0.08	; CC1 (1/m/s), CC2 (m ³ /kg), CC3 (1/celcius)	6.
0.0	; SPSR (m)	7.
5.E-7 4.0E-7 2.E-9 1.E-9	; KQ1, KQ2, KQ3, KQ4 (1/s)	8.
3.E-7 3.E-7 2.E-9	; KI1, KI2, KI3 (1/s)	9.
0.19 0.19 0.10 0.16	; SMV1, SMV2, SMV3, SMV4 (m)	10.
0.30 1.0	; SMVMAX (m), RR	11.
0.21 -2.0	; EO (mm/d), TO (celcius)	12.
0.03 0.2	; KEMIN, KEMAX (mm/celcius/d)	13.
0.2	; ASN	14.

1. Varastotyyppien alkuarvot (m) järjestyksessä:
 Painannesäilyntävarasto, maavesivarasto, välivarasto, pohjavesivarasto.
2. Lumikerroksen suureiden alkuarvot järjestyksessä:
 Lumikerroksen vesi-arvo (m), paksuus (m), jääpitoisuus ja vesipitoisuus.
3. Vesisateen lämpötilaraja (celcius), lumisateen lämpötilaraja (celcius).
4. Sulamiskertoimen minimiarvo (mm/d/celcius), vastaava maksimi-arvo (mm/d/celcius), lämpötilaraja sulamiselle (celcius).
5. Veden jäätyksen kerroin (mm/d/sqrt(celcius)), lämpötilaraja jäätymiselle (celcius).
6. Lumen tiivistymisen kertoimet 1 (1/m/s), 2 (m³/kg) ja 3 (1/celcius).
7. Painannesäilyntävaraston rajakoko (m).
8. Purkautumiskertoimet (1/s) 1-4.
9. Imeytymiskertoimet (1/s) 1-3.
10. Maavesivaraston rajakoko imeytymiselle (m), maavesivaraston rajakoko purkautumiselle (m), maavesivaraston rajakoko (m) jonka alapuolella haihdunta = 0, maavesivaraston rajakoko (m) jonka yläpuolella haihdunta on maksimissaan.
11. Maavesivaraston maksimikoko (m), välivarastoon imeytymisen kaavan potenssiinkorotuksen kerroin r.
12. Haihdunnan vakiotermi (mm/d), lämpötilaraja haihtumiselle (celcius).
13. Haihtumiskertoimen minimiarvo (mm/d/celcius), vastaava maksimi-arvo (mm/d/celcius).
14. Veden purkautumisen kerroin lumesta.

Esimerkki ohjelman SIVU lähtötiedostosta SIVU4.DAT selityksineen.
 Sarakkeiden maksimäärä yhdellä rivillä on 72.
 Luvut erotetaan toisistaan välilyönnillä.
 Puolipisteet, niiden jälkeinen teksti ja viitenumerot 1-2
 eivät ole lähtötietoja.

```
-----
1                ; FLLAA (1/0)                1.
5.07 0.018 0.032 0.031 ; pH, Al, SO4, Fe (mol/m3) 2.
-----
```

1. Merkki, joka osoittaa tarkastellaanko veden laatua (1) vai ei (0)
2. Sivupaluma-alueen veden konsentraatiot (mol/m³, paitsi pH ;
 vakiot koko simuloinnin ajan): pH, Al, SO₄, Fe

Esimerkki ohjelman HAPSU lähtötiedostosta HAPSU1.DAT selityksineen.
 Sarakkeiden maksimäärä yhdellä rivillä on 72.
 Luvut erotetaan toisistaan välilyönnillä.
 Puolipisteet, niiden jälkeinen teksti ja viitenumerot 1-10
 eivät ole lähtötietoja.

```

-----
HAPSU - PROJEKTI                                     1.
PAJULUOMAN PUMPPAAMO
VUODET 1990 - 1992
KALIBROINTILASKENTA
790 1 24. 78 3           ; NSTEP (d), NOSA, DT (h), DAY (d), NVU   2.
6500.                   ; VALLAS (m3)                               3.
7.7                     ; koko alueen ALA (km2)                     4.
1 1                     ; NSULF, NSIVU                               5.
1                       ; FLLAA (1/0)                               6.
316. 0.0107 1.E-3 1.1E16 109.6 0.3 28.6 9.5 ; KO:t                 7.
1.26E5                  ; KCACO3                                    8.
0 1. 10                 ; INEU (1/0), KNEU, VIIVE (d)   9.
-7.60 -0.50 0.12       ; P1, P2, P3                               10.
-----

```

1. Otsikkotiedot neljällä rivillä. Jos tekstiä on vähemmän kuin 4 riviä, laitetaan puuttuvien rivien tilalle tyhjiä rivejä.
2. Simuloinnin kokonaisaika (d), aika-askel osina vuorokaudesta (1, 2, 3, ...), aika-askel (h), laskennan aloituspäivä (päivää vuoden alusta), monelleko kalenterivuodelle laskenta ulottuu.
3. Pumppaamon altaan tilavuus (m³).
4. Koko valuma-alueen (sulfaattimaa-alueet + sivuvaluma-alueet) pinta-ala (km²).
5. Sulfaattimaa-alueiden lukumäärä, sivuvaluma-alueiden lukumäärä.
6. Merkki, joka osoittaa lasketaanko veden laatu (1) vai ei (0).
7. Tasapainovakioiden arvot lämpötilassa 25 celciusta, järj.: Kgibb, KAlOH, KAlSO₄, KFe, KFeOH, KHFA, KHA1, KHCa
8. Tasapainovakio kalkituslaskentaa varten.
9. Tehdäänkö neutralointi vai ei (1/0), neutraloinnin kalkkimäärän kerroin ja neutraloinnin vaikutusaika (d).
10. Raudan hapettumisen kertoimet.

