

Kerrospumppauksia Keski-Suomen hiekka-sora-akvifereissa

JORMA MÄKELÄ

Pohjavesitutkimus on tärkeää esimerkiksi hyvälaatuista pohjavettä tuottavien vedenottamoiden paikkojen suunnittelun ja pohjavesialueiden kartoituksen kannalta. Keski-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (Ely-keskus) ja sen edeltäjät valtionhallinnossa ovat tehneet pohjavesitutkimuksia Keski-Suomen maakunnan alueella vuodesta 1976 alkaen. Tutkimusraportteja on valmistunut noin

230 kpl, joista valtaosa on yhdyskuntien ja taajamien vedenhankinnan tarpeisiin tehtyjä selvityksiä. Asiakkaina ja yhteistyökumppaneina ovat olleet lähinnä kuntien vesilaitokset ja yksityiset vesiosuuskunnat.

Pohjavesitutkimuksiin liittyvät olennaisena osana erilaiset pumppauskokeet. Kerrospumppauksin selvitetään nimensä mukaisesti maaperän vedenjohtokykyä ja pohjaveden laatua vertikaalisuunnassa. Kerrospumppaus antaa tietoa



Kuva 1. Kairaus- ja pumppauskalusto Jyväskylän Korpilahdella Reinanpohjassa pisteellä 1B 30.5.2017. Ns32-imuputken siiviläosa on monitoimikairalla lyöty 5–7 metriin maanpinnasta, putki huuhdeltu ja pumppaus aloitettu. Sininen on imuletku ja valkoinen poistoletku; pumppaustuotto 130 l/min. Kuva: Ossi Alho

Figure 1. Multipurpose drilling rig and pumping equipments at the Reinanpohja test site 1B of Korpilahti in the municipality of Jyväskylä 30.5.2017. The screen has been flushed clean and the pumping has started (screen depth from 5 to 7 m bgs). Blue suction hosepipe is the inlet pipe for a centrifugal pump, white one is the outlet pipe. Pumping rate 130 l/min. Photo: Ossi Alho

pumppauspisteeltä ja sen lähiympäristöstä. Vedenhankintatutkimuksissa kerrospumppauksia käytetään lähinnä varsinaisen koepumppauspaikan (usein kaivonpaikan) alustavaan määrittelyseen.

Tässä artikkelissa tarkastellaan Keski-Suomen pohjavesiä kerrospumppaushavaintojen perusteella.

Kerrospumppausmenetelmä

Kerrospumppausmenetelmässä tutkimuskohde teessa tehdään ensin maaperäkairaus (Ø 22 mm:n tangot) määräsyyvyyteen lyönti- ja/tai tärykairauksena. Kairatankoa väliin kiertämällä tehdään aistinvaraisesti havainnot maaperän laadusta (karkeusaste, tiiviys, kivisyys). Kokenut kairaaaja pystyy tunnistamaan päämaalajitteet ja usein kuvailemaan niitä myös lisämäärein (esim. hkSr+ki). Maanäytteitä ei kairauksen yhteydessä oteta.

Kairauksen jälkeen tangot nostetaan ylös ja syntyneeseen reikään lyödään metrin pituisia Ø 32 mm:n teräsputkia toisiinsa liittämällä Ns32-imuputki, joka varustetaan karkikappaleella ja suojahatulla. Vesi putkeen pääsee putken alapään 1–2 metriä pitkistä, maa-aineksesta huuhdellusta siiviläosasta. Siiviläosassa on Ø 3 mm:n reikiä noin 3 prosenttia putken pinta-alasta. Putkien asennukset on Ely-keskuksessa tehty kallioporakoneella vuoteen 1990 saakka, jolloin Ely-keskukseen hankittiin tela-alustainen monitoimikaira (kuva 1).

Ennen pumppauksen aloittamista mitataan pohjavedenpinnan syvyys imuputkesta. Pumppaus tehdään maanpinnalla olevalla polttomootorikäyttöisellä keskipakopumpulla, jonka imuletku liitetään tiiviisti imuputken yläpäähän (kuva 1). Koska vesi nousee maanpinnalle putkeen syntyvän alipaineen ansiosta, ei imuputkeen saa päästä ilmaa. Pumppauksia on tehty erilaisella kalustolla vuosien mittaan. Nykyisten pumppujen teho on maksimissaan 400 l/min vapaasta vedestä pumpattaessa. Pumpattu vesi siirretään kauemmaksi pumppauspisteeltä poistoletkun avulla. Vesi on aluksi sameaa ja sen kir-

kastumista seurataan pumppauksen edetessä. Pumppaus kestää tunnin verran, joskus kauemminkin. Tämä varmistaa veden vaihtumisen ja tutkittavasta kerroksesta saadaan edustavat vesinäytteet (kuva 2). Näytteenotossa noudatetaan vesiviranomaisten käyttämiä näytteenotto-ohjeita ja -menetelmiä (Vesihallitus 1984). Veden lämpötila mitataan näytteenoton yhteydessä. Näytteet tutkitaan akkreditoiduissa laboratorioissa standardien mukaisesti. Ely-keskuksella on sertifioituneet näytteenottajat.

Näytteenoton jälkeen pumppu pannaan maksimiteholle ja pumppaustuotto mitataan astiamittauksena. Imuletken irrotuksen yhteydessä mitataan pohjavedenpinnan syvyys imuputkesta. Tämän jälkeen putkea jatketaan ja se lyödään seuraavaan kerrokseen.

