

TALOUSVEDEN RADIONUKLIDIEN POISTOMENETELMÄT

P. Vesterbacka, T. Turtiainen, K. Hämäläinen, L. Salonen, H. Arvela

Tässä raporttisarjassa esitetyt johtopäätökset ovat tekijöiden johtopäätöksiä, eivätkä ne välttämättä edusta Säteilyturvakeskuksen virallista kantaa.

ISBN 951-712-753-7 (nid.)
ISBN 951-712-828-2 (pdf) korjattu painos
ISSN 0781-1705

Dark Oy, Vantaa, 2003

Myynti:
STUK – Säteilyturvakeskus
PL14, 00881 Helsinki
Puh. (09) 759881
Faksi (09) 75988500

VESTERBACKA Pia, TURTIAINEN Tuukka, HÄMÄLÄINEN Kai, SALONEN Laina, ARVELA Hannu. STUK-A197. Talusveden radionuklidien poisto. Vantaa 2003, 94 + 5 s.

Avainsanat radon, uraani, radium, lyijy, polonium, vedenkäsittely, talusvesi, porakaivo, kalliopohjavesi, poistomenetelmät

Tiivistelmä

Talusvedessä esiintyy luonnosta peräisin olevia radioaktiivisia aineita. Näiden pitoisuudet voivat olla haitallisen korkeita erityisesti porakaivovedessä. Tämä tutkimus on jatkoa vuonna 1995 Suomessa aloitetuille radioaktiivisten aineiden poistomenetelmien tutkimukselle. Hankkeen yhtenä päätavoitteena on ollut opaskirjan laatiminen kuluttajille ja vedenkäsittelyalan yrityksille.

Radonia voidaan poistaa vedestä joko ilmastamalla tai aktiivihiihluodatuksella. Oikein suunnitellulla ja asennetulla ilmastimella radon voidaan poistaa yli 90-prosenttisesti. Parhaiden ilmastimien poistotehokkuudet ovat olleet lähes sata prosenttia. Ilmastimien asennus tulee suunnitella huolella. Myös aktiivihiihluodatus poistaa radonia tehokkaasti. Niillä poistotehokkuudet ovat niin ikään yli 90 prosenttia, tavallisesti lähes sata prosenttia. Aktiivihiihi täytyy vaihtaa 2–3 vuoden välein suodattimen koosta sekä veden laadusta ja kulutuksesta riippuen. Koska aktiivihiihluodattimet lähettävät käytön aikana gammasäteilyä, ei niitä tule asentaa asuinrakennukseen vaan erilliseen rakennukseen tai kaivon yhteyteen.

Uraanin poistoon suositellaan anioninvaihtimia, joilla poistuma on useimmiten lähes sata prosenttia. Poikkeuksena ovat keittiön hanaan kytkettävät pienet vaihtimet, joiden poistotehokkuus riippuu veden uraanipitoisuudesta ja veden valutusnopeudesta. Veden suolapitoisuuden voimakas lisääntyminen voi aiheuttaa uraanin irtoamisen ioninvaihtimesta. Putkiston paineenmuutokset tai pH-arvon vaihtelut eivät merkittävästi irrota uraania vaihtimesta käytön aikana.

Lyijyn ja poloniumin poistaminen vedestä onnistuu luotettavasti vain käänteisosmoosilaitteilla. Muilla menetelmillä aikaansaadut poistumat vaihtelevat suuresti, koska lyijy ja polonium esiintyvät pohjavesissä monina eri yhdisteinä sekä kiinnittyneinä veden partikkeliainekseen. Ioninvaihtimilla ja aktiivihiihluodattimilla lyijy ja polonium voidaan poistaa vedestä vain osittain.

Pienikokoisiin partikkeleihin sitoutuneet lyijy ja polonium poistuvat näillä menetelmillä tehokkaammin kuin suurikokoisissa partikkeleissa sitoutuneena olevat.

Radonin, raudan ja mangaanin samanaikainen poistaminen vedestä on mahdollista. Hankkeessa tutkitut laitteet poistivat yli 98 prosenttia veden radonista. Myös eräitä fluoridin poistolaitteita voidaan käyttää uraanin, radiumin, lyijyn ja poloniumin poistoon.

Tätä tutkimusta on rahoittanut Teknologian kehittämiskeskus TEKES.

VESTERBACKA Pia, TURTIAINEN Tuukka, HÄMÄLÄINEN Kai, SALONEN Laina, ARVELA Hannu. Removal of radionuclides from household water. STUK-A197. Vantaa 2003, 94 pp + Appendices 5 pp. In Finnish.

Keywords radon-222, uranium-234,238, radium-226, lead-210, polonium-210, water treatment methods, drilled well water

Abstract

Research upon methods for removing radionuclides from household water was initiated in Finland in 1995. Three research projects, of which two were carried out with National Technology Agency of Finland and one with CEC, have been completed by the end of 2002. One of the main objectives of the research was to compose a guidebook for consumers and water treatment companies.

Radon can be removed from household water by aeration and by activated carbon filtration. Aerators that are well designed and set up can remove over 90% of waterborne radon. The best aerators have achieved removal efficiencies that are nearly 100%. However, setting up an aeration system requires thorough planning. Also, activated carbon filtration removes radon efficiently. The removal efficiencies have been over 90%, often nearly 100%. Depending on the water quality and usage, the carbon batch inside the filter needs to be changed every 2–3 years. Since activated carbon filters emit gamma radiation while in use, they should not be installed inside the dwelling but in a separate building or by the well.

It is recommended that uranium be removed from drinking water by anion exchange, which is the most efficient removal method for this purpose. Typically, the removal efficiencies are nearly 100%. The one exception is the so called tap filter, the removal efficiency of which depends on uranium concentration in raw water and the rate of water flow. High saline concentration in water may extricate uranium from ion exchange resin. Changes in plumbing pressure or pH-value do not have any significant influence in uranium retention.

Removal efficiencies of lead and polonium vary a lot depending on the chemical form in which they occur in water. They can be reliably removed from water by reverse osmosis only. Other treatment methods, such as ion exchange and activated carbon filtration, remove lead and polonium partly. Lead and

polonium are removed more efficiently when they are bound onto smaller particles than larger particles.

Testing simultaneous removal of radon, iron and magnesium by two commercial devices gave promising results: radon removal efficiency was over 98%. Furthermore, it was found that certain fluoride removal equipment can be applied to simultaneous removal of uranium, radium, lead and polonium.

This research has been funded by the National Technology Agency of Finland (TEKES).

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	5
Esipuhe	9
1 Johdanto	10
1.1 Lähtökohdat	10
1.2 Enimmäispitoisuudet	11
1.3 Tutkimuksen tavoitteet	12
2 Talousveden radioaktiivisten aineiden poistomenetelmät	15
2.1 Radonin poisto	15
2.2 Uraanin poisto	21
2.3 Radiumin poisto	22
2.4 Lyijyn ja poloniumin poisto	23
3 Tutkimusmenetelmät	25
3.1 Näytteenotto-ohjelma	25
3.2 Radionuklidien määrittäminen	28
3.3 Radioaktiivisten aineiden poistumat	30
3.4 Radonin adsorptionopeus aktiivihiileen	30
3.5 Aktiivihiilen vaihto ja käytetyn hiilen radioaktiivisuus	30
3.6 Paineen, pH-arvon ja suolapitoisuuden muutosten vaikutus anioninvaihtimen toimintaan	32
3.7 Lyijyn ja poloniumin sitoutuminen erikokoisiin pohjaveden partikkeleihin	33
3.8 Kyselytutkimus	34
4 Tutkimusohjelma	35
4.1 Ilmastimet	35
4.2 Aktiivihiilisuodattimet	35
4.3 Ioninvaihtimet	37
4.4 Radonin, raudan ja mangaanin samanaikainen poisto	39
4.5 Fluoridin, uraanin, radiumin, lyijyn ja poloniumin samanaikainen poisto	41
5 Tulokset	42
5.1 Ilmastimet	42
5.2 Aktiivihiilisuodattimet	50
5.3 Ioninvaihtimet	65
5.4 Paineen, pH-arvon ja suolapitoisuuden vaikutus anioninvaihtimen toimintaan	71

5.5	Ioninvaihtimen käyttöikä	74
5.6	Radonin, raudan ja mangaanin samanaikainen poisto	75
5.7	Fluoridin, uraanin, radiumin, lyijyn ja poloniumin samanaikainen poisto	78
5.8	Lyijyn ja poloniumin sitoutuminen erikokoisiin pohjaveden partikkeleihin	82
5.9	Kyselytutkimus	84
6	Johtopäätökset	89
7	Kirjallisuusviitteet	91
	LIITE A	95
	LIITE B	96

Esipuhe

Vesihuolto 2001 oli Teknologian kehittämiskeskuksen eli Tekesin vuonna 1997 käynnistämä teknologiaohjelma Suomen vesihuoltosektorin kehittämiseksi. Ohjelma päättyi vuonna 2001. Se keskittyi yhdyskuntien ja haja-asutusalueiden vesihuoltoon ja sisälsi erilaisia painopistealueita. Yksi painopistealueista oli hyvän talousveden turvaava vedenkäsittelytekniikka, johon Säteilyturvakeskuksen toteuttama "Radionuklidien poistolaitteiden turvallinen käyttö" -tutkimus kuului.

Vesihuolto 2001 -ohjelmassa korostettiin verkottumisen ja yhteistyön merkitystä yritysten, tutkimuslaitosten, viranomaisten ja vesihuoltolaitosten välillä. Tämä huomioitiin keskustelu- ja tiedotustilaisuudessa, jonka Säteilyturvakeskus järjesti vedenkäsittelylaitteita myyville yrityksille keväällä 2001. Tilaisuuteen osallistui yli kaksikymmentä vedenkäsittelyyn erikoistunutta asiantuntijaa.

Tutkimuksen tekijät haluavat kiittää hankkeeseen osallistuneita yrityksiä antoisasta yhteistyöstä tutkimuksen aikana. Haluamme kiittää kaikkia tutkimukseen osallistuneita asiakkaita, jotka omalta osaltaan tekivät tämän tutkimuksen mahdolliseksi.

1 Johdanto

1.1 Lähtökohdat

Suomessa alettiin tutkia pohjaveden radioaktiivisten aineiden poistomenetelmiä vuonna 1995. Ensimmäiset tutkimukset olivat Säteilyturvakeskuksen (STUK), Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) ja Teknisen korkeakoulun (TKK) toteuttamia. Tutkimukseen saatiin rahoitusta Tekesiltä. Näissä tutkimuksissa pääpaino oli radonin ja uraanin poistossa. Radonin poistoon kehitettiin uusia ilmastusperiaatteella toimivia poistolaitteita ja etsittiin radonin poistoon parhaiten soveltuvaa aktiivihiihilaatua (Myllymäki 1996, Myllymäki ym. 1999). Vuonna 1997 tutkimus jatkui 2,5 vuotta kestäneenä EU-rahoitteisena tutkimushankkeena, TENAWA (Treatment Techniques for Removing Radionuclides from Drinking Water), joka oli aikaisempia tutkimuksia huomattavasti laajempi. Hankkeessa tutkittiin radonin ja uraanin poiston lisäksi radiumin, lyijyn ja poloniumin poistoa sekä raudan ja mangaanin poistoon tarkoitettujen laitteiden kykyä poistaa vedestä radioaktiivisia aineita (Annanmäki ja Turtiainen 2000).

EU-hankkeen aikana tutkittiin 10 kotitalouskäyttöön asennettua ilmastinta, 13 kotitalouteen asennettua aktiivihiihisiuodatinta ja kuutta ioninvaihdinta. Raudan, mangaanin ja radioaktiivisten aineiden samanaikaista poistoa tutkittiin 24 kotitaloudessa. Kahdessa kotitaloudessa tutkittiin käänteisosmoosilaitteen kykyä poistaa radioaktiivisia aineita. Tutkimusaineiston puutteena oli eri pohjavesityyppien rajallisuus: tutkimukset toteutettiin pääasiassa kohteissa, joissa veden laatu oli hyvä. Korkeita rauta-, mangaani- tai orgaanisen aineksen pitoisuuksia esiintyi vain muutamissa tutkimuskohteissa. Vain yhdessä kohteessa, jossa tutkittiin käänteisosmoosilaitteen toimintaa, esiintyi korkea kloridipitoisuus (yli 500 mg/l). Jotta ioninvaihdinten ja aktiivihiihisiuodattimien toiminta voitaisiin taata kaikenlaisille pohjavesille, täytyi niiden toimivuutta edelleen tutkia erityyppisissä pohjavesissä.

Ioninvaihdossa ja aktiivihiihisiuodatuksessa radioaktiiviset aineet kertyvät suodatinmassoihin. EU-projektin kenttätutkimuksen kesto, joka oli noin kaksi vuotta, ei ollut riittävän pitkä suodatinmassojen vaihtovälin määrittämiseksi. Ioninvaihdinten mitoitus tehtiin lähinnä veden humuspitoisuuden perusteella, ja aktiivihiihien käyttöikää arvioitiin veden mikrobiologisen laadun perusteella. Vaihtovälin arvioitiin riippuvan myös veden laadusta, kulutuksesta ja radionuklidipitoisuuksista. Suodatinmassojen käyttäytymistä muuttuvissa olosuhteissa, kuten veden pH-arvon, lämpötilan, paineen, virtaaman ja mineraalikoostumuksen vaihdella, ei EU-projektin puitteissa tutkittu.

Lyijyn ja poloniumin poistomenetelmien kehitystyö koettiin tärkeäksi, koska nämä radionuklidit aiheuttavat radonin jälkeen merkittävimmät säteilyannokset porakaivoveden käyttäjille. Ne esiintyvät pohjavesissä sekä liukoisina yhdisteinä että mineraalisiin ja orgaanisiin kolloideihin sitoutuneina (Lehto ym. 1999.). Siksi niiden poisto ei ollut onnistunut aktiivihilisuodatuksella tai ioninvaihdolla. Lyijyn ja poloniumin poiston tiedettiin onnistuvan kalvosuodatustekniikalla (käänteisosmoosi). Täten tuotettu vesi on kuitenkin erittäin pehmeää, joten usein näihin laitteisiin tulisi liittää kalkkikivisuodatus veden jälkikäsittelyksi sen kovuuden lisäämiseksi. Erilaisten massojen yhdistämistä pidettiin yhtenä mahdollisena vaihtoehtona lyijyn ja poloniumin poistamiseksi.

1.2 Enimmäispitoisuudet

Säteilyturvakeskus on antanut säteilylain 592/91 nojalla talousveden radioaktiivisuutta koskevan ohjeen ST 12.3 vuonna 1993. Ohjeen mukaan veden radonpitoisuus saa olla enintään 300 Bq/l. Muita luonnon radioaktiivisia aineita saa olla radionuklidista riippuen enintään 0,5–20 Bq/l. Jos vedessä on sekä radonia että muita luonnon radioaktiivisia aineita, pitoisuuksien tulee olla edellä mainittuja arvoja pienempiä. Jos toimenpideraja ylittyy, toiminnanharjoittajan tulee pienentää radioaktiivisten aineiden määrää vedessä.

Suomalaista lainsäädäntöä on yhdenmukaistettu EU:n neuvoston talousvesidirektiivin mukaiseksi vuonna 2000 annetussa laissa 441/2000 terveydensuojelulain muuttamisesta ja siihen liittyvässä sosiaali- ja terveysministeriön (STM) asetuksessa 461/2000 talousveden laatuvaatimuksista. Talousveden radioaktiivisuuden osalta direktiivin mukainen 0,1 mSv:n viitteellinen kokonaisannos on kirjattu asetukseen laatusuosituksena. Viitteelliseen kokonaisannokseen ei lasketa tritiumin, kalium-40:n, radonin eikä sen lyhyt- ja pitkäikäisten hajoamistuotteiden aiheuttamaa annosta. Asetuksessa tritiumille suositellaan tavoitteellista enimmäisarvoa 100 Bq/l. Asetus ei ole vielä (vuonna 2003) voimassa veden radioaktiivisille aineille. STM:n pieniä vesilaitoksia ja yksityisiä kaivoja koskevassa asetuksessa 401/2001 on radonpitoisuutta koskeviksi laatusuosituksiksi asetettu pienille talousvesiyksiköille 300 Bq/l ja yksityisten kaivojen vedelle 1000 Bq/l. Enimmäispitoisuudet 1000 Bq/l ja 300 Bq/l ylittyvät vastaavasti 20 000 ja 80 000 porakaivon käyttäjän juomavedessä.

Uraanin enimmäispitoisuudet vaihtelevat eri valtioissa pitoisuusalueella 20–160 µg/l. Sekä kemiallista myrkyllisyyttä että radioaktiivisuutta

on käytetty enimmäispitoisuuksien asettamisen perusteena. Maailman terveysjärjestö WHO on päättänyt kokeellisten tutkimusten perusteella hyvin pieneen ohjearvosuositukseen (2 µg/l). WHO on kuitenkin vastikään nostanut tätä ohjearvosuositustaan arvoon 15 µg/l (WHO 2003). Noin 50 000 suomalaisella, joista 30 000 asuu porakaivotalouksissa, juomaveden uraanipitoisuus ylittää 20 µg/l. Ohjearvosuositus 2 µg/l koskisi jo yli puolta miljoonaa suomalaista. Toistaiseksi STUK on suositellut uraanin poistamista juomavedestä, kun sen pitoisuus ylittää 100 µg/l. Tämä pitoisuus vastaa 0,06–0,12 mSv:n vuotuista säteilyannosta.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimushankkeen tavoitteena oli koota riittävä tulosaineisto talousveden radioaktiivisuuden poistomenetelmiä käsittelevän opaskirjan laatimiseksi. Opaskirja on tarpeellinen sekä kuluttajille että vedenkäsittelylaitteita myyville yrityksille. Sen tarkoituksena on antaa perustietoa laitteiden toiminnasta sekä niiden soveltuvuudesta erityyppisien vesien käsittelyyn. Opaskirjalla pyritään myös vilkastuttamaan poistolaitteiden myyntiä sekä Suomessa että muissa pohjoismaissa, joissa ei ole vielä tehty kokeellista tutkimusta uraanin tai muiden pitkäikäisten radionuklidien poistosta.

Tutkimus jaettiin viiteen työpakettiin. Ensimmäisessä työpaketissa tutkittiin markkinoilla olevat vielä testaamattomat ilmastimet. Toisessa työpaketissa keskityttiin aktiivihilisuodattimiin ja niiden pitkäaikaisen toiminnan tutkimiseen erilaisissa olosuhteissa. Kolmannessa työpaketissa tutkittiin uraanin, radiumin, lyijyn ja poloniumin poistoa eri yritysten ioninvaihtosuodattimilla. Osa tutkimuskohteista valittiin siten, että saatiin käyttökokemusta myös useita vuosia käytössä olleiden suodattimien toiminnasta. Neljännessä työpaketissa tutkittiin useamman haitta-aineen samanaikaista poistoa ja viidennessä työpaketissa lyijyn ja poloniumin sitoutumista pohjaveden partikkeleihin.

1.3.1 Työpaketti 1

Etsitään yhteistyössä yritysten kanssa kotitalouksia, joihin on asennettu ilmastin radonin poistoon. Kotitalouksille lähetetään kyselykirje, jolla tiedustellaan asiakkaan kokemuksia ilmastimen toimintavarmuudesta ja käytön helpoudesta. Lisäksi testataan markkinoilla olevat ilmastimet, joita ei ole vielä ole testattu STUKissa kehitetyn testausmenetelmän mukaisesti.

1.3.2 Työpaketti 2

Tavoitteena on etsiä yhteistyössä yritysten kanssa kotitalouksia, joihin on asennettu radonin poistoon tarkoitettu aktiivihiilisuodatin. Kotitalouksille lähetetään kirje, jolla tiedustellaan aktiivihiilisuodattimen käyttökokemuksia ja suodattimen asennuspaikkaa koskevia tietoja.

Vastanneista valitaan 10–20 seurantakohtetta kenttäkokeisiin. Valintakriteerit ovat:

1. Suodattimen käyttöikä. Pitkään toiminnassa olleista suodattimista valitaan 5–10 tutkimuskohteiksi aktiivihiilen turvallisen vaihtovälin selvittämiseksi.
2. Poikkeava veden laatu. Aktiivihiilet pidättävät rautaa, orgaanista ainesta ja pitkäikäisiä radionuklideja. Mikäli näiden aineiden pitoisuudet ovat poikkeuksellisen suuret, valitaan näitä kohteita 1–5.
3. Aktiivihiilipedin koko. Tutkitaan yhdessä kohteessa, mikäli on aihetta epäillä hiilipedin alimitoitusta.
4. Tekniset ongelmat. Tutkitaan ongelmat, jotka aiheutuvat suodattimen teknisestä toiminnasta (esim. painehäviö, tukkeutuminen).
5. Poikkeava asennus. Mikäli suodattimen yhteyteen on asennettu muita laitteita eikä kyseistä laiteyhdistelmää ole tutkittu aiemmin, valitaan näitä kohteita seurantaan soveltuvasti.
6. Takaisinhuuhtelutoiminto. Tutkitaan takaisinhuuhtelun vaikutusta radonin ja muiden radionuklidien pidättymiseen, vapautumiseen sekä suodattimen tekniseen toimintaan 1–2 kohteessa. Kokeella selvitetään myös raudan käyttäytymistä takaisinhuuhtelun aikana.
7. Hiilipedin ikä. Suodattimen toimintaa testataan maksimivirtaamalla (n. 15 litraa minuutissa) kohteessa, joissa suodatin on ollut pitkäaikaisessa käytössä. Kokeella tutkitaan, voivatko hiileen pidättyneet radionuklidit purkautua juomaveteen esimerkiksi hiilen rapautumisen seurauksena.

Seurannan aikana kerätyt, käytetyt aktiivihiilet analysoidaan gammaspektrometrisesti. Tutkimuksella selvitetään aktiivihiileen pidättyneiden uraani-238:n, radium-226:n ja lyijy-210:n aktiivisuudet.

1.3.3 Työpaketti 3

Kotitalouksille lähetetään kirje, jolla tiedustellaan ioninvaihtimien käyttökokemuksia ja suodattimen asennuspaikkaa koskevia tietoja.

1. Tutkitaan 10–20 kotitaloudessa pitkäaikaisessa käytössä olleiden ioninvaihtimien uraanin ja radiumin poistotehokkuutta. Lisäksi valitaan 1–2 uutta tutkimuskohtetta, joissa veden laatu poikkeaa aikaisempien tutkimuskohteiden veden laadusta (mm. kovat ja suolaiset vedet).

2. Tutkitaan erilaisten asennusten (mm. jälkisuodattimet) vaikutuksia lyijy 210:n ja polonium 210:n poistoon.
3. Tutkitaan ioninvaihtohartsin poistotehokkuuden heikentymistä hartsin vaihtovälin selvittämiseksi yhdessä tutkimuskohteessa, jossa on korkea veden orgaanisen aineen pitoisuus.
4. Tutkitaan eri yritysten käyttämien anioni- ja kationivaihtohartsien kykyä poistaa uraania ja radiumia. Valitaan 1–2 kpl sellaisia kotitalouksia, joihin on näiden yritysten ioninvaihtimet on asennettu.
5. Valitaan yksi pitkäaikaisessa käytössä ollut keittiön veden puhdistukseen asennettu ioninvaihdin (7 litraa) laboratoriossa tapahtuviin jatkotutkimuksiin, joissa selvitetään, miten äkilliset olosuhteiden muutokset kuten veden pH-arvon, mineraalikoostumus tai paineen muutokset vaikuttavat ioninvaihtomassojen toimivuuteen.

1.3.4 Työpaketti 4

1. Tutkitaan kahdessa kotitaloudessa fluoridin ja muiden radioaktiivisten aineiden samanaikaista poistoa. Asiaa tutkitaan vain keittiöveden puhdistamiseen tarkoitetuilla suodattimilla; paljonko vettä suodattimilla voidaan käsitellä, jotta sekä fluoridin että radioaktiivisten aineiden poistumat pysyvät riittävinä.
2. Tutkitaan kahdessa kotitaloudessa radonin, raudan ja mangaanin samanaikaista poistoa kahdella laiteella, joilla on siihen edellytyksiä aikaisempien tutkimusten perusteella. Laitteita ei ole testattu pitkäaikaisessa käytössä.

1.3.5 Työpaketti 5

1. Tutkitaan viidessä kotitaloudessa lyijyn ja poloniumin sitoutumista partikkeliaineeseen sekä ioninvaihtimen ja aktiivihiilisuodattimen vaikutusta partikkelien kokojakaumaan. Kotitaloudet valitaan siten, että tutkimukseen sisältyvät humus-, rauta-, mangaani- ja suolapitoinen sekä laadultaan moitteeton vesi.

2 Talousveden radioaktiivisten aineiden poistomenetelmät

Säteilyannoksen kannalta merkittävin porakaivovesissä esiintyvä radioaktiivinen aine on radon. Porakaivovedessä on usein myös uraania sellaisina pitoisuuksina, että se tulee poistaa. Lyijyn ja poloniumin poisto vedestä on usein tarpeellista, kun veden radonpitoisuus on yli 1000 Bq/l. Radiumia on vedessä vain harvoin sellaisina pitoisuuksina, että sen poisto vedestä on välttämätöntä.

Radon tulee poistaa aina kaikesta talousvedestä, koska se vapautuu sisäilmaan veden käytön yhteydessä. Muille radioaktiivisille aineille riittää, kun ne poistetaan juomavedestä. Ne eivät aiheuta säteilyaltistusta muun veden käytön, esim. suihkun, yhteydessä.

Radioaktiiviset aineet ovat fysikaalisilta ja kemiallisilta ominaisuuksiltaan erilaisia, joten niiden poistaminen ei yleensä onnistu samoilla menetelmillä. Menetelmiä ja laitteita on kehitetty eniten Yhdysvalloissa mutta myös Euroopassa. Vaihtoehtoisten poistomenetelmien soveltuvuutta suomalaisten pohjavesien käsittelyyn on tarkasteltu laajasti Petri Jokelan kirjallisuustutkimuksessa (Jokela 1993). Ruotsissa on kehitetty monia ilmastimia yksityistalouksien käyttöön (Lindén 1997). Ne ovat olleet riittävän tehokkaita myös pienten vesiosuuskuntien tarpeisiin (Salonen ym. 2002). Suomessa tutkimukset ovat painottuneet pääosin kenttätutkimuksiin, joissa eri menetelmien soveltuvuutta on testattu vesilaitoksilla ja kotitalouksissa erityyppisten vesien käsittelyyn (Salonen ym. 1998). Suomalaisesta laitekehityksestä ovat esimerkkeinä kaksi ilmastinta (Myllymäki ym. 1999, Annanmäki ja Turtiainen 2000).

Poistolaitteiden asennus ja yhdistäminen on suunniteltava tapauskohtaisesti etenkin silloin, kun vedestä on poistettava samanaikaisesti useita radioaktiivisia aineita, tai kun vedessä on poistettavia määriä muita aineita, kuten rautaa, mangaania tai humusta. Suurina määrinä ne voivat haitata radionuklidien poistolaitteiden toimintaa. Yleensä rauta, mangaani ja humus kannattaa poistaa ennen radioaktiivisten aineiden poistoa.

2.1 Radonin poisto

Radonin fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet määräävät pitkälti poistomenetelmien toteutettavuuden. Kemiallisesti radon on lähes inertti, joten sen

poistaminen ei voi perustua kemialliseen reaktioon. Radonin massa on aina hyvin pieni; esimerkiksi 5000 Bq vastaa $0,88 \times 10^{-12}$ grammaa. Lisäksi radon on kohtuullisen liukoinen veteen. Huoneen lämmössä sen liukoisuus on samaa luokkaa kuin hiilidioksidin. Radon hajoaa fysikaalisen puoliintumisaikansa (3,825 päivää) mukaisesti ja hajotessaan ylläpitää neljää lyhytikäistä tytärnuklidia aktiivisuustasapainossa itsensä kanssa. Kaikki nämä seikat asettavat erityisvaatimuksensa poistolaitteille. Lisäksi soveltuvan poistolaitteen valintaa rajoittaa käytettävissä olevan asennustilan koko ja laitteen hankintahinta. (Lowry ja Brandow 1985).

Radonia poistetaan vedestä kahdella eri menetelmällä: ilmastuksella ja aktiivihiihluodatuksella. Ilmastus on ensisijainen menetelmä, kun veden radonpitoisuus ylittää 5000 Bq/l tai kun käsitellään suuria vesimääriä, kuten vesilaitoksilla.

2.1.1 Ilmastus

Ilmastus perustuu veteen liuenneen kaasumaisen radonin siirtymiseen ympäröivään ilmaan diffuusion avulla. Siirtymistä voidaan nopeuttaa luomalla suuri pinta-ala veden ja ilman välille. Lämpötilassa 10 °C ja normaali-ilmanpaineessa ilman radonpitoisuus on noin kolminkertainen veden radonpitoisuuteen verrattuna, kun veteen liuenut radon saavuttaa tasapainotilan ilmassa olevan kaasumaisen radonin kanssa. Yleensä tarvitaan kuitenkin kymmenkertainen määrä ilmaa tiettyä vesitilavuutta kohti, jotta saadaan 95 prosenttinen poistuma radonille. Ilmastus poistaa vedestä myös muita kaasumaisia aineita, kuten hiilidioksidia, rikkivetyä ja haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Muita luonnon radioaktiivisia aineita ilmastus ei poista.

Ilmastuksen tehokkuuteen vaikuttavat mm. seuraavat tekijät:

- veden ja ilman välinen kontaktiaika
- veden ja ilman pinta-alojen suhde
- veden ja ilman suhteelliset osuudet säiliön tilavuudesta
- ilman tasainen sekoittuminen koko vesitilavuuteen
- veden ja ilman lämpötila ja paine
- radonin konsentraatioero säiliössä olevan veden ja ilman välillä

Tavallisimmat ilmastusperiaatteet kaupallisissa laitteissa ovat:

1. *Suihkutus-ilmastus.* Radonpitoinen vesi pumpataan säiliöön sumutussuuttimen läpi. Suuttimessa vesi muuttuu hyvin pieniksi pisaroiksi, joiden pinnalta radon siirtyy helposti säiliön ilmatilaan. Sieltä radonpitoinen ilma johdetaan pois kanavaa pitkin ulkoilmaan. Korvausilma otetaan tavallisesti huoneilmasta.

2. *Hienokuplailmastus*. Radonpitoiseen veteen tuotetaan suuri määrä pieniä ilmakuplia, joihin liuennut radon siirtyy. Kuplat voidaan tuottaa kompressorilla ja hienokuplasuuttimella tai kierrättämällä vettä ejektorin läpi. Radonpitoinen ilma johdetaan tuuletuskanavaa pitkin ulkoilmaan.

3. *Torni-ilmastus*. Vesi johdetaan pystysuoraan asennetun tornin yläosaan. Torni on täytetty materiaalilla, jolla on suuri pinta-ala (esim. muoviverkoilla tai -paloilla). Tornin alaosassa on tehokas kompressori, joka puhaltaa tornin läpi ilmaa. Radonpitoinen ilma johdetaan tuuletuskanavaa pitkin ulkoilmaan. Kun vesi valuu tornissa alaspäin, muodostuu suuri pinta-ala veden ja ilman välille.