Esimerkki ohjelman HAPSU lähtötiedostosta HAPSU2.DAT selityksineen.
 Sarakkeiden maksimäärä yhdellä rivillä on 72.
 Luvut erotetaan toisistaan välilyönnillä.
 Viitenumerot 1-2 eivät ole lähtötietoja.

```

-----
DAY    RAD  TEMP (cel.)  PREC (mm/d)          1.
 78    7.177  9.30  1.20              2.
 79    7.325  4.20  0.00
 80    7.474  1.40  6.80
 81    7.624  3.30  0.00
 82    7.775  2.80  0.00
 83    7.927  0.20  7.20
      .
      .
      .
-----

```

1. Otsikkorivi (ei merkitystä, mutta annettava).
2. Laskennan jokaiselle vuorokaudelle (1 rivi/ vuorokausi) :
 - päivä (ei merkitystä, mutta annettava), säteily (ei merkitystä, mutta annettava), lämpötila (celcius), sadanta (mm/d)

Liite B. Aakkosellinen luettelo lähtötiedoista

NIMI	YKSIKKÖ	TIEDOSTO	VIITE
AL	m	SULFA4.DAT	3.
ALA	km ²	HAPSU1.DAT	4.
ALFA		SULFA1.DAT	8.
APAR		SULFA3.DAT	9.
ASN		SULFA3.DAT	8.
		SIVU3.DAT	14.
ASV	km ²	SIVU1.DAT	3.
BECO2	1/s	SULFA4.DAT	6.
BETA	1/s	SULFA4.DAT	5.
C0	mol/m ³	SULFA5.DAT	1. ja 3.
CC1	1/m/s	SULFA3.DAT	6.
		SIVU3.DAT	6.
CC2	m ³ /kg	SULFA3.DAT	6.
		SIVU3.D AT6.	
CC3	1/celcius	SULFA3.DAT	6.
		SIVU3.DAT	6.
CR	mol/m ³	SULFA4.DAT	13.
		SIVU4.DAT	2.
CRCO2	mol/m ³	SULFA4.DAT	6.
CRO2	mol/m ³	SULFA4.DAT	5.
CSOI	J/kg/celcius	SULFA3.DAT	9.
CW	J/kg/celcius	SULFA3.DAT	9.
D*	m ² /s	SULFA4.DAT	3.
DAIR	m ² /s	SULFA4.DAT	5.
DAY	d	SULFA1.DAT	2.
		SIVU1.DAT	2.
		HAPSU1.DAT	2.
DSN	m	SULFA3.DAT	1.
		SIVU3.DAT	2.
DT	h	SULFA1.DAT	2.
		SIVU1.DAT	2.
		HAPSU1.DAT	2.
DZ	m	SULFA1.DAT	15.
E		SULFA1.DAT	18.
E0	mm/d	SULFA3.DAT	7.
		SIVU3.DAT	12.
EA	mm/5 d	SULFA1.DAT	16.
		SIVU1.DAT	5.
ETA		SULFA1.DAT	18.
FLDAY	d	SULFA1.DAT	13.
FLLAA		SULFA4.DAT	1.
		SIVU4.DAT	1.
		HAPSU1.DAT	6.

NIMI	YKSIKKÖ	TIEDOSTO	VIITE
HAIA		SULFA1.DAT	6.
		SIVU1.DAT	4.
HAIB		SULFA1.DAT	6.
		SIVU1.DAT	4.
HH0	m	SULFA3.DAT	10.
HH4	m	SULFA1.DAT	7.
HIIK	m	SULFA4.DAT	7.
HIIR		SULFA4.DAT	7.
HIIS	1/s	SULFA4.DAT	7.
IKAL		SULFA4.DAT	12.
INEU		HAPSU1.DAT	9.
IPAD		SULFA1.DAT	10.
ISADE		SULFA1.DAT	4.
		SIVU1.DAT	2.
JAR1		SULFA1.DAT	3.
JAR2		SULFA1.DAT	3.
K0		SULFA4.DAT	8.
		HAPSU1.DAT	7.
KCA	mol/m ³ /s	SULFA4.DAT	11.
KCACO ₃		SULFA4.DAT	9.
		HAPSU1.DAT	8.
KEMAX	mm/celcius/d	SULFA3.DAT	5.
		SIVU3.DAT	13.
KEMIN	mm/celcius/d	SULFA3.DAT	5.
		SIVU3.DAT	13.
KER		SULFA1.DAT	15.
		SULFA3.DAT	10.
KF	mm/d/sqrt(ce.)	SULFA3.DAT	3.
		SIVU3.DAT	5.
KI	m/d	SULFA1.DAT	12.
KI1	1/s	SIVU3.DAT	9.
KI2	1/s	SIVU3.DAT	9.
KI3	1/s	SIVU3.DAT	9.
KKE		SULFA1.DAT	11.
KMMAX	mm/celcius/d	SULFA3.DAT	4.
		SIVU3.DAT	4.
KMMIN	mm/celcius/d	SULFA3.DAT	4.
		SIVU3.DAT	4.
KNEU		HAPSU1.DAT	9.
KOX1F	m ³ /mol/s	SULFA4.DAT	11.
KOX1G	1/celcius	SULFA4.DAT	11.
KOX2F	m ³ /mol/s	SULFA4.DAT	11.
KOX2G	1/celcius	SULFA4.DAT	11.
KQ1	1/s	SIVU3.DAT	8.
KQ2	1/s	SIVU3.DAT	8.

