

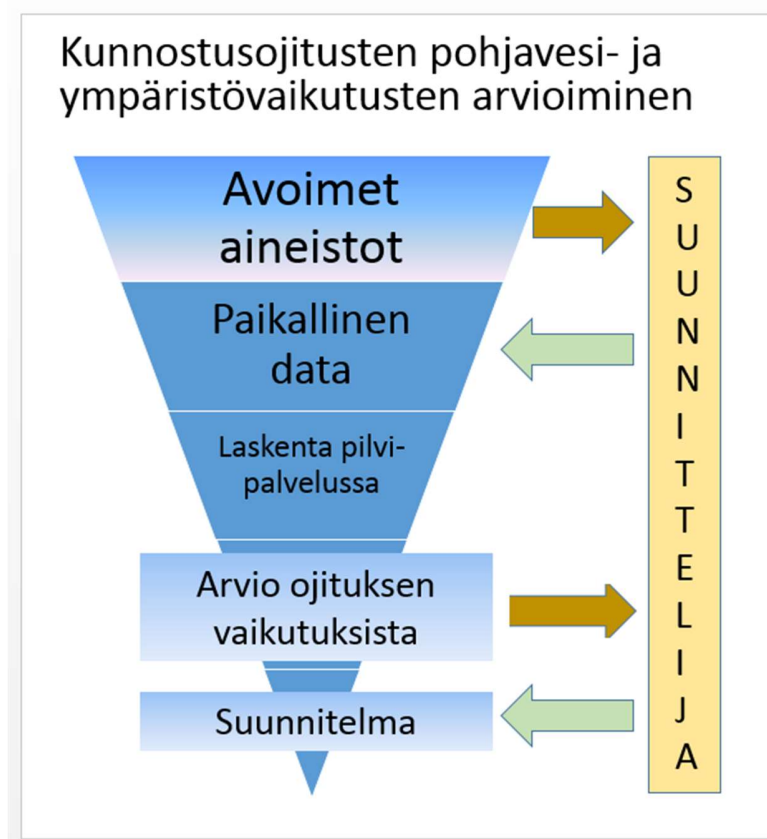
Metsätalous pohjavesialueilla

KUNNOS II

Toimintamalli kunnostusojitusten pohjavesivaikutusten arviointiin

Hyypän ja Karhukankaan alueen mallit

Pilvipalvelukonseptin testaus



Sisällysluettelo

Sisällysluettelo	1
1 Johdanto	3
1.1 Taustaa.....	3
1.2 Mallinnusosion tarkoitus ja tavoitteet.....	4
2 Aineistot ja menetelmät.....	7
2.1 Avoimet aineistot	7
2.2 Projektin kohdealueet	8
2.2.1 Patamäen pohjavesialue.....	9
2.2.2 Ekokankaan alue	14
2.2.3 Hyypän alue.....	18
2.2.4 Karhukankaan alue	20
2.3 Pilvipalvelu.....	24
3 Menetelmät	25
3.1 Pinta- ja pohjavesimallin muodostaminen kohdealueille.....	25
3.1.1 Mallin muodostaminen avoimien aineistojen avulla	25
3.1.2 Mallinnusalueen rajausta	25
3.1.3 Malli- vai datakeskeinen tarkastelu?	25
3.1.4 Pinta- ja pohjavesimallin laskentaverkko.....	26
3.1.5 Kallionpinnan korkeusmalli.....	26
3.2 Pohjavesimallin kalibrointi	27
3.2.1 Sääaineistot ja lumimalli	27
3.2.2 Kallionpinnan korkeusmalli.....	27
3.2.3 Maakerrosten ominaisuudet.....	28
3.2.4 Mallin reunaehdot	28
3.2.5 Automaattinen kalibrointi.....	28
4 Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	29
4.1 Pohjavesimallin tulokset eri alueilla	29
4.1.1 Patamäki.....	29
4.1.2 Ekokangas.....	33
4.1.3 Hyypän alue.....	36
4.1.4 Karhukankaan alue	39
5 Mallien soveltaminen kunnostusojitusten pohjavesi-vaikutusten arvioinnissa.....	41
5.1 Patamäki.....	41
5.2 Ekokangas	46
5.3 Hyypän ja Karhukankaan alueet	48

6	Yhteenveto ja johtopäätökset	50
6.1	Yhteenveto	50
6.2	Johtopäätökset	51
6.3	Ehdotus jatkotoimenpiteiksi.....	52
	Viitteet.....	53

1 Johdanto

1.1 Taustaa

Pohjavesialueilla harjoitetaan laajasti metsätaloutta. Toimintaa varten on laadittu vesien-suojelusuositukset (Joensuu ym. 2013) varmistamaan, miten metsätaloutta voidaan harjoittaa aiheuttamatta pohjavesien pilaantumista. Suositukset on laadittu käytännön kokemuksiin ja päättelyyn perustuen. Asiantuntijoiden mukaan metsätalous on turvallisimpia maankäyttömuotoja pohjavesialueilla. Tämä voidaan päätellä jo siitäkin, että pohjavedet ovat edelleen hyvässä tilassa, vaikka pohjavesialueilla on harjoitettu pitkään metsätaloutta. Metsätaloustoimenpiteiden vaikutuksista, erityisesti, kunnostusojituksen vaikutuksista varsinaisilla pohjavesialueilla on erittäin vähän tutkimus- tai seurantatietoa. Lupien myöntäminen metsätaloustoimenpiteille perustuukin tästä syystä varovaisuusperiaatteen noudattamiseen. Jonkin verran tutkimustietoa löytyy hakkuiden vaikutuksista pohjavesiin (esim. Kubin 2013 ja Piirainen 2013), mutta seuranta on yleensä toteutettu normaalilla metsämaalla, jossa pohjamaa on moreenia. Luonnonvarakeskus on muutamilla hakkuu- ja energiapuukorjuun seuranta-alueilla tutkinut metsätaloustoimenpiteiden vaikutuksia maaveteen. Varsinaisilta pohjavesialueilta seuranta kuitenkin paria esimerkkiä (Rusanen 2002, Piirainen 2013) lukuun ottamatta on vähäistä (Joensuu 2017).

Metsätalous pohjavesialueilla Tapion Oy:n käynnistämä hanke, jonka tarkoituksena on ollut keskustella kunnostusojituksen mahdollisuuksista pohjavesialueilla. Hankkeella luodun yhteistyöverkoston avulla tavoitteena on ollut parantaa metsätaloustoimijoiden ja talousvesistä vastaavien toimijoiden sekä viranomaisten välistä kanssakäymistä, vuoropuhelua ja yhteistyötä (Joensuu 2017).

Kunnostusojitus on merkittävin metsätaloustoimenpide, jolla katsotaan olevan vaikutusta pohjavesiin. Tästä syystä pohjavesialueiden rajaukset vaikuttavat erityisen paljon nimenomaan kunnostusojitussuunnittelijan työhön. Valtakunnan eri osissa käytännöt vaihtelevat, mutta pääsääntöisesti kunnostusojituksessa alueet rajataan varovaisuuden vuoksi siten, että ainakin I- ja II-luokan pohjavesialuerajauksen sisäpuolella vanhojenojien kunnostaminen on melko harvinaista. Monissa kohteissa kyse on metsäojien kunnostusojitusten toteuttamisesta nykyisin voimassa olevien pohjavesirajauksen sisällä. Alueet on aikanaan ojitettu 50-70-luvuilla ennen kuin nykyisiä pohjavesialueita oli edes rajattu. Pohjavesialueiden rajausta on tehty myöhemmin ja osa ojitusalueista on jäänyt pohjavesialueiden rajauksen sisään ja niiden kunnostusojitukseen ei ole helppo saada lupaa ilman, että arvioidaan kunnostusojitusten vaikutukset.

Alueet on rajattu pohjavesirajauksen ulkopuolelle joko ojitussuunnittelijan toimesta tai viimeistään siinä vaiheessa, kun suunnitelmaan liittyvä ojitusilmoitus on toimitettu alueelliseen ELY-keskukseen. Kun rajauksia tarkistetaan ELY-keskuksissa uuden luokituksen mukaisiksi, on tärkeää, että kartta- ja paikkatiedot ovat oikein rajauksen osalta. Samoin on tärkeää tietää, mitä rajauksen sisäpuolella saa tehdä ja mitä vaikutuksia rajauksilla on maanomistajien talouteen. Tiukentuvan ympäristölainsäädännön takia yhteiskunta ja viranomaiset tulevat vaatimaan tarkempia toimintasuunnitelmia ympäristölupia varten sekä mahdollisesti määräämään toimijoita kalliisiin puhdistustoimenpiteisiin pilaantuneilla maa-alueilla (Joensuu 2017).

Nykyinen, usein yleiseen varovaisuusperiaatteeseen perustuva käytäntö kunnostusojituksen suunnittelun rajaamisesta pohjavesialueen ulkopuolelle voi aiheuttaa merkittäviä tulonmenetyksiä yksittäiselle maanomistajalle, vaikka kansantaloudellisesti tarkasteltuna ongelma ei olisikaan suuri. Pohjavesialueiden pinta-ala on n. 4 % Suomen pinta-alasta ja tästä ojitusta kaipaavien alueiden osuus on melko pieni. Paikallisesti pohjavesialuerajaus voi olla merkittäväkin sellaisilla alueilla, joissa pohjavesialuerajaukset ovat laakeiden harjumuodostumien tai ns. piiloharjujen alueilla. Tällaisia alueita on muun muassa Pohjanmaalla. Esimerkkinä ovat Kauhajoen Hyypän alueella olevat pohjavesialuerajaukset. Pohjavesialuerajaukset käsittävät runsaat 12 000 hehtaaria, josta noin 5 000 hehtaaria on metsäojitettua. Käytännössä näillä alueilla usein koko tilan metsäpinta-ala ojitusalueineen on pohjavesialuerajauksen sisäpuolella (Joensuu 2017).

Metsätalous pohjavesialueilla-hankkeen yhteydessä järjestetyissä työpajoissa on keskusteltu mahdollisuudesta arvioida tai "mallintaa" kevyesti pohjavedenpintaa olemassa olevaa tietoa (metsävaratieto, maaperäkartta, korkeusmallit, laserkeilaus, lähteet ym) ja paikkatietoa hyödyntäen. Edelleen todettiin, että tapauskohtaisesti tarkasteluun voisi olla mahdollisuuksia, ja että yleisesti on tarve lisätä yhteistyötä ja tuottaa uutta tietoa (Joensuu 2017).

Tutkimustarpeita kuitenkin tunnistettiin esimerkiksi kunnostusojituksen mahdollisesti aikaansaamiin muutoksiin pohjavesimuodostuman vedenlaadussa mm. mahdollinen pintavesien imeytyminen huomioiden. Tietoa tarvitaan erityisesti humuksen ja fosforin osalta.

1.2 Mallinnusosion tarkoitus ja tavoitteet

Vesiensuojelun asiantuntija Samuli Joensuu Tapio Oy:stä esitti alun perin ajatuksen pohjavesimallien soveltamisesta metsätalouden kunnostusojitusten vaikutusten arviointiin. Tässä raportissa on esitelty uutta KUNNOS-toimintamallia, joka tähtää pohjavesimallien monipuoliseen hyödyntämiseen metsätalouden kunnostusojitusten vaikutusten arvioinnissa. KUNNOS on osa *Metsätalous pohjavesialueilla*-hanketta. KUNNOS-toimintamalli on toteutettu yhteistyöhankkeena Tapio Oy:n ja WaterHopen kesken. Tapiosta hanketta on johtanut Samuli Joensuu ja WaterHopen työhön osallistui tekn. tri Tuomo Karvonen. Toimintamallin ideointi tehtiin yhteistyönä ja mallinnuksen toteutuksesta vastasi WaterHope.

Metsätalous pohjavesialueilla-hankkeen yhteydessä on todettu, että sopivien pohjavesialueilla sijaitsevien kunnostusojituksen seuranta- ja tutkimusalueiden löytäminen on haastavaa ja lisäksi alueita tarvittaisiin useista erilaisista pohjavesimuodostumatyypeistä. Ojituksen vaikutukset voivat eri puolella Suomea ja erilaisilla muodostumatyypeillä vaihdella hyvin paljon, siksi yksittäisillä tutkimuksilla on hankala päästä yksityiskohtaiseen yleisesti sovellettavissa olevaan ohjeistukseen. Yksi vaihtoehto tapauskohtaisen ohjeistuksen laadinnan apuvälineiksi ovat pohjavesimallit, joilla voidaan arvioida kunnostusojituksen syvyyden ja ojavälin vaikutuksia pohjavedenpinnan käyttäytymiseen ja pohjaveden purkautumis- tai imeytymisolosuhteiden muutoksiin.

KUNNOS-toimintamallissa yhdistetään suunnittelijan ammattitaito, vapaasti ladattavat aineistot, toimijoiden hallussa olevat tapauskohtaiset tiedot ja pohjavesimallit (kuva 1-1). Suomessa on vapautettu viimeisten 10 vuoden aikana runsaasti aineistoja, joita pystytään hyödyntämään pohjavesimallien kehittämisessä. KUNNOS-toimintamallissa käytetään Suomen ympäristökeskuksen (SYKE), Maanmittauslaitoksen (MML), Ilmatieteen laitoksen (IL) ja Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) aineistoja. Tapauskohtaisia, toimijoiden itse keräämiä tietoja ovat esimerkiksi ojitusten toteutusajankohta ja -tapa, pohjavedenpinnan korkeushavainnot, turvekerosten paksuus, maalajitiedot ja kunnostussuunnitelmat. Toimintamallin kehittämisessä

sovelletaan datakeskeistä filosofiaa, missä malli on osa analyysivaihetta eikä se ole riippuvainen saatavissa olevasta aineistosta vaan mallia muokataan sen mukaan mitä aineistoa on käytettävissä.

Alla olevat osiot kirjoitetaan uudelleen ja lisätään Hyypän ja Karhukankaan alueiden esittely.

Metsätalouden kunnostusojitusten pohjavesivaikutuksia kuvaavan laskentamallin kohdealueiksi on valittu neljä erityyppistä aluetta, joilla metsätaloudella on merkittävä rooli. Patamäen pohjavesialue sijaitsee pääosin Kokkolan kaupungin alueella. Ekokankaan alue on osa Kauhavan, Alahärmän ja Ylihärmän kuntien alueilla sijaitsevaa pitkää harjujaksoa, johon kuuluvat Ekokankaan lisäksi Saunakangas ja Pöyhösenkankaan kolme esiintymää (A, B ja C). Hyypän alue sijaitsee Kauhajoella ja erityispiirteenä on se, että varsinaisen muodostumisalueen pinta-ala on pieni verrattuna koko alueen pinta-alaan. Hyypän mallinnusalueen sisällä on useita pohjavesiesiintymiä: Hyypänmäki, Lumikangas, Pahalähde, Harrinkangas, Hiukkakangas, Järvikangas A, B ja C ja Katikankangas. Karhukankaan alue sijaitsee myös Kauhajoella Hyypän alueen vieressä. Karhukankaan mallinnusalueen sisällä olevat esiintymät ovat Karhukangas I ja IIA, IIB ja IIC ja Kivistönkangas.

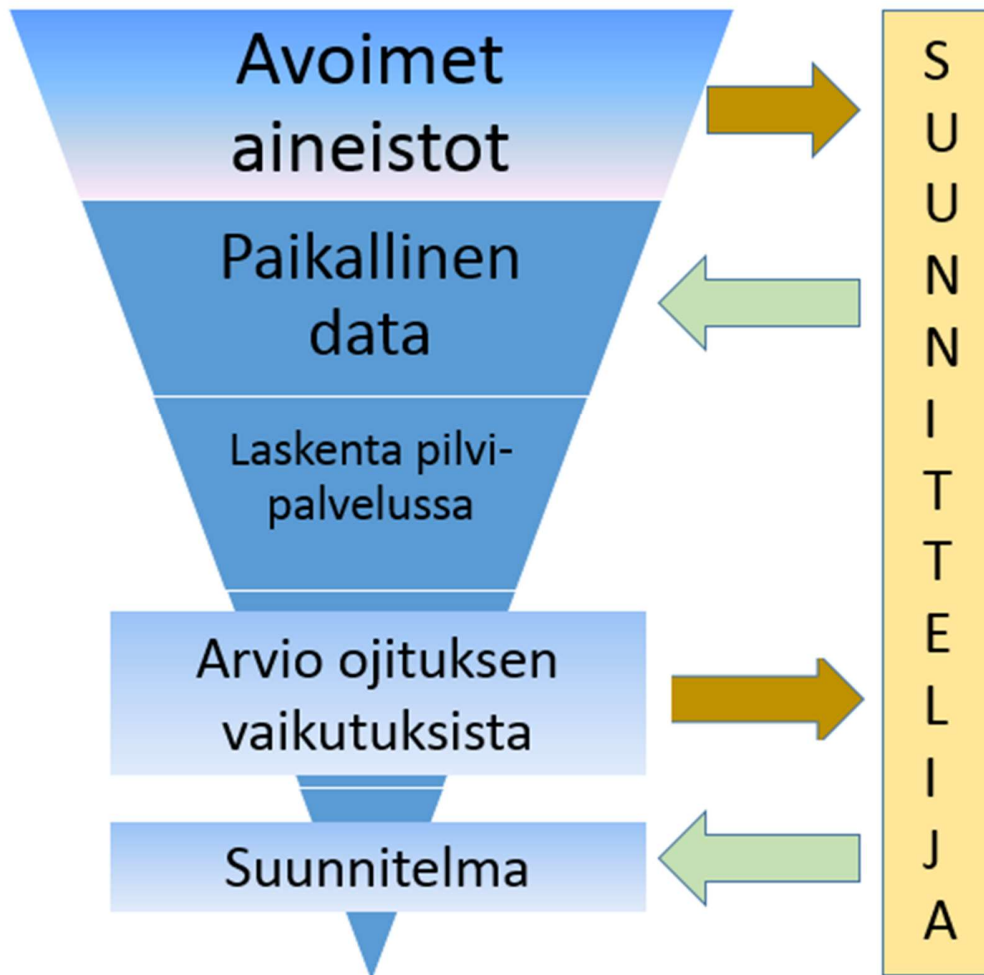
Tavoitteena oli valita mahdollisimman erilaisia alueita mallin testausta varten. Patamäen alueella on vain yksi luokiteltu pohjavesiesiintymä, mutta muissa kohteissa mallinnusalueen sisällä on useita pohjavesiesiintymiä. Hyypän ja Karhukankaan alueilla pohjavesiesiintymän reuna-alueiden sisällä on erittäin paljon ojitettuja alueita. Kohdealueilla on sekä purkavia, että kerääviä esiintymiä ja osa alueista pohjavesi on paineellista. Näillä perusteilla valittuja kohdealueita voi pitää erittäin edustavana otoksena arvioitaessa kunnostusojitusten vaikutuksia.

Aikaisempia KUNNOS-hankkeen kaltaisia projekteja on vähän. Suomen ympäristökeskus (SYKE) on toteuttanut koko Suomen laajuisen hydrologiaa simuloivan WSFS-mallin (Vehviläinen, 1994) mutta se toimii karkeammalla valuma-aluemittakaavalla eikä sillä voida suoraan arvioida valuma-alueen sisällä tapahtuvia prosesseja, kuten veden virtausta ja aineiden kulkeutumista pohjavesialueilla.

Pilvipalvelu

Suomessa ei ole toistaiseksi julkistettu ohjelmistoa, joka yhdistää avoimet ympäristöaineistot, käyttäjän omat aineistot ja hydrologiset laskentamallit laskentakehikkoon, jota voitaisiin käyttää pilvialustalta käsin. WaterHope ja Gain Oy ovat yhdessä kehittäneet prototyypin järjestelmästä, jossa laskenta tapahtuu pilvipalvelussa ja ohjelmistoa voidaan käyttää asiakkaan omalla työasemalla. KUNNOS II-hankkeessa on tarkoitus testata em. yritysten kehittämää pilvipalvelu-ohjelmistoa kunnostusojitusten vaikutusten arvioinnissa. Pilvipalvelun avulla avoimia aineistoja ja laskenta-ohjelmistoja ei tarvitse asentaa käyttäjien koneelle vaan ne tallennetaan pilvialustalle. Ohjelmiston ja aineistojen päivitys tehdään vain kerran ja muutokset siirtyvät saman tien kaikille käyttäjille. Vuoden 2018 tehdään ensimmäiset kokeilut ohjelmiston soveltuvuudesta kunnostusojitusten vaikutusten arviointiin ja näiltä osin projektia jatketaan vuoden 2019 aikana.

Kunnostusojitusten pohjavesi- ja ympäristövaikutusten arvioiminen



Kuva 1-1. KUNNOS-toimintamallin kaavio pohjavesimallien hyödyntämisestä metsätalouden kunnostusojitusten vaikutusten arvioinnissa. Toimintamallin muutos KUNNOS I-hankkeeseen verrattuna on se, että laskenta toteutetaan pilvipalveluna eikä ohjelmistoa tarvitse asentaa käyttäjän omalle koneelle.

2 Aineistot ja menetelmät

2.1 Avoimet aineistot

Suomessa on viimeisten kymmenen vuoden aikana toteutettu useita palveluita, joilta käyttäjä voi ladata julkaistua avointa tietoa. Osaan avoimesta tiedosta on kehitetty käyttöliittymät, joiden avulla käyttäjä voi suoraan selata ja ladata tietoa. Toisiin aineistoihin on julkaistu vain verkkorajapintoja, joihin käyttäjän on tehtävä oma latausjärjestelmä.

Avoimien aineistojen lataus- ja tiedonselauspalveluita, joihin on kehitetty käyttöliittymät:

- Maanmittauslaitoksen (MML) avoimien aineistojen tiedostopalvelu: korkeusmallit, laserkeilausaineisto, maastotietokanta, maastokartat ja ilmakuvat
- Hertta (SYKE): Ympäristötiedon hallintajärjestelmä (vesivarat, pintavesien tila, pohjavedet, eliölajit, ympäristön kuormitus)
- Karpalo (SYKE): Selauspalvelu ympäristöhallinnon paikkatietojen tarkasteluun
- Liiteri (Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu): Elinympäristön tieto- ja analyysipalvelu (rakennettua ympäristöä ja kaavoitusta koskevia paikka- ja tilastotietoja)
- Hakku (GTK): Geologiset tietotuotteet (paikkatieto, dokumentit): Pinta- ja pohjamaan maaperäkartat, kallioperän tiedot
- Lapio (SYKE): Karttakäyttöliittymä (maanpeite, luonnonriskialueet, geologia, hydrografia, korkeus, maankäyttö, suojellut alueet, ympäristön tilan seuranta)
- PaiTuli (Ilmatieteen laitos, Maanmittauslaitos, Liikennevirasto, Maaseutuvirasto, Tilastokeskus, SYKE): Yleinen paikkatietoaineistojen latauspalvelu

Avoimien aineistojen rajapintapalvelut, joihin on kehitettävä oma latausohjelma:

- GTK: Pinta-, pohjamaa- ja kalliokartat, kallioperä (pinta- ja syväkairaukset), purovesi-, purosedimentti- ja moreenikartoitukset
- SYKE: Valuma-aluejako, uomaverkosto, luonnonsuojelu- ja Natura-alueet, pohjavesialueet, CORINE-maankäyttöaineisto, tulvariskialueet, metsäkasvillisuusvyöhykkeet, hydrologiset havaintopaikat, kaukokartoitustuotteet (lumipeite ja -vesiarvo)
- Ilmatieteen laitos: sääasemien mittaukset, säätutkakuvat, säteilyhavainnot, meriveden korkeudet, ilmastomuutoskenaariot 30-vuotisjaksoille

Seuraavia avoimia aineistoja käytettiin Tapion pilottihankkeen kohdealueilla:

- Maanmittauslaitoksen korkeusmallit: 10x10 m² ja 2x2 m² resoluutiot
- Maanmittauslaitoksen maastotietokanta: uomat, järvet, kalliopaljastumat, maatalous-alueet, lähteet, tiet, autoliikenne-alueet, maa-aineksen ottoalueet, rakennukset
- SYKEN pohjavesirekisteri ja HERTTA-tietokanta: pohjavesialueiden rajaukset, pohjavesiputkien tekniset tiedot ja pohjavedenpinnan korkeushavainnot
- SYKE: CORINE-maankäyttöaineisto
- Ilmatieteen laitos: Ilman keskilämpötila, minimi ja maksimi lämpötila, sadanta

Päivittäinen potentiaalinen evapotranspiraatio arvioitiin vuorokauden minimi ja maksimi ilman lämpötilojen avulla Hargreavesin kaavalla (Hargreaves ja Samani, 1982).

Pilottihankkeessa käytetyn pohjavesimallin alueellisia lähtötietoja ovat:

- maanpinnan korkeusmalli (MML)
- kallionpinnan korkeusmalli (MML ja GTK)
- maalajit mieluiten 3D-kerroksina (rakennemalli tai putkikorttien perusteella tehtävä tulkinta)
- järvet ja lammet
- maankäyttörasteri (peltoalueet, taajamat, tiealueet, soranottoalueet)
- pintavesiuomien sijainti
- kunnostettavien uomien sijainti
- lähteiden ja kaivojen sijainti

2.2 Projektin kohdealueet

Metsätalouden kunnostusojitusten pohjavesivaikutuksia kuvaavan laskentamallin kohdealueiksi on valittu neljä erityyppistä aluetta, joilla metsätaloudella on merkittävä rooli. Alueet ovat:

1. Patamäen pohjavesialue, joka sijaitsee pääosin Kokkolan kaupungin alueella.
2. Ekokankaan alue, joka on osa Kauhavan, Alahärmän ja Ylihärmän kuntien alueilla sijaitsevaa pitkää harjujaksoa. Ekokankaan lisäksi harjujaksoon kuuluvat Saunakangas ja Pöyhösenkankaan kolme esiintymää (A, B ja C).
3. Hyypän alue Kauhajoella. Hyypän mallinnusalueen sisällä on useita pohjavesiesiintymiä: Hyypänmäki, Lumikangas, Pahalähde, Harrinkangas, Hiukkakangas, Järvikangas A, B ja C ja Katikankangas.
4. Karhukankaan alue sijaitsee Kauhajoella Hyypän alueen vieressä. Karhukankaan mallinnusalueen sisällä olevat esiintymät ovat Karhukangas I ja IIA, IIB ja IIC ja Kivistönkangas.

Tavoitteena oli valita mahdollisimman erilaisia alueita mallin testausta varten. Patamäen alueella on vain yksi luokiteltu pohjavesiesiintymä, mutta muissa kohteissa mallinnusalueen sisällä on useita pohjavesiesiintymiä. Hyypän ja Karhukankaan alueilla pohjavesiesiintymän reuna-alueiden sisällä on erittäin paljon ojitettuja alueita.

Patamäen alue: Patamäen esiintymä on pääasiassa purkava pohjavesiesiintymä ja vedenhankintaa varten tärkeä pohjavesialue.

Hyypän alue: Hyypänmäki, Lumikangas, Pahalähde, Harrinkangas ja Katikankangas ovat synkliinisiä eli vettä ympäristöstään kerääviä esiintymiä. Hiukkakangas, ja Järvikankaan esiintymät A, B ja C ovat purkavia eli antikliinisiä esiintymiä. Hyypänmäki, Lumikangas, Pahalähde, Harrinkangas ja Järvikangas B ovat vedenhankintaa varten tärkeitä pohjavesialueita. Katikankangas, Hiukkakangas, ja Järvikangas A ja C ovat vedenhankintaan soveltuvia pohjavesialueita.

Ekokankaan alue: Ekokangas, Saunakangas ja Pöyhösenkankaan esiintymät A, B ja C ovat kaikki purkavia esiintymiä. Ekokangas ja Pöyhösenkangas A ja B ovat vedenhankintaa varten tärkeitä pohjavesialueita. Saunakangas ja Pöyhösenkangas C ovat vedenhankintaan soveltuvia pohjavesialueita.

