

Jatkuvatoiminen mittausjärjestelmä veden laadun ja ainetaseiden seurantaan

Esa Juntura

VTT Yhdyskuntatekniikka ja YVA Oy

Esa Aarnio, Kaisa Kerätär ja Olli Nenonen

Kemijoki Oy

Tero Väisänen, Mirja Savolainen ja Seppo Hellsten

VTT Yhdyskuntatekniikka

Markku Virtanen, Jorma Koponen, Arto Inkala ja Hannu Ylinen

YVA Oy



ISBN 951-38-5136-2 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5137-0 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1997

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Yhdyskuntatekniikka, Kallio- ja ympäristötekniikka, Kaitoväylä 1, PL 19042, 90571 OULU
puh. vaihde (08) 551 2111, faksi (08) 551 2090

VTT Samhällsbyggnad och infrastruktur, Berg- och miljöteknik,
Kaitoväylä 1, PB 19042, 90571 ULEÅBORG
tel. växel (08) 551 2111, fax (08) 551 2090

VTT Communities and Infrastructure, Rock and Environmental Engineering
Kaitoväylä 1, P.O.Box 19042, FIN-90571 OULU, Finland
phone internat. + 358 8 551 2111, fax + 358 8 551 2090

Kansikuva: Keskipäivän aurinko nähtynä Porttipahdan voimalaitospadoilta.

Valokuva: Tero Väisänen

Kuvankäsittely: Kalle Nuortimo ja Esa Juntura

Toimitus Leena Ukskoski

LIBELLA PAINOPALVELU OY, ESPOO 1997

Juntura, Esa, Aarnio, Esa, Kerätär, Kaisa, Nenonen, Olli, Väisänen, Tero, Savolainen, Mirja, Hellsten, Seppo, Virtanen, Markku, Koponen, Jorma, Inkala, Arto & Ylinen, Hannu. Jatkuvatoinen mittausjärjestelmä veden laadun ja ainetaseiden seurantaan [Automated water quality and nutrient mass balance monitoring system]. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1848. 45 s.

UDK 504.45:543.81:681.586:658.562

Avainsanat reservoirs, water quality, measuring instruments, automatic control equipment, detectors

Tiivistelmä

Työssä kehitettiin jatkuvatoiminen automaattinen mittausjärjestelmä veden laadun tarkkailuun. Järjestelmä koostuu veden laadun automaattiseen mittaamiseen soveltuvista antureista, vesistön veden laadun kehittymistä kuvaavista laskentasovelluksista (matemaattiset mallit) sekä käyttöliittymästä, jolla järjestelmää ohjataan. Mitatut vedenlaatutiedot tallennetaan antureilta suoraan mittauspaikan tietokoneelle, josta tiedot siirretään järjestelmän keskusyksikköön.

Laajan, kaikkiaan 32 mittausmenetelmää ja 23 mitattavaa suuretta käsittäneen kenttäkäyttöisten mittalaitteiden perusselvityksen pohjalta päädyttiin mittaamaan veden lämpötilaa, sähkönjohtokykyä, happamuutta, redox-potentiaalia, happipitoisuutta ja sameutta. Sameuden mittaamiseen hankittiin BTG MET-3010 -mittari ja muiden suureiden mittaamiseen YSI 6000 -vedenlaatumittari. Järjestelmää sovellettiin Porttipahdan voimalaitokselle, jonne mittauksia varten muotoiltiin virtauksiltaan optimoitu allas (noin 60 cm x 150 cm x 40 cm). Laskentaa sovellettiin erityisesti voimalan alapuoliseen Kitiseen noin 160 km:n matkalle (jokimalli). Lisäksi laskentaa sovellettiin voimalan yläpuoliseen tekojärveen, jotta jokimallin syöttötietojen valikoimaa saatiin laajennetuksi vähän mitattuihin liukoisiin ravinteisiin ja leväbiomassoihin.

Käyttökokemukset osoittivat Pohjois-Suomen vedet kaupallisille antureille erittäin vaativiksi soveltamiskohteiksi, sillä anturien erotuskyky ja toimintavarmuus eivät kaikissa tapauksissa olleet riittäviä. Voimalaitoksen magneettikentistä mittauksille aiheutuneet häiriöt poistettiin erityissuojauksilla. Antureita oli puhdistettava niihin kertyneestä limasta lähes kuukausittain myös talvella.

Vaativissa oloissa kehitetty, testattu ja varmistettu mittalaitteiden toiminta yhdistettynä jo paikkansa pitäväksi osoitettuihin laskelmiin antaa erinomaisen pohjan järjestelmän monipuolisiin jatkosovelluksiin myös muualle maailmaan.

Juntura, Esa, Aarnio, Esa, Kerätär, Kaisa, Nenonen, Olli, Väisänen, Tero, Savolainen, Mirja, Hellsten, Seppo, Virtanen, Markku, Koponen, Jorma, Inkala, Arto & Ylinen, Hannu. Jatkuvatoinen mittausjärjestelmä veden laadun ja ainetaseiden seurantaan [Automated water quality and nutrient mass balance monitoring system]. Espoo 1997, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1848. 45 p.

UDC 504.45:543.81:681.586:658.562

Keywords reservoirs, water quality, measuring instruments, automatic control equipment, detectors

Abstract

An automatic monitoring system has been developed for continuous monitoring of water quality along water course. The system consists of automatic gauges for measuring water quality, numerical models of the water course for developing of the water quality and user interface for systems management. The measured results are recorded to the computer of the measuring place. From this computer results are transferred to the central processing unit of the system.

Based on a survey of 32 methods for automatic monitoring of 23 quantities, YSI 6000 meter has been adopted for measurement of water temperature, conductivity, pH, redox potential and oxygen concentration. Furthermore, turbidity has been measured with BTG MET-3010 meter. Both gauges are located at a specially designed measurement box in Porttipahta hydropower station in Finnish Lapland. Modelling is applied mainly to the total phosphorus concentration in the river Kitinen downstream of the power station. In addition to correlations, the variety of possible source components (input for river model) is extended to include dissolved nutrients and algae biomasses by utilizing a numerical model of the Porttipahta reservoir upstream of the hydropower station.

The clean and cold waters of North Finland appeared to be most demanding for operation of gauges. In addition, special shelters against the magnetic field of the power station were designed and installed. Against sliming, almost monthly cleaning is recommended for the gauges.

When successfully implemented into the most demanding weather and water conditions, the unique combination of automatic measurements and modelling is ready for usage (as suitably tailored when necessary) in any water areas around the world.

Alkusanat

Jatkuvatoiminen mittausjärjestelmä veden laadun ja ainetaseiden seurantaan on kehitetty vuosina 1994 - 1996 Kemijoki Oy:n, Suomen Ympäristövaikutusten Arviointikeskus Oy:n (YVA Oy) sekä VTT Yhdyskuntatekniikan yhteistyönä. Kehitystyötä on tukenut em. yhteistyötahojen lisäksi Teknologian kehittämiskeskus TEKES. Työryhmän Kemijoelle aiemmin kehittämä KEVE-malli ja siihen liittyneet tutkimukset muodostivat työlle hyvän pohjan.

Vuosina 1994 ja 1995 määritettiin mittauksiin soveltuvat laitteet ja rakennettiin Porttipahdan voimalaitokselle mittausjärjestelmä. Vuonna 1996 järjestelmää täydennettiin ja tarkennettiin siten, että käyttöä ja toimintaa haitanneet häiriöt saatiin poistetuiksi. Mittauspisteen ulkopuolella ilmeneviä vaikutuksia ja vaihteluita määrittämään liitettiin järjestelmään YVA Oy:ssa kehitetty jokimalli, jonka avulla voidaan ennustaa mm. voimalaitoksen alapuolisen joen veden laadussa mahdollisesti tapahtuvia muutoksia. Muina kuin mitattuina suureina ilmeneviä vaikutuksia selvitettiin havaintotulosten keskinäisriippuvuuksilla ja yläpuolisen tekojärven ravintoverkkolaskelmilla. Ainetaseita ja laskentaolosuhteita määrittämään liitettiin järjestelmään Kemijoki Oy:n jatkuvasti seuraamat tiedot juoksutuksista ja säästä.

Työn etenemisestä päävastuussa ovat olleet hankeryhmän puheenjohtajana ympäristöpäällikkö Olli Nenonen Kemijoki Oy:sta 1994 - 95 sekä jäsenenä erikoistutkija Markku Virtanen YVA Oy:sta ja tutkija Tero Väisänen VTT Yhdyskuntatekniikasta. Vuonna 1996 dipl. ins. Esa Aarnio Kemijoki Oy:sta toimi hankeryhmän puheenjohtajana.

Fil. maist. Kaisa Kerätär Kemijoki Oy:sta ja tutkija Seppo Hellsten VTT Yhdyskuntatekniikasta ovat seuranneet ja tukeneet työtä asiantuntijoina. YVA Oy:sta Jorma Koponen ja Hannu Ylinen ovat muokanneet ja kehittäneet jokimallin perustaa Kitiseen sovellettavaksi, ja Arto Inkala on soveltanut ravintoverkkolaskelmia Porttipahdan tekojärvelle. Fil. maist. Esa Juntura ja dipl. ins. Mirja Savolainen VTT Yhdyskuntatekniikasta osallistuivat järjestelmän kehittämiseen ja raportointiin TEKESin tuella. Esa Juntura jatkoi työtä YVA Oy:ssa Kitisen jokimallin soveltajana ja syöttötietojen yhdistelyn ohjelmoijana.

Kirjoittajien lisäksi tekn. yo Marko Järvinen, tekn. yo Petri Jurmu ja fil. yo Heini Porra selvittivät opetusministeriön tuella aiheeseen liittyneitä erilliskysymyksiä. Teknikko Tapani Sormunen VTT Rakennustekniikasta oli projektissa mukana käytännön töiden järjestelyissä. Kemijoki Oy:sta fil. maist. Juho Päiväniemi ja Sodankylän käyttöpäivystäjät ins. Jarmo Liimataisen johdolla seurasivat laitteiston toimintaa ja huolehtivat mittauslaitteiden viikoittaisesta puhdistamisesta. Mittaustuloksia varmennettiin analysoimalla Porttipahdan velvoitetarkkailupisteen P1 vesinäytteitä

Rovaniemellä Lapin Vesitutkimus Oy:ssa sekä Oulussa VTT Yhdyskuntatekniikan vesilaboratoriossa.

Työn edetessä on työtä ja sen aihepiiriä esitelty mm. seuraavissa erilliselvyksissä:

Väisänen, T. 1994. Esiselvitys vesistötutkimuksiin liittyvistä anturi- ja analysointitekniikoista. VTT Yhdyskuntatekniikka. Julkaisematon. 9 s.

Väisänen, T., Pietiläinen, A., Miettinen, J., Virtanen, M. ja Nenonen, O. 1996. Kokemuksia limoittumisen mittauksesta Kemijoen Valajaskoskella - esitutkimus. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 330. Julkaisematon/luottamuksellinen. 13 s. + 9 liitettä. Summary in English.

Savolainen, M., Inkala, A., Juntura, E., Koponen, J., Ylinen, H. ja Virtanen, M. 1997. Vesistöjen virtausten ja veden laadun laskennan tausta ja valmiudet Suomessa ulkomaihin verrattuina sekä veden laadun automaattiseen mittaamiseen liittyvä soveltaminen Porttipahdan tekojärvelle ja Kitiseen. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 380, Espoo, 25 s. Julkaisematon.

Väisänen, T., Juntura, E. ja Savolainen, M. 1996. Automaattinen klorofyllimittaus Porttipahdan tekojärvellä kesällä 1995. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 381. Julkaisematon.

Jurmu, P., Savolainen, M. ja Väisänen, T. 1996. Sumean logiikan ja neurolaskennan käyttömahdollisuudet vesistömittausten ohjauksessa - kirjallisuusselvitys. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 382. Julkaisematon.

Järvinen, M., Porra, H., Savolainen, M. ja Väisänen, T. 1996. VMM-tietokanta ja sen päivitys 1995. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 383. Julkaisematon.

Jurmu, P., Savolainen, M. ja Väisänen, T. 1996. Veden värin merkitys ja jatkuvatoimiset mittausmahdollisuudet vesistömittauksissa. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 384. Julkaisematon.

Rintala, J. ja Örn, P. 1996. Jokiuomien poikkipintojen pelkistetty luonnehtiminen. Oulun yliopisto, Fysiikkaalisten tieteiden laitos, Biofysiikka, Projektityö. 20 s.

Juntura, E., Virtanen, M. and Väisänen, T. (1996): ARMS - Automatic River quality Monitoring System. The Ecological Basis for Lake and Reservoir Management. Int. Symp. on Lake and Reservoir Management, National Rivers Authority NRA, Broads Authority and University of Leicester, Leicester, March 19 - 22. Poster presentation. 6 s.

Inkala, A., Koponen, J., Keränen, M. and Virtanen, M. (1996): Food web modelling of plankton group and nutrient cycles with bacteria and 3D hydrodynamics. The Ecological Basis for Lake and Reservoir Management. Int. Symp. on Lake and Reservoir Management, National Rivers Authority NRA, Broads Authority and University of Leicester, Leicester, March 19 - 22. Poster presentation, computer demonstrations, abstract and introduction. 18 s.

Käsillä olevaan VTT Tiedotteita -sarjaan kuuluvaan raporttiin on koottu projektin keskeisimmät tulokset. Mittausjärjestelmän yksityiskohtaiset käyttöohjeet on koottu kansioon, jonka välilehdet jakavat kolmeen pääosaan:

Juntura, E. & Savolainen, M. (toim.) 1996. Jokimittari-järjestelmän käsikirja. VTT Yhdyskuntatekniikka. Oulu. 44 s.

Juntura, E. & Savolainen, M. (toim.) 1996. YSI 6000 -vedenlaatumittarin pikaohjeet. VTT Yhdyskuntatekniikka. 21 s.

Juntura E. & Savolainen, M. (toim.) 1996. BTG MET-3010 -sameusmittarin pikaohjeet. VTT Yhdyskuntatekniikka. 12 s.

Kiitämme kaikkia tutkimukseen osallistuneita ja myötävaikuttaneita tahoja.