NIMI	YKSIKKÖ	TIEDOSTO	VIITE
KQ3	1/s	SIVU3.DAT	8.
KQ4	1/s	SIVU3.DAT	8.
KS	m/d	SULFA1.DAT	15.
KUID	m	SULFA1.DAT	9.
KUIL	m	SULFA1.DAT	9.
KUIR	m	SULFA1.DAT	9.
LAMBDA	W/m/celcius	SULFA3.DAT	11.
LF	J/kg	SULFA3.DAT	9.
MYY		SULFA1.DAT	3.
NKUT		SULFA1.DAT	17.
NOSA		SULFA1.DAT	2.
		SIVU1.DAT	2.
		HAPSU1.DAT	2.
NSIVU		HAPSU1.DAT	5.
NSTEP	d	SULFA1.DAT	2.
		SIVU1.DAT	2.
		HAPSU1.DAT	2.
NSULF		HAPSU1.DAT	5.
NTHE		SULFA1.DAT	14.
NTHETU	d	SULFA1.DAT	14.
NTUL	d	SULFA4.DAT	2.
NVU		SULFA1.DAT	2.
		SIVU1.DAT	2.
		HAPSU1.DAT	2.
NZ		SULFA1.DAT	2.
P1		SULFA4.DAT	10.
		HAPSU1.DAT	10.
P2		SULFA4.DAT	10.
		HAPSU1.DAT	10.
P3		SULFA4.DAT	10.
		HAPSU1.DAT	10.
PAINO		SULFA1.DAT	15.
PALA	km2	SULFA1.DAT	4.
PREC	mm/d	SULFA2.DAT	2.
		SIVU2.DAT	2.
		HAPSU2.DAT	2.
RAJA	m	SULFA1.DAT	3.
RAJA1		SULFA4.DAT	3.
RAJA2		SULFA4.DAT	3.
RAJA3	mol/m3	SULFA4.DAT	4.
RAJA4	mol/m3	SULFA4.DAT	4.
ROO	kg/m3	SULFA1.DAT	15.
RR		SIVU3.DAT	11.
SMV	m	SIVU3.DAT	1.
SMV1	m	SIVU3.DAT	10.
SMV2	m	SIVU3.DAT	10.

NIMI	YKSIKKÖ	TIEDOSTO	VIITE
SMV3	m	SIVU3.DAT	10.
SMV4	m	SIVU3.DAT	10.
SMVMAX	m	SIVU3.DAT	11.
SPS	m	SULFA3.DAT	1.
		SIVU3.DAT	1.
SPSMAX	mm	SULFA3.DAT	7.
SPSR	m	SIVU3.DAT	7.
SPV	m	SIVU3.DAT	1.
SVV	m	SIVU3.DAT	1.
T0	celcius	SULFA3.DAT	5.
		SIVU3.DAT	12.
TALA	celcius	SULFA3.DAT	2.
		SIVU3.DAT	3.
TEMP	celcius	SULFA2.DAT	2.
		SIVU2.DAT	2.
		HAPSU2.DAT	2.
TEND	celcius	SULFA3.DAT	9.
TF	celcius	SULFA3.DAT	3.
		SIVU3.DAT	5.
TFF	celcius	SULFA3.DAT	9.
TG	celcius	SULFA3.DAT	10.
THICE	m3/m3	SULFA3.DAT	10.
THIS	m3/m3	SULFA3.DAT	1.
		SIVU3.DAT	2.
THS	m3/m3	SULFA1.DAT	15.
THWR	m3/m3	SULFA1.DAT	11.
THWS	m3/m3	SULFA3.DAT	1.
		SIVU3.DAT	2.
TM	celcius	SULFA3.DAT	4.
		SIVU3.DAT	4.
TYLA	celcius	SULFA3.DAT	2.
		SIVU3.DAT	3.
VALLAS	m3	HAPSU1.DAT	3.
VIIVE	d	HAPSU1.DAT	9.
WSN	m	SULFA3.DAT	1.
		SIVU3.DAT	2.
ZE1	m	SULFA1.DAT	5.
ZE2	m	SULFA1.DAT	5.
ZPAD	m	SULFA1.DAT	10.
ZSO	m	SULFA1.DAT	5.
XKAL	kg/ha/a	SULFA4.DAT	12.
XNEU	%	SULFA4.DAT	12.

Liite C.

Ohjelman SULFA tulostiedostot

Ohjelman SIVU tulostiedostot

Ohjelman HAPSU tulostiedostot

Ohjelman SULFA tulostiedostot

SULFA1.LIS: aika (d), sade (mm/d), ilman lämpötila (°C), infiltraatio ylimpään maakerrokseen (mm/d), infiltraatio rakoihin (mm/d), pohjaveden pinnan korkeus (m), kokonaishaihdunta (mm/d), pohjavesivirtaus kuivatusojiin (mm/d), lumen vesiarvo (mm), kumulatiivinen sademäärä (m)

SULFA2.LIS: vesipitoisuus, jääpitoisuus ja maaveden lämpötila (°C) (käyttäjä valitsee kerrosmäärän ja tulostusvälin)

SULFA3.LIS: aika (d), alueen kumulatiivinen vesimäärä (m³)

SULFA4.LIS: liuenneiden ja kiinteiden aineiden konsentraatiot (mol/m³) kaikissa maakerroksissa (käyttäjä valitsee tulostusvälin)

SULFA5.LIS: aika (d), salaojaveden pH, salaojaveden alumiinipitoisuus (mg/l), salaojaveden sulfaattipitoisuus (mg/l) ja salaojaveden rautapitoisuus (ug/l)

SULFA6.LIS: aika (d), alueen kumulatiivinen vetyionikuorma (mol/m²), alueen kumulatiivinen alumiinikuorma (g/m²), alueen kumulatiivinen sulfaattikuorma (g/m²) ja alueen kumulatiivinen rautakuorma (mg/m²)

SULFA7.LIS on simuloinnin yhteenvetotiedosto, josta on esimerkki liitteessä D.

