

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

ISBN 951-712-434-1

ISSN 0781-1705

Oy Edita Ab, Helsinki 2001

Myynti:

Säteilyturvakeskus

PL 14, 00881 HELSINKI

Puh. 09-759 881

MÄKELÄINEN I, HUIKURI P, SALONEN L, MARKKANEN M, ARVELA H.
Talousveden radioaktiivisuus – perusteita laatuvaatimuksille. STUK-A182, Helsinki 2001, 46 s.

ISBN 951-712-434-1

ISSN 0781-1705

Avainsanat radon, radioaktiivisuus, uraanisarjan isotoopit, talousvesi, säteilyannos, ohjearvo

TIIVISTELMÄ

Talousvedessä esiintyy monia luonnosta peräisin olevia radioaktiivisia aineita, joista säteilysuojelun kannalta haitallisin on radon-222. Radonin lisäksi vedessä esiintyy pitkäikäisiä alfa-aktiivisia aineita, kuten uraani-238, uraani-234, polonium-210 ja radium-226, sekä beeta-aktiiviset aineet lyijy-210 ja radium-228. Kohonneita pitoisuuksia esiintyy vain pohjavesissä. Kallioperän pohjavedessä pitoisuudet ovat selvästi korkeampia kuin maaperän vedessä.

Dosimetriaan perustuen voidaan arvioida, että talousveden radioaktiivisuudesta aiheutuu vuosittain noin 20 kuolemaan johtavaa syöpätapausta. Noin 40 % aiheutuu huoneilmaan vapautuneesta radonista, 40 % veden mukana nautitusta radonista ja 20 % muista luonnon radioaktiivisista aineista.

Raportissa on esitetty perusteluita talousveden radioaktiivisista aineista aiheutuvan säteilyaltistuksen rajoittamista ja valvontaa käsittelevälle ehdotukselle, jonka Säteilyturvakeskus on antanut maaliskuussa 1999 Sosiaali- ja terveysministeriölle. Ehdotuksessa vesilaitoksille talousveden radonpitoisuuden toimenpidearvo on 300 Bq/litra. Talousvedessä olevista muista radionuklideista kuin radonista aiheutuvan annoksen toimenpidearvoksi ehdotetaan 0,1 millisievertiä (mSv) vuodessa. Uusi ehdotus ei tuo merkittävää muutosta valvontakäytäntöön, vaikka laskennalliset annokset hieman muuttuvat. Yksityisille kaivoille esitetty päätösehdotus sisältää radonin raja-arvon 1000 Bq/l.

Vesilaitosten jakamaa verkostovettä, jossa radonpitoisuus 300 Bq/l ylittyy, käyttää tällä hetkellä nykyisten valvontatietojen perusteella alle 200 suomalaista. Noin 1000 verkostoveden käyttäjää saa muista radioaktiivisista aineis-

ta kuin radonista yhteensä suuremman vuosiannoksen kuin 0,1 mSv. Noin 20 000 henkeä käyttää yksityisen kaivon vettä, jonka radonpitoisuus ylittää STUKin enimmäisarvosuosituksen 1 000 Bq/l.

Radon voidaan poistaa vedestä joko ilmastamalla tai aktiivihiihluodatuksella. Uraani ja radium taas voidaan poistaa tehokkaasti ioninvaihtomenetelmällä ja lyijy ja polonium käänteisosmoosilaitteella.

Suomessa yleisesti käytössä olevia menetelmiä veden radonpitoisuuden määrittämiseksi ovat nestetuikemittaus ja alueellisissa elintarvike- ja ympäristölaboratorioissa käytettävä Mini-Assay mittarilla tehtävä mittaus. Radiumin ja uraanin pitoisuus voidaan arvioida nestetuikemittauksella mitatusta kokonaisalfa-aktiivisuudesta. Tarkka määrittäminen kaikista nuklideista on mahdollista käyttäen radiokemiallista analyysiä.

Tässä ehdotuksessa esitetyt enimmäisarvot perustuvat yksinomaan radioaktiivisuuteen. Uraanin kemiallisen myrkyllisyyden perusteella eri yhteyksissä ehdotetut raja-arvot ovat olleet alhaisempia kuin säteilyriskiin perustuvat raja-arvot. Noin 15 % suomalaisista käyttää vettä, jossa uraanipitoisuus ylittää WHO:n ehdottaman raja-arvon 2 mikrogrammaa litrassa.

*MÄKELÄINEN I, HUIKURI P, SALONEN L, MARKKANEN M, ARVELA H.
Radioactivity of drinking water in Finland – basis for quality requirements.
STUK-A182, Helsinki 2001, 46 pp.*

ISBN 951-712-434-1

ISSN 0781-1705

Keywords radon, radioactivity, uranium-series radionuclides, drinking water, radiation dose, guideline

ABSTRACT

Several natural radioactive substances occur in drinking water in Finland, among which radon-222 is the most harmful from radiation protection viewpoint. Also long-lived alpha-active substances like uranium-238, uranium-234, polonium-210 and radium-226, as well as beta-active lead-210 and radium-228 occur in drinking water. Elevated concentrations are found only in ground water, those originating from bedrock being clearly higher than those from soil.

Assessments based on dosimetry indicate that radioactivity in drinking water causes annually 20 fatal cancers. About 40% of cases is due to inhaled water-born radon, 40% is due to ingested radon and 20% is due to other natural radioactive substances than radon.

This report gives motivation for a proposition to restrict and monitor the radiation exposure from radioactive substances in drinking water, delivered by STUK to the Ministry of Social Affairs and Health in March 1999. The proposition introduces an action level of 300 Bq/l for radon concerning the waterworks. For other radionuclides except radon the action level proposed is 0.1 millisieverts per year (mSv/a), collectively. This new proposition does not bring in notable changes in the monitoring practice, although the calculated doses will change slightly. The proposed guideline for radon in private wells is 1000 Bq/l.

According to the present monitoring data, less than 200 Finns served by waterworks use drinking water with radon concentration exceeding 300 Bq/l. Approximately 1 000 waterworks consumers receive an annual dose that exceeds 0.1 mSv from other radionuclides than radon. About 20 000 Finns served by private wells use drinking water with radon concentration exceeding the STUK guideline 1 000 Bq/l.

Radon can be removed from drinking water using aeration or granular activated carbon filtration (GAC), whereas uranium and radium can be effectively removed by ion exchange resins and lead and polonium using reverse osmosis.

There are two methods to determine the radon concentration in drinking water, commonly used in Finland: liquid scintillation method and Mini-Assay measurement used by local foodstuff and environmental laboratories. The concentration of uranium and radium-226 can be assessed using alpha-activity measured by liquid scintillation method. Concentrations of all radionuclides can be accurately determined using radiochemical analysis.

The guidelines proposed in this report are based on radioactivity only. In respect of chemical toxicity of uranium, lower limits than those based on radiological effects have been set. Approximately 15% of Finns use drinking water with uranium concentration exceeding the guideline value of 2 micrograms per litre recommended by WHO.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT.....	5
SISÄLLYSLUETTELO.....	7
ALKUSANAT	9
1 TALOUSVEDEN RADIOAKTIIVISTEN AINEIDEN ESIINTYMINEN SUOMESSA	10
1.2 ALKUPERÄ JA SÄTEILYOMINAISUUDET	10
1.2 ESIINTYMINEN ERITYYPPISISSÄ TALOUSVESISSÄ	12
1.3 ALUEELLINEN ESIINTYMINEN	17
2 TALOUSVEDEN RADIONUKLIDIEN TERVEYSRISKIT	20
2.1 TALOUSVEDEN SYÖPÄRISKIN ARVIOINTI	20
2.2 TERVEYSRISKIT SUOMESSA	23
3 VOIMASSA OLEVAT SÄÄDÖKSET	27
3.1 ST-OHJE 12.3 ”TALOUSVEDEN RADIOAKTIIVISUUS”	27
3.2 KOKEMUKSIA VIRANOMAISVALVONNASTA	28
3.3 TALOUSVESIDIREKTIIVI.....	29
3.4 YHTEENVETO SÄÄDÖSTILANTEESTA VUODEN 2001	30
ALUSSA	30
4 EHDOTUKSEN TOIMENPIDEARVOT JA PERUSTELUT	32
4.1 VESILAITOKSET.....	32
4.2 YKSITYISET KAIVOT	32
4.3 PERUSTELUT	33
5 TALOUDELLISET VAIKUTUKSET	34
6 RADIOAKTIIVISUUDEN POISTOMENETELMÄT	36
6.1 RADONIN POISTO ILMASTUSMENETELMÄLLÄ	36
6.2 RADONIN POISTO AKTIIVIHILISUODATUKSELLE	37
6.3 URAANIN JA RADIUMIN POISTO.....	37
6.4 LYIJYN JA POLONIUMIN POISTO	38

6.5	TARJOLLA OLEVAT YRITYSPALVELUT	39
6.6	KUSTANNUKSET YKSITYISTALOUKSILLE	39
6.7	KUSTANNUKSET VESILAITOKSILLE	40
7	MITTAUSMENETELMÄT	42
7.1	RADON.....	42
7.2	PITKÄIKÄISET ALFA- JA BEETA-AKTIIVISET AINEET.....	43
7.3	STUKIN MITTAUSPALVELUT.....	43
8	URANIN KEMIALLINEN MYRKYLLISYYS	45
9	KIRJALLISUUSVIITTEET	47

ALKUSANAT

Säteilyturvakeskus antoi maaliskuussa 1999 Sosiaali- ja terveysministeriölle ehdotuksen talousveden radioaktiivisista aineista aiheutuvan säteilyaltistuksen rajoittamisesta ja valvonnasta.

Tässä raportissa on koottuna päätösehdotuksen valmistelussa käytettyä tutkimusaineistoa talousveden radioaktiivisuuden esiintymisestä ja terveysvaikutuksista Suomessa sekä kuvaus voimassa olevasta valvontakäytännöstä. Samoin raportissa on päätöksen toimeenpanossa tarvittavaa tietoa talousveden radioaktiivisuuden mittaamisesta, puhdistusmenetelmistä ja torjunnan kustannuksista. Raportissa on lyhyesti esitelty päätösehdotuksen toimenpiderajat ja näiden tärkeimmät valintaperusteet.

Vuonna 1999 annetun päätösehdotuksen toimeenpano on siirtynyt EU:n talusvesidirektiivin toimeenpano-ohjeiden viivästymisen johdosta. Tämä raportti on kirjoitettu vuonna tehdyn 1999 muistion pohjalta. Merkittävin muutos on tässä raportissa käytetty aikaisempaa alhaisempi juodun radonin annoskerroin. Muutos perustuu uusimpiin kansainvälisiin tutkimuksiin.

Talousveden uraanin toksisten vaikutusten rajoittaminen on rajattu päätösehdotuksen ulkopuolelle. Koska toimenpiteet talousveden uraanipitoisuuden ja muun luonnon radioaktiivisuuden alentamiseksi ovat sidoksissa toisiinsa, on raportissa lyhyt kuvaus uraanin kemiallisen myrkyllisyydestä ja sen esiintymisestä talousvesissä.

Säteilyturvallisuusohjeen 12.3 (ST-ohje 12.3 1993) perusteella vesilaitosten veden ja elintarvikkeiden valmistuksessa käytettävän veden radonpitoisuus saa olla enintään 300 Bq/l. Päätösehdotuksessa tämä toimenpideraja jää ennalleen. Yksityistalouksille Säteilyturvakeskus suosittelee radonpitoisuuden pienentämistä, mikäli veden radonpitoisuus ylittää 1 000 Bq/l.

1 Talousveden radioaktiivisten aineiden esiintyminen Suomessa

1.2 Alkuperä ja säteilyominaisuudet

Useimmat luonnon radioaktiiviset aineet eli radionuklidit kuuluvat hajoamis-sarjoihin. Niistä tärkein on uraanisarja, jonka lähtöaine on uraanin isotooppi uraani-238 (Taulukko 1). Säteilysuojelun kannalta eniten merkitystä on radonilla (radon-222). Sarjan muut aineet ovat syntyneet uraanista peräkkäisten hajoamisten tuloksena. Hajoamistuotteita kutsutaan myös tytäraineiksi. Talousvedessä esiintyviä pitkäikäisiä uraanisarjan jäseniä ovat lähtöaineen uraani-238:n lisäksi uraani-234, radium-226, polonium-210 ja lyijy-210. Radonin lyhytikäiset hajoamistuotteet esiintyvät aina yhdessä radonin kanssa, ja niillä on säteilyannoksen kannalta merkitystä vain harvoin.

Joskus vesissä saattaa esiintyä torium-sarjaan kuuluvaa radiumin isotooppia radium-228. Sarjoihin kuulumatonta kaliumin beeta-aktiivista isotooppia kalium-40 esiintyy aina pohjavesissä. Kalium on ihmiselle välttämätön alkua-aine, josta valtaosa saadaan ruoan mukana. Sen määrä kehossa pysyy suurin piirtein vakiona, eikä juomaveden kaliumpitoisuudesta aiheutuvaan säteilyannokseen voida vaikuttaa.