Kerrospumppaus soveltuu tehtäväksi hiekkasoraesiintymissä, joissa maaperän vedenjohdavuus on vähintäänkin kohtuullinen. Pumpun rajallisen imukorkeuden takia pohjavedenpinta voi käytännössä olla korkeintaan 5–6 metrin



Kuva 2. Näytteenotto suoritettu kerrospumppauspisteellä 5 Multian Köpinkankaalla 12.11.2018. Happipullon (oik.) ruskea väri kertoo pohjaveden hyvästä happitilanteesta. Siiviläsyvyys 5–7 m mp:sta, pumppaustuotto 177 l/min. Kuva: Ossi Alho

Figure. 2. Groundwater has been sampled at the Köpinkangas pumping site nr 5 in the municipality of Multia 12.11.2018. Brown colour in the rightmost bottle tells about high oxygen content in the groundwater. Screen depth from 5 to 7 m bgs, pumping rate 177 l/min. Photo: Ossi Alho

syvyydellä maanpinnasta. Pumppauksia ei siten voida tehdä moreenimailla tai hienosedimenteissä eikä harjuselänteillä, joissa pohjavedenpinta on syvällä maanpinnan alapuolella. Hydrogeologin tehtävä on valita tutkimuspisteet niin, että pumppaukset onnistuvat.

Tietokanta

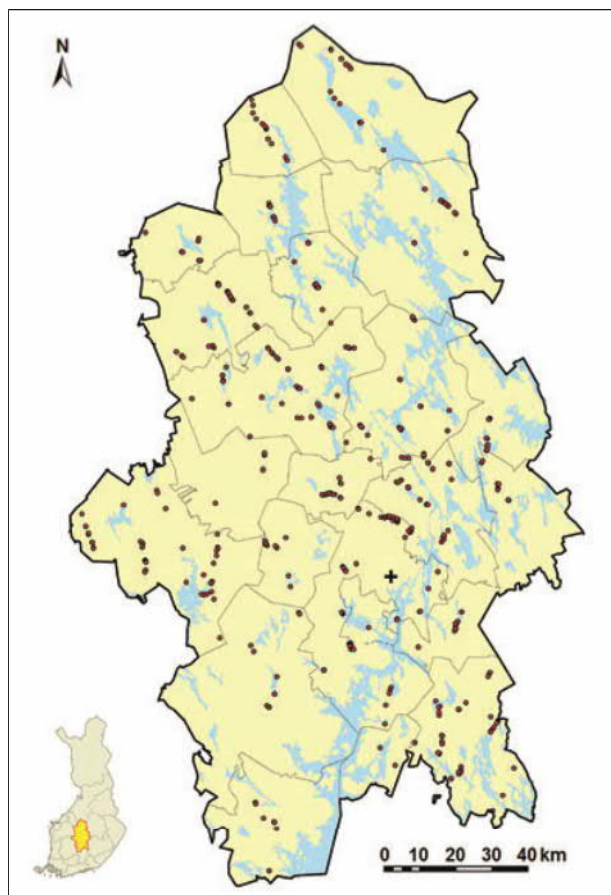
Kerros- ja koepumppausten yhteydessä on Elykeskukseen kertynyt vuosien varrella runsaasti maasto- ja laboratorioaineistoa, joka on nyt koottu yhtenäiseksi Excel®-pohjaiseksi tietokannaksi sisältäen noin 65 000 tietoa (tilanne 16.10.2019). Tietokanta on tarkoitettu ainoastaan tutkimus- ja viranomaiskäyttöön. Tutkimusraportit ovat julkisia asiakirjoja.

Tietokannassa kunkin pumppauspisteen ja -kerroksen tiedot ovat omilla riveillään. Teknisiä tietoja ovat kuntakoodi, tutkimusraportin ja -pisteen tunnus, koordinaatit, pumppauksen tarkoitus (kerros/koepumppaus), siiviläsyvyys maanpinnasta, päämaalajite, pumppaustuotto ja havaintopäivämäärä. Tämän jälkeen tulevat vedenlaatutiedot (taulukko 1). Taulukosta on jätetty pois aineet, joista on alle 50 määrittystulosta (TotN, Al, Sb, As, Ba, B, Hg, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Pb, Ni, Se, Zn, Sr, CN, Sn, U, Rn). Lopuksi ilmoitetaan tutkimuslaboratorio, näytteen suodatustiedot ja indeksoidaan havainto tilastoajoja varten.

Kerrospumppauksia

Kerrospumppauksia on tehty 519 kohteessa yhteensä 1711 kpl (kuva 3). Erikoisimmat pumppauspaikat löytyvät Kinnulan Muholasta ja Saarijärven Peltokylältä. Ensin mainitussa paikassa pumppaus tehtiin järvenjäältä Kivijärven Kotkatselällä vedenpinnan alla kulkevasta harjusta, josta saatu ”pohjavesi” oli hapetonta ja siinä oli runsaasti rautaa ja mangaania. Jälkimmäisessä paikassa tuli teräsputkesta hyvälaatuisia pohjavettä ilman pumppuakin (kuva 4).

Syvimmillään pumppaukset on ulotettu 25 metriin maanpinnasta (Md 7 m). Pumppaustuotoksi on saatu eri pisteistä ja kerroksista 0–



Kuva 3. Kerrospumppauspaikat Keski-Suomessa (tilanne 16.10.2019, n=519). Jyväskylän kaupunki on merkitty karttaan ristisymbolilla (+).

Figure. 3. Multilevel pumping test sites in Central Finland as of 16.10.2019 (n=519). City of Jyväskylä is marked with a cross symbol (+).

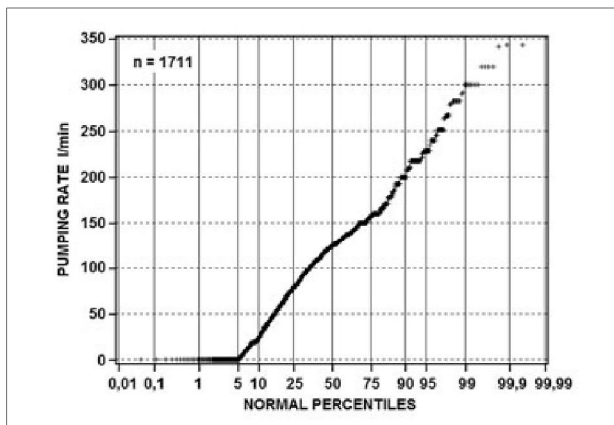
343 l/min (Md 123 l/min). Kuvassa 5 on esitetty kerrospumppausten tuottojakauma todennäköisyysasteikolla. Mitä ylemmäksi jakauma kiipeää, sitä paremmin vettä johtavista maakerroksista on kyse. Jakauman alapäässä maaperän vedenjohtokyky on puolestaan heikonlainen. Joistakin kerroksista vettä ei ole saatu ollenkaan (5 prosenttia aineistosta). Tällöin on yleensä hienoaines tukkinut siiviläosan.