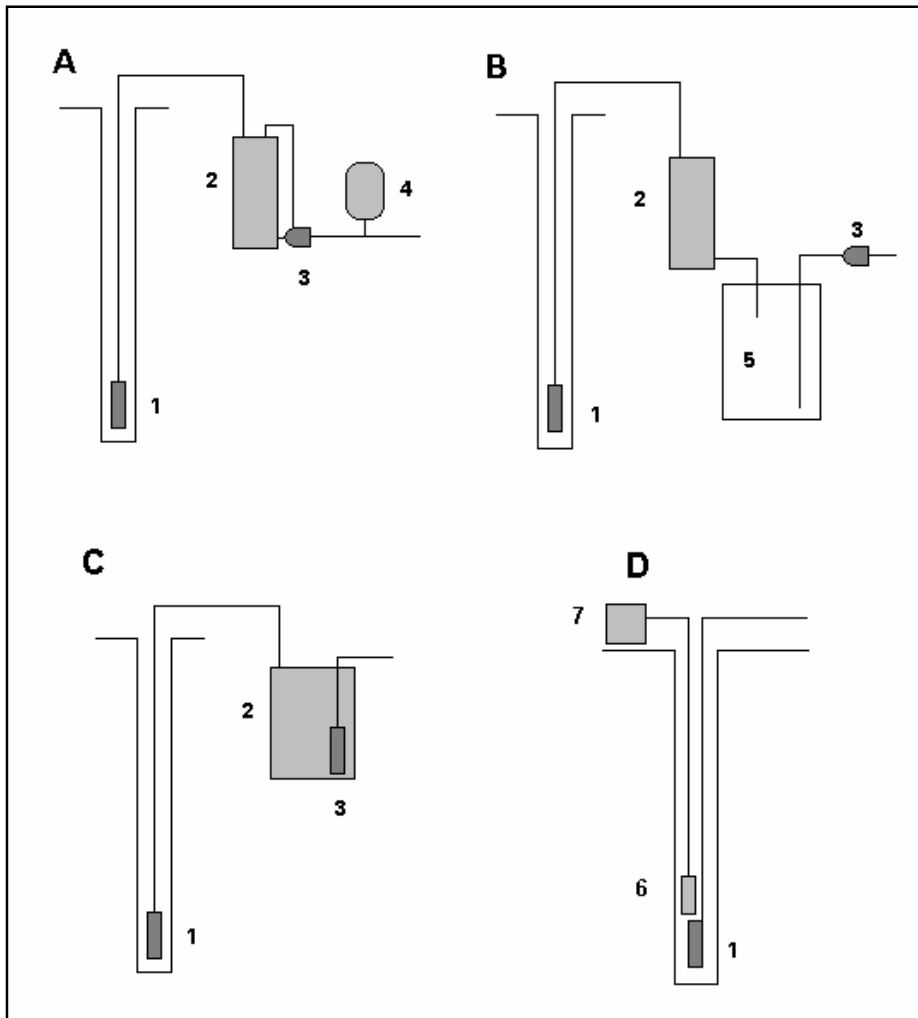
Ilmastuslaitteisto voidaan asentaa kotitalouden vesilinjaan usealla eri tavalla (Kuva 1). Ilmastettu vesi voidaan varastoida ilmastimessa, ohjata paineistamattomaan varastosäiliöön tai ohjata painesäiliöön. Markkinoilla on myös radoninpoistolaite, joka ilmastaa veden suoraan kaivossa. Ilmastimien asennustapa vaihtelee ja riippuu tavallisesti halutusta vedentuotosta sekä asennukseen tarvittavista tiloista.

Ilmastuksen vaikutus veden laatuun

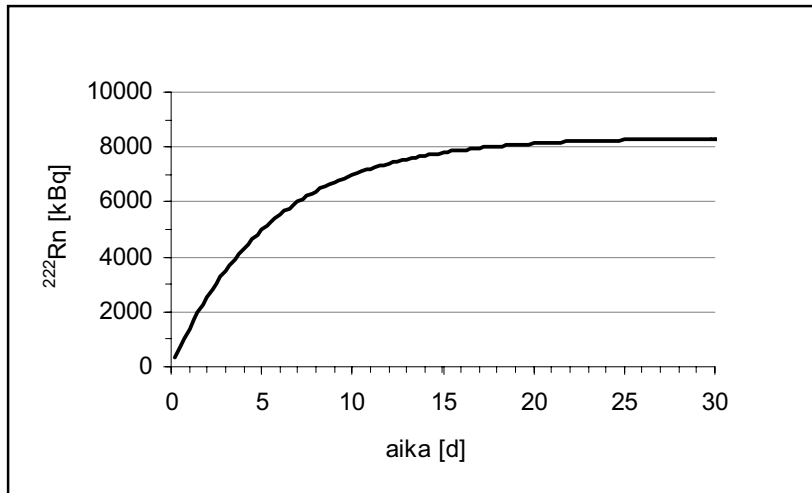
Ilmastus poistaa rikkivetyä ja kasvattaa veden happipitoisuutta, mikä parantaa veden makua ja hajua. Ilmastuksen aikana vedestä poistuu hiilidioksidi, mikä nostaa veden pH-arvoa ja vähentää veden korrodoivuutta. Hapelliset olosuhteet ja kohonnut pH-arvo voivat taas aiheuttaa vedessä olevan raudan hapettumista ja saostumista hydroksidina. Myös mangaani voi tällöin saostua. Sakat tuleekin poistaa jälkisuodatuksella, jotteivät ne pääse vesilinjaan. Kovissa vesissä ilmastus voi myös lisätä kattilakiven muodostumista lämmityskattiloissa, jos veden pH-arvo kasvaa. Ilmastuksessa vesi joutuu kosketuksiin sinne johdettavan ilman kanssa, joten veden mikrobiologiseen laatuun sekä ilmastinlaitteiden puhdistukseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Ilmastimen käyttämä ilma tulisi aina suodattaa.

2.1.2 Aktiivihiilisuodatus

Aktiivihiilisuodattimet ovat 20–100 litran vetoisia paineellisia säiliöitä, jotka on täytetty aktiivihiilellä. Aktiivihiilisuodattimen toiminta perustuu radonin adsorptioon aktiivihiilen pinnalle. Aktiivihiilen pinnalle adsorboitunut radon hajoaa puoliintumisaikansa mukaisesti. Noin kolmen viikon kuluttua suodattimen käyttöönotosta radonin kertymänopeus aktiivihiileen on yhtä suuri kuin sen poistuminen radioaktiivisen



Kuva 1. Erityyppisten ilmastimien asennuksia, joiden komponentit ovat: 1 kaivopumppu, 2 ilmastin, 3 paineenkorotuspumppu, 4 painesäiliö, 5 varastosäiliö, 6 ilmastussuutin ja 7 kompressori. Asennuksessa **A** paineenkorotuspumppu ilmastaa veden ja paineistaa vesilinjan. Asennuksessa **B** kaivopumppu täyttää ilmastimen, varastosäiliö täyttyy painovoimaisesti ja paineenkorotuspumppu paineistaa kotitalouden vesilinjan. Asennuksessa **C** ilmastin toimii varastosäiliönä. Asennuksessa **D** kompressori pumppaa ilmaa kaivoveteen kaivossa olevan ilmastussuuttimen läpi.

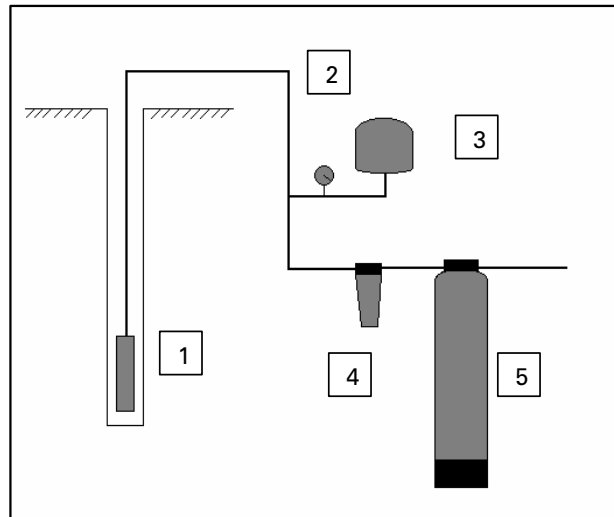


Kuva 2. Aktiivihiileen kertyneen radonin aktiivisuus käyttöajan funktiona. Radonin poistuminen radioaktiivisen hajoamisen kautta on yhtä nopeaa kuin kertyminen noin kolmen viikon kuluttua suodattimen käyttöönotosta. Tällöin suodattimen sanotaan olevan tasapainotilassa ja radonin aktiivisuus aktiivihiilisuodattimessa on asettunut maksimitasolleen. Kuvassa on esitetty tapaus, jossa veden kulutus on 520 L/d ja raakaveden radonpitoisuus 3000 Bq/L. Tasapainotilassa radonia on kertyneenä suodattimeen noin 8300 kBq. Radonin lyhytikäiset hajoamistuotteet pidättyvät niin ikään suodattimeen ja ovat tasapainossa radonin kanssa.

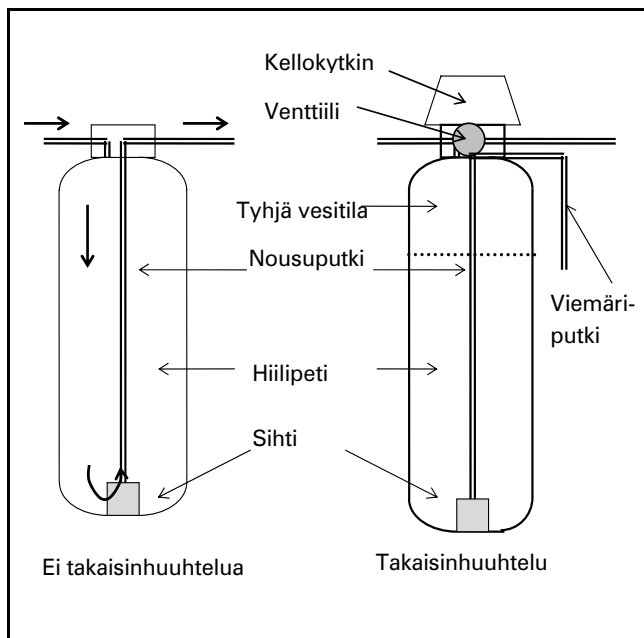
hajoamisen kautta. Tällöin suodattimen sanotaan olevan tasapainotilassa (Kuva 2).

Tasapainossa olevassa aktiivihiilisuodattimessa radon on tasapainossa lyhytikäisten hajoamistuotteidensa (polonium-218, lyijy-214, vismutti-214 ja polonium-214) kanssa. Näistä hajoamistuotteista lyijy-214 ja vismutti-214 emittoivat gammasäteilyä, joten annosnopeus aktiivihiilisuodattimen pinnalla ja välittömässä läheisyydessä voi olla haitallisen suurta. Annosnopeus riippuu suoraan veden radonpitoisuudesta ja veden kulutuksesta. Tämän vuoksi aktiivihiilisuodatin sijoitetaan joko varastotiloihin kauas asuinhuoneista tai kaivon yhteyteen. Aktiivihiilisuodatusta ei suositella, jos veden radonpitoisuus ylittää 5000 Bq/l.

Joissain tapauksissa ennen aktiivihiilisuodatinta asennetaan esisuodatin partikkeliaineksen poistoon (Kuva 3). Mikäli raakavedessä esiintyy rautaa (> 0,2 mg/l), valitaan usein aktiivihiilisuodatin, joka on varustettu takaisinhuhteluautomatiikalla (Kuva 4).



Kuva 3. Aktiivihiihisuodattimen asennus kotitalouden vesilinjaan. Kuvan komponentit ovat: 1 kaivopumppu, 2 painemittari, 3 painesäiliö, 4 esisuodatin ja 5 aktiivihiihisuodatin.



Kuva 4. Aktiivihiihisuodattimissa raakavesi suodatetaan hiilipedin läpi alaspäin ja käsitelty vesi nousee nousuputkea pitkin vesilinjaan. Takaisinhuuhtelussa venttiili ohjaa raakaveden nousuputken kautta hiilipedin pohjalle. Ylöspäin virtaava vesi huuhtelee hiilipetiin kertyneet saostumat ja partikkelit ja kuljettaa ne erillistä putkea pitkin viemäriin. Takaisinhuuhtelulla varustetuissa suodatinkoteloissa hiilen osuus on noin kaksi kolmasosaa kotelon koko tilavuudesta.

2.2 Uraanin poisto

Pohjavedessä uraani esiintyy pääasiassa kahdella eri hapetusasteella. Pelkistävässä olosuhteissa vallitsevina ovat uraaniyhdisteet, joissa uraanin hapetusluku on +4. Nämä yhdisteet ovat erittäin niukkaliukoisia. Hapettavissa olosuhteissa uraanin vallitseva muoto on uranyyli-ioni, UO^{2+} , jonka hapetusluku on +6. Uranyyli-ioni muodostaa kompleksiyhdisteitä olosuhteista riippuen mm. vedessä olevien fosfaatin, sulfaatin, karbonaatin, hydroksidi- ja kloridi-ionin ja veden orgaanisen aineksen kanssa. Suomessa kalliopohjavedet ovat ns. bikarbonaattivesiä, joiden pH-arvo on useimmiten 7–10 (Hyypä 1984). Tällaisissa olosuhteissa uraanin vallitsevat esiintymismuodot ovat $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ ja $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ (Langmuir 1978). Tämän lisäksi suomalaiset maapohjavedet ovat tyypillisesti pehmeitä, hiilidioksidipitoisia ja usein myös happamia (Hiisvirta 1991). Kaikki nämä seikat edistävät uraanin liukoisuutta pohjavesiin (Salonen 1995).

Uraania voidaan poistaa pohjavesistä useilla eri menetelmillä. Tutkituja menetelmiä ovat ioninvaihto, kemiallinen saostus, adsorptio aktiivihiileen ja aktivoituun alumiinioksidiin sekä kalvosuodatus (käänteisosmoosi ja nanosuodatus).

Uraanin saostaminen vedestä eri metallisuolojen avulla on hyvin riippuvainen veden pH-arvosta silloin, kun vedessä on bikarbonaatteja. Tehokkaan poistamiseen tarvitaan optimiolosuhteet, minkä vuoksi saostusmenetelmää ei käytetä yksityisissä kotitalouksissa. Aktiivihiilisuodattimet poistavat uraania, mutta aktiivihiilen kapasiteetti uraanille on vähäinen. Yksityisissä kotitalouksissa on järkevintä käyttää joko ioninvaihtoa tai käänteisosmoosia.

Ioninvaihtomenetelmää on käytetty uraanikaivoksilla uraanin erottamiseen jo vuosikymmeniä, mutta juomaveden käsittelyyn vasta 1980-luvulta lähtien (Jokela 1993). Uraanin poistoa ioninvaihtoon ja käänteisosmoosioon perustuvilla menetelmillä on tutkittu Suomessa vuodesta 1995 alkaen (Myllymäki 1996, Huikuri ja Salonen 2000).

Uraanin poisto onnistuu parhaiten vahvalla orgaanisella anioninvaihtohartsilla, jolla päästään lähes 100 prosentin poistumiin. Anioninvaihdossa käytetty hartsi muodostaa kemiallisen sidoksen vedessä esiintyvien negatiivisesti varattujen ionien eli anionien kanssa. Jossain vaiheessa, kun vettä on suodatettu suodattimen läpi riittävän paljon, hartsin ioninvaihtokyky alkaa heikentyä tai se loppuu kokonaan. Tällöin hartsiin pidäytyneet ionit poistetaan siitä elvytyksellä. Elvytys tehdään lähes kylläisellä suolaliuksella

2.2.1 Anioninvaihtimen asentaminen

Kaupallisia anioninvaihtohartsilla varustettuja laitteita on saatavilla useita eri kokoja. Malli valitaan vedenkulutuksen ja kuluttajan käyttötarpeen perusteella. Jos vedessä on uraania on yli 1 mg/l tai muita haitta-aineita, kuten rautaa, mangaania tai humusta, valitaan laite, jolla käsitellään kaikki talousvesi. Laitteistossa on kellokytkimellä toimiva elvytys ja tarvittaessa raudan ja mangaanin poistoon oma hartsi. Näissä suodattimissa eri hartsien yhteistilavuus on 30–80 litraa. Elvytyksessä, joka tehdään tavallisesti kerran viikossa lähes kylläisellä merisuolaliuoksella, hartsiin pidätynyt uraani, muut ionit ja partikkelit irtoavat. Näin hartsin uraaninpidätyskyky palautuu lähes alkuperäiselle tasolleen.

Anioninvaihdin voidaan asentaa käsittelemään kaikki talousvesi myös ilman elvytystäkin. Tämä on mahdollista, kun vedessä ei ole uraanin lisäksi merkittäviä pitoisuuksia muita haitta-aineita. Koska hartsia ei elvytetä, siihen kertyy uraania ja muita aineita jatkuvasti koko käytön ajan. Hartsi vaihdetaan uuteen, kun uraanin pidätyskyky alkaa heikentyä ja käsitellyn veden uraanipitoisuus nousee yli 10 µg/l. Nämä suodattimet ovat tilavuudeltaan tavallisesti 20–60 litraa. Suodattimet, joilla käsitellään kaikki talousvesi asennetaan kotitaloudessa useimmiten tekniseen tilaan.

Uraania ei tarvitse välttämättä poistaa kaikesta talousvedestä, koska se ei aiheuta säteilyaltistusta muun kuin juodun veden kautta. Jos uraani poistetaan vain juomavedestä ja ruuan valmistukseen käytettävästä vedestä, hartsia ei yleensä elvytetä. Sama hartsi voi pidättää uraania vuosia, jonka jälkeen se vaihdetaan uuteen. Tyypillinen asennuspaikka tällaiselle laitteelle on keittiön tiskipöydän alla oleva kaappi. Näissä laitteissa hartsin tilavuus on 7–11 litraa.

Markkinoilla on myös nk. hanasuodatin, joka on helppo asentaa keittiön hanaan poresuuttimen tilalle. Laitteessa on patruuna, joka on täytetty vahvalla anioninvaihtohartsilla. Hartsin tilavuus on tavallisesti alle litra. Hanasuodattimen uraaninpoistokyky riippuu veden valutusnopeudesta, eikä ole korkeilla (yli 200 µg/l) uraanipitoisuuksilla niin hyvä kuin edellä esitettyjen suodattimien. Hanasuodattimia suositellaankin käytettäväksi vain vapaa-ajan asunnoilla. Patruuna tulee vaihtaa kerran vuodessa.

2.3 Radiumin poisto

Radium esiintyy pohjavedessä hydratoituneena kationina hapetusluvulla +2. Radium on suhteellisen liukoinen ja muistuttaa kemiallisilta ominaisuuksiltaan sukulaisaineitaan bariumia, kalsiumia ja

magnesiumia. Se saostuu yhdessä niiden kanssa (ns. kersaostuminen) vedestä vaikealiukoisina karbonaattina ja sulfaattina. Radium muodostaa sulfaattien kanssa myös neutraaleja ionipareja, joilla on taipumus adsorboitua erilaisille pinnoille. Positiivisesti varautunut radium adsorboituu helposti varaukseltaan negatiivisten hydroksidien pinnoille (Clifford 1990).

Radiumin poistomenetelmiä on tutkittu paljon. Yhdysvalloissa 1970-luvulta lähtien tutkittuja menetelmiä ovat mm. koagulointi, BaSO_4 -kersaostus, kalkkipehmenys, ioninvaihto, sorptiomenetelmät ja käänteisosmoosi.

Radium poistuu vedestä erilaisilla saostusmenetelmillä. Saostus bariumsulfaatin kanssa on tehokas menetelmä. Se ei sovellu juomaveden käsitelyyn, koska bariumpitoisuus käsitellyssä vedessä lisääntyy ja ylittää helposti sille asetetun enimmäispitoisuuden. Kalkki- ja kalkkisoodapehmenys ovat tehokkaita menetelmiä, joita on käytetty vesilaitoksilla (Bennett 1978). Kalkkipehmenyksessä tapahtuvaa mekanismia ei kuitenkaan tunneta täysin, mutta sen arvioidaan olevan joko saostuminen, kersaostuminen, adsorptio tai näiden yhdistelmä.

Ioninvaihtomenetelmä radiumin poistossa on tehokas. Hartsina voidaan käyttää joko natrium- tai vetymuodossa olevaa kationinvaihtohartsia. Ioninvaihto tapahtuu nopeasti, minkä vuoksi hartsia ei tarvita suurta määrää.

Radiumin poistoa sorptiolla on tutkittu käyttämällä adsorptioaineena mangaanidioksidia, bariumsulfaattia, aktiivihiiltä, aktivoitua alumiinioksidia ja hiekkasuodattimia. Näiden menetelmien haittapuolena on se, ettei suodatinmassoja voida elvyttää. Ainoastaan hiekkasuodattimia, jotka on käsitelty mangaanilla, voidaan elvyttää hapolla. Tällöin laitteisto on kootava hapon kestävästä materiaalista, mikä nostaa sen hintaa.

Myös käänteisosmoosisuodatusta on tutkittu varsin laajasti jo 1970-luvulta lähtien. Radium on poistunut vedestä useimmiten lähes täydellisesti.

Radiumin poistoa ioninvaihto- ja käänteisosmoosimenetelmillä on tutkittu Suomessa vuodesta 1997 alkaen (Annanmäki ja Turtiainen 2000). Radiumin poistoon soveltuu vahva orgaaninen kationinvaihtohartsi. Näillä kahdella menetelmällä on päästy yli 95 % poistumiin. Kaupallisia laitteita on saatavilla useita malleja ja kokoja, joista voidaan valita sopivin vedenkulutuksen ja radiumpitoisuuden perusteella.

2.4 Lyijyn ja poloniumin poisto

Lyijy ja polonium esiintyvät vedessä muodostaen epäorgaanisia yhdisteitä, adsorboituneena vedessä oleviin hiukkasiin tai liukoisina ioneina. Ne voivat

muodostaa yhdisteitä myös veden orgaanisen aineksen kanssa. Koska lyijy ja polonium esiintyvät vedessä vaihtelevasti erilaisina kemiallisina yhdisteinä tai sitoutuneena hiukkasiin, niiden poistumat eri aikoina tai eri menetelmillä voivat poiketa suuresti toisistaan. Lyijyn ja poloniumin poistoa on tutkittu ioninvaihdolla, aktiivihiiliadsorptiolla, käänteisosmoosilla ja eri saostusmenetelmillä (Annanmäki ja Turtiainen 2000).

Ioninvaihtimilla ja aktiivihiilisuodattimilla saadut lyijyn ja poloniumin poistumat voivat vaihdella paljonkin. Ioninvaihdossa on tutkittu vahvoja orgaanisia ja kelatoivia hartseja sekä zeoliittejä. Kelatoivien hartsien kanssa lyijy muodostaa kompleksiyhdisteitä hartsin kanssa (Mazidji ym. 1992). Vahvat orgaaniset hartsit ja zeoliitit ovat poistavat vedestä todennäköisimmin liukoisessa muodossa olevaa lyijyä.

Lyijyn ja poloniumin poistossa on käytetty myös saostusmenetelmiä (Fox ja Sorg 1992, Kuenn 1992). Saostuskemikaaleina ovat toimineet muun muassa alumiinisulfaatti, rautasulfaatti yksinään ja yhdistettynä kalkin kanssa sekä pelkkä kalkki. Eri saostuskemikaalit ovat poistaneet eri määrät lyijyä ja poloniumia. Rauta- ja kalkkisaostuksella lyijyn poistuma on yli 95 prosenttia ja sitä on parannettu lisäämällä jälkikäsitteilyksi esimerkiksi aktiivihiilisuodatus. Poloniumin poistossa saostusmenetelmillä on saavutettu 60–90 %:n poistumia (Cowen ym. 1977, Hogde ym. 1974).

Edellä kuvatuilla menetelmillä poistumat ovat vaihdelleet riippuen siitä, missä kemiallisessa muodossa lyijy ja polonium ovat esiintyneet tutkituissa pohjavesissä. Kalvosuodatusmenetelmässä aineiden kemiallinen muoto ei ole ainoa ratkaiseva tekijä, koska vesi suodatetaan paineella puoliläpäisevän kalvon läpi, jonka huokoskoko on hyvin pieni (käänteisosmoosi ja nanosuodatus). Käänteisosmoosilaitteilla lyijyn ja poloniumin poistumat ovat olleet yli 95 % hyvin suolaisissakin vesissä. Kaupallisissa laitteissa on usein sekä esi- että jälkisuodattimet, jotta vedessä olevat muut aineet eivät tukkisi kalvoa ja veden mikrobiologinen laatu säilyisi hyvänä (Huikuri ym. 1998).

3 Tutkimusmenetelmät

3.1 Näytteenotto-ohjelma

Vesinäytteitä otettiin tutkimuskohteissa 2–3 kuukauden välein. Näytteet otettiin raakavedestä (ennen vedenkäsittelylaitetta) ja käsitellystä vedestä (vedenkäsittelylaitteen jälkeen). Kohteissa, joissa oli käytössä hanasuodatin uraanin poistoon, asukkaat keräsivät vesinäytteet itse. Kaikissa muissa kohteissa näytteen otti Säteilyturvakeskuksen työntekijä.

Kaikista vesinäytteistä määritettiin veden radonpitoisuus ja pitkäikäisten alfa-aktiivisten aineiden kokonaispitoisuus (kokonaisalfa-aktiivisuus). Työpaketeissa 2 määritettiin lisäksi lyijy- ja poloniumpitoisuudet. Työpaketeissa 3 ja 4 määritettiin edellisten lisäksi vielä veden uraani- ja radiumpitoisuudet. Tarkempi näytteen keruuohjelma on esitetty Liitteessä 1.

Työpaketeissa tehtiin myös muita veden laatuparametrien määrytyksiä (Taulukko 1). Määritettävät parametrit valittiin aiempien tutkimusten perusteella (Turtiainen ym. 2000, Huikuri ja Salonen 2000).

Taulukko 1. Veden laatuparametrien määrytykset eri työpaketeissa. Parametrit olivat pesäkkeiden lukumäärä (HPL) 22 ja 37 °C, pH-arvo, sähkönjohtavuus, rauta (Fe), mangaani (Mn), sulfaatti (SO₄), permanganaattiluku (KMnO₄), orgaanisen hiilen kokonaisuusmäärä (TOC), alumiini (Al) ja fluoridi (F).

Työpaketti	HPL 22 °C	HPL 37 °C	pH	Sähkönjoht.	Fe	Mn	SO ₄	KMnO ₄	TOC	Al	F
TP2	X	X	X	X	X	X			X		
TP3	X	X	X	X	X	X	X	X			
TP4	X	X	X	X	X	X		X		X	X

3.1.1 Ilmastimien testausmenetelmä

EU-hankkeen aikana havaittiin, että joidenkin ilmastimien radoninpoistotehokkuus ei ole vakio vaan se voi vaihdella sen mukaan, kuinka paljon vettä on valutettu ennen näytteenottoa (Annanmäki ja Turtiainen 2000). Tätä varten STUKissa kehitettiin näytteenottomenetelmä, jolla ilmastimen toimivuutta vaihtelevissa olosuhteissa voidaan tutkia.

Aluksi otettiin näytteet sekä raakavedestä että putkistossa seisovasta ilmastetusta vedestä. Tämän jälkeen keittiön hanaan liitettiin 25 cm pitkä muoviletku, jonka toinen pää asetettiin 2 litran Erlenmayer-kolvin pohjalle,

joka oli tiskialtaassa. Hana avattiin ja vettä valutettiin noin puolella maksimivirtaamasta (5–7 l/min), jolloin vettä oli kolvissa koko ajan 2 litraa ja ylimäärä valui viemäriin. Valutuksen aloitushetki kirjatattiin ylös. Joka toinen tai kolmas minuutti valutuksen aloittamishetkestä pipetoitiin kolvista vesinäyte ilman pumpettia. Vettä valutettiin 15–20 minuuttia, kunnes sitä oli valutettu vähintään 100 litraa. Veden virtaamaa pyrittiin pitämään vakiona valutuksen aikana. Lopuksi otettiin vielä näyte raakavedestä.

Kun näytteet oli analysoitu, piirrettiin kuvaaja, jossa ilmastetun veden radonpitoisuus (Bq/l) on kuvattu juoksutetun vesimäärän funktiona. Laskettiin laitteen poistotehokkuus 50 ja 100 litran valutukselle, yhtälön 3.1 mukaisesti.

$$R_e = \frac{\sum^n [\frac{1}{2} \cdot (C_n + C_{n-1}) \cdot (V_n - V_{n-1})]}{V_{tot} \cdot \frac{C_{i0} + C_{if}}{2}} \cdot 100\% , \text{ missä} \quad (3.1)$$

R_e on keskimääräinen poistotehokkuus,

C_n on näytteen n radonpitoisuus, kun vettä on valutettu V_n litraa,

V_{tot} on joko 50 tai 100 litraa,

C_{i0} on ensimmäisen raakavesinäytteen radonpitoisuus ja

C_{if} on jälkimmäisen raakavesinäytteen radonpitoisuus.

Lisäksi laskettiin heikoin hetkellinen poistotehokkuus seuraavasti:

$$R_{min} = \left(1 - \frac{2C_{max}}{C_{i0} + C_{if}}\right) \cdot 100\% , \text{ missä} \quad (3.2)$$

R_{min} on hetkellinen minimipoistotehokkuus,

C_{max} on korkein mitattu radonpitoisuus ensimmäisen 100 litran aikana,

C_{i0} on ensimmäisen raakavesinäytteen radonpitoisuus ja

C_{if} on jälkimmäisen raakavesinäytteen radonpitoisuus.

Tässä tutkimuksessa veden laatua ei seurattu, koska ilmastimien vaikutus veden laadulle on selvitetty aiemmissa tutkimuksissa (Myllymäki ym. 1999, Annanmäki ja Turtiainen 2000).

3.1.2 Muiden laitteiden testaukset

Radonnäytteet ilman veden valutusta

Ennen näytteenoton aloittamista kirjattiin muistiin vesimittarin lukema. Radonnäyte otettiin ensin raakavedestä, jotta saatiin selville sen hetkinen radonpitoisuus käsittelemättömässä vedessä. Tämän jälkeen otettiin

radonnäyte keittiön hanasta siten, että vettä oli valutettu enimmillään puoli litraa (putkistoveden radon). Lopuksi mitattiin veden lämpötila.

Mikrobiologinen näyte

Lämpötilan mittaamisen jälkeen keittiön hanasta irrotettiin poresuutin. Hanapää pyyhittiin nukattomalla pyyhkeellä ja runsaalla määrällä A12t-liuosta (80 % w/w). Annettiin A12t-liuoksen kuivua noin minuutin ajan, jolloin liuoksen etanoli laimeni pitoisuuteen 70 % w/w ja lopuksi haihtui. Hananpään desinfioinnin jälkeen vettä juoksuutettiin noin neljäsosateholla maksimivirtaamasta, yhteensä kaksi litraa. Tämän jälkeen mikrobiologinen vesinäyte valutettiin steriloituun pulloon. Näyte toimitettiin tutkittavaksi Helsingin kaupungin Ympäristökeskukseen neljän tunnin sisällä näytteen ottamisesta. Siellä mikrobiologisesta vesinäytteestä määritettiin pesäkkeiden lukumäärä 22 °C ja 37 °C:ssa (HPL 22 °C ja 37 °C).

Radonnäyte käsitelystä vedestä

Mikrobiologisen näytteen ottamisen jälkeen vettä valutettiin virtaamalla 5–7 l/min niin kauan, että vesi oli vaihtunut putkistossa ja vedenkäsittelylaitteessa. Esimerkiksi 39 litran vetoisilla aktiivihiiisuodattimilla valutettiin yhteensä 40 litraa ja 63 litran vetoisilla suodattimilla valutettiin 55 litraa. Useimmat ioninvaihtimet oli asennettu aktiivihiiisuodattimen yhteyteen, joten näiden läpi valutettiin vettä aktiivihiiisuodattimen tilavuuden perusteella. Valutuksen jälkeen otettiin radonnäyte suodatetusta vedestä suoraan nestetuikepulloon.

Veden muiden laatuparametrien määritykset

Näytteet raudan (Fe), mangaanin (Mn), fluoridin (F), sulfaatin (SO₄), alumiinin (Al), veden permanganaattiluvun (KMnO₄) ja orgaanisen hiilen kokonaispitoisuuden (TOC) määrityksiä varten otettiin Helsingin ympäristökeskuksesta tilattuihin näytepulloihin.

Näytteet pitkäikäisten radioaktiivisten aineiden määrittystä varten otettiin kahteen litran polyeteenipulloon. Kaikki näytepullot täytettiin ensin noin kolmasosaan tilavuudestaan, suljettiin ja ravisteltiin huolellisesti. Pullot tyhjennettiin ja täytettiin sen jälkeen kaulaan asti.

Veden pH-arvo, sähkönjohtavuus, lämpötila ja liuenneen hapen määrä määritettiin kannettavalla monialuemitarilla (Consort C535). Näytteet otettiin silikoniletkun avulla. Letku kiinnitettiin keittiön hanan päähän ja annettiin veden virrata kunnes ilmakuplat olivat poistuneet letkusta. Letkun pää asetettiin lasipulloon ja veden annettiin valua lasipullon reunojen yli vähintään kolme kertaa pullon tilavuuden verran. Tämän jälkeen mittarin anturi upotettiin pulloon ja mittarista luettiin pH-arvo, lämpötila, sähkönjohtavuus ja happipitoisuus. Mittari kalibroitiin laboratorioissa ennen näytteen hakemista.

Näytteet raakavedestä

Kun kaikki näytteet käsittelystä vedestä oli otettu, luettiin vesimittari uudelleen ja otettiin näytteet raakavedestä seuraavassa järjestyksessä: mikrobiologinen näyte, radonnäyte, rauta-, mangaani-, sulfaatti-, alumiini-, fluoridi- ja TOC-näyte, näytteet pitkäikäisten radionuklidien aktiivisuusmäärittäisiin, pH-arvo, lämpötila, sähkönjohtavuus ja happipitoisuus.