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
1. Johdanto	9
1.1 Taustaa	9
1.2 Automaattinen jatkuvatoiminen veden laadun mittaaminen	10
1.3 Veden laadun ja virtausten laskentaperusteet	11
1.4 Ainesmääriä vedestä kuluttavia vuorovaikutuksia	14
1.5 Jokisovelluksen erityispiirteitä	16
1.6 Työn tavoitteet	18
1.7 Työn eteneminen	18
2. Mitattavien suureiden valikoima ja valinnat	21
2.1 Vesistövaikutusten suoria mittausmahdollisuuksia	21
2.2 Vesistö- ja velvoitetarkkailuihin yleisesti kuuluvat suureet	23
2.3 Mitattavien suureiden valinta	23
3. Mittausjärjestelmä	25
3.1 Järjestelmän kuvaus	25
3.2 Ohjelmistot	26
3.3 Järjestelmän ylläpito	26
4. Laskentamahdollisuuksien täydentäminen	27
4.1 Mitattavien suureiden yhteydet velvoitetarkkailun muuttujiin	27
4.2 Tekojärven ravinnemalli syöttötietojen täydentäjänä	29
5. Jokilaskelmien kehittäminen ja soveltaminen	33
5.1 Laskentamallin muokkaus jokiin soveltuvaksi	33
5.2 Yhdistäminen mittauksiin ja soveltaminen Kitiseen	34
6. Tuote ja sen toiminnan varmentaminen	35
6.1 Mittausten luotettavuus	35
6.2 Malliajojen luotettavuus	38
7. Yhteenveto ja johtopäätökset	40
7.1 Yhteenveto	40
7.2 Johtopäätökset	40
Lähdeluettelo	42

1. Johdanto

1.1 Taustaa

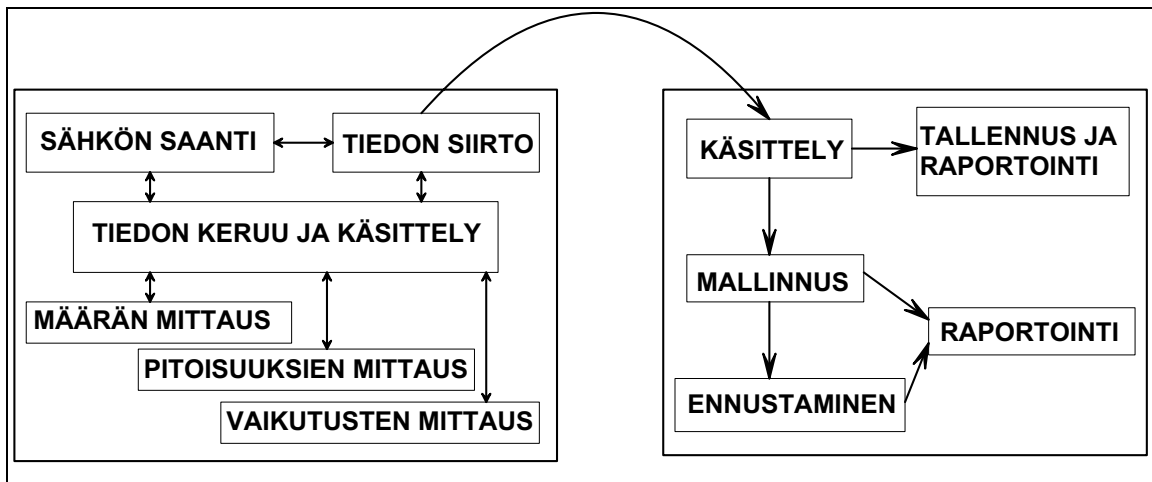
Sähköverkkoon on jatkuvasti syötettävä kulutusta vastaava määrä sähköä, koska sähköä ei etenkään vaihtovirtana varastoida suuria määriä. Vesivoimalla tuotettua sähköä käytetään tasaamaan sähkön tuotanto kulutusta vastaavaksi. Säättötehoa voidaan vesivoimalla tuottaa 2 000 MW (Energiatilastot 1993). Energiapoliittisesti epävarmoina aikoina vesivoimatuotannon säätömahdollisuuden merkitys korostuu.

Suomen vesivoimalaitoksilla tuotetaan vuosittain sähköä lähes 13 TWh (= 1 500 megawattivuotta, MW_v) mikä on noin 20 % sähkön kokonaiskulutuksesta (Energiatilastot 1993). Vesivoimalla tuotetusta sähköstä yli 30 % (4 - 4,5 Twh eli 460 - 510 MW_v) tuotetaan Kemijoen vesistön voimalaitoksilla. Tällä hetkellä Kemijoen vesistössä on kaikkiaan 18 voimalaitosta. Näistä 13 on Kemijoki Oy:n omistuksessa. Voimalaitoksia on myös Rovakaira Oy:lla, Iijoen Voima Oy:lla ja Koillis-Lapin Sähkö Oy:lla (Kemijoki Oy:n vuosikertomus 1996). Lisäksi Kemijoki Oy:n rakenteilla tai suunnitteilla olevia voimalaitoshankkeita ovat Kitisen Matarakoski, Vuotos (tekojärven yhteyteen), Kelukoski ja Sierilä.

Vuosina 1988 - 92 toteutettiin Kemijoki Oy:n rahoittamana laaja tekojärvitutkimus, jossa Kemijoki Oy:n, Suomen Ympäristövaikutusten Arviointikeskuksen (YVA Oy) ja VTT:n Rakennuslaboratorion yhteistyönä laadittiin tekojärvien vedenlaatumalli (KEVE-malli). Mallin avulla on ennakoitu erityisesti Vuotokseen suunnitellun tekoaltaan vaikutuksia ja selvitelty mahdollisuuksia vaikutusten lieventämiseen (Virtanen ym. 1993). Tutkimuksessa tulivat selkeästi esiin sekä rakennetun että luonnontilaisen jokivesistön veden laadun erittäin nopeat vaihtelut; erityisesti eloperäisestä aineksesta riippuvat muuttujat (fosfori, väri) ja happipitoisuus (altaasta ulostuleva vesi) vaihtelivat nopeasti. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin se, että veden alle jäänyt maaperä vaikuttaa merkittäväällä tavalla altaan veden laatuun erityisesti allastuksen ensimmäisten vuosien aikana. Tutkimuksessa huomattiin myös se, että voimalaitosten rakenteelliset ominaisuudet vaikuttavat alapuolisen vesistön vedenlaatuun. Porttipahdan voimalaitoksen valmistumisen myötä tehty muutos veden juoksuasteossa lisäsi välittömästi kuormitusta alapuolisessa vesistössä; ilmiö näkyi erityisesti ainetaselaskelmissa (Virtanen ym. 1993).

1.2 Automaattinen jatkuvatoiminen veden laadun mittaaminen

Automaattinen, jatkuvatoiminen vesistömittaus koostuu anturi- ja analysaattorilaitteista sekä tiedonkeruu-, siirto- ja hallintalaitteistoista. Liittämällä automaattiseen mittausjärjestelmään mallit ja esitystekniikat saadaan luonnonilmiöiden seuraamiseen ja ennakkointiin soveltuva apuväline (kuva 1). Järjestelmällä voidaan tulevaisuudessa ainakin osittain täydentää nykyistä vesinäytteiden ottoon ja analysointiin perustuvaa tarkkailukäytäntöä. Tarkkailu tulisi olemaan nykyistä yksinkertaisempaa ja tulokset olisivat heti mittausten jälkeen käytettävissä.



Kuva 1. Automaattinen veden laadun seurantajärjestelmä.

Suomessa yksittäisten kenttäkäyttöisten automaattisten mittalaitteiden määrä ja saatavuus on kasvanut ja hintataso laskenut Keski-Euroopassa ja Yhdysvalloissa tapahtuneen laitekehittelyn myötä (taulukko 1) (Väisänen 1994 sekä Järvinen ym. 1996). Lisäksi nykyisen tekniikan avulla voidaan ratkaista 1970- ja 1980-luvuilla vesistömittausten automatisoinnin suurimpana esteenä olleet tiedonsiirto ja -tallennusongelmat (esimerkiksi Kohonen 1985, Peura ym. 1994).

Taulukko 1. Kenttäkäyttöiset vedenlaadun mittausmenetelmät, niiden soveltuvuusalueet, käyttökokemukset Suomessa tätä ennen ja tässä työssä sekä menetelmien saatavuus.

Mitattava suure	Menetelmä	Suosittelava käyttökohde	Käyttökokemukset Suomessa	Käyttökokemukset tässä proj.	Kaupallinen saatavuus
A-klorofylli	fluorometri	N	X	X	X
BOD(/)	respirometri	R,N	X		
Bakteerimäärä	fluorosenssi	R, N			
Levät	fluorosenssi	R, N			
Bioanturit	elävän org. reaktiot	(R), N		X	(X)
Happipitoisuus	automaattititraattorit	R, N			X
	puoliläp. kalvo anturit	R,N	X	X	X
	Rapid pulse electrode	R ¹⁾ ,N	X	X	X
pH	potentiometrinen	R,N	X	X	X
Redox-potentiaali	potentiometrinen	R,N	X	X	X
Lämpötila	esim. PT 100	R,N	X	X	X
Vedenkorkeus	paineanturi	R,N	X		X
	ultraäänianturi	R,N	X		X
Syvyys	paineanturi	R,N	X		X
Sähkönjohtavuus	Johtokykykammio	R,N	X	X	X
Saliniteetti	Johtokykykammio	R,N	X	X	X
Sameus	optiset anturit	R,N	X	X	X
Kiintoainepitoisuus	optiset anturit	R,N	X		X
	säteilyanturit	R	X		X
	tiheysanturit	R	X		X
Sulfaatti	ioniselektiivinen anturi	R,N	X		X
	analysaattori/fotometri	R,N			X
Nitraatti/Nitriitti	ioniselektiivinen anturi	R,N	X		X
	analysaattori/fotometri	R,N			X
Ammonium	ioniselektiivinen anturi	R,N	X		X
	analysaattori/fotometri	R,N			X
Kloraatti	analysaattori/ionisel.	R,N			X
Metalli-ionit	ioniselektiivinen anturi	R,N	X		X
	analysaattori/krom.gra	R,N			X
Fosfaatti	analysaattori/fotometri	R,N			X
Veden väri	optinen analysaattori	R,N		X	X
Rauta	analysaattori/fotometri	R,N	X		X

R = rakennetun ympäristön jätevedet ja teollisuusvedet, N = luonnonympäristön joki-, järvi- ja meri-vedet, R¹⁾ = vain jätevesille, ei sovellu teollisuusvesille

1.3 Veden laadun ja virtausten laskentaperusteet

Vesistöissä kulkeutuvien pitoisuuksien ja veden ominaisuuksien muutoksia on mallinnettu 1970-luvulta lähtien kytkemällä virtausten ja veden laadun laskenta toisiinsa. Nykyiset tietokonesovellutukset mahdollistavat tulosten havainnollisen esittämisen.

Tekojärvien ja niiden alapuolisten jokien veden laadun kehitys määräytyy kaikille vesialueille yhteisistä perusrippuvuuksista ja tekijöistä. Alueittain ja vesistötyypeittäin eri tekijöiden merkitys voi vaihdella huomattavasti. Yleisesti pitoisuusmuutokset määräytyvät

- eri tahoilta, erityyppisistä lähteistä vapautuvista kuormituksista,
- vapautuvien kuormitusten kulkeutumisesta vesistön virtausten mukana
- vapautuvien kuormitusten sekoittumisesta pyörteiden, nopeuserojen ja molekyyli-värähtelyjen vaikutuksesta sekä
- moninaisista biologisista, geologisista, kemiallisista ja muista vastaavista vuorovaikutuksista, jotka veden laadun ilmentämiseen käytetystä muuttujasta riippuen voivat kehittyä omia aikojaan (muista muuttujista riippumatta ajan ja olosuhteiden mukana) taikka vuorovaikutuksessa muiden muuttujien ja veden rajapintojen kanssa.

Näistä yhdistettyinä saadaan pitoisuusmuutosten laskemiseksi lauseke

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial qL}{\partial n} - u^s \frac{\partial c}{\partial x} - v^s \frac{\partial c}{\partial y} - w^s \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial c}{\partial z}) + R(T, c, \dots), \quad (1)$$

- kun c on kyseisen ominaisuuden väkevyys, esim. pitoisuus (mg/l), lämpötila ($^{\circ}\text{C}$), sähkönjohtavuus (mS/m), sameus (FTU), radioaktiivisuus (Bq/m³), BHK (mg O₂/l), veden väri (mg Pt/l), KHT (mg O₂/l) jne.
- qL veteen vapautuvat päästöt eli ominaiskuormitukset, joista alaindekseillä voidaan erottaa toisistaan jokien (R), lähivaluma-alueen (D), pohjan (B), ilmalaskeuman (A) ja pistelähteiden (P) vaikutukset (tn/km²/vrk eli g/m²/vrk silloin, kun tarkasteltavana muuttujana on pitoisuus, jonka yksikkönä on mg/l eli g/m³)
- n päästöä vastaan kohtisuoran suunnan pituusmitta (m)
- u^s, v^s, w^s x-, y- ja z-suuntaiset kulkeutumismopeudet (m/s)
- D_x, D_y, D_z x-, y- ja z-suuntaiset sekoittumiskertoimet (m²/s)
- $R(T, c, \dots)$ muista syistä - ns. biogeokemiallisten vuorovaikutusten, kehityksen ja ominaisuuksien tuloksina - aiheutuvat väkevyysmuutokset (mg/l/vrk eli g/m³/vrk silloin, kun tarkasteltavana muuttujana on pitoisuus, jonka yksikkönä on mg/l).

Veden ominaisuuksien kulkeutumiseen vaikuttavat nopeudet u^S , v^S , w^S aika- ja paikkavaihteluineen saadaan kattavasti selville vain laskemalla. Vaakataso virtausnopeuksien u ja v muutoksiin vaikuttavat luonnossa

- paine-erot (ilmanpaineen, pinnan korkeuden ja veden tiheuserojen määrääminä),
- sekoittuminen pyörteiden, nopeuserojen ja molekyylivärähtelyjen vaikutuksesta virtausnopeuden suuntaan, sitä vastaan vaakatasossa poikittain sekä pystysuuntaan
- maan pyörimisliikkeestä ns. Coriolis-voimana aiheutuva kiertyminen sekä
- nopeuserojen kulkeutuminen virtausten mukana (pitoisuuserojen tavoin) virtausnopeuden suuntaan, sitä vastaan vaakatasossa poikittain ja pystysuuntaan.

Pystysuunnan virtausnopeuksiin w vaikuttaa edellisten lisäksi maan vetovoima kiihdyttävyydellä g . Sen rinnalla muut tekijät paitsi paine-ero osoittautuvat merkityksettömiksi. Kun tämä otetaan huomioon, kutistuu pystysuunnan liikeyhtälö ns. hydrostaattisen (eli seisovan veden) paineen lausekkeeksi. Virtausmuutosten laskemiseksi saadaan (vaakataso termit edellä esitettyssä järjestyksessä pitäen)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} / \rho_0 + \frac{\partial}{\partial x} (K_l \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_s \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial u}{\partial z}) + fv - u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} / \rho_0 + \frac{\partial}{\partial x} (K_s \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_l \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial v}{\partial z}) - fu - u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3)$$

$$p = p_a + g \cdot (\eta - z) \cdot \rho_0 + g \int_z^\eta (\rho - \rho_o) dz. \quad (4)$$

Yhtälöissä	t	on aika (s)
	x ja y	vaakataso paikkakoordinaatit toisiaan vastaan kohtisuoriin suuntiin (m) x kasvaa y :stä oikealle (myötäpäivään)
	z	pystysuunnan sijainti ylöspäin kasvavana (m)
	u ja v	vaakataso virtausnopeudet x :n ja y :n suuntaan (cm/s)
	w	pystysuunnan virtausnopeus ylöspäin ($\mu\text{m/s}$)
	η	veden pinnan korkeus (m)
	h	veden syvyys pinnasta pohjaan (m)
	p, p_a	paine vedessä ja ilmanpaine pinnalla (N/m^2)
	ρ, ρ_o	veden tiheys ja sen keskiarvo (kg/m^3)
	K_l, K_s, K_v	pitkittäinen, poikittainen ja pystysuuntainen liikemäärän sekoittumiskerroin (m^2/s)
	$f = 2 \Omega \sin\phi$,	ns. coriolis-kerroin (1/s)
	Ω	maan pyörimisnopeus (1/s)
	ϕ	maantieteellinen leveys päiväntasaajalta pohjoiseen (asteina $^\circ$)
	g	putoamiskiihtyvyyys (m/s^2).