Karhukankaan alue: Karhukangas I on purkava esiintymä ja Karhukangas IIA, B ja C ja Kivistönkangas ovat kerääviä esiintymiä. Karhukangas I ja IIA ja Kivistönkangas ovat vedenhankintaa varten tärkeitä pohjavesialueita. Karhukangas IIB ja IIC ovat vedenhankintaan soveltuvia pohjavesialueita.

Patamäen alueelta on käytettävissä sekä GTK:n laatima rakennemalli (Paalijärvi ym. 2011), että alueelle laadittu pohjavesimalli (Okkonen ym. 2011). Kallionpinnan korkeusmalli ja maalajivyöhykkeet otettiin GTK:n tutkimuksista. Patamäen alueella on tehty kunnostusojitusta v. 2016 aikana.

Ekokankaan, Hyypän ja Karhukankaan alueilta ei toistaiseksi ole käytettävissä rakennemallia, joten kallionpinnan korkeusmalli jouduttiin laatimaan SYKEN pohjavesirekisteristä ja Maanmittauslaitoksen avoimista aineistoista ladattavien tietojen perusteella. Keskeisimmät käytetyt tiedot olivat havaintoputkien tekniset perustiedot (mm. kalliovarmennetut pisteet) ja maanmittauslaitoksen avoimista aineistoista ladatut kalliopaljastumien tiedot. Kallionpinnan korkeusmallin epätarkkuus on suurin yksittäinen epävarmuutta aiheuttava tekijä näillä kolmella alueella.

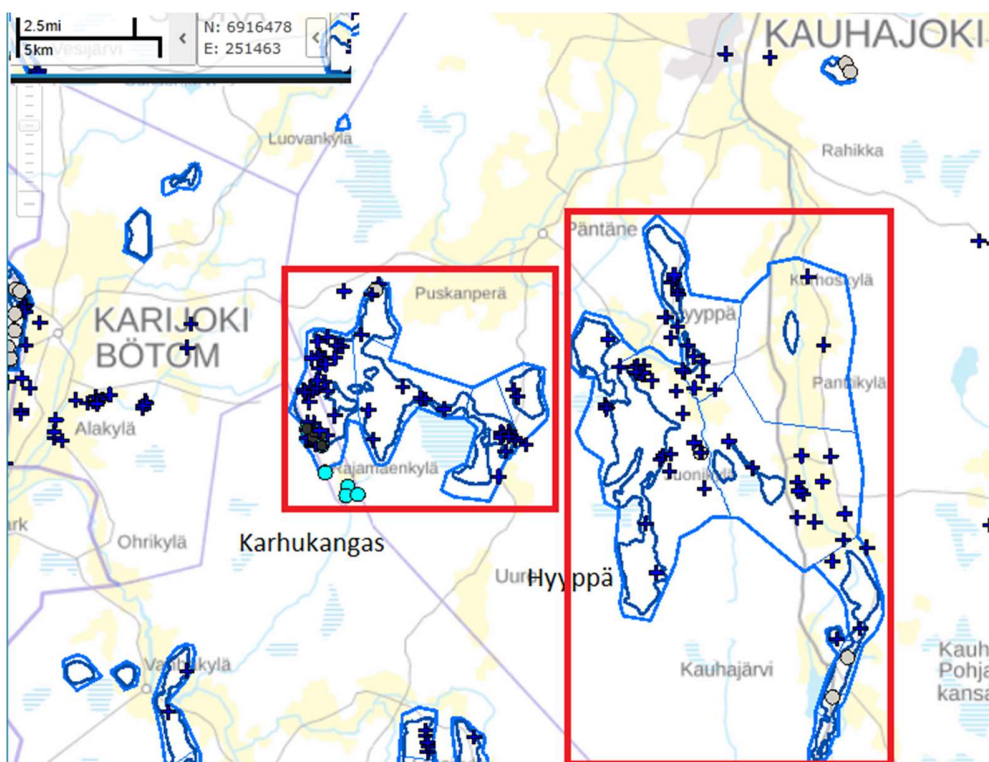
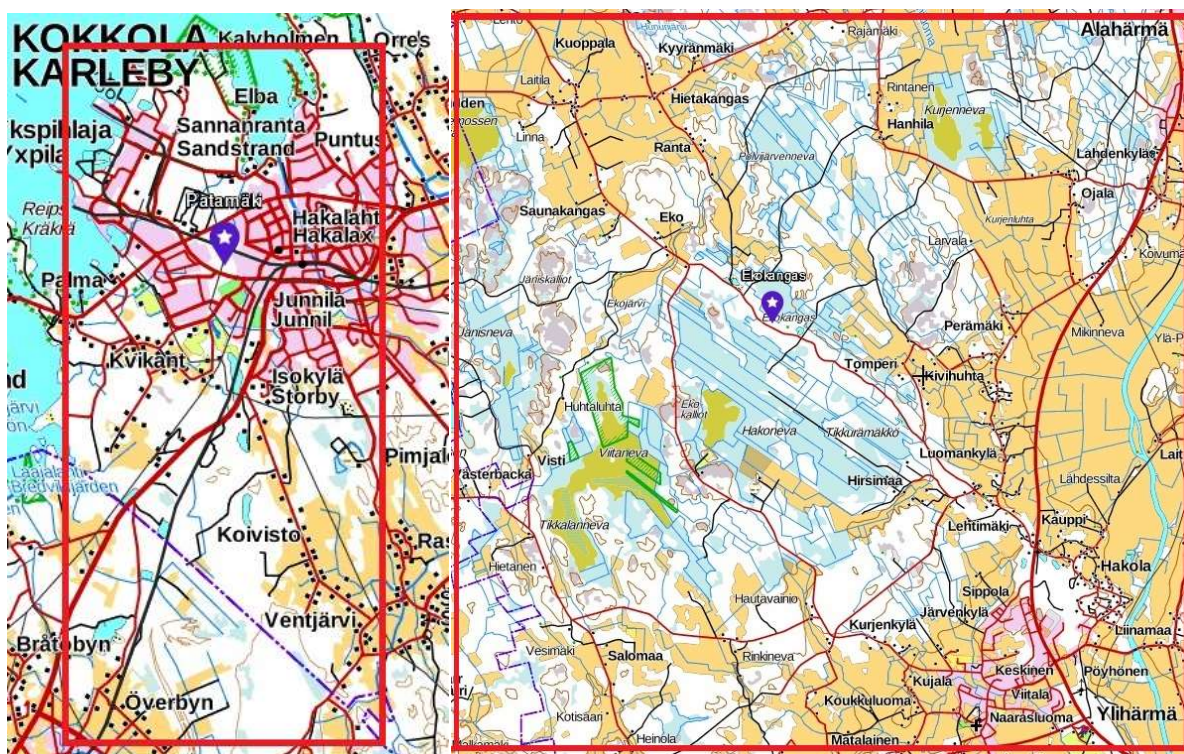
Kuvassa 2.1 on esitetty kaikkien kohdealueiden sijainti.

2.2.1 Patamäen pohjavesialue

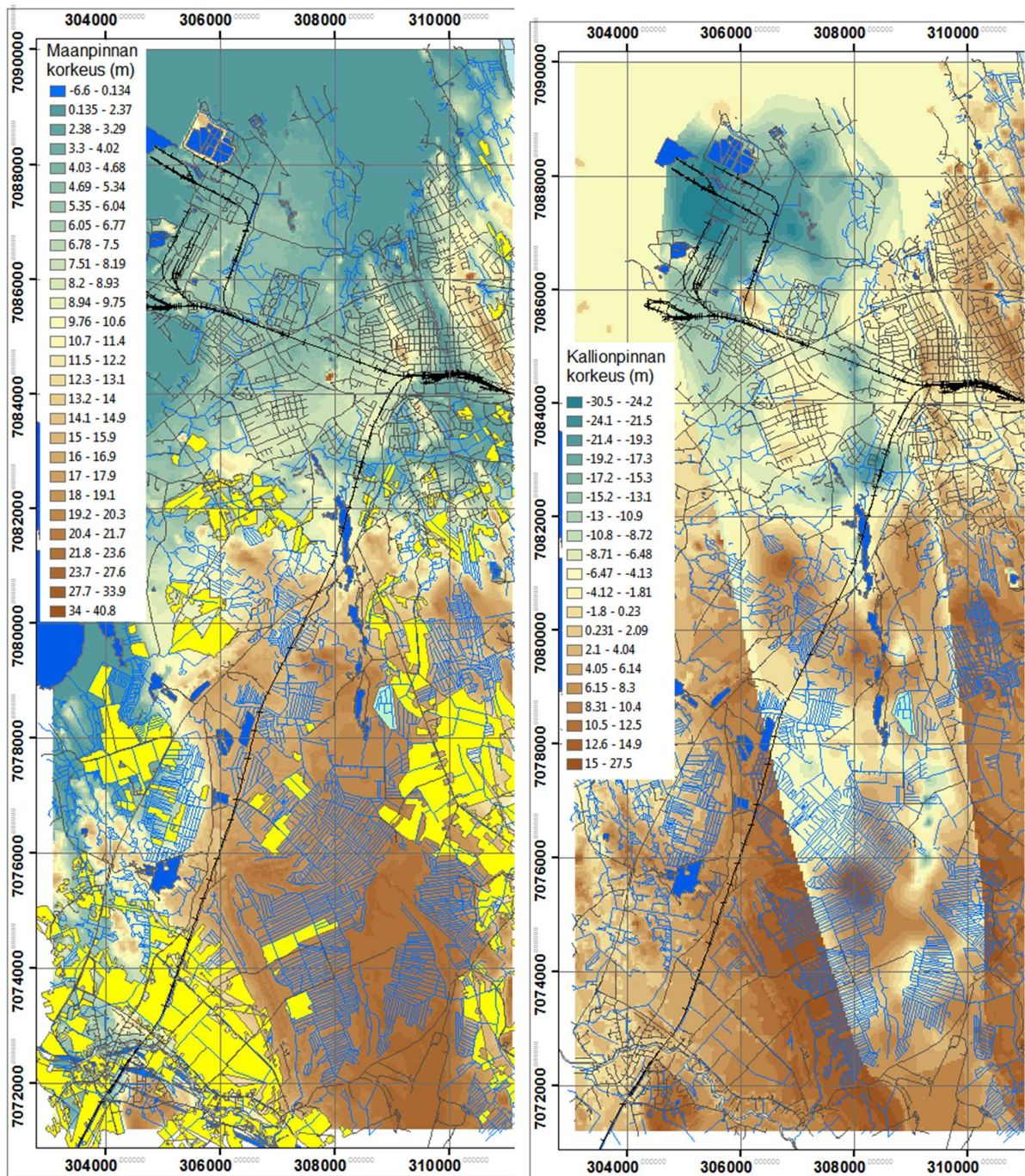
Patamäen pohjavesialue sijoittuu Kokkolan kaupungin ja Kruunupyyn kunnan alueelle. Patamäki on osa harjujaksoa, joka nousee pohjoisessa Pohjanlahdesta ja jatkuu Kruunupyyn ja Kaustisen kautta Veteliin saakka. Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus on määrittänyt pohjavesialueen kokonaispinta-alaksi 25,52 km ja muodostumisalueen pinta-alaksi 19,84 km². Pohjavettä alueella on arvioitu muodostuvan 11000 m³/vrk (POVET-tietojärjestelmä 2.2.2011). Patamäen pohjavesialueella sijaitsevat Patamäen, Saarikankaan ja Galgåsenin vedenottamot, joista jatkuvassa käytössä on ainoastaan Patamäen ja Saarikankaan vedenottamot. Patamäen vedenottamolta pumpataan keskimäärin n. 6350 m³/vrk ja Saarikankaalta 230 m³/vrk. Alueen pohjoisosassa sijaitsevat Kokkolan kaupunki- ja Ykspihlajan teollisuusalueet. Keski- ja eteläosaa hallitsevat metsä- ja peltoalueet. Maa-ainesten ottamisalueita ja pohjavesilammikoita on runsaasti. Huomattava osa alueesta on ojitettu. Tutkimusalueen keskiosan läpi kulkee VT8 (Okkonen ym. 2011).

Aiempien tutkimusten mukaan (Paalijärvi ym. 2011) Patamäen vedenottamon vaikutusalue ulottuu pohjoissuunnassa noin 2,5-3 kilometrin etäisyydelle. Etelään, itään ja länteen siirryttäessä vaikutusalue ulottuu noin 1-1,5 kilometrin etäisyydelle vedenottamosta. Vedenottamon valuma-alue vastaa suhteellisen hyvin pohjavesialueen nykyistä rajaa, lukuun ottamatta vedenottamon itäpuolta, missä vaikutusalue ulottuu mahdollisesti nykyisen pohjavesialuerajauksen ulkopuolelle (Paalijärvi ym. 2011 ja Okkonen ym. 2011).

Mallinnettavan alueen pinta-ala on n. 150 km² (8 x 18.8 km²), josta Patamäen pohjavesialueen osuus on n. 25 km² (kuva 2.3). Aluetta rajaa pohjoisessa ja lännessä merialue. Kuvassa 2.2 on esitetty maanpinnan korkeusrasterin lisäksi Patamäen mallinnusalueen rajaus, pintavesiuomien, järvien ja lampien, sekä teiden ja peltoalueiden sijainti (vasemmanpuoleinen kuva). Geologian tutkimuskeskus on tehnyt geologisia harjurakennetutkimuksia Patamäen harjualueella, Kokkolan Ykspihlajan ja Kruunupyyn lentokentän välisellä alueella ja näiden tutkimusten tuloksena käytettävissä oli kallionpinnan korkeusmalli myös Patamäen alueelle (Paalijärvi ym. 2011). Kallionpinnan korkeusmallia ei ollut käytettävissä digitaalisessa muodossa, joten se digitointiin Paalimäen ym. raportissa esitetyistä kuvista. Kallionpinnan korkeusmalli on esitetty kuvassa 2.2 (oikeanpuoleinen kuva).

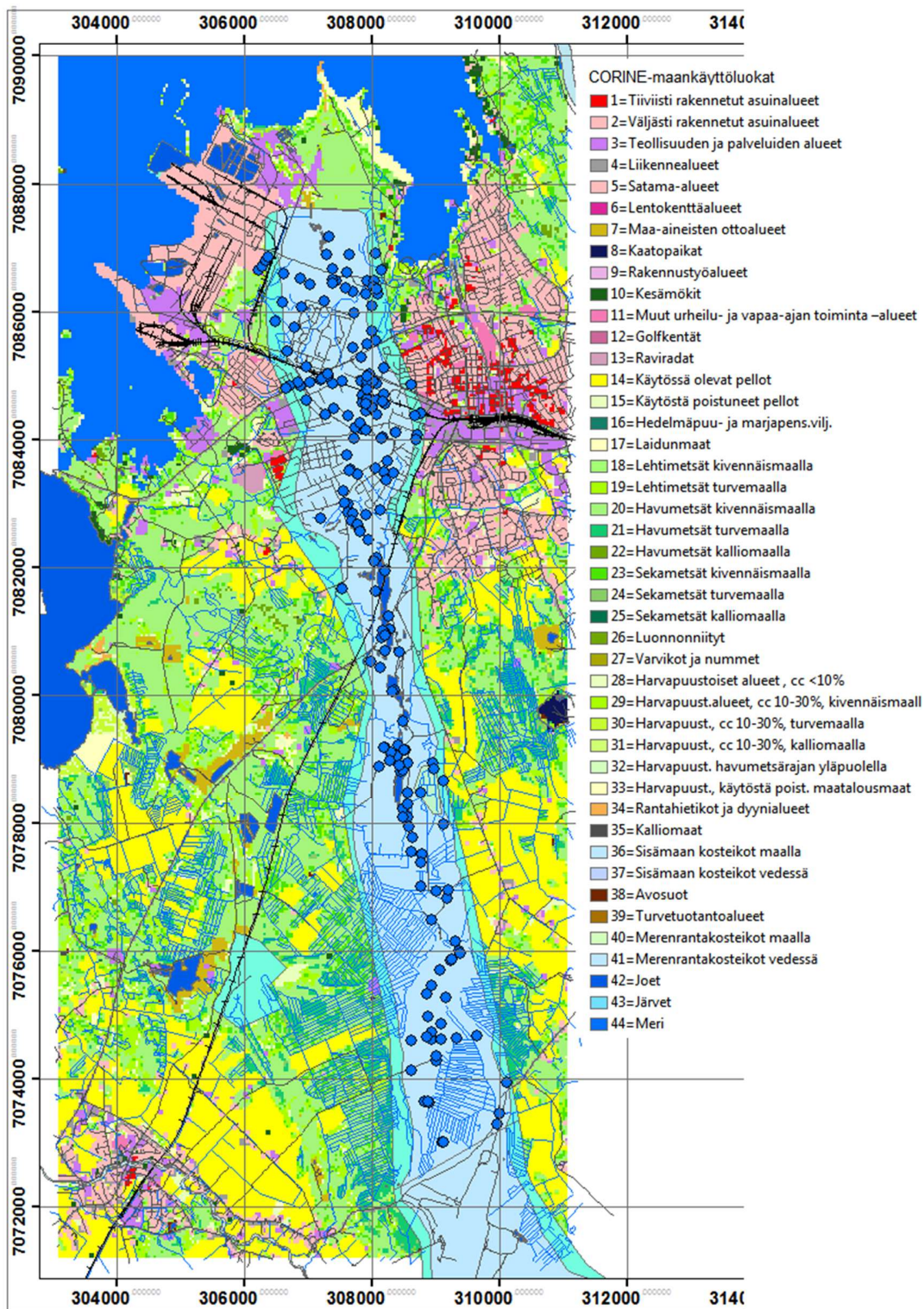


Kuva 2-1. Patamäen pohjavesialue (ylhäällä vasemmalla), Ekokankaan, Saunakankaan ja Pöyhösenkankaan pohjavesialueiden muodostama harjualue (ylhäällä oikealla) ja Hyypän ja Karhukankaan alueet (alempi kuva). Punaishalla suorakaiteelle on esitetty kaikkien kohteiden mallinnusalueen likimääräiset rajaukset.

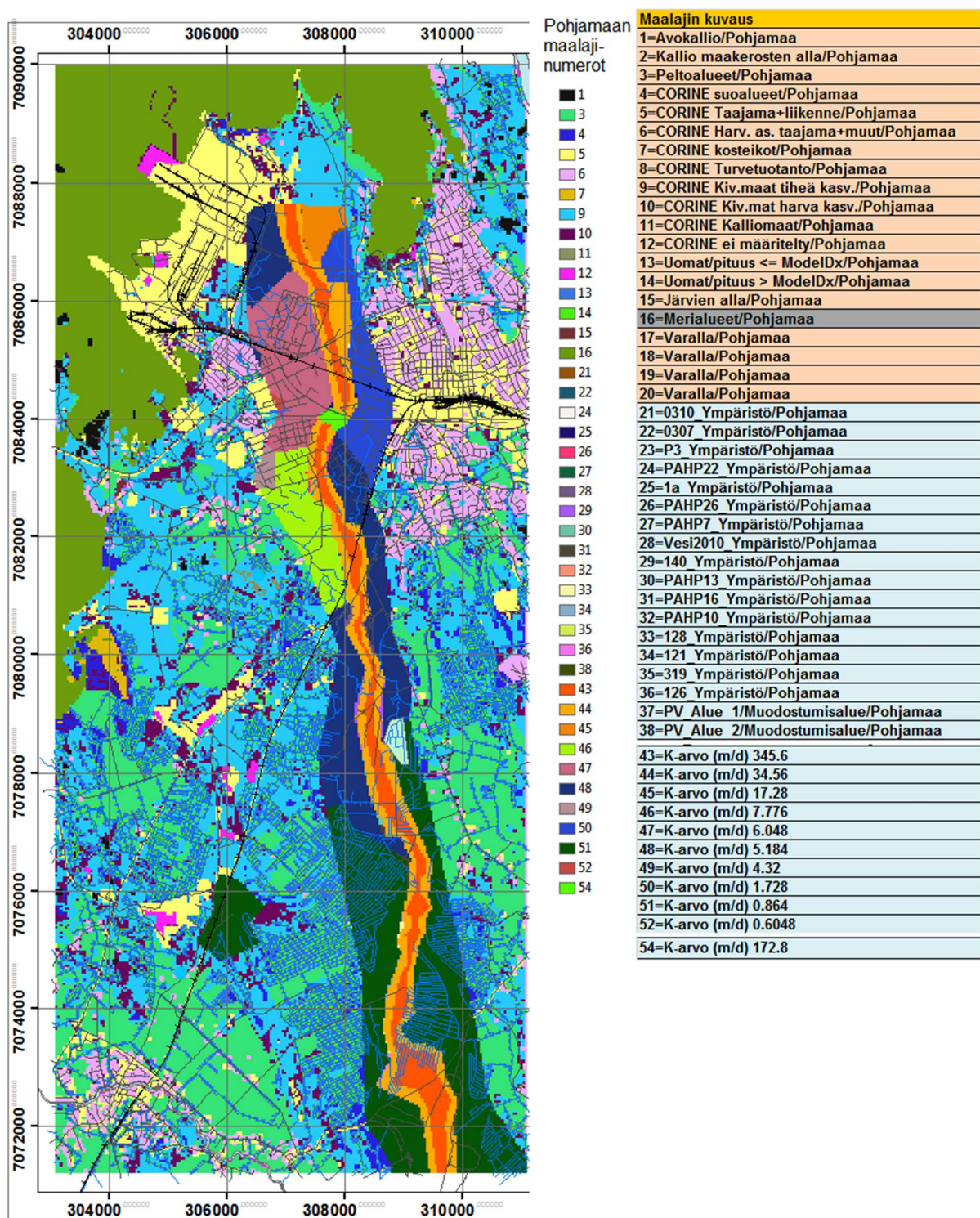


Kuva 2-2. Patamäen mallinnusalueen rajausta, pintavesiuomat, järvet ja lammet, tiet ja peltoalueet, sekä maanpinnan korkeusrasteri (vasemmanpuoleinen kuva), ja kallonpinnan korkeusrasteri (oikeanpuoleinen kuva).

Pohjavesimallin tarvitsema maankäyttörasteri ladattiin SYKEN CORINE-maankäyttökisteristä. CORINE-luokkia on yhteensä 44 (kuva 2.3) ja mallin tarvitsemista alueellisista tiedoista osa otetaan CORINE-maankäyttötietojen perusteella.



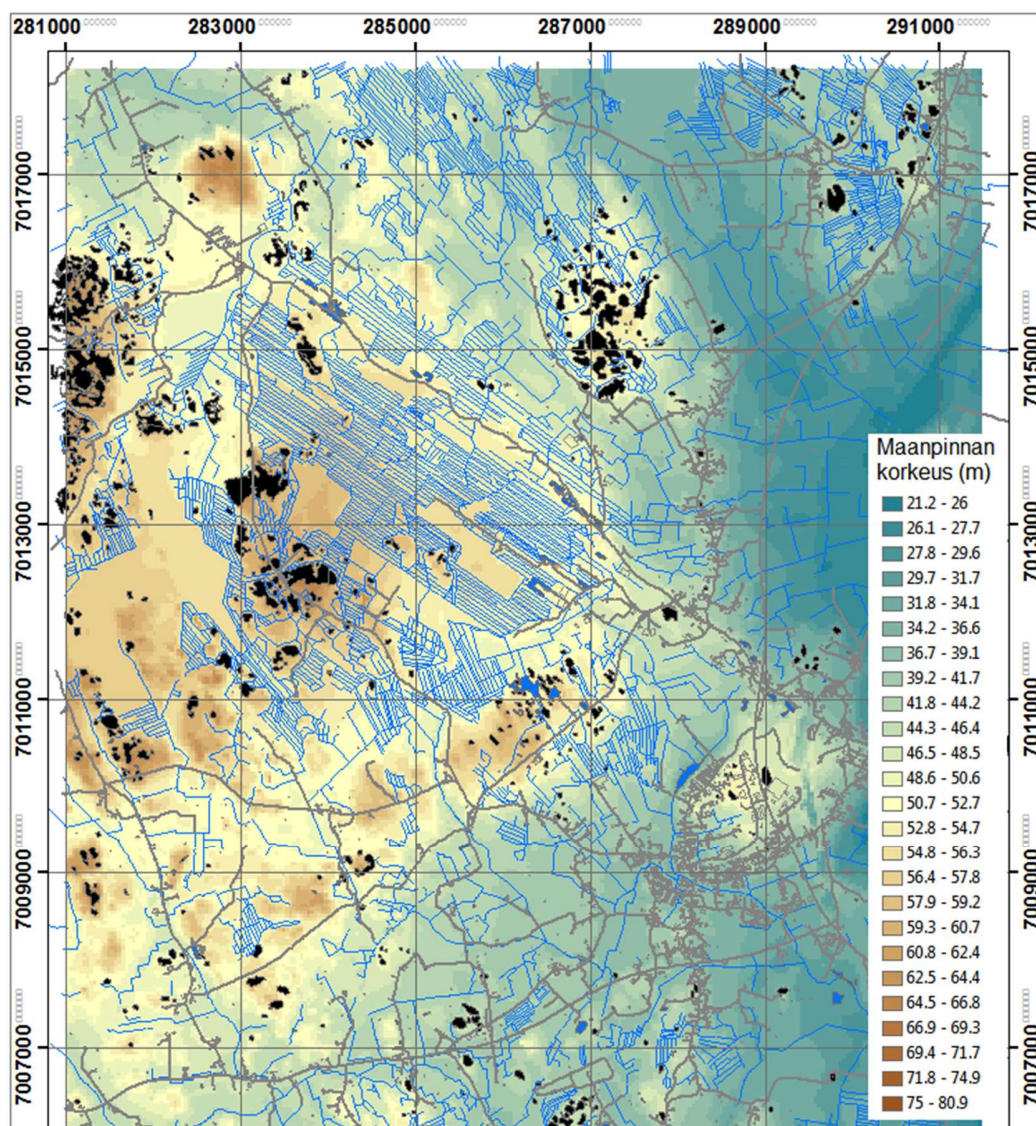
Kuva 2-3. Patamäen pohjavesialue ja maankäytön rasteri SYKE:n CORINE-luokittelun perusteella. Kuvassa on esitetty myös pohjavesialueen rajausta ja SYKEN pohjavesirekisteristä ladattujen havaintoputkien paikat.