Kerrospumppauksissa yleisimmin käytetty kahden metrin pituinen siiviläosa kattaa usein vedenjohtavuudeltaan erilaisia maakerroksia. Kunkin kerroksen maalajitteeksi on tietokantaan valittu kairauksen perusteella kerroksen vallitseva maalajite. Tästä syystä on ymmärrettävää, että yksittäisten maalajitteiden kerrospumppaus-



Kuva 4. Artesinen Metsäsian lähde Saarijärven Peltokylällä 6.8.1987 (ks. Mäkelä ja Illmer 1993). Hyvälaatuista pohjavettä purkautuu omalla paineellaan 83 l/min Ns32-teräsputkesta, jonka siiviläosa on 19–21 m mp:sta. Vedentuloa seuraa Tauno Savela. Kuva: Jorma Mäkelä

Figure 4. Artesian Badger's Fountain in the municipality of Saarijärvi, Central Finland, as of 6.8.1987 (see Mäkelä and Illmer 1993). Good quality groundwater is pouring out of the Ns32 steel pipe under its own pressure (screen depth from 19 to 21 m bgs). Groundwater discharge of 83 l/min is witnessed by Tauno Savela. Photo: Jorma Mäkelä



Kuva 5. Kerrospumppaustuottojen summafrekvensijakauma todennäköisyysasteikolla (n=1711).

Figure 5. Pumping rates from multilevel tests plotted against a normalized probability axis (n=1711).

tuotot vaihtelevat laajasti koko aineistossa (n=1230). Jotakin voidaan kuitenkin maalajiteryhmiä vedenantoisuuksista todeta. Mediaanituotoiltaan hiekka- ja soramaalajit ovat yhtä antoisia (130 l/min), vaikka sora on tunnetusti hiekkaa karkearakeisempaa. Karkearakeiset hiek-

kakerrokset antavat parhaiten vettä (Md 137 l/min). Havaintoja selittää hiekan parempi lajituneisuus (esim. Mäkelä ja Reijonen 1994). Hienorakeisten ja moreenimaisten maalajien kohdalla mediaanituotto on edellisiä selvästi pienempi (70–100 l/min). Kuitenkin hienohiekkakerroksesta voidaan saada hyvin vettä, jopa 280 l/min. Tällöin on kairatessa usein tavattu ns. löysä maakerros, jossa kairausvastus on pieni ja kairautangot menevät maahan pitkälti painamalla. Tällaisessa paikassa kannattaa kokeilla kerrospumppausta, jos paikka muutoin sopii vedenottoon.

Kerrospumppaustuoton ja siiviläosan keskisyvyyden välillä on heikko, tosin erittäin merkitsevä negatiivinen korrelaatio (Pearsonin korrelaatiokerroin -0,117, $p < 0,0001$, $n = 1379$). Tämä yhteys on kuitenkin näennäinen ja selittyy putken virtausvastuksen lisääntymisellä siiviläsyvyyden kasvaessa.

Taulukkoon 1 on koottu kerrospumppaustutkimusten vesianalyysitulosten tilastollisia tunnuslukuja. Joistakin pumppauspisteistä on tietokannassa useita näytteitä samoista kerroksista, mikä tulee ottaa huomioon tunnuslukuja tarkastellessa. Vaihteluväli antaa hyvän kuvan siitä, missä rajoissa hiekka-sora-alueiden pohjaveden laatu eri aineiden ja ominaisuuksien osalta voi kulkea. Mukana tietokannassa on runsaasti huippulaatuisia pohjavesiä mutta myös erittäin huonolaatuisia vesiä, joista ei edes käsittelemällä saataisi laadukasta talousvettä.

Kerrospumppausaineiston perusteella Keski-Suomen hiekka-sora-alueiden pohjavesiä voisi yleisesti luonnehtia happamiksi, vähäsuolaisiksi ja pehmeiksi vesiksi, joissa on hyvä happitilanne, metallipitoisuudet ovat pieniä ja ihmistoinnin vaikutus on vähäistä. Kerrosnäytteiden mediaanipitoisuudet ovat samaa suuruusluokkaa kuin Keski-Suomen hiekka-sora-alueiden pohjavedenottamoiden raakavesillä (n=94; Sara 2001). Näistä vedenottamoista noin puolet on rakennettu Ely-keskuksen tutkimiin paikkoihin.

Useimpien vedenlaatutekijöiden, mm. ha-

Taulukko 1. Pohjaveden laatu kerrospumppausnäytteissä. Mukana taulukossa ovat ne aineet ja ominaisuudet, joista on analyysituloksia vähintään 50 kpl. Noin 8 % metallinäytteistä on suodatettu 0,45 µm:n kalvolla maastossa. Mediaaniarvot on lihavoitu.

Table 1. Groundwater quality in the multilevel samples. Statistics are shown for those variables with ≥50 analysis results. Around 8 % of the metal samples have been filtrated through a 0,45 µm membrane filter in the field. Median values are in bold.