Koska lisäksi vettä ei synny tyhjästä, ei katoa olemattomiin, eikä mainittavasti puristu kokoon eikä sen sisään synny aukkoja, voivat vesimäärät muuttua vain reunojen läpi virtaamalla. Tämä kytkee eri ulottuvuuksien virtausnopeuserot toisiinsa ns. jatkuvuusyhtälöllä

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

1.4 Ainesmääriä vedestä kuluttavia vuorovaikutuksia

Pitoisuusmuutoksiin päästöjen, kulkeutumisen ja sekoittumisen ohella vaikuttavista biogeokemiallisista vuorovaikutuksista $R(c,T,\dots)$ tavallisimpia ovat vajoaminen (vedessä tasolta toiselle), pidättäminen altaan tai uoman pohjalle (sedimentoituminen), kuluminen, väheneminen ja vaikutuksen heikkeneminen ajan mukana (vedessä, osin muihinkin muuttujiin vaikuttaen) sekä ilmastuminen ja pohjasedimentin hapenkulutus esimerkkeinä vuorovaikutuksista pinnan, pohjan, kasvillisuuden ja muiden rajapintojen kanssa. Kuvaustapoina näille yhteyksille on yleensä käytetty seuraavia lausekkeitä:

väheneemiselle, kulumiselle ja vaikutuksen heikkenemiselle

$$R_d(c) = -k_c \cdot c - \delta_c \cdot c^2, \quad (6)$$

vajoamiselle vedessä vesikerroksesta toiseen

$$R_s(c) = -(w_c + \sigma_c \cdot c) \cdot \partial c / \partial z, \quad (7)$$

vajoamiselle alimmasta vesikerroksesta veden pohjalle

$$R_b(c) = -w_{cb} \cdot c / H_b - \sigma_{cb} \cdot c^2 / H_b, \quad (8)$$

hapen ilmastumiselle pintakerroksessa avoveden aikana

$$R_a(O_2) = w_a \cdot (O_{sat} - O_2) / H_u, \quad (9)$$

lausekkeen (9) ilmastuskertoimelle

$$w_a = w_{ao} + \sqrt{(w_{av} \cdot W)}, \quad (10)$$

hapen kulumiselle veden biologisen hapenkulutuskyvyn, BHK:n vaikutuksesta

$$R_i(O_2) = -k_{bhk} \cdot BHK_7 \cdot Brat \quad (11)$$

sekä hapen kulumiselle alimmasta vesikerroksesta pohjan ainesten ja pieneliöiden vaikutuksesta

$$R_{ib}(O_2) = -SHK / H_b \quad (12)$$

Kertoimista ja muista suureista

k_c	ominaisuuden c (lineaarinen) vähenemiskerroin (1/vrk)
δ_c	ominaisuuden c neliöllinen vähenemiskerroin (1/vrk/(mg/l))
w_c	ominaisuuden c (lineaarinen) vajoamisnopeus (m/vrk) vedessä
σ_c	ominaisuuden c neliöllinen vajoamiskerroin (m/vrk/(mg/l)) vedessä
$w_c b$	ominaisuuden c (lineaarinen) sedimentaationopeus (m/vrk) vedestä pohjaan
$\sigma_c b$	ominaisuuden c neliöllinen sedimentoitumiskerroin (m/vrk/(mg/l)) vedestä pohjaan
c	tarkasteltavana olevan ominaisuuden väkevyys (jonka yksiköksi neliöllisten kertoimien laadun luonnehdintaan on otettu mg/l)
O_2	liuennan hapen pitoisuus vedessä (mg/l)
O_{sat}	liuennan hapen kyllästyspitoisuus, väkevin mahdollinen enimmäispitoisuus vedessä (mg/l)
BHK_7	veden biologinen hapenkulutus 7 vrk:ssa (mg O ₂ /l)
$Brat$	veden kokonais-BHK:n ja BHK ₇ :n suhde (> 1)
SHK	sedimentin hapenkulutus (g/m ² /vrk)
w_a	ilmastumisnopeus (m/vrk)
$w_{a o}$	ilmastumisnopeus tyynellä säällä (m/vrk)
$w_{a w}$	ilmastumislisäyksen neliön suhde tuulen nopeuteen (m/vrk)
H_b	alimman vesikerroksen paksuus (m)
H_u	veden pintakerroksen paksuus (m).

Vaikutusten voimakkuus ja vaikutusnopeudet (kertoimien lukuarvot) voivat (lausekkeiden sisällä) riippua mm. lämpötilasta, valaistuksesta, eri pitoisuuksista, happamuudesta, suolaisuudesta, jääpeitteestä, pohjan laadusta ja monista muista tekijöistä. Näitä samoin kuin erityisesti pohjalta vapautuvan sisäisen kuormituksen ja tarkastelualueen muiden reunaehtojen laskentaperusteita ja -tapoja sekä kulkeutumisen ja virtausnopeuksien välisiä yhteyksiä on tarkemmin käsitelty vuosien 1988 - 92 tekojärvi-laskelmien ns. KEVE-projektin loppuraportissa (Virtanen ym. 1993).

KEVE-projektin jälkeen on laskentaperusteiden ja menetelmien kehitys keskittynyt ravintoverkoston (kasvi- ja eläinplanktonin eri ryhmien ja bakteerien sekä ravinteiden eri esiintymismuotojen keskinäisten vuorovaikutusten) tarkastelun syventämiseen järvi-, meri- ja rannikkoalueilla sekä tekojärvissä ja jokivesistöissä.

1.5 Jokisovelluksen erityispiirteitä

Uoman pohjan kaltevuus tulee varsinaisesti vastaan, kun lausek(k)e(et) (2) (ja (5)) integroidaan syvyyden (ja mahdollisesti leveydenkin) yli vedenkorkeuden z_s , pinnankaltevuuden $d(z_s)/dx$ ja (pitkittäis)virtaamien Q_x välisten yhteyksien ratkaisemiseksi. Vesisyvyydeksi H , jonka paksuudelle pohjan ja pinnan kitkavaikutuksista aiheutuneiden leikkausjännitysten erotus jakautuu, tulee tällöin pinnan z_s ja uoman pohjan z_b korkeuksien erotus

$$H = z_s - z_b. \quad (13)$$

Laajojen vesialueiden sovelluksissa pinnankallistuksen vaikutus vesisyvyyksiin on valtaosin jätetty huomiotta, kun kiinteältä tasolta (vähintään säännöstelyn ylärajalta) mitatut kunkin kohdan syvyudet H on annettu suoraan lähtötietoina.

Jokiuomien poikkipinta-ala A muuttuu vedenkorkeuden z_s mukana uoman poikkileikkausmuodosta $B(z)$ riippuen. Poikkipinnan pääpiirteitä on pyritty kuvaamaan kaksi- tai kolmijakoisella lausekkeella

$$\begin{aligned} B(z) &= 0 && \text{kun } z < z_b \\ &= B_b + c_1 \cdot (z - z_b) && \text{kun } z_b \leq z \leq z_1 \\ &= B_b + c_1 \cdot (z_1 - z_b) + c_2 \cdot (z - z_1) && \text{kun } z_1 < z, \end{aligned} \quad (14)$$

jossa siis uoman leveys $B(z)$ kasvaa pohjan leveydestä B_b kaltevuudella c_1 vedenkorkeudelle z_1 asti ja siitä ylöspäin kaltevuudella c_2 . Poikkipinnoiksi $A(z)$ saadaan vastaavasti

$$\begin{aligned} A(z) &= 0 && \text{kun } z < z_b \\ &= (2 \cdot B_b + c_1 \cdot (z - z_b)) \cdot (z - z_b)/2 && \text{kun } z_b \leq z \leq z_1 \\ &= A(z_1) + (2 \cdot B(z_1) + c_2 \cdot (z - z_1)) \cdot (z - z_1)/2 && \text{kun } z_1 < z. \end{aligned} \quad (15)$$

Kääntäen tästä käy ilmi myös kutakin poikkipintaa vastaava vedenkorkeus.

Joen kunkin kohdan keski(määräiseksi virtaus)nopeudeksi U saadaan kyseisen kohdan virtaama Q_x jaettuna poikkipinta-alalla:

$$U(x) = Q_x(x)/A(x, z_s(x)). \quad (16)$$

Leikkausjännityksistä korostuu pohjakitkan vaikutus, jonka rinnalla esim. tuulen vaikutus veden pintaan jää jokuomissa toissijaiseksi. Paine-eroista (4) jokuomissa korostuu pinnan kaltevuuden vaikutus ($\rho \cdot g \cdot z_s$). Kun ilmanpaineen ja veden tiheyserojen vaikutus (sekä liikemäärän pituussuuntainen sekoittuminen) jätetään tämän rinnalla huomiotta, saadaan lausekkeista (2) ja (5) poikkipinnan yli integroituina

$$\partial U / \partial t = -g \partial(z_s) / \partial x - U \partial U / \partial x - r(U) \cdot U / H \quad (17)$$

ja

$$\partial A / \partial t = -\partial(A \cdot U) / \partial x, \quad (18)$$

missä $r(U)$ on virtausnopeudesta esim. suoraviivaisesti pohjan vastuskertoimella C_b riippuva pohjakitka

$$r(U) = C_b \cdot U. \quad (19)$$

Pohjimmiltaan voisi kitkavaikutuksista ottaa huomioon pelkän pohjan (oik. sen vaakaprojektion leveyskeskiarvon) lisäksi myös sivuseinämien vaikutuksen. Tällöin lausekkeeseen (17) tulisi syvyyden H sijasta ns. hydraulinen säde H_r , ts. poikkipinta-ala jaettuna märkäpiirillä eli veden alla olevien seinämien ja pohjan yhteismitalla. Myös riippuvuudeksi virtausnopeudesta on tarjolla yhteydestä (19) poikkeavia lausekkeita. Vakiintuneimpia kitkalausekkeita on ns. Manningin kaava

$$r(U)/H = n \cdot g \cdot U / H_r^{4/3} \quad (20)$$

jonka karheuskertoimista n ($m^{-1/3}/s$) erilaisille kanaville ja uoma-aineksille on olemassa paljon kokemusperäistä tietoa (Malve 1992, Chow 1973). Luonnonuomiin sovellettuina kitkalausekkeet tuskin kuitenkaan ovat tarkennustarpeista ensimmäisiä, kun sovellusten ilmeisin epätarkkuus liittyy ennen kaikkea poikkipinnan likimääräisarvioihin (14) ja (15).

1.6 Työn tavoitteet

Säännöstelyn, jätevesipäästöjen ja vesirakentamisen lupaehtoihin kuuluu lähes poikkeuksetta velvoite seurata toiminnan vaikutuksia vedenlaatuun. Lähinnä laskelmin voidaan paljolti ennalta selvittää, miten mikin toimenpide on vaikuttava veden laatuun ja virtauksiin. Mittaamalla saadaan puolestaan selville mittauspisteeseen vaikuttaneiden kaikkien toimenpiteiden ja olosuhteiden yhteisvaikutuksia. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kehittää erityisesti jokien vesistöseurantaa nykyistä kattavammaksi. Tähän tähdättiin mittaumahdollisuuksia kehittämällä sekä mittausten ja laskelmien erisuuntaisia vahvuuksia yhdistelemällä.

Nykyisin jokivesistöjen veden laatua seurataan joesta määräjain (yleensä 2 - 12 kertaa vuodessa) otetuilla näytteillä, joista laboratorioissa sitten mitataan seurattaviksi sovitut ominaisuuksia. Tältä osin työssä pyrittiin tiivistämään tietojen saantia jatkuvammaksi käyttämällä hyväksi automaattista mittaustekniikkaa sekä numeerisia malleja jatkuvasti kootuilla sää-, juoksutus- ja lähtöpitoisuustiedoilla ohjattuina.

Järjestelmän ensimmäiseksi kehitys-, soveltamis- ja testauspaikaksi valittiin Porttipahdan voimalaitos, josta juoksutuksia säädellään, veden laatua ja säätietoja mitataan ja jonka alapuolelle Kitiseen jokilaskentaa sovelletaan. Kemijoen vesistöalueen järvisyys on pieni (3,8 %) ja virtaamavaihtelut sen myötä suuria. Keskivirtaama jokisuulla on $556 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Veden laatu on yleensä hyvä; tekoaltaiden vaikutus näkyy lähinnä kuormituksen siirtymisenä juoksutusten mukana kevään tulva-ajasta keskitalvelle. Sovelluksella voidaan vesivoiman ympäristövaikutusten seurannan tarkentamisen ja helpottamisen lisäksi tukea vesivoiman ja sen käytön suunnittelua ja valvontaa.

1.7 Työn eteneminen

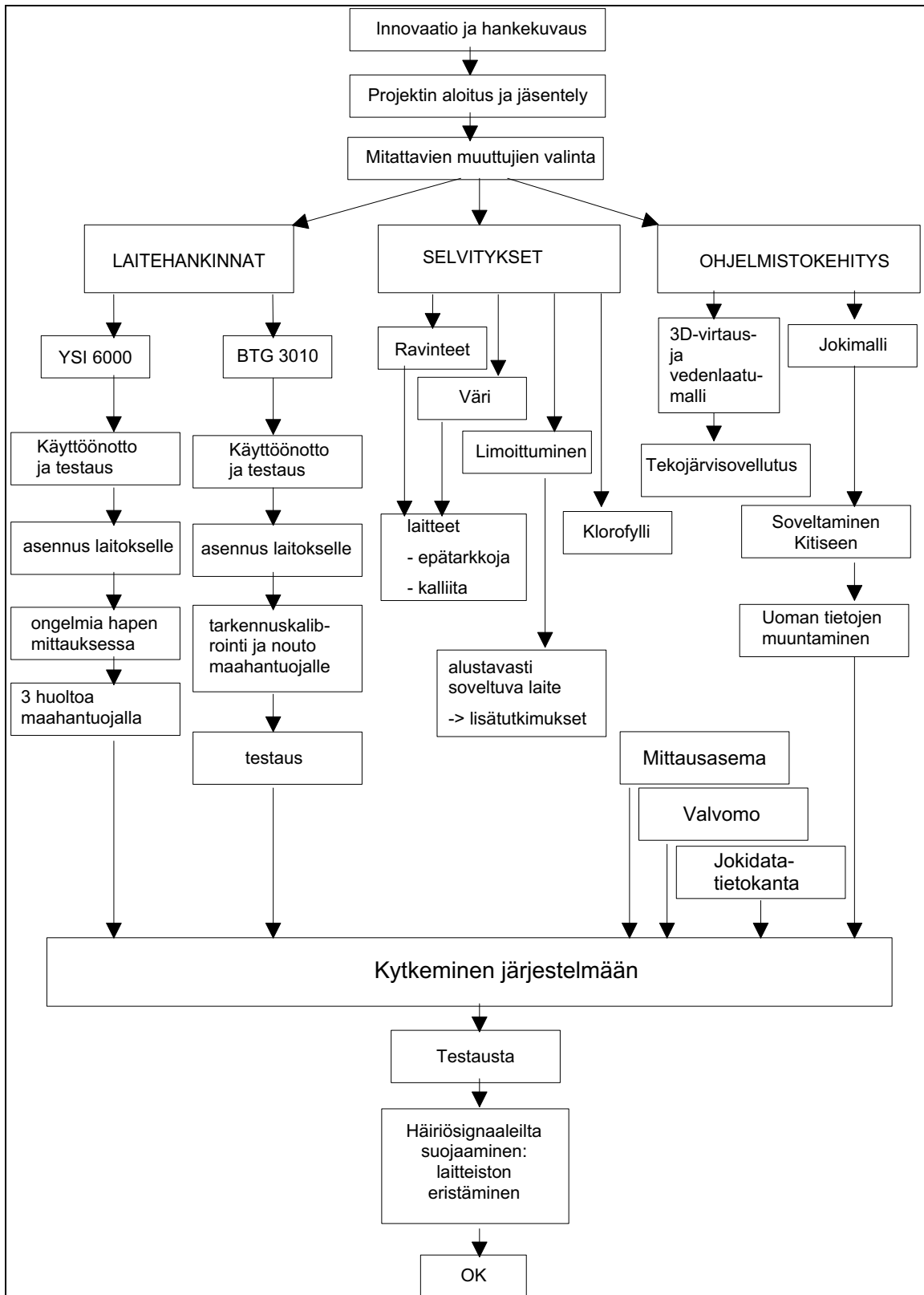
Työ oli alun alkaen suunniteltu tehtäväksi sujuvimmillaan 22 kuukaudessa 1.3.1994 - 31.12.1995. Pääasiassa soveltuvien mittalaitteiden saantivaikeudet hidastivat työn alkuun pääsyä ja etenemistä muutamilla kuukausilla. Erityisesti vesien talvinen kylmyys ja ympärivuotinen puhtaus, pienet pitoisuudet, asettivat kaupallisten mittareiden ohjearvot ja esitelupaukset ensi alkuun ylivoimaisen kovalle koetukselle. Mittalaitteista monipuolisempi, YSI 6000, oli suunnitellusta työajasta yli 6 kuukautta maahantuojalla tai valmistajalla huollettavana tai säädettävänä, kalibroittavana. Mittareiden sijoituspaikkana voimalaitos vahvoine magneettikenttineen vaati lopulta mittausrjestelyihin myös lisäsuojauksia ja suojaustarpeen selville saantia.