SULFA.LIS on binäärimuotoinen tulostiedosto, joka on lähtötiedostona seosveden laskennassa. Tiedostossa on alueelta tuleva vesimäärä (m³) ja liuenneiden aineiden konsentraatiot (mol/m³).

Ohjelman SIVU tulostiedostot

SIVU1.LIS: aika (d), sade (mm/d), ilman lämpötila (°C), kokonaishaihdunta (mm/d), lumen vesiarvo (mm)

SIVU2.LIS: aika (d), varastojen koot (m) ja virtaama varastoista (mm/d) (painannesäilyntä-, maavesi-, väli- ja pohjavesivarasto), alueen kokonaisvirtaama (m³/d)

SIVU3.LIS: aika (d), alueen kumulatiivinen vesimäärä (m³)

SIVU4.LIS: aika (d), alueen kumulatiivinen vetyionikuorma (mol/m²), alueen kumulatiivinen alumiinikuorma (g/m²), alueen kumulatiivinen sulfaattikuorma (g/m²) ja alueen kumulatiivinen rautakuorma (mg/m²)

SIVU5.LIS on simuloinnin yhteenvetotiedosto, josta on esimerkki liitteessä D.

SIVU.LIS on binäärimuotoinen tulostiedosto, joka on lähtötiedostona seosveden laskennassa. Tiedostossa on alueelta tuleva vesimäärä (m³) ja liuenneiden aineiden konsentraatiot (mol/m³).

Ohjelman HAPSU tulostiedostot

HAPSU1.LIS: aika (d), seosveden kumulatiivinen vesimäärä (m³)

HAPSU2.LIS: aika (d), seosveden pH, seosveden alumiinipitoisuus (mg/l), seosveden sulfaattipitoisuus (mg/l) ja seosveden rautapitoisuus (µg/l)

HAPSU3.LIS: aika (d), valuma-alueen kumulatiivinen vetyionikuorma (mol/m²), valuma-alueen kumulatiivinen alumiinikuorma (g/m²), valuma-alueen kumulatiivinen sulfaattikuorma (g/m²) ja valuma-alueen kumulatiivinen rautakuorma (mg/m²)

HAPSU4.LIS on simuloinnin yhteenvetotiedosto, josta on esimerkki liitteessä D.

Liite D.**Ohjelman SULFA simuloinnin yhteenvetotiedosto****Ohjelman SIVU simuloinnin yhteenvetotiedosto****Ohjelman HAPSU simuloinnin yhteenvetotiedosto**

SULFAATTIMAA-ALUE
SIMULOINNIN YHTEENVETOTULOSTUS

HAPSU -PROJEKTI
PAJULUOMA, SULFAATTIMAA-ALUE 4.1 km²
VUODET 1990 - 1992
KALIBROINTILASKENTA

SIMULOINTIAIKA	790.	d
AIKA-ASKEL	24.	h
ALUEEN PINTA-ALA	4.10	km ²

KOKONAISSADANTA	1196.	mm
KOKONAISHAIHDUNTA	894.	mm
KOKONAISSVALUNTA	362.	mm
KOKONAISSVESIMÄÄRÄ	1482923.	m ³

KUMULATIIVISET AINEKUORMAT:

VETYIONIT	0.054 mol/m ²	220553.	mol
ALUMIINI	8.35 g/m ²	34222.	kg
SULFAATTI	278.68 g/m ²	1142607.	kg
RAUTA	2.039 g/m ²	8359.	kg

EI POHJAVEDEN PADOTUSTA

EI PELLON KALKITUSTA

SIVUVALUMA-ALUE
SIMULOINNIN YHTEENVETOTULOSTUS

HAPSU - PROJEKTI
PAJULUOMA, SIVUVALUMA-ALUE 3.6 km²
VUODET 1990 - 1992
KALIBROINTILASKENTA

SIMULOINTIAIKA	790.	d
AIKA-ASKEL	24.	h
ALUEEN PINTA-ALA	3.60	km ²

KOKONAISSADANTA	1196.	mm
KOKONAISHAIHDUNTA	888.	mm
KOKONAISSVALUNTA	384.	mm
KOKONAISSVESIMÄÄRÄ	1381160.	m ³

KUMULATIIVISET AINEKUORMAT:

VETYIONIT	0.003 mol/m ²	11756.	mol
ALUMIINI	0.19 g/m ²	671.	kg
SULFAATTI	1.18 g/m ²	4243.	kg
RAUTA	0.666 g/m ²	2398.	kg

KOKO VALUMA-ALUE (SEOSVESI)
SIMULOINNIN YHTEENVETOTULOSTUS

HAPSU - PROJEKTI
PAJULUOMAN PUMPPAAMO
VUODET 1990 - 1992
KALIBROINTILASKENTA

SIMULOINTIAIKA	790.	d
AIKA-ASKEL	24.	h
ALUEEN PINTA-ALA	7.70	km ²

KOKONAISSVALUNTA	371.	mm
KOKONAISSVESIMÄÄRÄ	2860207.	m ³

KUMULATIIVISET AINEKUORMAT:

VETYIONIT	0.032 mol/m ²	243604.	mol
ALUMIINI	4.52 g/m ²	34815.	kg
SULFAATTI	148.63 g/m ²	1144429.	kg
RAUTA	1.394 g/m ²	10737.	kg

EI SEOSVEDEN KALKITUSTA

Liite E.