Variable and its unit	Abbreviation	n	Mean $\bar{x}$	Median Md	Min	Max	STM 2017
Temperature °C	TEMP	1124	5,5	5,2	0,8	14,3	<20
Colour mg Pt/l	COLO	829	17	5	0	600	
Turbidity FNU	TURB	961	6,3	0,55	0	2900	
pH	PH	858	6,3	6,3	5,3	7,3	6,5–9,5
Electrical conductivity 25 °C mS/m	COND	1215	10,1	7,4	1,1	85,5	<27,5/<275
Alkalinity mmol/l	ALK	686	0,32	0,27	0,03	3,30	
Total hardness mmol/l	HARD	687	0,20	0,17	0	1,66	
Oxygen, dissolved mg/l	O2	1103	6,6	7,5	0	14,2	
Oxygen, saturation-%	O2 %	1082	52	60	0	116	
Carbon dioxide mg/l	CO2	453	28	23	1,5	170	
Chemical oxygen demand mg/l	COD	1021	1,3	0,4	0	37,0	<5,0
Potassium permanganate mg/l	KMNO4	1021	5,4	2,0	0	146,3	
Total organic carbon mg/l	TOC	143	1,4	0,9	0,2	19,0	
Ammonium mg/l	NH4	687	0,056	0,004	0	6,92	<0,50
Nitrite mg/l	NO2	750	0,003	0,002	0	0,08	≤0,50
Nitrate mg/l	NO3	748	1,79	0,53	0	70,8	≤50
Phosphate phosphorus mg/l	PO4P	216	0,013	0,004	0	0,86	
Total phosphorus mg/l	TOTP	398	0,022	0,006	0,001	0,58	
Chloride mg/l	CL	1097	12,3	4,7	0	220	<25/<250
Sulphate mg/l	SO4	309	6,1	5,2	0,8	44	<150/<250
Fluoride mg/l	F	91	0,092	0,054	0,005	0,63	≤1,5
Silica mg/l	SIO2	60	12,5	12,0	3,9	21	
Calcium mg/l	CA	139	7,9	6,5	0,7	22	
Magnesium mg/l	MG	113	2,0	1,6	0,2	6,9	
Sodium mg/l	NA	450	11,2	9,4	0,9	130	<200
Potassium mg/l	K	101	1,7	1,4	0,3	5,1	
Iron mg/l	FE	1180	1,26	0,075	0,002	40	<0,200
Manganese mg/l	MN	1162	0,088	0,007	0	3,7	<0,050
Coliform bacteria 35 °C cfu/100 ml	CF35	95	0,1	0	0	4	0
Coliform bacteria 44 °C cfu/100 ml	CF44	69	0,2	0	0	5	0
Fecal streptoc./enteroc. cfu/100 ml	FS	79	0,2	0	0	14	0

pettuvuuden, kloridin ja nitraatin (kuva 6), ja-kaumat ovat hyvin vinoja eikä niitä edes erilaisin muunnoksien saada normaalijakaumiksi. Selvän poikkeuksen muodostaa pH, joka on jo itsessään muunnos (määritelmän mukaisesti vetyioniväkevyyden negatiivinen logaritmiarvo). pH-arvot asettuvat ilmoitustarkkuuden rajoissa todennäköisyysasteikolla suoralle viivalle (kuva 6). Shapiron-Wilkin (1965) testi tosin hylkää normaalijakaumahypoteesin pH:nkin osalta,

vaikka W-arvoksi saadaan niinkin korkea kuin 0,992 ($p < 0,0001$). Kerrospumppausnäytteiden pH-arvot ovat pääosin happaman puolella. Vain noin prosentilla näytteistä on pH-arvo ollut yli 7. Vaikka Suomen maaperän pohjavedet ovat luonnostaan happamia (esim. Lahermo ym. 1990), havaintoja selittää osaltaan sekin, ettei näytteitä ole voitu menetelmästä johtuen ottaa paksujen vajovesikerrosten kohdalta harjuselänteiltä.

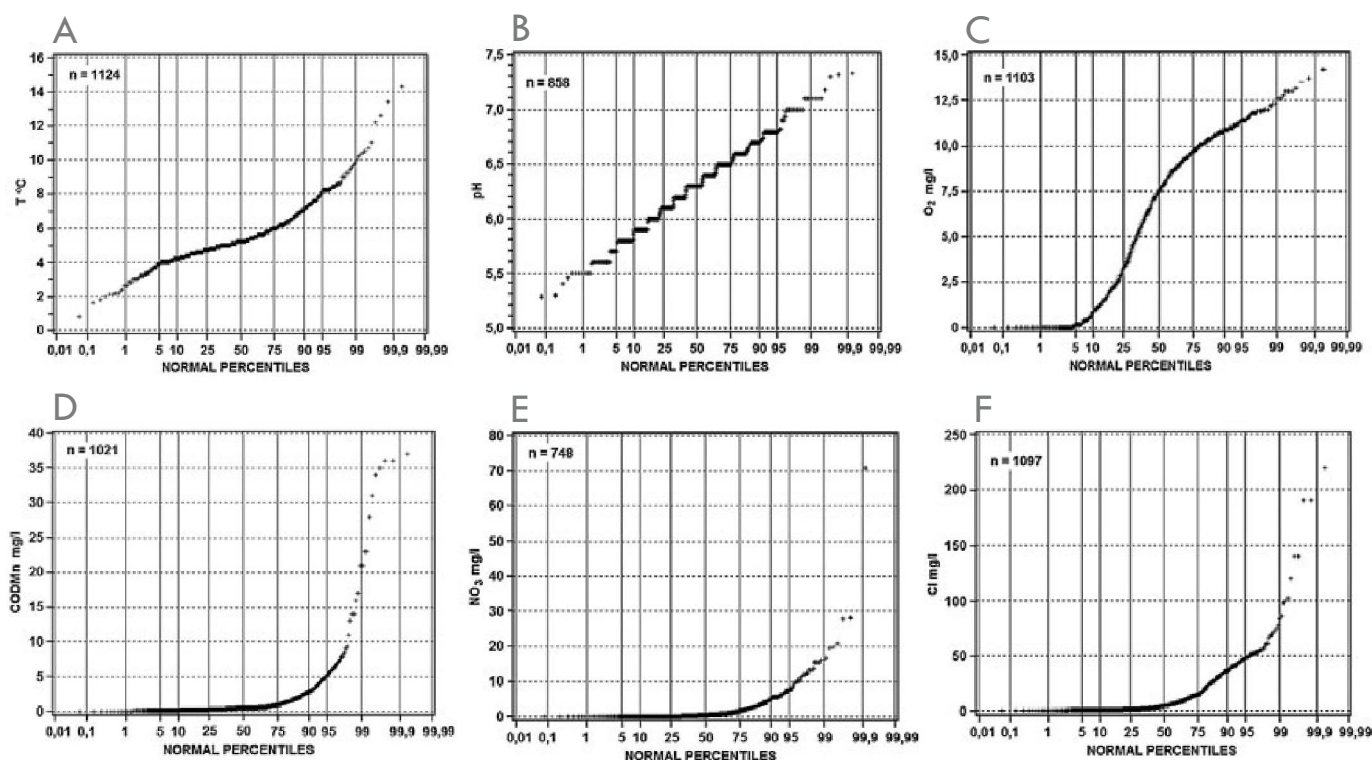
Kerospumppausnäytteiden lämpötila vaihtelee 0,8–14,3 °C, mediaanilämpötilan ollessa 5,2 °C (kuva 6). Pohjaveden keskilämpötila seuraa valtakunnallisesti maankamaran keskilämpötilaa, joka on parisen astetta ilman keskilämpötilaa suurempi (Geologian tutkimuskeskus 2019). Noin viidennes kerospumppausnäytteistä on sisältänyt happea alle 2,5 mg/l; saman verran näytteistä on ollut happipitoisuudeltaan yli 10 mg/l. Hapen mediaaniarvo on aineistossa 7,5 mg/l. Vain yhden kerospumppausnäytteen nitraattipitoisuus on ylittänyt talousveden terveysperusteisen raja-arvon 50 mg/l (kuva 6).