Annosnopeuden mittaus

Aktiivihiilisuodattimien aiheuttamaa ulkoisen säteilyn annosnopeutta mitattiin Kata-Electronics Oy:n DGM-Turva säteilymittarilla. Aluksi annosnopeus mitattiin suodattimen pinnalla 10 cm välein suodattimen yläosasta alaspäin. Lopuksi mitattiin annosnopeus metrin etäisyydellä siltä korkeudelta, jossa havaittiin suurin annosnopeus. Mittarin lukemia kirjattiin ylös vähintään viisi ja lopullinen, taulukoissa esitetty annosnopeus laskettiin näiden lukemien keskiarvona.

3.2 Radionuklidien määrittämenetelmät

Radon-222

Radonnäytteet (10 ml) otettiin suoraan lasisiin nestetuikepulloihin, jotka olivat etukäteen punnittuja ja esitäytettyjä nestetuikeliuoksella (12 ml Packardin Ultima Gold XR). Veden radonpitoisuus määritettiin Wallacin Guardian 1414 nestetuikelaskurilla, jonka määrittäysraja yhden tunnin mittausajalle on 0,2 Bq/l. Mittaustuloksen epävarmuus riippuu aktiivisuuspitoisuudesta. Radonpitoisuuden ollessa alle 10 Bq/l tuloksen epävarmuus on 10–15 % ja sitä korkeammilla radonpitoisuuksilla epävarmuus on 5 % (Salonen 1993, Salonen ja Hukkanen 1997).

Pitkäikäisten alfa-aktiivisten aineiden kokonaispitoisuus ja radium-226

Kokonaisalfa-aktiivisuusmäärittäystä varten näytteet otettiin 1 litran polyeteenipulloihin. Näytteet kestävästi väkevällä suolahapolla (4,5 ml per 1 litra näytettä). Kestävöidyistä näytteistä otettiin 38 ml:n vettä kahdessa 19 ml erässä, jotka haihdutettiin kylmäkuivaajalla teflonoiduissa nestetuikepulloissa. Haihdutusjäännös liuotettiin pieneen määrään 0,5 M suolahappoa ja lisättiin tuikeliuos. Tämän jälkeen näytettä seisotettiin 30 päivän ajan, jona aikana radium-226:sta syntyvä radon saavuttaa aktiivisuustasapainon emonuklidinsa kanssa. Näyte mitattiin Wallacin Quantulus 1220 nestetuikelaskurilla. Määrittäysraja kolmen tunnin mittausajalla oli 0,02 Bq/l kokonaisalfapitoisuudelle ja 0,01 Bq/l radium-226:n pitoisuudelle (Salonen 1993).

Uraani

Veden uraanipitoisuus määritettiin ICP-massaspektrometrillä Lahden tutkimuslaboratoriossa. Uraanimäärittystä varten näytteet kerättiin 100 ml:n vetoisiin polyeteenipulloihin, jotka kestävöitiin Säteilyturvakeskuksessa väkevällä typpihapolla (1 ml 100 ml:n näytettä). Näytteet lähetettiin Lahteen analysoitavaksi isommissa näyte-erissä, noin kahden kuukauden välein. Uraanin määrittämissä ICP-massaspektrometrillä oli 1 µg/l.

Polonium-210

Poloniumipitoisuus määritettiin samasta vesinäytteestä kuin veden radiumpitoisuus ja kokonaisalfa-aktiivisuuspitoisuus. Ennen poloniumin saostusta vesinäyte konsentroidiin vesihautella. Tämän jälkeen polonium saostettiin hopealevyille spontaanisti 80 °C:een lämpötilassa käyttäen neljän tunnin saostusaikaa. Saalismäärittelyyn käytettiin Po-209 standardia. Polonium isotooppien alfa-aktiivisuus mitattiin Canberran alfaspektrometrillä. Määrittämissä yhden litran näytteelle on 0,2 mBq/l, kun käytetään 4000 minuutin mittausaikaa. Mittaustuloksen epävarmuus on noin 15 prosenttia. (Häsänen 1977)

Lyijy-210

Vesinäyte lyijymäärittystä varten otettiin erikseen yhden litran polyeteenipulloon. Näyte kestävöitiin väkevällä typpihapolla (10 ml/litra näytettä), jonka jälkeen radonkaasu poistettiin vesinäytteestä ilmastamalla. Lyijyn erotus tehtiin Eichromin Sr-hartsilla. Lyijy eluoihtiin hartsista 6M suolahapolla, josta otettiin pieni (500 µl) osanäyte atomiadsorptiospektrofotometrilaitteella tehtävää saalismäärittystä varten. Haihdutusjäynnös liuotettiin 1 ml:an 1M typpihappoa, johon lisättiin Packardin Ultima Gold AB tuikeliuos. Ennen mittausta näytteitä seisotettiin vähintään 10 päivän ajan, jotta lyijy-210 hajoamisessa syntyneitä vismuttia (Bi-210) oli syntynyt riittävästi mittausta varten. Lyijyn aktiivisuus määritettiin Wallacin Guardian 1414 nestetuikelaskurilla. Määrittämissä puolen litran näytteelle on 0,15 – 0,20 Bq/l käyttäen kolmen tunnin mittausaikaa. Mittaustuloksen epävarmuus on 10–15 prosenttia. (Vadja 1997)

Gammasektrometriset mittaukset

Gammasektrometriset mittaukset käytetyille aktiivihiilille ja ioninvaihtohartseille tehtiin HPGe-puolijohdeilmalaskurilla. Näytteet, joista määritettiin uraani, mitattiin sylinterimäisissä PVC-muovista valmistetuissa mittaustuissa, joiden halkaisija on 75 mm ja korkeus 26 mm. Uraanipitoisuus laskettiin uraani-235:n 186 keV:n gammapiikistä olettaen $^{235}\text{U} / ^{238}\text{U}$ aktiivisuussuhde vakioksi (0,0466), kun tutkittavassa näytteessä ei ollut radium-226:a. Radium-226:a sisältävät näytteet mitattiin ilmatilviissä

mittausastioissa kolmen viikon kuluttua astian sulkemisesta. Radium-226:n aktiivisuus määritettiin vismutti-214:n 609 keV:n gammapiikistä. Lyijy 210:n aktiivisuus määritettiin 46 keV:n gammapiikistä.

3.3 Radioaktiivisten aineiden poistumat

Tässä raportissa radionuklidien poistumalla käsitetään sitä prosentuaalista osuutta tietyn radionuklidin aktiivisuudesta, joka poistuu vedestä poistolaitteen ansiosta. Poistuma laskettiin seuraavasta yhtälöstä:

$$E = \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right) \cdot 100\%, \text{ missä} \quad (3.3)$$

E on radionuklidin poistuma (%),

C_t radionuklidin pitoisuus käsitellyssä vedessä (Bq/l)

C_0 radionuklidin pitoisuus raakavedessä (Bq/l).

3.4 Radonin adsorption nopeus aktiivihieleen

Radonin adsorption nopeutta aktiivihieleen voidaan arvioida mallilla, jossa aktiivihieiliadsorption oletetaan noudattavan ensimmäisen asteen kinetiikkaa (Lowry ja Lowry 1987). Seuraavia yhtälöitä hyödynnettiin arvioitaessa adsorption nopeutta erikokoisissa suodattimissa ja eri veden kulutus-tilanteissa:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-K_{ss}t} \text{ ja} \quad (3.4)$$

$$t = \frac{V_b}{Q}, \text{ missä} \quad (3.5)$$

K_{ss} on ensimmäisen asteen kineettinen vakio (adsorption nopeus) (h^{-1}),

V_b on hiilipedin tilavuus ja

Q keskimääräinen virtaama (l/h).

3.5 Aktiivihiiilen vaihto ja käytetyn hiilen radioaktiivisuus

Tutkimuskohteessa D vaihdettiin 3,3 vuotta käytössä ollut aktiivihiihimassa uuteen. Hiilen vaihtoivat kaksi STUKin työntekijää. Heidän saamansa säteilyannokset mitattiin TL-dosimetreillä¹. Käytettyä hiiltä ei vanhennettu, koska haluttiin arvioida, kuinka suuren annoksen hiilen vaihdon aikana voi enintään saada. Radon ja sen lyhytikäiset hajoamistuotteet eivät olleet ehtineet hävitä hiilestä radioaktiivisen hajoamisen kautta. Uusi hiilierä (39 l) pestiin ennen vaihtoa 80 litran saavissa useaan kertaan kylmällä vedellä hiilipölyn poistamiseksi. Lattia suojattiin muovikalvolla ja vanha hiili tyhjennettiin suodatinkotelosta 80 litran vetoiseen saaviin koteloa ravistelemalla. Kotelo huuhdeltiin puhtaaksi, nousuputki asetettiin paikalleen ja lopuksi pesty uusi hiilierä pakattiin suodatinkoteloon muovikauhaa ja suppiloa käyttäen.

Käytetyn hiilen annettiin kuivua laboratoriossa huoneen lämmössä kuukauden ajan. Kuivunut hiili homogenisoitiin ja siitä otettiin kolme 24 gramman painoista osanäytettä, joille tehtiin gammaspektrometrinen määrittely n-tyypin puhdasgermanium-puoliyohteella². Ennen mittaamista osanäytteet pidettiin kaasutiiviissä astiassa kolmen viikon ajan, jolloin niiden radium-226:n aktiivisuus pystyttiin määrittämään vismutti-214:n 609 keV:n gammapiikin avulla.

Aktiivihiiileen pidähtynyt radon hajoaa lyhytikäisten tyttäreinsä kautta lyijy-210:ksi. Mikäli tämä lyijy-210 pidähtyy aktiivihiiileen pysyvästi, voidaan hiilen käyttöaikana pidähtynyt aktiivisuus laskea seuraavasta yhtälöstä.

$$A_{Pb} = \frac{Q \cdot (C_{0,Rn} - C_{t,Rn})}{\lambda_{Rn}} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pb}t}), \text{ missä} \quad (3.6)$$

- A_{Pb} on hiileen sitoutuneen lyijyn aktiivisuus (Bq), kun hiili poistettiin käytöstä,
 Q keskimääräinen vedenkulutus vuorokaudessa (l/d),
 $C_{0,Rn}$ raakaveden keskimääräinen radonpitoisuus (Bq/l),
 $C_{t,Rn}$ suodatetun veden keskimääräinen radonpitoisuus (Bq/l),
 λ_{Rn} radonin hajoamisvakio (0.181 d⁻¹),
 λ_{Pb} lyijy-210:n hajoamisvakio (8.52·10⁻⁵ d⁻¹) ja
 t aktiivihiiilen käyttöaika ennen sen vaihtamista uuteen hiileen (d).

¹ Termoluminesenssi-dosimetri (STUK).

² Analyysimenetelmän periaatteet on kuvattu standardissa IEC 1452: 1995.

Aktiivihiili sitoo itseensä myös vedessä esiintyvää lyijy-210:ä. Tämä havaittiin määrittämällä lyijy-210 sekä raakavedestä että käsitellystä vedestä. Tämä lyijy-210:n aktiivisuus saadaan arvioitua yhtälöllä:

$$A_{Pb2} = (C_{0,Pb} - C_{t,Pb}) \cdot Q \cdot t \cdot e^{-\lambda_{Pb} 0,5t}, \text{ missä} \quad (3.7)$$

A_{Pb2} on hiileen sitoutuneen lyijyn aktiivisuus suoraan raakavedestä,
 $C_{0,Pb}$ keskimääräinen lyijypitoisuus raakavedessä (Bq/l) ja
 $C_{t,Pb}$ suodatetun veden keskimääräinen lyijypitoisuus (Bq/l).

3.6 Paineen, pH-arvon ja suolapitoisuuden muutosten vaikutus anioninvaihtimen toimintaan

Neljä vuotta kotitalouskäytössä olleen ioninvaihtimen toimivuutta (ioninvaihtimet kohde D) tutkittiin laboratoriossa tehdyin lisäkokein. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin ioninvaihtohartsin sitoutunut uraani pysyy hartsissa, kun olosuhteet vesilinjassa muuttuvat. Laskennallisten arvioiden mukaan vahvalla orgaanisella anioninvaihtohartsilla täytetty ioninvaihdin pystyy poistamaan uraania vedestä useita vuosia. Kun vaihtimia käytetään pitkään, voi niihin kerääntyä useita kymmeniä grammoja uraania, toisinaan jopa satoja grammoja. Käytön aikana anioninvaihtohartsin kapasiteetti kuluu, kun uraania ja muita vedessä olevia aineita pidättyy siihen. Hartsin voi myös aikaa myöten väsyä mekaanisesti, jolloin sen toimintakyky voi heikentyä. Tällöin riskinä on, että radioaktiivisia aineita alkaa vapautua ioninvaihtimesta takaisin juomaveteen.

Koe toteutettiin muuttamalla veden painetta, pH-arvoa ja veden suolapitoisuutta. Kaikki kokeet tehtiin erikseen, jotta voitiin arvioida kunkin parametrin vaikutusta anioninvaihtimen toimintaan. Tätä varten anioninvaihdin liitettiin laitteistoon, jossa oli vesipumppu, jolla säädettiin veden virtausta vaihtimen läpi. Jokaisessa kokeessa vettä suodatettiin hartsin läpi noin 50 litraa, mikä vastaa yhden päivän aikana keittiössä kulutettua vesimäärää. Helsingin kaupungin verkostovesi valittiin testivedeksi, koska sen uraanipitoisuuden tiedettiin olevan erittäin pieni (0,16 µg/l), mutta siinä on kuitenkin muita talousvedessä normaalisti esiintyviä ioneja.

Paineen muutoksen vaikutus

Suodatuskokeet aloitettiin painekokeilla. Ensin vaihtimen läpi laskettiin Helsingin kaupungin verkostovettä käyttäen tasaista painetta (n. 3 bar). Tasaisen paineen jälkeen veden painetta muutettiin sykäyksittäin (2 → 5 bar) yhden suodatuksen aikana 5–8 kertaa. Suodatuskokeet toistettiin kaksi kertaa vaihdellen veden painetta.

pH-arvon muutoksen vaikutus

Toisessa vaiheessa selvitettiin pH-arvon vaikutusta uraanin pysymiseen hartsissa. Suodatuskokeet suoritettiin kahdessa eri pH-arvossa (pH 5 ja pH 10). Veden pH-arvoa säädettiin happamaksi typpihapolla. Emäksiseksi vesi säädettiin 6-molaarisella ammoniumhydroksidiliuoksella.

Veden kloridipitoisuuden vaikutus

Viimeisenä kokeena selvitettiin veden kloridipitoisuuden vaikutusta uraanin irtoamiseen hartsista. Veden kloridipitoisuutta muutettiin lisäämällä merisuolaa Helsingin kaupungin vesijohtoveteen siten, että veden kloridipitoisuus ensimmäisessä suodatuskokeessa oli 620 mg/l ja toisessa 1310 mg/l. Suolakokeet tehtiin viimeisenä, koska tiedettiin, että uraani irtoaa hartsista kylläisellä merisuolaliuoksella. Varmuutta siitä, kuinka korkea suolapitoisuus tarvitaan uraanin irrottamiseen hartsista, ei vielä ollut.

Gammasektrometriset mittaukset

Suodatuskokeiden jälkeen hartsiin kiinnittyneen uraanin aktiivisuus-pitoisuus mitattiin gammasektrometrisesti. Suodatinkotelossa ollut hartsi jaettiin neljään osaan mittauksia varten siten, että jokaisen osan korkeus oli noin 10 cm. Hartseja kuivattiin lämpökaapissa 55 °C:ssa vuorokauden ajan. Kuivatut hartsit homogenisoitiin, punnittiin, jonka jälkeen jokaisesta osasta otettiin kaksi rinnakkaisnäytettä (yhteensä 8 kappaletta) gammasektrometriseen mittaukseen.

3.7 Lyijyn ja poloniumin sitoutuminen erikokoisiin pohjaveden partikkeleihin

Lyijyn ja poloniumin sitoutumista pohjaveden partikkeleihin tutkittiin viides-ä kotitaloudessa erityyppisillä vesillä (Taulukko 2). Tutkimuskohteet valittiin siten, että niissä oli mukana humus-, rauta-, mangaani- ja suolapitoinen

Taulukko 2. Vedenkäsittelylaitteet ja tärkeimpien veden laatuparametrien arvot tutkimuskohteissa.

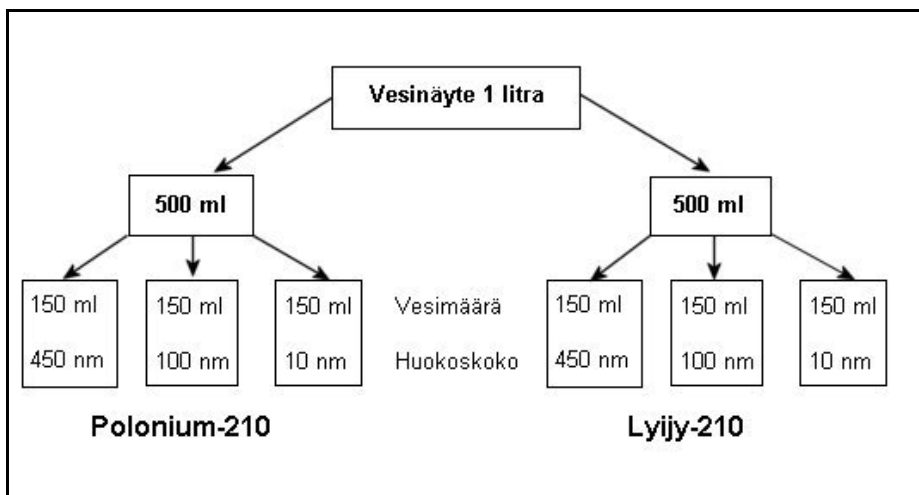
Tutkimus- kohde	Vedenkäsittelylaite	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)	KMnO ₄ (mg/l)	pH	Sähkönjohtavuus (mS/m)
A	Anioninvaihdin	0,04	0,023	32,5	7,7	28,3
B	Anioni- ja kationinvaihdin	0,096	0,007	4,7	7,4	25,7
C	Aktiivihiihliuodatin	0,4	0,50	2,4 (TOC)	7,2	79,3
D	Aktiivihiihliuodatin	0,45	0,72	4 (TOC)	7,0	198
E	Yhdistetty raudan ja radoninpoistolaite	1,2	0,18	2 (TOC)	7,0	50,2

sekä hyvälaatuinen vesi. Näihin kohteisiin oli asennettu joko aktiivihilisuodatin tai ioninvaihdin radioaktiivisten aineiden poistumiseksi.

3.7.1 Koejärjestely

Tutkimuskohteissa otettiin yhden litran vesinäytteet polyeteenipulloihin sekä raakavedestä että käsitellystä vedestä. Näistä molemmista suodatettiin kolme 150 ml näytettä lyijymääritystä varten ja kolme 150 ml näytettä poloniummääritystä varten (Kuva 5). Membraanit, joiden huokoskoot olivat 450 nm ja 100 nm, olivat Science Suporin valmistamia. Huokoskoon 10 nm suodatuksessa käytettiin Gelmannin Omega-painesuodatusta. Kohteesta C otettiin vettä enemmän, koska siitä tehtiin lisäksi suodatus noin 0,5 nm (5kD) huokoskoolla. Kaikki radioaktiivisuusmääritykset tehtiin suodatuskalvojen läpi tulleesta vedestä.

Koska näytteitä ei kestäväily laboratorioissa ennen suodatusta, haluttiin varmistua, ettei astioiden seinämiin tai suodatuskalvoihin ollut adsorboitunut lyijyä tai poloniumia. Tätä varten muoviset näytteenottopullot ja suodatusastiat huuhdeltiin hapolla. Poloniummäärityksen huuhtelussa käytettiin 3-molaarista suolahappoa ja lyijymäärityksissä 7-molaarista typpi-happoa. Happoliuokset analysoitiin erikseen.



Kuva 5. Vesinäytteiden suodatus lyijyn ja poloniumin partikkelijakauman selvittämiseksi.

3.8 Kyselytutkimus

Liitteessä 2 on esitetty kyselykaavake, joka annettiin vedenkäsittelyalan yrityksille lähetettäväksi asiakkailleen syksyllä 2000. Kyselykaavakkeita jaettiin noin 150 kappaletta. Vastauksia saatiin vain neljä, joten STUKin vesitietokannasta tehtiin listaus niistä kotitalouksista, joissa vedenkäsittelylaitteita tiedettiin käytettävän. Näitä kyselykirjeitä lähetettiin 192 kappaletta.

4 Tutkimusohjelma

4.1 Ilmastimet

Neljän kaupallisen ilmastinlaitteen radoninpoistotehokkuus määritettiin viidessä eri testikohteessa (kohteet A–E, Taulukko 3). Myös aiemmissa STUKin tutkimuksissa saadut testaustulokset ilmastinlaitteille, jotka ovat Suomen markkinoilla, on esitetty tässä raportissa (Kohteet F–H) (Annamäki ja Turtiainen 2000). Tässä tutkimuksessa testatut laitteet on esitetty Kuvassa 6.

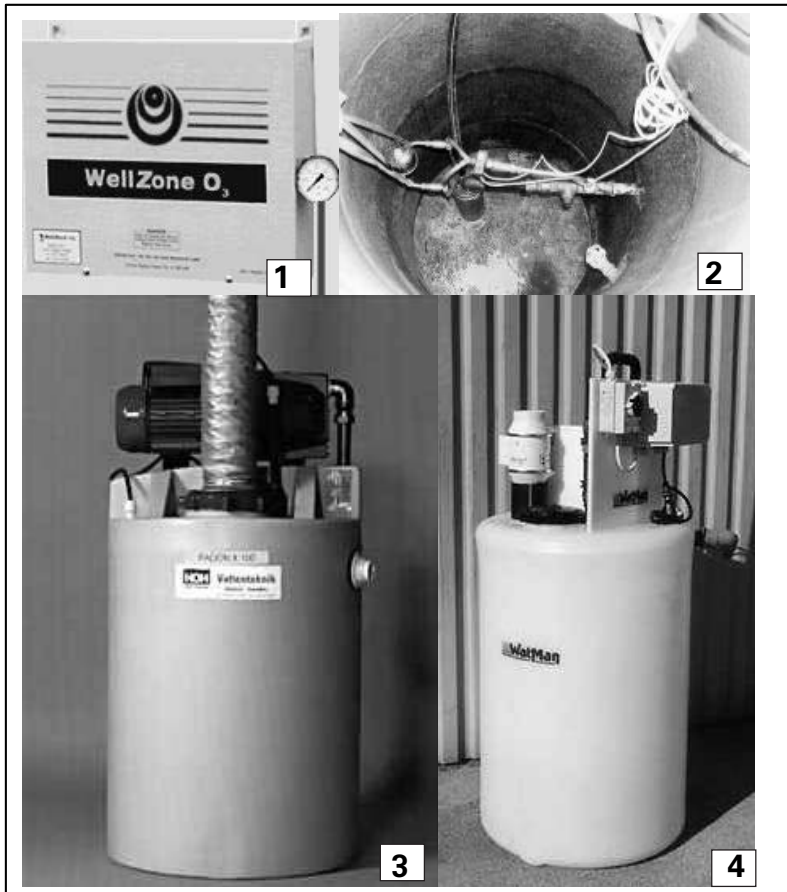
Taulukko 3. Tutkitut ilmastinlaitteet ja raakaveden korkeimmat radonpitoisuudet eri tutkimuskohteissa.

Kohde	Yritys	Ilmastin	Ilmastusäiliö [litraa]	Rn-222 [Bq/l]
A	WellRock	WellZone	—	2 600
B	HOH Separtec	Radon-X100	120	4 600
C	HOH Separtec	Radon-X100	120	6 000
D	WatMan	RnAl-500	500	1 900
E	Sednove	Vesivahti	—	11 600
F	WatMan	RF-150/KR6	150	19 700
G	Callidus	Radonett B2	80	35 200
H	OverCraft	Radox	300	17 000

4.2 Aktiivihiilisuodattimet

Aktiivihiilisuodattimien toimintaa tutkittiin kymmenessä tutkimuskohteessa, joissa suodattimet olivat yksityisten kotitalouksien vakituudessa käytössä. Suodattimet olivat tutkimuksen päättyessä olleet käytössä 2,7–4,2 vuotta. Tutkimuskohteet oli valittu siten, että raakaveden radonpitoisuus ylitti 1000 Bq/l, mutta vesissä oli vaihtelevia määriä rautaa, mangaania ja humusta (Taulukko 4).

Aktiivihiilisuodattimien toimittajia oli kaksi, Oy WatMan Ab (kohde B) ja HOH Separtec Oy (kohteet A ja C–J). Aktiivihiilen määrä suodattimissa oli 39–63 litraa (Taulukko 5). Joissain tapauksissa aktiivihiilisuodattimen yhteyteen oli asennettu myös muita vedenkäsittelylaitteita. Ioninvaihdin oli asennettu kolmeen talouteen ennen aktiivihiilisuodatusta (kohteet C, F ja J). Kahdessa kohteessa oli partikkelisuodatin ennen aktiivihiilisuodatinta (kohteet B ja C). Yhdessä aktiivihiilisuodattimessa oli takaisinhuuhteluautomaattikka (kohde B). Kaikissa tutkimuskohteissa oli käytössä vesimittari.



Kuva 6 Hankkeessa testatut laitteet: 1. WellZone O₃ otsonigeneraattori, 2. Sednove Vesivahti, 3. Radon-X100, 4. RnAl-300 (RnAl-500:n sisarmalli).

Taulukko 4. Tutkimuskohteissa mitattujen veden laatuparametrien korkeimmat arvot.

Kohde	Rn-222 [Bq/l]	Fe [mg/l]	Mn [mg/l]	TOC [mg/l]
A	3 060	0,021	0,018	0,7
B	4 200	0,67	0,13	1,5
C	3 080	0,025	0,067	2,9
D	4 080	0,40	0,55	3,4
E	1 550	0,70	0,26	—
F	2 240	0,16	0,004	2,5
G	7 350	0,033	0,032	1,8
H	4 580	0,12	0,053	0,7
I	2 290	0,12	0,007	1,2
J	1 600	0,007	0,083	—

Taulukko 5. Aktiivihillisuodattimien asennustietoja tutkimuskohteissa.

Kohde	Asennus- paikka	Hiilipeti [L]	Takaisin- huuhtelu	Esisuodatin	Anionin- vaihdin
A	Komero	39	—	—	—
B	tekn. tila	40	on	on	—
C	Kellari	39	—	on	21 L
D	Komero	39	—	—	—
E	tekn. tila	63	—	—	—
F	Kellari	39	—	—	21 L
G	Vaja	63	—	—	9 L
H	Autotalli	63	—	—	—
I	tekn. tila	63	—	—	—
J	tekn. tila	39	—	—	21 L

4.3 Ioninvaihtimet

Kolmen eri yrityksen (HOH Separtec Oy, Oy WatMan Ab ja Oy Callidus Ab) ioninvaihtimia tutkittiin yhteensä 21:ssä eri kotitaloudessa (Taulukko 6). Hartsien tilavuudet tutkituissa laitteissa olivat 0,7–36 litraa. Suurin osa ioninvaihtimista oli asennettu kotitalouksiin, jossa asuttiin vakituisesti. Kohdeissa B ja C ioninvaihtimet oli asennettu vapaa-ajan asunnoille. Kaikkissa ioninvaihtimissa oli vahvaa orgaanista anioninvaihtohartsia uraanin poistoon, mutta osassa laitteista oli lisäksi kationinvaihtohartsia radiumin poistoon tai muuta massaa vedessä olevien muiden haitta-aineiden poistamiseksi tai suodatetun veden laadun parantamiseksi.

Hartsit oli pakattu lasikuituvahvisteisiin, painetettuihin suodatinkoteloihin, jotka toimivat normaalissa putkiston paineessa (2–5 bar). Suodattimilla, joissa oli elvytysautomaattikka, vedentuotto oli 20–36 litraa minuutissa. Ilman elvytysautomaattikka olevilla suodattimilla, joilla käsitellään juomavesi tai koko talouden vesi, vedentuotto vaihtelee 5–12 litraa minuutissa. Heikoin vedentuotto on hanasuodattimilla, joilla se vaihtelee välillä 5–10 litraa minuutissa.

Radiumin poistossa on tärkeää ottaa huomioon hartsiin pidättynyt radium, joka toimii radonin lähteenä. Tämän vuoksi radiuminpoistoon tarkoitettu suodatin tulisi varustaa aina elvytysautomaattikalla, jolloin hartsiin pidättynyt radium poistetaan säännöllisin väliajoin. Näin radium ei pääse tuottamaan liikaa radonia käsiteltyyn veteen. Toinen vaihtoehto on asentaa radiumin poistolaite ennen radoninpoistolaitetta, jolloin radoninpoistolaite poistaa myös radiumista syntyneen radonin. Esimerkkinä käsitellyn veden radonpitoisuuden nousuta on tapaus, jossa vedenkulutus on 500 l/d ja Ra-226-

Taulukko 6. Tietoja tutkimuskohteisiin asennetuista ioninvaihtimista.

Tutkimuskohde	Vaihtimen toimit- tanut yritys	Vaihtimen asen- nusaika (kk - vuosi)	Vaihtimen tyyppi	Radonin poisto- menetelmä	Hartsin määrä suodattimessa (l)	Hartsityyppi A = anioni K = kationi M = muu massa	Elvytys- automaattikka	Käsiteltävä vesi
A	Separtec Oy	-	Hana(CT-10)	-	0,7	A	Ei	Keittiön vesi
B	Separtec Oy	-	Hana(CT-10)	-	0,7	A	Ei	Keittiön vesi
C	Separtec Oy	-	Hana(CT-10)	-	0,7	A	Ei	Keittiön vesi
D	Separtec Oy	1 – 2000	MPHU-007	IL	7	A	Ei	Keittiön vesi
E	Separtec Oy	10 – 1997	MPHU-011	IL	11	A	Ei	Keittiö, WC
F	Separtec Oy	11 – 1997	MPHU-021	GAC	21	A	Ei	Kaikki vesi
G	Separtec Oy	10 – 1998	MPHU-021	GAC	21	A	Ei	Kaikki vesi
H	Separtec Oy	10 – 1998	MPHU-021	GAC	21	A	Ei	Kaikki vesi
I	Separtec Oy	6 – 1998	MPHU-021	GAC	21	A	Ei	Kaikki vesi
J	Separtec Oy	11 – 1999	MPHU-021	GAC	21	A	Ei	Kaikki vesi
K	Separtec Oy	11 – 1998	AHLU-250	GAC	36	A + K	Kyllä	Kaikki vesi
L	Separtec Oy	6 – 1997	AHLU-250	IL	36	A + K	Kyllä	Kaikki vesi
M	Separtec Oy	6 – 1998	AHLU-250	IL	36	A + K	Kyllä	Kaikki vesi
N	Separtec Oy	1994	AHLU-250	-	36	A + K	Kyllä	Kaikki vesi
O	WatMan Oy		IX HK 10 F Kab	GAC	>30	A + M	Kyllä	Kaikki vesi
P	WatMan Oy	8 – 2000	IX HK 8	GAC	>30	A + M	Kyllä	Kaikki vesi
Q	WatMan Oy	5 – 2000	IX HK 10	GAC	>30	A + M	Kyllä	Kaikki vesi
R	WatMan Oy	5 – 2000	IX HK 8	GAC	>30	A + M	Kyllä	Kaikki vesi
S	WatMan Oy		IX HK 10x54	IL	>30	A + M	Kyllä	Kaikki vesi
T	Callidus Oy	8 – 1994	DD-30-HDH	-	36	A + K	Kyllä	Kaikki vesi
U	Callidus Oy	10 – 2000	DD-15-H	IL	11	A	Kyllä	Kaikki vesi

IL = ilmastin, GAC = aktiivihillsuodatin (Granular Activated Carbon)

pitoisuus 1,5 Bq/l. Jos laitetta käytetään kolme vuotta, jonka aikana Ra-226 kerääntyy suodattimeen, nousee käsitellyn veden radonpitoisuus yli 300 Bq/l.

Taulukossa 7 on esitetty radionuklidien ja veden tärkeimpien laatuparametrien keskimääräiset pitoisuudet raakavedessä. Uraanipitoisuus eri tutkimuskohteiden käsittelemättömässä vedessä vaihteli välillä 12–2200 µg/l. Tutkimuskohteista korkein rautapitoisuus (1100 µg/l) oli kohteessa I ja korkein humuspitoisuus (KMnO₄-luku 26,1 mg/l) kohteessa N. Suolaisin vesi oli kohteessa S, missä veden sähkönjohtavuus oli 320 mS/m.