Mittareiden huollon, tarkistusten ja takaisinsaantien selvittely ja hoitaminen sitoivat henkilövoimia osittain työn muilta tehtäviltä. Pisimmälle väistymään joutuivat

juoksutus- ja säätietojen syötön järjestäminen jokilaskelmiin sekä sen myötä ja toisaalta veden laadun lähtötietojen puuttuessa jokilaskelmat kaikkiaan ja etenkin niiden tulosten vertailu jokivarren mittaustuloksiin. Paljolti lähtöpitoisuuksien saantia varmistamaan - ja vahvasti hyödyntämään tuoreen kehityksen avaamia mahdollisuuksia - työssä paneuduttiin vastaavasti ennakoitua enemmän myös yläpuolisen tekojärven ravintoverkkolaskelmiin.

Järjestelmän laitehankintojen ja ohjelmistokehityksen lisäksi projektissa selvitettiin veden ravinnepitoisuuksien, värin, limoittumisen ja klorofyllin mittaamiseen soveltuvia laitteita (kuva 2). Selvitysten tarkoituksena oli testata jatkuvatoimisten kustannuksiltaan kohtuullisten laitteiden soveltuvuutta vesistömittaukseen Suomessa.

Kuvassa 2 on keskitytty erityisesti hankitun laitekannan ja sitä täydentäneiden muiden mittalaiteselvitysten etenemisvaiheisiin ja johtopäätöksiin. Esimerkiksi tekojärvitulosten käyttö jokimallin syöttötietoina, juoksutus- ja säätietojen syöttö niiden rinnalle, juoksutustietojen käyttö ainetaseiden laskentaan ja tähänastisiin havaintoihin sisältyneiden muuttujien keskinäisten yhteyksien selvittelyt on selvyiden turvaamiseksi jätetty kuvaan piirtämättä.

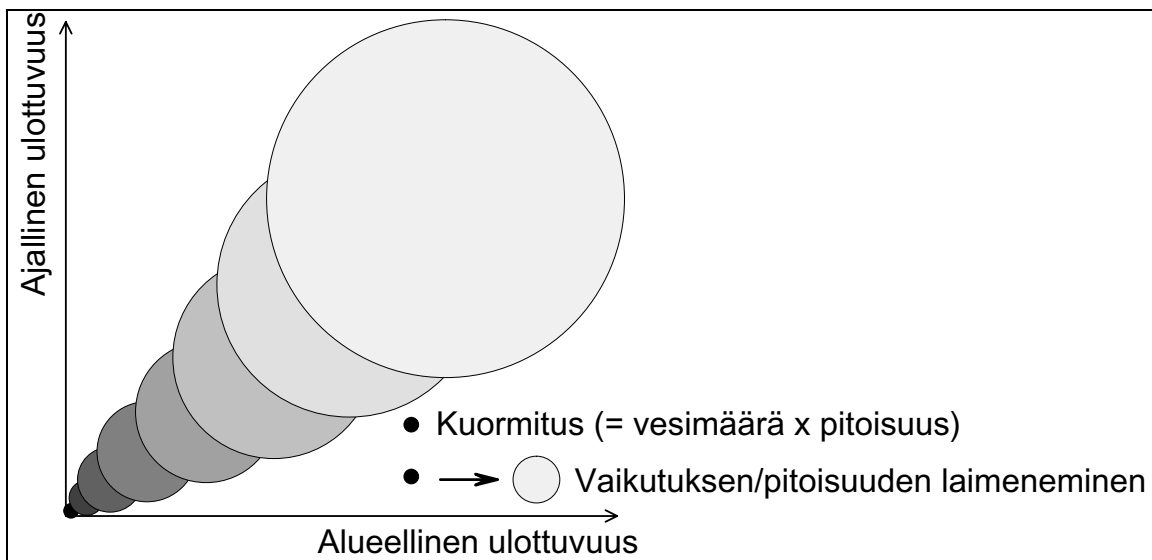


Kuva 2. Jatkuvatomisen mittausjärjestelmän kehittämisen työvaiheita pelkistettyinä.

2. Mitattavien suureiden valikoima ja valinnat

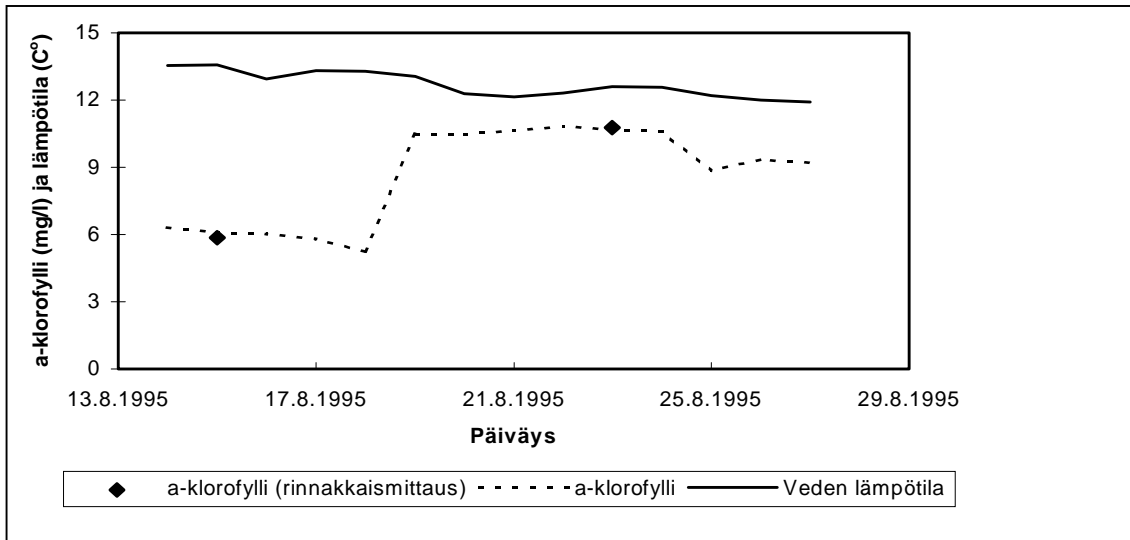
2.1 Vesistövaikutusten suoria mittausmahdollisuuksia

Vesistövaikutukset riippuvat kuormituksen alueellisesta ja ajallisesta jakautumisesta (kuva 3). Vaikutukset ilmenevät suorimmin vesistön rehevöitymisenä, happamoitumisena tai myrkyttymisenä (toksisuutena) tai näiden yhdistelminä. Seurauksena voi olla vesistön ravinnepitoisuuksien lisääntyminen, joka näkyy vesistössä leväkukintoina, vesikasvillisuuden lisääntymisenä sekä pyydysten, lähinnä verkkojen, limoittumisena (Salonen ym. 1992).



Kuva 3. Vesistökuormitus (pistelähteestä) ja sen vaikutusten ajallinen ja alueellinen leviäminen ja laimeneminen vesistöön (tummuus = vaikutuksen väkevyyys; laajuus = vaikutusala).

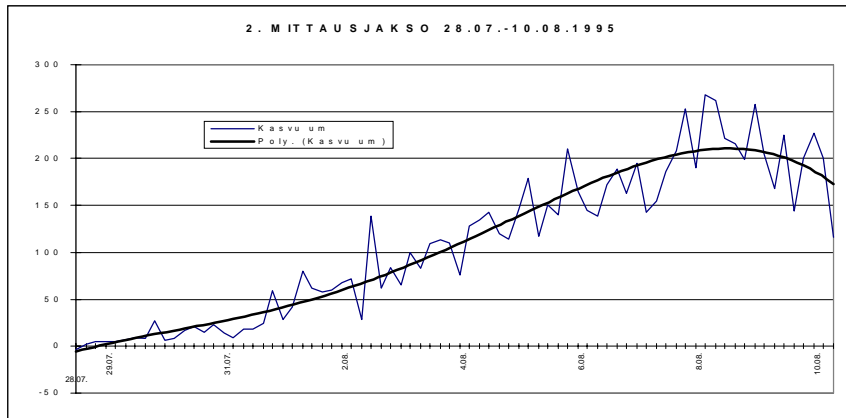
Leväkukintojen määrää voidaan jatkuvatoimisesti mitata fluorosenssiin perustuvalla a-klorofyllin mittauksella. A-klorofyllin jatkuvatoimisia mittauksia on onnistuneesti tehty jo muutamien vuosien ajan Itämerellä risteilevillä matkustajalaivoilla (Rantajärvi ja Leppänen, 1994) sekä Tanganjika-järvellä Arfikassa (Salonen ym.). Sinileväesiintymien määrittäminen a-klorofyllin fluorosenssin perusteella on J. Sarvalan suullisen tiedonannon perusteella ongelmallista, eikä menetelmää tulisi ko. tapauksissa käyttää. Myös Porttipahdan a-klorofyllin pitoisuuksien kehittymistä seurattiin elokuussa 1995 kahden viikon mittausjaksolla (Väisänen ym. 1996) (kuva 4).



Kuva 4. Porttipahdan jatkuvatoimiset a-klorofyllimittaukset 14. - 27.8.1995. Rinnakkaismittauksella varmennettiin jatkuvatoimisen mittauksen oikeellisuus.

Vesikasvillisuuden runsaus- ja rakennemuutosten toteaminen vaatii tavallisimmin pitkäaikaista seuranta. Muutos voi kyllä joskus tapahtua nopeastikin, jopa yhden kasvukauden aikana, jos ympäristön muutos on johtanut kasvillisuuden voimakkaaseen sukkessioon. Lajiston ja lajisuhteiden muutoksia mitataan yleisimmin ja tarkimmin tarkkailemalla samoina pysyviä koealoja toistuvasti vuosittain tai jopa useita kertoja kasvukaudessa (Hellsten ja Riihimäki 1995, Hellsten ym. 1995). Kaukokartoitusmenetelmistä satelliittikuvat ja ilmakuvaukset soveltuvat etenkin laajoilla alueilla tapahtuvien muutosten suuruuden hahmotteluun. Nopeilla maastokartoituksilla voidaan täydentää kaukokartoitusmenetelmien tarkkuutta. Perättäisinä vuosina toistettuina niillä yksinäänkin saadaan yleiskuva kasvillisuushabitaattien muutoksesta (Riihimäki ym. 1996).

Limoittumista voidaan tutkia havaksilla ja levyillä kerätyistä näytteistä. Limoittumista säätelevien tekijöiden testaamiseen on kehitetty rinnakkaiskourukokeita (Pietiläinen ja Pirinen 1997). Mittaustietoa limoittumisen ajallisesta vaihtelusta voidaan tuottaa jatkuvana myös biofilmin kertymistä seuraamalla. Esitutkimus biofilmin kertymän (BFM-mittalaite) määrittämiseksi tehtiin Kemijoen Valajaskoskella kesällä 1995 ja sen tulokset olivat rohkaisevia (Väisänen ym. 1996) (kuva 5).



Kuva 5. Esimerkki limoittumisen mittaustuloksista BFM-mittalaitteella.

Ravinteiden säätelemien levä-, vesikasvi- ja limoittumisvaikutusten suora mittaaminen olisi monelta kannalta suotavaa, koska juuri niihin vesistön käyttäjien päähuomio nykyisin eniten kiinnittyy. Mittaustulokset koetaan kuitenkin epävarmoiksi, koska käytetty tekniikka ja tulosten tulkinta on niin uutta perinteiseen kuvailevaan tutkimukseen verrattuna. Jatkuvasti, pitkiltä ajoilta kootut tiedot ovat edustavampia ja kattavampia kuin hetkellisten vesistönäytteiden tulokset. Mittalaitteiden rajoitettu saatavuus ja mittaustekniikan vakiintumattomuus ovat osin vaikuttaneet menetelmän hitaaseen yleistymiseen. Em. syistä tässä työssä ei ole otettu käyttöön vesistövaikutusmittauksia.

2.2 Vesistö- ja velvoitetarkkailuihin yleisesti kuuluvat suureet

Lokan ja Porttipahdan tekojärvistä on seurattu veden happitoisuutta, fosfaattifosfori- ja kokonaisfosforipitoisuuksia, ammonium-, nitraatti- ja nitriittityypipitoisuuksia, lämpötilaa, sähkönjohtavuutta, alkaliniteettia, pH:ta, kemiallista hapenkulutusta (COD_{Mn}), väriä ja rautapitoisuutta vesioikeuden määrittämän ja hyväksymän vesistö- ja velvoitetarkkailuohjelman mukaisesti. Lisäksi täyskierron aikana seurataan veden natriumin, kalsiumin, kaliumin, kloridin ja sulfaatin pitoisuutta.

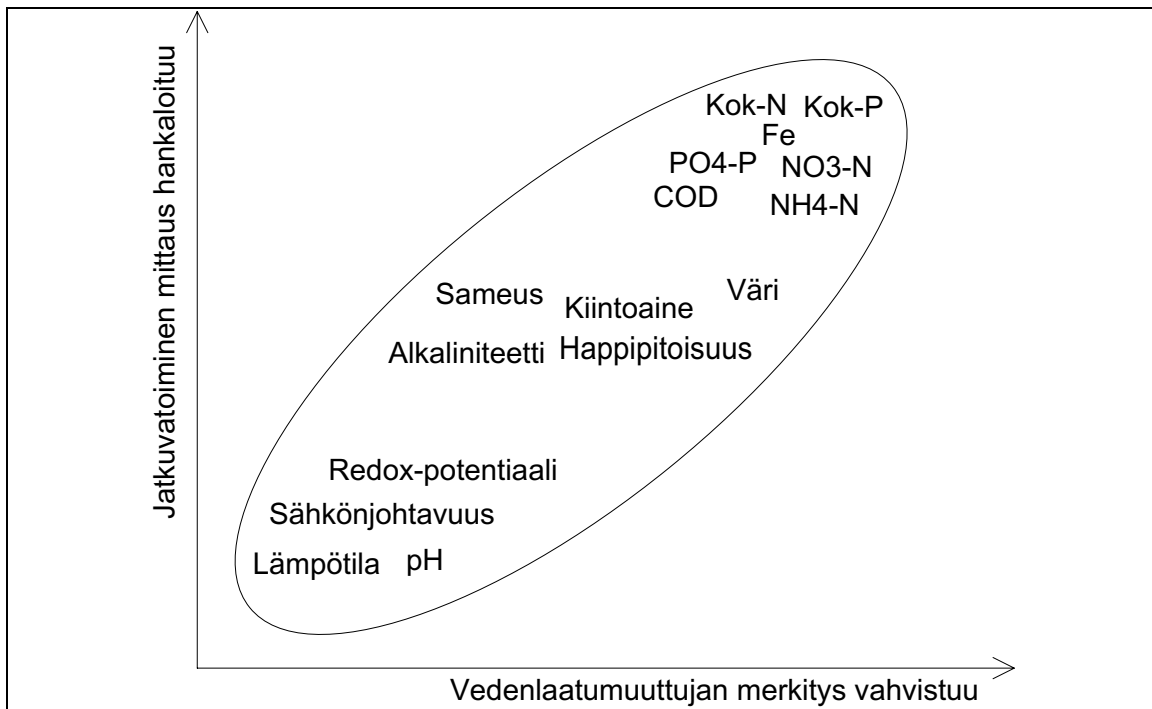
Edellä lueteltuja vedenlaatuomuuksia pidettiin lähtö- ja vertailukohtina, kun valittiin muuttujia jatkuvaan seurantaan

2.3 Mitattavien suureiden valinta

Kehitettyyn mittausjärjestelmään valittiin mitattaviksi suureiksi veden happipitoisuus, sähkönjohtavuus, pH, lämpötila, sameus ja redox-potentiaali. Mitattavat suureet valittiin ensi sijassa teknistaloudellisten näkökohtien perusteella. Lisäksi otettiin huomioon

suureen merkitys mallinnuksen lähtötietona ja sen informaatioarvo vesistövaikutusten arviointiin (kuva 6).