Siiviläosan keskisyvyys ja kerospumppaus tuotto korreloivat erittäin merkittävästi useiden vedenlaatutekijöiden kanssa (taulukko 2). Eri laisten suojien määrä lisääntyy ja pH nousee pohjavedessä pumppausvyvyyden kasvaessa (kuva 7). Liunneen hapen määrä puolestaan vähenee siiviläsyvyyden kasvaessa. Kun hieno-

aineksen osuus maakerroksissa kasvaa, myös kerospumppaustuotto yleisesti alenee. Tämä näkyy pumppaustuoton ja sameuden sekä sen kanssa korreloivien muuttujien negatiivisina korrelaatioina (taulukko 2).

Koko aineiston perusteella näytteenottosyvyys ja pohjaveden lämpötila eivät näyttäisi korreloivan keskenään, mutta asia ei ole näin yksinkertainen. Yksittäisissä mittauspisteissä lämpötilavaihtelu voi olla useita asteita pumppausajankohdasta riippuen. Yleistäen voidaan sanoa, että siiviläsyvyyden kasvaessa pohjaveden lämpötila laskee kesällä ja syksyllä ja nousee talvella ja keväällä.

Hapen tärkeä rooli pohjavesiympäristössä (esim. Mälekki 1999) tulee esiin erittäin merkittävänä negatiivisina ja positiivisina korrelaatioina useiden tietokannan vedenlaatutekijöiden kanssa. Negatiivisesti happi korreloi esimerkiksi hapettuvuuden, ammoniumin, kokonaisfos-



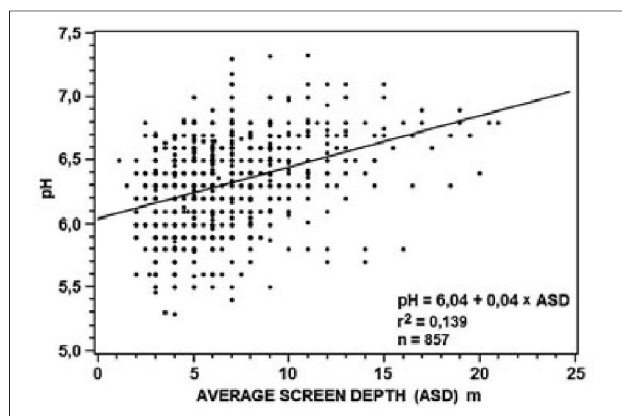
Kuva 6. Kerospumppausnäytteiden analyysitulosten summafrekvenssijakaumia todennäköisyysasteikolla. (A) lämpötila (B) pH (C) liunnut happi (D) hapettuvuus (E) nitraatti (F) kloridi.

Figure. 6. Probability plots of selected water quality variables in groundwater samples from multilevel pumping tests in Central Finland. (A) temperature, (B) pH, (C) dissolved oxygen, (D) chemical oxygen demand, (E) nitrate, (F) chloride.

Taulukko 2. Siiviläosan keskisyvyyden ja kerrospumppaustuoton korrelaatiot vedenlaatutekijöiden kanssa (Spearmanin epäparametrinen järjestyskorrelaatio, $p < 0,001$). Tarkastelussa ovat mukana ne aineet ja ominaisuudet, joista on analyysituloksia vähintään 50 kpl. Tunnusten selitykset ks. taulukko 1.

Table 2. Correlations of average screen depth and multilevel pumping rate with the water quality variables (Spearman non-parametric rank correlation, $p < 0,001$). Statistics are shown for those variables with ≥ 50 analysis results. Legend for the abbreviations see Table 1.

Variable	Positive correlation	Negative correlation	No correlation
Average screen depth [m] n = 60-1213	CA, PH, CL, COND, ALK, NA, HARD	NO ₂ , TURB, O ₂ , COD	COLO, TEMP, F
Pumping rate [l/min] n = 60-1083	NO ₂ , NO ₃	TURB, FE, TOTP, COLO, MN, COD	CO ₂ , COND, PH

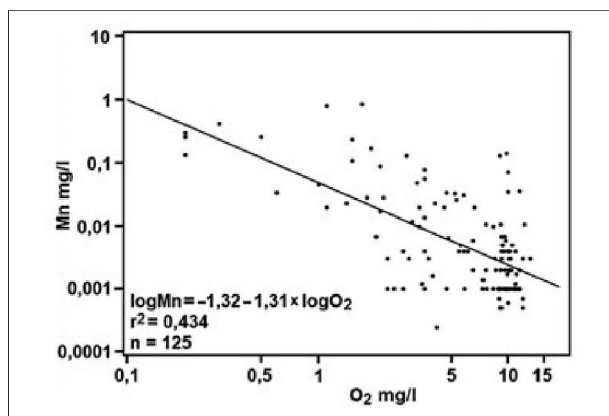


Kuva 7. pH:n ja siiviläosan keskisyvyyden lineaarinen regressio kerrospumppausaineistossa.