Ohjelman SULFA pääohjelman rakenne

Ohjelman SIVU pääohjelman rakenne

Ohjelman HAPSU pääohjelman rakenne

SULFA PÄÄOHJELMAN RAKENNE

- LÄHTÖ- JA TULOSTIEDOSTOJEN AVAUS
- LÄHTÖTIETOJEN LUKEMINEN
- LASKENNAN ALUSTUKSIA
- PÄIVITTÄINEN LUUPPI

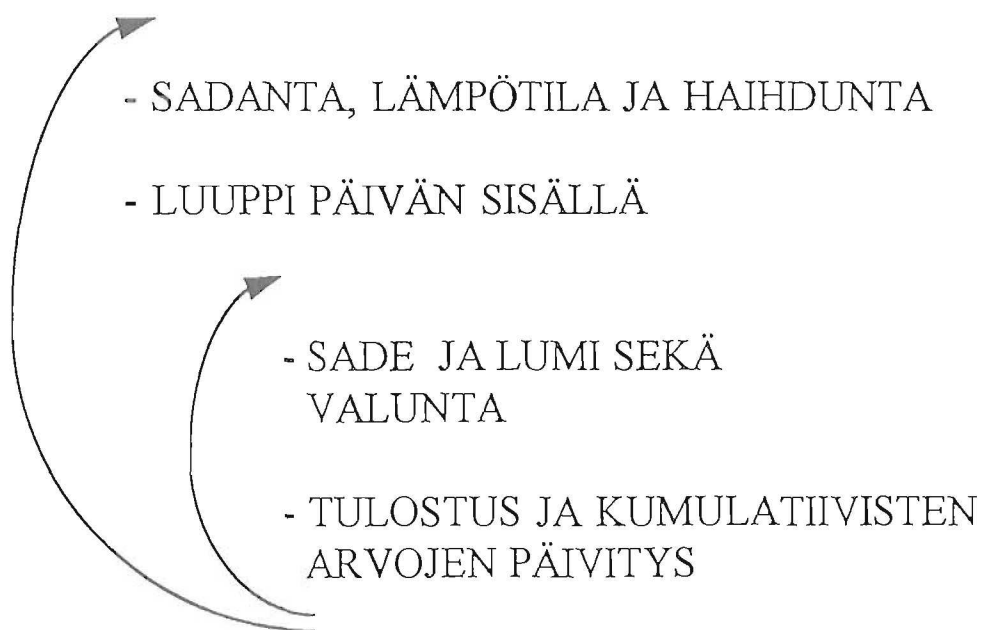
-
- SADANTA, LÄMPÖTILA JA HAIHDUNTA
 - LUUPPI PÄIVÄN SISÄLLÄ

- SADE JA LUMI
- MAAN RAKOILU
- MAAVEDEN VIRTAUS
- MAAN LÄMPÖTILA
- TULOSTUS JA KUMULATIIVISTEN ARVOJEN PÄIVITYS
- SULAMISEN JA JÄÄTYMISEN VAIKUTUS VEDEN LAATUUN
- HIILIDIOKSIDIN KULKEUTUMINEN
- HAPEN KULKEUTUMINEN
- HAPETTUMINEN JA RAPAUTUMINEN
- LIUENNEIDEN AINEIDEN KULKEUTUMINEN
- MAAVEDEN REAKTIOTASAPAINO
- SALAOJAVEDEN REAKTIOTASAPAINO
- TULOSTUS JA KUMULATIIVISTEN ARVOJEN PÄIVITYS

- LOPPUTULOSTUS

SIVU PÄÄOHJELMAN RAKENNE

- LÄHTÖ- JA TULOSTIEDOSTOJEN AVAUS
- LÄHTÖTIETOJEN LUKEMINEN
- LASKENNAN ALUSTUKSIA
- PÄIVITTÄINEN LUUPPI



- LOPPUTULOSTUS

HAPSU PÄÄOHJELMAN RAKENNE

- LÄHTÖ- JA TULOSTIEDOSTOJEN AVAUS

- LÄHTÖTIETOJEN LUKEMINEN

- LASKENNAN ALUSTUKSIA

- PÄIVITTÄINEN LUUPPI



- LÄMPÖTILA

- LUUPPI PÄIVÄN SISÄLLÄ



- VESIEN SEKOITTUMINEN JA
REAKTIOTASAPAINO

- NEUTRALOINTI

- VIIVE VEDEN VIRTAUKSESSA

- TULOSTUS JA KUMULATIIVISTEN
ARVOJEN PÄIVITYS

- LOPPUTULOSTUS

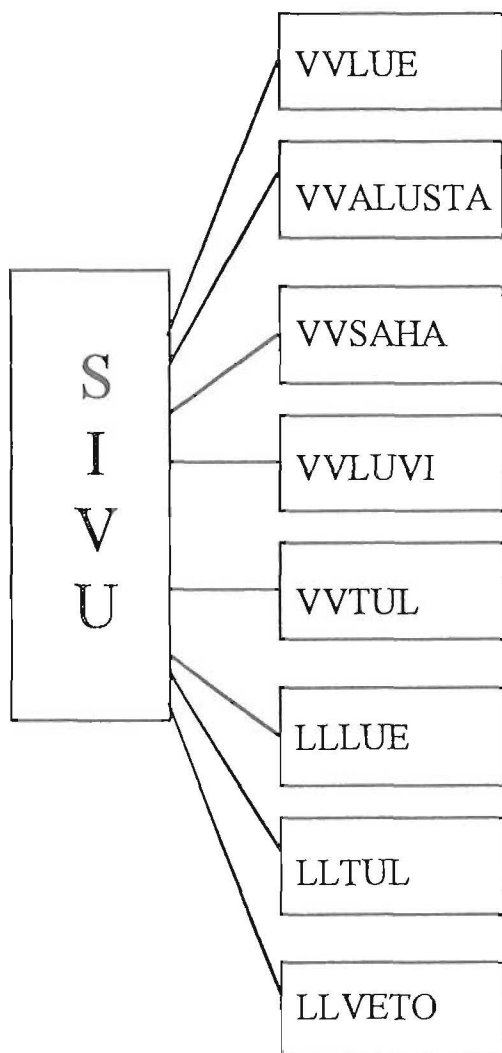
Liite F.