Normaalioloissa valtaosa talousveden säteilyannoksesta saadaan luonnon radioaktiivisista aineista eli (radio)nuklideista. Ihmisen toiminnan tuloksena veteen voi joutua radionuklideja ydinasekokeiden ja ydinenergian käytön yhteydessä sekä terveydenhuollossa ja teollisuudessa tapahtuvan radionuklidien käytön seurauksena.

Taulukko1. Uraani-238:n hajoamissarjan tärkeimmät radioaktiiviset aineet.

Nuklidi	Puoliintumisaika	Pääasiallinen säteilylaji	Huomautus
Uraani-238 (U)	4,5 miljardia vuotta	alfa	
Torium-234 (Th)	24 vrk	beeta, gamma	
Protaktinium-234 (Pa)	1,2 min	beeta, gamma	
Uraani-234 (U)	250 000 vuotta	alfa	
Torium-230 (Th)	75 000 vuotta	alfa, gamma	
Radium-226 (Ra)	1 600 vuotta	alfa, gamma	
Radon-222 (Rn)	3,8 vrk	alfa	Kaasu
Polonium-218 (Po)	3,1 min	alfa	Radonin lyhytikäinen hajoamistuote
Lyijy-214 (Pb)	27 min	beeta, gamma	Radonin lyhytikäinen hajoamistuote
Vismutti-214 (Bi)	20 min	beeta, gamma	Radonin lyhytikäinen hajoamistuote
Polonium-214 (Po)	0,000 16 s	alfa	Radonin lyhytikäinen hajoamistuote
Lyijy-210 (Pb)	22 vuotta	beeta	Radonin <i>pitkäikäinen</i> hajoamistuote
Vismutti-210 (Bi)	5,0 vrk	beeta	Radonin <i>pitkäikäinen</i> hajoamistuote
Polonium-210 (Po)	140 vrk	alfa	Radonin <i>pitkäikäinen</i> hajoamistuote
Lyijy-206 (Pb)	-	-	Pysyvä alkuaine

1.2 Esiintyminen erityyppisissä talousvesissä

Noin 87 % suomalaisista käyttää tällä hetkellä vesilaitosten verkostovettä. Tästä vedestä noin 40 % on pintavettä, 10 % tekopohjavettä ja 50 % luonnon omaa pohjavettä. Suurin osa vesilaitosten käyttämästä pohjavedestä on peräisin maaperästä, ja vain pieni osa kallioporakaivoista. Tekopohjavesi on maaperän läpi imeytettyä pintavettä. Siihen sekoittuu aina jonkin verran imeytysalueen omaa pohjavettä.

Järjestetyn vesihuollon ulkopuolella olevat taloudet käyttävät pääasiassa yksityisiä kaivoja. Toistaiseksi STUKilla ei ole tarkkaa tietoa siitä, kuinka suuri osa näistä on maaperään kaivettuja ja kuinka suuri osa kallioporakaivoja. STUK tulee selvittämään asiaa tarkemmin vuonna 2000 alkaneessa otantatutkimuksessa. Tässä muistiossa on käytetty maaperän kaivojen käyttäjien osuutena 9 % ja kallioporakaivojen 4 % suomalaisista.

Veden alkuperä vaikuttaa ratkaisevasti luonnon radionuklidien pitoisuuteen talousvedessä. Pintavesi ei sisällä juuri lainkaan radioaktiivisia aineita. Maaperän pohjavedessä kohonneita pitoisuuksia tavataan satunnaisesti. Kallioporakaivojen vedessä sen sijaan radionuklidipitoisuudet ylittävät voimassaolevat vesilaitoksille annetut raja-arvot melko usein. Julkisen vesihuollon piirissä korkeat radionuklidipitoisuudet ovat huomattavasti harvinaisempia kuin yksityisissä kaivoissa (Asikainen ja Kahlos 1977, Asikainen 1992, Salonen 1988, 1994).

Verkostovesien osalta käyttäjämäärät on tässä muistiossa arvioitu käyttäen STUKin tulostietokannassa olevia ottamo- ja verkkonäytteiden tuloksia. Lisäksi on käytetty Suomen Ympäristökeskuksen (SYKE) vesilaitostietokannasta saatuja verkkokohtaisia käyttäjämääriä ja pinta- ja pohjaveden osuuksia kussakin verkossa. Kaikista verkoista tai ottamoista ei ole mitattuja näytteitä, ja puuttuva radonia, kokonaisalfa- ja kokonaisbeeta-aktiivisuutta koskeva tieto on kunkin verkkotyypin pitoisuusjakaumasta lasketuilla luvuilla. Verkot on tätä varten luokiteltu veden alkuperän mukaisesti kuuteen ryhmään. Pitkäikäisten nuklidien pitoisuuksista on vähemmän mittaustuloksia kuin radonpitoisuudesta ja kokonaisalfa- ja kokonaisbeeta-aktiivisuuspitoisuuksista, ja siksi puuttuvat pitkäikäisten radionuklidien tulokset on arvioitu radonin, kokonaisalfan ja kokonaisbeetan avulla. SYKEN tieto on verkkokohtaista, ja kullekin verkolle on siten laskettu radionuklidipitoisuuksien keskiarvot. Käy-

tännössä verkot voivat käyttää useita ottamoita, ja veden pitoisuudet voivat vaihdella verkon eri osissa ja eri aikoina. Johtuen puuttuvista tuloksista, tietokannoissa olevista puutteista ja edellä mainitusta vaihtelusta tässä raportin arvioissa on epätarkkuutta.

Yksityiskaivojen osalta on STUKin omien radonmittaustulosten lisäksi käytetty paikallislaboratorioiden toimittamia tietoja niiden tekemistä porakaivojen radonmittauksista (Voutilainen ym. 2000). Näiden tulosten mukaan ottaminen oli perusteltua, koska niiden poisjättäminen olisi vääristänyt aineiston. Paikallislaboratoriot ovat tehneet omilla alueillaan seulontamittauksia, ja jos radonpitoisuus on ollut alle 300 Bq/l, vesi on todettu radonin osalta turvallisiksi. Jos toisaalta pitoisuus on ylittänyt 300 Bq/l, kaivonomistajille on suositeltu lisätutkimuksia STUKissa.

Kaivotulokset on painotettu kaivojen maantieteellisellä esiintymistiheydellä. Kuntakohtaiset painokertoimet on saatu SYKE:n ja STM:n valtakunnallisesta kaivotutkimuksesta (Korkka-Niemi ym. 1993, Korkka-Niemi ja Sipilä 1993) ja STUKin huoneilman radonin otantatutkimuksesta (Arvela ym. 1993). Rengaskaivotulosten painotukseen on käytetty kaivotutkimusaineistoa. Painotus on tarpeen erityisesti porakaivojen osalta, koska STUKin tietokannassa eteläisen Suomen porakaivot ovat yliedustettuina. Tähän on vaikuttanut terveysviranomaisten ja yleisön tietoisuus alueella esiintyvistä korkeista radonpitoisuuksista. Korkeiden pitoisuuksien löytyminen ja aiheen käsittely tiedotusvälineissä on usein näkynyt STUKissa palvelumittausten lisääntymisenä.

Taulukossa 2 on esitetty keskimääräiset, käyttäjämäärillä painotetut radionuklidipitoisuudet eri talousvesissä. Pitoisuudet ovat korkeimpia kallioporakaivoissa ja matalimpia verkostovedessä. Samoin taulukosta 3 nähdään, että suurin osa korkeille radonpitoisuuksille altistuvista henkilöistä on porakaivoveden käyttäjiä. Jos asiaa tarkastellaan vedestä saatavan vuosiannoksen perusteella, on tilanne samankaltainen (Taulukko 4).

Enimmäisarvoehdotuksessa käsitellään erikseen radonia ja radonin pitkäikäisiä hajoamistuotteita. Taulukossa 5 on esitetty pitkäikäisten nuklidien osalta eri annosrajat ylittävien käyttäjien lukumäärät eri vesilähteille.

Taulukko 6 kertoo tilanteen uraanin ja radiumin osalta. EU:n talousvesidirektiivi koskee vain näitä nuklideita. Koska verkostoveden osalta ei 0,1 mSv an-

noksen ylityksiä ole tiedossa, voidaan todeta, että Suomi toteuttaa tässä EU:n vesidirektiivin vaatimuksen.

Taulukko 7 osoittaa, että annoslyitykset pitkäikäisten nuklidien osalta johtuvat radonin pitkäikäisistä tytäraineista lyijy ja polonium. Suomi on toiminut edelläkävijänä talousveden radioaktiivisuuden tutkimuksessa. Täällä on mitattu laajemmin kuin missään muualla luonnon pitkäikäisten radionuklidien pitoisuuksia yksityiskaivovesissä. Suomessa on ehkä ensimmäisenä maailmassa tiedostettu, että hyvin radonpitoisissa vesissä polonium ja lyijy ovat radonin jälkeen seuraavaksi tärkeimmät radionuklidit säteilyannoksen kannalta (Salonen 1988).

Taulukko 2. Radionuklidien keskiarvopitoisuudet (Bq/l) vesilähteen mukaan. Koko väestön keskiarvo on painotettu käyttäjien lukumäärällä.

Nuklidi	Verkosto- vesi, Bq/l	Rengas- kaivot Bq/l	Porakaivot, Bq/l	Koko väestö, Bq/l
Radon-222	27	60	590	50
Uraani-234	0.02	0.02	0.6	0.04
Uranium-238	0.015	0.02	0.4	0.03
Radium-226	0.003	0.01	0.06	0.006
Polonium-210	0.003	0.01	0.07	0.007
Lyijy-210	0.003	0.04	0.06	0.008

Taulukko 3 Niiden henkilöiden lukumäärät, jotka käyttävät radonpitoisuudeltaan 100, 300 1000 ja 3000 Bq/l ylittävää talousvettä. Suluissa verkostoveden osalta arvioitu tilanne ennen ST-ohjeen 12.3 voimaantuloa.

Vesilähde	Käyttäjien lkm yh- teensä	100 Bq/l ylittävät	300 Bq/l ylittävät	1000 Bq/l ylittävät	3000 Bq/l ylittävät
Porakaivot	200000	120000	60000	20000	6000
Rengaskaivot	500000	60000	10000	20	0
Verkostovesi	4500000	200000	200 (10000)	0a (1000)	0a (100)
Yhteensä	5200000	400000	70000	20000	6000

a Ylitykset mahdollisia pienissä, kallioporavettä käyttävissä yksiköissä

Taulukko 4. Niiden henkilöiden lukumäärät, jotka saavat talousveden kaikista luonnon radioaktiivista aineista yhteensä vuotuisen säteilyannoksen, joka ylittää arvot 0,05, 0,1, 0,5 ja 1 mSv.

Vesilähde	Käyttäjien lkm yh- teensä	0.05 mSv ylittävät	0.1 mSv ylittävät	0.5 mSv ylittävät	1 mSv ylittävät
Porakaivot	200,000	150,000	100,000	40,000	20,000
Rengaskaivot	500,000	200,000	90,000	10,000	2,000
Verkostovesi	4,500,000	600,000	80,000	200	0
Yhteensä	5,200,000	1,000,000	300,000	50,000	20,000

Taulukko 5. Niiden henkilöiden lukumäärät jotka saavat talousveden pitkäikäisistä radionuklideista (uraani-234, uraani-238, radium-226, polonium-210 ja lyijy-210) vuotuisen säteilyannoksen, joka ylittää arvot 0,05, 0,1, 0,5 ja 1 mSv. Suluissa verkostoveden osalta arvioitu tilanne ennen ST-ohjeen 12.3 voimaantuloa.

Vesilähde	Käyttäjien lkm yhteensä	0,05 mSv ylittävät	0,1 mSv ylittävät	0,5 mSv ylittävät	1 mSv ylittävät
Porakaivot	200000	100000	50000	10000	5000
Rengaskaivot	500000	100000	50000	2000	100
Verkostovesi	4500000	20000	1000 (10000)	0a (100)	0a (100)
Yhteensä	5200000	200000	100000	10000	5000

a Ylitykset mahdollisia pienissä, kallioporavettä käyttävissä yksiköissä

Taulukko 6. Niiden henkilöiden lukumäärät jotka saavat talousveden uraanista ja radiumista (uraani-234, uraani-238 ja radium-226) vuotuisen säteilyannoksen, joka ylittää arvot 0,05, 0,1, 0,5 ja 1 mSv. Suluissa verkostoveden osalta arvioitu tilanne ennen ST-ohjeen 12.3 voimaantuloa.

Vesilähde	Käyttäjien lkm yhteensä	0,05 mSv ylittävät	0,1 mSv ylittävät	0,5 mSv ylittävät	1 mSv ylittävät
Porakaivot	200000	20000	10000	3000	1000
Rengaskaivot	500000	2000	600	0	0
Verkostovesi	4500000	2000	0a (1000)	0	0
Yhteensä	5200000	20000	10000	3000	1000

a Ylitykset mahdollisia pienissä, kallioporavettä käyttävissä yksiköissä

Taulukko 7. Niiden henkilöiden lukumäärät, jotka saavat talousveden lyijystä ja poloniumista (polonium-210 ja lyijy-210) vuotuisen säteilyannoksen, joka ylittää arvot 0,05, 0,1, 0,5 ja 1 mSv. Suluissa verkostoveden osalta arvioitu tilanne ennen ST-ohjeen 12.3 voimaantuloa.