Figure. 7. Linear regression between pH and average screen depth in multilevel pumping tests.

forin, raudan ja mangaanin kanssa. Positiivinen korrelaatio hapella on nitraatin ja pH:n kanssa (Spearmanin epäparametrinen järjestyskorrelaatio, $p < 0,001$, $n = 59-1094$). Kuvassa 8 on esitetty suodatetuista vesinäytteistä määritetyn liuenneen mangaanin ja hapen välinen regressio. Tyyppiyhdisteet ovat hapekkaissa pohjavesissä pääsääntöisesti nitraattimuodossa, kun taas nitriitti ja erityisesti ammonium ovat koholla huonohapissa pohjavesissä.

Tietokannassa on runsaasti näytteitä tiesuolauksen pohjavesivaikutuksia selvitelleistä tutkimuksista (esim. Tuominen 1992). Tämä näkyy taulukossa 1 luonnontilaiseen pohjaveteen nähden kohonneina johtokykyarvoina sekä kloridi- ja natriumpitoisuuksina (kuva 6). Aineistossa on mukana myös sameita näytteitä. Sameissa näyt-



Kuva 8. Liuenneen mangaanin ja hapen lineaarinen regressio logaritmisella asteikolla.

Figure. 8. Log-log linear regression between manganese and dissolved oxygen in filtrated multilevel samples.

teissä veden väriluku ja orgaanisen aineksen määrä (COD, TOC) ovat yleensä korkeita. Rauta- ja mangaanianalyseissä saadaan puolestaan näennäisen korkeita lukemia, kun suodattamattomissa näytteissä sameutta nostavat humuksen lisäksi erityisesti kiintoaines ja kolloidit (kuva 9). Tilanne on hyvin samankaltainen porakairoilla (Mäkelä 1989). Rauta ja mangaani tulisi aina analysoida suodatetuista näytteistä.

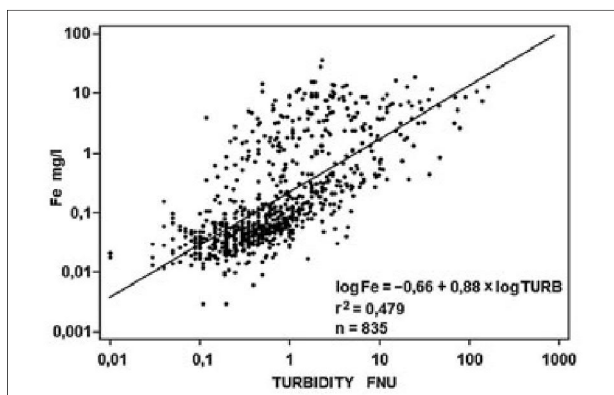
Sameus nostaa myös fosforipitoisuuksia (kuva 10). Useimmiten pohjaveden fosforipitoisuudet ovat kuitenkin hyvin pieniä, eikä fosforille ole annettu talousvesiasetuksessa enimmäisarvoa. Alkalit ja maa-alkalit (kokonaiskoivuus), pH ja johtokyky eivät korreloi sameuden kanssa. Tästä johtuen näytteiden suodatus näiden parametrien analysoimiseksi ei ole välttä-

mätöntä.

Tunnetusti pohjaveden rauta ja mangaani korreloivat keskenään (kuva 11). Rautaa on useimmissa kerrospumppausnäytteissä enemmän kuin mangaania. Joskus myös hapekkaissa kerrosvesinäytteissä voi olla runsaasti liennutta rautaa ja mangaania (kuva 8). TOC-arvoa voidaan arvioida hapettuvuuden avulla (kuva 12). Vaikka TOC kasvaa hapettuvuutta hitaammin, on sen määrä pohjavedessä pienillä pituisuilla hapettuvuutta suurempi. pH:lla ja vapaalla hiilidioksidilla on luonnollisesti vahva yhteys keskenään (kuva 13).

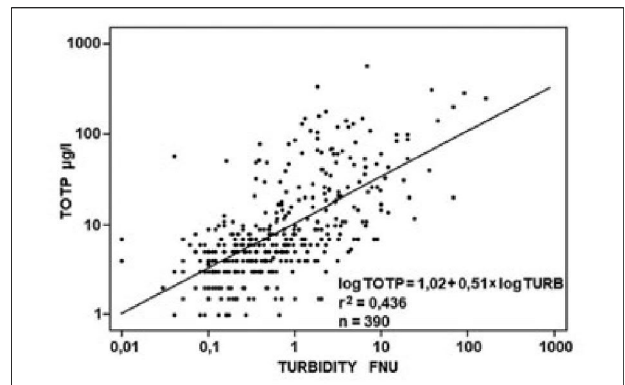
Vedenlaatumuuttujien keskinäisiä suhteita voidaan havainnollistaa lisäksi faktorianalyysillä (taulukko 3). Faktorianalyysin perusedellytyksenä on, että muuttujat ovat normaalisti jakautuneet. Tätä varten muuttujille tehtiin Box-Cox-muunnokset (Box ja Cox 1964), joilla jakaumien muotoa pyrittiin korjaamaan.