Ohjelman SULFA aliohjelmien kutsukaavio.

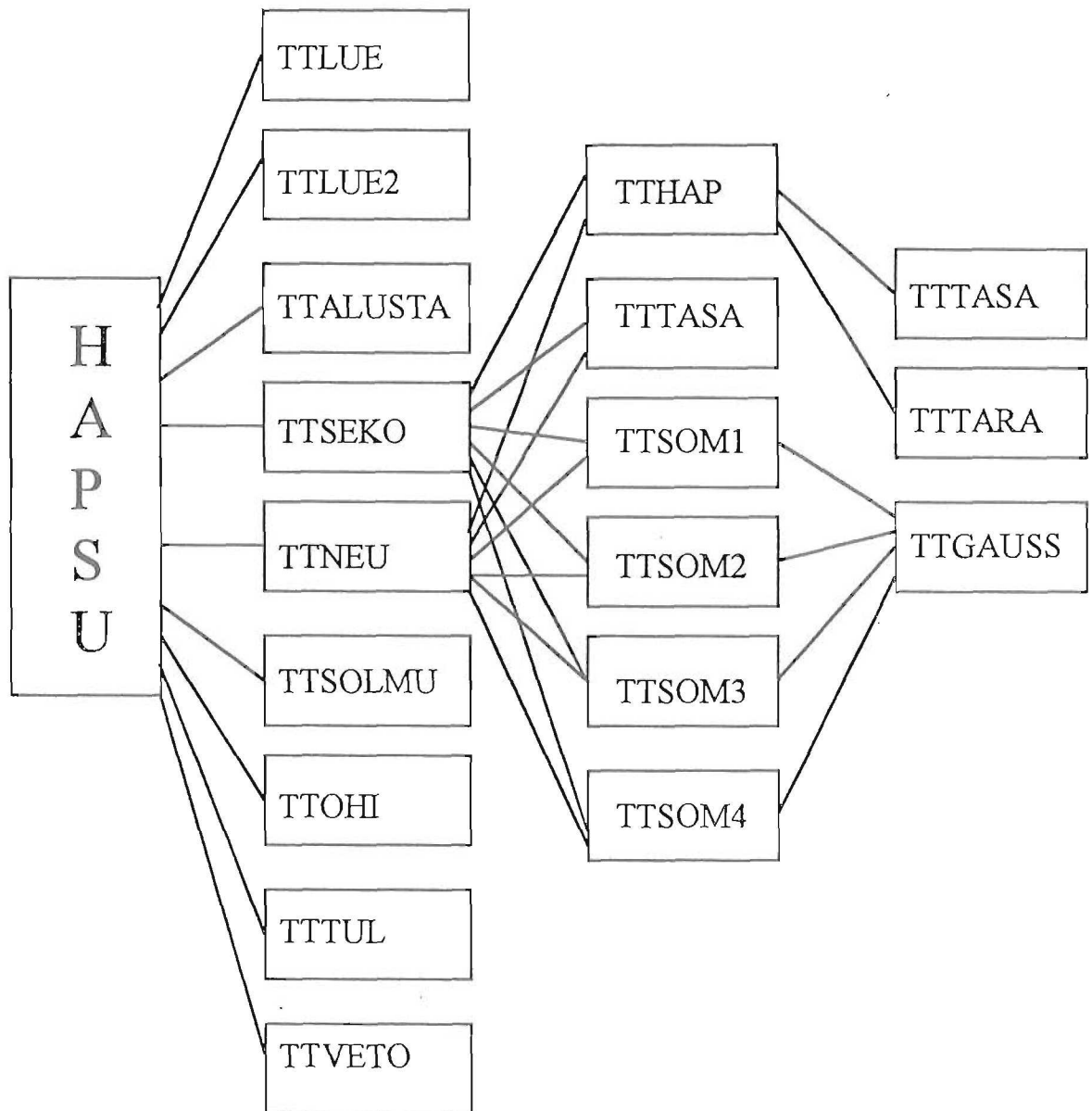
Ohjelman SIVU aliohjelmien kutsukaavio.

Ohjelman HAPSU aliohjelmien kutsukaavio.