Vesilähde	Käyttäjien lkm yhteensä	0,05 mSv ylittävät	0,1 mSv ylittävät	0,5 mSv ylittävät	1 mSv ylittävät
Porakaivot	200000	90000	50000	8000	4000
Rengaskaivot	500000	90000	40000	100	50
Verkostovesi	4500000	16000	0a (7000)	0a (100)	0a (100)
Yhteensä	5200000	20000	100000	8000	4000

a Ylitykset mahdollisia pienissä, kallioporavettä käyttävissä yksiköissä

1.3 Alueellinen esiintyminen

Radonpitoisuuden alueellista esiintymistä on tarkasteltu yksityiskohtaisesti STUKin julkaisemassa Porakaivoveden radonkartastossa (Voutilainen ym. 2000). Maaperän pohjavesissä radonpitoisuudet ovat selvästi matalampia kuin porakaivovesissä. Porakaivoveden radonpitoisuudet ovat korkeimpia entisen Uudenmaan läänin alueella ja Turun ja Porin läänin itäosassa. Kohonneita radonpitoisuuksia on myös Lapissa ja hajanaisesti myös muualla Suomessa, erityisesti graniittialueilla. Kohonneita kokonaisalfa-aktiivisuuspitoisuuksia, jotka aiheutuvat pääasiassa uraanista, esiintyy Etelä-Suomen läänin länsiosassa. Kuvassa 1 on esitetty porakaivoveden radonpitoisuuden alueellinen jakauma Suomessa.

Kuva 1. Radonpitoisuuden 1000Bq/l ylittävien porakaivovesien prosentuaalinen osuus kunnassa mitatuista porakaivoista Suomessa (Voutilainen ym.2000, kartta 4).

2 Talousveden radionuklidien terveysriskit

2.1 Talousveden syöpäriskin arviointi

Käytännön säteilysuojelutyössä käytettävä riskin mitta on säteilyannos. Annoksen yksikkönä on sievert (Sv), ja usein käytetään sen tuhannesosaa millisievertiä (mSv). Usean ihmisen yhteenlaskettu annos on nimeltään kollektiivinen annos, ja sen yksikkö on mansievert (manSv). Kun ihmisen kehoon pääsee radioaktiivisia aineita ruoansulatuskanavan kautta tai hengityksen mukana, hän saa sisäisen säteilyannoksen. Talousveden aiheuttama annos riippuu veden radioaktiivisten aineiden pitoisuuksista, säteilymyrkyllisyydestä ja nautitun veden määrästä. Tietyn aineen säteilymyrkyllisyyttä eli kykyä aiheuttaa annosta kuvataan sen annosmuunnoskertoimella, jonka yksikkö on Sv/Bq.

Vedestä huoneilmaan vapautuva radon altistaa ihmisen säteilylle sekä hengitettynä että juotuna. Suurin osa hengitysannoksesta aiheutuu radonkaasun lyhytikäisistä hajoamistuotteista. Muut talousveden radioaktiiviset aineet lisäävät ihmisen säteilyannosta ainoastaan ruoan ja juoman mukana nautittuina.

Radioaktiivisista aineista aiheutuvaa syöpäriskiä voidaan arvioida joko suorilla väestön sairastumista selvittävillä epidemiologisilla tutkimuksilla tai käyttämällä laskennallisia annosarvioita eli dosimetriaa. Dosimetria käyttää hyväkseen tietoa siitä, mihin elimiin radioaktiiviset aineet kulkeutuvat elimistöön jouduttuaan ja kuinka pitkään ne siellä viiptyvät. Näihin tietoihin perustuvia nk. biokineettisiä malleja voidaan testata eläinkokeilla ja vapaaehtoisilla koehenkilöillä. Annosta arvioitaessa otetaan huomioon myös nuklidin ja sen tytäraineiden lähettämän säteilyn lajit ja altistuneiden elinten säteilyherkkyys. Syöpätapausten määrät voidaan arvioida annoksista käyttäen Kansainvälisen säteilysuojelukomission ICRP:n arviota, jonka mukaan kollektiivinen annos 1 manSv aiheuttaa 5% lisäyksen kyseisen väestön kuolemaan johtavissa syöpätapauksissa. Tämän arvion tärkeimpänä tietolähteenä on ollut Hiroshiman ja Nagasakin elonjääneiden keskuudessa suoritettu seurantatutkimus, joka jatkuu yhä.

Suuri osa veteen liuenneesta radonista vapautuu huoneilmaan vettä kuumenttaessa, esimerkiksi pyykin tai astianpesun yhteydessä, sekä myös suihkua käytettäessä. Veden huoneilmaan tuottama radonpitoisuus riippuu mm. käytetyn veden määrästä, asunnon koosta ja ilmanvaihdosta. Asunnon vedenkäyttötilojen, kuten keittiön ja kylpyhuoneiden sijainnilla ja näiden tilojen omilla ilmanvaihtojärjestelyillä on myös vaikutusta radonpitoisuuteen. Maailmalla käytetään yleisesti arviota, jonka mukaan veden radonpitoisuus 1 000 Bq/l nostaa huoneilman radonpitoisuutta 100 Bq/m³ (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1993, 2000). Yksittäisessä taloudessa voi veden radonpitoisuuden vaikutus ilmaan vapautuneen radonin pitoisuuteen olla huomattavastikin tätä pienempi tai suurempi.

Radonin poistoon tarkoitettu ilmastinlaite poistaa vedestä radonkaasun, mutta ei radonin lyhytikäisiä hajoamistuotteita. Hajoamistuotteista on kahden tunnin kuluttua ilmastuksesta jäljellä vedessä noin 20 %, ja neljän tunnin kuluttua 1 %. Niistä saattaa aiheutua annosta, jos veden radonpitoisuus on hyvin korkea.

Hengitysilman radonin aiheuttama syöpäriski tunnetaan paremmin kuin juomaveden aiheuttama riski. Hengitysilman riskistä on runsaasti epidemiologisista tietoa sekä kaivos- että asuinympäristössä. Luotettavimmat kaivostutkimukset yhdistävä nk. BEIR VI-tutkimus päätyy melko korkeaan riskiarviointiin (National Research Council 1999). Huoneilman tutkimuksista suurin on ruotsalainen Pershagenin ja hänen työtovereittensa tutkimus (Pershagen et al. 1994). Siinä saatiin selvä näyttö sille, että radon lisää keuhkosityöpäriskiä. Myös Suomessa on selvitetty radonin ja keuhkosityövän välistä yhteyttä (Auvinen et al. 1996, Ruosteenoja et al. 1996). Suomalaisissa tutkimuksissa saatiin viitteitä riskistä, vaikka tulos ei ollut kummassakaan tutkimuksessa tilastollisesti merkitsevä. Suomi osallistuu EU-projektiin, jossa tullaan yhdistämään kaikki eurooppalaiset ja myöhemmin myös pohjoisamerikkalaiset huoneilman radontutkimukset. Eri tuloksia yhdistelemällä voidaan saada tarkempi arvio sisäilman radonin aiheuttaman syöpäriskin suuruudelle.

Talousveden radionuklidien käyttäjistä ei ole tehty sellaisia epidemiologisia tutkimuksia, joiden perusteella voisi arvioida syöpäriskin suuruutta. Tutkimukset ovat olleet lähinnä ekologisia eli ryhmätason vertailuja tai sitten pieneköjä tapausverrokki-tutkimuksia. Useimmiten on tutkittu radiumin ja joskus myös radonin aiheuttamaa syöpäriskiä. Radiumin riskeistä on tutkimuksia myös muun kuin juomaveden kautta saadusta altistuksesta. Viime

vuosisadan ensimmäisellä puoliskolla, kun radioaktiivisuuden liittyviä riskejä ei vielä tunnettu, itsevalaisevia kelloja maallaneet työntekijät saivat sivellintä suulla muotoillessaan radiumia kehoonsa. Tässä joukossa havaittiin radiumin aiheuttamia luusyöpä. (National Research Council 1988). Suomessa on käynnissä talousveden radioaktiivisuuden terveysriskejä selvittävä epidemiologinen tutkimus, joka valmistunee vuonna 2001.

Biokineettiset mallit osoittavat, että juomaveden radon lisää säteilyannosta mahalaukulle ja siten myös mahasyövän riskiä (Kendall et al. 1988, National Research Council 1999b). Muiden elinten saama annos on huomattavasti pienempi. Talousveden pitkäikäiset radionuklidit lisäävät mallien mukaan munuais-, maksa-, rakko- ja luusyöpää sekä leukemiaa (International Commission on Radiological Protection, 1994, 1995).

Juomaveden mukana saadun radonin aiheuttamasta annoksesta ja riskistä on aikojen kuluessa esitetty hyvinkin erilaisia arvioita. Täyttä yksimielisyyttä ei tieteellisessä yhteisössä ole vielä saavutettu. Tässä raportissa käytetään uusinta, Yhdysvaltain tiedeakatemian vuonna 1999 julkaisemassa raportissa esitettyä ja Yhdistyneiden kansakuntien vuoden 2000 UNSCEAR-raportin omaksumaa riskiarviota (National Research Council 1999b, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000). Tutkimuksen perusteella laskettu riskiarvio on noin kolmasosa edellisestä, vuonna 1993 julkaistussa UNSCEAR-raportissa esitetystä arvosta (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1993). ST-ohjeen 12.3 radonin aktiivisuuspitoisuuden raja-arvon määrittämiseen oli käytetty em. vuoden 1993 arviota.

Tiedeakatemian raportissa todetaan, että radonin ja sen lyhytikäisten hajoamistuotteiden alfahiukkasten kantama ei yllä mahalaukun seinämän säteilyherkkiin soluihin. Täten säteilyannos riippuu siitä, missä määrin radon tunkeutuu mahalaukun sisällöstä sen seinämään. Aikaisemmin arvioitiin radonpitoisuuden olevan sama mahalaukun sisällä ja seinämässä. Tarkempien laskujen perusteella raportissa on päädytty siihen, että konservatiivisenkin arvion mukaan radonpitoisuus mahalaukun seinämässä on vain 30 % sisällön radonpitoisuudesta.

Tiedeakatemian raportissa otetaan kantaa myös lasten riskeihin. Alle yksivuotiaan annoskonversiokerroin on noin kymmenkertainen verrattuna aikuisen kertoimeen. Kuitenkin lasten pienemmästä vedenkulutuksesta

johtuen kymmenenä ensimmäisenä elinvuonna saatu altistus lisää henkilön elinikäistä riskiä vain noin 30 %. Tällä perusteella raportissa ei löydetty perustelua sille, että lapset tai jokin toinen ihmisryhmä olisi erityisen herkkä juomaveden radonille.

2.2 Terveysriskit Suomessa

Suomessa talousvesien eniten annosta aiheuttava radionuklidi on radon. Pitkäikäisistä radionuklideista annoksen kannalta seuraavina tulevat polonium ja lyijy, jotka esiintyvät usein samoissa vesissä radonin kanssa. Myös uraani voi joskus nostaa vedestä saatavaa annosta. Uraani poikkeaa muista radionuklideista siinä suhteessa, että se on todennäköisesti kemiallisena myrkkynä haitallisempi kuin radioaktiivisena aineena. Uraanin merkitystä säteilyannoksen ja myrkyllisyyden kannalta käsitellään lyhyesti luvussa 8. Radium on Suomessa säteilysuojellinen ongelma vain poikkeustapauksissa, lähinnä suolaisissa vesissä.

Porakaivojen käyttäjät saavat suurimmat annokset. Noin 200 000 porakaivonkäyttäjää saa yhtä suuren kollektiivisen annoksen kuin 4,5 miljoonaa vesilaitosvettä käyttävää henkilöä. Suurin mittausten perusteella arvioitu porakaivonkäyttäjän vuosiannos on ollut 70 mSv vuodessa.

Asuntojen sisäilman radonin on arvioitu aiheuttavan Suomessa kaikkiaan noin 100 – 600 keuhkosityöpätapausta vuodessa. Näistä noin 4 % aiheutuu talousvedestä sisäilmaan vapautuneesta radonista. Merkittävin osa sisäilman radonista on peräisin rakennuksen alla olevasta maa- ja kallioperästä ja osa myös rakennusmateriaaleista. Radonin aiheuttamista keuhkosityövistä suurin osa tulee tupakoitsijoille. Tupakoinnin vähentäminen vähentää myös riskiä saada radonin aiheuttama keuhkosityöpä.