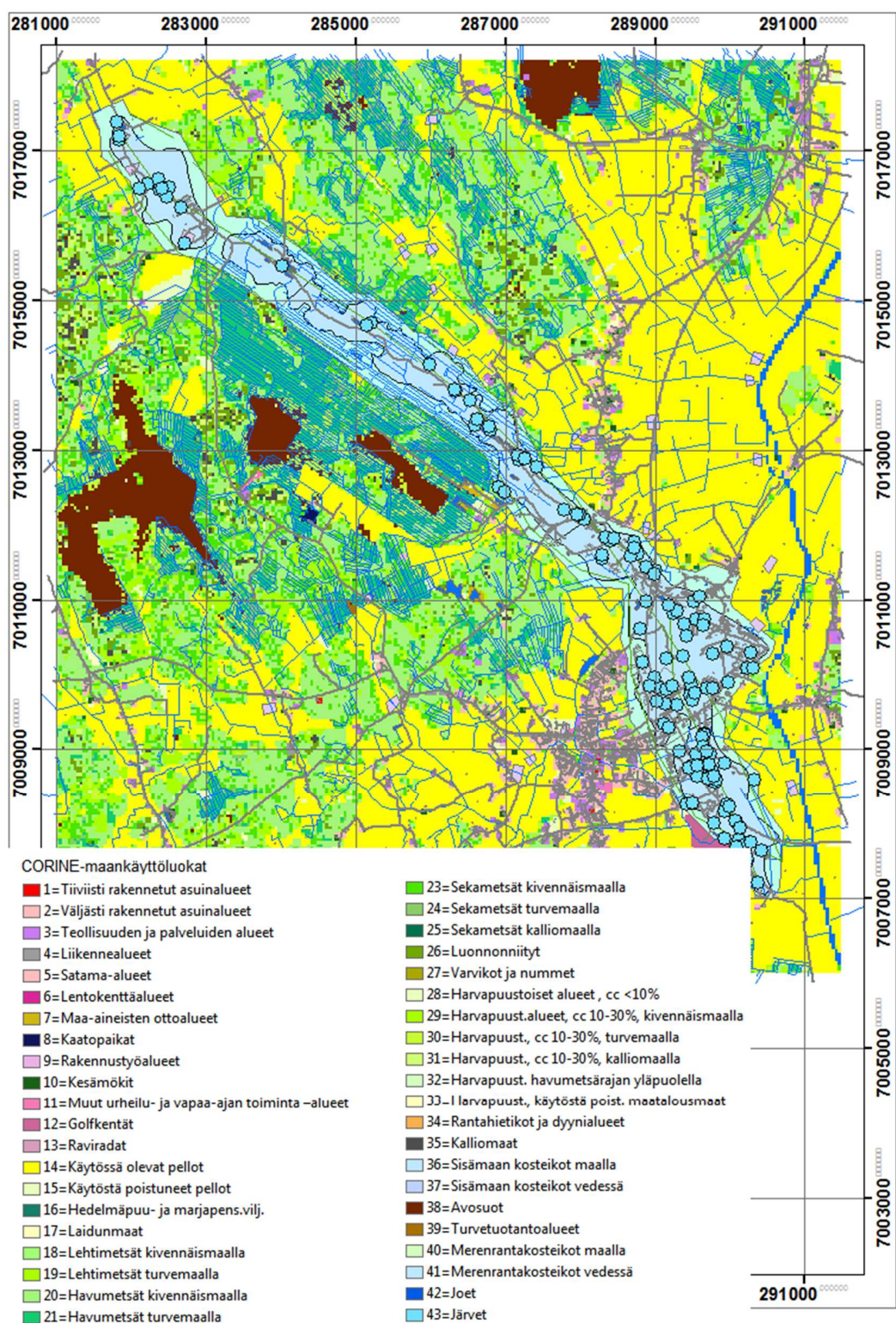
Kuva 2-4. Patamäen pohjavesialueen maanlajinumerot ja niitä vastaavat kuvaukset. Ydinharjun maalajialueet (numerot 43 – 54) on digitoitu Okkosen ym. (2011) raportista. Maalajinumerot 1–20 perustuvat CORINE-maankäyttöluokkien yhdistelyyn, numerot 21 – 29 ovat havaintoputkien ympärillä olevia alueita elleivät ne osu digitoituille alueille ja 37 – 42 ovat pohjavesialueiden muodostumis- ja reuna-alueita

2.2.2 Ekokankaan alue

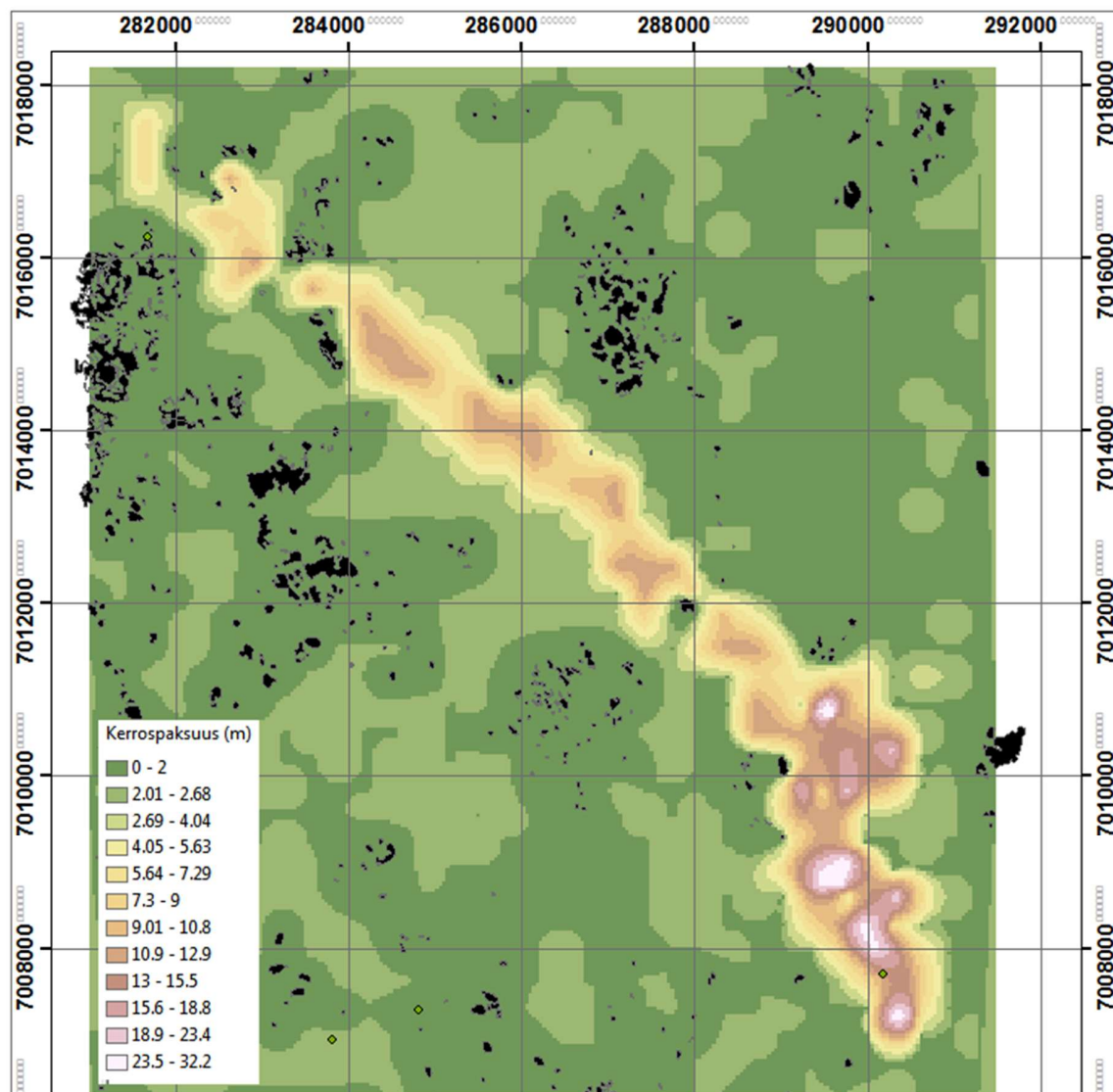
Ekokangas on osa harjujaksoa, joka jatkuu luoteeseen Saunakankaan pohjavesialueelle ja kaakkoon Pöyhösenkankaan kolmelle alueelle (A, B ja C). Maakerrosten paksuudet pohjavesialueella ovat alueella 10-32 metriä ja hienohiekka- ja silttivaltaisia. Pohjaveden pinta on lähellä maanpintaa noin 1,5 metrin syvyydessä ja alueella on useita pohjavesilammikoita. Pohjaveden virtaussuunta on kaakkoon Kaupinkankaan suuntaan, jossa se purkautuu Lehtimäen alueella. Ekokangas rajoittuu molemmilta sivustoilta turvealueisiin ja osin hiekkakerrokset jatkuvat turpeen alle. Alueen läpi on johdettu oja, joista voi imeytyä huonolaatuista vettä muodostumaan (Hydrogeologinen kuvaus, HERTTA).



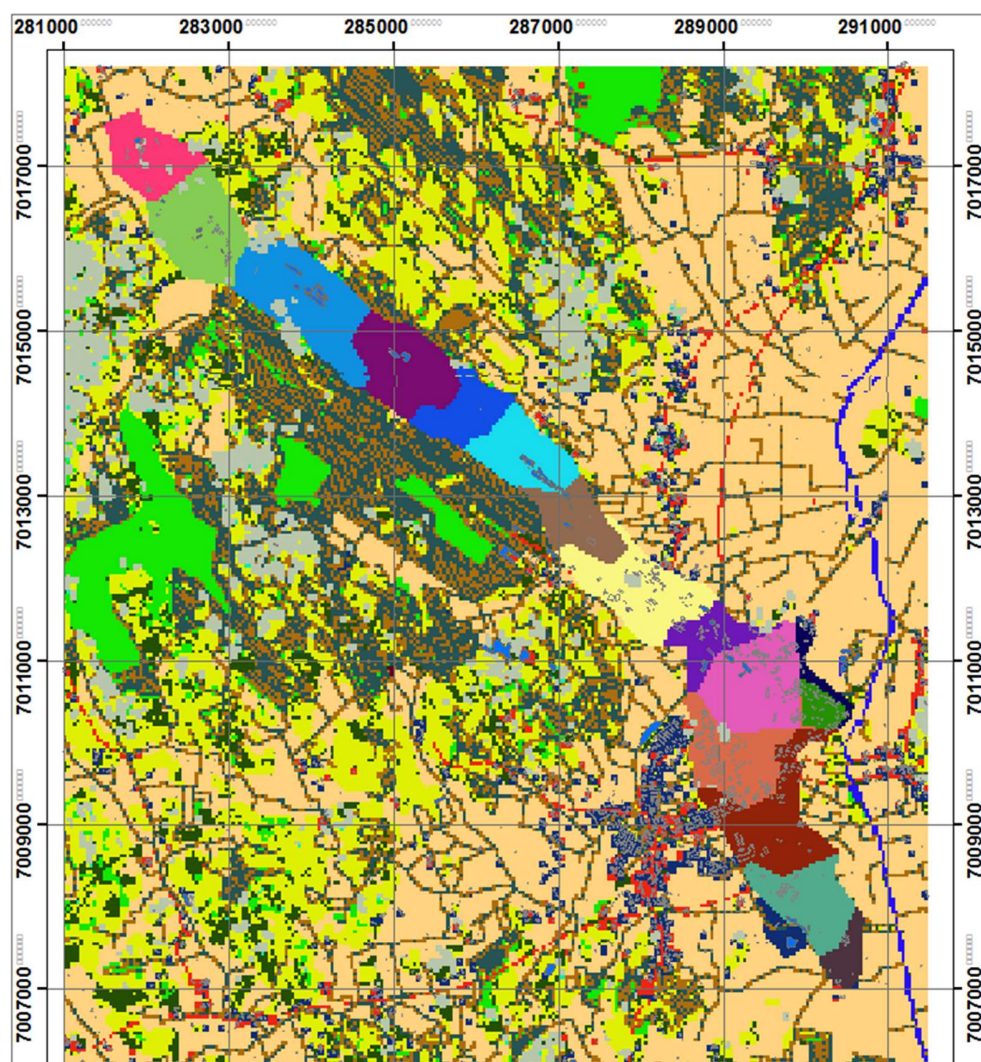
Kuva 2-5. Ekokankaan, Saunakankaan ja Pöyhösenkankaan mallinnusalueen rajaus, pintavesiuomat, järvet ja lammet, tiet ja peltoalueet, kallioalueet, sekä maanpinnan korkeusrasteri.



Kuva 2-6. Ekokankaan, Saunakankaan ja Pöyhösenkankaan pohjavesialueet ja maankäytön rasteri SYKE:n CORINE-luokittelun perusteella. Kuvassa on esitetty myös pohjavesialueen rajausta ja SYKEN pohjavesirekisteristä ladattujen havaintoputkien paikat.



Kuva 2-7. Ekokankaan, Saunakankaan ja Pöyhösenkankaan maakerrosten paksuusrasteri.



Pohjamaan
maalaji-
numerot

- 1
- 3
- 4
- 5
- 6
- 3
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15

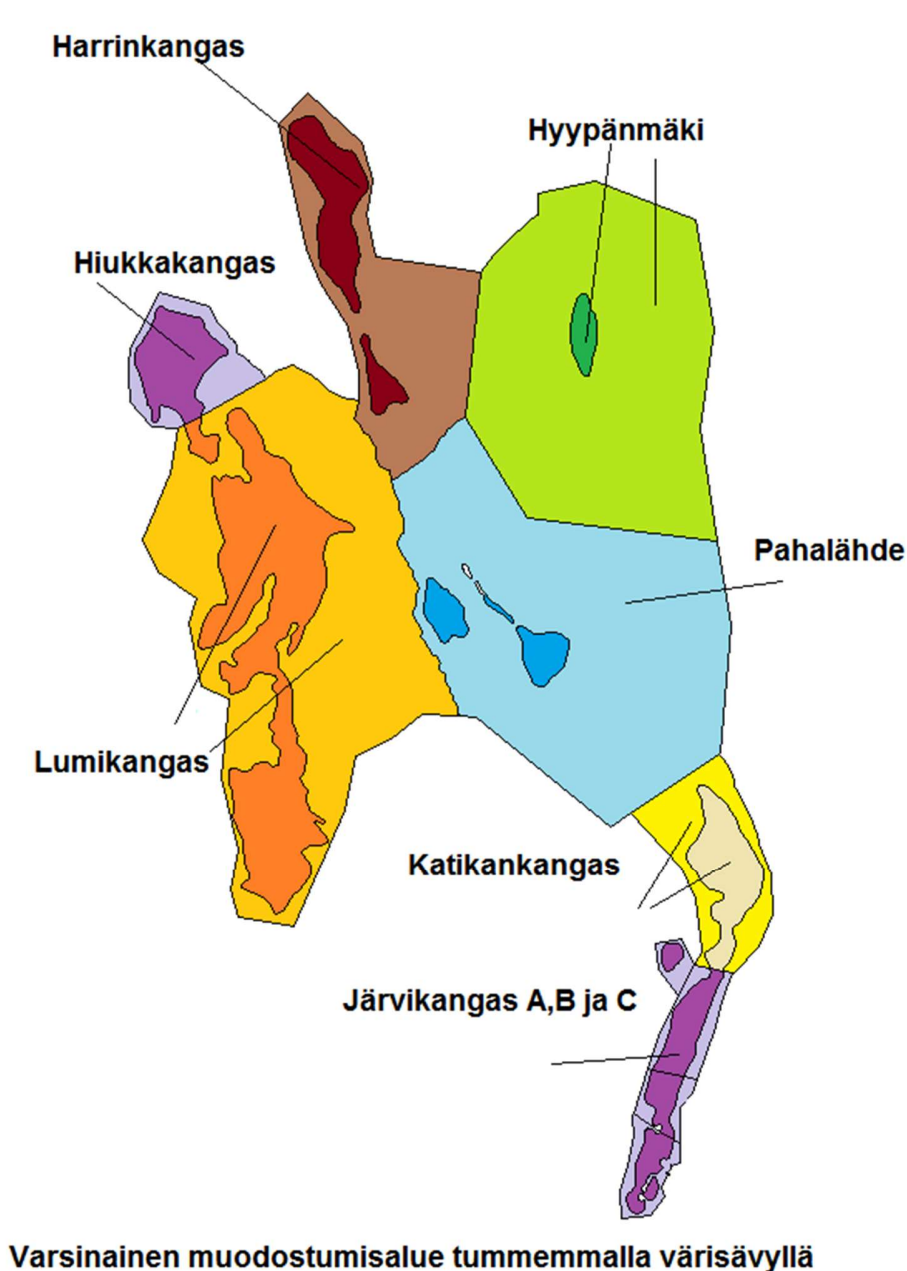
Maalajin kuvaus	
1=Avokallio/Pohjamaa	
2=Kallio maakerosten alla/Pohjamaa	
3=Peltoalueet/Pohjamaa	
4=CORINE suoalueet/Pohjamaa	
5=CORINE Taajama+liikenne/Pohjamaa	
6=CORINE Harv. as. taajama+muut/Pohjamaa	
7=CORINE kosteikot/Pohjamaa	
8=CORINE Turvetuotanto/Pohjamaa	
9=CORINE Kiv.maat tiheä kasv./Pohjamaa	
10=CORINE Kiv.mat harva kasv./Pohjamaa	
11=CORINE Kalliomaat/Pohjamaa	
12=CORINE ei määritelty/Pohjamaa	
13=Uomat/pituus <= ModelDx/Pohjamaa	
14=Uomat/pituus > ModelDx/Pohjamaa	
15=Järvien alla/Pohjamaa	

21	21=Hp 43 Ympäristö/Pohjamaa
22	22=Hp 43 Ympäristö/Pohjamaa
23	23=Hp 43 Ympäristö/Pohjamaa
24	24=Hp 43 Ympäristö/Pohjamaa
25	25=uusikaivo Ympäristö/Pohjamaa
26	26=sininen Ympäristö/Pohjamaa
27	27=Hp 8 Ympäristö/Pohjamaa
28	28=35 Ympäristö/Pohjamaa
29	29=2009.1 Ympäristö/Pohjamaa
30	30=PKHP3 Ympäristö/Pohjamaa
31	31=S 4 Ympäristö/Pohjamaa
32	32=S 3 Ympäristö/Pohjamaa
33	33=PKHP8 Ympäristö/Pohjamaa
34	34=PKHP10 Ympäristö/Pohjamaa
39	39=Pöyhös.k. C/Muodostumisalue/Pohjamaa
43	43=Pöyhös.k. B/Reuna-alueet/Pohjamaa

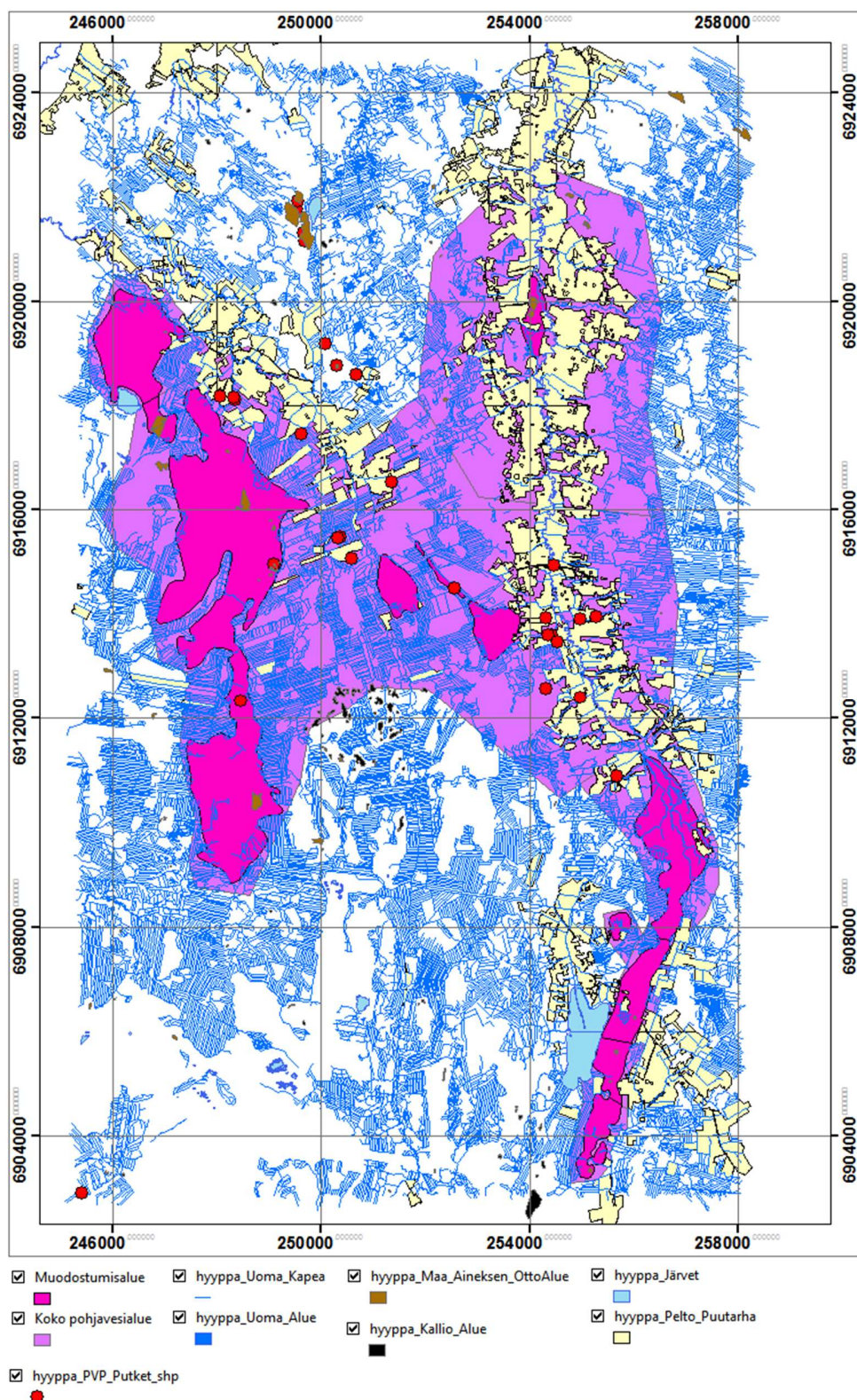
Kuva 2-8. Ekokankaan, Saunakankaan ja Pöyhösenkankaan pohjavesialueiden maanlajinumerot ja niitä vastaavat kuvaukset. Maalajinumerot 1–20 perustuvat CORINE-maankäyttöluokkien yhdistelyyn, numerot 21 – 34 ovat havaintoputkien ympärillä olevia alueita ja 35 – 43 ovat pohjavesialueiden muodostumis- ja reuna-alueita.

2.2.3 Hyypän alue

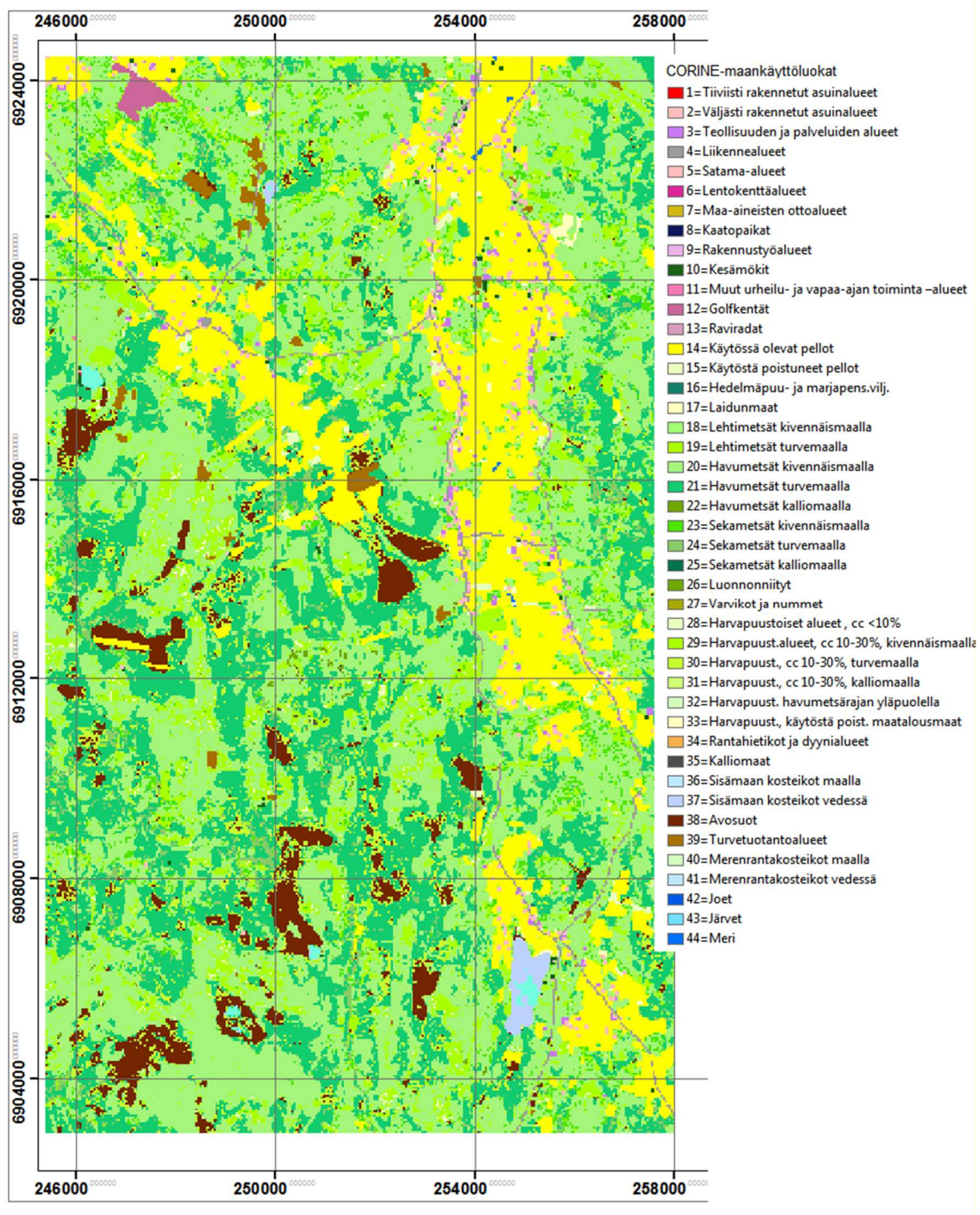
Hyypän mallinnusalueen pinta-ala on erittäin suuri, n. 272 km² (12.6x21.6 km²). Mallinnusalueella on useita pohjavesiesiintymiä, joiden sijainti on esitetty kuvassa 2-9. Hyypän alue poikkeaa Patamäen ja Ekokankaan alueista erityisesti siitä syystä, että pohjavesialueiden sisällä – ei kuitenkaan varsinaisella muodostumisalueelle – on erittäin paljon metsäojituksia, joista osa on kunnostuksen tarpeessa. Metsäojien sijainti on esitetty kuvassa 2-10.



Kuva 2-9. Hyypän mallinnusalueen sisällä olevat pohjavesiesiintymät.



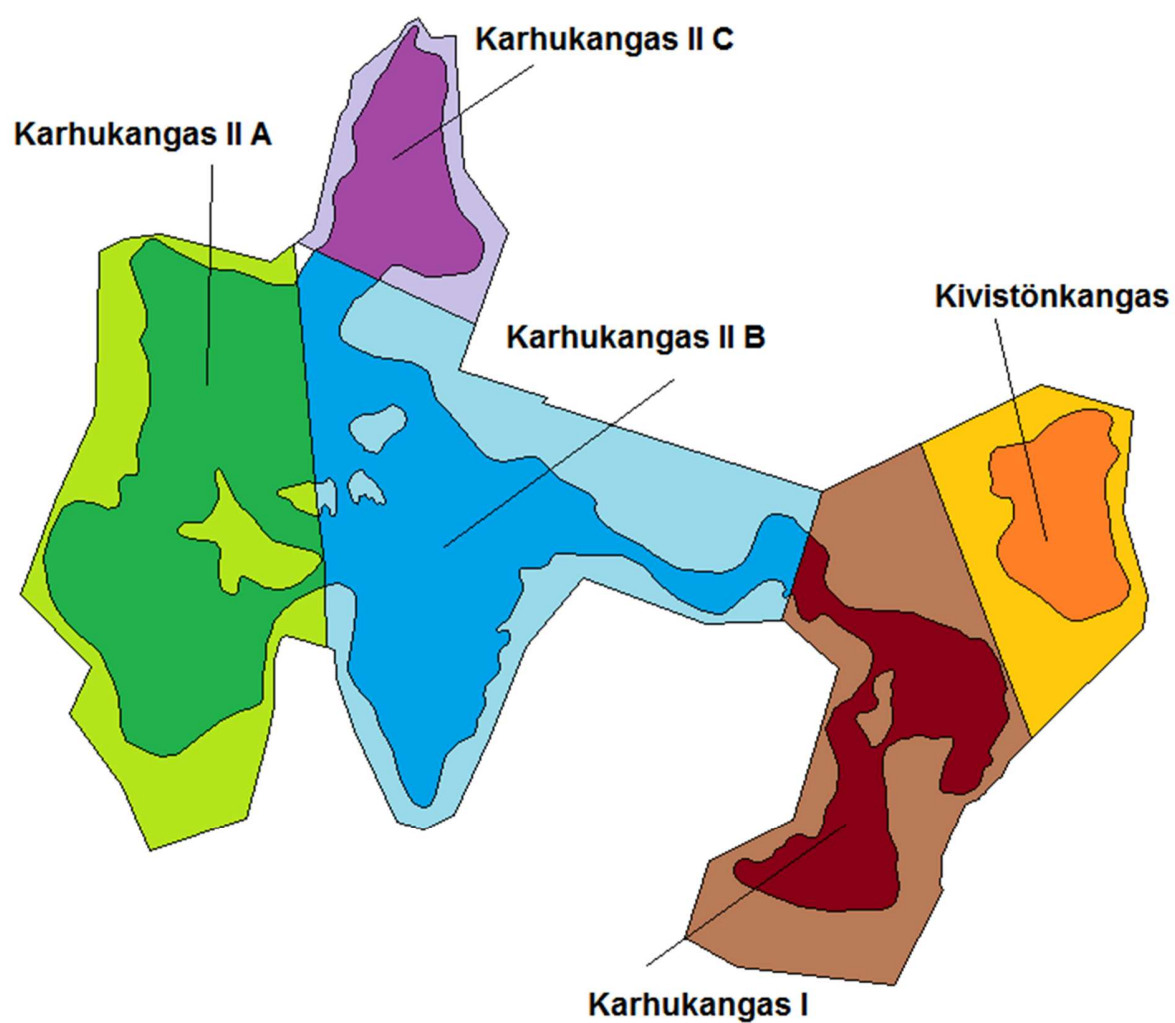
Kuva 2-10. Hyypän mallinnusalueen rajaukset (koko pohjavesialue ja varsinainen muodostumisalue), alueella olevat metsäojitukset (kapeat uomat), Maanmittauslaitoksen aineiston uoma-alueet (alueina esitettävät uomat, joiden leveys > 5 m), peltoalueet, kallioalueet, maa-aineksen ottoalueet ja järvet.