Analyysin tuloksena saatiin neljä faktoria (taulukko 3): suolaisuusfaktori (1-faktori), redoxfaktori (2-faktori), sameusfaktori (3-faktori) ja yksistään pH:n sisältävä happamuusfaktori (4-faktori). Parhaiten muuttujien vaihtelua selittää suolaisuusfaktori. On huomioitavaa, että jotkut muuttujat ovat hyvin esillä myös muissa kuin omista faktoreistaan. Näitä ovat FE, MN ja negatiivisena NO₃, jotka korreloivat merkittävästi myös redoxfaktorin muuttujien kanssa,



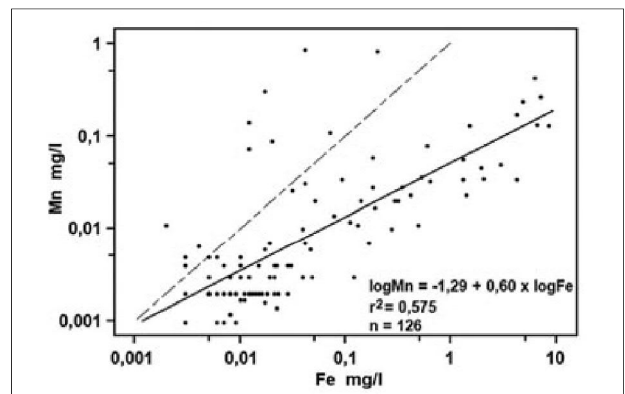
Kuva 9. Raudan ja sameuden lineaarinen regressio logaritmisella asteikolla.

Figure. 9. Log-log linear regression between iron and turbidity.



Kuva 10. Kokonaisfosforin ja sameuden lineaarinen regressio logaritmisella asteikolla.

Figure. 10. Log-log linear regression between total phosphorus and turbidity.



Kuva 11. Mangaanin ja raudan lineaarinen regressio logaritmisella asteikolla (suodatetut näytteet). Katkoviivan kohdalla lukemat ovat yhtä suuria.

Figure. 11. Log-log linear regression between manganese and iron in filtrated multilevel samples. The dashed line shows where the values are equal.

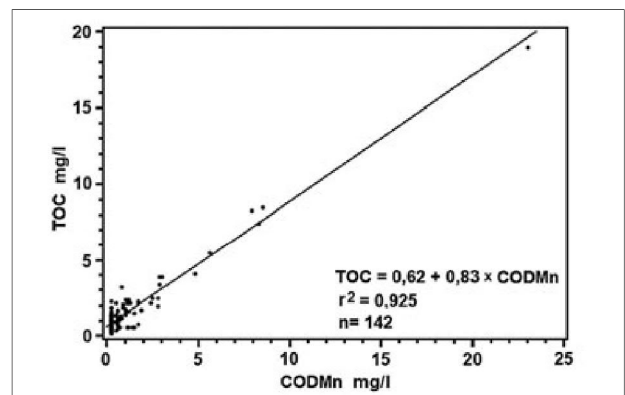
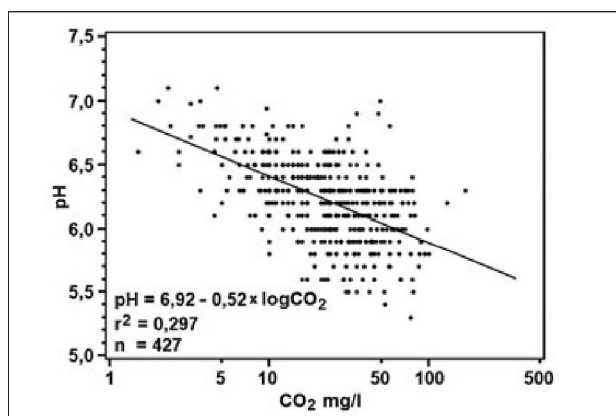


Figure. 12. Orgaanisen kokonaishiilen ja hapettuvuuden lineaarinen regressio.

Fig. 12. Linear regression between total organic carbon and chemical oxygen demand.



Kuva 13. pH:n ja hiilidioksidin lineaarinen regressio puolilogaritmisella asteikolla.

Figure. 13. Semi-log linear regression between pH and carbon dioxide.

sekä ALK ja negatiivisena CO₂, joiden lataus on korkea myös happamuusfaktorissa.

Lopuksi

1990-luvun alkupuolelta lähtien on Keski-Suomen Ely-keskuksen pohjavesiselvityksissä ruvettu käyttämään kerros- ja koepumppauksen rinnalla ns. syvätutkimustekniikkaa (esim. Mälkki 1980, Mäkelä 1995a). Syvätutkimustekniikka mahdollistaa hiekka-sora-akviferien keskeisten osien hydraulikan ja vedenlaadun tutkimisen riippumatta pohjavedenpinnan syvyydestä. Syvätekniikka tukeutuu pitkäsiiviläisiin Ds52-havaintoputkiin ja putkikaivoista tehtäviin koepumppauksiin. Syvätekniikan ansiosta vedenotamatot on voitu sijoittaa akviferien keskiosiin, jotka ovat pohjavesituotoltaan ja etenkin vedenlaadultaan optimaalisia kaivonpaikkoja.

Perinteisellä 'matalatekniikalla' on silti paikansa useasta syystä. Ensinnäkin kerrospumppaus on koeteltu ja luotettava (robusti) menetelmä, jossa suhteellisen yksinkertaisella laitteistolla voidaan saada tietoa maaperän vedenjohdokyvystä ja pohjaveden laadusta. Kerrospumppauksissa käytettävien keskipakopumppujen pumppausteho on monikymmenkertainen verrattuna Ds52-putkissa käytettäviin pieniin uppopumppuihin. Tällä on oma vaikutuksensa vesinäytteiden edustavuuteen. Menetelmä on

Rotated Factor Pattern				
	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4
HARD	0.94363	0.03581	-0.02146	0.08514
COND	0.93443	0.20863	0.08823	0.11658
CL	0.81926	0.23344	-0.04043	-0.00310
SO4	0.77612	-0.21090	0.01695	-0.25186
ALK	0.68840	0.35883	0.21974	0.45257
NO3	0.66320	-0.48886	-0.15506	-0.07215
NH4	-0.05665	0.79339	0.37175	0.06534
NO2	0.05352	0.68707	0.08645	0.05968
COD	-0.03465	0.64212	0.36606	-0.29912
CO2	0.46725	0.59193	0.23875	-0.49462
O2	-0.23293	-0.70876	-0.29448	0.18315
TURB	-0.04743	0.00978	0.89028	0.05238
FE	0.04681	0.43895	0.73105	-0.22677
TOTP	0.10988	0.27500	0.73063	0.25152
COLO	-0.05903	0.25678	0.72362	-0.10729
MN	0.08674	0.53555	0.66238	-0.17258
PH	0.05974	-0.14043	-0.02226	0.94891
Variance Explained by Each Factor				
	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4
	4.2618399	3.5189678	3.3296016	1.7289638

Taulukko 3. Varimax-rotatoitu faktoriratkaisu kerrospumppausnäytteiden (n=253) vedenlaatu-muuttujille (n=17). Neljällä faktorilla ominaisarvo on suurempi kuin 1,0. Nämä neljä faktoria pystyvät selittämään 76 % muuttujien varianssista. Muuttujien faktorilataukset kertovat, kuinka paljon kunkin faktorin avulla pystytään selittämään kyseisten muuttujien vaihtelua. Muuttujien selitykset ks. taulukko 1.