Taulukko 7. Tietoja raakaveden laadusta ja keskimääräiset pitoisuudet ioninvaihtosuodattimien tutkimuskohteissa.

Tutkimus- kohde	²³⁸ U (µg/l)	²²⁶ Ra (Bq/l)	²¹⁰ Pb (Bq/l)	²¹⁰ Po (Bq/l)	Fe (µg/l)	Mn (µg/l)	KMnO ₄ (mg/l)	pH	Sähkönjohtavuus (mS/m)
A	510	0,50	0,36	0,49	-	-	-	-	-
B	250	0,03	-	0,03	-	-	-	-	-
C	95	0,17	0,20	0,15	40	10	3,2	7,5	27,7
D	450	0,15	0,08	0,09	9	5	1,7	8,1	25
E	190	0,30	1,2	1,1	17	13	12	8,0	22,1
F	200	0,03	0,20	0,24	50	2	3,5	7,1	27,1
G	95	0,17	0,13	0,15	20	4	4,5	8,3	35,6
H	76	0,04	0,16	0,02	4	28	<1	7,9	19,3
I	2200	0,18	0,71	1,6	1100	20	2,4	8,5	33,7
J	380	0,39	0,27	0,23	130	22	5,4	7,4	54,1
K	25	0,06	1,1	0,48	13	1	1,0	8,7	24,5
L	1070	2,70	0,62	0,12	10	10	2,2	7,2	28,6
M	660	0,35	4,7	5,9	63	4	4,5	7,9	28,7
N	12	0,40	0,07	0,30	240	185	26,1	8,1	270
O	110	0,11	0,04	0,04	-	-	-	-	-
P	130	0,48	0,31	0,16	16	29	2,7	8,3	69
Q	1020	0,13	0,26	0,16	33	5	8,5	8,3	41
R	1200	0,24	0,49	0,03	8	3	4,3	7,2	46
S	220	21	0,70	3,6	1830	915	13,2	7,1	320
T	120	0,39	0,23	1,7	2200	1200	25,2	6,6	50
U	110	2,2	1,7	0,87	24	0,06	<1	8,2	22

4.4 Radonin, raudan ja mangaanin samanaikainen poisto

Akva Filter Oy:n ja Oy WatMan Ab:n markkinoimien raudan- ja mangaaninpoistolaitteen kykyä poistaa myös radonia tutkittiin kahdessa kotitaloudessa (Taulukko 8). Akva Filter Oy:n laite oli asennettu kotitalouteen ennen Tekes hankkeen alkamista. Molempiin laitteisiin oli lisätty aktiivihiiltä radonin poistamiseksi.

Taulukko 8. Raudan- ja mangaaninpoistolaitteiden asennustiedot sekä tutkimuskohteiden raakaveden keskimääräiset radon-, rauta- ja mangaanipitoisuudet.

Tutkimus- kohde	Laitteen toimittanut yritys	Suodattimen asennusaika (kk – vuosi)	Elvytys- automaatiikka	Käsiteltävä vesi	²²² Rn (Bq/l)	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)
A	Akva Filter Oy	12 – 1999	Kyllä	Koko talous	1800	2,6	0,3
B	WatMan Oy	5 – 2000	Kyllä	Koko talous	2600	1,1	0,16

Oy WatMan Ab:n laite on painettestattu lasikuituvahvisteinen suodatin. Se asennetaan putkilinjaan painesäiliön jälkeen ja se toimii normaalissa putkistopaineessa (2–5 bar). Akva Filter Oy:n kotelo on valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Tämä suodatin toimii samalla paineentasajana ja vedenvaraajana. Laite kestää normaalin vesijohtoverkoston paineen (4–10 bar) eikä aiheuta merkittävää paineen alentumista vesipisteissä (max. 0,2 bar). Laitteet on esitetty Kuvassa 7.



Kuva 7. Tässä Tekes hankkeessa testatut radonin, raudan ja mangaanin samanaikaiseen poistoon soveltuvat laitteet: 1 Akva FilterOy:n laite, 2 Oy WatMan Ab:n laite.

4.5 Fluoridin, uraanin, radiumin, lyijyn ja poloniumin samanaikainen poisto

Kahden eri yrityksen (Oy Callidus Ab ja Alvitec Oy) fluoridin poistolaitteen kykyä poistaa vedestä myös uraania, radiumia, lyijyä ja poloniumia tutkittiin kahdessa kotitaloudessa (Taulukko 9).

Callidus Oy:n laite on ioninvaihdin, jonka sisällä on fluoridin poistoon tarkoitettu kertakäyttöinen hartsi, jota ei elvytetä käytön aikana. Siinä on hartsin lisäksi aktiivihiilisuodatin jälkisuodattimena. Alvitec Oy:n suodattimessa fluoridin poistoon käytetään aktivoitua alumiinioksidia. Laitteistoon kuuluu myös hopeoitu aktiivihiilisuodatin, jolla pyritään varmistamaan käsitellyn veden mikrobiologinen laatu. Molemmat laitteistot on tarkoitettu vain juomaveden ja ruuan valmistukseen käytettävän veden käsittelemiseen. Laitteiden keskimääräinen vedentuotto on noin 2 litraa minuutissa. Laitteet asennettiin tiskipöydän alle (Kuva 8).

Taulukko 9. Fluoridin poistolaitteiden asennustiedot sekä tutkimuskohteiden raaka-veden keskimääräiset fluoridi-, rauta- ja permanganaattipitoisuudet.

Tutkimus- kohde	Laitteen toimittanut yritys	Suodatin panoksen vaihto (kk - vuosi)	Elvytys- automaatiikka	Käsiteltävä vesi	F (mg/)	Fe (mg/)	KMnO ₄ (mg/)
C	Callidus Oy	9 – 2000	Ei	juomavesi	2,1	0,02	3,0
D	Alvitec Oy	10 – 2000	Ei	juomavesi	2,0	0,11	3,1



Kuva 8. Tässä Tekes hankkeessa testatut fluoridin poistolaitteet: 1 Alvitec Oy:n laite, 2 Callidus Oy:n laite

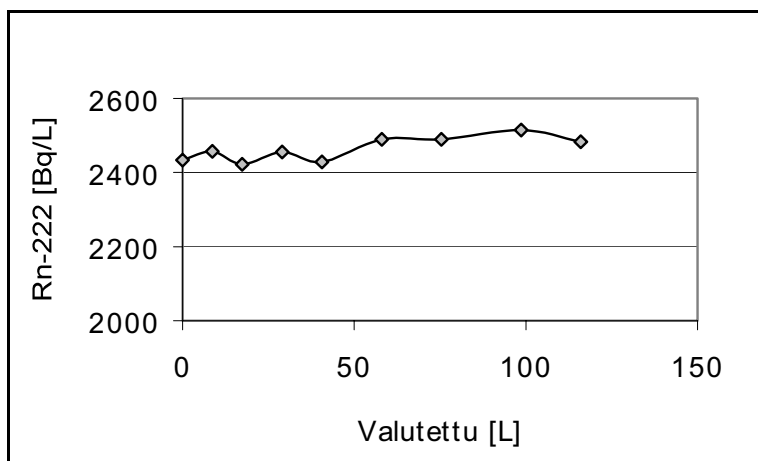
5 Tulokset

5.1 Ilmastimet

5.1.1 Testikohde A, WellZone - ilmastin

WellZone O₃ on WellRock Oy:n markkinoima vedenpuhdistusjärjestelmä, jota voidaan käyttää myös porakaivoissa. Porakaivojärjestelmän toiminta radoninpoistossa perustuu veden ilmastamiseen porareissä.

Laitteen testauspäivä oli 31.5.2001. Aamulla ennen näytteiden keräämistä kiinteistössä oli käytetty vettä noin 50 litraa. Testauksen aikainen veden valutusnopeus oli keskimäärin 5,8 litraa minuutissa. Testikohteessa ei ollut mahdollisuutta ottaa raakavettä, joten radonin poistumat on laskettu 5.11.1997 otetun raakavesinäytteen perusteella. Tämän näytteen radonpitoisuus oli 2600 Bq/l.



Kuva 9. Ilmastetun veden radonpitoisuus valutetun veden tilavuuden funktiona testi-kohteessa A (WellZone).

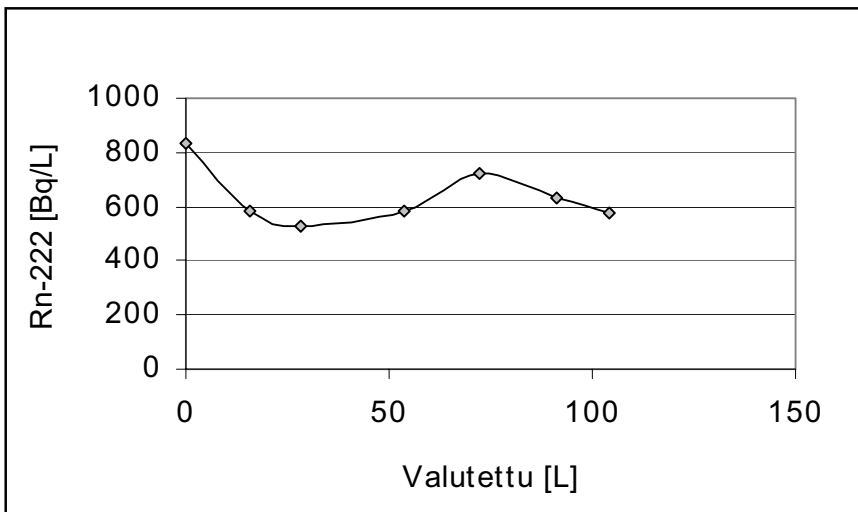
Keskimääräinen poistotehokkuus 50 litran vedenkulutuksen aikana oli 6 % ja 100 litran vedenkulutuksen aikana 5 %). Laitteen oli asentanut jälleenmyyjäyritys, joka oli sitä myös yrittänyt säätää kyseiseen kaivoon sopivaksi. Mittaustuloksen tulkinnassa on otettava huomioon, että siihen on todennäköisesti vaikuttanut kaivon vedentuotto-olosuhteet tai mahdolliset puutteet laitteen asennuksessa. Tällaisen järjestelmän radonin poistotehokkuuteen voi vaikuttaa esim. kaivon vedentuotto, vedenpinnan syvyys kaivossa tai vedenpinnan vaihtelut. Järjestelmän poistotehokkuudesta puut-

tuu julkaistua tutkimustietoa. Näistä syistä lopullisen arvion tekeminen laitteen käyttökelpoisuudesta radonin poistoon vaatii lisätutkimuksia.

5.1.2 Testikohde B, Radon-X100 -ilmastin

Radon-X100 on HOH Separtec Oy:n markkinoima ilmastin, joka on kotitalouskäyttöön tarkoitettu radoninpoistolaite. Laitteen toiminta perustuu eräilmastukseen.

Laitteen testauspäivä oli 19.10.2001. Aamulla ennen testausta vettä oli käytetty arviolta 100 litraa. Testauksen aikainen veden valutusnopeus oli keskimäärin 6,3 litraa minuutissa. Raakaveden radonpitoisuus oli 4 600 Bq/l. Laitteen ilmastusaika-asetuksina käytettiin arvoa 9 ja 50 %, mikä vastaa 9 minuutin ilmastusaikaa (Kuva 10).

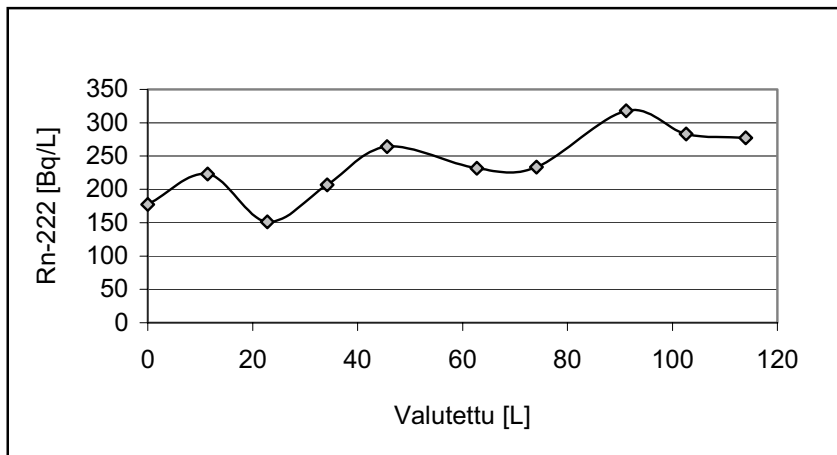


Kuva 10. Ilmastetun veden radonpitoisuus valutetun veden tilavuuden funktiona ensimmäisen testauksen aikana testikohteessa B (Radon-X100). Ilmastusaika oli 9 minuuttia.

Keskimääräinen poistotehokkuus 50 litran vedenkulutuksen aikana oli 87 % ja 100 litran vedenkulutuksen aikana 86 %. Heikoin hetkellinen poistotehokkuus oli 82 %, kun ilmastusaika-asetukset olivat 9 ja 50 %. Kuvasta 11 nähdään, että ilmastetun veden radonpitoisuus ei ole vakio. Tämä osoittaa sen, että ilmastuksen aikana laitteesta on mahdollista ottaa vettä, jota ei ole käsitelty täyttä, ennalta säädettyä ilmastusaikaa. Lyhyemmän aikaa ilmastettu vesi, jota laite päästää lävitseen, nostaa käyttöveden radonpitoisuutta. Laite ei siis toimi eräilmastuksena vaan osittain myös

jatkuvatoimisena.

Ilmastusaikaa pidennettiin käyttäen ilmastusaika-asetuksia 9 ja 80 %. Tällöin ilmastuksen kesto oli 14,4 minuuttia. Uusilla asetuksilla poistumat paranivat selvästi (Kuva 11). Keskimääräinen poistotehokkuus 50 litran vedenkulutuksen aikana oli 96 % ja 100 litran vedenkulutuksen aikana 95 %.



Kuva 11. Ilmastetun veden radonpitoisuus valutetun veden funktiona toisen testauksen aikana testikohteessa B (Radon-X100). Ilmastusaika oli 14,4 minuuttia.

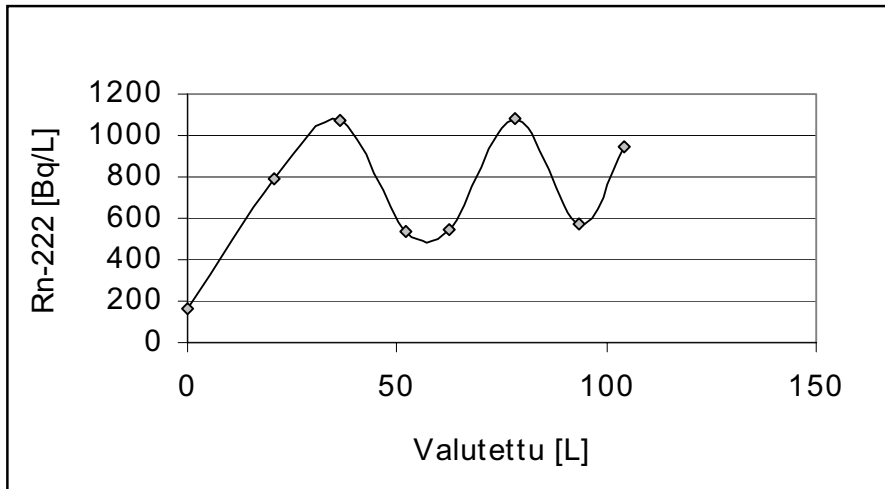
Heikoin hetkellinen poistotehokkuus oli 93 %.

5.1.3 Testikohde C, Radon-X100 - ilmastin

Radon-X100 on HOH Separtec Oy:n markkinoima ilmastin, joka on kotitalouskäyttöön tarkoitettu radoninpoistolaite. Laitteen toiminta perustuu eräilmastukseen.

Laitteen testauspäivä oli 19.10.2001. Aamulla ennen testausta oli vettä käytetty arviolta 50 litraa. Testauksen aikainen veden valutusnopeus oli keskimäärin 5,2 litraa minuutissa. Raakaveden radonpitoisuus oli 6 000 Bq/l. Ilmastimen ilmastusaika-asetuksina käytettiin arvoa 9 ja 50 %, mikä vastaa 9 minuutin ilmastusaikaa (Kuva 12).

Keskimääräinen poistotehokkuus 50 litran vedenkulutuksen aikana oli 88 % ja 100 litran vedenkulutuksen aikana 90 %. Heikoin hetkellinen poistotehokkuus oli 82 %. Kuvasta 12 nähdään, että ilmastetun veden radonpitoisuus ei ole vakio myöskään tässä kohteessa. Veden radonpitoisuus on hetkellisesti yli 1 000 Bq/l, mikä ei ole suositeltavaa. Ilmastusaikaa suositeltiin pidennettäväksi 15 minuuttiin, kuten testikohteessa B.



Kuva 12. Ilmastetun veden radonpitoisuus valutetun veden tilavuuden funktiona testi-kohteessa C (Radon-X100). Ilmastusaika oli 9 minuuttia.

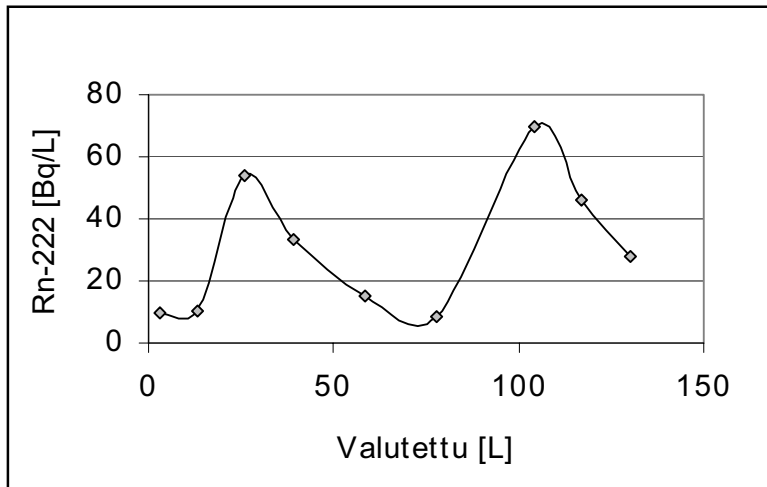
Radon-X100 on testattu Ruotsin elintarvikeviraston (Livsmedelverket) ja säteilysuojelulaitoksen (SSI) toimeksiannosta Ruotsissa. Heidän testiensä mukaan se kuului kolmen parhaan tutkitun laitteen joukkoon. Kolmessa tutkitussa kohteessa poistumat olivat 98, 97 ja 88 %, joista viimeisessä laite oli asennettu väärin. Tästä syystä radonin poistuma ei ollut yhtä hyvä kuin oikein asennetuilla laitteilla.

5.1.4 Testikohde D, RnAI-500 - ilmastin

RnAI-500 on Oy WatMan Ab:n valmistama, kotitalouskäyttöön tarkoitettu radoninpoistolaitte. Laitteen toiminta perustuu jatkuvatoimiseen ilmastukseen. Laitteesta on olemassa samalla periaatteella toimiva sisarmalli RnAI-300, joka on suunniteltu pienemmälle vedenkulutukselle ja radonpitoisuudelle.

Testauspäivä oli 31.5.2001. Tuntia ennen laitteen testaamista kiinteistössä oli käytetty vettä noin 10 litraa. Testauksen aikainen veden valutusnopeus oli keskimäärin 6,5 litraa minuutissa. Kiinteistössä ei ollut mahdollisuutta ottaa raakavettä, joten radonin poistumat on laskettu 16.2.1998 otetun raakavesinäytteen perusteella, jonka radonpitoisuus oli 1900 Bq/l (Kuva 13).

Keskimääräinen poistotehokkuus 50 litran vedenkulutuksen aikana oli 98 % ja 100 litran vedenkulutuksen aikana 99 %. Heikoin hetkellinen poistotehokkuus oli 96 %. Kuvasta 13 nähdään putkistoveden tyyppillinen



Kuva 13. Ilmastetun veden radonpitoisuus valutetun veden tilavuuden funktiona testi-kohteessa D (RnAI-500). Raakaveden radonpitoisuus oli 1900 Bq/l.

radonpitoisuuden vaihtelu jatkuvatoimisilla ilmastimilla. Tämä ilmastinmalli on hyvin tehokas ja hetkelliset poistotehokkuudetkin ovat hyviä. Laskennallisesti RnAI-500 soveltuu alle 20 000 Bq/l radonpitoisuuksien poistamiseen, mikäli ilmastetun veden keskimääräinen radonpitoisuuden tavoitearvo on alle 300 Bq/l.

5.1.5 Testikohte E, Vesivahti - ilmastin

Sednove Oy:n Vesivahti on kehitetty alun perin putkien jäätyksen estämiseen sekä veden haju- ja makuhaittojen poistoon. Laite perustuu veden kierrätykseen kaivosta painesäiliöön ja sieltä takaisin kaivoon ejektorin läpi. Tutkitussa laitteistossa veden kierrätys tapahtui kahden ejektorin läpi ja kierrätyksen aikana veden virtausnopeuden arvioitiin olevan 25 l/min.

Kaivo oli otettu käyttöön kesällä 2001. Sen syvyys oli noin 120 metriä ja halkaisija 12,5 cm. Kaivon vedentuottoa ei ollut määritetty. Kaivossa oli tehokas uppopumppu noin 100 metrin syvyydellä. Ennen laitteen asentamista talousvedestä otettiin useita radonnäytteitä 22.8.2001 ja 2.5.2002 välisenä aikana (Taulukko 10). Korkeimmat pitoisuudet mitattiin näytteistä, jotka otti STUKin työntekijä. Voidaan siis arvioida, että raakaveden pitoisuus kaivossa oli keskimäärin 11 000 Bq/l.

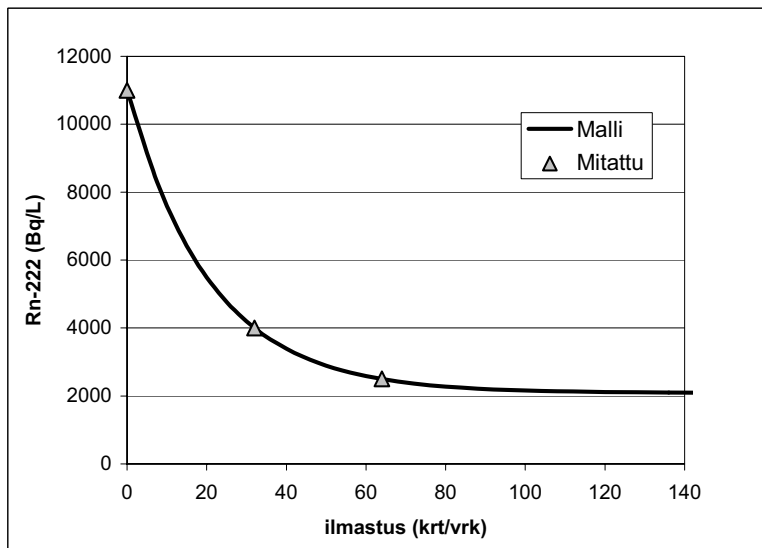
Sednoven vesivahdin asentamisen jälkeen veden radonpitoisuus tutkittiin kaksi kertaa. Ensimmäisellä kerralla (22.5.2002) veden kierrätys tapahtui kerran 45 minuutissa, 5,5 minuuttia kerrallaan. Toisella kerralla

Taulukko 10. Talousveden radonpitoisuus tutkimuskohteessa ennen Sednove vesivahdin asentamista. Näytteet on otettu keittiön hanasta.

Päivämäärä	Radon-222 [Bq/l]	Kierrätys [min/h]
22.8.2001	7 200	—
17.12.2001	10 200	—
23.4.2002	11 300	—
23.4.2002	11 600	—
29.4.2002	11 200	—
2.5.2002	8 700	—
22.5.2002	4 000	7,3
30.5.2002	2 500	14,7

(30.5.2002) veden kierrätys tapahtui joka 22,5 minuutin välein, 5,5 minuuttia kerrallaan.

Ilmastuksen vaikutus radonpitoisuuteen seuraa fysikaalisesti ensimmäisen asteen kinetiikkaa ts. se on satunnaisprosessi. Sednoven laitteella prosessi on monimutkaisempi, koska ilmastettu vesi palaa kaivoon. Tällöin siihen liukenee koko ajan lisää radonia ja lisäksi kaivossa oleva vesi vaihtuu tuoreeseen, radonpitoiseen kalliopohjaveteen. Oletetaan, että radonin



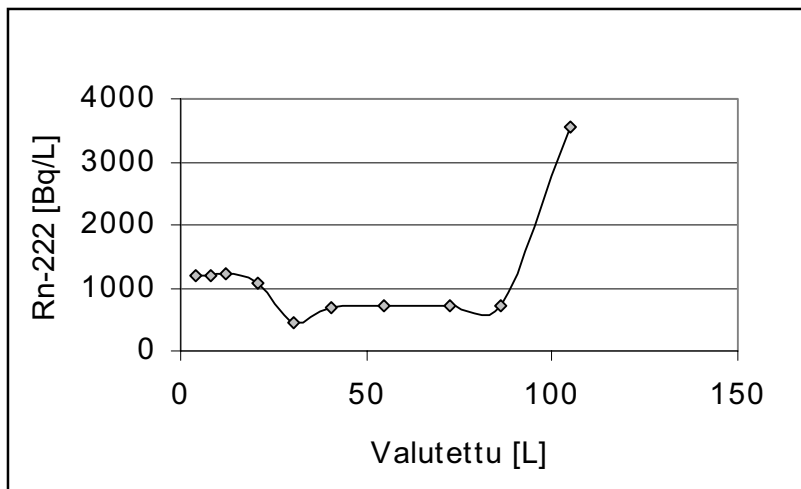
Kuva 14. Sednove Vesivahti ilmastimen vaikutus talousveden radonpitoisuuteen. Mallinnos on tehty ensimmäisen asteen kineettiseen malliin.

pääsy em. reittejä pitkin kaivoveteen tapahtuu puhtaasti diffuusion avulla ja näin noudattaa niin ikään ensimmäisen asteen kinetiikka. Tällöin voidaan arvioida, ettei tavoitearvoon 300 Bq/l päästä jatkuvallakaan ilmastuksella, kun veden radonpitoisuus on yli 2000 Bq/l (Kuva 14).

Paras laitteella saatu radonin poistuma oli vain 77 %. Testatun laitteen radoninpoistokykyyn vaikuttaa oleellisesti veden virtaukset kaivossa sekä radonin liukenemisnopeus kaivoveteen. Laitteen toimivuus riippuu siis voimakkaasti porakaivon ominaisuuksista ja kyseisen kalliopohjaveden virtauksista. Tätä laitetta ei voida suositella tällaisenaan kotitalouksien radoninpoistoratkaisuksi.

5.1.6 Testikohte F, RF-150/KR6 - ilmastin

Oy WatMan Ab myy radoninpoistolaitetta RF-150, jossa on kierrätys/paineenkorotuspumppu KR6. Laite on kotitalouskäyttöön tarkoitettu radoninpoistolaite, jonka toiminta perustuu eräilmastukseen.



Kuva 15. Ilmastetun veden radonpitoisuus valutetun veden tilavuuden funktiona testi-kohteessa E (RF-150/KR6). Raakaveden radonpitoisuus oli 19700 Bq/l.

Laitteen testauspäivä oli 24.9.1998. Tuntia ennen laitteen testaamista kiinteistössä oli käytetty vettä noin 50 litraa. Testauksen aikainen veden valutusnopeus oli keskimäärin 4,6 litraa minuutissa. Raakaveden radonpitoisuus oli 19 700 Bq/l. Ilmastusajaksi oli säädetty 10 minuuttia (Kuva 15).

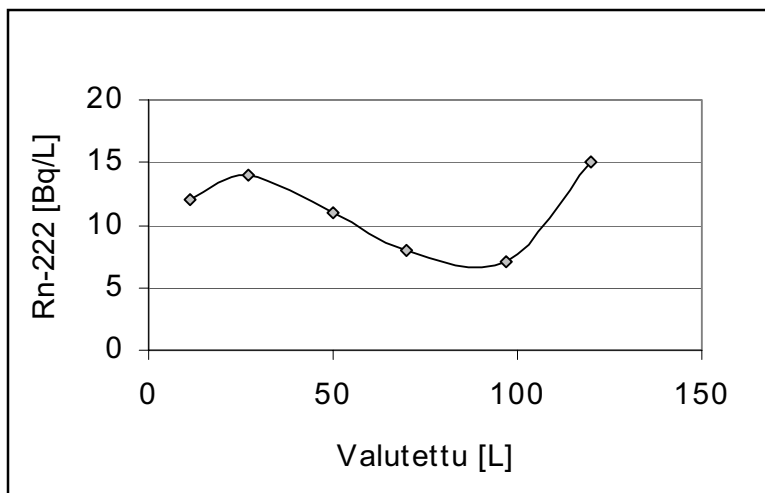
Keskimääräinen poistotehokkuus 50 litran vedenkulutuksen aikana oli

95 % ja 100 litran vedenkulutuksen aikana 95 %. Heikoin hetkellinen poistotehokkuus oli 53 %. Tässä kohteessa raakaveden pitoisuus oli lähes 20 000 Bq/l. Vaikka poistotehokkuus olikin keskimäärin 95 prosenttia, jää käyttöveden radonpitoisuudeksi noin 900 Bq/l, hetkellisesti jopa 3000 Bq/l.

Vajaan 100 litran valutuksen jälkeen nähdään selvästi, miten radonpitoisuus kasvaa putkistovedessä. Tämä johtuu siitä, että vettä pääsee putkistoon kesken ilmastuksen. Asiaa selviteltiin yrityksen kanssa pitkään ja vika johtui magneettiventtiilin tiivisteestä. Vika on korjattu.

5.1.7 Testikohde G, Radonett B2

Radonett B2 laite on Oy Callidus Ab:n markkinoima ilmastin, joka on kotitalouskäyttöön tarkoitettu radoninpoistolaite. Laitteen toiminta perustuu eräilmastukseen.



Kuva 16. Ilmastetun veden radonpitoisuus valutetun veden tilavuuden funktiona testi-kohteessa F (Radonett B2). Raakaveden radonpitoisuus oli 35 200 Bq/l.

Ilmastimen testauspäivä oli 10.3.1998. Tuntia ennen laitteen testaamista kiinteistössä oli käytetty vettä noin 10 litraa. Testauksen aikainen veden valutusnopeus oli keskimäärin 5,5 litraa minuutissa. Raakaveden radonpitoisuus oli 35 200 Bq/l. Ilmastusajaksi oli säädetty 5,5 minuuttia (Kuva 16).

Keskimääräinen poistotehokkuus 50 litran vedenkulutuksen aikana oli lähes 100 % kuten 100 litran vedenkulutuksen aikanakin. Heikoin hetkellinen poistotehokkuus oli niin ikään lähes 100 %. Laitteen radonin poistotehokkuus oli erittäin hyvä. Tällä ilmastimella voi turvallisesti poistaa suurimmatkin

radonpitoisuudet, joita porakaivovesissä esiintyy. Poistotehokkuudet olivat lähes yhtä hyviä, vaikka ilmastusaika lyhennettiin 2,5 minuuttiin. Hyvät poistotehokkuudet voivat osittain selittyä raakaveden korkealla hiilidioksidipitoisuudella. Ennen ilmastimen asennusta hanasta otettava vesi oli täynnä pieniä hiilidioksidikuplia; liuennut hiilidioksidi vapautui, kun veden paine laski noin neljäsosaan tullessaan normaali-ilmanpaineeseen. Kun näitä kuplia muodostuu ilmastimessa, kasvaa radonin poistoon tarvittava faasien välinen pinta ja siten myös poistotehokkuus paranee.

5.1.8 Testikohde H, Radox - ilmastin

Suomalaisen Oy OverCraft Ab:n kehittämä Radox – ilmastin toimii täysin eräilmastuseriaatteella. Ilmastus tapahtuu 300 litran vetoisessa, polyeteenistä valmistetussa sylinterimäisessä säiliössä, johon on upotettu reiätetty sylinteri. Sylinteri pyörii nopeasti moottorin avulla, jolloin Bernoullin yhtälön mukaisesti syntyvä paine-ero sylinterin sisä- ja ulkopinnan välillä aikaansaa ilman virtaamisen sylinterin sisältä sen ulkopuolelle vesisäiliöön. Pyörivä sylinteri leikkaa ilman pieniksi kupliksi ja samalla sekoittaa ilmastettavaa vettä erittäin tehokkaasti.