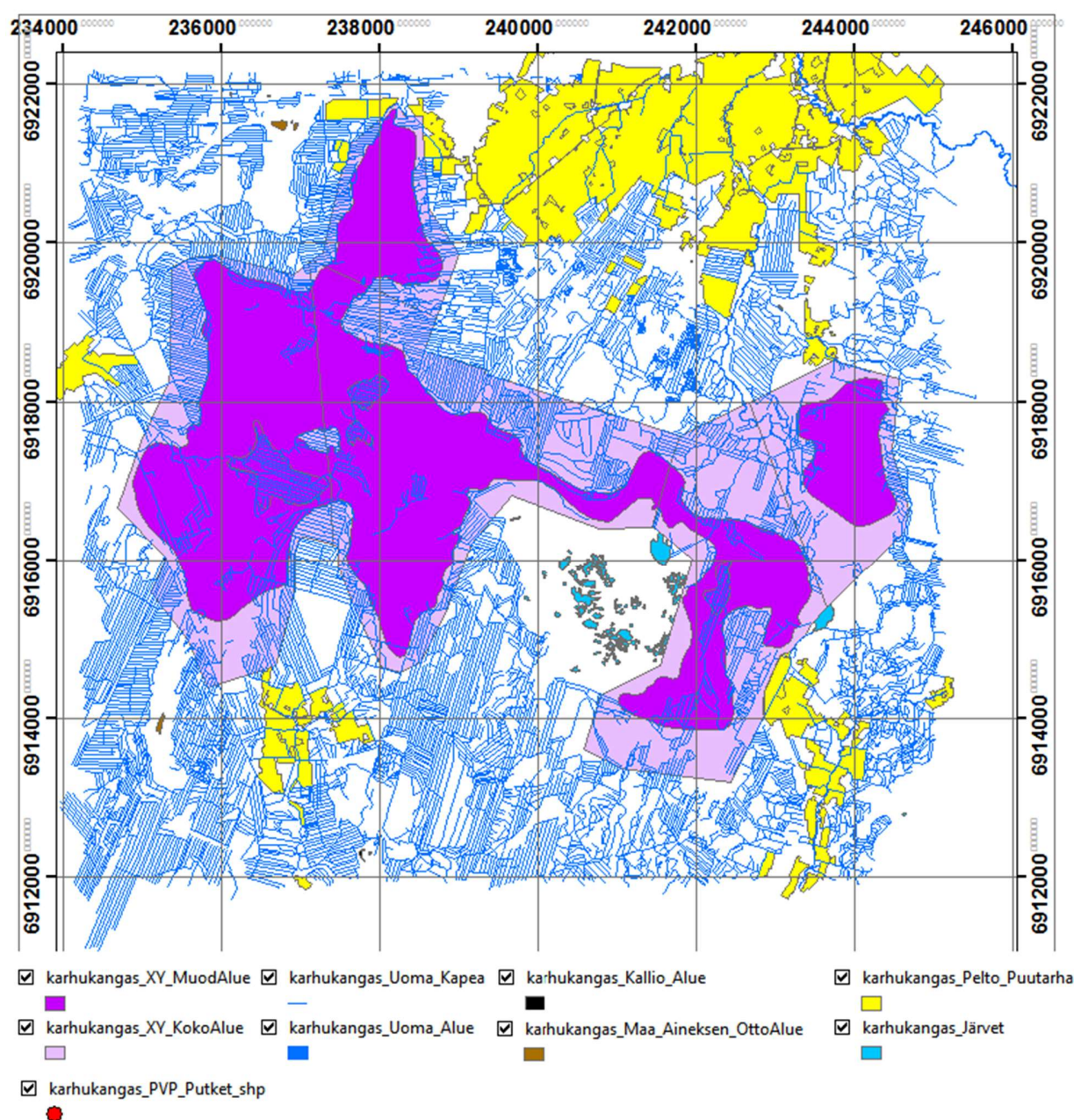
Kuva 2-11. Hyypän mallinnusalueen maankäyttö SYKE:n CORINE-luokittelun perusteella.

2.2.4 Karhukankaan alue

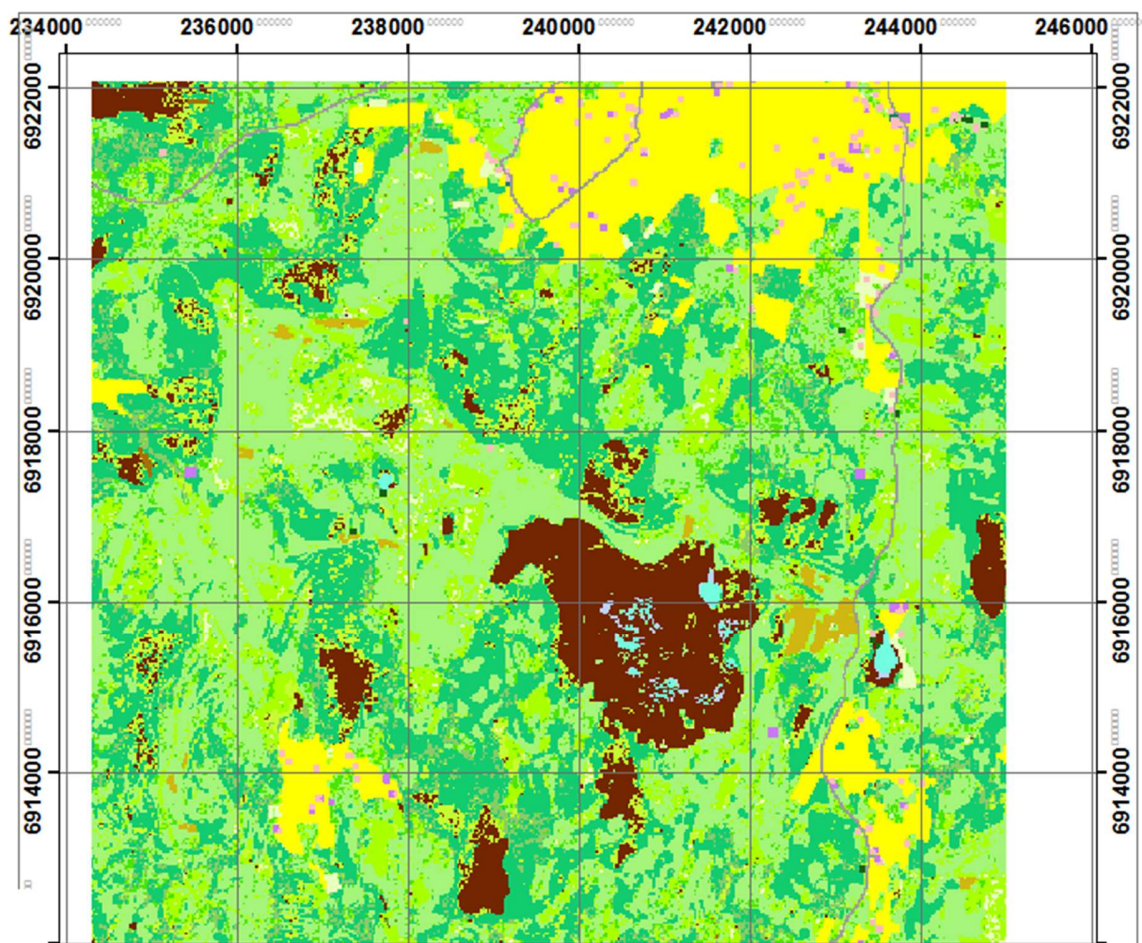
Karhukankaan mallinnusalueen pinta-ala on n. 108 km² (10.7 x 10.1 km²). Mallinnusalueella on useita pohjavesiesiintymiä, joiden sijainti on esitetty kuvassa 2-12. Karhukankaan alue on saman tyyppinen kuin Hyypän alue, eli pohjavesialueiden sisällä on erittäin paljon metsäojituksia, joista osa on kunnostuksen tarpeessa.



Kuva 2-12. Hyypän mallinnusalueen sisällä olevat pohjavesiesiintymät.



Kuva 2-13. Karhukankaan mallinnusalueen rajaukset (koko pohjavesialue ja varsinainen muodostumisalue), alueella olevat metsäojitukset (kapeat uomat), Maanmittauslaitoksen aineiston uoma-alueet (alueina esitettävät uomat, joiden leveys > 5 m), peltoalueet, kallioalueet, maa-aineksen ottoalueet ja järvet.



CORINE-maankäyttöluokat

- | | |
|--|--|
| 1=Tiiviisti rakennetut asuinalueet | 23=Sekametsät kivennäismaalla |
| 2=Väljästi rakennetut asuinalueet | 24=Sekametsät turvemaalla |
| 3=Teollisuuden ja palveluiden alueet | 25=Sekametsät kalliomaalla |
| 4=Liikennealueet | 26=Luonnonniityt |
| 5=Satama-alueet | 27=Varvikot ja nummet |
| 6=Lentokenttäalueet | 28=Harvapuustoiset alueet, cc <10% |
| 7=Maa-aineisten ottoalueet | 29=Harvapuust.alueet, cc 10-30%, kivennäismaalla |
| 8=Kaatopaikat | 30=Harvapuust., cc 10-30%, turvemaalla |
| 9=Rakennustyöalueet | 31=Harvapuust., cc 10-30%, kalliomaalla |
| 10=Kesämökkit | 32=Harvapuust. havumetsärajan yläpuolella |
| 11=Muu urheilu- ja vapaa-ajan toiminta -alueet | 33=Harvapuust., käytöstä poist. maatalousmaat |
| 12=Golfkentät | 34=Rantahietikot ja dynnialueet |
| 13=Raviradat | 35=Kalliomaat |
| 14=Käytössä olevat pellot | 36=Sisämaan kosteikot maalla |
| 15=Käytöstä poistuneet pellot | 37=Sisämaan kosteikot vedessä |
| 16=Hedelmäpuu- ja marjapens.vilj. | 38=Avosuot |
| 17=Laidunmaat | 39=Turvetuotantoalueet |
| 18=Lehtimetsät kivennäismaalla | 40=Merenrantakosteikot maalla |
| 19=Lehtimetsät turvemaalla | 41=Merenrantakosteikot vedessä |
| 20=Havumetsät kivennäismaalla | 42=Joet |
| 21=Havumetsät turvemaalla | 43=Järvet |
| 22=Havumetsät kalliomaalla | 44=Meri |

Kuva 2-14. Karhukankaan mallinnusalueen maankäyttö SYKE:n CORINE-luokittelun perusteella.

2.3 Pilvipalvelu

Tässä projektissa testaan WaterHopen ja Gain Oy:n yhdessä kehittämää pilvipalvelukonseptia kunnostusojitusten vaikutusten arvioinnissa. Pilvipalvelu voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, mutta käyttäjän kannalta turvallisinta tapa on tallentaa sekä avoimet aineistot, että laskentamallia pilvipalvelulle. Tämän konseptin suurin etu on se, että kaikki aineistojen ja ohjelmistojen päivitykset tallennetaan pilvipalvelukoneille eikä käyttäjän tarvitse huolehtia aineistojen/ohjelmistojen uudelleen asennuksista päivitysten jälkeen. Laskenta tapahtuu luonnollisesti myös pilvipalvelua tarjoavan operaattorin palvelimilla. Laskenta voidaan käynnistää sekä Windows-, että Linux-koneilta käsin. Periaate on, että käyttäjä ottaa yhteyden pilvipalveluun ja valitsee sieltä laskentamallin kohdasta "MALLIT" (alla oleva ylempi kuva), jonka jälkeen avautuu lomake, jolle käyttäjä syöttää lähtötiedot (alempi kuva) ja käynnistää laskennan. Pilvipalveluohjelmisto ilmoittaa kun laskenta on tehty, jonka jälkeen käyttäjä voi ladata tulostustiedostot omalle koneelleen. Näiden lomakkeiden muoto ja tulostustiedostot sovitaan tarkemmin vuoden 2019 aikana tehtävissä käyttäjätesteissä.

Hydrologisten mallien pilvipalvelu

ETUSIVU OHJEET MALLIT YHTEYSTIEDOT

Käyttäjä: hydroluser Kirjautu ulos

Tervetuloa palveluun

Hydrologisten mallien pilvipalvelu yhdistää avoimet aineistot ja tietokoneilla toimivat laskentamallit työkaluksi, jolla voidaan tarkastella erilaisia ympäristöön liittyviä ilmiöitä kuten veden virtausta ja aineiden kulkeutumista. Pilvipalveluilla tarkoitetaan Internetin yli tarjottavia dynaamisesti skaalautuvia ja virtuaalisia resursseja. Hydrologisten mallien pilvipalvelun avulla tietokoneiden käyttö helpottuu koska monet vaikeat ja työläät osiot kuten aineistojen keräys tutkittavilta alueilta, mallien muodostaminen niille ja aineiden kemiallisten ominaisuuksien määrittäminen on jo tehty valmiiksi järjestelmässä.

Hydrologisten mallien pilvipalvelu tuo nämä uudet työkalut kaikkien ympäristöasiantuntijoiden ja tutkijoiden ulottuville riippumatta toimivatko he yrityksissä, tutkimuslaitoksissa tai yliopistoissa. Pilvipalvelua voi käyttää esimerkiksi ympäristövaikutusten arvioinnissa, erilaisten ympäristöongelmien ratkaisussa ja tutkimustyössä. Palveluun liittyvät uutiset esitetään taulukossa 1.

Päivämäärä:	Uutinen:
08.08.2018	Sivujen ulkoasu on määrittänyt CSS-tyyleillä.

Simulaation tunnus (ei välilyöntejä eikä erikoismerkkejä):
Koe2

Alue:
Potamäki

Kunnostusojitus tehdään:
☒ Kyllä
☐ Ei

Ojien syventäminen (m):
0,5

Avohakkuu tehdään samalle alueelle:
☐ Kyllä
☒ Ei

Ojitusalueen rajauksen pisteiden lukumäärä (max = 10):
5

Ojitusalueen kulmapisteet (ETRS89 / ETRS-TM35FIN koordinaatisto):

308949	7078150
308658	7078553
308774	7078896
308995	7078954

Kuva 2-14. Esimerkki pilvipalvelun käyttöliittymästä (ylempi kuva) ja sovelluskohtaisesta lomakkeesta, jolla käyttäjä määrittelee laskentakohteen ja muut tarvittavat parametrit.

3 Menetelmät

3.1 Pinta- ja pohjavesimallin muodostaminen kohdealueille

3.1.1 Mallin muodostaminen avoimien aineistojen avulla

KUNNOS-toimintamallin pohjavesivaikutusten arviointiin käytettävän mallinnuskokonaisuuden pohjana ovat WaterHopen laatimat ohjelmistot. Niiden kehittäminen aloitettiin v. 2009 sen jälkeen, kun SYKE julkisti ensimmäiset avoimet aineistot (pohjavesialueiden rajaukset, CORINE-maankäyttöaineisto ja HERTTA-tietokanta pinta- ja pohjavesihavainnoille). Maanmittauslaitos avasi monipuoliset tietokantansa vapaaseen käyttöön v. 2012, Ilmatieteen laitos vapautti sääaineiston v. 2013 ja myös GTK:n maalaji- ja geologisia aineistoja voi nykyään ladata vapaasti kaupalliseen käyttöön.

WaterHopen tavoitteena on ollut kehittää monipuolinen tietokoneohjelmisto, jolla on mahdollista poimia avoimista aineistoista lähes kaikki pinta- ja pohjavesimallissa tarvittavat lähtötiedot. Alkuvaiheen automatisoinnin avulla uusien sovelluskohteiden vaatima työaika pienenee oleellisesti ja tapauskohtaisten suunnitelmien laatiminen on mahdollista, joskin suunnittelijan käytettävissä oleva työaika asettaa rajoituksia nykymuotoisen mallin soveltamiselle.

Kaikkia mallin muodostamisen ja kalibroinnin osavaiheita ei kuitenkaan voi kokonaan automatisoida ja näitä vaiheita kuvataan tarkemmin luvussa 3.2.

3.1.2 Mallinnusalueen rajaus

KUNNOS-toimintamalli on pääosin suunniteltu alueille, joilla pohjavesien virtauksilla on hyvin oleellinen rooli vaikutusten arvioinnissa. Pintavesien dominoimat alueet joudutaan kuitenkin ottamaan huomioon, sillä pohjavedet purkautuvat monissa kohteissa harjuja ympäröiville suo- tai peltoalueille. Piiloharjujen alueilla pintavesien ja pohjaveden yhteys voi olla myös hyvin merkittävä. Sovelletavan mallitarkastelun on siis pystyttävä käsittelemään samassa mallissa sekä pohjavesialueet, että ympäröivät alueet, joilla pintavesien rooli on tärkeä.

Mallinnusalue on valittava niin suureksi, että se kattaa sekä pohjavesialueen, että riittävän suuren alueen sen ympäriltä. Lukujen 2.2 kuvissa on esitetty rajaukset valituille kohteille (Patamäki, Ekokangas, sekä Hyypän ja Karhukankaan alueet).

3.1.3 Malli- vai datakeskeinen tarkastelu?

Pohjavesimalleja voidaan kehittää ja hyödyntää vaikutusten arvioinnissa joko mallikeskeistä tai datakeskeistä lähestymistapaa. Mallikeskeisessä lähestymistavassa valitaan ensin malli, jota käytetään. Datan on sopeuduttava mallin ominaisuuksiin ja monissa tapauksissa osa aineistosta jää hyödyntämättä tai joku keskeinen mallin vaatima lähtötieto puuttuu.

Datakeskeisessä lähestymistavassa aineisto hyödynnetään sellaisessa muodossa kuin se on ja malli sopeutuu tarvittaessa kulloiseenkin aineistoon. Mallia ei myöskään ”päästetä keskiöön” vaan se on osa analyysivaihetta.

KUNNOS-toimintamallin ohjelmistoissa käytetään datapohjaista lähestymistapaa, jossa mallin muodostaminen on mahdollista riippumatta siitä, kuinka paljon lähtötietoa on käytettävissä. Epävarman aineiston vaikutus on otettava huomioon, kun tulkitaan mallinnustuloksia ja käytetään

niitä apuna vaikutusten arvioinnissa. Datapohjainen tarkastelu sopeutuu myös joustavasti siihen, jos lähtötietoaineistoa saadaan lisää.

3.1.4 Pinta- ja pohjavesimallin laskentaverkko

Avoimista aineistoista poimittavien tietojen avulla muodostetaan ensimmäinen versio laskentaverkosta. Sekä mallinnuksessa koko tarkastelualue jaetaan solmuihin, joiden koko on yleensä n. 20x20 – 40x40 m². Koko mallinnusalueesta muodostuu rasteri, jonka jokaiselle solmupisteelle lasketaan pohja-vedenpinnan korkeus ja virtausnopeudet. Mallin tulokset esitetään useimmiten GIS-ohjelmissa karttatasoina (layer).

Yhden laskentasolmun pinta-alan valintaan vaikuttavat tarkastelualueen laajuus ja käytettävissä olevien aineistojen määrä. Patamäen alueella yhden laskentasolmun koko on 40x40 m² ja solmupisteitä on sekä X-suunnassa 200 ja Y-suunnassa 470, eli mallinnusalueen pinta-ala on 8x18.8 km². Ekokankaan alueella solmun koko on myös 40x40 m² ja rasterin koko on 262x305 eli mallin koko on 10.5x12.2 km². Hyypän alueella laskentasolmun koko on 40x40 m², rasterin koko on 315x540 ja mallin koko on 12.6x21.6 km². Karhukankaan alueella laskentasolmun koko on 25x25 m², rasterin koko 428x404 ja mallin koko on 10.7x10.1 km².

Avoimista aineistoista poimitaan laskentaverkkoon seuraavat muuttujat:

- maanpinnan korkeus MML:n aineistoista käyttäen joko 10x10 m²:n tai 2x2 m²:n lähtötietorasteria
- solmun maankäyttömuoto SYKE:n CORINE-aineiston perusteella (44 maankäyttömuotoa kuvien 2-3 ja 2-6 mukaisesti)
- pohjavesialueiden sijainti SYKE:n pohjavesirekisteristä (koko alueen rajausta ja muodostumisalueen rajausta)
- järvet ja merialueet MML:n maastotietokannasta ja SYKE:n CORINE-aineistosta
- uomaverkosto MML:n maastotietokannasta (alle 2 m leveät uomat, 2-5 m leveät uomat ja alueina esitettävät suuremmat uomat)
- kalliopaljastumat MML:n maastotietokannasta
- lähteiden sijainti MML:n maastotietokannasta
- pohjavesialueiden alustava rajausta MML:n maastotietokannasta
- huonosti vettä läpäisevien alueiden rajausta MML:n maastotietokannan ja SYKE:n CORINE-tietokannan avulla

Mallin laskentaverkon muodostamisvaiheessa on hyödynnettävä myös kaikki olemassa olevat pistehavainnot:

- putkikortit (maapinnan korkeus, kallionpinnan taso, maalajiarviot)
- muut kalliovarmennetut pisteet
- vedenottamoiden ja muiden kaivojen sijainti ja niistä saatavat arviot kallionpinnan korkeudesta
- lähteet, jotka puuttuvat MML:n maastotietokannasta

3.1.5 Kallionpinnan korkeusmalli

Pohjavesimalleissa tarvitaan lähtötietona koko alueen kallionpinnan korkeuskartta. Ideaalitilanteessa käytettävissä on joko geologinen rakennemalli tai erityyppisiin geologisiin tulkintoihin perustuva alueellinen arvio kallionpinnan korkeuksista. Jos tämän tyyppistä lähtötietoa ei ole käytettävissä, kallionpinnan korkeusmalli on laadittava kalliopaljastumien, putkikorttien ja

mahdollisten kalliovarmennettujen pisteiden avulla. Useissa tapauksissa kallionpinnan korkeusmallin laatimisessa joudutaan lisäksi käyttämään subjektiivista harkintaa ja osin kalibrointia niille alueille, joista mittauksia ei ole käytettävissä. Kallionpinnan korkeusmalli on hyvin usein pohjavesimallien merkittävin epävarmuustekijä.

3.2 Pohjavesimallin kalibrointi

3.2.1 Sääaineistot ja lumimalli

Pinta- ja pohjavesimallin tarvitsemat lähtötiedot ovat vuorokausiarvot sadannalle, ilman lämpötilalle ja haihdunnalle. Sadanta, ilman keskilämpötila ja vuorokauden minimi- ja maksimilämpötila saadaan ladattua Ilmatieteen laitoksen tietokannoista. Ilman lämpötilojen avulla lasketaan potentiaalisen haihdunnan arvio (Hargreaves ja Allen 2003). Lämpötiloihin perustuva arvo on vuorokausitasolla epätarkka. Hargreavesin menetelmällä lasketut arvot kerrotaan kalibroinnissa mukana olevalla korjauskertoimella (0.8 - 1.2). Korjauskertoimen avulla haihdunnan vuosisumma pystytään arvioimaan riittävän tarkasti. Hargreavesin menetelmää joudutaan käyttämään, sillä Ilmatieteen laitoksen havaintoasemilta ei useimmiten ole ladattavissa alueellisia arvoja globaalisäteilylle, tuulen nopeudella ja suhteelliselle kosteudelle. Nämä arvot tarvitaan, jos haihdunta lasketaan fysikaalisesti perustellummilla kaavoilla kuten Penman-Monteith (Vakkilainen 2009).

Suomen olosuhteissa lumen kertymisen ja sulamisen mallintaminen on erittäin tärkeää erityisesti pintavesivirtausten osalta. Myös pohjavesiesiintymissä lumimalli on tarpeen erityisesti silloin, jos etäisyys maanpinnalta pohjavedenpintaan on isolla osalla aluetta alle 5 m, kuten esimerkiksi Ekokankaan pohjavesialueella. Pinta- ja pohjavesimalleissa käytetyn lumimallin kuvauksen on alun perin esittänyt Vehviläinen (1992 ja se löytyy myös viitteestä Karvonen 2012).

3.2.2 Kallionpinnan korkeusmalli

Kallionpinnan korkeusmalli otetaan GTK:n kehittämästä rakennemallista, jos sellainen on olemassa. Jos rakennemallia ei ole käytettävissä kallionpinnan korkeus on arvioitava Maanmittauslaitoksen aineistoista saatavien kalliopaljastumien, SYKE:n pohjavesirekisteristä ladattavien pohjavesiputkien teknisten tietojen ja kaikkien olemassa olevien kalliovarmennettujen pisteiden avulla. Kallionpinnan korkeusmallin muodostaminen jaetaan kahteen vaiheeseen: a) luokitellut pohjavesiesiintymät ja b) esiintymiä ympäröivät pintavesivirtausten dominoimat alueet.

Luokitelluilla pohjavesiesiintymillä kallionpinnan korkeusmalliin sijoitetaan ensin kaikki tunnetut pisteet, joita ovat kalliopaljastumat ja putkikorteista ja kalliovarmennetuista pisteistä saadut pistehavainnot. Sen jälkeen interpoloidaan jokaiselle solmupisteelle kallionpinnan korkeus käyttäen joko krigingia tai käänteiseen etäisyyteen perustuvaa menetelmää (inverse distance weighted, eli IDW).

Muilla alueilla kallionpinnan korkeusmalliin sijoitetaan kaikki kalliopaljastumat ja muut tunnetut kallionpintapistet. Mallille määritellään lähtötietoina keskimääräinen maakerrosten paksuus peltoalueille, suo-alueille esiintymien ulkopuolella, taajama-alueille, sekä kivennäis- ja kalliomaille esiintymien ulkopuolella.

Mallin kalibrointivaiheessa voidaan joutua muuttamaan yllä olevia keskimääräisiä paksuuksia tai lisäämään pohjavesialueille uusia pisteitä, joiden maakerrosten paksuus annetaan lähtötietona. Kallionpinnan korkeusmallin muodostaminen on tärkein syy siihen, että laskentaverkon muodostamisen automatisointi ei ole mahdollista, ellei käytettävissä ole yksityiskohtaista geologista rakennemallia.

3.2.3 Maakerrosten ominaisuudet

Maakerrosten ominaisuudet (vaaka- ja pystysuuntainen vedenläpäisevyys ja pF-käyrä) ovat kaikki muuttujia, jotka voidaan ottaa mukaan mallin automaattiseen kalibrointimenetelmään (kts. kappale 3.2.6). Maakerrosten ominaisuuksien valinta ja kalibrointi jaetaan kahteen vaiheeseen: a) luokitellut pohjavesiesiintymät ja b) muut alueet.