Ruoan ja juoman mukana nautitusta radonista aiheutuneen annoksen laskemiseen on tässä raportissa käytetty edellä kuvatussa Yhdysvaltain tiedeakatemian julkaisussa esitettyjä annosmuunnoskertoimia. Pitkäikäisten radioaktiivisten aineiden aiheuttamien annosten laskemiseen on taas käytetty EU:n perusnormin mukaisia aikuisten annosmuunnoskertoimia (Council Directive 1996). Nekin ovat hiukan muuttuneet ST-ohjetta 12.3 vuonna 1992 laadittaessa käytetyistä arviosta (ST-ohje 12.3. 1993), jotka perustuivat julkaisuun ICRP 61 (International Commission on Radiological Protection

1991). Pitkäikäisten nuklidien osalta oletetaan, että vettä juodaan 2,2 litraa vuorokaudessa, ja radonin osalta, että suoraan hanasta laskettua keittämätöntä vettä, josta radon ei ole vapautunut, nautitaan 0,5 litraa vuorokaudessa.

Taulukko 8. Eri vesilähteistä ja eri radionuklideista aiheutuvat keskimääräiset säteilyannokset (mSv vuodessa) aikuisille.

Nuklidi	Verkosto- vesi	Rengaskaivot	Porakaivot	Painotettu keskiarvo
Radon-222	0.02	0.03	0.4	0.03
Uraani-234	0.0008	0.008	0.02	0.0014
Uraani-238	0.0005	0.006	0.01	0.0009
Radium-226	0.0007	0.002	0.01	0.0014
Polonium-210	0.003	0.01	0.07	0.006
Lyijy-210	0.0015	0.02	0.03	0.005
Annos yhteensä	0.02	0.07	0.5	0.05

Taulukossa 8 on esitetty eri tyyppisistä vesistä ja eri radionuklideista aiheutuvat annokset Taulukon 2 keskipitoisuuksille. Taulukossa 9 on esitetty pitkäikäisistä radionuklideista aiheutuva keskimääräinen ja maksimiannos aikuisille eri radonpitoisuuden arvoilla. STUKin suosittelemaa yksityisten kaivojen radonpitoisuuden enimmäisarvoa 1 000 Bq/l suositellaan myös seulontarajaksi muiden radioaktiivisten aineiden mittaukselle. Taulukosta 9 voidaan havaita, että 1 000 Bq/l radonia rajoittaa melko tehokkaasti myös pitkäikäisistä nuklideista saatavaa annosta. Vaikka pitkäikäiset radionuklidit aiheuttavat yksittäisiä muutamien mSv:ien vuosiannoksia, tällaiset tapaukset ovat suhteellisen harvinaisia. Yhdessä mitatuista porakaivoista, missä radonpitoisuus alittaa 300 Bq/l, on veden pitkäikäisistä radionuklideista saatava vuosiannos 6,4 mSv. Annos on suuri, jos sitä verrataan esimerkiksi vesilaitosten turvallisuustavoitteeseen 0,5 mSv vuodessa. Se on kuitenkin pienempi kuin sisäilman radonin enimmäisarvon (400 Bq/m³) aiheuttama vuosiannos 7 mSv.

Kuten edellä on todettu, tieteellisissä tutkimuksissa esitetyissä ja kansainvälisten järjestöjen omaksumissa riskiarvioissa on suurta vaihtelua. Kuvasta 2 voidaan nähdä, mitä kyseiset riskiarviot merkitsisivät Suomen oloihin sovellettuina.

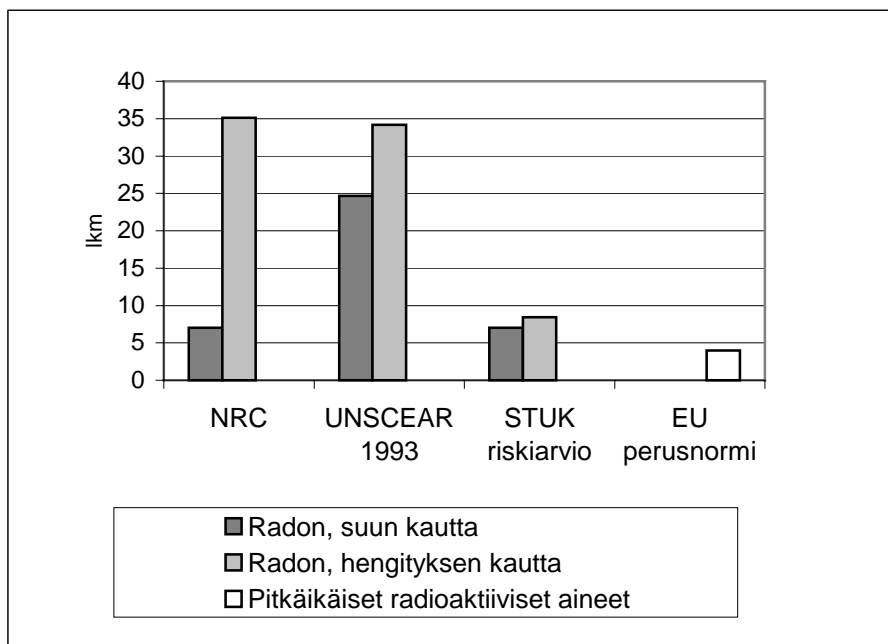
Taulukko 9. Pitkäikäisistä radionuklideista yhteensä aiheutuva keskimääräinen annos (mSv vuodessa) ja suurin havaittu annos (suluissa) radonpitoisuuden ja vesilähteen mukaan. Verkostoveden osalta taulukossa on mukana myös käytöstä poistettuja tai korjattuja kohteita.

Vesilähde	Radon alle 300 Bq/l	Radon 300– 1000 Bq/l	Radon 1000– 5000 Bq/l	Radon yli 5000 Bq/l
Porakaivot	0,06 (6,4)	0,2 (3,6)	0,7 (17)	3,2 (26)
Rengaskaivot	0,04 (2,0)	0,3 (0,9)	0,4 (0,4)	-
Verkostovesi	0,01 (0,2)	0,08 (0,1)	0,2 (0,2)	1,2 (1,2)

Yhdysvaltain tiedeakatemian riskiarvioiden (National Research Council 1999) mukaan radon aiheuttaisi Suomessa vuosittain noin 40 kuolemaan johtavaa syöpätapausta, joista huoneilmaan vapautunut radon tuottaisi valtaosan. STUKissa taas arvioidaan, että talousveden radon aiheuttaisi Suomessa yhteensä noin 15 kuolemaan johtavaa syöpätapausta vuodessa. Näistä hiukan yli puolet on huoneilmaan vapautuneen radonin aiheuttamia keuhkosityöpiä ja loput ruoan ja juoman mukana kehoon joutuneen radonin aiheuttamia, lähinnä mahasyöpiä. Pitkäikäiset nuklidit aiheuttavat kuolemaan johtavia syöpätapauksia noin 4. UNSCEAR 1993 arvio on huoneilmaan vapautuneen radonin osalta lähes sama kuin NCR:n arvio, mutta juodun veden osalta kolminkertainen.

Suomessa käytetty arvio sisäilman radonin aiheuttamien keuhkosityöpien määrästä on kansainvälisessä vertailussa matala. Yhdysvaltain tiedeakatemia käyttämän riskiarvion mukaan Suomessa olisi noin 500 – 700 radonin aiheuttamaa keuhkosityöpää vuodessa. Arvio on korkea, kun ottaa huomioon, että vuotuisia keuhkosityöpätapauksia on Suomessa kaikkiaan noin 2 000.

Talousvedestä ja sisäilmasta saatavia annoksia voidaan verrata toisiinsa. STUKin suositus yksityisten, vakituksessa käytössä olevien kaivojen radonpitoisuuden enimmäisarvoksi on 1 000 Bq/l. Dosimetrinen mallin mukaan tämä vastaa noin 0,6 mSv annosta vuodessa. STM:n päätöksen mukainen enimmäispitoisuus huoneilman radonille (400 Bq/m³) taas vastaa noin 7 mSv vuodessa. Tämä vertailu osoittaa, että STUKin talousveden radonille antama suositus on varsin tiukka.



Kuva 2. Eri perustein arvioituja talousveden luonnon radioaktiivisten aineiden aiheuttamia vuotuisten kuolemaan johtavien syöpätapausten lukumääriä Suomessa. Lukumäärät on laskettu erikseen suun kautta nautitulle ja hengitetylle radonille sekä pitkäikäisille radionuklideille. Kirjallisuusviitteet: NRC = (National Research Council 1999), UNSCEAR 1993, EU perusnormi = (Council Directive 1996). STUKin arvio on juodun veden osalta sama kuin NRC:n, ja hengitetyn radonin osalta on käytetty STUKin asiantuntijoiden arviota.

3 Voimassa olevat säädökset

3.1 ST-ohje 12.3

Säteilyturvakeskus antoi vuonna 1993 ohjeen, jossa esitettiin Säteilylain 70 §:n 2. momentin nojalla turvallisuustavoite talousveden sisältämistä radioaktiivisista aineista aiheutuvan säteilyaltistuksen rajoittamiseksi (ST-ohje 12.3 1993). Ohjetta sovelletaan jo käytössä oleviin ja käyttöön otettaviin talousvesiin, silloin kun kyseessä ovat terveydenhuoltolain (469/65, muutos 416/84) 54 §:ssä tarkoitettut vesilaitokset ja ammattimaiset juoman ja elintarvikkeiden valmistajat, jotka käyttävät omaa kaivoa tai vedenottamoita. Terveydenhuoltolain määritelmän mukaisesti vesilaitoksella tarkoitetaan laitosta, joka tuottaa vettä vähintään 50 henkilön tai 10 asuinhuoneiston tarpeisiin. Vesilaitoksena ei pidetä omaan käyttöön tarkoitettua kaivoa tai vedenhankintalaitteistoa. Ohjetta ei sovelleta poikkeustilanteissa, esimerkiksi ydinvoimalalaitosonnettomuudesta aiheutuvaan laskeumaan.

Turvallisuustavoitteeksi on asetettu, että talousveden radioaktiivisista aineista aiheutuva efektiivinen annos saa olla enintään 0,5 mSv vuodessa. Annosta laskiessa otetaan huomioon kaikki radionuklidit (sekä luonnon radionuklidit, että tarvittaessa myös keinotekoiset radionuklidit), jotka aiheuttavat säteilyaltistusta veden mukana juotuna. Annoksen laskemisen perustana on aikuinen, joka käyttää vettä 2,2 litraa päivittäin vuoden ajan. Radonin osalta oletetaan, että tästä vedestä 0,5 litraa käytetään suoraan juomavetenä, josta radon ei ole ehtinyt vapautua ilmaan. Annosta laskiessa ei huomioida vedestä hengitysilmaan vapautuvasta radonista aiheutuvaa annosta.

Käytännön valvonnan apuvälineeksi ohjeessa on esitetty aktiivisuusindeksi, jonka avulla turvallisuustavoitteen toteutumista voidaan arvioida veden kokonaisalfa-, kokonaisbeeta- ja radonmittauksista saatujen tulosten perusteella. Aktiivisuusindeksi on määritelty siten, että jos sen arvo on 1 tai sitä pienempi, turvallisuustavoite toteutuu siitä riippumatta mitä alfa- tai beetasäteilijöitä vesi sisältää. Jos aktiivisuusindeksin arvo on suurempi kuin yksi, tulee vedestä selvittää nuklidikohtaisin analyysin ylityksen aiheuttavat radionuklidit eli aktiivisuusindeksille voidaan sitten määrittää tarkempi arvio nuklidikohtaisista analyysien perusteella. Aktiivisuusindeksin määrittämisessä tarvittavat nuklidikohtaiset kertoimet on annettu ohjeessa.

Uraani huomioidaan ohjeessa sen säteilyvaikutusten perusteella. Ohjeessa mainitaan, että uraanin kemiallisen myrkyllisyyden vuoksi asetettava raja-arvo olisi huomattavasti pienempi (eri yhteyksissä on esitetty raja-arvoja välillä 0,02 ... 0,1 mg/l).

Ohje korostaa säteilylain periaatteiden mukaisesti toiminnan harjoittajan vastuuta siitä, että säteilyturvallisuuskohdat tulevat toiminnassa asianmukaisesti hoidetuksi. Toiminnan harjoittaja vastaa tarvittavista analyysistä ja muista veden radioaktiivisuuteen liittyvistä selvityksistä. Toiminnan harjoittajan tulee ennen uuden vedenottamon käyttöönottoa määrittää veden radioaktiivisuus. Mittaukset tulee tehdä myös jos on perusteltua syytä epäillä, että jo käytössä olevan vesilaitoksen veden aktiivisuusindeksi ylittää arvon 1.

Jos mittaukset osoittavat, että veden aktiivisuusindeksi ylittää arvon 1, toiminnan harjoittajan tulee joko selvityksin osoittaa, että turvallisuustavoite 0,5 mSv toteutuu tai vedessä olevien radionuklidien määrää on pienennettävä. Jos selvitykset osoittavat, että vedestä aiheutuva annos saattaa ylittää arvon 0,5 mSv, Säteilyturvakeskus ratkaisee mitä vaatimuksia tai rajoituksia veden käytölle asetetaan säteilyaltistuksen rajoittamiseksi.