Myös a-klorofyllin, veden värin ja limoittumisen mittaaminen olisi ollut tarpeellista. Niiden mittaamiseen ei kuitenkaan ollut saatavilla kohtuuhintaista (alle 100 000 mk/vedenlaatumuuttuja) riittävän tarkkaa mittalaitetta.

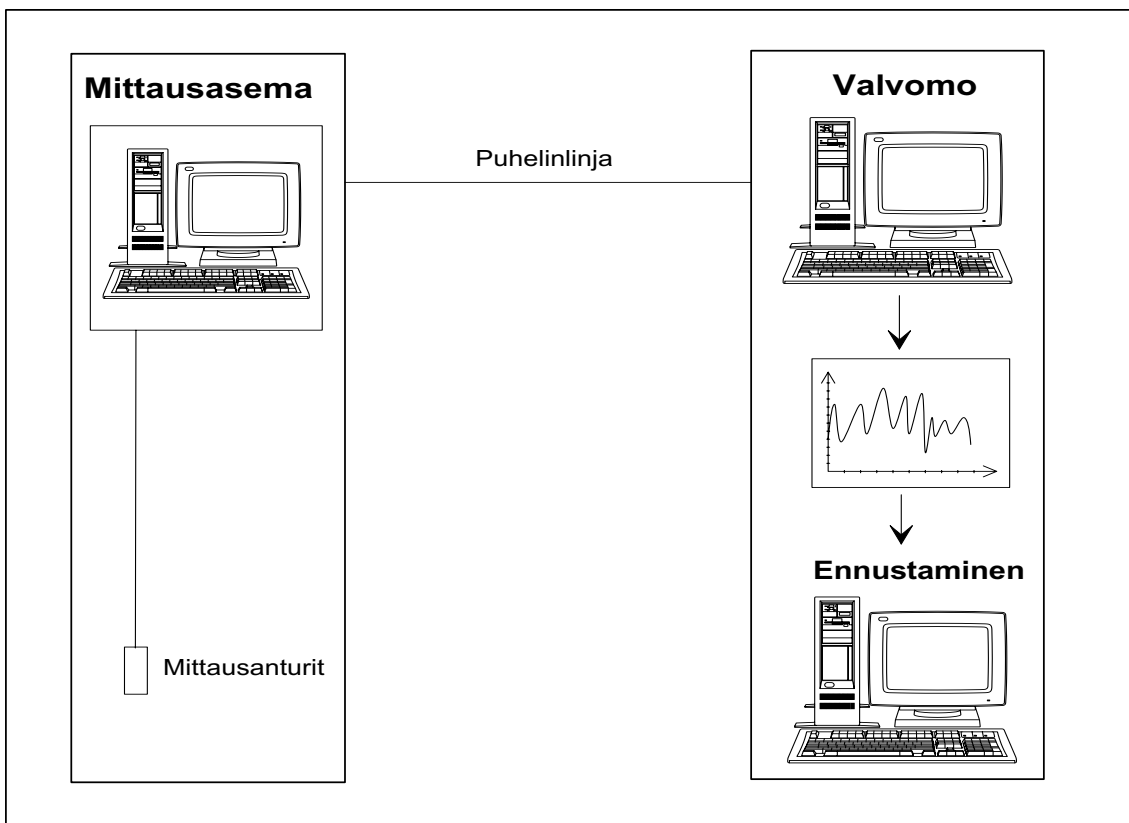


Kuva 6. Vedenlaatumuuttujan mitattavuuden ja merkityksen välinen yhteys.

3. Mittausjärjestelmä

3.1 Järjestelmän kuvaus

Järjestelmä koostuu kahdesta eri yksiköstä, mittausasemasta ja valvomosta (kuva 7). Mittausasema sijaitsee Porttipahdan voimalaitoksella ja valvomo sijaitsee Rovaniemellä Kemijoki Oy:n keskusvalvomon tiloissa. Mittausasemalla mitataan veden laatua kahdella anturilla (YSI 6000 ja BTG MET-3010), jotka on kytketty mittautietokoneeseen. YSI 6000:lla mitataan veden happipitoisuutta, sähköjohtavuutta, pH:ta, lämpötilaa ja redox-potentiaalia. BTG MET-3010:lla mitataan veden sameutta. Mittautietokoneessa on tulosten tallentamiseen tarvittava ohjelma. Valvomosta voidaan modeemiyhteydellä ohjata mittausaseman tietokonetta. Valvomon tietokoneella on tarvittavat ohjelmat mittautulosten siirtoa, käsittelyä ja analysointia varten. Mittautulosten ja virtaamatietojen perusteella voidaan mm. ennustaa joen vedenlaatusuureiden kehittymistä numeerisen vedenlaatumallin (jokimalli) avulla.



Kuva 7. Periaatekuva mittausjärjestelmästä. Veden laatu mitataan automaattisella jatkuvatoimisella mittarilla. Mitatut tiedot siirretään valvomoon puhelinlinjoja pitkin, ja mitattujen tietojen perusteella voidaan mallintaa veden laadun kehittymistä käyttämällä ko. tarkoitusta varten kehitettyä numeerista vedenlaatumallia.

3.2 Ohjelmistot

Mittausasemalla on ohjelma mitattujen vedenlaatusuureiden keräämistä varten, ja valvomossa on kolme ohjelmaa mittaustulosten käsittelyä varten (taulukko 2). Ohjelmien käyttöympäristönä on Microsoft Windows 3.11.

Taulukko 2. Ohjelmistosovellukset yksiköittäin ja niillä suoritettavat tehtävät.

Yksikkö/ohjelma	Käyttökohde
Mittausasema	
<i>Mittausasema</i>	Mittaustulosten keruu antureilta
Valvomo	
<i>Valvomo</i>	Yhteydenotto mittausasemalle ja tulosten siirto aikasarjoina valvomoon
<i>Jokidata</i>	Tulosten käsittely (tilastollisten arvojen laskeminen) ja erilaisten hakujen tekeminen (tietty aika, tietynlaiset arvot)
<i>Malliapu</i>	Vedenlaatusuureiden kehittymisen ennustaminen

3.3 Järjestelmän ylläpito

Veden lämpötila vaikuttaa mittausaltaan ja mittalaitteiden limoittumiseen. Kun lämpötila oli alle + 1 °C, limoittumista ei havaittu. Lämpötilan ollessa noin + 5 °C limoittumista esiintyi pääasiassa vain mittausaltaassa. Yli + 10 °C lämpötilassa limoittumista esiintyi mittausaltaan lisäksi myös mittalaitteessa. Limoittumisen vaikutuksia mittaustuloksiin selvitettiin altaan ja laitteiden viikoittaisen puhdistuksen yhteydessä. Ennen puhdistusta ja puhdistuksen jälkeen mitattuja arvoja verrattiin keskenään. Limoittumisella oli vaikutusta ainoastaan happipitoisuuden tuloksiin veden lämpötilan ollessa yli + 12 °C. Tällöin erot olivat noin 0,2 mg/l, mikä merkitsee noin 2 %:n epätarkkuutta mittaustuloksiin.

YSI 6000 -mittalaitteen viritys ja kalibrointi tehdään laitteiston omalla ohjausohjelmistolla käyttöohjeessa annettujen yleisohjeiden mukaisesti. Sameutta mittaavan BTG 3010 -mittalaitteen kalibroi maahantuoja. Kalibroinnissa on otettava huomioon se, että Porttipahdan veden sameusarvot ja lämpötilat ovat alhaiset. Näin mittalaitteen tarkkuus saadaan riittävän hyväksi.

4. Laskentamahdollisuuksien täydentäminen

4.1 Mitattavien suureiden yhteydet velvoitetarkkailun muuttujiin

Mittausjärjestelmällä mitatut veden laadun muuttujat (lämpötila T, happamuus pH, happipitoisuus O₂, sähkönjohtavuus Cond ja sameus) eivät täysin ole niitä muuttujia, jotka laskentatuloksina eniten kiinnostavat (veden väri, kokonaisfosfori P_{tot}, kemiallinen hapen tarve KHT, happi O₂, biologinen hapenkulutus BHK, rauta Fe, mangaani Mn, kiintoaine SS ja kokonaistyyppi N_{tot} sekä ravinnemallin sovelluksissa liukoiset ravinteet ja leväbiomassa). Osittaista päällekkäisyyttä niiden välillä kuitenkin on. Näiltä osin (tekojärven) laskentatulosten osuvuus voidaan varmistaa vertaamalla niitä mittaustuloksiin, jolloin alapuolisten jokien veden laadun laskenta täsmentyy yksityiskohtaisilla syöttötiedoilla.

Altaasta purkautuvat pitoisuudet ja kuormitukset, joita ei mittausjärjestelmällä mitata, voidaan määrittää joko suoraan altaan laskentatuloksista tai eri muuttujien välillä todettujen tilastollisten riippuvuuksien (korrelaatioiden) avulla. Suoraan yläpuolisen alueen laskelmista alapuoliseen vesistöön välittyvien syöttötietojen sujuvaa siirtoa ja käyttöä on kehitetty, sovellettu ja tarkasteltu KEVE-projektin loppuvaiheissa ja erityisesti sen jatkovarmistuksissa (Virtanen ym. 1993, 1996). Tässä keskitytään sen vuoksi enää muuttujien välisten yhteyksien selvittämiseen. Tämä tiivistää samalla yhteyksiä mittausten ja laskelmien välille, mikä on ollut työn keskeinen tavoite.

Riippuvuuksien selvittämisen pohjaksi otettiin Porttipahdan kahdeksasta vakinaisesta mittauspisteestä kaikilta syvyyksiltä joulukuusta 1970 tammikuuhun 1987 tehdyt mittaukset (taulukko 3). Useimmin mitattuihin suureisiin kuului sekä jatkuvasti mitattavia muuttujia (O₂, T, pH), kiinnostavimpia muita muuttujia (P_{tot}, N_{tot}, Väri, KHT) että täydentäviä tietoja (alkaliniteetti Alk ja näytteenottoisyvyys Syv).

Taulukko 3. Riippuvuuksien selvittämisen pohjaksi otetut Porttipahdalla joulukuun 1970 ja tammikuun 1987 välisenä aikana mitatut muuttujat, mittausten lukumäärät sekä tulosten keskiarvot ja vaihteluvälit.

Muuttuja	Lukumäärä	Keskiarvo	Vaihteluväli	(Yksikkö)
Syv.	2193	9,30	0 - 35	m
T	2170	4,85	0 - 18,5	degC
O ₂	1926	6,38	0 - 15,2	mg/l
P _{tot}	1272	59,3	1 - 950	µg/l
N _{tot}	1262	563	20 - 2400	µg/l
pH	1250	6,63	5,8 - 7,4	-
KHT	1241	11,6	1,3 - 72	mg/l
Alk.	1070	0,268	0,1 - 1,7	mmol/l
Väri	426	176	13 - 1200	mg Pt/l

Läheisimpiä olivat yhteydet veden väristä alkaliniteettiin, typpipitoisuuteen ja fosforipitoisuuteen (selitysasteet $R^2 = 62,5, 61,9$ ja $57,6$ %). Eri havaintoparien toisistaan poikeavat lukumäärät aiheuttavat kuitenkin lievää epätasapainoa selitysasteiden (korrelaatiokertoimen R neliöiden) suoraan vertailuun.

Varsinaisesti havaintojen osuminen lomittain keskenään vaikeuttaa (tai tekee itse asiassa mahdottomaksi) useampiportaisten (monimuuttuja)yhteyksien selitysasteiden vähänkään perustellumman päättämisen tai laskemisen pareittaisten selitysasteiden pohjalta. Tästä syystä yhteyksien koontia ei ole jatkettu toiseksi läheisintä muuttujaa pitemmälle eikä näiltäkään osin yhteisiä selitysasteita ole selvitetty. Tällä tavoin rajoitettuna saadaan läheisimmäksi yhteydeksi mitattavasta muuttujasta kokonaisfosforipitoisuuteen (1132 yhteisestä havainnosta 21,2 %:n selitysasteella)

$$P_{tot} = 111,3 \mu\text{g/l} - 8,14 \cdot O_2 \mu\text{g/mg}. \quad (21)$$

Tilastollista merkitsevyyttä mittaavan t-testin vertailuarvoksi tulee näiden välille 17,4 vapausasteella 1130. Yhteys on sen mukaan erittäin vakuuttavasti nolasta poikkeava, sillä 99,9 %:n varmuuteen olisi riittänyt vertailuarvo 3,3.

Kaiken kaikkiaan läheisimmät yhteydet (kahden muuttujan selityksinä, pareittaisine selitysasteineen ja lukumäärineen) muodostuivat seuraaviksi:

Alk.	=	0,188 mmol/l		
	+	0,00115 · Väri mmol/mg	(62,5 %)	(339)
	-	0,000654 · P _{tot} mmol/μg	(45,0%)	(1069)
O ₂	=	- 25,04 mg/l		
	-	14,99 · Alk mg/mmol	(41,3 %)	(965)
	+	5,466 · pH mg	(34,8 %)	(1128)
KHT	=	4,68 mg/l		
	+	0,0113 · N _{tot} mg/μg	(36,6 %)	(1218)
	+	0,00836 · P _{tot} mg/μg	(34,8 %)	(1228)
P _{tot}	=	54,4 μg/l		
	+	0,712 · Väri μg/mg	(57,6 %)	(425)
	-	0,127 · N _{tot}	(52,9 %)	(1256)
N _{tot}	=	406 μg/l		
	+	2,13 · Väri μg/mg	(61,9 %)	(421)
	-	1,40 · P _{tot}	(52,9 %)	(1256)

T	=	-	50,2 degC		
		+	8,51 · pH degC	(24,5 %)	(1236)
		-	0,123 · O2 degC/(mg/l)	(3,6 %)	(1906)
pH	=		6,19		
		+	0,0450 · O2 /(mg/l)	(34,8 %)	(1128)
		+	0,0220 · T /degC	(24,5 %)	(1236)
Väri	=	-	136 mg/l		
		+	543 · Alk mg/mmol	(62,5 %)	(339)
		+	0,177 · Ptot mg/µg	(57,6 %)	(425)
Syv	=		4,73 m		
		+	0,0396 · Väri m/(mg/l)	(34,2 %)	(426)
		-	7,24 · Alk m/(mmol/l).	(17,3 %)	(1070)

Jatkuvasti mitattavat suureet ovat tämän mukaan läheisimmässä yhteydessä juuri keskenään. Muista muuttujista omaksi ryhmäkseen ovat keskittyneet erityisesti väri, Ptot, Ntot ja alkaliniteetti. Vähän löyhemmin näihin liittyvät KHT ja näytteenottoosyyvyys. Selittävät yhteydet jatkuvasti mitattavista muuttujista laskentamuuttujiin peittyvät paljolti keskinäisyhteyksien alle. Alkaliniteetti ja pH selittävät toistensa vaihteluista 6,7 %.

Laskentasovelluksissa on käytetty Kitisen fosforipitoisuuksien syöttötietoina lausekkeen (21) antamia tuloksia.

4.2 Tekojärven ravinnemalli syöttötietojen täydentäjänä

Tekojärvien ja niiden alapuolisen vesistön veden laadun kehitykseen vaikuttavia pääyhteyksiä ja niiden laskennallisia kuvaustapoja on laajimmin selvitetty KEVE-projektin loppuraportissa ja sen täydennyksissä sekä näistä tiivistetyissä kirjoituksissa (Virtanen ym. 1993, 1994, 1995, 1996, Hellsten et al. 1993).