SIVU
ALIOHJELMIEN KUTSUKAAVIO



HAPSU ALIOHJELMIEN KUTSUKAAVIO



Kuvailulehti

Julkaisija	Suomen ympäristökeskus	Julkaisu-aika Toukokuu 1996
Tekijä(t)	Reijo Hutka, Timo Laitinen, Maria Holmberg, Markku Maunula ja Titta Schultz	
Julkaisun nimi	Happamien sulfaattimaiden ionivirtausmalli (HAPSU)	
Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut		
Tiivistelmä	<p>Julkaisussa esitetään HAPSU-projektissa kehitetty happamien sulfaattimaiden ionivirtausmalli. Osassa I on esitetty mallin yleiskuvaus ja sen kalibrointi ja sovellutuslaskennat. Osassa II on mallin käyttöohjeet.</p> <p>HAPSU-malli simuloi SO_4^{2-}, H^+, Fe^{3+} ja Al^{3+}-huuhtoutumien aikakehitystä happamia sulfaattimaita sisältäviltä valuma-alueilta. Sulfaattimaille malli kuvaa lämmön, veden, hapen ja liuosten kulkeutumisen maapatsaassa. Malli sisältää varsinaisia sulfaattimaita käsittelevän osan sekä muita valuma-alueeseen sisältyviä maita käsittelevän osan. Lopulliset valuma-alueelta tulevat ainehuuhtoumat saadaan yhdistämällä osa-alueiden ainevirtaamat.</p> <p>Malli on kalibroitu Kyrönjoen vesistöalueella oleville Pajuluoman ja Haapajyrän alueille aikavälillä maaliskuusta -90 toukokuuhun -92. Pajuluoma on 1970-luvulla toteutettu pengerrysalue, kun taas Haapajyrä on yksi Suomen ympäristökeskuksen tarkkailuohjelmaan sisältyvistä pienistä valuma-alueista.</p> <p>Pitkän ajan simuloinnin perusteella maasta tulevan veden pH oli 30 vuoden kuluessa hieman laskeva. Pohjaveden padotuslaskennan perusteella padotus vähensi sulfaattimailta tulevia ainekuormia, koska hapettuminen ei päässyt tapahtumaan niin syvältä kuin luonnontilassa. Kalkituslaskennat puolestaan näyttivät, että pellon kalkitus ei suurillakaan kalkkimäärillä merkittävästi neutraloinut valumavesiä, vaan vaikutus kohdistuu lähinnä pellon pintakerrokseen. Laskelmien mukaan riittävä seosveden kalkitus sen sijaan neutraloi veden.</p>	
Asiasanat	Hapan sulfaattimaa, ainevirtaama, malli, maaprofiili, rauta, alumiini	
Julkaisusarjan nimi ja numero	Suomen ympäristö 8	
Julkaisun teema	Luonto ja luonnonvarat	
Projektihankkeen nimi ja projektinnumero		
Rahoittaja/ toimeksiantaja	Suomen ympäristökeskus	
Projektiryhmään kuuluvat organisaatiot		
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-0018-4
	Sivuja 154	Kieli Suomi
	Luottamuksellisuus Julkinen	Hinta 105 mk
Julkaisun myynti/ jakaja	Suomen ympäristökeskus, asiakaspalvelu puh. (90) 4030 0100, telefax (90) 4030 0190 ja Oy Edita Ab, julkaisumyynti puh. (90) 566 0266, telefax (90) 566 0380	
Julkaisun kustantaja	Suomen ympäristökeskus	
Painopaikka ja -aika	Oy Edita Ab, Helsinki 1996	
Muut tiedot		

Presentationsblad

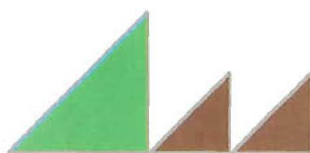
Utgivare	Finlands miljöcentral	Datum Maj 1996
Författare	Reijo Hutka, Timo Laitinen, Maria Holmberg, Markku Maunula och Titta Schultz	
Publikationens titel	Modell av jonflödet i sura sulfatjordar (HAPSU)	
Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt		
Sammandrag	<p>Publikationen presenterar en jonflödesmodell för sura sulfatjordar. Del I omfattar en allmän beskrivning av modellen, kalibreringen och några tillämpningar. Del II är bruksanvisningen.</p> <p>Modellen har utvecklats inom HAPSU-projektet för att simulera flödet av SO_4^{2-}, H^+, Fe- och Al från avrinningsområden som innefattar sura sulfatjordar. För sulfatjordarna beskriver modellen flödet av värme, vatten, syre och joner i markprofilen. Modellen behandlar skilda sura sulfatjordarna och övriga delar av avrinningsområdet. Det slutliga flödet från avrinningsområdet beräknas på basen av flödet av ämnen från de olika delområdena.</p> <p>Modellen kalibrerades med data från Pajuluoma och Haapajyrä vid Kyro älv för tiden mars -90 till maj -92. Pajuluoma har uppdämts på 1970-talet, medan Haapajyrä hör till Finlands miljöcentrals observations program.</p> <p>En simulering över 30 år gav ett sjunkande pH-värde för utlakningsvattnet. En uppdämning av grundvattnet beräknades minska utlakningen av ämnen från sulfatjordarna, eftersom marken inte oxiderades lika djupt som i naturtillstånd. Kalkningsberäkningar visade att inte ens stora kalkmängder på marken kunde neutralisera avrinningsvattnet, utan kalkningen inverkar närmast på markens ytskikt. Direkt kalkning av utlakningen neutraliserade vattnet.</p>	
Nyckelord	Sur sulfatjord, ämnesflöde, modell, markprofil, järn, aluminium	
Publikationsserie och nummer	Miljön i Finland 8	
Publikationens tema	Natur och naturtillgångar	
Projektets namn och nummer		
Finansiär/ uppdragsgivare	Finlands miljöcentral	
Organisationer i projektgruppen		
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-0018-4
	Sidantal 154	Språk Finska
	Offentlighet och andra villkor offentlig	Pris 105 mk
Beställningar/ distribution	Finlands miljöcentral, kundservice tel. (90) 4030 100, telefax (90) 4030 0190 och Edita Ab, tel (90) 566 0266, telefax (90) 566 0380	
Förläggare	Finlands miljöcentral	
Tryckeri/ tryckningsort och -år	Edita Ab, Helsingfors 1996	
Övriga uppgifter		