3.2 Kokemuksia viranomaisvalvonnasta

ST-ohje 12.3 tuli voimaan lokakuussa 1993. Ohje lähetettiin noin 800 vesilaitokselle (yli 200 käyttäjän laitokset) sekä kuntien terveystarkastajille. Ohjeen mukana lähetetyssä kirjeessä vesilaitoksia kehoitettiin selvittämään toimittamansa veden radioaktiivisuus jos käytetään muuta kuin pintavettä ja radioaktiivisuutta ei ole aikaisemmin selvitetty. Terveystarkastajia pyydettiin huomiomaan ohje valvontatoimissaan tavoitteena, että tarvittavat mittaukset tulisi tehdä myös pienissä 10 – 200 käyttäjän vesilaitoksissa, joita Säteilyturvakeskuksen on vaikea itse suoraan tavoittaa.

Suurimmassa osassa yli 200 käyttäjän vesilaitoksissa (noin 800 laitosta) oli tehty radioaktiivisuusmittauksia jo 1970 – 1980 -luvulla. Jos nämä tulokset osoittivat turvallisuustavoitteen selvästi alittuvan, eikä toiminnassa ollut muutoksia (esim. uusia vedenottoja), ei uusintamittauksia edellytetty.

Vuosina 1994 – 2000 Säteilyturvakeskus antoi lausunnon noin 390 vesinäytteen radioaktiivisuuden mittauksesta. Näistä 68:ssa tapauksessa

kehoitettiin joko pienentämään vesissä olevien radioaktiivisten aineiden määrää tai nuklidikohtaisin analyysien osoittamaan, että turvallisuustavoite saavutetaan. Ylitystapausten suuri määrä (noin 17 % mittauksista) johtuu siitä, että mittauksia on tehty lähes yksinomaan pohjavedestä ja pienissä yksiköissä, joissa porakaivot ovat yleisempiä. Suurimmassa osassa ylitystapauksia vedenotto tai kaivo on nyt joko poistettu käytöstä tai siihen on asennettu radonin poistolaitteisto. Näiden joukossa oli muutama yli 200 käyttäjän laitos sekä kymmenkunta pienempää, alle 200 käyttäjän laitosta. Loput olivat erilaisia julkisia laitoksia (kouluja, hoitolaitoksia, tehtaita, urheilu- ja lomakeskuksia jne.), jotka käyttivät omaa kaivoa.

3.3 Talousvesidirektiivi

EU:n ministerineuvosto hyväksyi talousvesidirektiivin 3.11.1998 (Neuvoston direktiivi 98/83/EY 1998). Direktiiviin sisällytettiin osoitinmuuttujiksi veden tritiumpitoisuus (100 Bq/l) ja viitteellinen kokonaisannos 0,1 mSv. Osoitinmuuttuja ei ole luonteeltaan sitova, mutta sen ylittyessä jäsenmaan tulee arvioida veden käytöstä aiheutuva terveyshaitta ja ryhtyä tarvittaessa toimiin ihmisten terveyden suojelemiseksi.

Viitteellisestä kokonaisannoksesta on rajattu pois tritiumin (vety-3) ja kaliumin (kalium-40) sekä radonin ja sen hajoamistuotteiden aiheuttama altistus. Direktiivissä säädetään, että tarkemmista menettelytavoista kuten seurantatiheyksistä, -menetelmistä ja annoksen määrittämisestä (0,1 mSv) päätetään myöhemmin komission ehdotuksen pohjalta direktiivin Artiklassa 12 esitettyä menettelytapaa käyttäen (jäsenmaiden edustajista muodostuva komitea). Komissio on antanut menettelytavoista ehdotuksensa, mutta sitä ei ole vielä käsitelty neuvostossa (tilanne tammikuussa 2001). Direktiivin radioaktiivisuutta koskevaa osuutta ei siten ole käytännössä mahdollista panna täytäntöön ennen kuin tarkemmista menettelytavoista on päätetty.

Euratom-sopimuksen Artikloissa 35 – 36 EU-jäsenmaat veloitetaan seuraamaan väestölle ympäristön radioaktiivista aineista aiheutuvaa säteilyaltistusta ja raportoimaan seurannan tulokset komissiolle säännöllisesti. Talousvesidirektiivissä kuitenkin todetaan (Liite 1, Osa C, Alaviite 10), että direktiivin johdosta jäsenmaan ei tarvitse järjestää erillistä radioaktiivisuusvalvontaa, jos jo toteutetun valvonnan tulosten ja muiden

selvitysten perusteella voidaan osoittaa, että direktiivissä esitetyn osoitinmuuttujan tai viitteellisen kokonaisannoksen arvo ei ylity. Perustelut tällaisesta ratkaisusta tulee kuitenkin toimittaa komissiolle. Tritiumin osalta valvontaa ei siten tarvittane järjestää, sillä STUKin tutkimusten perusteella pitoisuudet suomalaisissa talousvesissä ovat pienempi kuin 10 Bq/l.

Direktiivin artiklassa 8 säädetään, että jäsenmaan tulee kieltää tai rajoittaa sellaisen veden käyttöä, josta todetaan aiheutuvan merkittävää terveyshaittaa. Kyseisen veden käyttäjiä tulee informoida haitasta sekä antaa heille tarvittavat neuvot terveyden suojelemiseksi. Samoin tulee tiedottaa käyttäjiä kun ryhdytään korjaaviin toimiin direktiivin vaatimusten täyttämiseksi, ellei jäsenmaa arvioi vaatimustason ylitystä suuruudeltaan merkityksettömäksi.

3.4 Yhteenveto säädöstilanteesta vuoden 2001 alussa

STM:n asetukseen 461/2000 talousveden laatuvaatimuksista ja valvontamittauksista on sisällytetty talousvesidirektiivin mukainen viitearvo tritiumpitoisuudelle (100 Bq/l) ja viitteellinen kokonaisannos 0,1 mSv. Asetuksessa todetaan, että näitä ei tarvitse määrittää, jos aikaisempien tutkimusten perusteella tiedetään, että näiden arvot ovat selvästi alle muuttujan arvon. Lisäksi todetaan, että mittauksista ja niiden tiheydestä annetaan erilliset määräykset. Nämä määräykset tulevat korvaamaan tai muuttamaan Säteilyturvakeskuksen ST-ohjeessa 12.3 esitettyjä vaatimuksia. STM ei ole vielä voinut antaa uusia määräyksiä, sillä vastaavia vesidirektiivin kohtia ei ole vielä hyväksytty (ks. kappale 3.3).

Edellä olevan johdosta STM asetuksessa 461/2000 esitetty viitearvo tritiumpitoisuudelle (100 Bq/l) ja viitteellinen kokonaisannos 0,1 mSv eivät anna aiheutta käytännön mittausten järjestämiselle ja valvontatoimille ennen kuin näitä koskevat tarkemmat määräykset on annettu. Mittausten ja valvonnan osalta sovelletaan siihen asti nykyistä ST-ohjetta 12.3.

Talousvesidirektiivi ja STM asetus eivät koske radonia tai sen hajoamistuotteita. EU komissio valmistelee parhaillaan jäsenvaltioille osoitettavaa suositusta talousveden radonista. STM tullee antamaan myös talousveden radonia

koskevia määräyksiä samassa yhteydessä kun se antaa edellä mainitut tarkemmat mittausten järjestämistä ja valvontaa koskevat määräykset.

4 Ehdotuksen toimenpidearvot ja perustelut

4.1 Vesilaitokset

Säteilyturvakeskus antoi maaliskuussa 1999 Sosiaali- ja terveysministeriölle ehdotuksen talousveden radioaktiivisista aineista aiheutuvan säteilyaltistuksen rajoittamisesta ja valvonnasta. Ehdotuksessa vesilaitoksille talousveden radonpitoisuuden toimenpidearvo on 300 Bq/litra. Tämä vastaa käytössä olevaa ST-ohjeen mukaista rajaa ja se annetaan kansallisin perustein (ei direktiivin vaatimus). Se vastaa tässä raportissa käytettyä annosmuunnoskerrointa käyttäen vuotuista annosta 0,2 mSv, kun ST-ohjeessa 12.3 sen oli laskettu vastaavan arvoa 0,5 mSv. Talousvedessä olevista muista radionuklideista kuin radonista aiheutuvan annoksen toimenpidearvoksi ehdotetaan 0,1 millisieverttiä (mSv) vuodessa. Pitkäikäisistä radionuklideista aiheutuu vesilaitosvesissä tyypillisesti 30 % kokonaisannoksesta. Uusi ehdotus ei tuo merkittävää muutosta valvontakäytäntöön, vaikka laskennalliset annokset hieman muuttuvat. Tehty ehdotus poikkeaa EU:n direktiivin mukaisesta päätöksestä merkittävästi siinä, että 0,1 mSv:n annosta laskettaessa huomioidaan kaikki luonnon radioaktiiviset aineet. Direktiivissä taas on suljettu pois radonin hajoamistuotteet. Koska merkittävin osa annoksesta aiheutuu radonin pitkäikäisistä hajoamistuotteista lyijy-210 ja polonium-210, on tämä kansallinen päätösehdotus tiukempi kuin direktiivin vaatimus.

4.2 Yksityiset kaivot

Pienille yksiköille esitetty päätösehdotus sisältää raja-arvon vain radonille, 1 000 Bq/l, joka vastaa tässä raportissa käytetyn riskiarvion mukaan vuosiansannosta 0,6 mSv. Vapaa-ajan kaivojen osalta voidaan korkeammatkin pitoisuudet hyväksyä, kun otetaan huomioon kaivon lyhempi vuosittainen käyttöaika. Säteilyturvakeskus antaa erillisohjeet torjuntatoimista ja pitkäikäisten nuklidien mittaamisesta radonpitoisuuden ylittäessä 1 000 Bq/l. Yksityiselle kaivonkäyttäjälle on laadittu oppaaksi vuonna 2000 sekä suomeksi että ruotsiksi ilmestynyt katsaus (Säteilyturvakeskus 2000, Strålsäkerhetscentralen 2000). Tietoja alueellisesta esiintymisestä saa STUKin julkaisemasta Porakaivoveden radonkartastosta (Voutilainen ym. 2000).

4.3 Perustelut

Ehdotusta annettaessa ja raja-arvoalinnoissa on huomioitu seuraavia näkökohtia:

- Ehdotuksen tavoite on rajoittaa talousveden radioaktiivista aineista aiheutuva säteily-altistus niin pieneksi kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista.
- Ehdotuksella toteutetaan kansallisen ympäristöterveysohjelman tavoitteita talousvedestä tulevan säteilyaltistuksen vähentämiseksi.
- Radonpitoisuuden toimenpiderajoja vastaavat aikuisten annokset ovat alhaisia verrattuina muusta luonnonsäteilyaltistuksesta, kuten huoneilman radonista saatavaan annokseen. Vaikka lasten laskennalliset annokset juotua vesimäärää kohden ovat aikuisten annoksia korkeammat, lasten pienemmästä vedenkulutuksesta johtuen kymmenenä ensimmäisenä elinvuonna saatu altistus lisää henkilön elinikäistä riskiä vain noin 30 %. Siksi ei ole katsottu tarpeelliseksi esittää erityisiä rajoituksia lapsille.
- Vesilaitoksille on asetettu tiukempi raja, koska kuluttajien määrä on huomattavasti korkeampi ja koska torjuntatoimien kustannukset käyttäjää kohti laskettuna ovat merkittävästi pienemmät kuin yksityisille kaivonomistajille.
- Ehdotuksessa on huomioitu EU:n talousveden laatutekijöistä antama direktiivi. Talousveden muille radioaktiivisille aineille kuin radonille ehdotettu enimmäisarvo 0,1 mSv vuodessa on sama kuin Maailman Terveysjärjestön WHO:n vuonna 1993 julkaisussaan (Guidelines for drinking water quality, vol. 1, Recommendations) suosittama viitearvo.
- Yksityistalouksille on ehdotettu vain radonpitoisuudelle toimenpidearvo 1 000 Bq/l. Ehdotetulla radonpitoisuuden raja-arvolla rajoitetaan myös pitkäikäisistä nuklideista saatavaa annosta, koska radonpitoisuus on hyvä indikaattori myös tärkeimpien pitkäikäisten nuklidien aiheuttamalle annokselle. Säteilyturvakeskus antaa lisäksi ohjeita pitkäikäisten nuklidien mittaamisesta ja poistomenetelmistä.
- Tritiumin osalta erillistä valvontaa ei tarvitse järjestää sillä Euratom-sopimuksen Artikloiden 35 – 36 mukaisen ympäristövalvonnan kautta voidaan osoittaa, että pitoisuudet suomalaisissa talousvesissä ovat riittävän pieniä.

5 Taloudelliset vaikutukset

Voimassa olevan ja myös uuden ehdotuksen mukaisen vesilaitosveden radonille asetetun turvallisuustavoitteen 300 Bq/l ylitti vuonna 1993 muutama kymmenen enimmäkseen pientä vesilaitosta, joiden piirissä asui yhteensä 13 000 henkeä. Määrä on kuitenkin vuonna 1993 aloitetun valvonnan kautta laskenut siten, että STUKin valvontatietojen perusteella vuonna 1999 alle 200 henkeä käyttää vettä, joka ylittää enimmäisarvon. Todennäköisesti kuitenkin erityisesti laitoksissa ja kouluissa on porakaivoja, joiden veden radonpitoisuutta ei ole vielä mitattu ja joissa enimmäisarvo ylittyy.