Hienojakoisempien syöttötietojen saamiseksi jokilaskelmiin sovellettiin tekojärvelle ns. ravinnemallia. Sen keskeisimpiin erityispiirteisiin kuuluvat

- a) typen (N) ja fosforin (P) leville (A) välittömästi käyttökelpoisten osapitoisuuksien Nu ja Pu tarkastelu kokonaispitoisuuksien Ntot ja Ptot sijasta,

- b) levissä vallitsevien solun sisäisten typpi- ja fosforipitoisuuksien NinA ja PinA vaihteluiden laskenta,
- c) levien kasvun (ja osin kulumisenkin) riippuvuus ulkoisten pitoisuuksien Nu ja Pu lisäksi solun sisäisistä pitoisuuksista NinA ja PinA, sekä
- d) kuolleeseen biomassaan (detritukseen, bakteerikierrossa vapautuviksi) sitoutuneiden ravinnepitoisuuksien Ndetr ja Pdetr sisällyttäminen laskentaan omina osinaan, kemiallisesti tai levätesteillä eroteltavissa olevien muiden osien rinnalle.

Tällaisia ravinnevaikutusten hienosyisempään erittelyyn (ilman biomassan lisäjaotteluja) keskittyneitä sovelluksia on kehitystyössä kutsuttu ravinnemalleiksi erotuksena biomassankin jaotteluun suuntautuvista varsinaisista ravintoverkkomalleista. Edellä kuvattujen peruspiirteiden (a - d) lisäksi näille molemmille on yhteistä

- e) biomassan esittäminen (orgaanisen) hiilen (C) pitoisuuksina, yhdenmukaisesti ravintoverkoston kaikilla (trofia)tasoilla.

Ravintoverkkomalleille puolestaan on - ravinnemalleista poiketen - ominaista erityisesti

- f) biomassan jaottelu useampiin, toistensa kanssa vuorovaikutuksessa oleviin ryhmiin, esimerkiksi leviin (A), eläinplanktoniin (Z), bakteereihin (B), joista kukin voi olla edelleen jaoteltu vielä hienojakoisempiin erityisosiin.

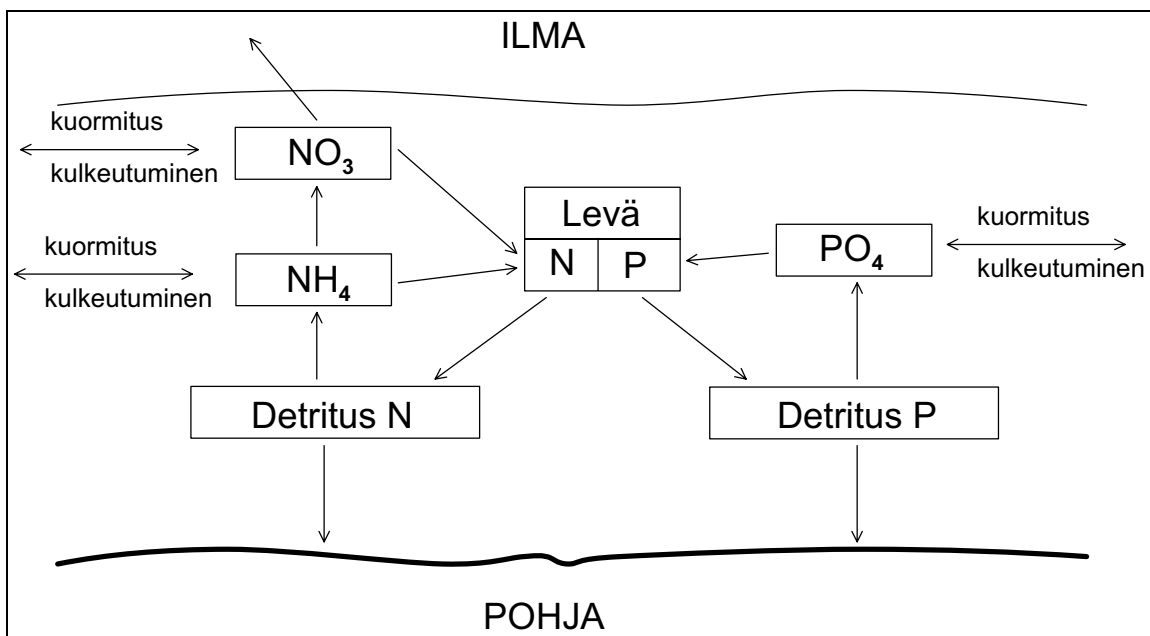
Perusteina lisäjaotteluihin voidaan käyttää joko

- f1) toiminnallisia piirteitä, joista erityisesti sinilevien ja varsinaisen kasviplanktonin väliset erot ovat jyrkimpiä verrattuina esim. piilevien, kultalevien ja muun kasviplanktonin poikkeamiseen toisistaan, tai
- f2) yksilökokoja, joka merkittävimmin on noussut esiin juuri ravintoverkko-tarkastelujen rinnalla ja joka sen vuoksi on ollut vaarassa sekoittua jopa ravintoverkkomallien eniten korostetuksi tunnuspiirteeksi, vaikka kyse on lähinnä vain helposti erottuvasta teknisestä yksityiskohdasta.

Ravinteiden käyttökelpoisuutta on levätestein ja laboratorionkokein selvitetty erityisesti Ekholm (1994), ravintoverkkotarkastelujen pohjana taas ovat erityisesti Haapamäen (1993) esiintuomat ja pohjustavasti testaamat vaikutusyhteydet. Levätestien pohjalta suoraan veden ravinnepitoisuuksiin nojaavia moniryhmäsovelluksia (f1, ilman piirteitä b ja c) ovat esittäneet mm. Bilaletdin ym. (1993) ja Malve ym. (1994), moniulotteisten ravintoverkkoratkaisujen sovelluksia (f2, b ja c korostettuina) puolestaan Keränen (1994) ja Inkala (1995). Näiden menetelmien laskentakertoimissa tai

käyttökelpoisuudessa ei ole kovin selviä eroja (Virtanen 1995). Kehityksen etenemiseen, jatkumiseen ja ylläpitoon ovat paljolti vaikuttaneet Heiskasen (1993) kahden vuoden mittaukset Perämereltä Hailuodon pohjoispuolelta, Lepistön ja Pietiläisen (1996) tulokset Kemijärveltä sekä Itkosen (1995, 1996) perinpohjainen paneutuminen tulosten merkitysten selvittämiseen, varmistamiseen ja laatimiseen.

Pääosin Kemijärven sovelluksen (Inkala 1995) ja kokemusten pohjalta on Porttipahdalle päädytty soveltamaan ravinnemallia (kuva 8). Tulouomat, laskeuma ilmakehästä sekä sisäinen kuormitus altaan pohjalta syöttävät veteen ravinteita, joiden liukoisia osia ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ ja $\text{PO}_4\text{-P}$) levät pystyvät suoraan käyttämään hyväkseen. Levien kasvu sitoo samalla liukoisia ravinteita solujen sisälle. Levien kuollessa muuttuu biomassa detritukseksi, kuolleeksi orgaaniseksi (eloperäiseksi) aineeksi. Sen sisältämistä ravinteista osa vajoaa pohjaan, osa taas vapautuu ja liukenee veteen, kun bakteerit hajottavat eli mineralisoivat (kivennäistävät) kuollutta ainesta eloperäisestä poikkeavaan (epäorgaaniseen, elottomaan) muotoon.



Kuva 8. Typen ja fosforin kierto ravinne- ja ravintoverkkomallissa (Inkala 1995).

Typen nitrifikaatio ("typpihapon muodostuminen") muuttaa ammoniumia ($\text{NH}_4\text{-N}$) nitriitiksi ($\text{NO}_2\text{-N}$) ja edelleen nitraatiksi ($\text{NO}_3\text{-N}$). Välivaihe on niin nopea, ettei nitriitin osuutta ole erikseen otettu laskelmissa huomioon, etenkin kun nitriittien sopivuus leville on likimain sama kuin nitraattienkin. Vastaavasti denitrifikaatio ("typpihapon purku") hajottaa nitraattitypen ($\text{NO}_3\text{-N}$) typpikaasuksi (N_2), joka poistuu vedestä ilmakehään.

Typpihapon hajoaminen on laskelmissa keskitetty pohjasedimentin tuntumaan, kunkin kohdan alimpaan tarkastelukerrokseen.

Leväbiomassaa on Porttipahdalla mitattu useana vuonna. Mittaustuloksen ja saman hetken laskentatuloksen suoran vertailun merkitystä vähentää leväbiomassan muutosten nopeus. Osa levämittauksista voi lisäksi olla aliarvioituja säilöntähäiriön vuoksi (Itkonen 1995). Leväbiomassaa on vertailtu myös a-klorofyllin pitoisuuksiin, joita laskentatulosten vertailuun on mitattu useammin kuin biomassaa. Pienimmän neliösumman menetelmällä kasviplanktonin ja a-klorofyllin väliseksi suhteeksi saatiin 184, joskin korrelaatiokerroin R jäi 0,53:een (selitysaste R^2 28 %:iin). Kemijärvellä biomassan ja a-klorofyllin suhde oli 115. Klorofyllimittauksista tehtyjä biomassaarviointeja voidaan pitää melko karkeina. Laskentatuloksina malli saavuttaa lähes jokaisena vuonna mitatun biomassan maksimipitoisuuden. Vuosina 1994 ja 1995 biomassan ja a-klorofyllin mittauksia oli runsaasti edellisiin vuosiin verrattuna. Näinä vuosina kesän suurimmat pitoisuudet jäivät selvästi edellisiä vuosia pienemmiksi, yhdenmukaisesti sekä mittaus- että laskentatuloksissa.

Malli kuvaa liukoisten ravinteiden dynamiikkaa erittäin hyvin. Liukoisten ravinteiden dynamiikka määräytyy selkeästi leväbiomassan mukaan. Pitoisuudet ovat korkeimmillaan loppukevästä juuri ennen, kun leväbiomassa alkaa kasvaa, ja pienimmillään, kun leväbiomassa saavuttaa kesän maksiminsa. Erityisen selkeästi dynamiikka sekä mallin ja mittausten yhteensopivuus näkyvät nitraatin ja fosfaatin kohdalla, sillä näiden ravinteiden mittaustuloksissa on suuri hajonta eivätkä pinnan ja pohjan pitoisuudet poikkea niin merkittävästi toisistaan kuin ammoniumin kohdalla.

5. Jokilaskelmien kehittäminen ja soveltaminen

5.1 Laskentamallin muokkaus jokiin soveltuvaksi

Laskennan soveltamisessa tekojärvien alapuoliseen vesistöön on huomio suuntautunut mm. jokien virtauslaskentaan ja siinä käytettyjen oletusten tarkistamiseen. Lisäksi tekojärivistä jokeen purkautuvien pitoisuuksien ja ainemäärien laskenta- ja mittaustulosten hyväksikäyttöä jokipitoisuuksien laskentaan on kehitetty.

Koska uoman pohjan korkeuserot ovat moninkertaisia vesisyvyyskiin verrattuna pitkillä jokiväleillä, on virtauslaskentaa muokattu 3D pohjalta poikkeavaksi. Tällöin laajempien vesialueiden laskennan vaakatason kerrosrajojen käyttö on ollut hankalaa, koska yläjuoksulla uoman pohja on ollut monta kerrosta korkeammalla kuin veden pinta alajuoksulla. Pohjan kaltevuuden huomioonotto helpottaa, tarkentaa ja varmistaa erityisesti uoman suuntaisen, pitkittäisen virtausnopeuden u (lauseke 2) laskentaa.

Vedenkorkeuden, poikkipintojen ja virtausnopeuksien vaihtelut jokiverkostoissa on lausekkeiden (15) - (19) pohjalta ratkaistu numeerisesti samalla tavoin Eulerin menetelmällä kuin 3D-laskennan muutkin osat. Tällä on korvattu jokilaskelmiin aiemmin omaksuttu ns. McCormacin kahden osa-askelen eksplisiittinen (avoin, suoraan tuloksen antava) ennustaja-korjaajamenetelmä (Ylinen 1994, Franco & Almeida 1991). Tuloksiksi saatuja virtausnopeuksia on sen jälkeen käytetty pitoisuuksien pitkittäisen kulkeutumisen laskentaan lausekkeen (1) tapaan. Peräkkäisten poikkipintojen eroista yhteyksiä välittävän yhteisen poikkipinta-alan määrittämiseen aiheutuvien vaikutusten tarkasteluun on samalla kiinnitetty erityistä huomiota (Ylinen 1994).

Rintala ja Örn (1996) ovat kehittäneet monimutkaisten luonnonuomien yksityiskohtaisten poikkipintatietojen (lauseke (14), luvut z_b , B_b , c_1 , z_1 , c_2) yksinkertaistamiseen soveltuvan C-kielisen ohjelman. Ohjelman avulla voidaan perättäisiä uoman poikkileikkauksia yhdistellä laskentaa varten kohtuullisen yhtenäisiksi jokiväleiksi. Näin laskennassa käytettävän lähtötiedon määrä saadaan kohtuulliseksi. Esimerkiksi Porttipahdan voimalaitoksen alapuolisen joen (Kitinen) poikkileikkaustietojen määrä saatiin varsinaista virtaus-, kulkeutumis- ja pitoisuuslaskentaa varten vähennetyksi 998:sta 237:ään.

5.2 Yhdistäminen mittauksiin ja soveltaminen Kitiseen

Jokimallin lähtötietoina käytetään mitatuista vedenlaatusuureista laskettuja simulointi-muuttujien arvoja. Taulukosta 4 nähdään, että riippuvuusyhtälöiden selitysaste on suhteellisen alhainen, parhaimmillaankin n. 40 % (0,41).

Taulukko 4. Mallin simulointimuuttujien riippuvuudet kahdesta mitatusta suureesta.

<i>Mallin muuttujat</i>		<i>Riippuvuusyhtälöt</i>					
kirjain-tunnus	koko nimi ja yksikkö	vakio	mitattu suure 1	kerroin 1	mitattu suure 2	kerroin 2	selitys-aste
ALKA	alkaliniteetti, mmol	0.03	happi mg/l	-0.03	pH	0.06	0.41
CODA	kemiallinen hapenkulutus mg/l	30	happi mg/l	-0.4	pH	-2.4	0.10
PTOT	kokonaisfosfori µg/l	111	happi mg/l	-8.1	-	-	0.21
TOTN	kokonaistyyppi µg/l	1500	happi mg/l	-25	pH	-110	0.14
VARI	väri mg/l	640	happi mg/l	-13	pH	-61	0.19

Taulukon 4 mukaan alkaliniteetti lasketaan hapen ja pH:n mittaustuloksista seuraavasti:

$$\text{alkaliniteetti (mmol)} = 0.03 - 0.03 \times (\text{hapen mittaustulos, mg/l}) + 0.06 \times (\text{pH:n mittaustulos}).$$

Simuloinnin lähtöarvojen laskenta tapahtuu Malliapu-ohjelman avulla. Ohjelma lukee mittaustulokset tiedostosta, laskee simulointimuuttujien arvot em. yhtälöiden avulla ja lisää lasketut arvot mallin lähtöparametritiedostoon.

Kitisen veden laadun laskennan lähtöpitoisuudet syötetään mittaustulosten mukaisina Porttipahdan voimalaitoksen alapuoliseen hilaruutuun (laskentapisteeseen). Sen yläpuolen pitoisuuksia jokimallissa ei lasketa. Muiden Kitisen joen mallipisteiden pitoisuudet saadaan mallin laskentatuloksista.

Vedenlaatumallin soveltaminen Kitiseen käsitti joen uoman tietojen muokkaamisen mallin käyttämään muotoon sekä virtaus- ja vedenlaatutietojen kytkemisen malliin.