Pääpaino kalibroinnissa on luokiteltujen pohjavesiesiintymien vedenläpäisevyyksien arvioinnissa. pF-käyrän parametrit (van Genuchten 1980, 1981) voidaan myös kalibroida tai käyttää Jauhiaisen (2004) mittaamia tyyppikäyriä.

Muille alueille otetaan parametrien alkuarvot Jauhiaisen tyyppikäyristä ja parametrien kalibrointi voidaan tehdä, jos käytettävissä on pohjavedenpinnan korkeushavaintoja luokiteltujen pohjavesialueiden ulkopuolelta.

3.2.4 Mallin reunaehdot

Pinta- ja pohjavesimallien hyvin tärkeitä lähtötietoja ovat mallin reunaehdot. Avoimista tietokannoista saadaan kaikkien järvien ja merialueiden sijainti. Merialueiden vedenpinta annetaan aina mallille reunaehtona. Järvien vedenpinnat annetaan mallille lähtötietoina ja reunaehtoina, jos järvi on riittävän iso (> 5 ha) ja voidaan perustellusti olettaa, että järvessä on aina vettä, eikä se kuivu.

KUNNOS-toimintamallin yhteydessä käytettävien mallien erityspiirre on se, että pintavesien dominoimat alueet ja pohjavesiesiintymät lasketaan samassa mallissa ja ko. alueiden välillä tapahtuu veden vaihtoa sen mukaan onko mallilla laskettu esiintymän pohjavedenpinta ylempänä vai alempana kuin ympäröivän alueen mallinnettu pohjavedenpinta. Kehitetty ohjelmisto luokittelee kaikki alueen laskentasolmut joko esiintymään tai ympäröiviin alueisiin kuuluviksi.

Avoimista aineistoista poimitaan myös kaikki mallinnusalueen uomat (leveys alle 2 m, 2 – 5 m tai alueina annettavat isommat uomat). Uomat toimivat mallissa mahdollisina pintavesien tai pohjavesien purkautumisalueina. Jos uomasolmun mallinnettu pohjavedenpinta on korkeammalla kuin uoman pohjan taso, niin pinta- tai pohjavettä virtaa avouomiin ja niiden kautta lähimpään järveen tai mereen. Uomien syvyydeksi oletetaan 0.7 m (alle 2 m uomat) tai 1.0 m (2 – 5 m leveät uomat ja alueina annettavat uomat). Uomiin ei oleteta purkautuvan vettä, jos mallinnettu vedenpinta on alempana kuin uoman pohjan taso.

Metsäojien laskenta tapahtuu vastaavalla periaatteella kuin muissakin uomissa lukuun ottamatta sitä, että ojien syvyys ja ojaväli voidaan antaa mallille lähtötietona.

3.2.5 Automaattinen kalibrointi

Kehitettyyn ohjelmistoon sisältyy ns. automaattisia kalibrointimenetelmiä. Näillä tarkoitetaan aliohjelmistoja, joille annetaan lähtötietoina kaikki pohjavedenpinnan mittaukset ja kalibrointiin valittujen parametrien alkuarvot ja sallittu vaihteluväli (minimi- ja maksimiarvo). Ohjelmisto laskee sen jälkeen mallin läpi useita satoja kertoja ja pyrkii löytämään parametriyhdistelmän, jolla mitatut ja lasketut arvot vastaavat mahdollisimman hyvin toisiaan ja mallin parametrien arvot pysyvät minimi- ja maksimiarvojen sisällä (vältetään epäfysikaaliset parametriarvot). Ohjelmisto käyttää ns. gradienttimenetelmiä parhaan mahdollisen parametriyhdistelmän löytämiseksi. Kalibroinnissa tärkein kriteeri oli saada tasapainotilanteen mitatut ja lasketut pohjavedenpinnan korkeudet vastaamaan mahdollisimman hyvin toisiaan. Mallin kalibrointi dynaamisten mittausten avulla ei ole mahdollista, sillä laskenta-ajat olisivat kohtuuttoman pitkät (yhden alueen optimointiajoon kuluisi aikaa n. 2-3 vrk).

4 Tulokset ja tulosten tarkastelu

4.1 Pohjavesimallin tulokset eri alueilla

Pinta- ja pohjavesimallien soveltuvuus herkkyys- ja riskianalyyysien laadinnassa on mahdollista vain, jos mallien tulokset vastaavat riittävän hyvin mitattuja arvoja. Tässä luvussa on esitetty mitatut ja mallinnetut lumen syvyydet ja pohjavedenpinnan korkeudet.

Lumimallin tulostuksena saadaan lumen vesiaron ja lumen syvyyden lisäksi myös sulannan määrä vuorokausitasolla. Mitatut lumen syvyydet saadaan Ilmatieteen laitoksen avoimista tietokannoista, jos kohdealueilla ei ole tehty lumen syvyys- tai vesiäromittauksia.

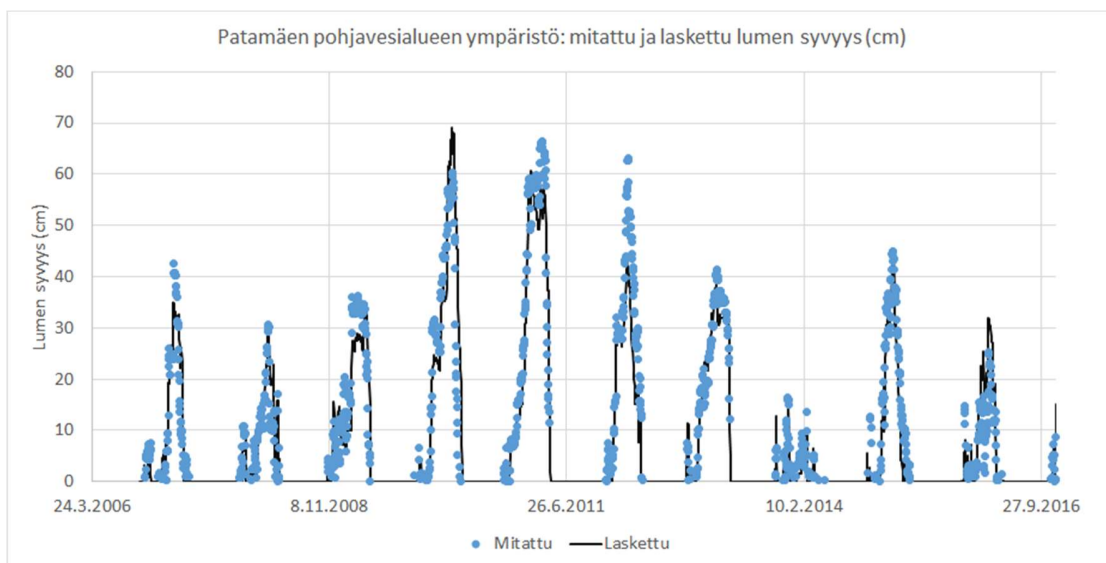
Patamäen ja Ekokankaan toiminta-alueilta on käytettävissä myös pohjavedenpinnan mittauksia useista havaintoputkista. Tässä luvussa esitetään mitattujen ja laskettujen pohjavedenpinnan korkeuksien vertailu. Patamäen alueelta pohjavedenpinnan korkeushavaintoja oli mallinnusjaksolta käytettävissä 79 putkesta yhteensä n. 1700 kpl ja Ekokankaan, Saunakankaan ja Pöyhösenkankaan alueilta n. 60 putkesta 2300 havaintoa. Suurin osa havainnoista oli kuitenkin Pöyhösenkankaan kolmelta esiintymältä ja Ekokankaalta havaintoputkia oli alle 10.

Hyypän alueelta oli mallinnusjaksolta käytettävissä pohjavesihavaintoja 25 putkesta yhteensä 600 yksittäistä mittausta ja Karhukankaan alueelta havaintoja oli 22 putkesta n. 750 havaintoa.

Pinta- ja pohjavesimallin laskentajakso on Patamäen ja Ekokankaan alueille 01.09.2006 – 31.7.2016 ja Hyypän ja Karhukankaan alueille 1.10.2009 – 31.7.2018.

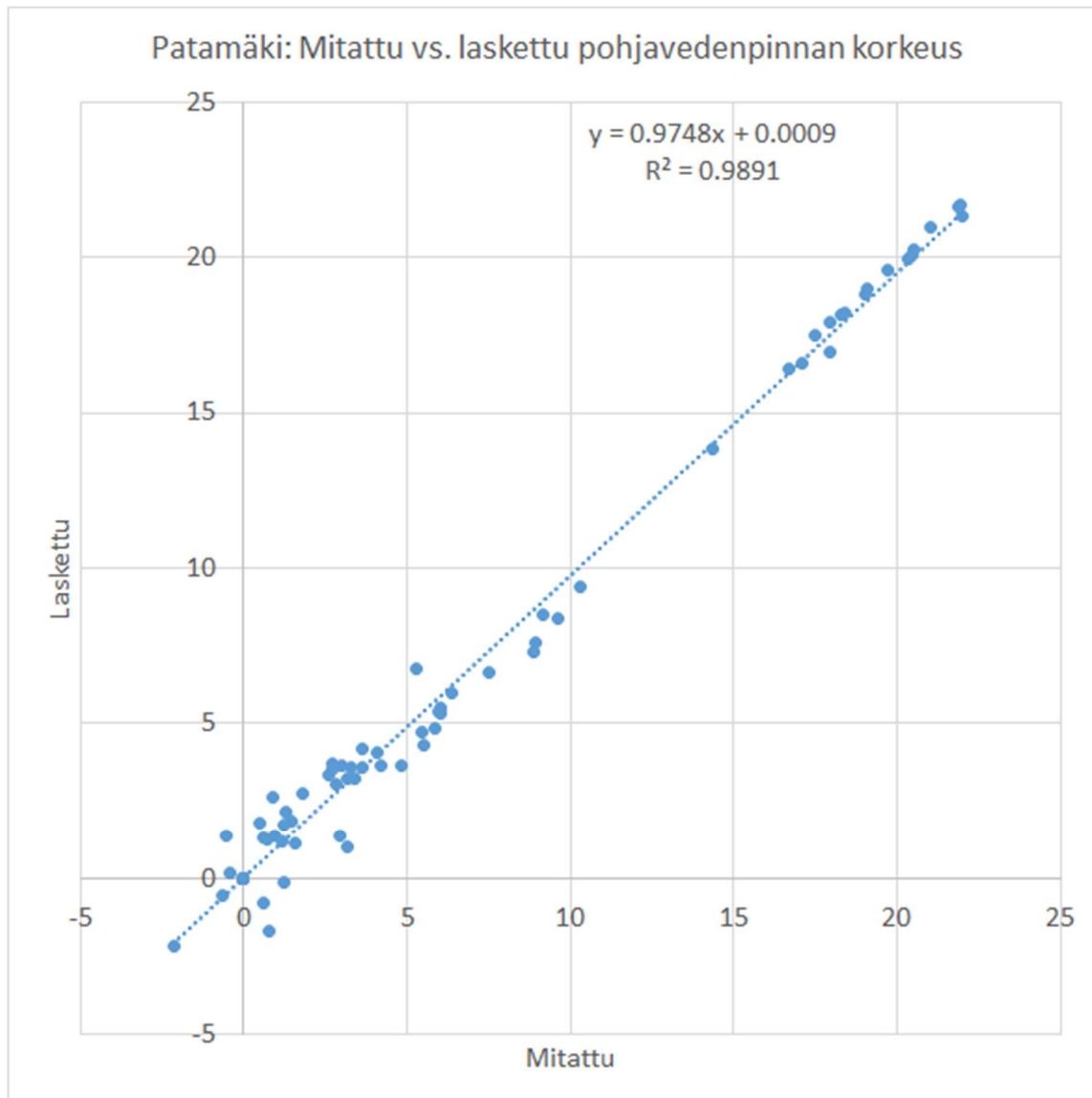
4.1.1 Patamäki

Kuvassa 4-1 on esitetty Patamäen alueen mitattu ja mallilla laskettu lumen syvyys vuosien 2006 – 2016 väliseltä ajalta. Mallilla pystytään ennustamaan lumen sulannan ajoitus erittäin hyvin ja mitatut ja mallinnetut lumen syvyyden maksimiarvot vastaavat melko hyvin toisiaan.

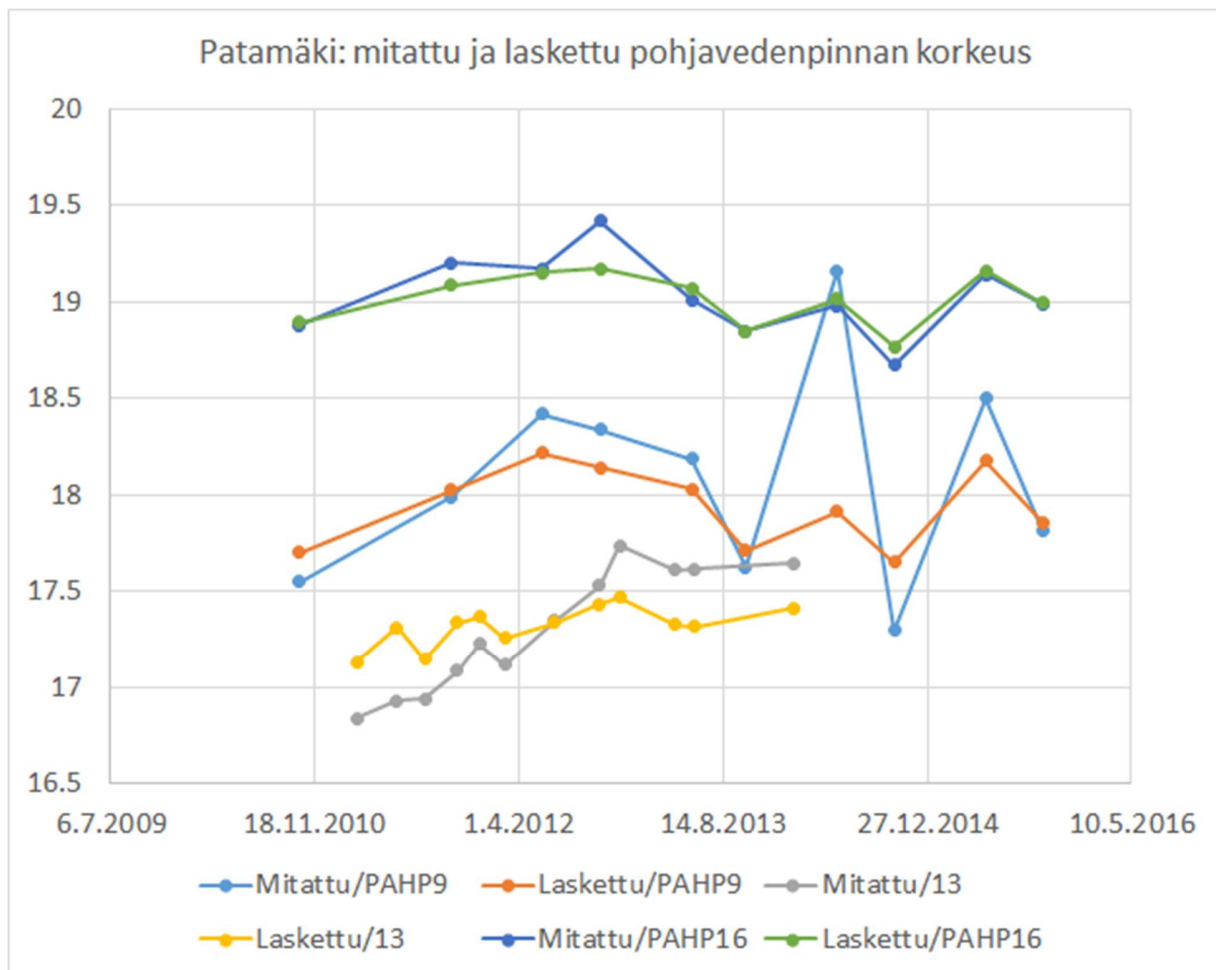


Kuva 4-1. Patamäen alueen mitattu ja mallilla laskettu lumen syvyys.

Kuvassa 4-2 on esitetty mitattujen ja mallilla laskettujen keskimääräisten pohjavedenpinnan korkeuksien vertailu. Mitattujen ja laskettujen arvojen vastaavuus on erittäin hyvä (selitysaste R^2 on 0.99). Tulokset ovat luotettavia, sillä kallionpinnan korkeusmalli oli käytettävissä.



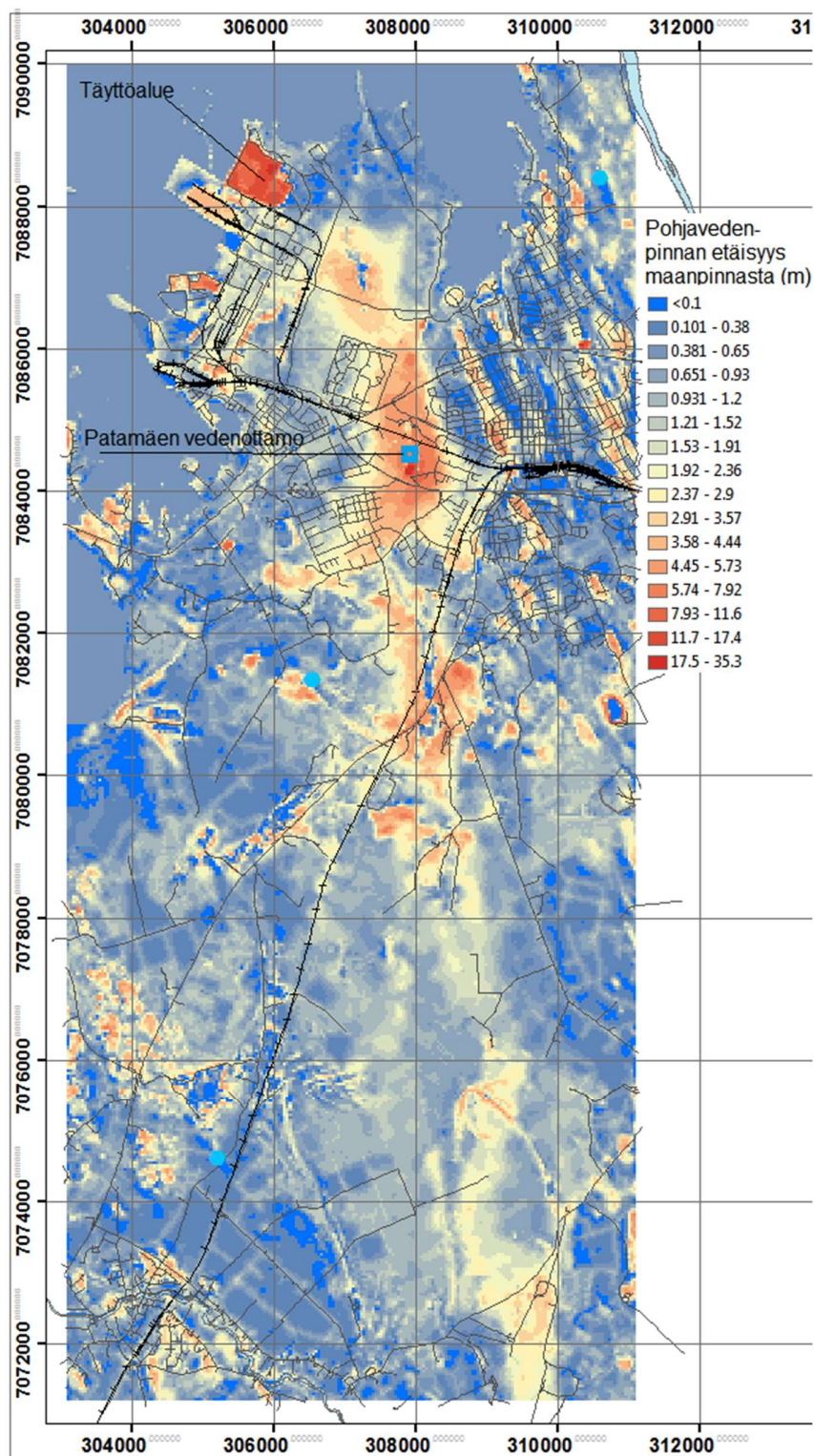
Kuva 4-2. Mitattu ja mallinnettu pohjavedenpinnan korkeus Patamäen alueen pohjavesiputkissa (kaikkien putkien keskimääräiset mitatut ja lasketut pohjavedenpinnan korkeudet)



Kuva 4-3. Mitatut ja lasketut pohjavedenpinnan korkeudet muutamassa havaintoputkessa, jotka sijaitsevat avohakkuualueen läheisyydessä.

Kuvassa 4-3 on esitetty ajan suhteen muuttuvat mitatut ja lasketut pohjavedenpinnan korkeudet Patamäen alueelta avohakkuun (kts. kappale 4.2.1) lähellä olevissa putkissa. Vastaavuus on pääosin hyvä lukuun ottamatta putkea PAHP9, jossa vuoden 2014 alkupuolella on mitattu hyvin korkea arvo ja samassa putkessa loppuvuonna melko matala arvo. On myös mahdollista, että alkuvuoden mittaesarvo on virheellinen.

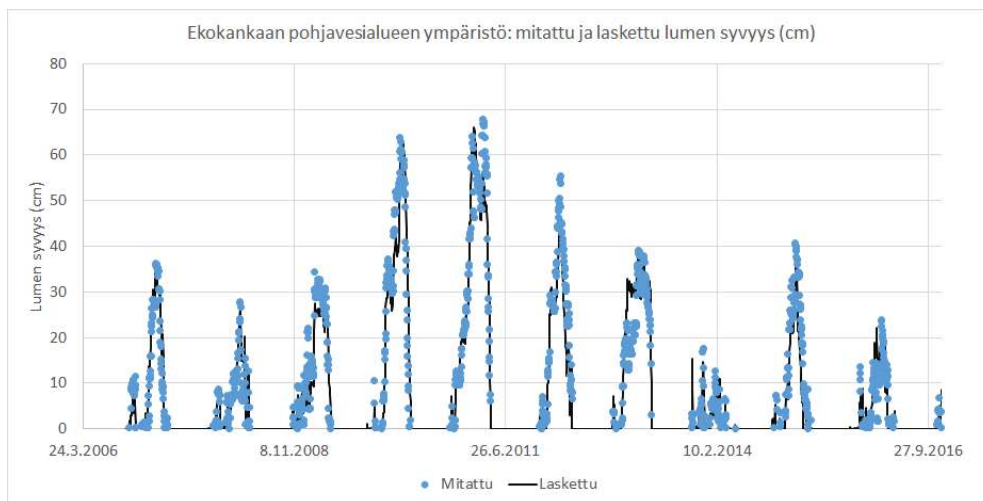
Kuvassa 4-4 on esitetty Patamäen alueen mallinnettu keskimääräinen pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnalta. Mallin mukaan pohjavedenpinnan syvyys on suurimmillaan lähes 35 m Patamäen pohjavesiesiintymän pohjoisosassa olevalla täyttöalueella ja varsinaisen esiintymän alueella pohjavedenpinnan syvyys on n 25 m. Patamäen vedenottamon ympärillä (kuva 4-4). Pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnalta on tarpeellinen lähtötieto (karttataso) arvioitaessa maanpinnalla tapahtuvien päästöjen kulkeutumista ensin ylhäältä alaspäin vertikaalisuunnassa ja sen jälkeen pohjaveden virtauksen mukana kohti merialueita.



Kuva 4-4. Patamäen alueen mallinnettu keskimääräinen pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnalta.

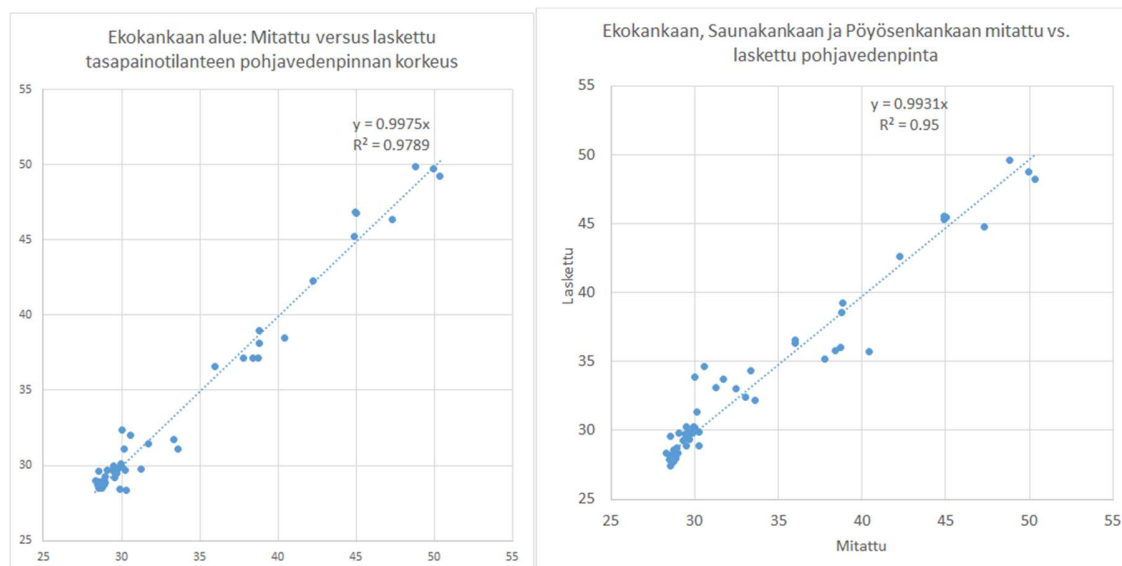
4.1.2 Ekokangas

Kuvassa 4-5 on esitetty Ekokankaan alueen mitattu ja mallilla laskettu lumen syvyys vuosien 2006 – 2016 väliseltä ajalta. Myös tällä alueelle malli pystyy ennustamaan lumen sulannan ajoituksen. Mitatut ja mallinnetut lumen syvyyden maksimiarvot vastaavat hyvin toisiaan.



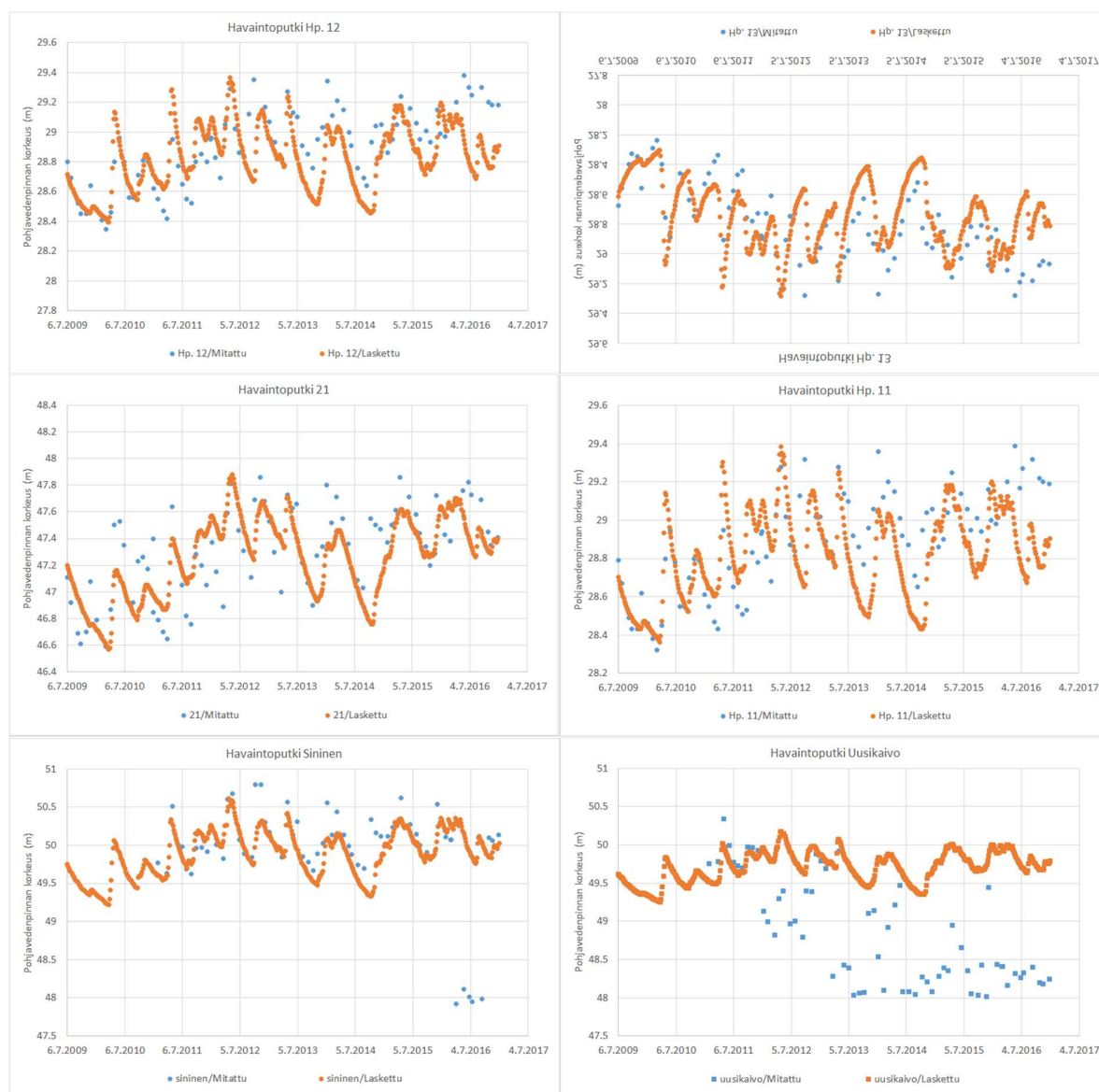
Kuva 4-5. Ekokankaan alueen mitattu ja mallilla laskettu lumen syvyys.