Yksityistalouksille ehdotetun rajan 1 000 Bq/l ylittäviä käyttäjiä on porakaivotalouksissa 20 000 ja rengaskaivotalouksissa vain joitakin kymmeniä. Korjausta vaativien talouksien määrä olisi siten noin 7 000, mikä on kymmenesosa porakaivotalouksien kokonaismäärästä. Jos vesilaitosten rajaa 300 Bq/l sovellettaisiin yksityistalouksiin, asuisi korjausta vaativissa porakaivotalouksissa 60 000 henkeä ja rengaskaivotalouksissa 10 000 henkeä. Korjausta vaativien kaivojen määrä olisi yhteensä noin 23 000 (20 000 porakaivoa ja 3 000 rengaskaivoa).

Tässä raportissa käytetty porakaivojen määrä yksityistalouksissa perustuu oletukseen, että porakaivoveden käyttäjiä on 4 % noin 200 000) väestöstä. Lisäksi arvioissa on käytetty yksityistalouksien keskimääräisenä asukasmääränä 3 henkilöä. Porakaivojen kokonaismäärä on arvion mukaan siten noin 70 000.

Luvussa 6 on käsitelty tarvittavien korjaustoimenpiteiden kustannuksia. Kaikkien 1 000 Bq/l ylittävien 7 000 talouden korjauskustannukset ovat radoninpoiston osalta yhteensä 105 mmk, kun keskikustannuksiksi arvioidaan 15 000 mk. Arvioitu poistomenetelmien tarve ja keskihinnat on esitetty Taulukossa 10. Arvioissa radonpitoisuudeltaan 1 000 – 5 000 Bq/l olevien kaivojen korjauksessa käytetään yhtä paljon aktiivihiilisuodatinta ja ilmastinta. Aktiivihiilisuodattimen keskihinnaksi on arvioitu 7 000 mk, mistä 5 000 mk tulee laitekuluista ja 2 000 mk säteilysuojus- ja asennuskuluista. Ilmastimen keskihinnaksi on arvioitu 20 000 mk, mistä 15 000 mk on laitekuluja ja 5 000 mk asennuskuluja. Aktiivihiilen ja ilmastimen käyttö alempien pitoisuuksien korjauksissa voidaan arvioida vain karkeasti. Säteilysuojuksen käyttöön ja

asennukseen liittyvien ongelmien ratkaisut sekä ilmastimien hinnoittelu markkinoiden kasvaessa tulevat vaikuttamaan laitevalintaan.

Taulukko 10. Yksityiskaivojen radioaktiivisuuden poistokustannukset Suomessa

Radon-pitoisuus Bq/l	Kaivojen määrä	Korjausmenetelmä	Keskihinta mk	Kokonaiskulut mmk
1000 – 5000	2500	Aktiivihiiisuodatin	7000	15
1000 – 5000	2500	Ilmastin	20000	50
>5000	2000	Ilmastin	20000	40
Yhteensä	7000		15000	105

Esitettyssä karkeassa arviossa on pyritty huomioimaan myös pitkäikäisten nuklidien poistojärjestelmistä tulevia lisäkuluja. Uraanipitoinen vesi heikentää aktiivihiiisuodattimen toimintaa, jolloin osassa talouksia tarvitaan myös ioninvaihdin uraaninpoistoon. Osassa yksityistalouksia vedenpuhdistus tullaan hoitamaan haja-asutusalueille perustettavissa vesiyhtymissä. Tämä tulee alentamaan asuntokohtaisia kustannuksia. Mikäli uraanin kemialliselle myrkyllisyydelle asetetaan raja-arvo, tulevat mahdolliset uraanin poistolaitteiden asennukset vaikuttamaan myös muun radioaktiivisuuden poistolaitteiden valintoihin ja kustannuksiin.

6 Radioaktiivisuuden poistomenetelmät

Radioaktiiviset aineet ovat kemiallisilta ominaisuuksiltaan erilaisia, joten niiden poistamiseen tarvitaan eri menetelmiä.

STUKissa on tutkittu radonin poistoa ilmastusmenetelmällä ja aktiivihiihliuodatuksella. Uraanin ja radiumin poistoa juomavedestä on tutkittu kaupallisilla ioninvaihtimilla. Lyijyn ja poloniumin poistaminen juomavedestä on hankalampaa, koska ne ovat pohjavesissä sitoutuneet erikokoisiin partikkeleihin. Niiden poistaminen onnistuu, mutta menetelmän valinnassa on otettava huomioon muut vedenkäsittelylaitteet.

Laitteiston asennuksen jälkeen kannattaa mittauksin varmistaa, että laitteet toimivat odotetusti. Aktiivihiihliuodattimen ollessa kyseessä kannattaa odottaa 3 – 4 viikkoa suodattimen tasapainottumista ennen varmistusmittausta.

6.1 Radonin poisto ilmastusmenetelmällä

Ilmastus voidaan toteuttaa periaatteessa kolmella eri tavalla: hienokuplailmastuksena, spray-ilmastuksena ja torni-ilmastuksena. Näissä menetelmissä radon siirtyy ilmaan, joka saatetaan kontaktiin veden kanssa. Tämän jälkeen radonpitoinen ilma johdetaan tuuletuskanavaa pitkin ulos. Ilmastus tapahtuu normaali-ilmanpaineessa. Ilmastin asennetaan kotitaloudessa tekniseen tilaan. Laitteiden monimutkaisen tekniikan johdosta ne vaativat aika ajoin huoltoa.

Ilmastusta voidaan käyttää hyvin suurienkin radonpitoisuuksien (yli 5 000 Bq/l) alentamiseen. Tällöin aktiivihiihliuodatusta ei enää suositella suodattimeen kertyvien radonin hajoamistuotteiden aiheuttaman ulkoisen säteilyn vuoksi. Ilmastuslaitteilla pystytään käsittelemään suuria vesimääriä.

STUKissa radoninpoistoa on testattu neljällä eri ilmastuslaitteella. Radoninpoisto on onnistunut lähes kaikilla tutkituilla laitteilla hyvin. Poistumat ovat nykyisin markkinoilla olevilla laitteilla yli 95 %.

6.2 Radonin poisto aktiivihillisuodatuksella

Aktiivihillisuodatus on tehokas menetelmä radonin poistoon. Sen hyviä puolia ovat sen edullisuus, asennuksen helppous, pieni tilan tarve ja äänettömyys. Suodatus tapahtuu suljetussa paineellisessa suodattimessa. Vesi johdetaan painesäiliön jälkeen noin 40 – 60 litran vetoisen aktiivihillellä täytetyn suodattimen kautta kulutukseen. Veteen liuennut radon pidättyy hiileen.

Suodattimeen kertyvät radonin lyhytikäiset hajoamistuotteet lähettävät suodattimen ympäristöön gammasäteilyä, jonka määrä riippuu veden kulutuksesta ja radonpitoisuudesta. Aktiivihillisuodatusta ei siksi suositella 5 000 Bq/l suurempien radonpitoisuuksien alentamiseen. Suodatin tulee asentaa asuin-kiinteistössä tai sen välittömässä läheisyydessä siten, että sen aiheuttama säteilyannos asukkaille jää mahdollisimman vähäiseksi. STUK tulee antamaan suosituksen siitä kuinka aktiivihillisuodatin tulee asentaa.

STUKin tutkimusten mukaan aktiivihillisuodatus toimii hyvin radonin poistossa. Radonin pidättyminen suodattimiin on ollut lähes 100 %. Tutkittujen vesien radonpitoisuudet ovat vaihdelleet välillä 1 000 – 7 400 Bq/l. Mikäli veden rauta-, humus- tai uraanipitoisuus on korkea, voi näillä aineilla olla vaikutusta suodattimen poistokykyyn. Tällöin nämä aineet on poistettava ennen aktiivihillisuodatusta. Tutkituissa kohteissa ei ole havaittu veden laadun heikentymistä.

Suodattimen pidätyskyky heikentyy ajan myötä, joten aktiivihilli täytyy välillä uusia. Suositeltu vaihtoväli on noin kaksi vuotta, mikäli veden laatu on ollut moitteeton.

6.3 Uraanin ja radiumin poisto

Uraanin ja radiumin poistoon sopii parhaiten ioninvaihtomenetelmä. Uraanin poistoon käytetään anioninvaihtohartsia ja radiumin poistoon kationinvaihtohartsia. Nämä ovat samoja orgaanisia hartseja, joita käytetään myös humuksen poistoon (anionihartsi) sekä raudan ja mangaanin poistoon (kationihartsi). Ioninvaihdin voidaan varustaa automaattisella elvytyslaitteistolla. Kyllästytyllä merisuolaliuoksella tehtävä elvytys (huuhtelu) voidaan ohjata myös käsi-käyttöisesti.

Koko talouden veden puhdistamiseen sopivat esimerkiksi automaattisella huuhtelulla varustetulla ioninvaihdin, jonka tilavuus on noin 40 litraa, tai noin 20 litran vetoinen, ilman automatiikkaa toimiva suodatin. Molemmat on tarkoitettu asennettaviksi tekniseen tilaan. Ilman automatiikkaa olevalla ioninvaihtimella, jonka tilavuus on noin 10 litraa, uraani voidaan poistaa keittiövedestä. Asennuspaikka voi olla esimerkiksi tiskipöydän alla oleva astiakaappi. Halvin testatuista menetelmistä on hanasuodatin, joka sopii lähinnä vain vapaa-ajan asuntoihin.

STUKissa on testattu kolmea eri tyyppistä Suomen markkinoilla olevaa kaupallista ioninvaihdinta. Tutkittavien kohteiden vedet poikkesivat toisistaan rauta-, mangaani- ja humuspitoisuuden suhteen. Raakaveden uraanipitoisuudet olivat välillä 0,08 – 2 mg/l. Tutkimuksissa uraanin poistuma on ollut lähes 100 % ja radiumin poistuma yli 90 %. Testatut ioninvaihtimet ovat toimineet teknisesti moitteettomasti. Uraanin ja radiumin poisto aktiivihiilisuodattimella on sen sijaan ollut epävarmaa. Hyvin suolaisissa vesissä toimivin vaihtoehto uraanin ja radiumin poistoon on käänteisosmoosisuodatus.

Anioninvaihtosuodatinta käytettäessä veden muu laatu on säilynyt hyvänä ja toisinaan jopa parantunut, kun vedessä oleva orgaaninen aines on poistunut. Kationisuodatinta käytettäessä veden kovuus häviää, minkä vuoksi veden jälkikäsittely esimerkiksi kalkkikivellä on tarpeellinen.

6.4 Lyijyn ja poloniumin poisto

Porakaivoveden lyijy ja polonium ovat sitoutuneet enimmäkseen vedessä oleviin hiukkasiin. Siitä syystä niiden poistoon voidaan käyttää sopivia suodatusmenetelmiä. Tällaisia ovat esimerkiksi nano- ja käänteisosmoosisuodatus.

Käänteisosmoosilaitetta käytetään yleisesti suolanpoistoon. Se poistaa tehokkaasti myös lyijyn ja poloniumin, uraanin ja radiumin. Poistumat ovat olleet lähes 100 %. Radonia käänteisosmoosilaitte ei poista. Edellä kuvatut menetelmät, aktiivihiilisuodatus ja ioninvaihtimet, ovat testeissä poistaneet vedestä vaihtelevia määriä (50 – 95 %) lyijyä ja poloniumia.

Jos raakavedessä on lyijyä tai poloniumia, ja muiden radioaktiivisten aineiden poistoa varten on asennettu aktiivihiilisuodatin tai anioninvaihdin, kannattaa

selvittää kuinka hyvin kyseiset laitteet ovat poistaneet lyijyn ja poloniumin käyttövedestä. Mikäli lyijyn tai poloniumin pitoisuudet ovat edelleen liian korkeat, ne voidaan poistaa asentamalla käänteisosmoosilaitte keittiöveden suodatukseen. Käänteisosmoosilaitte tulee kyseeseen myös silloin, jos vedessä ei ole muita radioaktiivisia aineita kuin radonia sekä lyijyä tai poloniumia, ja radon poistetaan vedestä ilmastusmenetelmällä.

Käänteisosmoosilaitteen huonona puolena on veden laadun heikkeneminen. Vesi muuttuu tislattun veden kaltaiseksi, ja vaatii jälkikäsittelyn esimerkiksi dolomiittikalkilla.

6.5 Tarjolla olevat yrityspalvelut

Suomessa on tällä hetkellä kymmenkunta yritystä, jotka myyvät ilmastusmenetelmällä toimivia radoninpoistolaitteita. Näistä laitteista neljä on testattu Säteilyturvakeskuksessa ja kaksi Ruotsissa. Markkinoilla on vielä muutama laite, joita ei ole vielä testattu Suomessa. Aktiivihiilisuodattimia radonin poistoon myy Suomessa kaksi yritystä, joiden kanssa STUK on kehittänyt ja testannut niitä.