Uoman lähtötietoina käytettiin Kemijoki Oy:n Kitisen uoman poikkileikkauksia. Rintalan ja Örnin (1996) kehittämän ohjelmiston avulla poikkileikkauksaineisto muunnettiin jokimallille käyttökelpoiseen muotoon.

Virtaustietoina käytettiin viideltä voimalaitokselta (Porttipahta, Kurittukoski, Vajukoski, Kurkiaska, Kokkosniva) saatavia virtausmittaustietoja (m^3/s). Tiedot siirretään mallin parametritiedostoon Malliapu-ohjelmalla.

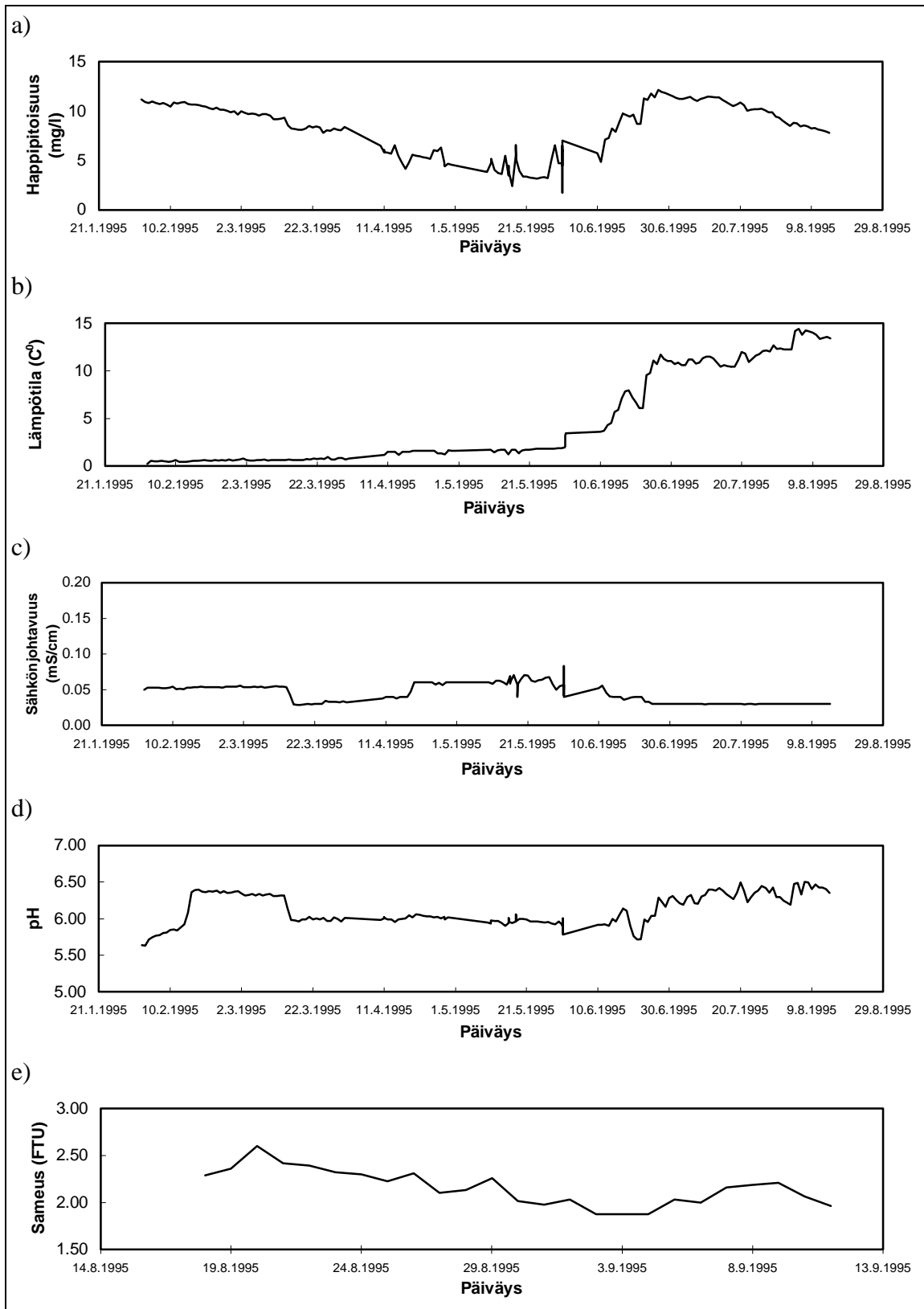
6. Tuote ja sen toiminnan varmentaminen

6.1 Mittausten luotettavuus

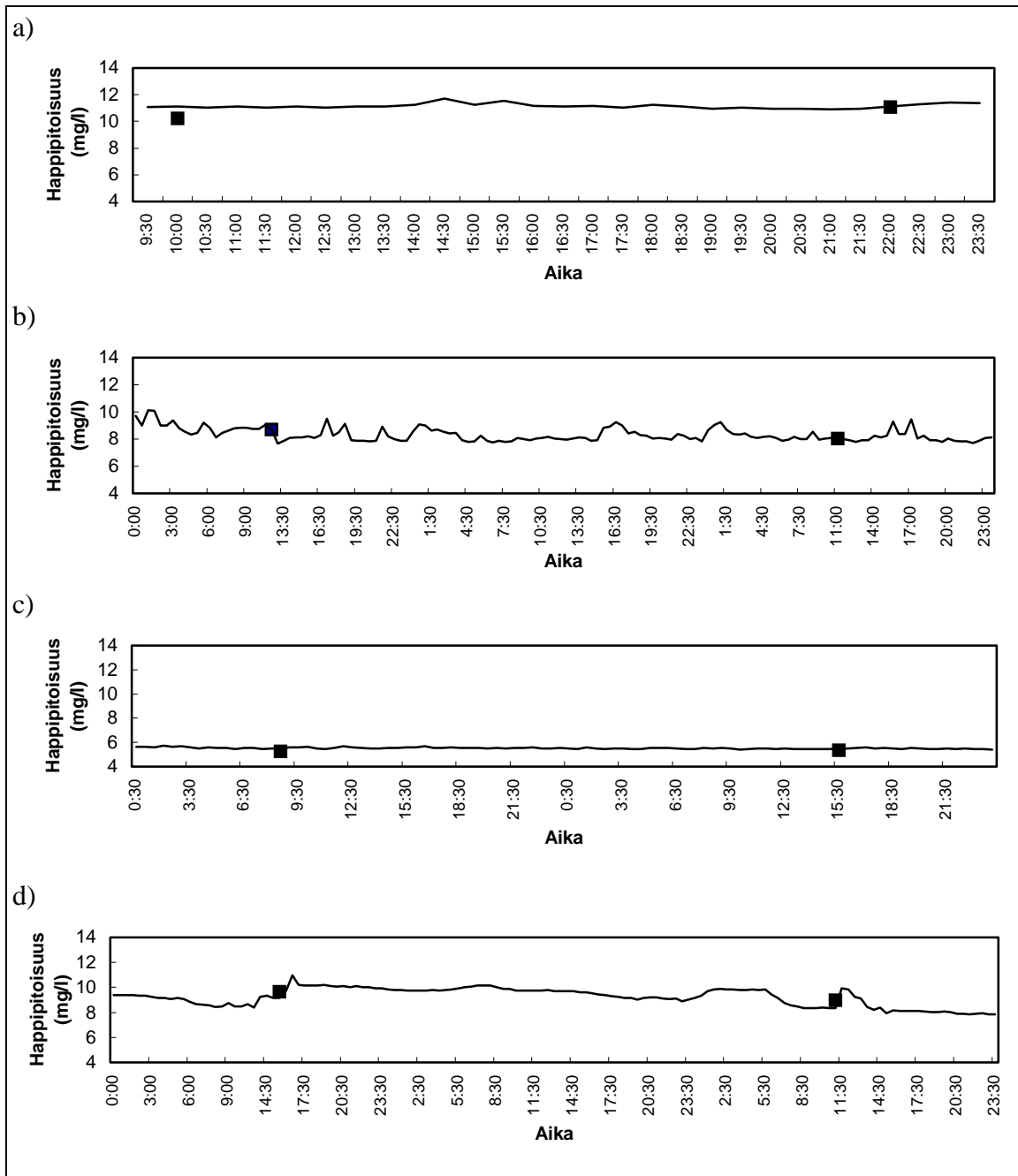
Mittausten luotettavuutta testattiin vertailumittauksilla ja laboratorioanalyysillä. Mittapäiden puhdistamisen vaikutusta mittausten tarkkuuteen ja laatuun on selvitetty kohdassa 3.3. Kalibrointi ja muut mittareille tehtävät toimenpiteet on suoritettava käyttöohjeiden mukaisesti, jotta mittauksessa saavutettaisiin riittävä tarkkuus. Mittaustuloksia tulkittaessa on syytä muistaa, että jatkuvatoimiset mittalaitteet eivät ole yhtä herkkiä kuin laboratoriomääritykset. Jatkuvatoimiset mittalaitteet paljastavat parhaiten selviä muutoksia, joita kehittyä luontevimmin pitkinä aikajaksoina.

Mittausten luotettavuutta testattiin yhtäjaksoisen mittausjakson aikana 2.2. - 14.8.1995 (kuva 9). Mittaustulokset tallennettiin 30 minuutin välein ja niistä laskettiin vuorokausikeskiarvot. Mittausajanjaksolla laitteisto puhdistettiin viikoittain ja kalibroitiin neljä kertaa (2.2., 15.3., 19.4. ja 19.6.). Kalibroinnin yhteydessä otettiin vesinäytteet laboratorioanalyysijä varten. Lisäksi vesinäytteitä otettiin 17.3., 20.4. ja 21.6. Mittausvirheet laskettiin vertaamalla mittaustuloksia laboratoriossa määritettyihin tuloksiin (kuva 10 ja taulukko 5).

Virhetarkastelussa prosentti- tai osuusvertailut auttavat hahmottamaan sekä erojen laajuutta että tulosten tavanomaista tasoa tai vaihtelua. Taulukossa 5 suurimmat yksittäiset virheet on laskettu hetkellisistä arvoista ja keskivirheet on laskettu havaintojen keskiarvoista. Laittevalmistajat puolestaan yleensä ilmoittavat tarkkuuksia osuuksina asteikon enimmäislukemista, ja tilastollisten merkitysten päättelyyn taas tarvitaan mittaus- ja laskentatulosten erojen neliösumman vertailua mittaustulosten neliölliseen hajontaan oman keskiarvonsa ympärillä. Valittu virhetarkastelun esitystapa poikkeaa siis yleisesti käytetyistä esitystavoista, sillä tässä tapauksessa se havainnollistaa todellisia havaittuja virheitä.



Kuva 9. Porttipahdan voimalaitokselta mitattuja veden laatutuloksia. Veden happipitoisuuden (a), lämpötilan (b), sähkönjohtavuuden (c) ja pH:n (d) tulokset on mitattu 2.2. - 14.8.1995. Veden sameuden (e) tulokset on mitattu 16.8. - 12.9.1995.



Kuva 10. Happipitoisuuden jatkuvatoimiset suorat mittaustulokset (yhteinäinen viiva) ja vesinäytteistä määritetyt happipitoisuudet (mustat neliöt). Tulokset ovat ajanjaksoilta a) 2.2.1995, b) 15. - 17.3.1995, c) 19. - 20.4.1995 ja d) 19. - 21.6.1995.

Taulukko 5. Järjestelmällä mitatut hapen, lämpötilan, sähkönjohtavuuden, pH:n ja sameuden tulosten vaihtelut 2.2. - 14.8.1995 sekä mittaustulosten virheet vesinäyteanalyysieihin verrattuina.

Muuttuja, yksikkö	Mittaustulos	Suurin yksittäinen virhe	Keskivirhe
Happi, mg l ⁻¹	2 - 12	0,63 (25 %)	0,35 (7 %)
Lämpötila, °C	0,1 - 15	0,07 (18,2 %)	0,05 (3,7 %)
Sähkönjohtavuus, mS m ⁻¹	2 - 7	0,30 (17,6 %)	0,13 (7,2 %)
pH	5,6 - 6,5	0,25 (4,1 %)	0,14 (2 %)
Sameus, FTU	1,7 - 2,7	0,20 (10,1 %)	0,07 (3 %)

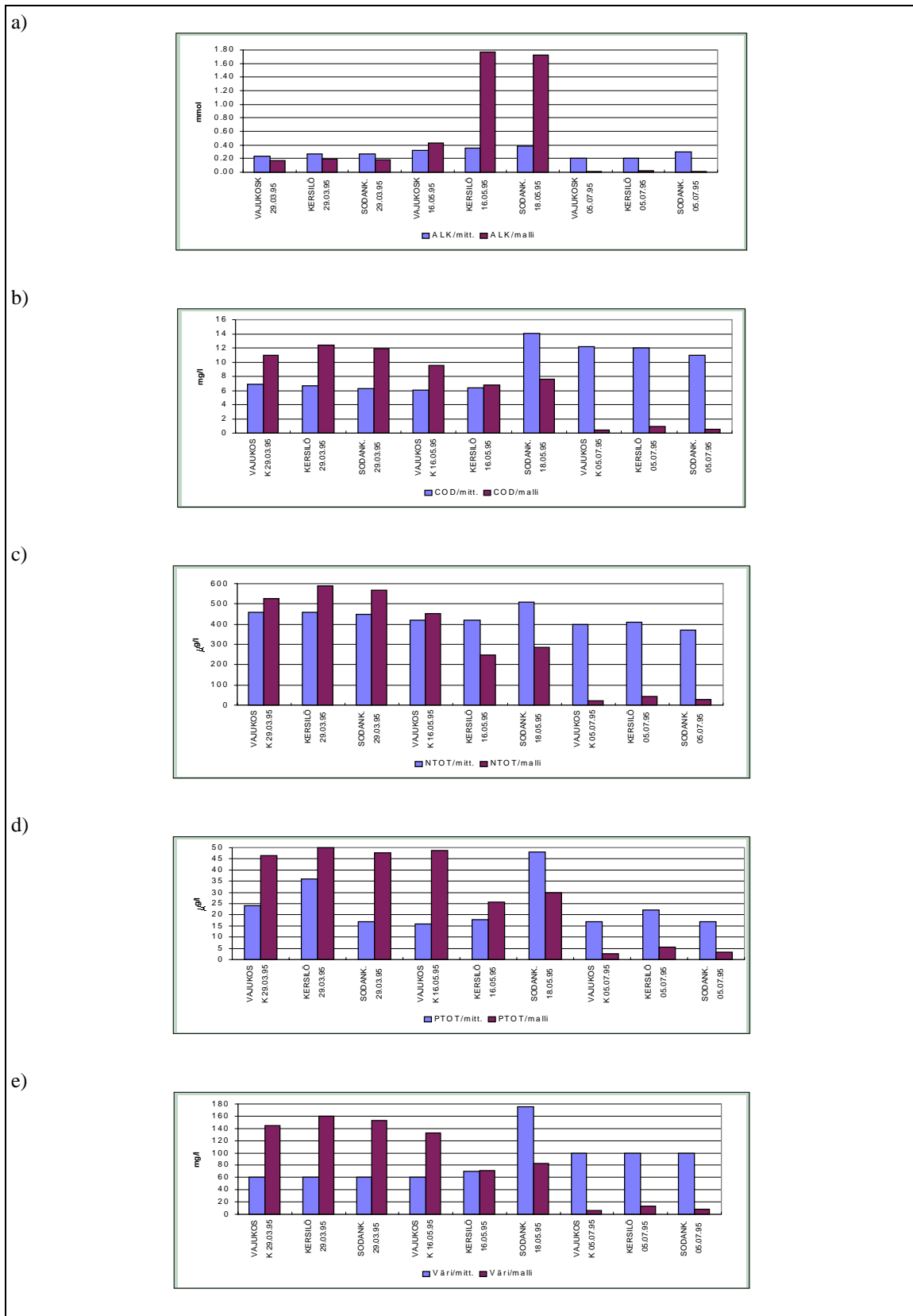
6.2 Malliajojen luotettavuus

Kuvassa 11 on esitetty veden laadun näytteistä mitatut analyysitulokset ja vastaavien vedenlaatuusureiden arvot jokimallin avulla laskettuina. Sivuvallun ja sivujokien tulopitoisuuksiin ei ole kiinnitetty vertailuissa juurikaan huomiota. Tämän takia varsinkin kesällä voimalan pienten juoksutusten aikainen alhainen automaattisesti mitattu lähtöpitoisuus ei selitä lainkaan alemmaa joesta mitattuja pitoisuuksia (kuva 11). Talvella runsaiden juoksutusten aikana taas automaattimittarin lähtöarvoista päädytään osin yliarvioituihin tuloksiin. Mitatuista juoksutuspitoisuuksista johdetut arvot ja sivutulovesien vaikutus näyttävät yleisimmin olevan tasapainossa keskenään tulvakaudella toukokuussa. Sivutulovesien vaikutusten tarkentamista tarvitaan lisäämään mittausten ja laskelmien merkitystä. Siihen voidaan edetä joko valuma-aluealuelaskelmia soveltaen, niitä vastaavin päätelmin taikka lisäämällä automaattimittareita edustaviin sivutulojokiin.