Kuvassa 4-6 on esitetty mitattujen ja mallilla laskettujen keskimääräisten pohjavedenpinnan korkeuksien vertailu. Mitattujen ja laskettujen arvojen vastaavuus on jonkin verran huonompi kuin Patamäen alueella, sillä Ekokankaan, Saunakankaan ja Pöyhösenkankaan alueilta käytettävissä ei ole kallionpintamallia vaan se on arvioitu kalliopaljastumien ja havaintoputkien teknisten tietojen perusteella. Malli on kalibroitu uudelleen projektin toisessa vaiheessa. Uuden kalibroinnin selitysaste R^2 on 0.98 ja pilottivaiheen mallissa se oli 0.95.



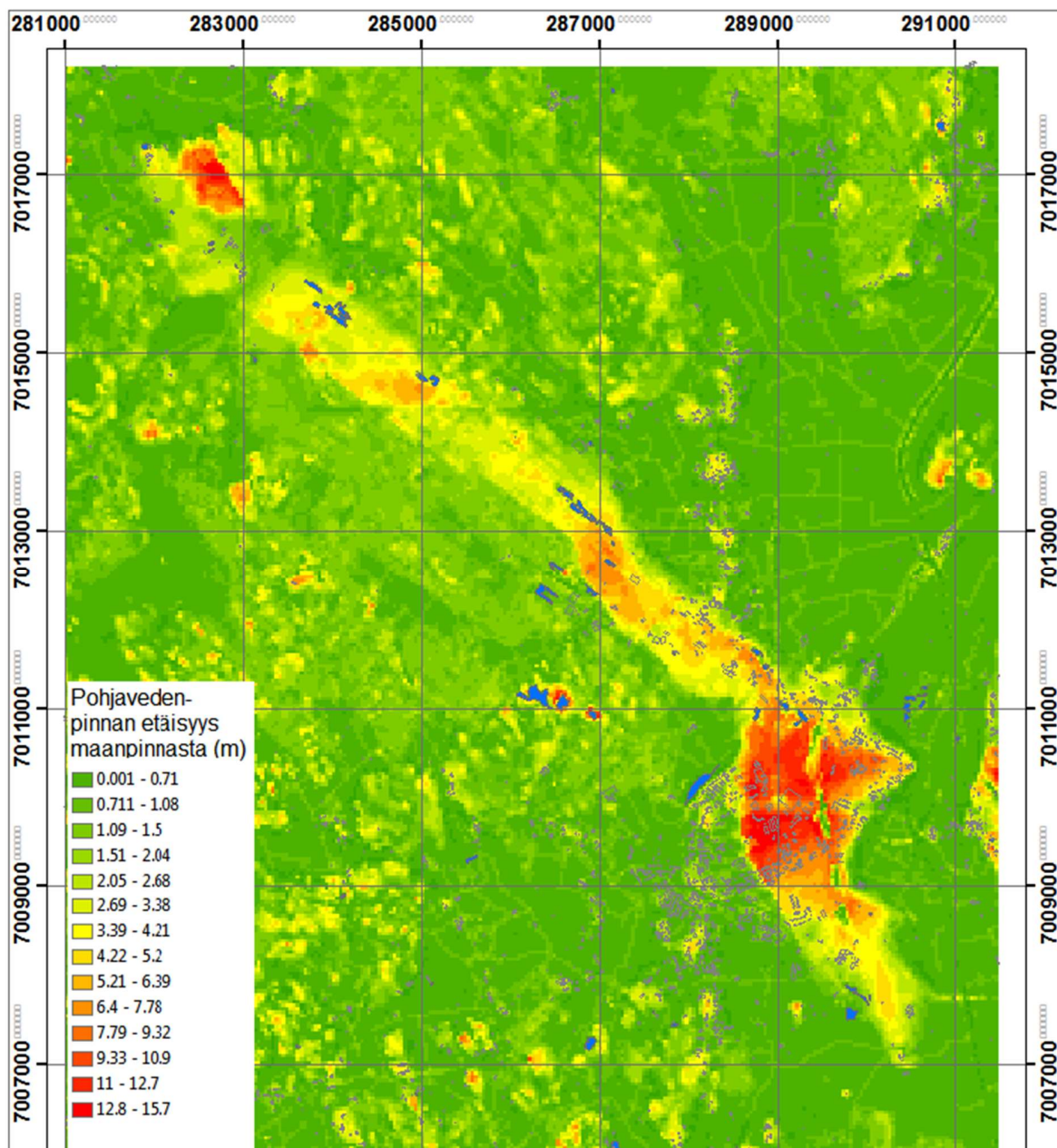
Kuva 4-6. Mitattu ja mallinnettu pohjavedenpinnan korkeus Ekokankaan, Saunakankaan ja Pöyhösenkankaan alueiden pohjavesiputkissa (kaikkien putkien keskimääräiset mitatut ja lasketut pohjavedenpinnan korkeudet). Uuden kalibroinnin tulokset on esitetty vasemmanpuoleisessa kuvassa ja edelliset, pilottivaiheen aikana tehdyt kalibroinnin tulokset oikealla.

Mitatut ja mallinnetut pohjavedenpinnan korkeudet ajan suhteen muuttuvina arvoina on esitetty kuvassa 4-7 muutamalle Ekokankaan ja Pöyhösenkankaan esiintymän alueella oleville havaintoputkille. Mitattujen ja laskettujen arvojen vastaavuus on pääosin hyvä. Kuvan oikeassa alanurkassa on esitetty tulokset havaintoputkesta Uusikaivo. Mallista puuttuu toistaiseksi Pöyhösenkankaan vedenottamon pumppauspaikka ja -määrä (tiedot eivät ole julkisia). Tiedot lisätään malliin myöhemmin.



Kuva 4-7. Mitattu ja mallinnettu pohjavedenpinnan korkeus Ekokankaan ja Pöyhösenkankaan alueilla. Kuuden havaintoputken ajan suhteen muuttuvat mitatut ja lasketut pohjavedenpinnan korkeudet.

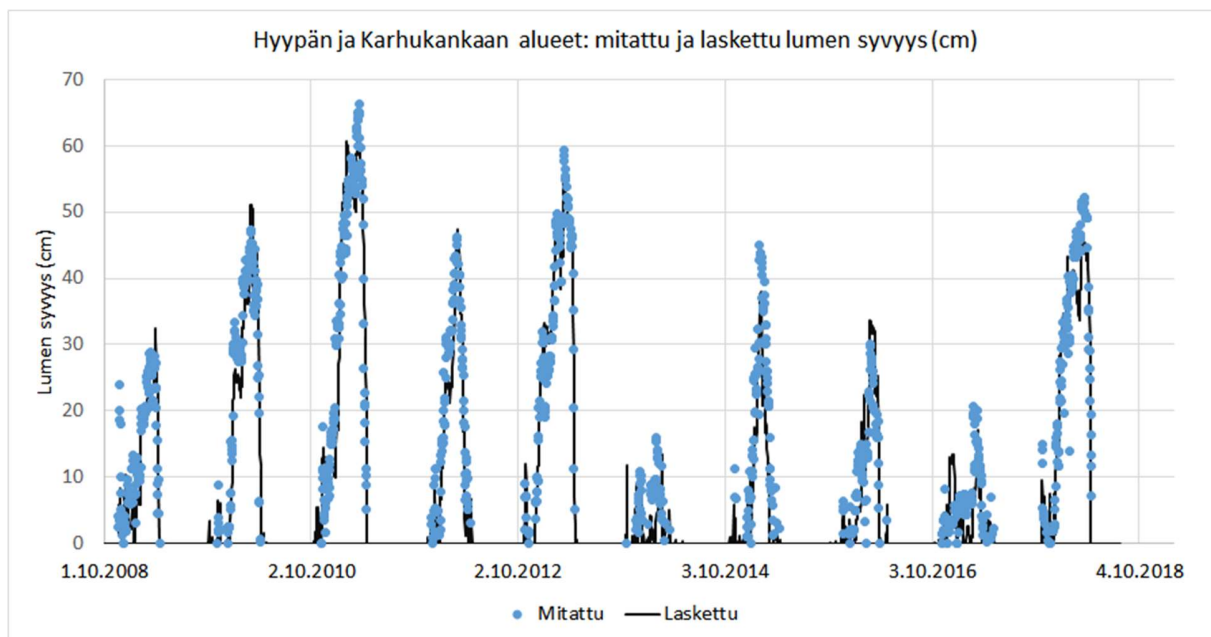
Kuvassa 4-8 on esitetty Ekokankaan, Saunakankaan ja Pöyhösenkankaan pohjavesiesiintymien mallinnettu keskimääräinen pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnalta. Mallin mukaan pohjavedenpinnan syvyys on suurimmillaan 15 m Pöyhösenkankaan alueella mutta keskimäärin pohjavedenpinta on melko lähellä maanpintaa (pääosin alle 5 m). Pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnalta on tarpeellinen lähtötieto arvioitaessa kunnostusojitusten vaikutuksia pohjavedeksi imeytyvän veden laatuun,



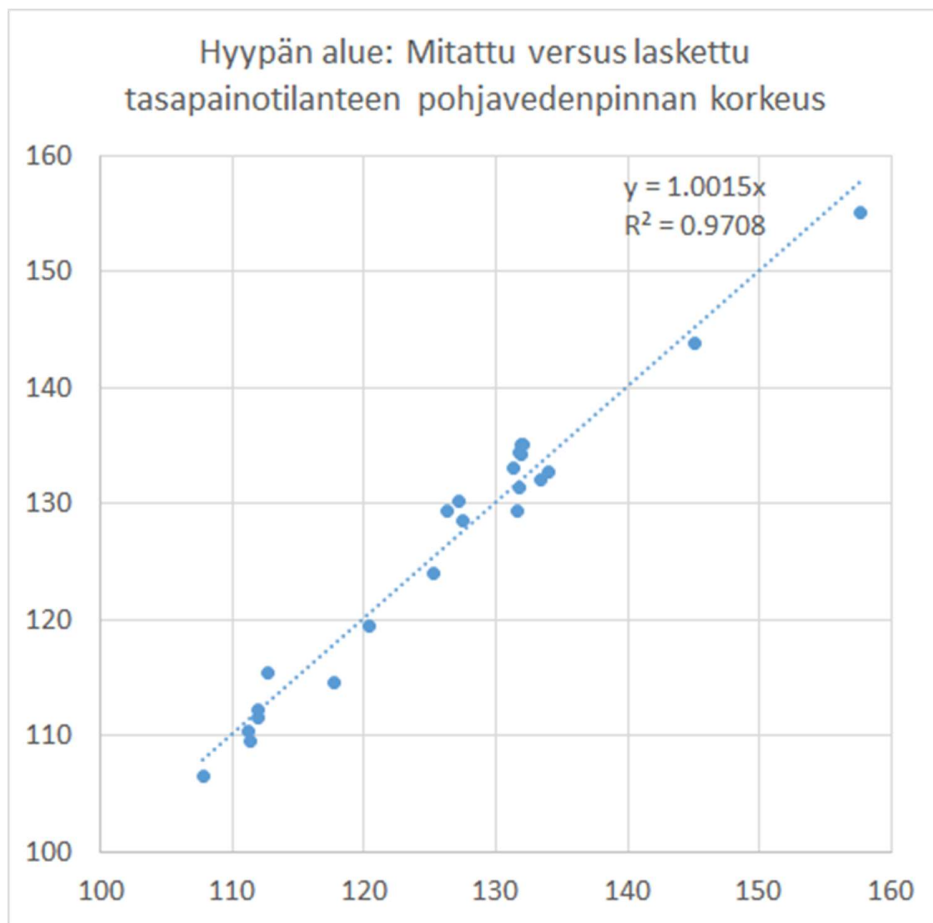
Kuva 4-8. Ekokankaan, Saunakankaan ja Pöyhösenkankaan pohjavesialueiden mallinnettu keskimääräinen pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnalta.

4.1.3 Hyypän alue

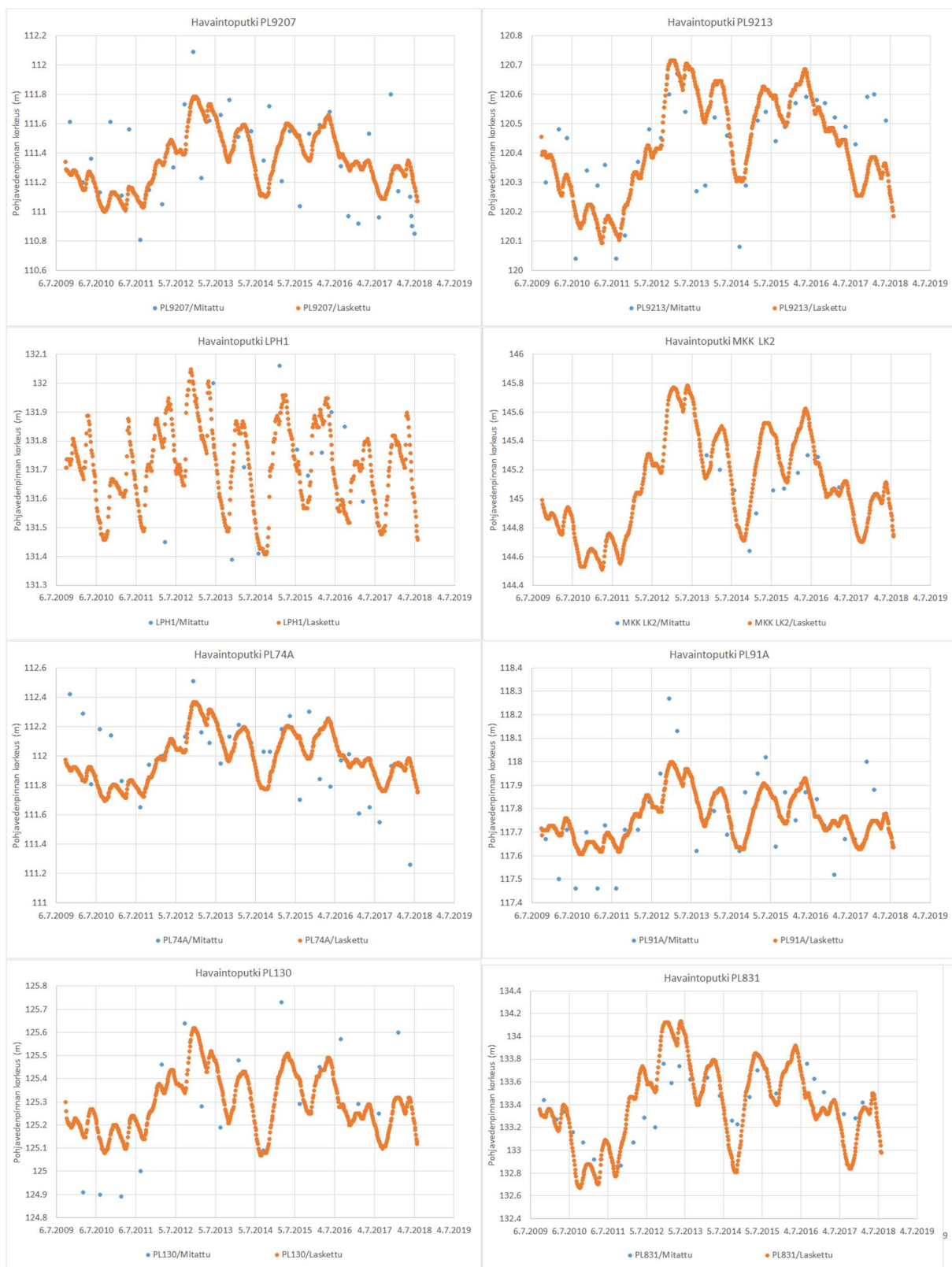
Kuvassa 4-9 on esitetty Hyypän ja karhukankaan alueiden mitattu ja mallilla laskettu lumen syvyys vuosien 2006 – 2017 väliseltä ajalta. Alueet ovat niin lähellä toisiaan, että niillä käytetään samaa lumen kertymistä ja sulamista kuvaavaa mallia. Malli pystyy ennustamaan hyvin lumen kertymisen alkuhetken sulannan ajoituksen. Mitatut ja mallinnetut lumen syvyyden maksimiarvot vastaavat melko hyvin toisiaan.



Kuva 4-9. Hyypän ja Karhukankaan alueiden mitattu ja mallilla laskettu lumen syvyys.



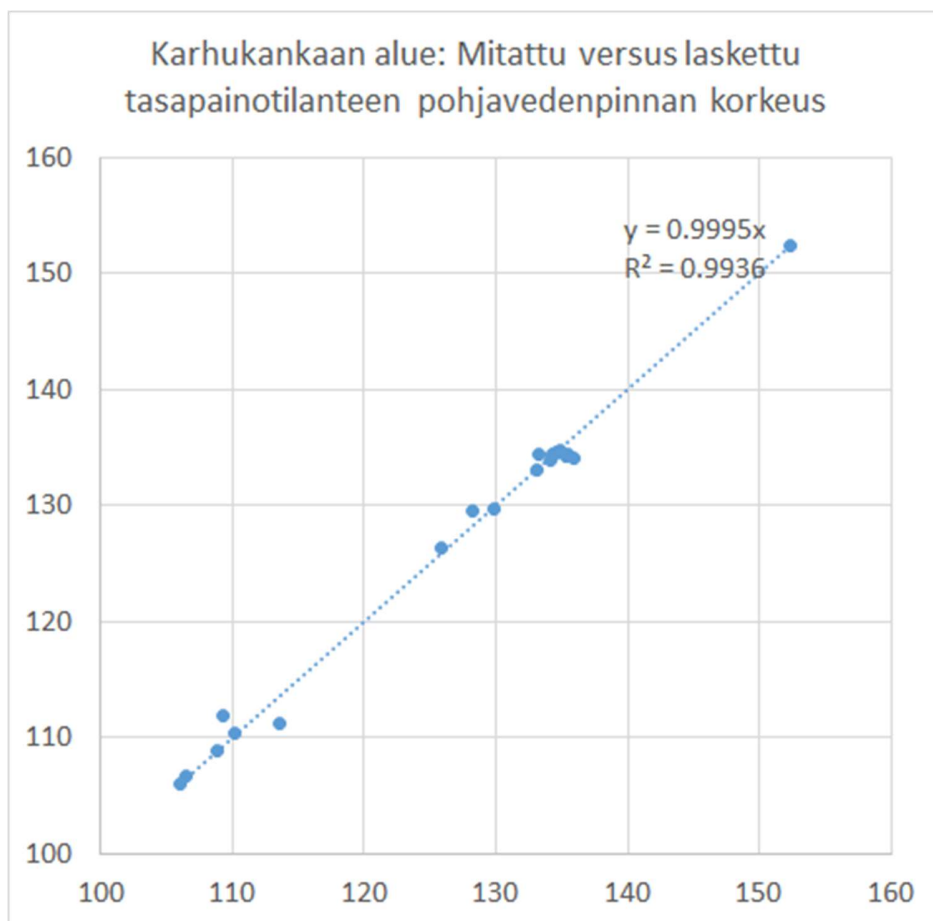
Kuva 4-10 Mitattu ja mallinnettu pohjavedenpinnan korkeus Hyypän alueen havaintoputkissa (kaikkien putkien keskimääräiset mitatut ja lasketut pohjavedenpinnan korkeudet).



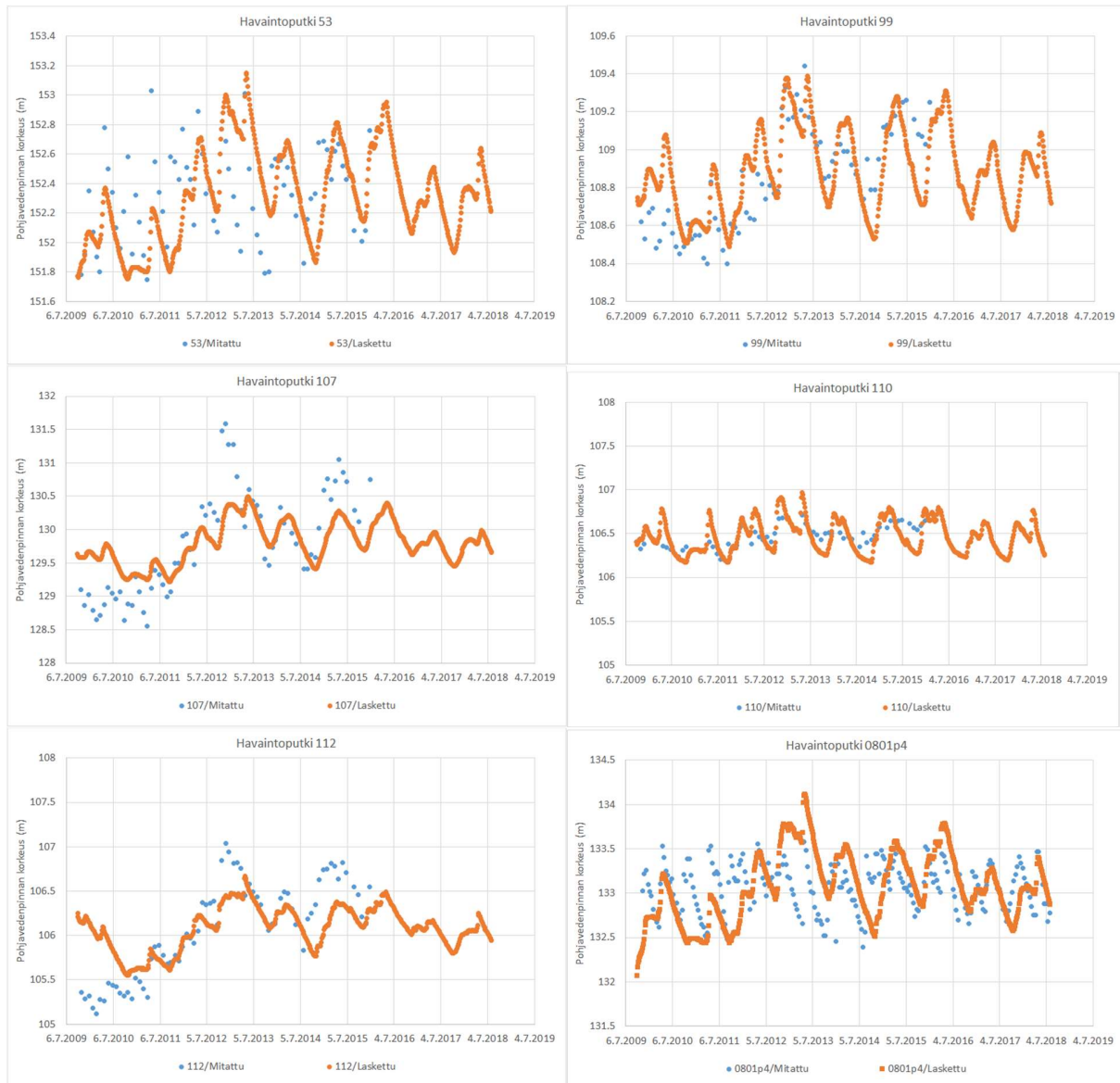
Kuva 4-11. Mitattu ja mallinnettu pohjavedenpinnan korkeus Ekokankaan ja Pöyhösenkankaan alueilla. Kuuden havaintoputken ajan suhteen muuttuvat mitatut ja lasketut pohjavedenpinnan korkeudet.

4.1.4 Karhukankaan alue

Karhukankaan alueella käytetään samaa lumen kertymisen ja sulannan kuvaavaa mallia kuin Hyypän alueella (kuva 4-9).



Kuva 4-12. Mitattu ja mallinnettu pohjavedenpinnan korkeus Karhukankaan alueen havaintoputkissa (kaikkien putkien keskimääräiset mitatut ja lasketut pohjavedenpinnan korkeudet).



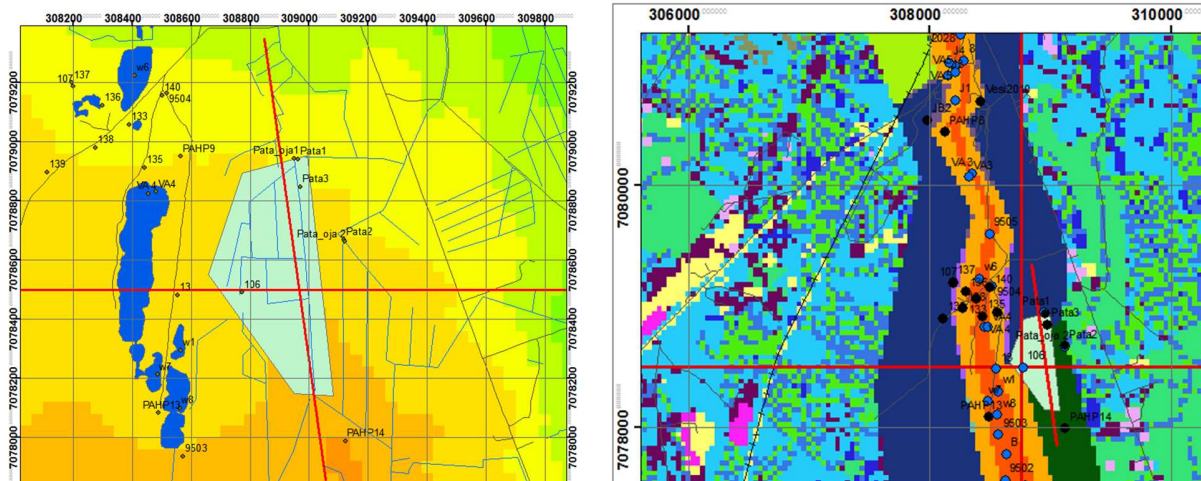
Kuva 4-13. Mitattu ja mallinnettu pohjavedenpinnan korkeus Ekokankaan ja Pöyhösenkankaan alueilla. Kuuden havaintoputken ajan suhteen muuttuvat mitatut ja lasketut pohjavedenpinnan korkeudet.

5 Mallien soveltaminen kunnostusojitusten pohjavesivaikutusten arvioinnissa

5.1 Patamäki

Patamäen alueella tehtiin v. 2016 pohjavesialueen rajauksen sisällä sekä avohakkuu että metsäojien perkaus (kuva 5-1). Toimenpiteet ajoittuivat hyvin lähelle toisiaan. Avohakkuu nostaa pohjavedenpintoja, sillä haihdunta pienenee. Metsäojien perkaus puolestaan alentaa pohjavedenpintoja, sillä kuivatus tehostuu. Patamäen alueella kunnostusojitus sijoittuu ydinharjun itäpuolelle.