Ilmastimen testauspäivä oli 23.9.1998. Kiinteistössä ei ollut käytetty vettä noin kuuteen tuntiin ennen testaamista. Raakaveden radonpitoisuus oli 17 000 Bq/l. Ilmastusajaksi oli säädetty 7 minuuttia. Tässä tutkimuskohteessa ilmastettu vesi ohjataan 2 kuutiometrin vetoiseen valekaivoon, joten putkistoveden radonpitoisuus ei vaihtelee sadan litran valutuksen aikana. Tämän vuoksi vettä ei valutettu vakiovirtaamalla, vaan otettiin aina parin minuutin voimakkaan juoksutuksen jälkeen radonnäyte suoraan nestetuikepulloon. Ilmastetun veden pitoisuus oli tasaisesti 230 Bq/l. Laitteella saatu radonin poistotehokkuus oli täten 98,6 %.

5.2 Aktiivihilisuodattimet

5.2.1 Radonin poistumat

Radonin poistumat on laskettu yhtälön 3.3 mukaisesti. Radonin poistuman heikkenemistä on tarkasteltu erikseen jokaiselle tutkimuskohteelle ja verrattu sitä veden laatuun. Suodattimilla käsitellyn veden tilavuus on ilmaistu yksiköissä petitilavuus (BV), joka on suodattimessa olevan aktiivihilien tilavuus.

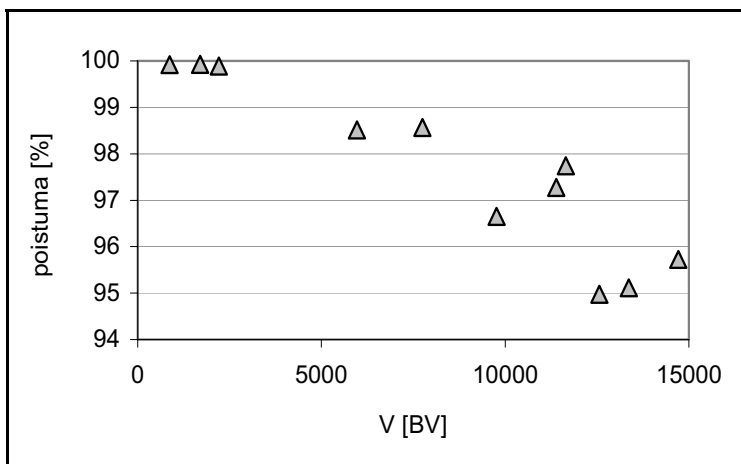
Tutkimuskohde A

Tutkimuskohteessa A kotitalouteen ei ole asennettu muita vedenkäsittelylaitteita. Aktiivihilisuodatin oli ollut käytössä 4,2 vuotta, kun viimeinen näyte otettiin. Vedessä on vähän orgaanista ainesta (TOC alle 1 mg/l), rautaa ja mangaania (alle 10 µg/l).

Taulukko 11. Tutkimuskohteen asennustiedot, vedenkulutus ja raakaveden radonpitoisuus.

Suodatin:	HOH Separtec ACR-039
Hiilen tilavuus:	39 l
Asennettu:	Kesäkuu 1997
Veden kulutus:	370 l/d
Rn-222:	2000–3000 Bq/l

Kuvasta 17 nähdään, että radonin pidättyminen hiileen heikkenee melko tasaisesti. Laskennallisesti arvioiden 90 % -läpimurto saavutetaan 23 000 petitilavuuden kohdalla ($R^2 = 0,87$). Suodatetun veden määrä on silloin noin 900 m³ (23 000 BV * 0,039 m³/BV = 897 m³).



Kuva 17. Radonin poistuma suodatetun veden petitilavuuden (BV) funktiona tutkimuskohteessa A. Yksi petitilavuus on 39 litraa.

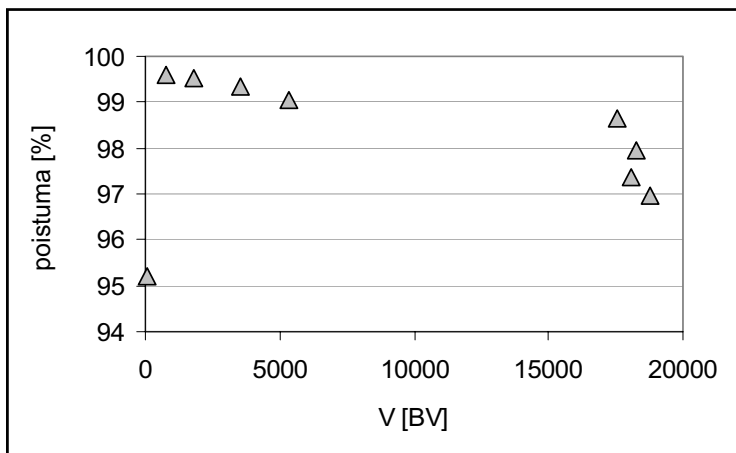
Tutkimuskohde B

Veden kulutus tutkimuskohteessa B oli vuoteen 1999 asti noin 630 litraa päivässä. Asukkaat vaihtuivat 1999, jolloin veden kulutus laski noin puoleen. Suodatin oli ollut käytössä 3,8 vuotta, kun viimeinen radonnäyte otettiin. Aktiivihiihisiuodatin on varustettu esisuodattimella ja takaisinhuuhtelulla. Vedessä on vähän orgaanista ainesta (TOC alle 0,5 mg/l), mutta runsaasti rautaa (yli 400 µg/l) ja mangaania (yli 100 µg/l).

Taulukko 12. Tutkimuskohteen asennustiedot, vedenkulutus ja raakaveden radonpitoisuus.

Suodatin:	WatMan RnAH-10
Hiilen tilavuus:	40 l
Asennettu:	Elokuu 1997
Veden kulutus:	630 l/d (-1998), 310 l/d (1999-)
Rn-222:	2500–4300 Bq/l

Arvioitaessa suodattimen kapasiteettia laskennallisesti 90 % -läpimurto saavutetaan noin 45 000 petitilavuuden (BV) kohdalla ($R^2 = 0,81$). Suodatetun veden määrä on silloin 1800 m³. Ensimmäinen radonnäyte, jossa radonin poistuma oli luokkaa 95 %, otettiin heti kun takaisinhuuhtelu oli juuri tehty. Sitä ei ole huomioitu edellä esitettyssä arvioissa.



Kuva 18. Radonin poistuma suodatetun veden petiilavuuden (BV) funktiona tutkimuskohteessa B. Yksi petiilavuus on 40 litraa.

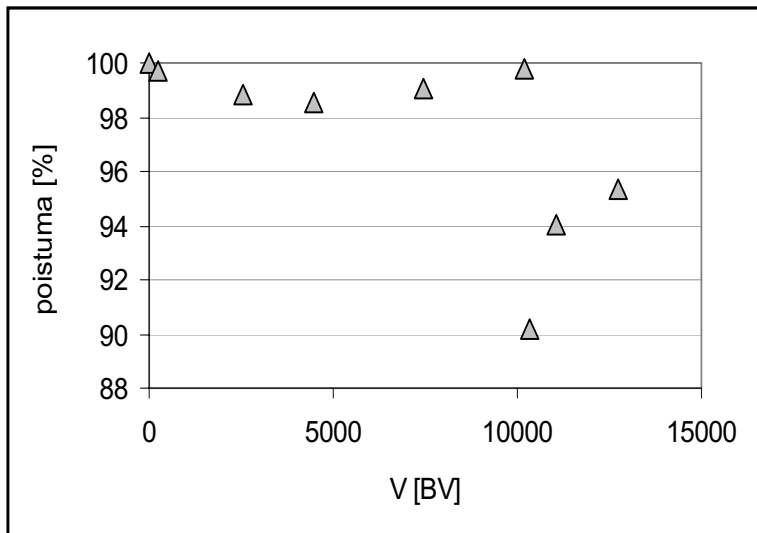
Tutkimuskohde C

Tutkimuskohteessa C aktiivihiilisuodatin on varustettu esisuodattimella. Vesilinjassa on aktiivihiilisuodattimen edellä 21 litran vetoinen anioninvaihdin. Aktiivihiilisuodatin oli ollut käytössä 2,9 vuotta, kun viimeinen radonnäyte otettiin. Aktiivihiilisuodattimeen tulevassa vedessä on anioninvaihtimesta huolimatta jonkin verran orgaanista ainesta (TOC 1–2 mg/l) ja mangaania (alle 70 µg/l). Rautaa vedessä on vähän (alle 30 µg/l).

Taulukko 13. Tutkimuskohteen asennustiedot, vedenkulutus ja raakaveden radonpitoisuus.

Suodatin:	HOH Separtec ACR-039
Hiilen tilavuus:	39 l
Asennettu:	Elokuu 1998
Veden kulutus:	470 l/d
Rn-222:	1900–3100 Bq/l

Arvioitaessa suodattimen kapasiteettia laskennallisesti 90 % -läpimurto saavutetaan 17 000 petitilavuuden (BV) kohdalla ($R^2 = 0,43$). Suodatetun veden määrä on silloin noin 700 m³.



Kuva 19. Radonin poistuma suodatetun veden petitilavuuden (BV) funktiona tutkimuskohteessa C. Petitilavuus on 39 litraa.

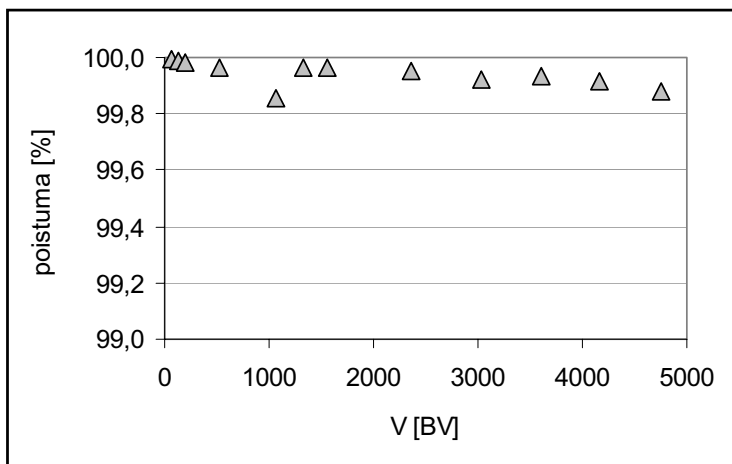
Tutkimuskohde D

Tutkimuskohteessa D aktiivihiilisuodattimen lisäksi ei ole muita vedenkäsittelylaitteita. Suodatin oli ollut käytössä 3,3 vuotta, kun viimeinen radonnäyte otettiin. Vedessä on paljon orgaanista ainesta (TOC yli 2,5 mg/l) ja mangaania (yli 200 µg/l) sekä kohtalaisesti rautaa (yli 90 µg/l).

Taulukko 14. Tutkimuskohteen asennustiedot, vedenkulutus ja raakaveden radonpitoisuus.

Suodatin:	HOH Separtec ACR-039
Hiilen tilavuus:	39 l
Asennettu:	Lokakuu 1997
Veden kulutus:	160 l/d
Rn-222:	2800–4100 Bq/l

Radonin poistumat eivät oleellisesti huonontuneet seurannan aikana. Kotitalouden vähäinen veden kulutus voi olla syynä poistotehokkuuden pysymiseen näin hyvänä yli kolmivuotisen tutkimusajanjakson aikana.



Kuva 20. Radonin poistuma suodatetun veden petitilavuuden (BV) funktiona tutkimuskohteessa D. Petitilavuus on 39 litraa.

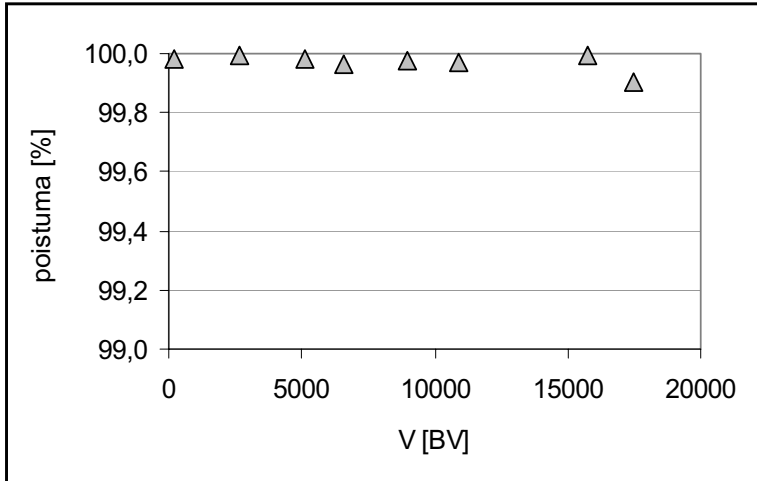
Tutkimuskohde E

Tutkimuskohteessa E aktiivihiilisuodattimen lisäksi ei ole muita vedenkäsittelylaitteita. Suodatin oli ollut käytössä 3,7 vuotta, kun viimeinen radonnäyte otettiin. Veden orgaanisen aineen ja mangaanin pitoisuutta ei mitattu, mutta vesi sisältää paljon rautaa (yli 500 µg/l).

Taulukko 15. Tutkimuskohteen asennustiedot, vedenkulutus ja raakaveden radonpitoisuus

Suodatin:	HOH Separtec ACR-063
Hiilen tilavuus:	63 l
Asennettu:	Lokakuu 1997
Veden kulutus:	510 l/d
Rn-222:	1300–1600 Bq/l

Radonin poistuman heikkenemistä ei seurannan aikana havaittu, vaikka veden kulutus on kohtuullisen runsasta ja vettä on suodatettu yli 17 000 petitilavuutta.



Kuva 21. Radonin poistuma suodatetun veden petitilavuuden (BV) funktiona tutkimuskohteessa E. Petitilavuus on 63 litraa.

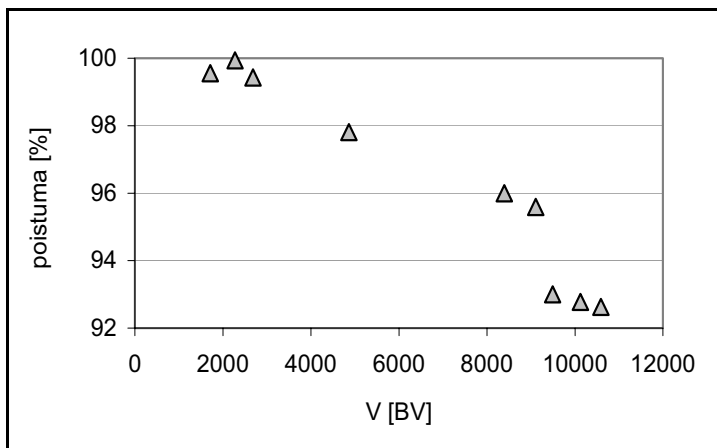
Tutkimuskohde F

Tässä tutkimuskohteessa on 21 litran vetoinen vahva anioninvaihdin ennen aktiivihiihisiuodatinta. Aktiivihiihisiuodatin oli ollut käytössä 3,5 vuotta, kun viimeinen radonnäyte otettiin. Aktiivihiihisiuodattimeen tulevassa vedessä on kohtalaisesti orgaanista ainesta (TOC 1–2 mg/l) sekä vähän rautaa (alle 100 µg/l) ja mangaania (alle 4 µg/l).

Taulukko 16. Tutkimuskohteen asennustiedot, vedenkulutus ja raakaveden radonpitoisuus.

Suodatin:	HOH Separtec ACR-039
Hiilen tilavuus:	39 l
Asennettu:	Marraskuu 1997
Veden kulutus:	320 l/d
Rn-222:	1600–2200 Bq/l

Radonin poistuma heikkenee tasaisesti. Arvioitaessa suodattimen kapasiteettia mitattujen tulosten perusteella saavutetaan 90 % -läpimurto 12 000 petitilavuuden kohdalla ($R^2 = 0,95$). Suodatetun veden määränä tämä on noin 500 m³.



Kuva 22. Radonin poistuma suodatetun vedenpeti tilavuuden (BV) funktiona tutkimuskohteessa F. Petitilavuus on 39 litraa.

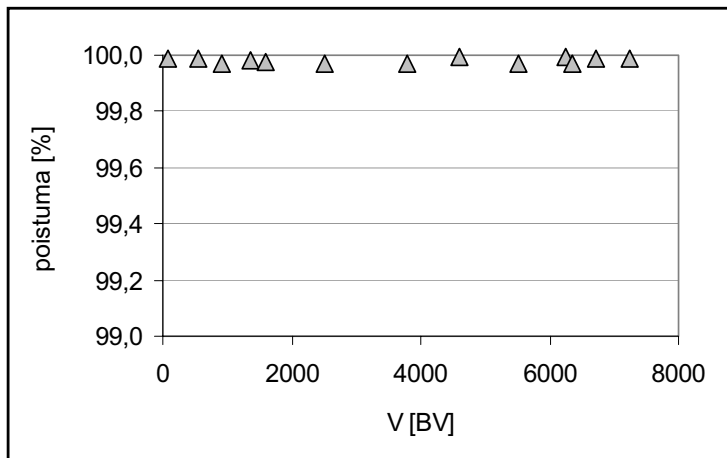
Tutkimuskohde G

Tutkimuskohteessa G aktiivihiilisuodattimen lisäksi on asennettu 11 litran vetoinen anioninvaihdin, jolla käsitellään keittiön vesi. Näytteet suodatetusta vedestä on otettu vesilinjasta aktiivihiilisuodattimen jälkeen, mutta ennen anioninvaihdinta. Suodatin oli ollut käytössä 3,5 vuotta, kun viimeinen radonnäyte otettiin. Vedessä on jonkin verran orgaanista ainesta (TOC alle 1,8 mg/l), vähän rautaa (alle 40 µg/l) ja kohtalaisesti mangaania (20–40 µg/l).

Taulukko 17. Tutkimuskohteen asennustiedot, vedenkulutus ja raakaveden radonpitoisuus.

Suodatin:	HOH Separtec ACR-063
Hiilen tilavuus:	63 l
Asennettu:	Marraskuu 1997
Veden kulutus:	360 l/d
Rn-222:	5100–7500 Bq/l

Radonin poistuman heikkenemistä ei seurannan aikana havaittu ja se oli koko seurannan ajan lähes 100 %.



Kuva 23. Radonin poistuma suodatetun veden petitilavuuden (BV) funktiona tutkimuskohteessa G. Petitilavuus oli 63 litraa.

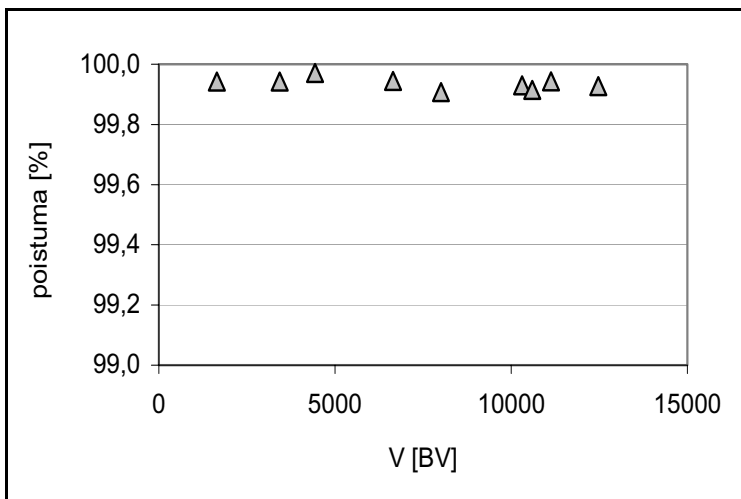
Tutkimuskohde H

Tutkimuskohteessa H aktiivihiilisuodattimen lisäksi ei ole asennettu muita vedenkäsittelylaitteita. Suodatin oli ollut käytössä 3,7 vuotta, kun viimeinen näyte otettiin. Vedessä on vähän orgaanista ainesta (TOC alle 0,7 mg/l), jonkin verran rautaa (90–120 µg/l) sekä kohtalaisesti mangaania (noin 50 µg/l).

Taulukko 18. Tutkimuskohteen asennustiedot, vedenkulutus ja raakaveden radonpitoisuus.

Suodatin:	HOH Separtec ACR-063
Hiilen tilavuus:	63 l
Asennettu:	Marraskuu 1997
Veden kulutus:	600 l/d
Rn-222:	3800–4600 Bq/l

Radonin poistuman heikkenemistä ei seurannan aikana havaittu ja se oli koko seurannan ajan lähes 100 %.



Kuva 24. Radonin poistuma suodatetun veden pettilavuuden(BV) funktiona tutkimuskohteessa H. Pettilavuus oli 63 litraa.

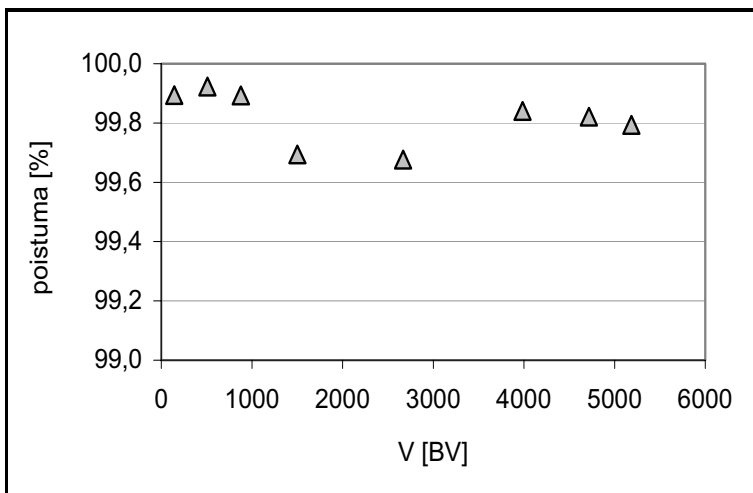
Tutkimuskohde I

Tutkimuskohteessa I aktiivihilisuodattimen lisäksi ei ole asennettu muita vedenkäsittelylaitteita. Suodatin oli ollut käytössä 3,4 vuotta, kun viimeinen näyte otettiin. Vedessä on jonkin verran orgaanista ainesta (TOC noin 1,2 mg/l), jonkin verran rautaa (90–120 µg/l) sekä paljon mangaania (yli 60 µg/l).

Taulukko 19. Tutkimuskohteen asennustiedot, vedenkulutus ja raakaveden radonpitoisuus

Suodatin:	HOH Separtec ACR-063
Hiielen tilavuus:	63 l
Asennettu:	Joulukuu 1997
Veden kulutus:	280 l/d
Rn-222:	1200–2300 Bq/l

Kuvasta 25 nähdään, ettei radonin poistuman heikkenemistä havaittu seurannan aikana. Radonin poistotehokkuus oli koko seurannan ajan yli 99,6 %.



Kuva 25. Radonin poistuma suodatetun veden petiilavuuden (BV) funktiona tutkimuskohteessa I. Petiilavuus oli 63 litraa.

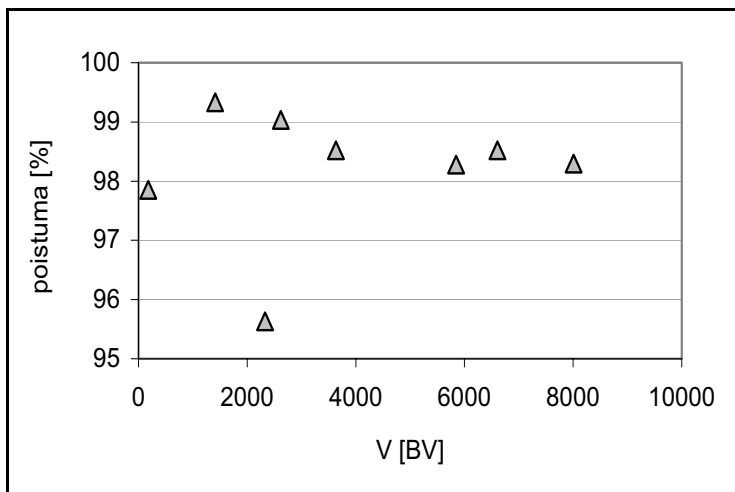
Tutkimuskohde J

Tutkimuskohteessa J on ennen aktiivihiihliisuodatinta 21 litran vetoinen anioninvaihdin. Aktiivihiihliisuodatin oli ollut käytössä 2,7 vuotta, kun viimeinen radonnäyte otettiin. Aktiivihiihliisuodattimeen tulevassa vedessä on hyvin vähän orgaanista ainesta (KMnO_4 -luku alle 1 mg/l) sekä rautaa (alle 10 $\mu\text{g/l}$), mutta vaihtelevasti mangaania (yleensä alle 10 $\mu\text{g/l}$, ajoittain noin 80 $\mu\text{g/l}$).

Taulukko 20. Tutkimuskohteen asennustiedot, vedenkulutus ja raakaveden radonpitoisuus.

Suodatin:	HOH Separtec ACR-039
Hiilen tilavuus:	39 l
Asennettu:	Lokakuu 1998
Veden kulutus:	490 l/d
Rn-222:	1200–1600 Bq/l

Poiketen muista aktiivihiihliisuodattimista radonin poistuma aktiivihiihleen ei ollut lähellä 100 prosenttia suodattimen asentamisen jälkeen. Merkittävää pidättymisen heikkenemistä ei seurannan aikana kuitenkaan havaittu. Radonin poistuma pysyi yli 98 % lukuun ottamatta yhtä näytettä, jossa poistuma oli alle 96 %.

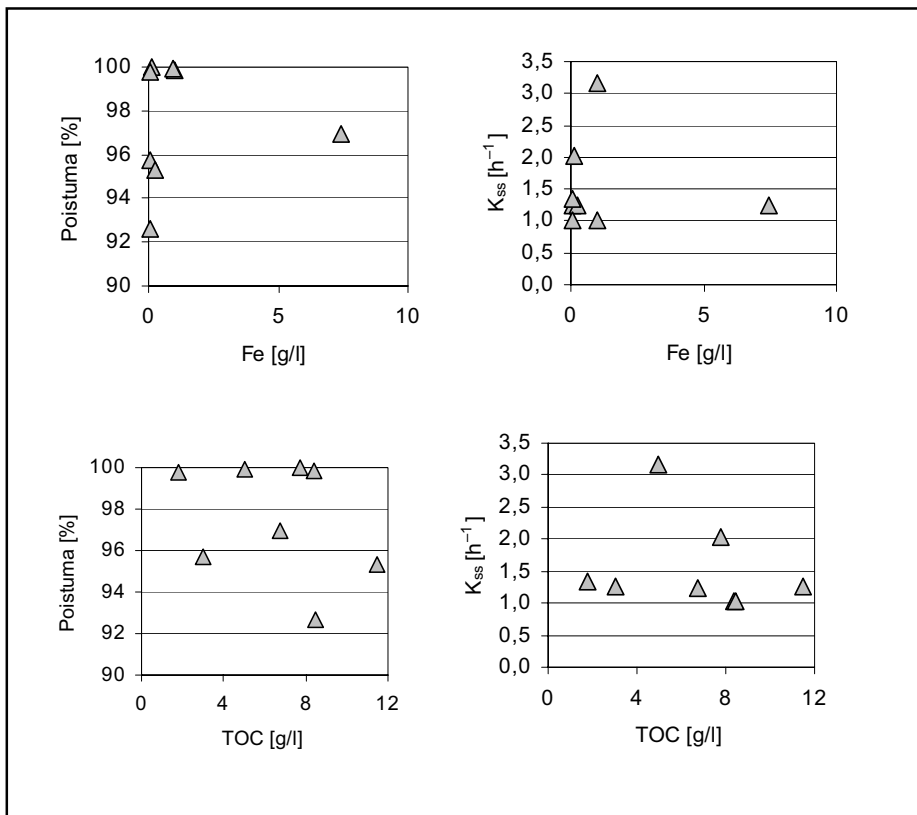


Kuva 26. Radonin poistuma suodatetun veden petiilavuuden (BV) funktiona tutkimuskohteessa J. Petiilavuus oli 39 litraa.

5.2.1 Aktiivihiilisuodattimien kapasiteetti

Neljässä 39 tai 40 litran vetoisessa aktiivihiilisuodattimessa havaittiin radonin poistuman heikenevän ajan mittaan. Näiden tulosten ja toisen asteen polynomisen ekstrapoloinnin perusteella voidaan arvioida, että suodattimen kapasiteetti (90 % -läpimurto) olisi luokkaa 12 000–43 000 petitilavuutta. Kuitenkin osalla suodattimista on käsitelty vettä jo noin 15 000 petitilavuutta ja poistumat ovat edelleen yli 99 %.

Suodattimiin kerääntyvä suodatuksen aikana lähinnä rautaa ja orgaanista ainesta. Näiden aineiden määrällä tämän tutkimusaineiston perusteella ei kuitenkaan havaittu olevan korrelaatiota radonin poistumaan tai adsorptionopeuteen (Kuva 27).



Kuva 27. Radonin poistuma ja adsorptionopeus suodattimeen kerääntyneen raudan ja orgaanisen aineksen funktiona. Adsorptionopeuden yksikkö on h^{-1} , joka on adsorption ensimmäisen asteen kineettinen vakio. Aktiivihiileen kerääntyneen raudan ja orgaanisen aineen määrät on ilmoitettu grammoina hiililitraa kohti ja arvioitu raakavedestä ja suodatetusta vedestä otettujen näytteiden perusteella.

5.2.2 Aktiivihiiisuodattimeen kertyvät radioaktiiviset aineet

Tutkimuskohteessa D vaihdettiin suodattimeen uusi aktiivihiihi. Vaihdon suorittivat kaksi STUKin työntekijää. Työhön kului aikaa noin tunti, jona aikana saatu henkilökohtainen efektiivinen annos jäi alle TL-dosimetrin määritysrajan, 17 μ Sv.

Käytetystä hiilestä gammaspektrometrisesti määritetty ja laskennallinen lyijy-210:n aktiivisuus vastaavat hyvin toisiaan (taulukot 21 ja 22). Tämä koe vahvisti aiemmat tutkimukset Yhdysvalloissa ja Suomessa, joiden mukaan hiilessä hajoavan radonin jälkeläiset pidättyvät lähes kvantitatiivisesti hiileen. Käytetyssä hiilessä olevan lyijy-210:n aktiivisuus on siten helppo laskea ennen kuin suodatin poistetaan käytöstä. Lisäksi koe vahvisti sen, ettei hiileen kertynyttä lyijy-210:ä purkaudu ainakaan merkittävästi juomaveteen käytön aikana.

Taulukko 21. Aktiivihiiheen kertyneen lyijy-210:n aktiivisuuden laskemiseen käytetyt tiedot tutkimuskohteessa D (yhtälöt 3.6 ja 3.7).

Radonin pitoisuus raakavedessä	$C_{0, Rn}$	3656 Bq/l
Radonin pitoisuus suodatetussa vedessä	$C_{t, Rn}$	2 Bq/l
Lyijy-210 pitoisuus raakavedessä	$C_{0, Pb}$	0,46 Bq/l
Lyijy-210 pitoisuus suodatetussa vedessä	$C_{t, Pb}$	0,18 Bq/l
Keskimääräinen veden kulutus	Q	156 l/d
Hiilen käyttöaika	t	1187 d

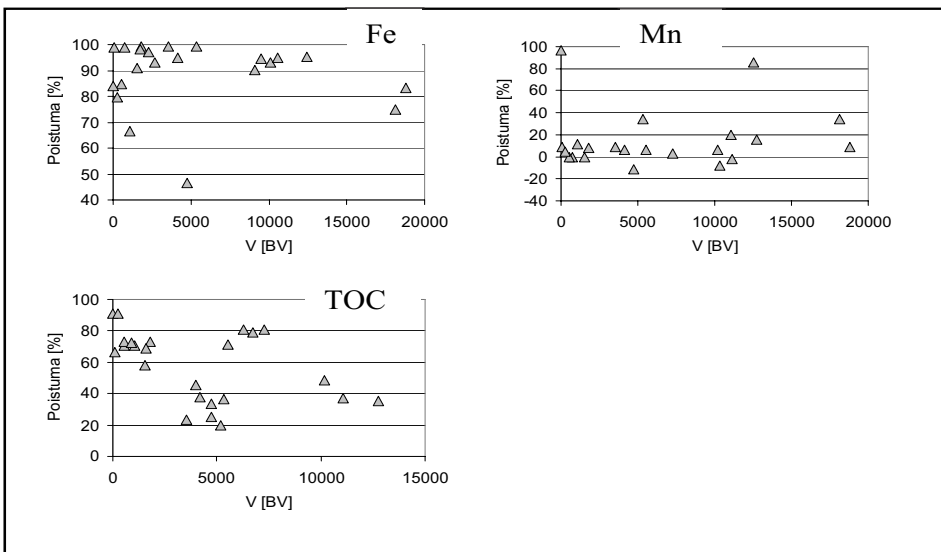
Taulukko 22. Aktiivihiilestä gammaspektrometrisesti määritettyjen radionuklidien aktiivisuudet sekä laskennallinen Pb-210:n aktiivisuus. Hiilipedin massa oli kuivana 23,4 kg. Lasketut epävarmuudet on ilmoitettu 95 prosentin luottamusvälille ($\pm 2\sigma$).