Table 3. Varimax rotated factor solution for selected water quality variables (n=17) in groundwater samples from multilevel pumping tests in Central Finland (n=253). Four factors were retained on the basis of the eigenvalues-greater-than-one rule. Together they account for 76 % of the standardized variance. The factor loadings indicate how strongly the variables and the factors are related. Legend for the abbreviations see Table 1.

myös joustava ja kustannustehokas sekä ennen kaikkea nopea. Menetelmä on todettu kenttäkelpoiseksi myös puolustusvoimien harjoituksissa (Mäkelä 1995b).

Tietokantaa voidaan hyödyntää vedenotto-paikkojen ja poikkeusaikojen vesihuollon suunnittelussa sekä pohjaveden suojelukysymyksissä. Tietokantaa voidaan täydentää lisäämällä siihen tietoja mm. akviferien hydrogeologiasta ja valuma-alueen ihmistoiminnasta. Myös syvätut-

kimuksissa kertynyt laajahko aineisto on mahdollista siirtää tietokantaan. Tietokantaan jo kootut koepumppaukset antavat tietoa esimerkiksi akviferien antoisuudesta, vedenlaadun kehittymisestä pumppausten aikana ja rantaimeytymisen vedenlaatuvaikutuksista.

Kiitokset

Ely-keskuksessa pohjavesiselvityksiä tekee hydrogeologin ohjaama maastoryhmä. Ryhmään on vuosien varrella kuulunut insinöörejä, rakennusmestareita, konekairaajia sekä maa- ja vesirakennustyöntekijöitä kesäharjoittelijoita unohtamatta. Nykyään siinä työskentelevät jo pitkän työkokemuksen omaavat rakennusmestarit Ossi Alho ja Pekka Heino. Ilman maastoryhmän kenttäosaamista ei tämän jutun kirjoittaminen olisi ollut mahdollista. Sanna Sara on osallistunut tietokannan editointiin sen alkuvaiheessa. Juha Romula on avustanut karttakuvan laadinnassa. Aineiston tilastokäsittely on tehty Suomen ympäristökeskuksen palvelimella olevalla SAS®-ohjelmistolla.

JORMA MÄKELÄ

FT, Keski-Suomen Ely-keskus
PL 250, FI-40101 Jyväskylä
jorma.makela@ely-keskus.fi

Kirjoittaja on hydrogeologi Keski-Suomen Ely-keskuksessa.

Summary:

Multilevel pumping tests in Central Finnish sand and gravel aquifers

A digital database of multilevel pumping tests has been compiled in the Central Finland ELY Centre. The database is based on 230 groundwater investigations executed by the ELY Centre during the years 1976–2019. The database consists of technical and water quality information from more than 1700 pumping tests at 519 different sites around Central Finland. The findings from the database are illustrated with a few examples.

Viitteet

- Box, G.E.P. ja Cox, D.R., 1964. An analysis of transformation. *Journal of the Royal Statistical Society Series B* vol. 26:211–243.
- Geologian tutkimuskeskus, 2019. Geoenergia. <http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/geoenergia/> [23.11.2019]
- Lahermo, P., Ilmasti, M., Juntunen, R. ja Taka, M., 1990. The Geochemical Atlas of Finland Part 1: The hydrogeochemical mapping of Finnish groundwater. Geological Survey of Finland. 66 s.
- Mäkelä, J., 1989. Sameuden vaikutuksesta pohjaveden rauta- ja mangaanipitoisuuteen. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja 148. 21 s.
- Mäkelä, J., 1995a. Vedenhankinnan pohjavesitutkimus kehittyi. *Kunnalliselämä* 1:17–18.
- Mäkelä, J., 1995b. Talousveden hankinta maastossa. *Huoltoupseeri* 4:22–23.
- Mäkelä, J. ja Illmer, K., 1993. Artesinen Metsäsian lähde Saarijärvellä Keski-Suomessa (Summary: The Artesian Badger's Fountain in Saarijärvi, Central Finland). *Geologi* 1:8–11.
- Mäkelä, J. ja Reijonen, R., 1994. Muuratharjun teko-pohjavesitutkimus. *Kunnalliselämä* 1:49–51.
- Mätkki, E., 1980. The deep investigation technique in practical groundwater survey. *Vannet i Norden* 3:7–22.
- Mätkki, E., 1999. Pohjavesi ja pohjaveden ympäristö. Tammer-paino Oy, Tampere. 304 s. ISBN 951-26-4515-7.
- Sara, S., 2001. Vedenottamoiden vedenlaatu Keski-Suomen glasiofluviaalisissa muodostumissa (Abstract: Water quality of the water plants situated in glaciofluvial aquifers in Central Finland). *Alueelliset ympäristöjulkaisut* 224. 180 s.
- Shapiro, S.S. ja Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52:591–611.
- Sosiaali- ja terveysministeriö, 2017. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista annetun sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen muuttamisesta. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170683> [15.11.2019]
- Tuominen, P., 1992. Tiesuolauksen vaikutus pohjaveden Keski-Suomessa (Abstract: Effects of highway de-icing on groundwater quality in Central Finland). Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja 423. 118 s.
- Vesihallitus, 1984. Vesiviranomaisten käyttämät vesitutkimusten näytteenottomenetelmät. Toinen, korjattu painos. Vesihallituksen julkaisuja 40. 56 s.