Documentation page

Publisher	Finnish Environment Institute	Date	May 1996
Author(s)	Reijo Hutka. Timo Laitinen. Maria Holmberg. Markku Maunula and Titta Schultz		
Title of publication	Ionic flow model for acid sulphate soils (HAPSU)		
Parts of publication/			
Abstract	<p>The publication describes the ionic flow model developed for acid sulphate soils in the HAPSU project. Part I describes the model in general and presents its calibration and application calculations. Part II gives instructions for using the model.</p> <p>The model simulates the trend of SO_4, H^+, Fe and Al leaching by time in runoff areas with acid sulphate soils. For these soils, the model describes the passage of heat, water, oxygen and liquids in the soil column. One part deals with actual sulphate soils and another with other soils in the runoff area. Totals for the substances leached from the runoff area can be obtained by combining the substance flows in the two parts.</p> <p>The model was calibrated for the Pajuluoma and Haapajyvä areas of the Kyrönjoki river system in March '90 to May '92. Pajuluoma is an area protected by embankments in the 1970s, whereas Haapajyvä is one of the small runoff areas included in the Finnish Environment Institute monitoring programme.</p> <p>In long-term simulation, the pH value of water from the soil showed a slightly downward trend over a period of 30 years. It is calculated that damming reduced the substance loads from sulphate soil because oxidation did not take place as deeply as in natural conditions. Calculations also revealed that even heavy liming fields did not significantly neutralise runoff waters, the effect being primarily limited to the surface layer of the fields. The calculations show, however, that adequate liming of the mixing water will neutralize the water.</p>		
Keywords	Acid sulphate soil, substance flow, model, soil profile, iron, aluminium		
Publication series and number	The Finnish Environment 8		
Theme of publication	Natural resources		
Project name and number, if any			
Financier/ commissioner	Finnish Environment Institute		
Project organization			
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-0018-4	
	No. of pages 154	Language Finnish	
	Restrictions official	Price 105 FMK	
For sale at/ distributor	Finnish Environment Institute, customerservice tel. + 358 0 4030 0100, telefax + 358 0 4030 0190 and Edita tel + 358 0 566 0266, telefax + 358 0 566 0380		
Financier of publication	Finnish Environment Institute		
Printing place and year	Edita, Helsinki 1996		
Other information			

SUOMEN YMPÄRISTÖ

1. Järvinen, Mika: Ympäristöystävä vai vapaamatkusta? Helsinki 1995.
2. Saukkonen, Sari & Kenttämies, Kaarle (toim.): Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE-projektin loppuraportti. Helsinki 1996.
3. Kosola, Marjaleena; Miettinen, Pauli & Laikari Hannu: Ympäristötalous - ajan-kohtaisia tutkimus- ja kehittämistehtäviä. Helsinki 1996.
4. Riihimäki, Juha; Yrjänä, Timo & van der Meer, Olli: Lyhytaikaissäädön elin-ympäristövaikutusten arviointimenetelmät. Helsinki 1996.
5. Blomster, Jaana: Ravinnekuormituksen vaikutus rantavyöhykkeen leväyhteisöihin ja vaikutusten arvioinnissa käytetyt menetelmät. Helsinki 1996.
6. Soveri, Jouko & Peltonen Kimmo: Lumen ainepitoisuudet ja talviaikainen laskeuma Suomessa vuosina 1976-1993. Helsinki 1996.
7. Britschgi, Ritva: Pohjavesien suojelun ja kiviaineshuollon yhteensovittaminen. Helsinki 1996.
8. Holmberg, Maria; Hutka, Veijo; Laitinen, Timo; Maunula, Markku & Schultz Titta: Happamien sulfaattimaiden ionivirtausten mallintaminen. Helsinki 1996.
9. Harri Hagan: Lähiökorjaamisen arkkitehtooniset vaikutukset. Helsinki 1996.
10. Kylä-Setälä, Annamajja & Assmuth, Timo: Suomen maaperän tila, kuormitus ja suojele. Helsinki 1996.
11. Hyvärinen, Pekka; Vehanen, Teppo; Tigunov, Sergei; Mäki-Petäys, Aki & Kontinen, Erja: Kalojen vaellus Inarijärvestä Paatsjokeen. Helsinki 1996.
12. Palveluasumistyöryhmä: Palveluasumistyöryhmän muistio. Helsinki 1996.
13. Lepistö, Liisa & Pietiläinen, Olli-Pekka: Lokan ja Porttipahdan tekoaltaiden ja Kemijärven kasviplankton - muutokset määrissä ja koostumuksessa. Helsinki 1996.
14. Kaukoniemi, Tapani & Tikkanen, Hannu: Kulttuurimaiseman kasvot - Nivalan Kotila. Helsinki 1996.
15. Korhonen, Pekka & Virtanen, Jukka: Aineiden kertymisen kuvaaminen matemaattisella mallilla. Helsinki 1996.
16. Ympäristöministeriö: Raideliikennemelun mittaaminen. Helsinki 1996.



LUONTO JA LUONNONVARAT

Happamien sulfaattimaiden ionivirtausmalli (HAPSU)

Happamilta sulfaattimailta voi vesistöihin kulkeutua suuria määriä alumiinia, rautaa ja sulfaattia. Tässä työssä on kehitetty työkalu, jolla voidaan arvioida maaperän laadun, ilmaston ja ihmisen toiminnan vaikutusta huuhtoumiin.

HAPSU-malli kuvaa lämmön, veden, hapen ja liuosten kulkeutumisen maapatsaassa ja simuloi alumiinin, raudan ja sulfaatin huuhtoumista happamia sulfaattimaita sisältäviltä valuma-alueilta. Mallin avulla on arvioitu pohjaveden padotuksen, maaperän kalkituksen ja seosveden kalkituksen vaikutuksia ainekuormiin.

Osassa I on esitetty mallin rakenne ja sen kalibrointi ja sovellutuslaskennat. Osassa II on mallin käyttöohjeet.

ISBN 952-11-0018-4

ISSN 1238-7312

Myynti: Suomen ympäristökeskus

Julkaisumyynti

Puh. (90) 4030 0100

Oy EDITA Ab
PL 800, 00043 EDITA, vaihde (90) 566 01
ASIAKASPALVELU
puh. (90) 566 0266, telefax (90) 566 0380
EDITA-KIRJAKAUPAT HELSINGISSÄ
Annankatu 44, puh. (90) 566 0566
Eteläesplanadi 4, puh. (90) 662 801



9 789521 100185