Radionuklidi	Mitattu aktiivisuus	Laskennallinen aktiivisuus
Pb-210 [Bq]	350 000 \pm 28 000	352 000
Ra-226 [Bq]	8 580 \pm 520	—
U [g]	1,87 \pm 0,26	—
Ra-228 [Bq]	178 \pm 89	—
Th-228 [Bq]	59 \pm 23	—

On mahdollista, että aktiivihiileen pidättynyt radium-226 toimii radonin lähteenä ja täten lisää suodatetun veden radonpitoisuutta. Tässä tutkimuskohteessa veden keskimääräinen kulutus on 155 litraa vuorokaudessa. Aktiivihiilisuodattimen huokostilavuustilavuus (kokonaistilavuus – hiilen tilavuus) on noin 30 litraa, mikä on aktiivihiilen kanssa kontaktissa keskimäärin 0,2 vuorokautta. Sinä aikana aktiivihiileen ja siihen pidättyneeseen materiaaliin sitoutunut radium (8600 Bq) tuottaa veteen 300 Bq radonia, jolloin litraa kohden radonpitoisuuden nousu on noin 10 Bq/l. Koska radium on todennäköisesti pidättyneenä suodattimen yläosiin, mihin myös rauta pääosin pidättyy, ei sen tuottama radon juurikaan lisää suodatetun veden radonpitoisuutta. Toisin sanoen vesi tämän jälkeen suodattuu vielä aktiivihiilen läpi ja radon pidättyy suodattimen alempiin osiin. Takaisinhuhteluautomaatiikalla varustetuissa aktiivihiilisuodattimissa suodatinmatriisi sekoittuu huuhtelun aikana tasaisesti, joten radonpitoisuus voi kasvaa jonkin verran käsitellyssä vedessä. Tässä tapauksessa radonpitoisuuden kasvu olisi kuitenkin vain alle kaksi becquereliä litraa kohden.

5.2.3 Aktiivihiilisuodatuksen vaikutus veden laatuun

Aktiivihiilisuodattimet pidättivät suhteellisen tehokkaasti rautaa ja orgaanista ainesta. Aktiivihiilisuodatus ei yleensä poista mangaania (Kuva 28).



Kuva 28. Raudan, mangaanin ja orgaanisen aineen poistumat aktiivihiilisuodatuksessa tutkimuskohteissa suodatetun vesimäärän funktiona. Kuvaajilla on esitetty poistumat, mikäli Fe > 0,03 mg/l, Mn > 0,03 mg/l ja TOC > 1 mg/l.

Pesäkkeiden lukumäärän määrittämisellä 22 °C:ssa ja 37 °C:ssa ei pystytty osoittamaan aktiivihiihisiuodatuksen aiheuttamaa veden mikrobiologisen laadun heikkenemistä (Taulukko 23).

Taulukko 23. Pesäkkeiden lukumäärä (HPL) raakavedessä ja suodatetussa vedessä niissä aktiivihiihisiuodattimien tutkimuskohteissa, joissa vesinäyte pystyttiin luotettavasti ottamaan tähän tarkoitukseen (steriloinnin kestävä hana eikä muita suodattimia).

Aika käytössä [päiviä]	HPL 22 °C [pmy/100 ml]		HPL 37 °C [pmy/100 ml]	
	raakavesi	suodatettu	raakavesi	suodatettu
92	150	20	1	11
102	72	8	33	0
117	2	13	0	8
229	90	4	4	2
236	180	8	1	0
258	6	7	0	1
290	160	16	0	10
340	23	210	1	230
976	113	3	47	12
1014	2	32	0	34
1102	5	2	2	22
1129	11	5	2	2
1153	3	9	0	0
1180	11	13	1	0
1187	280	790	1	0
1194	340	100	3	1
1211	51	6	2	2
1243	30	19	1	1
1278	3	0	0	11
1299	42	1	8	8
1317	340	80	7	8
1338	2	4	2	0
1383	310	6	330	4
1401	140	44	0	0

Veden pH-arvoon aktiivihiilisuodatuksella ei ollut juurikaan vaikutusta. Veden happipitoisuus laski suodatuksen aikana jonkin verran, mikä voi aiheutua veden lämpötilan noususta suodatuksen aikana (Taulukko 24).

Taulukko 24. Aktiivihiilisuodatuksen vaikutus veden pH-arvoon ja happipitoisuuteen.

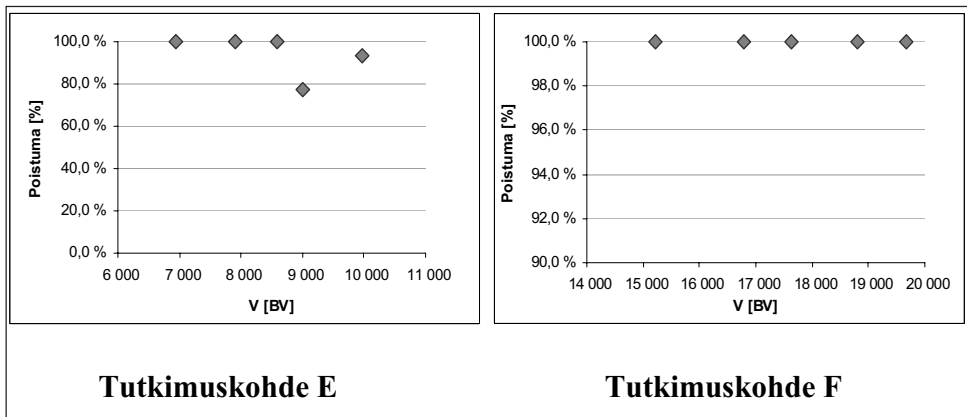
	pH-arvon muutos	O ₂ -pitoisuuden muutos [mg/l]
Keskiarvo	-0,03	-0,48
Mediaani	0,00	-0,40
Minimi	-0,62	-2,85
Maksimi	0,40	1,30
Mittauksia	24 kpl	21 kpl

5.3 Ioninvaihtimet

Uraanin poistumat eri tutkimuskohteissa vaihtelivat 88–100 prosentin välillä riippuen kotitaloudessa olevan vaihtimen koosta ja raakaveden uraanipitoisuudesta (Taulukko 25). Tutkimuskohteissa, joissa uraani poistettiin kaikesta talousvedestä, uraanin poistuma oli tyypillisesti 99 prosenttia käsitellyn veden uraanipitoisuuden jäädessä alle 10 µg/l – usein jopa alle 1 µg/l. Tutkimuskohteessa I uraanin poistuma oli suhteellisen hyvä (yli 98 %), mutta käsiteltyyn veteen jäi vielä melko paljon uraania, 34–38 µg/l. Todennäköinen syy tähän on suodattimen alimitoitus, kun otetaan huomioon raakaveden korkea uraanipitoisuus, veden laatu ja kulutus.

Oy WatMan Ab:n ioninvaihtimissa (O, P, Q, R ja S), joissa oli anioninvaihtohartsin lisäksi myös muuta massaa, uraanin poistuma oli hieman heikompi kuin Separtec Oy:n laitteilla, joissa oli pelkästään anioninvaihtohartsia. Todennäköisesti anioninvaihtohartsin määrän lisääminen Oy WatMan Ab:n suodattimiin lisäisi poistumaa niin, että käsitellyn veden uraanipitoisuus jäisi alle 1 µg/l. Nyt käsitellyn veden uraanipitoisuus vaihteli 3–7 µg/l välillä.

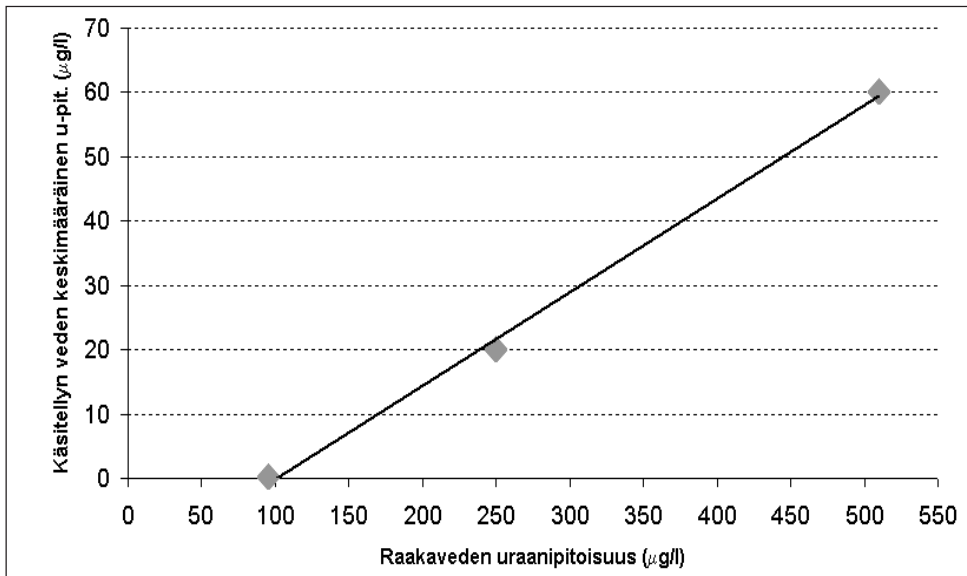
Jos uraani poistettiin vain ruoka- ja juomavedestä (A, B, C, D ja E) oli uraanin poistuma hieman heikompi kuin kohteissa, joissa uraani poistettiin kaikesta talousvedestä. Uraanipitoisuus oli kuitenkin lähes aina pienempi kuin 10 µg/l. Humuspitoisessa vedessä uraanin poistuma oli keskimäärin 5–10 prosenttiyksikköä matalampi verrattuna hyvälaatuisiin vesiin, joissa käsitellyn veden uraanipitoisuus oli 6–50 µg/l ja keskimääräinen pitoisuus 17 µg/l (Kuva 29).



Kuva 29. Uraanin poistumat (%) anioninvaihtimilla tutkimuskohteissa E ja F petitilavuuden (BV) funktiona. Kohteessa E raakaveden keskimääräinen uraanipitoisuus oli 190 $\mu\text{g/l}$ ja orgaanisen aineksen pitoisuus (KMnO_4 -luku) 12 mg/l. Kohteessa F raakaveden keskimääräinen uraanipitoisuus oli 200 $\mu\text{g/l}$ ja orgaanisen aineksen pitoisuus (KMnO_4 -luku) 3,5 mg/l.

Hanasuodattimien (A, B ja C), joita ei suositella käytettäväksi kuin kesäasunnoilla, uraanin poistuma oli heikoin. Niillä päästiin alle 10 $\mu\text{g/l}$ pitoisuuteen (poistuma 99 %) vain, jos raakaveden uraanipitoisuus oli alle 175 $\mu\text{g/l}$. Suuremmilla uraanipitoisuuksilla hanasuodattimen kapasiteetti ei riitä poistamaan uraanista kuin 90 %. Tutkimuskohteiden käsiteltyyn veteen jäi siten uraania 10–60 $\mu\text{g/l}$, kun niiden raakavesien uraanipitoisuudet olivat välillä 250–510 $\mu\text{g/l}$ (Taulukko 25). Tämä aiheutuu siitä, että veden virtausnopeus hanassa on hartsin määrään nähden liian suuri. Kontaktaika on silloin lyhyt eikä kaikki uraani ehdi kiinnittyä hartsiin. Uraaninpoistumaa voidaan parantaa valuttamalla vetä hanasta mahdollisimman hitaasti. Kuvassa 30 on esitetty hanasuodattimella käsitellyn veden uraanipitoisuuden riippuvuus raakaveden uraanipitoisuudesta. Kuvasta voidaan nähdä, että hanasuodattimen käytöllä päästään alle 10 $\mu\text{g/l}$ pitoisuuteen, mikäli raakaveden uraanipitoisuus on alle 175 $\mu\text{g/l}$.

Radiumin poistuma kohteissa, joissa ioninvaihtimessa oli anioninvaihtohartsin lisäksi kationinvaihtohartsia (K, L, M, N, ja T), vaihteli 33–94 % välillä. Niissä kohteissa, joiden ioninvaihtimessa ei ollut kationinvaihtohartsia, radiumin poistuma vaihteli 9–90 % välillä. Tulokset osoittavat, että osa poistuneesta radiumista on ollut anionisessa muodossa tai kiinnittyneenä orgaanisiin yhdisteisiin (humus- ja fulvohappo sekä humiini). Kohteessa L radiumin pidätyminen loppui reilun kolmen vuoden käytön jälkeen (elokuussa 2000). Tätä ennen radiumin poistuma oli yli 90 %. Kationinvaihtohartsin osuus koko ioninvaihtomassasta (36 l) oli noin viisi litraa.



Kuva 30. Kohteiden A, B ja C käsitellyn veden keskimääräisen uraanipitoisuuden ($\mu\text{g/l}$) riippuvuus raakaveden keskimääräisestä uraanipitoisuudesta hanasuodatinta käytettäessä. Virtaama keittiöhanassa 5 – 8 litraa minuutissa.

Oy WatMan Ab:n kohteissa (P, Q, R ja S) anioninvaihtohartsin lisäksi oli myös muuta suodatinmassaa. Näissä kohteissa radiumin poistumat ovat olleet 81 – 99 %.

Lyijyn ja poloniumin poistumat vaihtelivat suuresti (0–99 %). Toisissa kohteissa käsitellyn veden lyijy- ja poloniumpitoisuudet olivat jopa suurempia kuin raakavedessä. Osa lyijystä ja poloniumista on todennäköisesti ollut kiinnittynään veden partikkeliainekseen, jota irtoaa aika ajoin ioninvaihtimesta lisäten käsitellyn veden lyijy- ja poloniumpitoisuutta. Partikkeliainekseen kiinnittynään lyijyn ja poloniumin poisto ioninvaihtomenetelmällä ei yleensä onnistu. Lyijyn ja poloniumin sitoutumista erikokoisiin pohjaveden partikkeleihin on käsitelty laajemmin luvussa 5.8.

5.3.1 Ioninvaihdon vaikutus veden laatuun

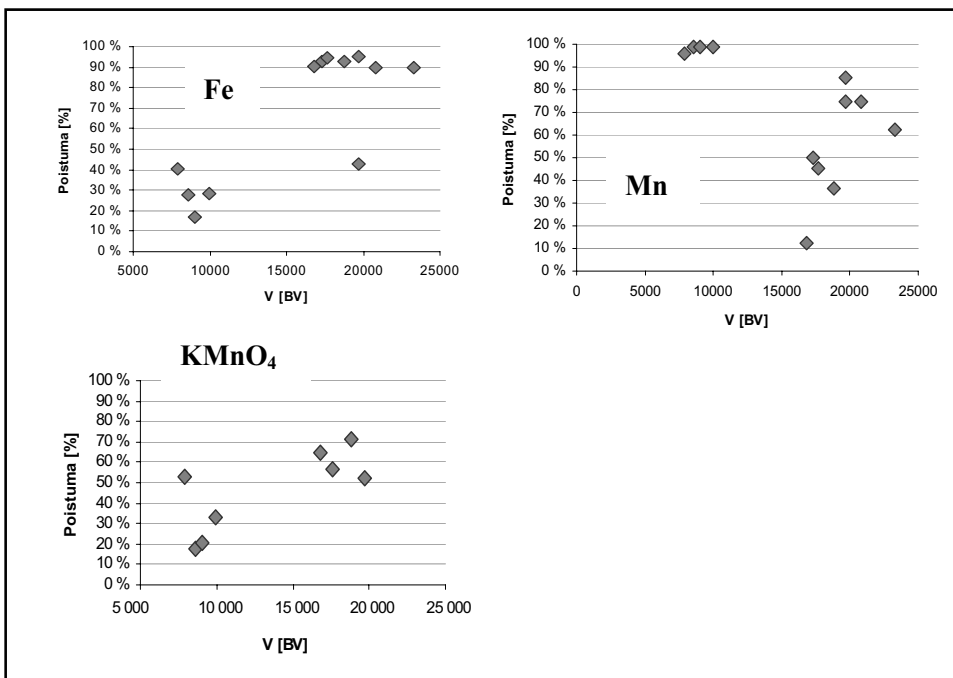
Tutkittaessa ioninvaihtimien toimintaa seurattiin myös muita veden laadun muutoksia. Seurattavat laatuparametrit olivat pesäkkeiden lukumäärä (HPL) 22 °C:ssa ja 37 °C:ssa, Fe, Mn, SO_4 , KMnO_4 , pH-arvo ja veden sähkönjohtavuus (taulukot 26 ja 27). Vedenlaadun arviointia vaikeutti se, että usein eri suodattimet (lähinnä aktiivihiilisuodatin ja ioninvaihdin, mutta myös

Taulukko 25. Radionuklidien keskimääräiset pitoisuudet raakavedessä ja käsitellyssä vedessä sekä keskimääräiset poistumaprosentit eri tutkimuskohteissa, joissa testattiin ioninvaihtimia.

Tutkimus- kohde	²³⁸ U (µg/l)			²²⁶ Ra (Bq/l)			²¹⁰ Pb (Bq/l)			²¹⁰ Po (Bq/l)		
	raaka- vesi	käsitely vesi	Poistuma (%)	raaka- vesi	käsitely vesi	poistuma (%)	raaka- vesi	käsitely vesi	poistuma (%)	raaka- vesi	käsitely vesi	poistuma (%)
A	510	60	88,4	0,50	0,46	9	0,36	0,16	56	0,49	0,40	19
B	250	20	91,9	0,03	0,02	40	-	-	-	0,03	0,09	-
C	95	<1	99,2	0,17	0,03	85	0,20	0,07	66	0,15	0,06	61
D	450	<1	99,8	0,15	0,12	21	0,08	0,09	-	0,09	0,006	94
E	190	17	90,8	0,30	0,10	68	1,2	0,11	84	1,1	0,54	50
F	200	<1	99,6	0,03	0,01	60	0,20	0,05	74	0,24	0,009	95
G	95	1,2	98,7	0,17	0,03	85	0,13	0,07	46	0,15	0,06	61
H	76	<1	99,1	0,04	0,02	50	0,16	0,04	74	0,02	0,002	88
I	2200	36	98,4	0,18	0,02	89	0,71	0,24	66	1,6	0,33	79
J	380	<1	99,8	0,39	0,33	17	0,27	0,06	79	0,23	0,04	81
K	25	<1	96,9	0,06	0,04	33	1,1	0,16	86	0,48	0,08	84
L	1070	1,3	99,9	2,7	1,8	33	0,62	0,13	79	0,12	0,04	71
M	660	3,6	99,5	0,35	0,02	94	4,7	2,5	47	5,9	2,5	57
N	12	<1	93,7	0,40	0,03	93	0,07	0,39	-	0,30	0,06	81
O	110	<1	99,1	0,11	<0,01	91	0,04	0,04	0	0,04	0,04	0
P	130	6,6	94,8	0,48	0,03	94	0,31	0,07	78	0,16	0,02	89
Q	1020	2,6	99,7	0,13	0,01	90	0,26	0,04	86	0,16	0,02	86
R	1200	3,4	99,7	0,24	0,05	81	0,49	0,03	95	0,03	0,02	29
S	220	<1	99,6	21	0,3	99	0,70	0,03	96	3,6	0,004	99,9
T	120	<1	99,5	0,39	0,04	89	0,23	0,13	45	1,7	0,23	87
U	110	1	99,1	2,2	1,8	20	1,7	0,20	89	0,87	0,05	95

ilmastin) olivat asennettu peräkkäin, eikä niiden välistä ollut mahdollisuutta ottaa vesinäytettä. Näin ollen havaitut veden laadun muutokset ja poistumaprosentit kuvaavat useimmiten näiden kohteiden kaikkien eri laitteiden (ilmastimien, suodattimien ja käänteisosmoosilaitteiden) yhteisvaikutusta.

Ioninvaihtimet, joissa oli vain anioninvaihtohartsia, poistivat veden orgaanisesta aineksesta keskimäärin 70 %. Osa raudasta ja mangaanista poistui vedestä käytettäessä pelkästään anioninvaihtohartsia (kohteet E, F, G, H, I ja J, Kuva 31). Tämä osoittaa, että osa raudasta ja mangaanista on anionisina yhdisteinä ja sitoutuneena esimerkiksi humus- tai fulvohappoihin tai kiinnittyneenä suodattimeen mekaanisesti, esimerkiksi rauta- ja mangaanisaostumina. Kohteissa, joissa suodattimessa oli anioninvaihtohartsin lisäksi kationinvaihtohartsia (K, L, M, N ja T), olivat raudan ja mangaanin keskimääräiset poistumat 65 %. Kohteen S tuloksia ei ole otettu huomioon laskuissa, koska siellä käytettiin ioninvaihtimen lisäksi käänteisosmoosilaitetta, joka poistaa vedestä lähes kaikki ionit. Tällöin poistumat ovat lähes aina hyviä.



Kuva 31. Raudan, mangaanin ja orgaanisen aineen poistumat anioninvaihtosuodattimilla (kohteissa E, F ja H) pettilavuuden funktiona.

Taulukko 26. Ioninvaihtokohteden raakaveden ja käsitellyn veden raudan, mangaanin ja orgaanisen aineen keskimääräiset pitoisuudet sekä pH:n keskiarvot.

Tutkimuskohde	Fe (µg/l)		Mn (µg/l)		KMnO ₄ (mg/l)		pH	
	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty
E	17	11	13	<1	12	6,9	8,0	7,8
F	50	4	2	1	3,5	1,3	7,1	7,0
G	20	4	4	2	4,5	1,0	8,3	7,5
H	4	1	28	8	< 1	< 1	7,9	7,8
I	1100	11	20	1	2,4	< 1	8,5	8,4
J	130	9	22	3	5,4	< 1	7,4	7,1
K	13	4	1	1	1,0	< 1	8,7	7,8
L	6	6	13	14	2,2	< 1	7,2	6,5
M	63	60	4	2	4,5	1,9	7,9	7,8
N	240	30	185	16	26,1	11,8	8,1	8,0
P	16	5	29	24	2,7	1,5	8,3	8,3
Q	33	4	5	2	8,5	1,0	8,3	9,8
R	8	6	3	3	4,3	< 1	7,2	7,9
S	1830	10	915	15	13,2	< 1	7,1	7,9
T	2200	120	1200	43	25,2	3,3	6,6	6,3
U	24	3	0,06	1	< 1	< 1	8,2	8,1

Useimmissa kohteissa veden pH-arvo laski suodatuksen vaikutuksesta (Taulukko 26). Muutokset olivat yleensä yhden pH-yksikön suuruisia. Poikkeuksena olivat kohteet P, Q, R ja S, joissa oli Oy WatMan Ab:n vaihdin. Näissä ioninvaihtimissa oli anioninvaihtomassan lisäksi muuta suodatinmassaa. Tämä lienee ollut syynä siihen, ettei veden pH-arvo laskenut käsittelyn aikana, vaan nousi jopa 1,5 pH-yksikköä.

Veden sähkönjohtavuus ei juuri muuttunut ioninvaihtimien vaikutuksesta (Taulukko 27). Ioninvaihtimen jälkeen asennettu käänteisosmoosilaitte (kohde S) laski odotetusti veden sähkönjohtavuutta, koska se poistaa vedestä lähes kaikki ionit. Sähkönjohtavuus laski 320 mS/m:stä 32 mS/m:n, mikä on selvästi alhaisempi kuin talousvedelle asetettu enimmäisarvo (250 mS/m).

Veden mikrobiologista laatua seurattiin pesäkkeiden lukumäärän avulla (Taulukko 27). Määritykset tehtiin kahdessa eri lämpötilassa, 22 °C:ssa ja 37 °C:ssa. Menetelmällä ei saada esille kaikkia vedessä olevia mikrobeja, mutta seuraamalla pesäkkeiden lukumäärää voidaan tarkkailla veden mikrobiologisen laadun muuttumista. Pesäkeluvun suuruuteen vaikuttavat raakaveden laatu, siinä oleva mikrobeille käyttökelpoisten ravinteiden määrä (mm. orgaaninen aines ja fosfori), vedenkäsittely, putkiston kunto sekä veden

Taulukko 27. Veden johtokyvyn ja pesäkkeiden lukumäärän (22 °C ja 37 °C) keskimääräiset arvot raakavedessä ja käsitellyssä vedessä.

Tutkimuskohde	Sähkönjohtavuus (mS/m)		Pesäkkeiden lukumäärä 22°C		Pesäkkeiden lukumäärä 37°C	
	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty
E	22,1	20,2	380	460	72	36
F	27,1	22,7	210	21	10	4
G	35,6	40,2	330	80	4	7
H	19,3	18,9	28	52	2	5
I	33,7	30,7	30600	35	1	1
J	54,1	47,6	510	230	25	16
K	24,5	24,0	24	5	0	1
L	28,6	31,8	130	540	10	110
M	28,7	34,2	25	260	4	66
N	270	290	500	86	160	24
P	69	69	320	440	2	11
Q	41	52	57	140	500	68
R	46	52	460	39	4	5
S	320	32	-	-	-	-
T	50	61	68	2	2	1
U	22	20	15	120	1	100

lämpötila ja viipymä. Tutkituissa kohteissa pesäkkeiden lukumäärä oli useimmiten suurempi käsitellyssä vedessä kuin raakavedessä. Myös elvytysautomaattilla varustetuissa laitteissa (kohteet K-U) käsitellyn veden pesäkeluku oli korkeampi kuin raakaveden.

5.4 Paineen, pH-arvon ja suolapitoisuuden vaikutus anioninvaihtimen toimintaan

Laboratoriotutkimuksiin valittiin anioninvaihdin, jota oli käytetty neljä vuotta uraanin poistamiseksi ruoka- ja juomavedestä. Tänä aikana suodattimella oli käsitelty 78,34 m³ vettä. Raakaveden uraanipitoisuus oli keskimäärin 520 ± 40 µg/l, lyijypitoisuus 0,05 ± 0,02 Bq/l, poloniumipitoisuus 0,06 ± 0,01 Bq/l ja käsitellyn veden pitoisuudet olivat vastaavasti 0,4 ± 0,3 µg/l, 0,04 ± 0,02 Bq/l ja 0,01 ± 0,001 Bq/l. Näistä tuloksista laskemalla saadaan, että suodattimeen olisi pidäntynyt sen käytön aikana 40 ± 4 grammaa uraania, 1160 Bq lyijyä ja 3370 Bq poloniumia.

Näiden aineiden irrottamiseksi ioninvaihtohartsista tehtiin erilaisia suodatuskokeita (Kappale 3.6). Ne osoittivat, että uraani on erittäin tiukasti kiinnittyneenä anioninvaihtohartsiin (Taulukko 28). Paineekokeissa uraania irtosi hartsista alle promillen (0,0005 %) hartsiin pidättyneen uraanin määrästä. Myös pH-arvon muuttuminen vaikutti hyvin vähän uraanin irtoamiseen anioninvaihtohartsista. Veden suolapitoisuuden lisäämisellä oli selvä vaikutus uraanin irtoamiseen. Veden kloridipitoisuuden ollessa 620 mg/l lisääntyi käsitellyn veden uraanipitoisuus alle 1 µg/l:sta 28,6 µg/l:an. Kloridipitoisuuden noustessa kaksinkertaiseksi (1310 mg/l) käsitellyn veden uraanipitoisuus tuli 2,5-kertaiseksi (75,5 µg/l). Tämä oli tärkeää testata, koska veden kloridipitoisuuden ollessa 620 mg/l siinä ei ole vielä selvästi havaittavaa makuhaittaa. Veden suolapitoisuuden nousun aiheuttama haitta ioninvaihtimen toiminnalle voi jäädä havaitsematta.

Näiden tulosten mukaan pohjavesien suolapitoisuuden merkittävä nousu esimerkiksi rannikkoalueilla tai teiden läheisyydessä voi estää uraanin pidättymisen ioninvaihtimeen sekä irrottaa siihen jo pidättynyttä uraania.

Taulukko 28. Käytöstä poistetun anioninsuodattimen läpi virranneet vesimäärät sekä veteen irronneet radionuklidimäärät eri suodatuskokeissa. Kokeet tehtiin vakio-paineessa sekä vaihtuvassa paineessa, kahdella eri pH:lla ja kahdella eri suolapitoisuudella.

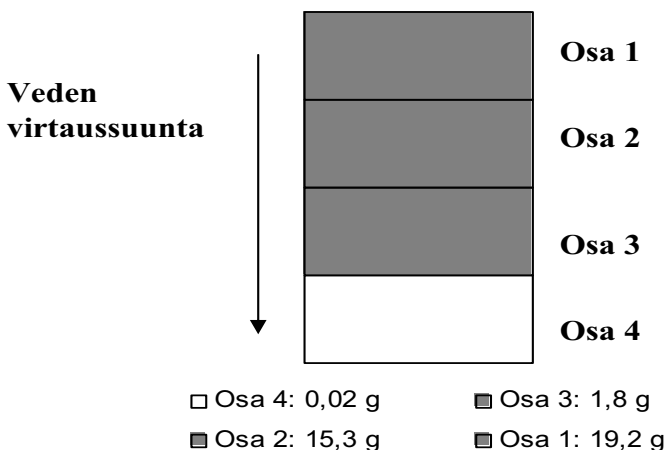
	Suodatettu vesimäärä (l)	²³⁸ U (µg)	²³⁴ U (Bq)	²¹⁰ Pb (Bq)	²¹⁰ Po (Bq)
Paineenvaihtelun vaikutus					
Tasainen paine (n. 3 bar)	47,6	4,0 (0,09 µg/l)	0,07 (0,0015 Bq/l)	2,7 (0,06 Bq/l)	0,45 (0,009 Bq/l)
Vaihtuva paine (2 → 5 bar)	31,2	21,0 (0,64 µg/l)	0,35 (0,011 Bq/l)	5,0 (0,16 Bq/l)	4,4 (0,14 Bq/l)
pH:n vaikutus					
pH 5	49,6	28,2 (0,57 µg/l)	0,44 (0,009 Bq/l)	3,3 (0,07 Bq/l)	2,0 (0,04 Bq/l)
pH 10	50,0	57,2 (1,14 µg/l)	0,90 (0,018 Bq/l)	3,0 (0,06 Bq/l)	1,6 (0,03 Bq/l)
Veden kloridipitoisuuden vaikutus					
Cl-pitoisuus vedessä 620 mg/l	50,1	1435 (28,6 µg/l)	21,7 (0,43 Bq/l)	4,3 (0,09 Bq/l)	3,2 (0,06 Bq/l)
Cl-pitoisuus vedessä 1310 mg/l	50,6	3820 (75,5 µg/l)	59,0 (1,17 Bq/l)	4,5 (0,09 Bq/l)	3,2 (0,06 Bq/l)

Lyijy ja polonium irtosivat veteen tasaisemmin riippumatta paineen, pH-arvon tai suolapitoisuuden vaihteluista. Tämä aiheutuu siitä, että ne ovat joko heikommin kiinnittyneinä hartsissa tai ovat kiinnittyneinä veden partikkeliaineeseen, joka ei ole kiinnittynyt hartsiin ionisidoksin.

5.4.1 Uraanin määrä käytetyssä anionihartsissa

Suodatuskokeiden jälkeen anioninvaihtohartsi jaettiin neljään 10 cm korkuiseen osaan (Kuva 32). Eri osien uraanipitoisuus mitattiin gammaspektrometrisesti, jolloin saatiin selville hartsiin jääneen uraanin määrä (Taulukko 29). Näiden mitausten perusteella hartsin uraanipitoisuudeksi saatiin 36 ± 4 grammaa, mikä vastaa hyvin raakaveden radiokemiallisten analyysien perusteella laskettua uraanipitoisuutta (40 ± 4 g). Gammaspektrometrisesti määritettyä uraanin kokonaisuutena voidaan pitää tässä tapauksessa luotettavampana kuin raakavedestä laskettua määrää. Syynä tähän on uraanipitoisuuden vaihtelu ja se, ettei näytteitä ole kerätty jatkuvasti. Neljän vuoden aikana uraanipitoisuus vaihteli 490–560 $\mu\text{g/l}$.