Uraaninpoistossa on käytetty kaupallista humuksen poistoon tarkoitettua orgaanista anioninvaihtohartsia ja radiumin poistossa raudan ja mangaanin poistoon tarkoitettua kationinvaihtohartsia. Suomessa kymmenkunta yritystä myy ioninvaihtimia, jotka voidaan varustaa tarvittavalla ioninvaihtomassalla. Laajempia tutkimuksia on tehty kolmen yrityksen hartseilla. Käänteisosmoosilaitteita myyvät samat yritykset kuin ioninvaihtimia.

6.6 Kustannukset yksityistalouksille

Puhdistusmenetelmien valintaan vaikuttaa raakaveden radionuklidipitoisuuksien lisäksi raakaveden muu laatu. Kustannuksia voivat lisätä esisuodatimet, raudan ja mangaaninpoistolaitteiden hankinta sekä veden jälkikäsittely. Eri yhdistelmien kustannuksia on esitetty taulukossa 11.

Ilmastimien hinnat ovat välillä 10 000 – 30 000 mk ja aktiivihiilisuodattimien välillä 3 000 – 13 000 mk. Elvytysautomaatiikalla varustettujen ioninvaihtimi-

en hinnat ovat koosta riippuen välillä 8 000 – 13 000 mk ja käsin ohjattavalla huuhtelulla varustettujen 3 000 – 8 000 mk. Käänteisosmoosilaitteiden hinnat ovat välillä 2 500 – 5 000 mk.

Raudan ja mangaanin poistolaitteiden hinnat vaihtelevat välillä 10 000 – 15 000 mk koosta, mallista ja valmistajasta riippuen. Aktiivihiilen säteily-suojuksen materiaali voi olla vesivaippa, rauta, betoni tai tiili. Suojuksien hinnat ovat 200 – 3 000 mk materiaalista riippuen. Taulukon hinnoissa ei ole huomioitu asennuskustannuksia eikä suojuksista, esisuodattimista ja muista ylimääräisistä laitteista aiheutuvia lisäkustannuksia.

Taulukko 11. Poistomenetelmävaihtoehtoja kustannuksineen erilaisille radioaktiivisten aineiden yhdistelmille. Hinnat eivät sisällä asennuskustannuksia, esisuodattimia eivätkä säteilysuojia.

Poistettavat aineet	Käytetty menetelmä tai menetelmien yhdistelmä	Kustannukset mk
Radon	Aktiivihiili	3 000 – 13 000
	Ilmastin	10 000 – 30 000
Radon ja uraani	Aktiivihiili ja anionivaihdin	7 000 – 26 000
	Ilmastin ja anionivaihdin	14 000 – 43 000
Radon, uraani ja radium	Aktiivihiili, anionivaihdin ja kationivaihdin	7 000 – 26 000
	Ilmastin, anionivaihdin ja kationivaihdin	18 000 – 43 000

6.7 Kustannukset vesilaitoksille

Vesilaitoksen kokonaiskustannukset koostuvat poistolaitteista, tarvittavasta tilasta tai rakennuksesta ja automaattisesta ohjauskeskuksesta. Lisäksi tulevat käyttökustannukset, joita ovat mm. määräaikaishuollot, sähkö, ioninvaihtimissa elvytykseen käytetty suola ja hartsien vaihdot.

Radoninpoistolaitetta valittaessa huomioitavia asioita ovat vedenkulutus ja raakaveden radioaktiivisten aineiden pitoisuudet. Nämä vaikuttavat valittujen laitteistojen kokoonpanoon ja mm. ilmastusaltaan paineluokkaan ja kokoon. Lisäksi kustannuksiin vaikuttaa laitoksessa ennestään olevat vedenkäsittelymenetelmät ja niiden automaatiikka.

Pienten vesiosuuskuntien (käyttäjämäärä alle 100 henkeä) radoninpoistolaitteiden hintahaarukka alkaa 20 000 mk:sta. Suuremmissa vesilaitoksissa (veden kulutus on n. 1 500 m³/vuorokausi ja/tai käyttäjien lukumäärä 1 000 tai enemmän) radoninpoistolaitteistojen hinnat ovat vähintään 200 000 mk. Ioninvaihtolaitteistojen hinnat lähtevät 100 000 mk:sta. Nämä arviot ovat karkeita, koska ilmastuslaitoksia ei ole saatavana valmiina pakettiratkaisuna. Esimerkkinä kustannuksista voidaan käyttää Hämeessä sijaitsevaa vesilaitosta, jossa toteutettiin uraanipoisto anioninvaihtimella, vedenpehennys kationinvaihtimella ja radoninpoisto ilmastuslaitteella. Vesilaitoksessa vedenkulutus on keskimäärin 70 m³/vuorokausi, maksimikulutuksen ollessa 110 m³/vuorokausi. Käyttäjien lukumäärä on noin 350. Taulukossa 12 on esitetty kustannukset tässä vesilaitoksessa.

Taulukko 12. Radionuklidien poistolaitteiden hinnat Hämeessä sijaitsevassa vesilaitoksessa.

Laite	Hinta mk
Ioninvaihdin (kationihartsit), halkaisija 1,6 m	120 000
Ioninvaihtimen käyttökulut vuodessa	20 000
Radonin poistolaite: ilmastin, 30 m ³	50 000
Radoninpoistolaitteen käyttökulut vuodessa	10 000
Automaatio	80 000

7 Mittausmenetelmät

7.1 Radon

Suomessa yleisesti käytössä olevia menetelmiä radonpitoisuuden määrittämiseksi vedestä ovat nestetuikemenetelmä ja alueellisissa elintarvike- ja ympäristölaboratorioissa käytettävä Mini-Assay mittarilla tehtävä mittaus.

Nestetuikemenetelmällä sekä vesinäytteen otto että radonmäärittäminen on yksinkertaista. Tutkittavasta vedestä otetaan 10 ml näyte, joka sekoitetaan tuke-
liuokseen. Näyte mitataan kolmen tunnin kuluttua kun radonin lyhytikäiset tyttäret ovat kasvaneet tasapainoon radonin kanssa. Määrittämissrajat yhden tunnin mittausajalla ovat erittäin alhaiset, laitteesta riippuen 0,2 – 1 Bq/l.

STUK on toimittanut kunnallisille elintarvikkeiden ja juomaveden valvonnasta vastaaville laboratorioille mittalaitteen elintarvikkeiden ja juomaveden radioaktiivisuuden mittaamiseksi poikkeuksellisissa säteilytilanteissa. Näitä samoja mittareita käytetään normaalioloissa veden radonpitoisuuden seulontamittauksiin. Mittalaitteistona on Mini-Assay 6 – 20 laskuri ja ilmaisimena 5-41 NaI(Tl)-tukekide. Mittaus tehdään kolmen litran muovikannussa käyttäen 2,5 litran näyttemäärää. Mini-Assay menetelmällä määrittämissraja on 10 – 20 Bq/l riippuen käytetystä mittausajasta ja siitä, onko mittaus suoritettu taustasuojassa.

STUK on suorittanut vertailevaa tutkimusta paikallislaboratorioiden seulontamittausten kanssa. Mini-Assay menetelmän antamat tulokset ovat olleet keskimäärin 20 % alhaisempia kuin nestetuikemenetelmällä saadut tulokset. Näytekohtaiset erot ovat olleet suurimmillaan noin 60 %. Eroihin on todennäköisesti vaikuttanut radonin karkaaminen näytteenoton ja mittauksen eri vaiheissa Mini-Assay menetelmää käytettäessä. Jo näytteenottovaiheessa vettä on saatettu laskea suuremmalla nopeudella isoon näytteenottoastiaan kuin pieneen nestetuikepulloon. Radonia karkaa myös siirrettäessä näytettä kanisterista mittausastiaan, ja jonkin verran myös mittauksen aikana mittausastista.

7.2 Pitkäikäiset alfa- ja beeta-aktiiviset aineet

Talousveden pitkäikäisten radioaktiivisten aineiden määrittäminen voidaan tehdä joko nuklidikohtaisilla analyyseillä, jolloin saadaan kunkin aineen tarkat pitoisuudet, tai mittaamalla näytteestä sen kokonaisalfa- ja/tai beetaaktiivisuus. Käytännössä kokonaisaktiivisuuden mittauksia kannattaa käyttää seulontamenetelminä päätettäessä tarvitaanko tarkempia, mutta aikaa vieviä nuklidikohtaisia analyysejä. Samanaikainen kokonaisalfa- ja beetamittaus voidaan tehdä nestetuikemenetelmällä. Vaihtoehtoisia menetelmiä ovat esimerkiksi ISO 9696 standardi menetelmät erikseen alfalle että beetalle.

Jos on käytettävissä nestetuikespektrometri, saadaan lisäksi yksityiskohtaista tietoa veden nuklidikoostumuksesta, jota ISO 9696 standardi menetelmällä ei saada. Nestetuikemenetelmällä saadaan tällöin veden radiumpitoisuus ja voidaan antaa arvio veden uraanipitoisuudesta. Lisäksi spektristä voidaan joissain tapauksissa havaita kohonnut radioaktiivisen lyijyn (lyijy-210) pitoisuus. Näytteenvalmistus on nestetuikemenetelmässä yksinkertaisempi verrattuna ISO 9696 standardi menetelmään.

Uraani-238:n pitoisuus voidaan mitata myös ICP-massaspektrometrillä. Halpana menetelmänä sitä voidaan käyttää seulontamenetelmänä ja nestetuikemenetelmän tukena, kun halutaan tietää, ylittyykö mahdollisesti 0,1 viitteellinen kokonaisannos mSv. Määrittämissä rutiinimittauksissa vähintään 1 mikrog/l (0,01 Bq/l uraani-238). Menetelmällä voidaan mitata myös muiden vedessä esiintyvien haitallisten alkuaineiden pitoisuuksia. Jos uraanin kemialliselle myrkyllisyydelle asetetaan raja-arvo, sen valvominen tulee olemaan helpointa ICP-massaspektrometrimittauksin.

7.3 STUKin mittauspalvelut

STUK tarjoaa yksityistalouksien näytteille joko pelkän radonmittauksen tai radonmittauksen yhdistettynä kokonaisalfamittaukseen. Tämän lisäksi tehdään vesilaitoksille kokonaisbeetamittauksia sekä nuklidikohtaisia analyysejä.

STUKissa kokonaisalfamittaus tehdään nestetuikemenetelmällä, mikä kertoo pitkäikäisten alfa-aktiivisten aineiden, kuten uraanin (uraani-238 ja uraani-234), radiumin (radium-226) ja poloniumin (polonium-210) kokonaismäärän

(Salonen 1993). Samalla spektrometrisellä mittauksella saadaan myös veden radiumpitoisuus varsin luotettavasti. Nestetuikespektristä voidaan edellisten lisäksi antaa arvio uraanin määrästä milligrammoissa käyttäen kalliopohjavesissä esiintyviä tyypillisiä isotooppisuhteita. Näytteistä 25 % isotooppisuhte on pienempi kuin 1,4 ja 25 % suurempi kuin 2,3. Annetessa ala- ja yläraja uraanin määrälle milligrammoissa käyttäen isotooppisuhteina 1 – 3 on uraanipitoisuus lähes 90 %:ssa tapauksista tällä välillä.

Kokonaisbeetamittaus tehdään samanaikaisesti kokonaisalfamittauksen kanssa. Annoksen kannalta beeta-aktiivisesta nuklideista merkittävin on lyijy-210. Kokonaisbeetamittauksen tarkkuus nestetuikemenetelmällä on huomionpi kuin kokonaisalfamittauksen. Lyijyn määrän arvioiminen nestetuikespektristä on hankalaa, koska muut nuklidit häiritsevät sen määrittystä. Spektrin perusteella voidaan asiakkaalle antaa suositus jatkotoimenpiteistä.

8 Uraanin kemiallinen myrkyllisyys

Uraanin tiedetään suurina pitoisuuksina vahingoittavan munuaisia. Maailman terveysjärjestö WHO on äskettäin arvioinut uudelleen juomaveden uraanin terveysperusteisen raja-arvon ja päätenyt aikaisempaa alhaisempaan ohjearvosuositukseen, joka ylittyy Suomessa maaperän koostumuksen vuoksi monin paikoin. WHO:n ehdotus raja-arvoksi on 2 mikrog/l (World Health Organization 1998), kun esimerkiksi EPA Yhdysvalloissa on päätenyt käyttämään raja-arvoa 30 mikrog/l (aikaisempi arvo 20 mikrog/l) ja Kanada arvoa 100 mikrog/l.

Kuten taulukosta 13 käy ilmi, lähes miljoona suomalaista käyttää vettä, jossa WHO:n esittämä raja-arvo ylittyy. Suurin osa näistä ylityksistä johtuu verkostovedestä. Sen sijaan raja-arvojen 20 ja 100 mikrog/l ylittäjistä valtaosa on yksityiskaivojen käyttäjiä.

Taulukko 13. Erityyppisten vesilähteiden käyttäjälukumäärät uraanin kemiallisen myrkyllisyyden perusteella ehdotetuilla enimmäispitoisuuksilla. Suluissa tilanne ennen ST-ohjeen 12.3 voimaantuloa.