Mallinnuksessa oletettiin, että ojien perkaus ja avohakkuu tehtiin samalla alueella (avohakkuun tarkka raja ei ollut tiedossa). Ojien vedenpinta oli perkauksen jälkeen (vuoden 2017 aikana) melko korkealla ennen ojitusta vallinneeseen tilanteeseen verrattuna. Mallin avulla tutkittiin samanaikaisen avohakkuun ja kunnostusojituksen mahdollisia yhteisvaikutuksia.



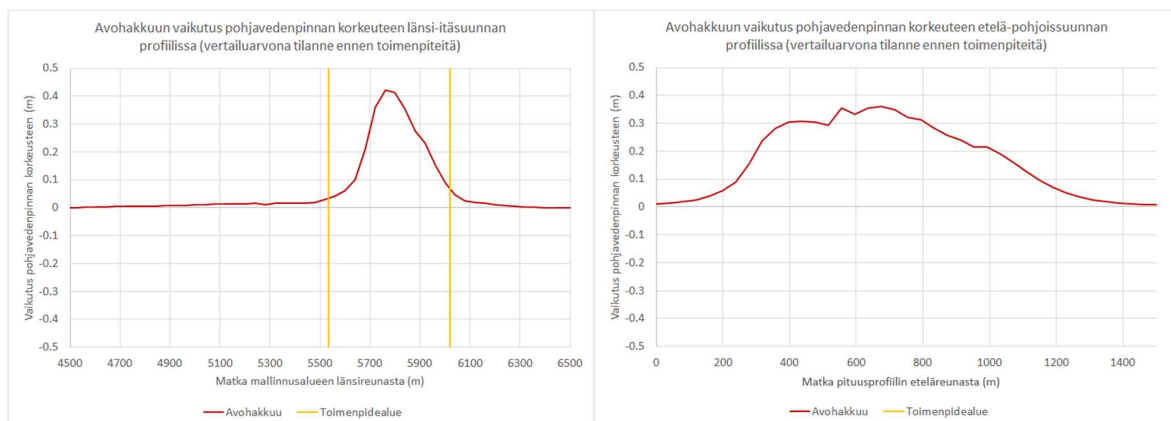
Kuva 5-1. Avohakkuun ja kunnostusojituksen sijainti Patamäen alueella. Kunnostusojitus- ja avohakkuualue ei sijaitse ydinharjun alueella vaan sen itäpuolella. Kuvassa olevat punaiset viivat ovat pituusleikkauksia, joiden kohta vertaillaan mallin laskemia pohjavedenpintoja ennen avohakkuuta ja kunnostusojitusta ja näiden jälkeisessä tilanteessa.

Mallilla laskettiin neljä tapausta:

- 0) Ei ojien perkausta eikä avohakkuuta (ennen toimenpiteitä vallinnut tilanne)
- 1) Ei ojien perkausta vaan pelkästään avohakkuu
- 2) Ojien perkaus, mutta ei avohakkuuta
- 3) Ojien perkaus ja avohakkuu samanaikaisesti (toteutunut vaihtoehto)

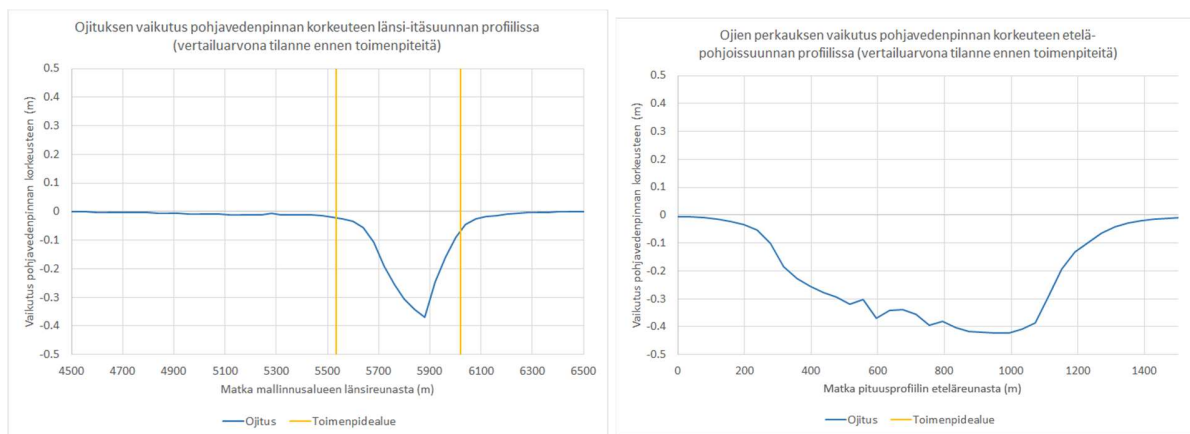
Eri laskentatapausten 1) – 3) tuloksia verrataan 0)-vaihtoehtoon tilanteeseen, jossa avohakkuuta tai kunnostusojitusta ei olisi tehty. Tulokset on esitetty sekä alenemakarttana (kuva 5-5), että pituusprofiilien (kuva 5-1) avulla. Toinen profiili leikkaa avohakkuualueen länsi-itäsuunnassa ja toinen on lähes pohjois-eteläsuunnan profiili.

Kuvassa 5-2 on esitetty pelkän avohakkuun (ei kunnostusojitusta) vaikutus pohjavedenpinnan käyttäytymiseen kuvan 5-1 pituusprofiileissa. Tuloksissa positiivinen muutos tarkoittaa, että toimenpiteen vaikutus nostaa hakkuualueen pohjavedenpintoja. Avohakkuu pienentää haihduntaa, joten pohjavedenpinta nousisi tulosten mukaan enimmillään n 0.4 m.



Kuva 5-2. Avohakkuun vaikutus pohjavedenpinnan muutoksiin kahdessa alueen poikki kulkevassa pituusprofiilissa. Tuloksissa positiivinen muutos tarkoittaa, että toimenpiteenvaikutus nostaa hakkuualueen pohjavedenpintoja.

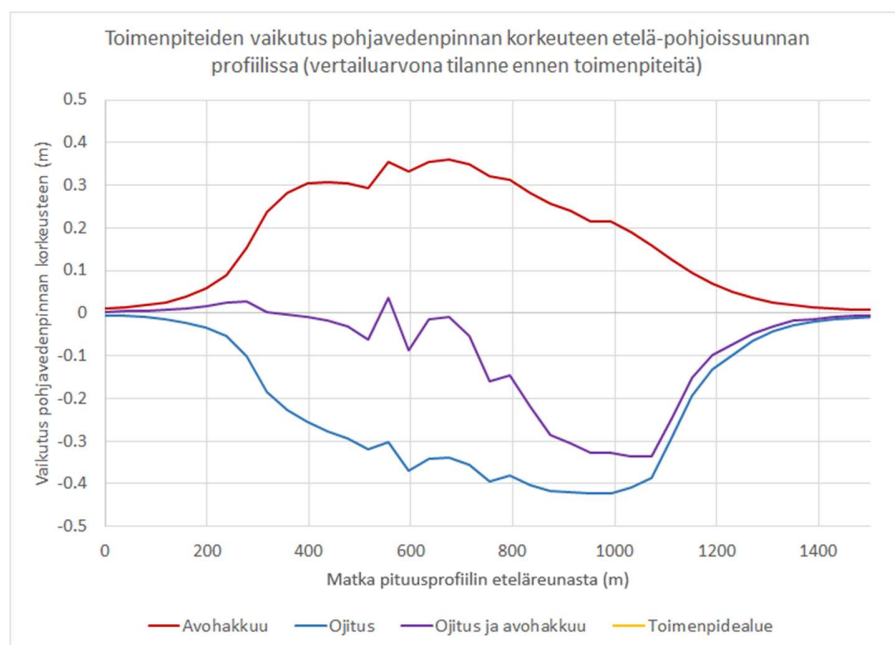
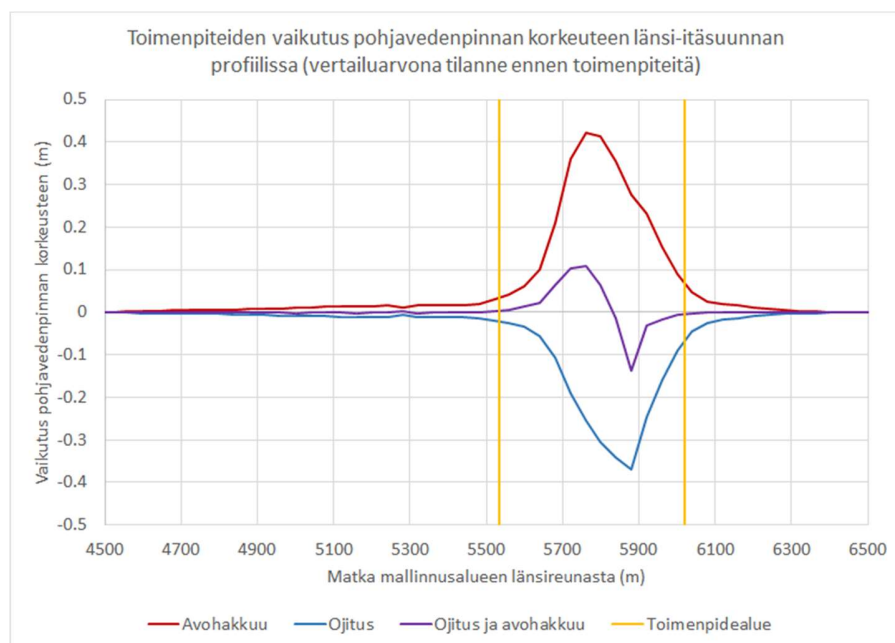
Kuvassa 5-3 on esitetty mallin laskemat arviot pohjavedenpinnan muutoksista, jos alueella olisi tehty pelkästään kunnostusojitus (perkaus ja ojien syventäminen 0.4 m), mutta ei avohakkuuta. Kunnostusojitus alentaa pohjavedenpintoja laskennan mukaan suurimmillaan n 0.4 m.



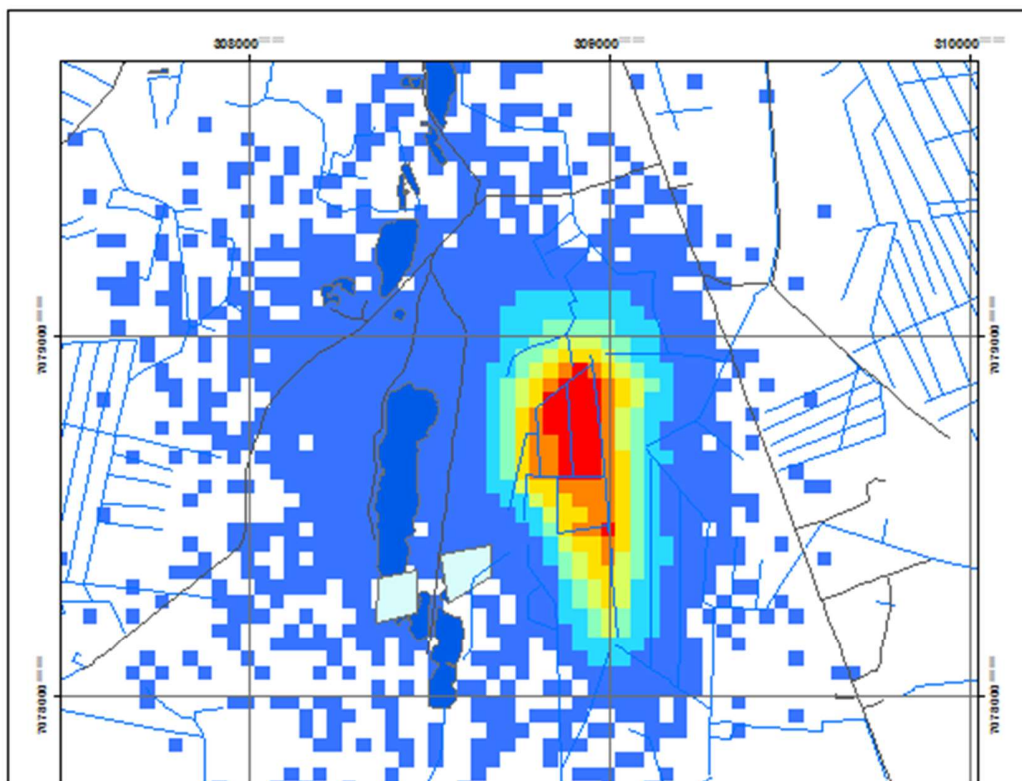
Kuva 5-3. Kunnostusojituksen (perkaus ja ojien syventäminen) vaikutus pohjavedenpinnan muutoksiin kahdessa alueen poikki kulkevassa pituusprofiilissa. Tuloksissa negatiivinen muutos tarkoittaa, että toimenpiteen vaikutus alentaa alueen pohjavedenpintoja.

Patamäen alueelle tehtiin avohakkuu ja kunnostusojitus ajallisesti hyvin lähellä toisiaan, joten todellinen tilanne on se, että on arvioitava avohakkuun ja kunnostusojituksen yhteisvaikutus. Tulokset on esitetty kuvassa 5-4. Tässä kuvassa on esitetty myös laskentavaihtoehtojen 1) ja 2) tulokset. Tulosten mukaan avohakkuun ja kunnostusojituksen vaikutukset kumoavat toisiaan, kun ne tehdään samanaikaisesti. Kuvan 5-4 tulosten mukaan yhteisvaikutus on länsi-itäsuunnan profiilissa suurimmillaan vain n. 0.1 m ja pohjois-eteläsuunnan profiilissa hieman suurempi (-0.3

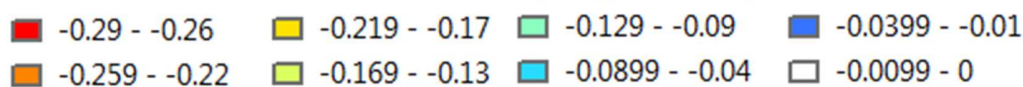
m). Laskelmissa oletettiin, että perkauksen lisäksi ojia syvennetään 0.4 m, mikä lienee suurempi kuin toteutettu ojien syventäminen. Jos ojien syventäminen on ollut esimerkiksi 0.2 m, niin kahden samanaikaisen toimenpiteen vaikutus olisi Patamäen tapauksessa hyvin pieni eli 0.1 m. Ojien perkaus ja pieni syventäminen aiheuttivat sen, että pohjavedenpinta on toimenpiteiden jälkeen kunnostetuissa ojissa ojan pohjan tason yläpuolella, kun se ennen toimenpiteitä lienee ollut ojien pohjan tason yläpuolella vain keväällä ja syksyn sateiden jälkeen.



Kuva 5-4. Avohakkuun ja kunnostusojituksen (perkaus ja ojien syventäminen) yhteisvaikutus pohjavedenpinnan muutoksiin kahdessa alueen poikki kulkevassa pituusprofilissa. Tuloksissa negatiivinen muutos tarkoittaa, että toimenpiteen vaikutus alentaa alueen pohjavedenpintoja.



Kunnostusojituksen vaikutus pohjavedenpinnan korkeuteen



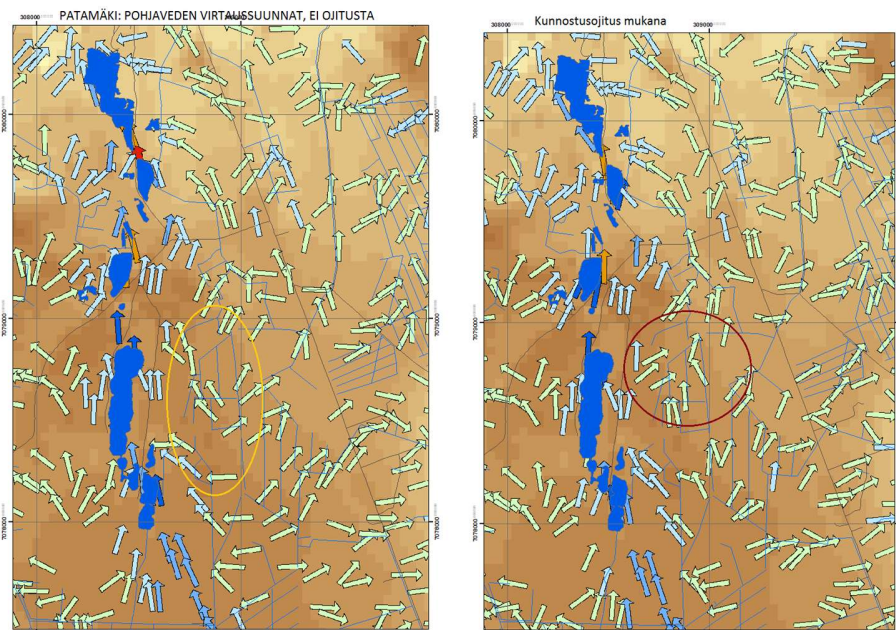
Kuva 5-5. Patamäen alueen avohakkuun ja kunnostusojituksen yhteisvaikutus pohjavedenpinnan korkeuteen. Negatiivinen muutos tarkoittaa sitä, että toimenpide alentaa pohjavedenpinnan korkeuksia.

Kuvassa 5-6 on esitetty mallilla lasketut pohjaveden virtaussuunnat ennen ja jälkeen toimenpiteiden ja kuvassa 5-7 pohjaveden valuma-aluejako ennen avohakkuuta ja kunnostusojitusta ja se jälkeen. Toimenpiteiden vaikutukset näkyvät pieninä muutoksina pohjaveden virtaussuunnissa ja valuma-aluejaossa, mutta vaikutukset eivät ole kovin suuria johtuen siitä, että ojiin virtaavan vesimäärä on mallin mukaan n. 5-10 % avohakkuualueen lähiympäristön kokonaisvesitaseesta (imeyntä ja vaakasuuntaiset pohjavesivirtaukset).

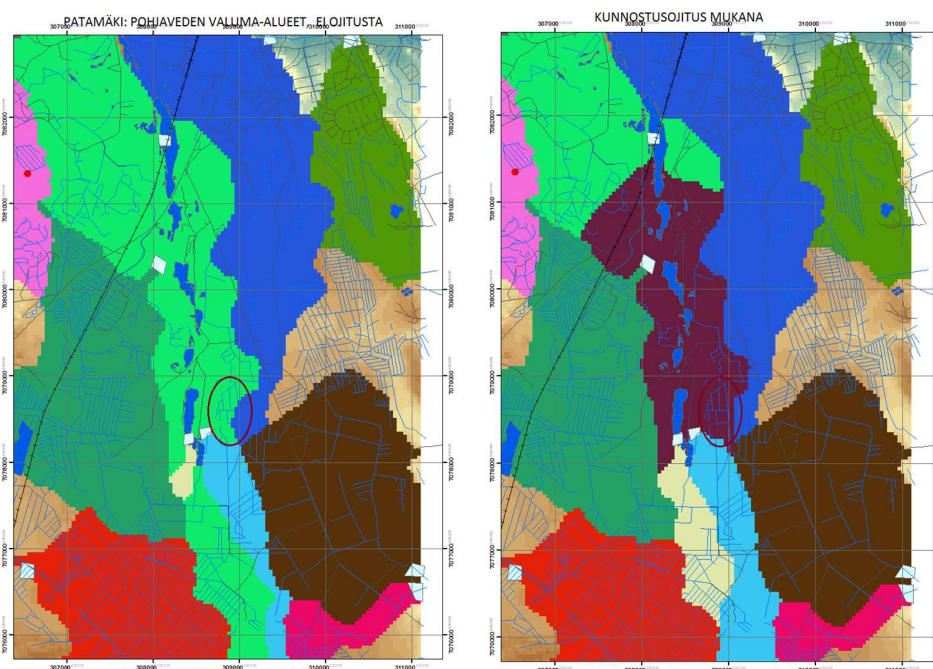
Johtopäätökset avohakkuun ja kunnostusojituksen yhteisvaikutuksesta

Alueella tehty avohakkuu samanaikaisen ojien perkauksen kanssa aiheuttaa sen, että perkauksen ja ojien syventämisen vaikutus voimakkaammin kuin tilanteessa, jossa tehdään pelkkä kunnostusojitus. Ojissa tämä näkyy pohjavedenpinnan nousuna ojan pohjan yläpuolelle enemmän kuin jos avohakkuuta ei olisi tehty. Haihdunta pienenee avohakkuun takia ja tämä nostaa pohjavedenpintaa ja samanaikainen ojien syvennys madaltaa ojan pohjan tasoa. Patamäen alueella kunnostusojitusta ei ehkä olisi tarvittu ollenkaan, kun alueella tehtiin avohakkuu. Yleinen johtopäätös Patamäen kokemuksista on se, että jos alueella tehdään avohakkuu, niin kunnostusojituksen tarve selvitetään huolellisesti etukäteen ja se toteutetaan vasta avohakkuun jälkeen, jos sille on tarve. Patamäen tapauksessa olisi järkevää yrittää saada

alueen metsänkasvu käyntiin, joka lisäisi haihduntaa ja alentaisi sitä myötä pohjavedenpintoja ennen pitkää samalle tasolle, jolla oltiin ennen avohakkuun ja kunnostusojituksen toteuttamista.



Kuva 5-6. Mallilla lasketut pohjaveden virtaussuunnat avohakkuualueen ja kunnostusojitusalueen lähiympäristössä ennen toimenpiteitä (vasemmanpuoleinen kuva) ja toimenpiteiden jälkeen (oikeanpuoleinen kuva).

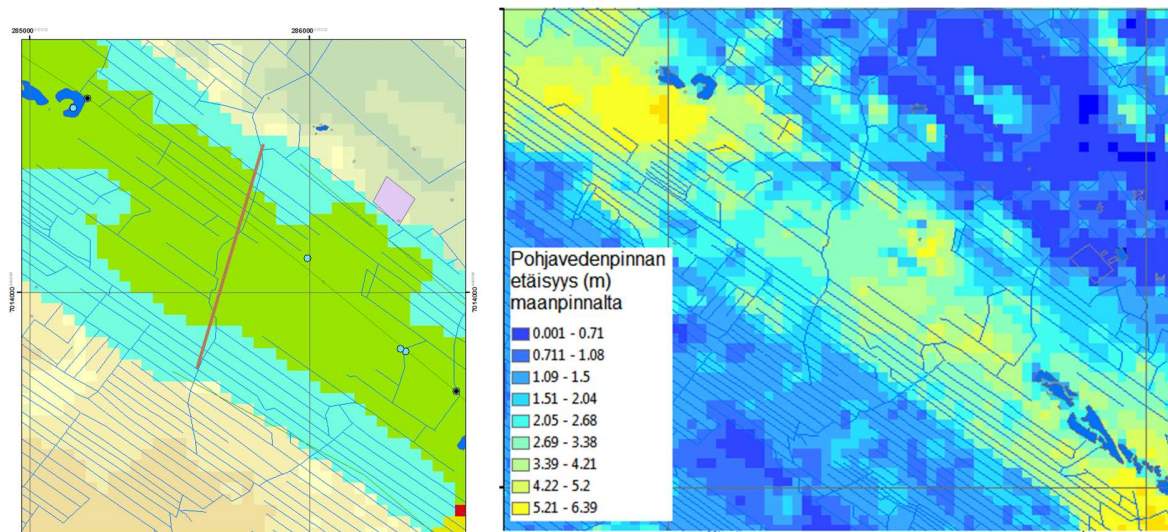


Kuva 5-7. Mallilla lasketut pohjaveden valuma-alueet avohakkuualueen ja kunnostusojitusalueen lähiympäristössä ennen toimenpiteitä (vasemmanpuoleinen kuva) ja toimenpiteiden jälkeen (oikeanpuoleinen kuva).

5.2 Ekokangas

Ekokankaan alueelle ei ole suunniteltu kunnostusojituksia, joten mallilla laskettiin hypoteettista tapausta, jossa Ekokankaan pohjavesialueen poikki menevää isompaa ojaa (kuva 5-8) perataan. Samalla oletetaan, että ojaa syvennetään 0.4 m. Mallilla laskettiin pohjavedenpinnan korkeudet ojien läheisyydessä sekä ilman perkausta, että perkauksen ja syventämisen vaikutus huomioiden.

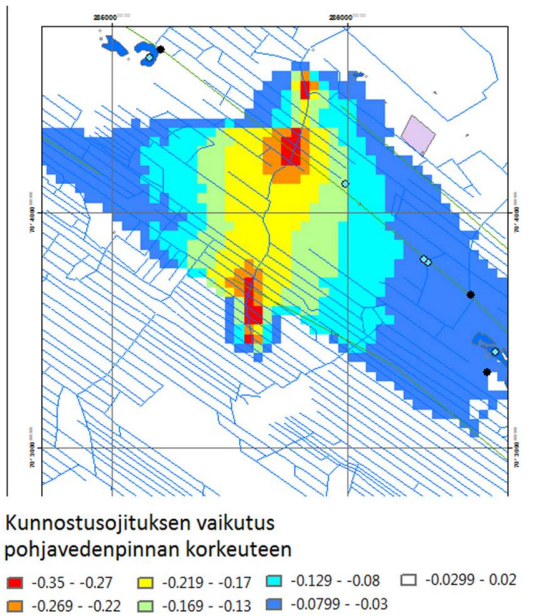
Ekokankaan alueella pohjavedenpinta on paikka paikoin lähellä maanpintaa ja kuvaan 5-8 merkityn isomman, alueen poikki kulkevan ojan ympäristössä pohjavedenpinnan syvyys vaihtelee 1.5 ja 3.0 m:n välillä.



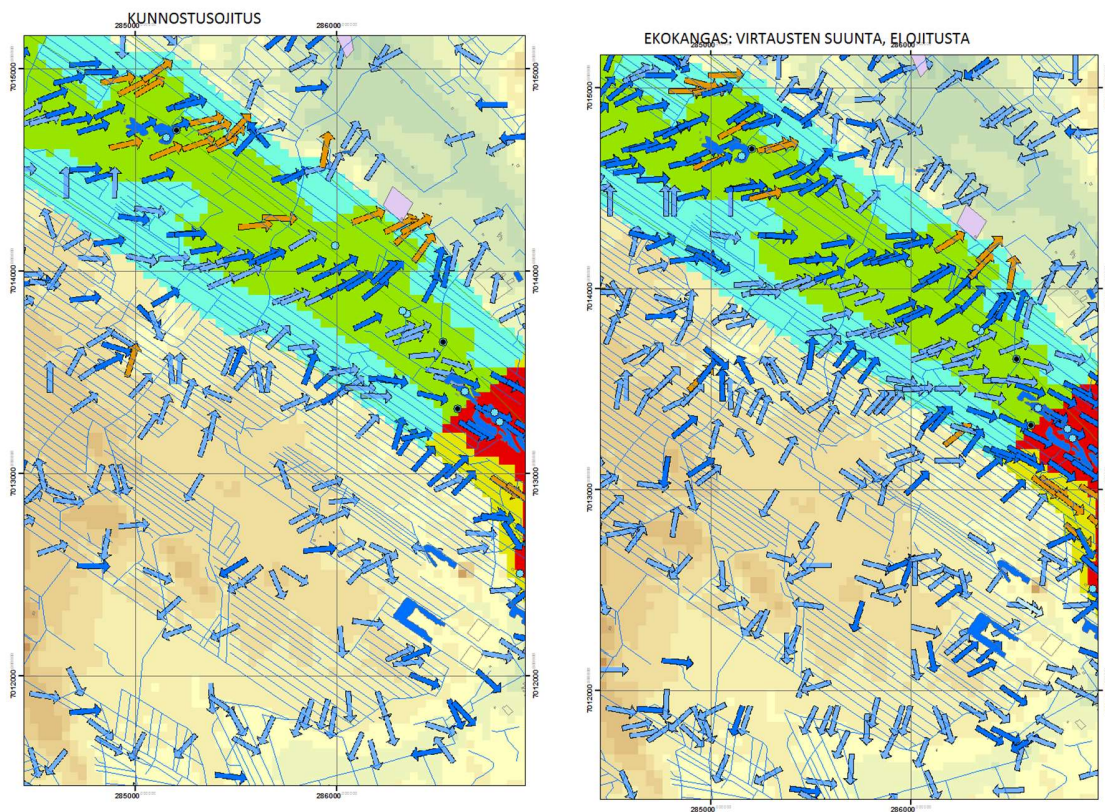
Kuva 5-8. Mallin testauskohteena käytetty uoma, joka kulkee Ekokankaan pohjavesiesiintymän poikki (vasemmanpuoleinen kuva) ja alueen mallinnettu pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnalta (oikeanpuoleinen kuva).