Ioninvaihtopylvään leikkeistä saadut tulokset osoittavat, että yli 90 % uraanista oli pidättynyt hartsin yläosaan sen nelivuotisen käytön aikana (Kuva 32). Ensimmäisessä 10 cm -osassa uraania oli 19,2 grammaa, mikä on noin 53 % hartsin kokonaisuraanimäärästä. Toisessa osassa uraanipitoisuus oli 15,3 grammaa, mikä oli noin 42 % suodattimen kokonaisuraanimäärästä.



Kuva 32. Uraanin jakauma (g) käytöstä poistetussa anioninvaihtohartsissa (7 l) sen neljävuotisen käytön jälkeen. Suodatetun veden kokonaisuutena oli 11 200 BV (78,34 m^3) ja raakaveden keskimääräinen uraanipitoisuus 450 $\mu\text{g/l}$. Anioninvaihtimella poistettiin uraani ainoastaan keittiön ruoka- ja juomavedestä.

Taulukko 29. Anioninvaihtohartsin eri osiin sitoutuneen uraanin määrä sekä osien uraanin pidätyskapasiteetti.

Osa	Hartsin määrä (g)	Uraanin laskennallinen kapasiteetti (g)	Hartsista mitattu uraani (g) ja osuus laskennallisesta kapasiteetista (g) (%)		Uraanin arvioitu kapasiteetti (g)	Kapasiteettia käyttämättä (g)
			(g)	(%)		
1	368	147	19,2	13	19,2	-
2	534	214	15,3	7,2	27,8	12,5
3	528	211	1,8	0,08	27,4	27,3
4	527	211	0,02	0,01	27,4	27,4

Kolmannessa osassa uraania oli noin 2 grammaa ja neljännessä osassa tästä enää sadasosa, 0,022 grammaa (Taulukko 29). Hartsin laskennallinen pidätyskapasiteetti uraanille on noin 780 grammaa, josta oli neljän vuoden käytön aikana kulutettu viitisen prosenttia. Todellinen kapasiteetti ei kuitenkaan ole yhtä suuri kuin hartsin laskennallinen kapasiteetti, koska veden muut anioniset yhdisteet (mm. humus) kuluttavat hartsin kapasiteettia.

5.5 Ioninvaihtimen käyttöikä

Taulukossa 29 esitettyjen tulosten perusteella voidaan arvioida ioninvaihtimen käyttöikä. Mikäli oletetaan, että ylimpään 10 cm kerrokseen ei enää pidäty uraania (koska sen alapuoliseen kerrokseen on jo pidättynyt merkittävä uraanimäärä), ylimmän kerroksen uraaninpidätyskapasiteetti olisi silloin 13 % laskennallisesta kapasiteetista. Jos oletetaan kahden seuraavan osan (2 ja 3) kapasiteetti vastaavanlaiseksi, on anioninvaihtimessa käyttämätöntä poistokapasiteettia uraanille vielä 39,8 grammaa. Tutkimuskohteen D raakaveden uraanipitoisuudella se vastaa noin 11 000 BV (77 m³).

Anioninvaihtohartsin mittaustulokset osoittavat, ettei ioninvaihtimen uraaninpoistokapasiteettia ei ollut kulutettu vielä loppuun neljän vuoden käytön aikana. Tämä nähdään myös siitä, ettei suodatetussa vedessä ole ollut uraania. Ennen anioninvaihtimen irrottamista vesijohtoputkesta sillä oli käsitelty vettä 11 200 BV. Yllä olevien tulosten perusteella anioninvaihtimen laskennallinen pidätyskapasiteetti uraanille on 20 000 ± 300 BV, kun kysymyksessä oli hyvänlaatuinen vesi. Täten anioninvaihdinta olisi voitu käyttää vastaavalla vedenkulutuksella ja uraanipitoisuudella vielä toiset neljä vuotta.

5.6 Radonin, raudan ja mangaanin samanaikainen poisto

Radonin sekä raudan ja mangaanin samanaikaista poistoa tutkittiin kahdessa eri kotitaloudessa. Toisessa kotitaloudessa oli Akva Filter Oy:n vedenkäsittelylaite ja toisessa Oy WatMan Ab:n vedenkäsittelylaite. Molempiin laitteisiin oli lisätty aktiivihieiltä radonin poistamiseksi vedestä.

AF-400, Akva Filter Oy

Akva Filter Oy:n vedenkäsittelylaitteen radoninpoistotehokkuus oli yli 96 % 1,5 vuotta kestäneen seurannan aikana (Taulukko 30). Raakavedessä radonpitoisuus vaihteli 1400–2000 Bq/l ja käsitellyn veden radonpitoisuus 21–74 Bq/l.

Laitteen radoninpoistokyky tutkittiin keräämällä 5 radonnäytettä 5 minuutin välein. Veden annettiin valua vakiovirtaamalla (noin 5 litraa/minuutti), jotta nähtiin nouseeko käsitellyn veden radonpitoisuus valutuksen seurauksena. Tulokset osoittavat, että käsitellyn veden radonpitoisuus oli runsaan valutuksen jälkeen keskimäärin kaksi kertaa korkeampi kuin heti valutuksen alussa otetussa vesinäytteessä. Taulukossa 30 on esitetty korkeimmat radonpitoisuudet kultaakin näytteenottokerralta.

Raakaveden rautapitoisuus vaihteli 2,3–2,9 mg/l ja käsitellyn veden 0,2–0,4 mg/l. Keskimääräinen poistuma oli 86 %. Raakaveden mangaanipitoisuudet vaihtelivat 0,29–0,34 mg/l ja käsitellyn veden 0,04–0,08 mg/l. Keskimääräinen poistuma oli 82 %. Raakaveden alumiinipitoisuus oli hyvin pieni, eikä selvää pitoisuuden nousua ollut havaittavissa käsitellyssä vedessä. Suodatuksen vaikutuksesta veden pH-arvo nousi, koska raudan ja mangaanin saostaminen edellyttää sitä.

Taulukossa 31 on esitetty ulkoisen säteilyn annosnopeudet Akva Filter Oy:n suodattimen pinnalla. Annosnopeusmittaukset aloitettiin suodattimen alaosasta, jonne eri massat on sijoitettu. Tässä esitettyjen kahden mittauksen välillä massat oli vaihdettu yhden kerran. Tämä näkyy myös suurimmasta annosnopeudesta, joka on myöhemmin tehdyssä mittauksessa (mittauspäivä 10.7.2001) ylempänä laitteen alareunasta.

Korkeimmillaan annosnopeus massan yläosassa oli noin 16 kertaa suurempi kuin normaalin taustasäteilyn annosnopeus. Suodatinsäiliö on ruostumatonta terästä, mikä osaltaan vaimentaa säteilyä. Laite ei lisää asukkaiden säteilyaltistusta, koska se on asennettu kellariin tekniseen tilaan.

Oy WatMan Ab:n laite

Oy WatMan Ab:n markkinoiman laitteen radonin- ja raudan poistotehokkuutta seurattiin vuoden pituisen tutkimusjakson ajan (Taulukko 32). Tutkimusjakson

Taulukko 30. Raakaveden ja käsitellyn veden radonin sekä eräiden veden laatuparametrien arvot eri näytteenotokerroilla. Tutkittavana laitteena oli Akva Filter Oy:n raudan ja mangaanipoistolaite AF-400.

Näytteen- ottopäivä	²²² Rn (Bq/l)		Fe (mg/l)		Mn (mg/l)		pH		Al (mg/l)	
	Raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	Raaka	Käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty
14.1.2000	1400	21	-	-	-	-	-	-	-	-
25.4.2000	1800	38	-	-	-	-	-	-	-	-
10.7.2000	-	44	-	-	-	-	-	-	-	-
25.10.2000	1800	28	2,3	0,47	0,29	0,051	7,0	7,8	0,006	0,008
16.1.2001	2000	35	2,7	0,28	0,29	0,036	7,2	8,0	<0,01	<0,01
21.3.2001	1900	55	2,9	0,41	0,34	0,044	7,1	7,9	0,008	0,008
10.7.2001	2100	74	2,6	0,19	0,34	0,079	7,1	7,5	0,006	0,008

Taulukko 31. Annosnopeudet ($\mu\text{Sv/h}$) Akva Filter Oy:n AF-400 raudan ja mangaanipoistolaitteen pinnalla eri korkeudella laitteen alaosasta.

Etäisyys laitteen aliosasta (cm)	Annosnopeus ($\mu\text{Sv/h}$) Mittauspäivä 11.8.1999	Annosnopeus ($\mu\text{Sv/h}$) Mittauspäivä 10.7.2001
80	0,8	1,1*
70	1,1	2,9
60	1,4	-
50	1,8	2,7
40	2,1	1,1
30	2,0	0,9
20	1,3	0,5
10	0,8	0,13
"tausta"	0,17 – 0,20	0,18

* mittaus suoritettu 95 cm suodattimen alareunasta.

aikana suodattimen radonin poistotehokkuus vaihteli 91–97 %:n välillä, jolloin käsitellyn veden radonpitoisuus oli alle 300 Bq/l. Radonin poistoa tutkittiin myös tässä kohteessa keräämällä 5 radonnäytettä 5 minuutin välein siten, että veden annettiin valua vakiovirtaamalla (noin 5 litraa/minuutti) näytteenoton ajan. Käsitellyn veden radonpitoisuus oli runsaan valutuksen jälkeen keskimäärin 20 prosenttia suurempi kuin valuttamatta otetussa vesinäytteessä. Taulukossa 32 on esitetty korkein radonpitoisuus kultakin näytteenotokerralta.

Raakaveden rautapitoisuus vaihteli 0,94–1,2 mg/l ja käsitellyn veden 0,13–0,34 mg/l. Keskimääräinen raudan poistuman oli 80 %. Mangaanipitoisuudet vaihtelivat raakavedessä 0,15–0,18 mg/l ja käsitellyssä vedessä 0,12–0,18 mg/l.

Taulukko 32. Raakaveden ja käsitellyn veden radonpitoisuudet ja eräiden veden laatuparametrien arvot eri näytteenottokerroilla. Tutkittava vedenkäsittelylaite oli Oy WatMan Ab:n kehittämä laite, joka on suunniteltu radonin ja raudan samanaikaiseen poistoon.

Näytteen- Ottopäivä	²²² Rn (Bq/l)		Fe (mg/l)		Mn (mg/l)		pH		KMnO ₄	
	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty
24.5.2000	2800	80	-	-	-	-	-	-	-	-
6.6.2000	2400	160	-	-	-	-	-	-	-	-
2.8.2000	1300	50	-	-	-	-	-	-	-	-
15.9.2000	3000	280	1,2	0,13	0,18	0,14	7,0	7,4	-	-
20.11.2000	2800	90	1,1	0,34	0,15	0,12	7,1	7,7	6,3	3,0
25.1.2001	2800	140	0,94	0,17	0,15	0,16	7,1	7,5	7,1	4,1
14.3.2001	2600	100	1,1	0,19	0,15	0,18	7,4	7,7	7,5	4,6
17.5.2001	2600	230	0,95	0,21	0,15	0,18	7,2	7,4	6,1	4,5

Taulukko 33. Takaisinhuuhtelun vaikutus suodatetun veden radonpitoisuuteen Oy WatMan Ab:n radonin ja raudan poistolaitteessa.

Vettä valutettu	ennen	heti	1 päivä	2 päivää	3 päivä	4 päivää
	takaisin- huuhtelua	takaisin- huuhtelun jälkeen	takaisin- huuhtelusta	takaisin- huuhtelusta	takaisin- huuhtelusta	takaisin- huuhtelusta
	²²² Rn (Bq/l)	²²² Rn (Bq/l)	²²² Rn (Bq/l)	²²² Rn (Bq/l)	²²² Rn (Bq/l)	²²² Rn (Bq/l)
1 min	51	2200	78	90	120	220
5 min	35	470	81	100	115	110
10 min	47	340	90	100	110	110
15 min	33	280	79	100	110	140
Raakavesi	1300	-	-	-	-	-

Suodattimen mangaanin poistuma oli siten hyvin heikko. Veden orgaaninen aines väheni myös suodatuksen aikana. Keskimäärin poistuma oli 40 %. Suodatuksen aikana veden pH-arvo nousi.

Poistolaite oli varustettu takaisinhuuhteluautomaatiikalla raudasakan poistamiseksi suodattimesta. Tutkimuksen aikana takaisinhuuhtelu suoritettiin neljä kertaa. Yhden takaisinhuuhtelun yhteydessä veden radonpitoisuutta seurattiin neljän päivää ajan takaisinhuuhtelun jälkeen (Taulukko 33). Takaisinhuuhtelun aikana vesi virtaa vastakkaiseen suuntaan verrattuna veden normaaliin virtaussuuntaan nähden. Takaisinhuuhtelun alkuvaiheessa (muutama minuutti kuluttua huuhtelusta) veden radonpitoisuus nousi hetkellisesti suureksi, koska takaisinhuuhtelu sekoitti radonin tasapainotilan suodattimessa. Radonpitoisuus laski kuitenkin nopeasti ollen jo 15 minuutin valutuksen jälkeen alle 300 Bq/l.

Taulukko 34. Ulkoisen säteilyn annosnopeus ($\mu\text{Sv/h}$) Oy WatMan Ab:n suodattimen pinnalla mitattuna eri korkeuksilla suodattimen yläosasta.

Etäisyys suodattimen yläreunasta (cm)	Annosnopeus ($\mu\text{Sv/h}$) Mittauspäivä 14.3.2001
10	9,4
20	33,7
30	48,9
40	41,6
50	25,3
60	10,4
"tausta"	0,1 - 0,2

Oy WatMan Ab:n suodattimessa aktiivihiihi ja raudanpoistomassa on pakattu samaan lasikuituvahvisteiseen suodatinkoteloon. Suodatin on siinä olevan aktiivihiihen takia sijoitettava ehdottomasti niin, ettei se lisää asukkaiden säteilyaltistusta. Sijoituspaikaksi sopii joko erillinen rakennus, jossa ei ole makuu- eikä oleskelutiloja tai huoltokaivo. Tässä tutkimuskohteessa suodatin oli asennettu erilliseen rakennukseen, jossa ei ollut asuintiloja. Annosnopeus suodattimen pinnalla oli suurimmillaan lähes 50 $\mu\text{Sv/h}$ (Taulukko 34).

5.7 Fluoridin, uraanin, radiumin, lyijyn ja poloniumin samanaikainen poisto

Fluoridin sekä uraanin, radiumin, lyijyn ja poloniumin samanaikaista poistoa tutkittiin kahdessa kotitaloudessa. Toisessa kotitaloudessa oli Oy Callidus Ab:n ioninvaihdin ja toisessa kotitaloudessa Alvitec Oy:n aktivoitu alumiinioksidisuodatin. Molemmissa kotitalouksissa laitteet oli asennettu keittiöön tiskipöydän allaskaappiin, joten niillä käsiteltiin ainoastaan ruoka- ja juomavesi.

Ioninvaihtomenetelmään perustuva fluoridin poistolaitte

Oy Callidus Ab:n fluoridin poistolaitteen kykyä poistaa vedestä radionuklideja seurattiin vuoden verran (8/2000–9/2001). Tutkimusjakson aikana vesinäytteitä kerättiin viisi kertaa ja laitteen massat vaihdettiin kaksi kertaa, elokuussa 2000 ja syyskuussa 2001.

Taulukko 35. Uraanin, radiumin, lyijyn ja poloniumin pitoisuudet raakavedessä ja käsitellyssä vedessä eri näytteenottokerroilla. Tutkittu laite on Callidus Oy:n markkinoimaa fluoridin poistolaite, jonka toiminta perustuu ioninvaihtoon.

Näytteen- ottopäivä	²³⁸ U (µg/l)		²²⁶ Ra (Bq/l)		²¹⁰ Pb (Bq/l)		²¹⁰ Po (Bq/l)	
	raaka	käsitelty	Raaka	Käsitelty	Raaka	Käsitelty	raaka	Käsitelty
18.7.2000	-	-	0,12	<0,01	-	-	-	-
6.11.2000	96	<1	0,14	<0,01	0,51	0,14	0,24	0,11
29.1.2001	420	<1	0,36	0,01	0,28	0,07	0,28	0,19
17.4.2001	320	<1	0,28	0,02	0,24	0,02	0,18	0,11
11.6.2001	290	<1	0,19	0,01	0,32	0,09	0,25	0,06

Tutkittu ioninvaihdin poisti vedestä myös uraania, lyijyä, poloniumia ja radiumia (Taulukko 35). Laitteen hartsi poisti uraania yhtä tehokkaasti kuin vahva orgaaninen anioninvaihtohartsi. Käsitellyn veden uraanipitoisuus oli koko tutkimusjakson ajan alle 1 µg/l. Laite poisti tehokkaasti myös radiumia (93–96 %), joka esiintyy pohjavesissä useimmiten kationisessa muodossa. Poistunut radium on voinut olla joko sitoutuneena anionisiin humushappoihin tai se on pidättynyt jälkisuodattimessa olleeseen hopeoituun aktiivihilleen. Aktiivihillen tarkoituksena on varmistaa, ettei veden mikrobiologinen laatu heikkene suodatuksen johdosta. Lyijyn poistumat vaihtelivat 70–90 % ja poloniumin poistumat 30–75 %. Koska lyijy ja polonium ovat pohjavesissä pääosin sitoutuneena veden partikkeliainekseen ne voidaan poistaa pohjavedestä vain osittain ioninvaihtomenetelmällä. Niiden esiintymistä pohjavesissä on käsitelty laajemmin luvussa 5.8.

Ioninvaihtohartsi poisti vedestä fluoridin lisäksi orgaanista ainetta, mangaania ja jonkin verran rautaa (Taulukko 36). Pesäkkeiden lukumäärä oli suurempi suodatetussa vedessä kuin raakavedessä. Suodatetun veden pitoisuus ylitti kerran Sosiaali- ja Terveysministeriön asettaman laatuvaatimuksen (100 pmy/ml).

Aktivoidun alumiinioksidin käyttöön perustuva fluoridin poistolaite

Alvitec Oy:n markkinoimaa fluoridin poistolaitetta (aktivoitua alumiinioksidia) tutkittiin 1,5 vuoden ajan, jona aikana vesinäytteitä kerättiin seitsemän kertaa ja suodattimen patruunat vaihdettiin kerran (marraskuu 2000). Laitteistoon kuuluu aktivoidun alumiinioksidipatruunan lisäksi hopeoitu aktiivihilipatruuna, jolla pyritään varmistamaan juomaveden mikrobiologista laatua.

Taulukko 36. Muutamien veden laatuparametrien arvot raakavedessä ja käsitellyssä vedessä eri näytteenotto-kerroilla. Käsitelyyn on käytetty ioninvaihtoperiaatteella toimivaa Callidus Oy:n merkkinomaista fluoridin poistolaitetta poistolaitetta.

Näytteen- ottopäivä	F (mg/l)		Fe (µg/l)		Mn (µg/l)		KMnO ₄ (mg/l)		Pesäkkeiden lukumäärä 37°C (pmy/ml)	
	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty
6.11.2000	1,5	<0,05	22	10	37	1	2,6	< 1	17	79
29.1.2001	2,2	<0,05	22	8	180	48	3,7	1,2	37	340
17.4.2001	2,0	<0,05	13	5	130	18	3,3	< 1	21	91
11.6.2001	2,6	<0,05	10	4	63	18	2,3	< 1	-	-

Taulukko 37. Uraanin, radiumin, lyijyn ja poloniumin pitoisuudet raakavedessä ja käsitellyssä vedessä eri näytteenotto-kerroilla aktivoituun alumiinioksidin käyttöön perustuvalla fluoridin poistolaitteella. Suodatinpatruuna on vaihdettu 25.8.2000 otetun vesinäytteen jälkeen.

Näytteen ottopäivä	²³⁸ U (µg/l)		²²⁶ Ra (Bq/l)		²¹⁰ Pb (Bq/l)		²¹⁰ Po (Bq/l)	
	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	Käsitelty
14.1.2000	190	6	0,19	0,08	0,52	0,003	0,48	0,005
26.4.2000	170	21	0,25	0,12	-	-	-	-
25.8.2000	245	43	0,39	0,21	0,53	0,02	0,53	0,35
6.11.2000	195	<1	0,30	0,02	0,54	0,09	0,58	0,01
29.1.2001	140	<1	0,21	0,02	0,26	0,03	0,64	<0,002
17.4.2001	160	<1	0,32	0,02	0,29	0,02	0,79	0,005
31.5.2001	160	<1	0,35	0,03	0,33	0,02	0,60	<0,002

Taulukosta 37 nähdään, että aktivoitu alumiinioksidi poistaa vedestä lähes kaiken uraanin ja poloniumin ja suurimman osan myös radiumista (94 %), kun käytössä on äskettäin käyttöönotettu patruuna. Käytön myötä patruunan poistotehokkuus heikkeni siten, että yhdeksän kuukauden kuluttua patruunan käyttöönotosta uraanin poistuma oli 82 %, radiumin poistuma 46 % ja poloniumin poistuma 34 %. Myös lyijyn poistuma oli hyvä (83 – 99 %), mutta se ei näyttäisi riippuvan yhtä selkeästi patruunan käyttöiästä kuin muilla nuklideilla.

Aktivoitu alumiinioksidisuodatin ei poistanut fluoridia yhtä tehokkaasti kuin ioninvaihtoperiaatteella toimiva fluoridin poistolaitte (Taulukot 36 ja 38). Koska fluoridi on ihmiselle välttämätön hivenaine, sitä ei tulisi poistaa vedestä kokonaan. Sosiaali- ja terveysministeriön asettama raja-arvo veden

Taulukko 38. Muutamien veden laatuparametrien arvot eri näytteenottokerroilla raaka-vedessä ja aktivoitun alumiinioksidin käyttöön perustuvalla fluoridin poistolaitteella käsitellyssä vedessä.

Näytteen- ottopäivä	F (mg/l)		Al (µg/l)		Fe (µg/l)		Mn (µg/l)		Pesäkkeiden lukumäärä 37°C	
	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty	raaka	käsitelty
6.11.2000	2,04	0,95	48	43	53	< 3	33	2	1	180
29.1.2001	2,11	1,22	< 5	18	36	4	7	3	18	21
17.4.2001	1,97	1,70	10	19	12	< 3	6	3	9	89
31.5.2001	1,96	0,37	10	39	370	18	6	2	-	-

Taulukko 39. Ulkoisen säteilyn annosnopeudet (µSv/h) eri paikoissa keittiötä. Mittauspäivä oli 14.1.2001.

Mittauspaikka	Annosnopeus (µSv/h)
Esisuodattimen pinnalla	0,70
Tiskipöydän kaappien ulkopuolella	0,25
Keittiön pöydällä	0,11

fluoridipitoisuudelle on 1,5 mg/l. Liiallinen fluoridin saanti aiheuttaa hammaskiilteen muodostumishäiriötä, hammasfluoroosia. Aiheuttaen muutoksia hohkaluun rakenteessa se voi myös lisätä luun murtumaherkkyttä.

Taulukosta 38 nähdään, että aktivoitu alumiinioksidi poisti vedestä tehokkaasti rautaa ja mangaania. Mikrobin määrä lisääntyi tässä kotitaloudessa vedenkäsitelyn vaikutuksesta. Pesäkkeiden määrä käsitellyssä vedessä oli kaikissa tutkituissa näytteissä korkeampi kuin raakavedessä ja ylitti kerran sosiaali- ja terveysministeriön laatuvaatimuksissa asetetun enimmäisarvon (100 pmy/ml). Taulukosta 38 nähdään myös, että suodattimesta liukeneva alumiini lisäsi käsitellyn veden alumiinipitoisuutta, mikä jäi kuitenkin kaikilla näytteenottokerroilla sen enimmäisarvoa (200 µg/l) selvästi pienemmäksi.

Alvitec Oy:n markkinoimaan fluoridin poistolaitteistoon kuuluu myös aktiivihiihisuodatin, joka poistaa vedestä radonia. Koska laitteisto on asennettu keittiöön, tiskipöydän alle, oli tärkeää mitata annosnopeus sen läheisyydessä. Annosnopeus mitattiin eri etäisyyksillä esisuodattimesta (Taulukko 39). Esisuodattimen pinnalla annosnopeus oli lähes 7-kertainen verrattuna keittiön pöydällä mitattuun annosnopeuteen, joka sijoittuu Suomesta mitattun ulkoisen

taustasäteilyn annosnopeuden vaihteluväliin (0,04–0,3 $\mu\text{Sv/h}$). Annosnopeus oli kohonnut myös allaskaapin ulkopuolella, kun kaapin ovet olivat suljettuna.

5.8 Lyijyn ja poloniumin sitoutuminen erikokoisiin pohjaveden partikkeleihin

Lyijyn ja poloniumin sitoutumista erikokoisiin pohjaveden partikkeleihin tutkittiin viidessä kotitaloudessa. Pohjavedessä esiintyy erikokoisia partikkeleita, kolloideja ja yhdisteitä, joiden kanssa lyijy ja polonium voivat muodostaa yhdisteitä tai adsorboitua niiden pinnoille.

Lyijy esiintyy pohjavesissä kahden arvoisena ja hydrolysoituu pohjavesissä muodostaen erilaisia yhdisteitä (PbOH^+ , $\text{Pb}(\text{OH})_2$ ja $\text{Pb}_3(\text{OH})^{2+}_4$). Lyijy on partikkelireaktiivinen ja adsorboituu helposti vedessä olevien mineraalien, kolloidien sekä humus- ja fulvohappojen pinnoille tai se muodostaa erilaisia komplekseja niiden kanssa. Lyijyn liukoisuus vedessä on riippuvainen pH-arvosta. Niukkaliukoisin lyijy on pH-arvon ollessa 9–10 välillä. Jos lyijy-yhdisteen liukoisuustulo ylitetään, vedessä olevat ionit liittyvät yhteen muodostaen kolloideja ja sakkoja. Nämä voivat edelleen adsorboitua erikokoisten partikkelien pinnoille riippuen lyijy-yhdisteen pitoisuudesta ja partikkelien määrästä vedessä.

Polonium muodostaa vedessä erilaisia hydrolysoitumistuotteita. Lievästi happamissa ja neutraaleissa olosuhteissa poloniumin esiintymismuodot ovat: $\text{PoO}(\text{OH})^+$, $\text{PoO}(\text{OH})_2$, PoO_2 , kun taas emäksisissä olosuhteissa polonium on PoO_3^{2-} -muodossa. Hydroksidimuotoisella ($\text{PoO}(\text{OH})_2$) poloniumilla on taipumus muodostaa yhdisteitä veden kolloidien ja partikkelien kanssa (Riekkinen 1997).

Taulukosta 40 nähdään, että lyijy oli raakavedessä useimmiten sitoutunut partikkeleihin, joiden koko oli yli 450 nm. Hyvälaatuisessa vedessä lyijy oli sitoutuneena kaikkein suurimpiin partikkeleihin (Kohde B). Rautapitoisessa vedessä (Kohde E, liukoista rautaa 1,2 mg/l) lyijy oli sitoutuneena pienempiin partikkeleihin (koko alle 100 nm) tai liukoisena (koko alle 5 kD). Tällöin vedessä ei ole rautasakkaa, johon lyijy voisi kiinnittyä. Kohteessa C mangaani muuttaa partikkelien kokojakaumaa ja lisää lyijyn sitoutumista partikkeleihin. Vedessä, jossa on paljon orgaanista ainetta (Kohde A), pääosa lyijystä on liukoisena tai sitoutuneena suurikokoisiin partikkeleihin. Suolapitoisessa vedessä (Kohde D) pääosa lyijystä on suurikokoisissa partikkeleissa, mutta sitä on selvästi havaittavia määriä myös pienemmissä partikkeleissa.

Hyvälaatuisessa vedessä polonium oli sitoutuneena joko kaikkein suurimpiin partikkeleihin tai liukoisena (Kohde B). Rautapitoisessa vedessä

Taulukko 40. Raakaveden lyijyn ja poloniumin pitoisuudet (Bq/l) pohjaveden erikokoisissa partikkeleissa ja prosentiosuudet suluissa.

Tutkimuskohde ja vesityyppi kohteessa	²¹⁰ Pb (Bq/l) raakavesi	²¹⁰ Pb:n pitoisuus ja %-osuus				²¹⁰ Po (Bq/l) raakavesi	²¹⁰ Po:n pitoisuus ja %-osuus			
		>450 nm	100– 450 nm	10 – 100 nm	<10 nm		>450 nm	100– 450 nm	10 – 100 nm	<10 nm
A (Humus)	1,2	0,42 (35)	0,08 (7)	<0,01	0,70 (58)	1,1	0,37 (34)	0,10 (9)	0,11 (10)	0,52 (47)
B (Hyvä laatu)	4,10	3,53 (86)	0,08 (2)	0,12 (3)	0,37 (9)	6,3	4,41 (70)	0,06 (1)	<0,01	1,83 (29)
C (Fe ja Mn)	0,75	0,72 (96)	0,01 (2)	<0,01	0,02 (3)	0,16	0,15 (91)	<0,01	<0,01	0,01 (8)
D (Suolainen)	2,13	1,57 (75)	0,31 (15)	0,15 (7)	0,10 (5)	5,2	0,94 (18)	0,20 (4)	2,86 (55)	1,20 (23)
E (Rauta)	0,34	<0,01	<0,01	0,21 (61)	0,13 (39)	0,48	0,05 (10)	0,08 (18)	0,35 (72)	<0,01

(Kohde E) pääosa poloniumista on sitoutuneena pienikokoisiin partikkeleihin. Mangaanipitoisuuden kasvaessa partikkelien koko vedessä kasvaa ja polonium on sitoutuneena isokokoiisiin partikkeleihin (Kohde C). Veden mineraalit lisäävät poloniumin sitoutumista pienikokoisiin partikkeleihin (Kohde D). Syynä tähän voi olla se, että kiinnittymispaikat poloniumille vähenevät, kun kilpailevien ionien määrä lisääntyy suolapitoisuuden kasvaessa. Vedessä, jossa on paljon orgaanista ainetta (Kohde A), polonium on sitoutuneena vaihtelevasti erikokoisiin partikkeleihin tai liukoisena.

Vedenkäsittelyn jälkeen lyijy on suurimmaksi osaksi sitoutuneena suurimpiin partikkeleihin (Taulukko 41). Vedessä, jossa on paljon orgaanista ainetta (Kohde A), pääosa lyijystä on sitoutuneena suurikokoisiin partikkeleihin. Loput lyijystä on sitoutuneena pienikokoisiin partikkeleihin ja liukoisena. Myös suolapitoisessa vedessä (Kohde D) osa lyijystä on sitoutuneena pienikokoisiin partikkeleihin tai liukoisena. Kohteessa D käsitellyn veden korkeampi lyijypitoisuus johtuu todennäköisesti vedenkäsittelylaitteesta irronneista partikkeleista, joihin lyijy on ollut sitoutuneena. Anioninvaihto- tai aktiivihilisuodattimella ei ollut selvää vaikutusta lyijyn sitoutumiseen erikokoisissa partikkeleissa.

Taulukosta 41 nähdään, että polonium esiintyi myös käsitellyssä vedessä useimmiten sitoutuneena suurikokoisiin partikkeleihin (koko yli 450 nm). Poikkeuksena oli rauta- ja mangaanipitoinen vesi (Kohde C), jossa polonium oli pääosin liukoisena (koko alle 10 nm). Rautapitoisessa vedessä (Kohde E)

Taulukko 41. Käsitellyn veden lyijyn ja poloniumin pitoisuudet (Bq/l) pohjaveden erikokoisissa partikkeleissa ja prosentiosuudet suluissa.

Tutkimuskohde ja vesityyppi kohteessa	²¹⁰ Pb (Bq/l) käsitelty vesi	²¹⁰ Pb:n pitoisuus ja %-osuus				²¹⁰ Po (Bq/l) käsitelty vesi	²¹⁰ Po:n pitoisuus ja %-osuus			
		>450 nm	100–450 nm	10–100 nm	<10 nm		>450 nm	100–450 nm	10–100 nm	<10 nm
A (Humus)	0,57	0,34 (60)	0,04 (7)	0,10 (17)	0,09 (16)	1,25	0,86 (69)	0,05 (4)	0,06 (5)	0,28 (22)
B (Hyvä laatu)	2,1	1,91 (91)	0,15 (7)	<0,01	0,04 (2)	3,0	2,34 (78)	<0,01	<0,01	0,66 (22)
C (Fe ja Mn)	0,40	0,36 (91)	<0,01	<0,01	0,03 (7)	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	0,03 (57)
D (Suolainen)	0,09	0,07 (82)	<0,01	0,01 (15)	<0,01 (3)	0,06	0,04 (74)	<0,01	0,01 (21)	<0,01
E (Rauta)	0,63	0,56 (88)	0,01 (2)	0,04 (7)	0,02 (3)	0,19	0,03 (15)	0,02 (12)	0,02 (12)	0,12 (61)

polonium oli sitoutuneena vaihtelevasti erikokoisiin partikkeleihin tai liukoisena. Vedenkäsittelylaitteella ei ollut selvästi havaittavaa vaikutusta poloniumin sitoutumiseen erikokoisissa partikkeleissa.