Vesilähde	Käyttäjien lkm yhteensä	2 µg/l ylittävät	20 µg/l ylittävät	100 µg/l ylittävät
Vesilaitokset	4 500 000	600 000	9 000 (10 000)	0 (1 000)
Rengaskaivot	500 000	100 000	10 000	2 000
Porakaivot	200 000	100 000	30 000	6 000
Yhteensä	5 200 000	800 000	50 000	8 000

Esitetty WHO:n raja-arvo perustuu pääasiassa kokeellisiin tutkimuksiin. Vedenkäyttäjiä on tutkittu hyvin rajoitetusti. Näissä tutkimuksilla muutamien kymmenien mikrog/l pitoisuuksilla on havaittu pieniä muutoksia munuaisten eritystoiminnassa. Nämä muutokset ovat olleet normaalin rajoissa eivätkä ole liittyneet henkilöiden sairastumiseen. Kansanterveyslaitoksen, Säteilyturvakeskuksen ja Sosiaali- ja terveysministeriön yhteistyönä on valmistumassa edellisiä huomattavasti laajempi tutkimus, jossa selvitetään porakaivoveden uraanin yhteyttä terveyteen Suomessa. Tutkimus valmistunee vuonna 2001.

Luonnonuraani koostuu kolmesta isotoopista, joista säteilysuojelun kannalta merkityksellisiä ovat uraani-238 ja uraani-234. Uraani-238:n puoliintumisaika on ratkaisevasti pitempi kuin uraani-234:n (katso Taulukko 1). Tästä seuraa, että uraanipitoisuus mitattuna massana tilavuusyksikköä kohti koostuu lähes yksinomaan isotoopista uraani-238. Pitoisuus ilmoitetaan tällöin yleensä yksikössä mikrog/l ($\mu\text{g/l}$), tai sen tuhatkertaisena yksikkönä millig/l (mg/l). Uraanin pitoisuus näissä yksiköissä saadaan edullisimmin mitattua käyttäen ICP-massaspektrometriä.

Taulukossa 14 näkyy, mitä juomaveden uraanipitoisuuden raja-arvot merkitsevät radioaktiivisuuspitoisuutena ja vuosiansiannoksena. Vaihteluväli johtuu isotooppisuhteen uraani-234/uraani-238 vaihtelusta: sen arvot ovat maaperän vesissä lähellä arvoa 1,2 ja porakaivoissa keskimäärin 1,9. Taulukossa on oletettu vaihteluvälin olevan 1-3 (90% porakaivoista suhde on pienempi kuin 3).

Taulukko 14. Uraanin kemiallisen myrkyllisyyden perusteella ehdotetut raja-arvot uraani-238:n ja kokonaisuraanin aktiivisuuspitoisuuksina ja vuosiansiannoksina. Vaihteluväli vastaa isotooppisuhteen uraani-234/uraani-238 arvoja 1-3.

Raja-arvo	Uraani-238 pitoisuus Bq/l	Uraani-234 ja -238 yhteensä Bq/l	Annos uraanista mSv vuodessa
2 mikrog/l	0,025	0,05-0,1	0,001-0,002
20 mikrog/l	0,25	0,5-1	0,01-0,02
100 mikrog/l	1,2	2,5-5	0,06-0,1

Talousveden radioaktiivisuusvalvonnassa voidaan hyödyntää ICP-massaspektrometrillä tai muulla tavoin määritettyjä uraanin yksikössä $\mu\text{g/l}$ mitattuja pitoisuuksia. EU:n talousvesidirektiivin viitteellinen kokonaisannos 0,1 mSv vuodessa vastaa taulukon mukaan noin 100 $\mu\text{g/l}$ luonnonuraania. Viitteelliseen kokonaisannokseen lasketaan mukaan uraanin ja radiumin isotoopit. Tällöin 100 $\mu\text{g/l}$ suuruinen uraanipitoisuus vedessä merkitsee todennäköistä viitearvon ylitystä. Arvoa 100 $\mu\text{g/l}$ alhaisempi, sopivasti valittu seulontaraja takaisi, ettei viitearvo ainakaan uraanin osalta ylittyisi edes poikkeavan korkeilla isotooppisuhteen arvoilla.

9 KIRJALLISUUSVIITTEET

Arvela H, Mäkeläinen I, Castrén O. Otantatutkimus asuntojen radonista Suomessa, STUK-A108. Helsinki: Oy Edita Ab, 1993.

Asikainen M, Kahlos H. Pohja- ja pintavesien luonnollinen radioaktiivisuus Suomessa. STL-A24. Helsinki: Säteilyturvallisuuslaitos, 1977.

Asikainen M. Natural radioactivity of ground water and drinking water in Finland. STL-39. Helsinki: Säteilyturvakeskus, 1992.

Auvinen A, Mäkeläinen I, Hakama M, Castrén O, Pukkala E, Reisbacka H, Rytömaa T. Indoor Radon Exposure and Risk of Lung Cancer: a Nested Case-Control Study in Finland. *Journal of National Cancer Institute* 1996; 88: 966-972. (See also: ERRATUM: *Journal of National Cancer Institute* 1998 90: 400-401).

Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionising radiation. *Official journal* 1996; NO. L 159, 29/06/1996: 0001-0114.

International Commission on Radiological Protection. Annual limits of intake of radionuclides by workers based on the 1990 Recommendations. ICRP Publication 61. Oxford: Pergamon Press, 1991.

International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. Oxford: Pergamon Press, 1994.

International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 3. Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 69. Oxford: Pergamon Press, 1995.

Kendall GM, Fell TP, Phipps AP. A Model to evaluate doses from radon in drinking water. *Radiation Protection Bulletin* 1988; 97: 7-8.

Korkka-Niemi K, Sipilä A, Hatva T, Hiisvirta L, Lahti K, Alftan G. Valtakunnallinen kaivovesitutkimus. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja – sarja A 146. Helsinki: Oy Edita Ab, 1993.

Korkka-Niemi K, Sipilä A. Valtakunnallisen kaivovesitutkimuksen 1990 – 1991 yhteydessä syntyneet perustiedot . Vesi- ja ympäristöhallinnon monistesarja nro 506. Helsinki: Vesi- ja ympäristöhallitus, 1993.

National Research Council. Health risks of radon and other internally deposited alpha emitters. BEIR 4. Washington DC: National Academy of Sciences, 1988.

National Research Council. Health effects of exposure to radon. BEIR 6. Washington DC: National Academy of Sciences, 1999.

National Research Council. Risk Assessment of Radon in Drinking Water. Washington DC: National Academy of Sciences, 1999.

Neuvoston direktiivi 98/83/EY ihmisten käyttöön tarkoitetun veden laadusta, annettu 3 päivänä marraskuuta 1998. EYVL L 330 05.12.1998: 32.

Pershagen G, Åkerblom G, Axelson O, Clavensjö B, Damber L, Desai G, Enflo A, Lagarde F, Mellander H, Svartengren M, Swedjemark GA. Residential radon exposure and lung cancer in Sweden. The New England Journal of Medicine 1994; 330: 159-164.

Ruosteenoja E, Mäkeläinen I, Rytömaa T, Hakulinen T, Hakama M. Radon and Lung Cancer in Finland. Health Physics 1996; 71(2): 185-189.

Salonen L. Natural radionuclides in ground water in Finland. Radiation Protection Dosimetry 1988; 24: 163-166.

Salonen L. ²³⁸U series radionuclides as a source of increased radioactivity in groundwater originating from Finnish bedrock. Future Groundwater Resources at Risk. Proceedings of the Helsinki Conference, June 1994. IAHS Publ. No. 222.

Salonen L. A rapid method for monitoring of uranium and radium in drinking water. *Science of the Total Environment* 1993; 130/131: 23-35.

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

Strålsäkerhetscentralen. Radioaktivitet i dricksvatten. Strål- och kärnsäkerhetsöversikter. December 2000.

Säteilyturvakeskus. Juomaveden radioaktiivisuus. Säteily- ja ydinturvallisuuskatsauksia. Toukokuu 2000.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 1993 Report, United Nations, 1993.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 Report. United Nations, 2000.

Voutilainen A, Mäkeläinen I, Huikuri P, Salonen L. Porakaivoveden radokartasto/Radonatlas över Borrbrunnar/Radon Atlas of wells drilled into bedrock. STUK-A171. Helsinki: Oy Edita Ab, 2000.

World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. WHO/EOS/98.1. International Programme on Chemical Safety. Health criteria and other supporting information Addendum to Volume 2 Geneva: World Health Organization, 1998.

STUK-A -sarjan julkaisuja

STUK-A181 Jalarvo V. Suomalaisten solariuminkäyttö. Helsinki 2000.

STUK-A180 Salomaa S, Mustonen R (eds.). Research activities of STUK 1995 - 1999. Helsinki 2000.

STUK-A179 Salomaa S (ed.). Research projects of STUK 2000 - 2002. Helsinki 2000.

STUK-A178 Rantavaara A, Calmon P, Wendt J, Vetikko V. Model description of the Forest Food Chain and Dose Module FDMF. Helsinki 2000.

STUK-A177 Rantavaara A, Moring M. Puun tuhkan radioaktiivisuus. Helsinki 2000.

STUK-A176 Lindholm C. Stable chromosome aberrations in the reconstruction of radiation doses. Helsinki 2000.

STUK-A175 Annanmäki M, Turtiainen T, Jungclas H, Rausse C. Disposal of radioactive waste arising from water treatment: Recommendations for the EC. Helsinki 2000.

STUK-A174 Servomaa A, Parviainen T (toim). Säteilyturvallisuus ja laatu röntgendiagnostiikassa 2000. Koulutuspäivät 24. - 25.2.2000 ja 10. - 11.4.2000. Helsinki 2000.

STUK-A173 Hämäläinen RP, Sinkko K, Lindstedt M, Ammann M, Salo A. Decision analysis interviews on protective actions in Finland supported by the RODOS system. Helsinki 2000.

STUK-A172 Turtiainen T, Kokkonen P, Salonen L. Removal of Radon and Other Natural Radionuclides from Household Water with Domestic Style Granular Activated Carbon Filters. Helsinki 1999.

STUK-A171 Voutilainen A, Mäkeläinen I, Huikuri P, Salonen L. Pora-kaivoveden radonkartasto/Radonatlas över borrbrunnar/Radon Atlas of wells drilled into bedrock in Finland. Helsinki 2000.

STUK-A170 Saxén R, Koskelainen U, Alatalo M. Transfer of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs into fishes in some Finnish lakes. Helsinki 2000.

STUK-A169 Annanmäki M, Turtiainen T (Eds.). Treatment Techniques for Removing Natural Radionuclides from Drinking Water. Helsinki 1999.

STUK-A168 Suomela M, Bergman R, Bunzl K, Jaakkola T, Rahola T, Steinnes E. Effect of industrial pollution on the distribution dynamics of radionuclides in boreal understory ecosystems (EPORA). Helsinki 1999.

STUK-A167 Thorring H, Steinnes E, Nikonov V, Rahola T, Rissanen K. A summary of chemical data from the EPORA project. Helsinki 1999.

STUK-A166 Rahola T, Albers B, Bergman R, Bunzl K, Jaakkola T, Nikonov V, Pavlov V, Rissanen K, Schimmack W, Steinnes E, Suomela M, Tillander M, Äyräs M. General characterisation of study area and definition of experimental protocols. Helsinki 1999.

STUK-A165 Ilus E, Puhakainen M, Saxén R. Strontium-90 in the bottom sediments of some Finnish lakes. Helsinki 1999.

STUK-A164 Kosunen A. Metrology and quality of radiation therapy dosimetry of electron, photon and epithermal neutron beams. Helsinki 1999.

STUK-A163 Servomaa A (toim.). Säteilyturvallisuus ja laadunvarmistus röntgendiagnostiikassa 1999. Helsinki 1999.

STUK-A162 Arvela H, Rissanen R, Kettunen A-V ja Viljanen M. Kerrostalojen radonkorjaukset. Helsinki 1999.

STUK-A161 Jokela K, Leszczynski D, Paile W, Salomaa S, Puranen L, Hyy-salo P. Radiation safety of handheld mobile phones and base stations. Helsinki 1998.

STUK-A160 Voutilainen A, Vester-backa K, Arvela H. Radonturvallinen rakentaminen - Kysely kuntien viranomaisille. Helsinki 1998.

STUK-A159 Hämäläinen RP, Sinkko K, Lindstedt M, Ammann M, Salo A. RODOS and decision conferencing on early phase protective actions in Finland. Helsinki 1998.

Täydellisen listan STUK-A -sarjan julkaisuista saa

Säteilyturvakeskus

Julkaisutoimikunta/Sihtööri

PL 14

00881 Helsinki

puh. (09) 759 881

The full list of publications is available from:

STUK- Radiation and Nuclear Safety Authority

P.O. BOX 14

FIN-00881 HELSINKI

Finland

Tel. +358 9 759 881

Porakaivot
1000 Bq/l ylittävien osuus

- 0 %
- 1 - 10 %
- 10 - 50 %
- 50 - 100 %
- alle 10 havaintoa