Tässä tapauksessa aineisto on liian niukka tilastollisten selitysteiden merkitykselliseen määrittämiseen, kun vertailutilanteita ja -kohtia on vähän. Yhtäpitävyyden (tai poikkeamien) suuruussuhteita havainnollistetaan sen sijasta taulukossa 6 vertaamalla mittaus- ja laskentatulosten erotuksen itseisarvojen keskiarvoa suurimman ja pienimmän havainnon erotukseen eli mittaustulosten vaihteluväliin.

Taulukko 6. Mittaustulosten ja mallilla laskettujen tulosten keskimääräiset poikkeamat toisistaan ja mittaustulosten vaihteluvälit.

Muuttuja	Mittaustulosten ja mallilla laskettujen tulosten keskimääräinen ero		Mittaustulosten vaihteluväli
Alkaliniteetti (mmol)	0,32	>	0,19
Kemiallinen hapenkulutus (mg l ⁻¹)	9,25	>	7,95
Typpi(µg l ⁻¹)	288,05	>	140,0
Fosfori (µg l ⁻¹)	17,15	<	32,0
Väri (mg l ⁻¹)	92,65	<	115,0



Kuva 11. Veden alkaliniteetin (a), kemiallisen hapenkulutuksen (COD) (b), kokonaistypen (NTOT) (c), kokonaisfosforin (PTOT) (d) ja värin (e) analyysitulokset sekä niitä vastaavat arvot Kitisen vedenlaatu- ja virtausmallin avulla laskettuna.

7. Yhteenveto ja johtopäätökset

7.1 Yhteenveto

Jatkuvatoiminen mittausjärjestelmä vedenlaadun ja ainetaseiden seurantaan on automaattisen mittaustekniikan, tiedon siirto- ja hallintamenetelmien sekä järjestelmän käyttöönottotietopakettien yhdistelmä. Kehitystyön tuloksena on luotu kaksi tuotetta.

Tuote 1:

Automaattinen ja jatkuvatoiminen veden laadun mittauslaitteisto. Mittauslaitteisto kootaan kullekin mittauspaikalle tarvittavista antureista ja analysointilaitteista (esim. happi-, kiintoaine- ja ravinnepitoisuudet sekä pH, redox-potentiaali ja sähkönjohtavuus) sekä niiden mittauksen ohjaukseen tarvittavista oheislaitteista ja ohjelmistoista. Mittaustiedon laadun varmistus ja mittausvälineiden huolto tulee varmistaa. Tuotteen käyttöönotto uuteen kohteeseen vaatii laitteiston testauksen.

Tuote 2:

Tuote sisältää vedenlaadun mittauslaitteiston, vesistön vedenlaatumallin sekä voimalaitosten tulovirtaamaennustemallin.

Kehitettävällä järjestelmällä on käyttökohteita ulkomaisten (esim. Kanada, Ruotsi, Norja ja Venäjä) tekoaltaiden alapuolisten vesistöjen vedenlaadun tarkkailussa ja ohjauksessa. Sitä voidaan markkinoida kohteeseen modifioitavana tuotteena. Järjestelmää voidaan soveltaa muihinkin koti- ja ulkomaisiin ympäristövaikutusten arviointi- ja seurantaan projekteihin (mm. turve- ja metsäteollisuuden hankkeisiin).

7.2 Johtopäätökset

Automaattisen vesistöseurannan esteenä 1970- ja 1980-luvulla olleet tiedonsiirto- ja tiedontallennusongelmat voidaan hallita nykyisen tietoliikennetekniikan avulla. Minimoimalla mittauksiin liittyvät ulkoiset häiriötekijät saadaan vesistöseuranta riittävän luotettavalle tasolle. Lisäksi mittauksen luotettavuus tulee varmistaa perinteisten laboratorioanalyysien avulla. Kehittämällä automaattista vesistöseurantaan entistä kattavammaksi voidaan perinteistä vesistöseurantaan keventää. Mittalaitteiden tarkkuus tuskin koskaan ylittää vesinäytteiden laboratorioanalyysien tasolle, mutta eron käytännön merkitys saattaa edelleen kaventua.

Suomen luonnonvesien ravinnepitoisuudet ovat monien muiden teollisuusmaiden luonnonvesiin verrattuna alhaisia. Nykyisin Suomen olosuhteisiin soveltuvat automaattiset mittalaitteet ovat kalliita. Lisäksi laitteiden ravinteiden erotusherkkyys ei aina ole riittävä.

Mitatut vedenlaatuomuttajat valittiin ensi sijassa teknistaloudellisten näkökohtien perusteella. Laajempaa automaattista vesistöseurantaä kehitettäessä tulee tarkoin pohtia sitä, mitkä vedenlaatuomuttajat ovat kussakin tapauksessa kaikkein tärkeimmät. Lähes kaikki mitattavat suureet voidaan valtaosin suoraan sisällyttää laskettaviksi, mutta usein muita muuttujia pidetään niiden sijasta laskettaviksi kiintoisampina.

Automaattista vedenlaadun mittauslaitteistoa tulisi kehittää siten, että toimivuuden edellyttämät säännölliset huollot ja kalibroinnit saataisiin mahdollisimman vähäisiksi. Laitteistojen limoittuminen, likaantuminen ja jäätyminen heikentävät mittausten luotettavuutta. Säännöllinen ja riittävä huolto sekä kalibrointi käsitöinä ovat usein kalliita toteuttaa ja siten osaltaan vähentävät automaation edullisuutta.

Mittausjärjestelmään liitetillä jokimallilla pystytään mallintamaan Porttipahdan voimalaitoksen alapuolisen joen ravinnepitoisuuksien kehittymistä silloin, kun sivutulovesien vaikutus on tasapainossa juoksutuksesta mitattujen lähtöarvojen kanssa. Malli on kehitelty siten, että sivujoista tulevien vesien määrä otetaan huomioon niiden alapuolisten voimalaitosten virtaamisissa. Tämä aiheuttaa sen, että sivujokien pääuomaa laimentava vaikutus jää mallissa huomiotta, jolloin mallilla lasketut ravinnepitoisuudet (typpi ja fosfori) ovat keväällä liian suuret ja kesällä liian pienet. Jokimallia on syytä kehittää siten, että sivujokien vaikutus laskelmiin otetaan huomioon.

Lähdeluettelo

Bilaletdin, Ä., Frisk, T. & Huttula, T. 1993. Roineen vedenottoalueen veden laadun riippuvuus lähivaluma-alueen kuormituksesta ja Längelmäveden veden laadusta. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja Nro 512. 56 s.

Chow, V. T. 1973. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Company, International Edition. 680 s.

Ekholm, P. 1994. Bioavailability of phosphorus in agriculturally loaded rivers in southern Finland. *Hydrobiologia*, 287, s. 179 - 194.

Energiatilastot 1993. Tilastokeskus. *Energia* 1994:1.

Franco, A. B. & Almeida, A. B. de 1991. Numerical simulation of abrupt front waves in steep slope channels. *Computational Hydraulics and Hydrology*, Vol. 2, Computational Mechanics Publications. 63 s.

Haapamäki, J. 1993. Malli hiilen kierrosta avovesisysteemin ravintoverkossa. Loppuraportti Suomen Akatemian Pohjanlahti-projektiin. Oulun yliopisto, kasvitieteen laitos, Oulu. 70 s.

Heiskanen, M. 1993. Pelagiaalin ravintoverkko koillisella Perämerellä. Lisensiaattitutkimus. Oulun yliopisto, eläintieteen laitos.

Hellsten, S., Virtanen, M., Nenonen, O., Kinnunen, K. & Riihimäki, J. 1993. Sources of nutrients and organic matters in Northern reservoirs. *Water Science and Technology* 28, s. 85 - 94.

Hellsten, S. & Riihimäki, J. 1995. Effects of lake water level regulation on the dynamics of aquatic macrophytes in northern Finland. Käsikirjoitus, lähetetty julkaistavaksi.

Hellsten, S., Riihimäki, J., Keränen, R. & Alasaarela E. 1995. Too dense or too sparse littoral vegetation - an experimental management study of aquatic weeds in regulated lakes of northern Finland. Käsikirjoitus, lähetetty julkaistavaksi.

Inkala, A. 1995. Vuotoksen tekojärvestä alapuoliseen vesistöön aiheutuvan rehevyyden määrittäminen, Osa 3. Uusien menetelmien soveltaminen kesän 1994 ja Vuotoksen vaikutusten uusimpiin tuloksiin. KEVE-raportti 9C, Suomen Ympäristövaikutusten Arviointikeskus Oy, Espoo. 21 s.

Itkonen, J. 1995. Lokan ja Porttipahdan ravinnepitoisuuksien ja -suhteiden kehittyminen sekä arvio suunnitellun Vuotoksen altaan aiheuttamasta kesäaikaisesta kokonaistyyppi-, ammoniumtyppi-, nitraattityppi- ja fosfaattifosforikuormituksesta. Moniste, Lapin ympäristökeskus, Rovaniemi. 23 s.

Itkonen, J. 1996. Lausunto Vuotoksen altaan veden laadun kehittymisestä sekä altaan vaikutuksesta Kemijoen, Kemijärven ja Perämeren tilaan. Vuotoksen Katselmuskirja, osa 12, Rovaniemi. 185 s.

Järvinen, M., Porra, H., Savolainen, M. & Väisänen, T. 1996. VMM-tietokanta ja sen päivitys 1995. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 383. Julkaisematon.

Kemijoki Oy:n vuosikertomus. 1996.

Keränen, M. 1994. 3D-hiilenkiertomalli vesiekosysteemille. Oulun yliopisto, biofysiikan laitos, Oulu. 81 s. [Three-dimensional carbon cycle model for water ecosystems. Master's Thesis (in Finnish). University of Oulu, Department of Biophysics. Publications of EIA, Series D:5, Oulu. August 1994. 75 p.]

Kohonen, T. 1985. Availability of automatic water quality monitoring for Finnish watercourses. Publications of the Water Research Institute, National Board of Waters, Finland, 62, s. 3-19.

Lepistö, L. & Pietiläinen, O.-P. 1996. Kasviplanktonin määrän ja koostumuksen muutokset Lokassa, Porttipahdassa ja Kemijärvessä. Suomen ympäristö 13, Suomen ympäristökeskus, Helsinki. 77 s.

Malve, O. 1992. Virtaukset ja kulkeutuminen avouomassa. Luku 13.2. teoksessa Hyödyn ja vahingon arviointi vesitaloudessa (toim. Äijö, H., Siivola, L. ja Vakkilainen, P.). TKK, rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, vesitalouden laboratorio, 1992-1. Tammer-Linkki Oy, Tampere. S. 247 - 262.

Malve, O., Ekholm, P., Kirkkala, T., Huttula, T. & Krogerus, K. 1994. Säskylän Pyhäjärven ravinnekuormitus ja rehevyystaso. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja -sarja A:181. 108 s.

Peura, P., Inkinen, M. & Alasaarela, E. 1994. The three stages of automatic monitoring of waterbodies. Aqua Fennica 24, 1, s. 69 - 82.

Pietiläinen, O.-P. & Pirinen, M. 1997. Typpi- ja fosforikuormituksen vaikutus perifytonin kasvuun Kymijoenlaaksoilla. Suomen ympäristö 100. 50 s.

Rantajärvi, E. & Leppänen, J.-M. 1994. Unattended Algal Monitoring on Merchant Ships in the Baltic Sea. Finnish Institute of Marine Research. 60 s.

Riihimäki, J., Yrjänä, T. & van der Meer, O. (1996). Lyhytaikaissäädön elinympäristövaikutusten arvioimismenetelmät. - Suomen ympäristö 4. Luonto ja luonnonvarat. 94 s.

Rintala, J. & Örn, P. 1996. Jokiuomien poikkipintojen pelkistetty luonnehtiminen. Oulun yliopisto, Fysiikaalisten tieteiden laitos, Biofysiikka, Projektityö. 20 s.

Salonen, K, Sarvala, J., Järvinen, M. & M. B. S. Kissaka. In vivo fluorescence of chlorophyll a in lake Tanganyika.

Salonen, S., Frisk, T., Kärmeniemi, T., Niemi, J., Pitkänen, H., Silvo, K. & Vuoristo, H. 1992. Fosfori ja typpi vesien rehevöittäjänä - vaikutusten arviointi. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja nro 96 - sarja A. 139 s.

Virtanen, M., Hellsten, S., Koponen, J., Riihimäki, J. & Nenonen, O. 1993. Pohjoisten tekojärvien veden laadun laskenta mittauksilla varmistettuna (Water Quality Model of Northern Reservoirs and its Validation with Field Measurements, in Finnish with English Abstract). Technical Research Centre of Finland VTT, Research Notes 1525, Espoo, 1993, 205 s. + liitt. 15 s.

Virtanen, M., Koponen, J., Hellsten, S., Nenonen, O. & Kinnunen, K. 1994. Principles for calculation of transport and water quality in strongly regulated reservoirs. Ecological Modelling 74, s. 103 - 123.

Virtanen, M. 1995. Vuotoksen tekojärvestä alapuoliseen vesistöön aiheutuvan rehevyyden määrittäminen, Osa 2. Rehevyyden laskentamenetelmiä vuosilta 1993 - 94. KEVE-raportti 9B, YVA Oy, Espoo. 32 s.

Virtanen, M., Koponen, J. & Hellsten, S. 1996. Tarkennuksia ja täydennyksiä KEVE-projektin loppuraporttiin (Further Focusing and Completion of the KEVE Project Final Report, in Finnish). Suomen Ympäristövaikutusten Arviointikeskus Oy (YVA) ja VTT, Tutkimusselostus, Espoo. 221 s.

Väisänen, T. 1994. Esiselvitys vesistö tutkimukseen liittyvistä anturi- ja analysointitekniikoista. VTT Yhdyskuntatekniikka. Julkaisematon. 9 s.

Väisänen, T., Pietiläinen, A., Miettinen, J., Virtanen, M. & Nenonen, O. 1996. Kokemuksia limoittumisen mittauksesta Kemijoen Valajaskoskella - esitutkimus. VTT

Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 330. Julkaisematon/luottamuksellinen. 13 s. + 9 liitettä. Summary in English.

Väisänen T., Juntura E. & Savolainen, M. 1996. Automaattinen klorofyllimittaus Porttipahdan tekojärvellä kesällä 1995. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 381. Julkaisematon.

Ylinen, H. 1994. Jokiverkon virtausten yksiulotteinen laskenta. Teknillinen korkeakoulu, materiaalifysiikan erikoistyö/ YVA E:14, Espoo. 21 s.