Koska huuhteluveden radioaktiivisuus jäi alle menetelmien määrittämissä rajoissa, voidaan olettaa, ettei näytteenottoastioiden seinämiin tai suodatuskalvoihin adsorboitunut lyijyä tai poloniumia.

5.9 Kyselytutkimus

Ensimmäiseen, yritysten postittamaan kyselyyn saatiin neljä vastausta. Toiseen, STUKin postittamaan kyselyyn vastasi 70 kotitaloutta, jolloin vastausprosentiksi saatiin 37. Yhteenveto vastauksista laadittiin erikseen ilmastimille, aktiivihiihluodattimille, ioninvaihtimille ja muille suodattimille. Neljä vastaajista oli liittynyt kunnalliseen vesijohtoon (Taulukko 42).

Ilmastimien käyttökokemuksia

Noin 30 prosenttia vastaajista käytti radonin poistoon ilmastimia. Niitä oli hankittu pääasiassa vakituisiin asuntoihin. Ilmastimen ohitusmahdollisuus ja lattia-kaivo puuttuivat noin 40 prosentista asennuksista. (Taulukko 43).

Tutkimusten mukaan ilmastimet poistivat radonia vedestä useimmiten hyvin. STUK oli määrittänyt raakaveden ja suodatetun veden pitoisuudet 17

Taulukko 42. Kyselytutkimukseen vastanneiden kotitalouksien vedenkäsittelylaitteet ja eri laiteyhdistelmät. Eri vedenkäsittelylaitteyhdistelmiä oli yhteensä 70 kappaletta.

Laitteiden lukumäärä		Yhdistelmien lukumäärä	
Aktiivihiiisuodattimia	41	Aktiivihiihi	25
Ioninvaihtimia	24	Aktiivihiihi ja ioninvaihdin	13
Ilmastimia	17	Muu suodatin	10
Muita suodattimia	13	Ilmastin	8
		Ilmastin ja ioninvaihdin	7
		Ioninvaihdin	3
		Aktiivihiihi ja muu suodatin	2
		Ilmastin ja aktiivihiihi	1
		Ilmastin, ioninvaihdin ja muu suod.	1
Laitteita yhteensä	95	Yhdistelmiä yhteensä	70

Taulukko 43. Tiedot kohteista, joissa radon poistettiin vedestä ilmastimella. Ilmastimeen liittyvät tiedot on ilmoitettu prosentteina.

Ilmastimeen liittyviä tietoja	Kyllä	ei	ei vast.
Ilmastimen ohitusmahdollisuus	59	35	6
Lattiakaivo	53	41	6
Ikkuna	35	59	6
Laite asuinrakennuksessa	35	59	6
Vedenkestävät materiaalit	71	24	6
Ääni häiritsee	30	65	6
Raportoituja vikoja	57	43	0
Vakituinen asunto	94	6	0
	Keskiarvo	minimi	maksimi
Ilmastimen ikä [a]*	2,8	0,5	6,2
Käyttäjien lukumäärä	3,5	2	6
Radon, raakavesi [Bq/l]	10 100	950	38 000
Radon, ilmastettu vesi [Bq/l]	311	25	1 300

* tammikuussa 2002

tapauksessa. Poistumien keskiarvo oli 90,8 %, minimi 39,4 % ja maksimi 100 %. Tutkituista ilmastimista 11 poisti yli 95 prosenttia radonista.

Ilmastimien osalta noin puolet vastaajista raportoi laitteessa esiintyneistä vioista. Kuluttajilla ei useinkaan ole ammattitaitoa ymmärtää

vikojen syytä, jolloin niitä ei välttämättä havaita. Seuraavassa on lueteltu vastaajilta saatuja tietoja ilmastimien vioista, toimintahäiriöistä, puutteista ja veden laadusta:

- Putkiliitokset olivat vuotaneet.
- Laitteen hanat oli asennettu sellaisiin paikkoihin, ettei niitä voitu käyttää.
- Varastosäiliö oli aiheuttanut veteen tunkkaisen maun.
- Radoninpoistokyky ei ollut luvaton mukainen.
- Pumpun lähtöputki oli jäänyt.
- Varastosäiliön pintaraja (pinnankorkeusanturi) oli ollut epäkunnossa.
- Ohjausautomaattikassa oli ollut useita vikoja eikä valmistaja pystynyt korjaamaan niitä. Korjaaminen oli jäänyt asiakkaan huoleksi.
- Magneettiventtiilin kela oli palanut.
- Kiertopumpun kansi oli jouduttu vaihtamaan noin kolme vuoden käytön jälkeen.
- Ilmastimen paineenkorotuspumpun ääni oli kantautunut rakenteiden kautta laajalle taloon.
- Ennen ilmastinta oleva magneettiventtiili oli jäänyt auki vedessä olleiden epäpuhtauksien vuoksi.
- Laitteen säädöt olivat olleet väärät, jolloin radonin poistuma oli ollut huono.
- Magneettiventtiili oli jumittunut, jolloin ilmastamatonta vettä oli päässyt vesilinjaan.
- Veden tuotto ei ollut ollut riittävä, vesi oli loppunut aika ajoin varastosäiliöstä.
- Huollon saaminen oli kestänyt 10 kuukautta ensimmäisestä yhteydenotosta.
- Laitteeseen oli asennettu tasavirta-magneettiventtiili, jonka kela paloi. Venttiilissä tulisi olla vaihtovirtakela.
- Laitteen puhdistaminen oli ollut hankalaa.
- Ilmanpoistoaukon ritilään ulkoseinällä oli kertynyt talvella jäätä. Kun se lopulta oli umpeutunut, ilmastimeen oli muodostunut painetta.

Aktiivihiihluodattimien käyttökokemukset

Kyselytutkimuksen perusteella tavallisimpia radioaktiivisten aineiden poistolaitteita ovat aktiivihiihluodattimet. Suodattimen ohitusmahdollisuus oli tehty noin 70 %:ssa asennuksissa. Noin 40 %:ssa kohteita oli asennettu esisuodatin ennen aktiivihiihluodatinta (Taulukko 44). Kahdeksassa kohteessa raakaveden

Taulukko 44. Teknisiä ym. tietoja kohteissa, joissa oli käytössä aktiivihiilisuodatin. Aktiivihiilisuodattimeen liittyvät tiedot ilmoitettu prosentteina.

Aktiivihiilisuodattimeen liittyviä tietoja	Kyllä	Ei	Ei vast.
Esisuodatin	41	59	0
Ohitusmahdollisuus	73	24	2
Takaisinhuuhteluautomaattikka	2	93	5
Veden kulutusmittari	29	71	0
Hiilet vaihdettu	10	90	0
Säteilysuojus	20	61	20
Raportoi vikoja	7	85	7
Vakituinen asunto	83	17	0
	Keskiarvo	minimi	maksimi
Suodattimen ikä [a]*	2,6	0,6	4,5
Käyttäjien lukumäärä	3,5	1	10
Radon, raakavesi [Bq/l]	3320	543	9300
Radon, suodatettu vesi [Bq/l]	58	1	510

* tammikuussa 2002

radonpitoisuus ylitti 5000 Bq/l. Tämä on korkein pitoisuus, jolla aktiivihiilisuodatinta suositellaan käytettäväksi sen aiheuttaman gamma-säteilyn vuoksi. Sitä suuremmilla pitoisuuksilla radon on poistettava ilmastusmenetelmällä.

Tutkimusten mukaan aktiivihiilisuodattimet poistivat radonia vedestä useimmiten hyvin. Raakaveden ja suodatetun veden tulokset löytyivät 38 tapauksessa. Poistumien keskiarvo oli 97,2 %, minimi 73,8 % ja maksimi 100 %. Tutkituista 38 suodattimesta 32 poisti yli 95 prosenttia radonista.

Monet asiakkaat ilmaisivat olevansa laitteeseen ja yritysten palveluun hyvin tyytyväisiä. Suoranaisia vikoja raportoitiin vain kolmesta kohteesta. Seuraavia vikoja, toimintahäiriöitä tai puutteita oli mainittu:

- Suodattimen kannen tiivistys oli hankalaa.
- Esisuodatin tukkeutuu, jolloin muodostuu painehäviöitä.
- Ei varmaa tietoa hiilen vaihtovälistä.
- 1½ vuoden käytön jälkeen veteen tuli paha haju ja hiili värjäsi veden.
- Aktiivihiilisuodattimen pinnalle tiivistyy vettä, joka valuu lattialle.
- Hiilen vaihto hankalaa ja kallista. Hiilen vaihtopalvelua ei ole tarjolla.
- Maku ja hajuhaittoja, jotka kuitenkin poistuivat käytön myötä.

Monissa tapauksissa haju- ja makuhaittojen syytä ei voitu selvittää, koska aktiivihiilisuodatin oli kytkettynä sarjaan anioninvaihtimen kanssa. Tavallisesti

aktiivihiihluosudatus poistaa vedestä maku- ja hajuhaittoja, joten mahdollisesti syynä hajuun tai makuun oli anioninvaihdin.

Ioninvaihdinten käyttökokemuksia

Toiseksi yleisimpiä radionuklidien poistolaitteita olivat ioninvaihtimet. Useissa tapauksissa ioninvaihtimella käsiteltiin koko talouden vesi ja monissa laitteissa oli takaisinhuuhteluautomaatiikka (Taulukko 45). Lähes kaikkien ioninvaihdinten yhteyteen oli asennettu joko ilmastin tai aktiivihiihluosudatin radonin poistoon. Monissa tapauksissa ioninvaihdin oli mahdollista ohittaa. Noin 20 % vastaajista ilmoitti laitteessa esiintyneistä vioista, puutteista tai toimintahäiriöistä.

Ioninvaihtimista kirjattiin seuraavia vikoja, toimintahäiriöitä tai puutteita:

- Vesi pehmenee liikaa, jolloin maku heikkenee ja korrodoivuus kasvaa. (Ongelma kationin vaihtohartsilla varustetuissa suodattimissa.)
- Haju ja makuhaittoja uusilla vaihtimilla ja hartseilla. Haitat kestävät jopa useita viikkoja.
- Regenerointiautomaatiikan kellomoottori irronnut kiinnikkeistään.
- Regenerointiliuoksen hävittäminen ongelmallista.

Taulukko 45. Tekniset ym. tiedot kohteista, joissa oli käytössä ioninvaihdin. Ioninvaihtimiin liittyvät tiedot on ilmoitettu prosentteina.

Ioninvaihtimiin liittyviä tietoja	Kyllä	ei	ei vast.
Vakituinen asunto	83	17	0
Ohitusmahdollisuus	71	25	4
Regenerointiautomaatiikka	42	50	8
Veden kulutusmittari	25	67	8
Hartsi vaihdettu	17	50	33
Kaikki vesi käsitellään	58	38	4
Raportoi vikoja	21	75	4
	Keskiarvo	minimi	maksimi
Suodattimen ikä [a]*	3,5	0,5	14,3
Käyttäjien lukumäärä	3,6	2	8

* tammikuussa 2002

6 Johtopäätökset

Radonia voidaan poistaa vedestä joko ilmastamalla tai aktiivihilisuodatuksella. Oikein suunnitellulla ilmastimella radon voidaan poistaa yli 90 prosenttisesti ja parhailla ilmastimilla 100 prosenttisesti. Tämän tutkimuksen aikana testattiin kaksi markkinoilla olevaa laitetta, joilla ei päästy testikohteissa talousveden radonpitoisuuden enimmäisarvon 1000 Bq/l alapuolelle. Ilmastimet eivät ole huonontaneet vedenlaatua. Ilmastuksen aikana veden happipitoisuus nousee, usein lähes 100 prosenttiin ja veden hiilidioksidipitoisuus laskee, mikä puolestaan nostaa veden pH-arvoa.

Toinen radonin poistoon käytetty menetelmä on aktiivihilisuodatus, joka poistaa radonin tehokkaasti, useimmiten yli 90 prosenttisesti. Kooltaan 39-litraisen suodattimen hiilien käyttöikä on noin kaksi vuotta ja 63-litraisen kolme vuotta, kun rakavesi on hyvälaatuista. Veden laatumääritysten mukaan aktiivihilisuodattimet eivät ole huonontaneet vedenlaatua. Ne poistivat vedestä jonkin verran rautaa ja humusta.

Uraanin poisto anioninvaihtimella onnistuu hyvin. Suodattimilla, jotka olivat kooltaan yli seitsemän litraa, päästiin yli 95 prosentin poistumiin ja käsitellyn veden uraanipitoisuus jäi alle 10 µg/l. Heikoimmat poistumat havaittiin hanasuodattimilla, joilla käsiteltyyn veteen jäi urania 1–60 µg/l raakaveden uraanipitoisuudesta ja veden valutusnopeudesta riippuen. Useita vuosia kestäneet veden laadun seurantatutkimukset eri tutkimuskohteissa ovat osoittaneet, etteivät anioninvaihtohartsilla varustetut laitteet ole huonontaneet veden laatua. Anioninvaihtohartsit poistaa vedestä orgaanisia aineita, sulfaattia ja joissakin paikoissa hiukan rautaa. Kationinvaihtohartsilla varustettu suodatin poistaa vedestä lähes kaiken kovuuden, jolloin käsitellystä vedestä tulee hyvin pehmeää.

Vesien suolapitoisuuden lisääntyminen voi aiheuttaa uraanin irtoamisen suodattimesta. Putkiston paineenmuutoksilla tai pH-arvon vaihteluilla ei ollut merkittävää vaikutusta uraanin irtoamiseen hartsista. Lyijy ja polonium irtosivat hartsista tutkituissa olosuhteissa urania helpommin, mutta pitoisuudet käsitellyssä vedessä olivat kuitenkin matalampia kuin raakavedessä (alle 0,15 Bq/l).

Radonin sekä raudan ja mangaanin samanaikainen poistaminen vedestä on mahdollista. Suomessa on tällä hetkellä kaksi yritystä, joiden tuotevalikoimaan kuuluu tällainen laitteisto. Tutkitut laitteet poistivat radonin vedestä yli 98 prosenttisesti.

Osa fluoridin poistoon tarkoitetuista laitteista poistaa myös uraania, radiumia, lyijyä ja poloniumia. Näistä ioninvaihtoperiaatteella toimiva fluoridin poistolaite poisti uraania yhtä tehokkaasti kuin anioninvaihtimet, kun taas aktivoitulla alumiinioksidisuodattimella uraanin poistuma vaihteli 80 ja 99 prosentin välillä patruunan käyttöiästä riippuen. Radiumin poistuma vaihteli näillä laitteilla 50 ja 90 prosentin välillä. Lyijyn ja poloniumin poistumat olivat paremmat aktivoitulla alumiinioksidisuodattimella (yli 90 %) kuin ioninvaihtoperiaatteella toimivalla suodattimella (30–90 %).

Lyijyn ja poloniumin poisto vedestä on vaikeaa, koska ne esiintyvät vaihtelevasti erilaisina kemiallisina yhdisteinä riippuen veden fysikaalis-kemiallisesta laadusta. Poistumat vaihtelivat suuresti riippuen näiden aineiden esiintymismuodosta pohjavedessä. Ioninvaihtimilla ja aktiivihiili-suodattimilla lyijy ja polonium voidaan poistaa vedestä vain osittain. Suodattimiin pidähtynyt lyijy ja polonium olivat useimmiten kiinnittyneinä pienikokoisiin partikkeleihin ja suodattimesta läpi mennyt lyijy ja polonium suurempi kokosiin partikkeleihin. Näiden tulosten perusteella vedenkäsittelylaitteella ei ollut selvästi havaittavaa vaikutusta lyijyn tai poloniumin sitoutumiseen erikokoisissa partikkeleissa.

7 Kirjallisuusviitteet

Annamäki M, Turtiainen T (Eds.). Treatment Techniques for Removing Natural Radionuclides from Drinking Water, STUK-A169. Helsinki: Oy Edita Ab, 2000.

Bennett DL. The Efficiency of Water Treatment Process in Radium Removal, Journal American Water Works Association, Vol 79, No. 12, p. 698–701, 1978.

Clifford DA. Removal of Radium from Drinking Water. In: Cothorn CR & Rebers PA. (eds.): Radon, Radium and Uranium in Drinking Water. Lewis Publishers, Inc., Boca Raton, Florida, 1990.

Cowen JP, Hodge VF, Folsom TR. Coprecipitation and Electrodeposition of Polonium from Sea Water. Analytical Chemistry, Vol. 49, No. 3, p. 494–496, 1977.

Etelämäki L. Veden käyttö Suomessa, SuomenYmpäristö nro 305. Helsinki: Oy Edita Ab, 1999.

Fox KR, Sorg ThJ. Controlling Arsenic, Fluoridide and Uranium by Point-of-Use Treatment. Journal American Water Works Association, Vol 79, No. 10, p. 81–84, 1992.

Hiisvirta L. Suomalainen vesi kansainvälisessä vertailussa, Vesitalous 4, 4 – 7, 1991.

Hodge VF, Hoffman FL, Foreman RL, Folsom TR. Simple Recovery of Plutonium, Americium, Uranium and Polonium from Large Volumes of Ocean Water. Analytical Chemistry, Vol. 46, No. 9, p. 1334–1336, 1974.

Huikuri P, Salonen L. Removal of Uranium from Finnish Groundwaters in Domestic Use with a Strong Base Anion Resin. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 245, 2: 385–393, 2000.

Huikuri P, Salonen L, Raff O. Removal of natural radionuclides from drinking water by point of entry reverse osmosis. Desalination 119: 235–239, 1998.

Hyypä J. Pohjaveden kemiallinen koostumus Suomen kallioperässä. Raportti YJT-84-10, 1984.

Häsänen E. Dating of sediments, based on Po-210 measurements. *Radiochem. Letters* 21 (4-5), 207-214, 1977.

Jokela P. Radionuklidien poistaminen pohjavedestä, Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja nro 461. Helsinki: Vesi- ja ympäristöhallitus, 1993.

Kuennen RW, Taylor RM, Van Dyke K, Groenevelt K. Removing Lead From Drinking Water With a Point-of-Use GAC Fixed-Bed Adsorber. *Journal American Water Association*, Vol. 84, No. 2, P. 91–1001, 1992.

Langmuir D. Uranium Solution—Mineral Equilibria at Low Temperatures with Applications to Sedimentary Ore Deposit. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42: 547–569, 1978.

Lehto J, Kelokaski P, Vaaramaa K, Jaakkola T. Soluble and Particle-Bound ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb in Groundwaters. *Radiochim. Acta* 85: 149–155, 1999.

Lieser KH, Ament A. Radiochemical Investigation of the Behaviour of Lead in Groundwaters. *Radiochim. Acta* 60: 27–32, 1993.

Lindén A. Utvärdering av radonavskiljare. Effekt på radon i dricksvatten från bergborrade brunnar. SSI-rapport 97:01. Stockholm: Statens strålskyddsinstitut, 1997.

Lowry JD, Brandow JE. Removal of radon from water supplies. *Journal of Environmental Engineering* 111, 4: 511–527, 1985

Lowry JD, Lowry SB. Modeling point-of-entry radon removal by GAC. *Journal AWWA* 79, 10: 85–88, 1987

Mazidji CN, Koopman B, Bitton G. Chelating resin versus ion-exchange resin for heavy metal removal in toxicity fractionation. *Water Science and Technology*, Vol 26, No3 1–2, p. 189–196, 1992.

Myllymäki P. Radonin ja uraanin poisto kalliopohjavedestä, Suomen ympäristö 50. Helsinki: Oy Edita Ab, 1996.

Myllymäki P, Turtiainen T, Salonen L, Helanterä A, Kärnä J, Turunen H. Radonin poisto porakaivovedestä, uusia ilmastimia ja aktiivihiilisuodatuksen käyttöönotto, Suomen Ympäristö 297. Helsinki: Oy Edita Ab, 1999.

Mäkeläinen I, Huikuri P, Salonen L, Markkanen M, Arvela H. Talousveden radioaktiivisuus – perusteita laatuvaatimuksille, STUK-A182. Helsinki: Oy Edita Ab, 2001.

Nazaroff WW, Doyle SM, Nero AV, Sextro RG. Potable water as a source of airborne ^{222}Rn in US dwellings: a review and assessment. *Health Physics* 52, 3: 281–295, 1987

Riekkinen I. Uraanin, radiumin, lyijyn ja poloniumin spesiaatio ja käyttäytyminen pohjavedessä. Pro Gradu tutkielma. Helsinki: Helsingin yliopisto, 1997.

Salonen L. Talousveden radioaktiivisuus ja sen poistaminen. *Vesitalous* 6, 3–10, 1992.

Salonen L. Measurement of low levels of ^{222}Rn in water with different commercial liquid scintillation counters and pulse shape analysis. In: Noakes JE, Schönhofer F, Polach HA (eds.). *Liquid scintillation Spectrometry 1992*. Radiocarbon 1993. Braun-Brumfield. Inc. Michigan. p. 361, 1993.

Salonen L. A Rapid Method for Monitoring of Uranium and Radium in Drinking Water. *The Science of the Total Environment*, 130/131 p.23–35, 1993.

Salonen L, Hukkanen H. Advantages of Low-Background Liquid Scintillation Alpha Spectrometry and Pulse Shape Analysis in Measuring Rn-222 and Ra-226 in Groundwater samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol 226, 67–74, 1997.

Salonen L, Huikuri P, Turtiainen T. Luonnon radioaktiiviset aineet pohjavesissä – poistolaitteiden tarve ja kehittäminen Suomessa. *Vesitalous* 4, 35 – 40, 1998.

Salonen L, Turunen H, Mehtonen J, Mjönes L, Hagberg N, Wilken R-D, Raff O. Removal of radon by aeration: Testing of various aeration techniques for small waterworks. STUK-A193. Helsinki: Oy Edita Ab, 2003.

ST-ohje 12.3. Talousveden radioaktiivisuus. Helsinki: Säteilyturvakeskus, 1993.

Turtiainen T, Kokkonen L, Salonen L. Removal of Radon and Other Natural Radionuclides from Household Water with Domestic Style Granular Activated Carbon Filters, STUK-A172. Helsinki: Oy Edita Ab, 2000.

Vajda N., LaRosa J., Zeisler P., Kis-Benedek Danesi & Gy, A Novel Technique for the Simultaneous Determination of ^{210}Pb and ^{210}Po Using a Crown Ether, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 37, No. 3, pp. 355 – 372, 1997.

Water in Finland—Basis for Quality Requirements), STUK-A182. Helsinki: Oy Edita Ab, 2001.

World Health Organization, 3rd Edition of Guidelines on Drinking water Quality, WHO, 2003, in press.

Vesi- ja viemäriulaitosyhdistys, Suomen kuntaliitto. Soveltamisopas talousvesi-asetukseen 461/2000. Helsinki: Copy-Set Oy, 2000.

VESINÄYTTEIDEN KERUUOHJELMA

Kohde	Huhti - Touko 2000	Kesä 2000	Heinä 2000	Elo 2000	Syys 2000	Loka 2000	Marras 2000	Joulu 2000	Tammi 2001	Helmi 2001	Maalis 2001	Huhti 2001	Touko 2001	Kesä 2001	Heinä 2001
TP 2 – Aktiivihiilisuodattimet															
A	X					X	X			X			X		
B								X		X	X		X		
C						X	X		X						X
D				X					X		X	X			X
E				X							X			X	
F				X			X		X		X		X		
G			X					X		X			X		
H			X			X			X		X				X
I					X					X			X		
J	X							X	X		X				X
TP 3 - Ioninvaihtimet															
A						X				X					
B				X								X		X	
C	X			X					X				X		
D				X				X					X		
E			X			X			X		X			X	
F				X			X		X		X		X		
G					X			X		X		X			X
H			X			X			X		X				X
I					X			X		X			X		
J					X	X		X		X			X		
K					X					X		X		X	
L	X			X			X		X		X		X		
M			X			X			X		X			X	
N							X		X		X		X		
O					X			X		X		X			
P						X		X		X			X		
Q						X			X		X		X		
R						X			X		X		X		
S							X		X		X		X		
T						X		X		X			X		
TP 4 – Radonin sekä raudan ja mangaanin samanaikainen poisto (A ja B)															
Fluorin sekä uraanin, radiumin, lyijyn ja poloniumin samanaikainen poisto (C ja D)															
A	X		X			X			X		X				X
B	X	X		X	X		X		X		X		X		
C			X				X		X			X			X
D				X			X		X			X		X	

A. Aukkaan tiedot

Vastajan nimi			
Lähiosoite			
Postinumero ja -toimipaikka			
Puhelin			

B. Veden hankinta ja käsittelylaitteistot

1. Vedentuotto- ja vedenkäsittelylaitteiston osat ja niiden järjestys kaivolta lukien (esim. 1. kaivopumppu, 2. painesäiliö, 3. partikkelisuodatin, 4. anioninvaihdin, 5. aktiivihiilisuodatin).

	Laitteen nimi	Laitteen merkki ja malli	Toimittaja/Myyjä
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			

2. Kuinka pitkä on vesijohto kaivon ja laitteiston välillä?
3. Onko kaivopumppu uoppumppu, ejektoripumppu vai muu pumppu?
4. Arvioikaa taloudessanne tapahtuvaa päivittäistä vedenkulutusta (pientaloasukas käyttää keskimäärin 130 litraa vettä päivässä henkilöä kohden).
5. Kuinka monta vakituista vedenkäyttäjää asuu taloudessa?

C. Veden laadun tutkimukset

1. Onko raakaveden laatu tutkittu?
2. Mikäli raakavetenne laatu on tutkittu, pyydämme teitä liittämään kopin tuloksista vastauskuoreen tai täyttämään oheisen taulukon.

KYSELYKAAVAKE

Radon (Rn)	Bq/l	Rauta (Fe)	mg/l
Kokonaisalfa	Bq/l	Mangaani (Mn)	mg/l
Uraani (U)	mg/l	KMnO ₄	mg/l
Radium 226	Bq/l	Kloridi (Cl)	mg/l
Lyijy 210	Bq/l	Fluori (F)	mg/l
Polonium 210	Bq/l	Sulfaatti (SO ₄)	mg/l
Kokonaiskovuus	mmol/l	Fosfaatti (PO ₄)	mg/l
Sähkönjohtavuus	mS/m	Pesäkkeiden	22°C pmy/ml
Sameus	FTU	lukumäärä	35°C pmy/ml

D. Ilmastinta koskevat tiedot

1. Ilmastimen tekniset tiedot (myyjä, asentaja, merkki ja malli, vesitiilavuus, säädetty ilmastusaika).
2. Milloin ilmastin on otettu käyttöön?
3. Missä ilmastettu vesi varastoidaan (painesäiliössä, ilmastimessa, varastosäiliössä, valekaivossa)?
4. Voiko ilmastimen ohittaa esim. hanoilla tai säädöillä?
5. Missä tilassa ilmastin sijaitsee (esim. kellari, tekninen tila, vaja)?

Onko tilassa lattiakaivo?		kyllä	ei
Onko tilassa ikkuna?		kyllä	ei
Onko tila asuinrakennuksessa?		kyllä	ei
Ovatko tilan seinä- ja lattiamateriaalit vedenkestäviä?		kyllä	ei
Tilan lämpötila	kesällä		talvella
Tuuletuskanava johtaa	katolle		ulkoseinälle

6. Koetteko, että ilmastimesta aiheutuva ääni on häiritsevää?
7. Onko ilmastintanne huollettu tai puhdistettu? Mitä tehtiin ja milloin?
8. Onko ilmastimessanne tai sen asennuksessa ilmennyt vikoja/toimintahäiriöitä? Näitä voivat olla esimerkiksi puutteellinen veden tuottokyky, huono radoninpoistotehokkuus, vesivuodot, liian korkea lämpötila ym. Lisäksi pyydämme teitä kertomaan, oletteko tyytyväinen ostamaanne ilmastimeen.

E. Aktiivihiihliisuodatinta koskevat tiedot

1. Aktiivihiihliisuodattimen tekniset tiedot (myyjä, asentaja, merkki ja malli, hiilitilavuus, onko takaisinhuuhteluautomaattikka).
2. Milloin suodatin on otettu käyttöön?
3. Onko suodattimeen vaihdettu uudet hiilet? Jos on, niin milloin?
4. Mikäli suodattimessanne on takaisinhuuhtelumahdollisuus, kuinka usein takaisinhuuhtelu tehdään/on tehty?
5. Onko suodattimen yhteyteen asennettu veden kulutusmittari? Jos on, niin kuinka paljon vastauspäivänä vettä on kulutettu?
6. Voiko aktiivihiihliisuodattimen ohittaa esim. hanoilla tai säädöillä?
7. Missä (huone)tilassa suodatin sijaitsee?
8. Mikäli suodatin sijaitsee asuinrakennuksessa, niin mikä on sen etäisyys:

Makuuhuoneeseen 1	metriä
Makuuhuoneeseen 2	metriä
Makuuhuoneeseen 3	metriä
Makuuhuoneeseen 4	metriä
Olohuoneeseen	metriä
Keittiöön	metriä
Kylpyhuoneeseen	metriä

9. Mistä materiaaleista on rakennettu sen huoneen, jossa suodatin sijaitsee, asuintiloihin päin oleva seinä? (pintamateriaali, kantava materiaali, eristeet)
10. Muiden väliseinien rakennusmateriaalit?
11. Onko suodattimen ympärille/läheisyyteen rakennettu säteilysuojus?

materiaali		paksuus	cm
suojan korkeus	cm		

12. Onko aktiivihiihliisuodattimessanne tai sen asennuksessa ilmennyt vikoja/toimintahäiriöitä? Näitä voivat olla esimerkiksi painehäviöt putkistossa, huono radoninpoistotehokkuus ym. Onko veden laadussa ollut selvästi havaittavia muutoksia? Lisäksi pyydämme teitä kertomaan, oletteko tyytyväinen

KYSELYKAAVAKE

ostamaanne suodattimeen.

F Ioninvaihdinta koskevat tiedot

1. Ioninvaihtimen tekniset tiedot (myyjä, asentaja, merkki ja malli, kationimassan tilavuus, anionimassan tilavuus, onko elvytysautomaattikka).
2. Ioninvaihtimen käyttötarkoitus? (Uraanin-, radiumin-, raudan-, mangaanin- tai humuksen poisto, veden pehmenys, muu)
3. Käsitelläänkö ioninvaihtimella kaikki talousvesi?
4. Milloin ioninvaihdin on asennettu kotitalouteen?
5. Onko ioninvaihtimen yhteyteen asennettu veden kulutusmittari?
6. Ioninvaihtimen asennuspaikka kotitaloudessa (esim. keittiö tai tekninen tila).
7. Onko ioninvaihdin mahdollista ohittaa esim. hanoilla tai säädöillä?
8. Mikäli ioninvaihtimenne on varustettu takaisinhuuhteluautomaattikalla, kuinka usein se tehdään?
9. Mikäli takaisinhuuhteluautomaattikkaa ei ole, oletteko vaihtaneet suodattimen massoja? Jos olette, niin milloin?
10. Kun otitte suodattimen käyttöönne, oliko veden laadussa havaittavissa muutoksia (esim. maku- tai hajuhaittoja)? Jos oli, kuinka nopeasti haitta poistui? Onko laitteessanne ollut vikoja/toimintahäiriöitä?

G. Muut vedenkäsittelylaitteet

(esimerkiksi raudan-, mangaanin-, kovuuden- ja fluoridin poistolaitteet, käänteisosmoosilaitteet ja nanosuodattimet. HUOM! ioninvaihtoon perustuvat muut laitteet kohdassa F)

1. Laitteen käyttötarkoitus.
2. Laitteen tekniset tiedot (myyjä, asentaja, merkki ja malli, muut mahdolliset tiedot).
3. Milloin laite on asennettu kotitalouteen?
4. Laitteen asennuspaikka kotitaloudessa (esim. keittiö tai tekninen tila).
5. Onko laite mahdollista ohittaa esim. hanoilla tai säädöillä?
6. Onko laitteessa tai sen asennuksessa ilmennyt vikoja/toimintahäiriöitä? Näitä voivat olla esimerkiksi puutteellinen veden tuottokyky, huono poistotehokkuus, vesivuodot, liian korkea lämpötila ym. Lisäksi pyydämme teitä kertomaan, oletteko tyytyväinen ostamaanne laitteeseen.