Kuvassa 5-9 on esitetty pohjavedenpinnan alenema alueen poikki kulkevan jos ojan ympäristössä, jos ojan syvennys ja perkaus toteutetaan. Ojien syventämisen vaikutus on mallin mukaan suurimmillaan n. 0.35 harjun reunoilla. Harjun keskiosassa mallinnettu alenema on n. 0.2 m.

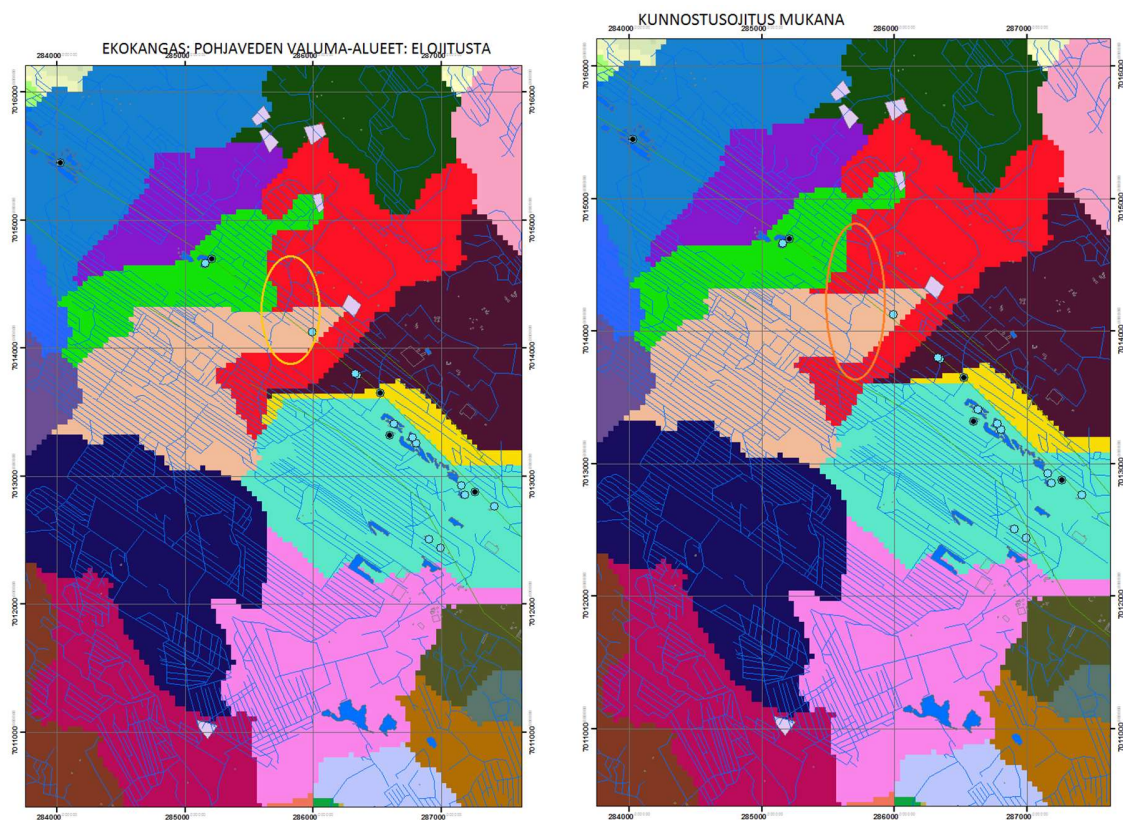
Kuvassa 5-10 on esitetty hypoteettisen kunnostusalueen ympäristön pohjaveden virtaussuunnat ja kuvassa 5-11 pinta- ja pohjavesien valuma-alueajat. Kuvan 5-10 mukaan pohjaveden virtaussuunta on ojan kohdalla länteen ja osin jopa harjualueen poikki suuntautuvaa. Tämä johtuu siitä, että maanpinta on ojan kohdalla esiintymän etelä- ja lounaispuolella n 4- 6 m korkeammalla kuin pohjois- ja koillispuolella esiintymää. Näillä alueilla pohjavedenpinta on niin lähellä maanpintaa, että maanpinnan korkeusero vaikuttaa myös pohjavedenpinnan virtaussuuntiin (n.s. piiloharju). Ojan syventäminen ei mallin mukaan muuta merkittävästi koko pohjavesiesiintymän virtaussuuntia tuolla alueella. Ojien kunnostuksen vaikutus valuma-alueiden jakoon ei myöskään muutu merkittävästi.



Kuva 5-9. Mallinnettu pohjavedenpinnan alenema, jos Ekokankaan esiintymän poikki kulevaa ojaa perataan ja syvennetään 0.4 m.



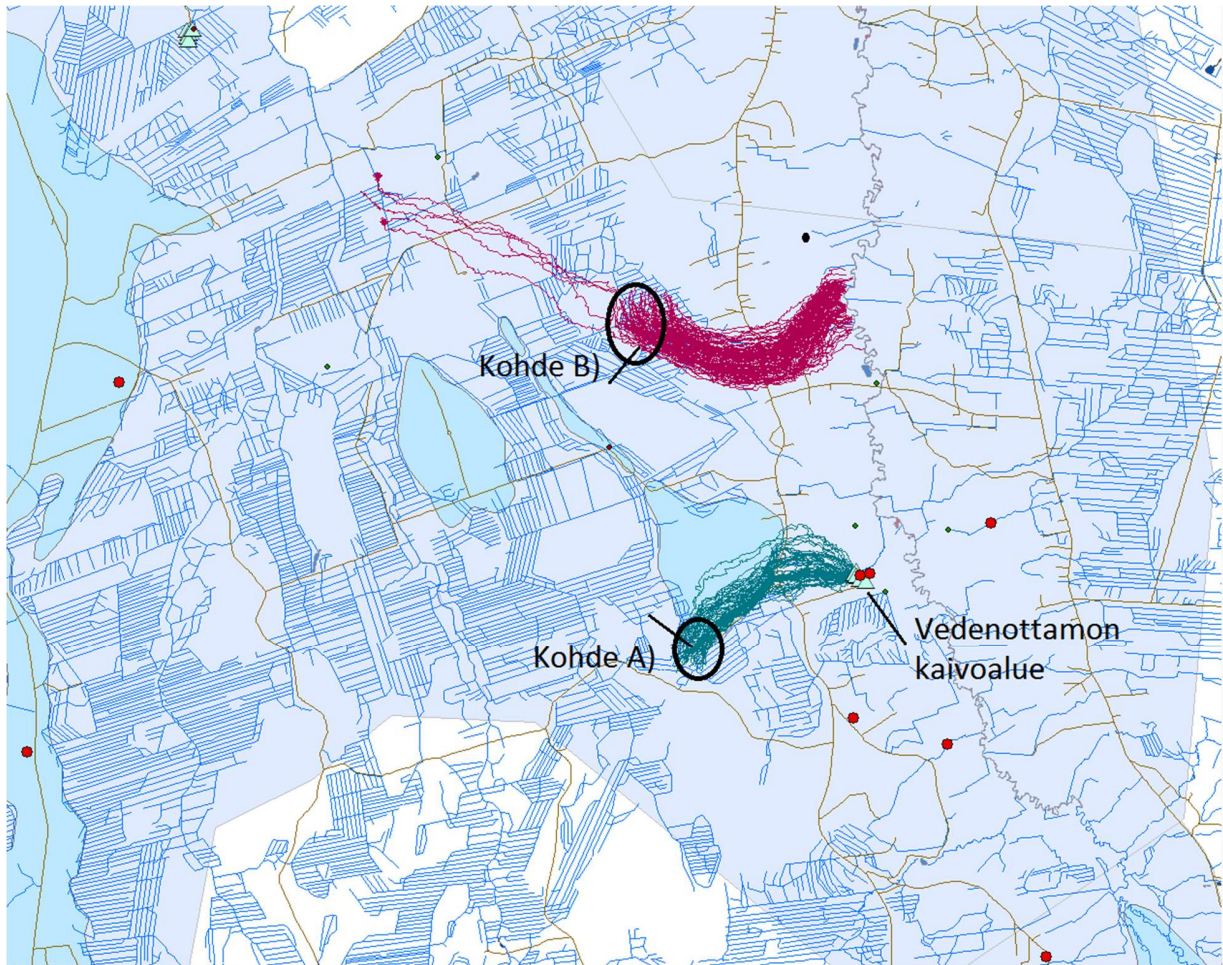
Kuva 5-10. Pohjaveden virtaussuunnat Ekokankaan esiintymän alueella hypoteettisen kunnostusalueen ympärillä.



Kuva 5-11. Mallilla lasketut pohjaveden ja pintaveden valuma-alueet alueelle, jolla Ekokankaan esiintymän poikki kulkee iso oja, jonka syventämisen vaikutuksia arvioidaan mallintamisen avulla. Valuma-alueet ennen toimenpiteitä (vasemmanpuoleinen kuva) ja toimenpiteiden jälkeen (oikeanpuoleinen kuva).

5.3 Hyypän ja Karhukankaan alueet

Hyypän alueelle ei ole toistaiseksi suunniteltu kunnostusojituksia. Työssä käytetyllä ohjelmistolla voidaan tehdä vastaavat tarkastelut kuin Patamäen ja Ekokankaan alueilla. Edellisten lisäksi ohjelmistoa voi käyttää arvioitaessa mihin suuntaan suunnitellun kunnostusojitusalueen pohjaveteen liuenneet yhdisteet ovat kulkeutumassa. Tämän tyyppisen tarkastelun tulokset on esitetty Hyypän alueelle kuvassa 5-12. Laskentamallilla voidaan arvioida todennäköisimmät kulkeutumisreitit kunnostuskohteen alueelta ja arvioida mm. riski sille, että pohjaveteen lienneet yhdisteet päätyisivät vedenottamon kaivoalueelle.



Kuva 5-12. Esimerkki ohjelmiston laskemista virtausviivoista potentiaalisen kunnostuskohteen alapuolisessa pohjavesivyöhykkeessä. Virtausviivat kuvaavat sitä, mihin kunnostuskohteen pohjaveteen lienneet yhdisteet ovat todennäköisimmin kulkeutumassa. Kohteen A) alueelta virtausreitit kulkevat kohti vedenottamon kaivoaluetta, mikä käytännössä estäisi ojen kunnostuksen tuolla alueella. Kohteen B) alueelta virtausreitit päättyvät pääosin pohjois-eteläsuunnassa kulkevaan Kauhajokeen ja pieni osa alueen länsipuolella olevaan pieneen ojaan. Alueen B) pohjaveteen lienneiden yhdisteiden kulkeutumisreitit eivät muodostaisi riskiä vedenottamon kannalta.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

6.1 Yhteenveto

Metsätalous pohjavesialueilla on Metsätalouden Kehittämiskeskus Tapion käynnistämä hanke, jonka tarkoituksena on ollut keskustella kunnostusojituksen mahdollisuuksista pohjavesialueilla. Hankkeella luodun yhteistyöverkoston avulla tavoitteena on ollut parantaa metsätaloustoimijoiden ja talousvesistä vastaavien toimijoiden sekä viranomaisten välistä kanssakäymistä, vuoropuhelua ja yhteistyötä. Tässä raportissa esitelty KUNNOS-toimintamalli on osa *Metsätalous pohjavesialueilla*-hanketta.

KUNNOS-toimintamalli tähtää pohjavesimallien monipuoliseen hyödyntämiseen metsätalouden kunnostusojitusten vaikutusten arvioinnissa. *Metsätalous pohjavesialueilla*-hankkeen yhteydessä on todettu, että sopivien pohjavesialueilla sijaitsevien kunnostusojituksen seuranta- ja tutkimusalueiden löytäminen on haastavaa, alueita tarvittaisiin useista erilaisista pohjavesimuodostumatyypeistä ja ojituksen vaikutukset voivat vaihdella erilaisilla muodostumatyypeillä hyvin paljon. Yksittäisillä tutkimuksilla on hankala päästä yksityiskohtaiseen yleisesti sovellettavissa olevaan ohjeistukseen. Yksi vaihtoehto tapauskohtaisen ohjeistuksen laadinnan apuvälineiksi ovat pohjavesimallit, joilla voidaan arvioida kunnostusojituksen syvyyden ja ojavälin vaikutuksia pohjavedenpinnan käyttäytymiseen ja pohjaveden purkautumis- tai imeytymisolosuhteiden muutoksiin. Avohakkuun vaikutuksia arvioitaessa voidaan huomioida haihdunnan pienenemisen vaikutukset pohjavedenpinnan käyttäytymiseen.

KUNNOS-toimintamallissa yhdistetään suunnittelijan ammattitaito, vapaasti ladattavat aineistot, toimijoiden hallussa olevat tapauskohtaiset tiedot ja pohjavesimallit. Suomessa on vapautettu viimeisten 10 vuoden aikana runsaasti aineistoja, joita pystytään hyödyntämään pohjavesimallien kehittämisessä. KUNNOS-toimintamallissa käytetään Suomen ympäristökeskuksen, Maanmittauslaitoksen, Ilmatieteen laitoksen ja Geologian tutkimuskeskuksen aineistoja. Tapauskohtaisia, toimijoiden itse keräämiä tietoja voivat olla ojitusten toteutusajankohta ja -tapa, pohjavedenpinnan korkeushavainnot, turvekerrosten paksuus, maalajitiedot ja kunnostussuunnitelmat.

Hankkeessa on tehty pohjavesimallit neljälle erityyppiselle pohjavesiesiintymälle ja kokeiltu mallin soveltuvuutta avohakkuun vaikutusten arvioinnissa ja pohjaveteen liuenneiden yhdisteiden todennäköisimpien kulkeutumisreittien arvioinnissa. Patamäen pohjavesialue sijaitsee pääosin Kokkolan kaupungin alueella. Ekokankaan alue on osa Kauhavan, Alahärmän ja Ylihärmän kuntien alueilla sijaitsevaa pitkää harjujaksoa, johon kuuluvat Ekokankaan lisäksi Saunakangas ja Pöyhösenkankaan kolme esiintymää. Hyypän alue on pinta-alaltaan huomattavasti suurempi kuin Patamäki ja Ekokangas. Hyypän alue sijaitsee Kauhajoella ja erityispiirteenä on se, että varsinaisen muodostumisalueen pinta-ala on pieni verrattuna koko alueen pinta-alaan. Hyypän mallinnusalueen sisällä on useita pohjavesiesiintymiä: Hyypänmäki, Lumikangas, Pahalähde, Harrinkangas, Hiukkakangas, Järvikangas A, B ja C ja Katikankangas. Karhukankaan alue sijaitsee myös Kauhajoella Hyypän alueen vieressä. Karhukankaan mallinnusalueen sisällä olevat esiintymät ovat Karhukangas I ja IIA, IIB ja IIC ja Kivistönkangas.

Tavoitteena oli valita mahdollisimman erilaisia alueita mallin testausta varten. Patamäen alueella on vain yksi luokiteltu pohjavesiesiintymä, mutta muissa kohteissa mallinnusalueen sisällä on useita pohjavesiesiintymiä. Hyypän ja Karhukankaan alueilla pohjavesiesiintymän reuna-alueiden sisällä on erittäin paljon ojitettuja alueita. Kohdealueilla on sekä purkavia, että kerääviä esiintymiä

ja osa alueista pohjavesi on paineellista. Näillä perusteilla valittuja kohdealueita voi pitää erittäin edustavana otoksena arvioitaessa kunnostusojitusten vaikutuksia.

KUNNOS-hankkeen ohjelmistoissa käytetään datakeskeistä lähestymistapaa, jossa aineisto hyödynnetään sellaisessa muodossa kuin se on ja malli sopeutuu tarvittaessa kulloiseenkin aineistoon. Datapohjaisessa tarkastelussa mallin muodostaminen on mahdollista riippumatta siitä, kuinka paljon lähtötietoa on käytettävissä. Epävarman aineiston vaikutus on otettava huomioon, kun tulkitaan mallinnustuloksia ja käytetään niitä apuna toimenpiteiden vaikutusten arvioinnissa. Data-pohjainen tarkastelu sopeutuu myös joustavasti siihen, jos lähtötietoaineistoa saadaan lisää.

Laskentamallien tuloksista muodostetaan rasteri, jonka jokaiselle solmupisteelle lasketaan pohjavedenpinnan korkeus, etäisyys maanpinnalta pohjavedenpintaan, sekä virtausnopeudet ja -suunnat.

KUNNOS II-hankkeessa on myös testattu pilvipalvelu-ohjelmistoa kunnostusojitusten vaikutusten arvioinnissa. Alustavien testien perusteella kunnostusojitusten vaikutusten arviointi on mahdollista tehdä pilvipalvelun avulla. Ehdotetun konsepti etu on se, että avoimia aineistoja ja laskenta-ohjelmistoja ei tarvitse asentaa käyttäjien koneelle vaan ne tallennetaan pilvialustalle. Ohjelmiston ja aineistojen päivitys tehdään vain kerran ja muutokset siirtyvät saman tien kaikille käyttäjille.

6.2 Johtopäätökset

KUNNOS-hankkeessa tavoitteena oli selvittää voidaanko vapaasti ladattavia aineistoja hyödyntämällä päästä riittävän luotettavaan kuvaukseen pohjavedenpinnan käyttäytymisestä niin, että hankekohtainen kunnostustoimenpiteiden vaikutusten arviointi on mahdollista.

Johtopäätökset liittyen kehitettyyn toimintamalliin:

- toimintamallissa käytetyllä ohjelmistolla pystytään automatisoimaan laskentaverkon ensimmäisen version luominen, niin, että hankekohtainen vaikutusten arviointi on mahdollista
- neljällä koealueella (Patamäki, Ekokangas, Hyyppä ja Karhukangas) tehdyt kalibroinnit osoittivat, että malleilla lasketut pohjaveden pinnankorkeudet olivat hyvin lähellä mitattuja arvoja, joten mallien antamia tuloksia voidaan käyttää metsätalouden kunnostustoimenpiteiden vaikutusten arvioinnissa
- ohjelmistoissa on mukana osamalli, jolla kunnostettavien ojien syvyyden vaikutus pohjavedenpinnan käyttäytymiseen on mahdollista ottaa suunnittelussa huomioon
- avohakkuun vaikutuksia arvioitaessa voidaan huomioida haihdunnan pienenemisen vaikutukset pohjavedenpinnan käyttäytymiseen.
- ohjelmistolla lasketut virtausnopeudet ja virtausten suunnat mahdollistavat jatkossa myös ravinteiden kulkeutumismallien kytkemisen mukaan KUNNOS-toimintamalliin
- ohjelmistolla voidaan tuottaa pohjaveden valuma-aluekartat, jotka ovat mahdollisissa jatkohankkeissa hyödyllisiä arvioitaessa esimerkiksi ravinteiden kulkeutumisuuuunta
- mallien tuloksia voidaan myöhemmin hyödyntää myös erityyppisissä riskitarkasteluissa
- riskikarttoja yhdistämällä voidaan arvioida erilaisten ongelmien yhteisvaikutuksia toiminta-alueilla
- pilvipalvelukonsepti tarjoaa erittäin hyvän mahdollisuuden toteuttaa mallinnus niin, että aineistot ja mallit ovat pilvipalvelua tarjoavan yrityksen (esim. Amazon, Google, jne.) palvelimilla

6.3 Ehdotus jatkotoimenpiteiksi

Mallin rakenne on aina kompromissi käytettävissä olevien tietojen määrästä ja suunnitteluun varatusta työmäärästä. Tässä raportissa kuvattu malli on hyvin monimutkainen, mutta pilvipalvelu mahdollistaa sen, että ohjelmistoa voi mahdollisesti käyttää myös hankekohtaisen suunnittelun apuvälineenä. Pilvipalvelun avulla käyttäjän ei tarvitse huolehtia avoimien aineistojen käsittelystä eikä myöskään laskentamallien asentamisesta omalle koneelle.

Alla ehdotus KUNNOS-toimintamallin kehittämiseksi niin, että sitä voitaisiin soveltaa myös hankekohtaisessa kunnostusojitusten vaikutusten arvioinnissa:

1. Kartoitetaan ne pohjavesiesiintymät, joiden alueella metsätalouden kunnostusojitusten tarve on erityisen suuri.
2. Ladataan näiltä alueilta kaikki avoimet aineistot ja tallennetaan ne pilvipalvelimelle suunnittelijan käyttöön.
3. Ladataan SYKE:n pohjavesirekisteristä kyseisten alueiden pohjavesirajaukset, alueen pohjavesiputkien tekniset tiedot ja HERTTA-tietokannasta pohjavesiputkien mittaushavainnot.
4. Jos GTK:n rakennemalli on käytettävissä, niin ladataan sen tiedot pilvipalvelimelle (GTK avaa rakennemallit vapaasti ladattaviksi v. 2019 aikana).
5. Tehdään algoritmi, jolla kallionpinnan korkeusmalli pystytään luomaan myös siinä tapauksessa, että rakennemallia ei ole käytettävissä.
6. Testaan voiko pilvipalveluun kytkeä myös pohjaveteen liuenneiden yhdisteiden pitoisuuslaskentaa jo olemassa olevan kulkeutumisreittien laskennan lisäksi (ja sen avulla)

Metsätalouden kunnostustoimenpiteiden hankekohtaisessa suunnittelussa pilvipalvelun kautta olisi käytettävissä heti kaikki mallin soveltamisessa tarvittavat avoimet aineistot. Seuraavassa vaiheessa suunnittelija lisää kaikki hankekohtaiset tiedot: ojitussuunnitelman yksityiskohdat ja muut käytettävissä olevat tiedot, joita ei löydy avoimesta aineistosta.

Muita mahdollisia detaljitason jatkokehityshankkeita ovat:

- selvitetään onko avoimista aineistoista poimittavissa tarpeelliset lähtötiedot veden laadun laskentamallien yhdistämiseksi pohjavesimalliin
- onko järkevää kytkeä toimintamalliin ravinnepitoisuuksien laskentamalli ja sillä tehtävät arviot ravinteiden kulkeutumissuunnista ja vastaanottavaan vesistöön (joet, järvet) purkautuvissa vesissä
- ohjelmiston laajentaminen niin, että sillä pystytään tuottamaan monen tyyppisiä karttatasoja ("GIS-layer"), jotka soveltuvat käytettäväksi herkkyys- ja riskianalyysissä

Pilvipalvelukonseptin testauksen jatkaminen

Vuoden 2018 aikana tehtiin ensimmäiset onnistuneet kokeilut ohjelmiston soveltuvuudesta kunnostusojitusten vaikutusten arviointiin ja näiltä osin projektia jatketaan vuoden 2019 aikana, jolloin palvelu avataan Tapion valitsemien asiantuntijoiden koekäyttöön. Tässä yhteydessä parannetaan sekä käyttöliittymää, että lähtötietolomakkeiden muotoa ja laaditaan monipuolisemmat tulostusvaihtoehdot. Hyvin oleellinen osa käyttäjän kannalta on laskentamallien tulosten visualisointi vapaasti ladattavilla ohjelmistoilla helposti ymmärrettävinä herkkyys- ja riskikarttoina, jotka mahdollistavat suurien tietomäärien nopean ja selkeän esittämisen.

Viitteet

- Eskelinen, R., Ala-aho, P., Rossi, P. M., Kløve, B. 2015. A GIS-based method for predicting groundwater discharge areas in esker aquifers in the Boreal region. *Environmental Earth Sciences* 74(5). DOI: 10.1007/s12665-015-4491-7
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani 1982. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. and Drain Engr.*, ASCE, 108 (IR3): 223-230.
- Jauhiainen, M. 2004. Relationships of particle size distribution curve, soil water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity and their implications on water balance of forest and agricultural hillslopes TKK-VTR-12. Doctoral thesis, Helsinki University of Technology, Laboratory of Water Resources. 167 p.
- Joensuu, S., Kauppila, M., Lindén, M & Tenhola, T. 2013. Hyvän metsänhoidon suositukset – Vesiensuojelu. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja.
- Joensuu, S. 2017. Metsätalous pohjavesialueilla. Kunnostusojitus ja terveyslannoitus erityistarkastelussa. Tapion Projektiraportti 6(22) 8.3.2017.
- Karvonen, T. 2012. Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Surface and near-surface hydrological modelling in the biosphere assessment BSA-2012. Posiva Report 2012-30. 160 p.
- Kubin, E. 2012. Long-term effects of silvicultural practices on groundwater quality in boreal forest environment. In: Krecek, J., Haigh, M., Hofer, Th. & Kubin, E. (eds.). *Management of Mountain Watersheds*. Springer, Netherlands. p. 192-199.
- Kupiainen, V. 2010. Pohjaveden purkautuminen metsäoisiin Rokuan harjalueella ja ojan kunnostus padottamalla – dipolmityö, Oulun yliopisto.
- Okkonen, J., Pasanen, A. ja Ikonen, M. 2011. Patamäen pohjavesialueen virtausmallinnus. Geologian tutkimuskeskus, Länsi-Suomen yksikkö, Raportti 62/2011.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K. and Belitz, K. 1994. Verification, validation and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science* 194:641–6.
- Paalijärvi, M., Lehtimäki, J. ja Valjus, T., 2011. Patamäen pohjavesialueen geologisen rakenteen selvitys 2007-2009. Tutkimusraportti 61/2011, 17.7.2009. Geologian tutkimuskeskus, Länsi-Suomen yksikkö. 32 s
- Piirainen, S., Domisch, T., Moilanen, M. & Nieminen, M. 2013. Long-term effects of ash fertilization on runoff water quality from drained peatland forests. *Forest Ecology and Management* 287: 53-66.
- Pukkila, V., Gustafsson, J., Tuominen, J., Aallonen, A., Kontro, M.H. 2009. The most-probable number enumeration of dichlobenil and 2,6-dichlorobenzamide (BAM) degrading microbes in Finnish aquifers. *Biodegradation*, 20, 679-686.
- Rossi, P., Ala-Aho, P., Vikstedt, H. ja Kupiainen, V. 2010. Rokuan harjun vesitalouden selvittäminen matkailullisten edellytysten turvaamiseksi. Loppuraportti. 46 s.
- Rusanen, K. 2002. Metsänhakkuun vaikutus pohjaveteen. Pro Gradu –tutkielma. Turun yliopisto.
- Rusanen, K., Finér, L., Antikainen, M., Korkka-Niemi, K., Backman, B. & Britschgi, R. 2004. The effect of forest cutting on the quality of groundwater in large aquifers in Finland. *Boreal Environment Research* 9: 253-261.

Vakkilainen, P. 2009. Hydrologian perusteita. Maan vesi- ja ravinnetalous. Ojitus, kastelu ja ympäristö, luku 3 (toim. Paasonen-Kivekäs, Peltomaa, R., Vakkilainen P. ja Äijä, H.). Salaojayhdistys ry, Helsinki. p. 67-111.

van Genuchten, M. Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892-898.

van Genuchten, M. Th., 1981. Analytical solutions for chemical transport with simultaneous adsorption, zero-order production and first-order decay, Journal of Hydrology vol. 49, pp. 213-233.

Vehviläinen, B. 1992. Snow cover models in operational watershed forecasting. Publications of Water and Environment Research Institute 11, National Board of Waters and the Environment, Finland, 112 pp.

Vehviläinen B. 1994. The watershed simulation and forecasting system in the National Board of Waters and the Environment. Publications of the Water and Environment Research Institute. National Board of Waters and the Environment, Finland No. 17.