



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Arttu Kauppila

# Radon ja rikkivety talousvedessä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

29.4.2020

Tekijä Otsikko	Arttu Kauppila Radon ja rikkivety talousvedessä
Sivumäärä Aika	32 sivua 29.4.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-urakointi
Ohjaaja	lehtori Hanna Sulamäki
<p>Tässä insinööriyössä selvitettiin talousvedessä esiintyvien radonin ja rikkivedyn haittavai- kutuksia, eri poistomenetelmiä sekä esiintyvyyttä Suomessa. Selvityksessä perehdyttiin alueellisiin eroavaisuuksiin radonin ja rikkivedyn esiintyvyydessä sekä siihen, mitkä asiat vaikuttavat radonin ja rikkivedyn syntyyn. Työssä hyödynnettiin Säteilyturvakeskuksen kat- tavaa aineistoa ja useita tutkimuksia sekä sosiaali- ja terveysministeriön antamia asetuksia radoniin liittyen. Poistomenetelmistä käsiteltiin aktiivihillisuodattimet sekä ilmastuslaitteet. Lisäksi insinööriyön yhteydessä suoritettiin tutkimuksia itse kehitellyllä ilmastuslaitteella.</p> <p>Työssä käydään aluksi tarkemmin läpi radonin sekä rikkivedyn teoriaa, minkä jälkeen käsi- tellään tarkasti eri poistomenetelmäratkaisuja näille. Työn lopuksi tarkastellaan itse kehitel- lylle ilmastuslaitteelle suoritettua tutkimusta. Tarkastelussa käydään läpi tutkimuksen eri vaiheet sekä tutkimuksen lopputulema. Lisäksi tarkastelussa pohditaan mahdollisia kehi- tystoimenpiteitä laitteen toiminnan tehostamiseksi.</p> <p>Tämän insinööriyön avulla saa kattavan kuvan radonin sekä rikkivedyn yleisyydestä ja haitoista suomalaisten talousvesissä. Työssä käsitellyistä poistomenetelmistä sekä niiden tehokkuudesta ja soveltuvuudesta eri kohteisiin saa luotettaviin tutkimuksiin ja selvityksiin perustuvaa tietoa. Työtä voi hyödyntää oman tai asiakaskohteen radonin tai rikkivedyn poistojärjestelmän tarpeellisuuden määrittelemisessä sekä sopivimman poistojärjestelmän valinnassa.</p>	
Avainsanat	radon, rikkivety, poistomenetelmä, tutkimus

Author Title	Arttu Kauppila Radon and Hydrogen Sulphide in Domestic Water
Number of Pages Date	32 pages 29 April 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Contracting
Instructor	Hanna Sulamäki, Principal Lecturer
<p>The goal of this thesis was to investigate the harmful effects of radon and hydrogen sulphide in domestic water, the different removal methods and the regional differences in the amounts of the substances detected in Finland.</p> <p>For this thesis, data from several studies on radon and hydrogen, sulphide as well as the Finnish laws and regulations were studied. The different removal methods examined in this thesis were activated carbon filters and aeration devices. Furthermore, the final year project included studied the topic with a self-developed aeration device.</p> <p>The thesis discussed, first, the concept and theory of radon and hydrogen sulphide and the different methods for their removal. Furthermore, the thesis introduced the theory and results of the studies made with the self-developed aeration device, as well as the possible improvements to make the device more efficient.</p> <p>This bachelor's thesis provides a clear view on how common radon and hydrogen sulphide are and how they negatively affect the domestic water in Finland. The studies on different removal methods, and how efficient they are, provide valuable data for further investigations. This thesis can be beneficial for defining the most viable solution for radon and hydrogen sulphide removal on a building site.</p>	
Keywords	radon, hydrogen sulphide, removal method

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Radon	2
2.1	Terveyshaitat	2
2.2	Viitearvot ja mittaukset	3
2.3	Radon talousvedessä	5
2.4	Esiintyvyys	7
3	Rikkivety	11
3.1	Rikkivety talousvedessä	11
3.2	Terveyshaitat	12
4	Poistomenetelmät	14
4.1	Ilmastus	14
4.2	Aktiivihiilisuodatus	19
4.3	Yhteenveto poistomenetelmistä	22
5	Tutkimus	24
5.1	Ilmastuslaite	24
5.2	Mittaukset	25
5.3	Tutkimuksen lopputulema	27
6	Yhteenveto	29
	Lähteet	31

## Lyhenteet ja käsitteet

becquerel	SI-järjestelmän yksikkö, millä mitataan aineen radioaktiivisuutta. Aineen radioaktiivisuus on 1 becquerel, kun annetuissa ainemäärässä hajoaa yksi atomi sekunnissa.
Bq	becquerelin lyhenne
isotooppi	alkuaineen erimassainen atomi, jonka ytimessä on eri määrä neutroneja, mutta sama määrä protoneja.
ppm	suhdeyksikkö, lyhenne tulee englannin kielen sanoista "parts per million" eli miljoonasosa. 1 ppm = 0,0001%
STM	sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö
STUK	Säteilyturvakeskus

## 1 Johdanto

Radon sekä rikkivety aiheuttavat Suomessa paljon haittaa varsinkin haja-asustusalueiden omakotitaloasujille. Maaperässä esiintyvä ja sieltä rakenteisiin sekä porakaivoveteen kulkeutuva radioaktiivinen kaasu radon voi suurina pitoisuuksina olla ihmisten terveydelle erittäin haitallista. Rikkivetyä esiintyy radonin tapaan maaperässä, josta se kulkeutuu porakaivoveteen. Suomessa talousveden rikkivetypitoisuudet ovat yleensä niin alhaisia, että siitä ei aiheudu vaaraa terveydelle. Rikkivedyn suurin haitta on veden erittäin epämiellyttävä haju, laatoituksen värjäytyminen sekä putkistolle aiheutuva korrosioriski.

Tämä insinööriyö käsittelee talousveden radonin ja rikkivedyn esiintyvyyttä Suomessa. Insinööriyössä on tarkoituksena selvittää eri menetelmiä, joiden avulla radon- ja rikkivetypitoisuuksia pystytään vähentämään merkittävästi tai jopa poistamaan kokonaan. Selvitystyön lisäksi tarkoituksena on suorittaa tutkimuksia itse kehitellyllä rikkivedyn- ja radoninpoistajalla. Osana tätä tutkimusta suoritetaan porakaivoista otettujen vesinäytteiden analysointi yhteistyössä Säteilyturvakeskuksen kanssa.

Insinööriyöllä ei ole tilaajayritystä, mutta insinööriyön yhteydessä suoritettavan tutkimuksen ilmastuslaitteet valmistetaan ja asennetaan yhteistyössä LVIS-Kauppi Oy:n kanssa. Tutkimuksessa mukana olevat kohteet ovat yrityksen asiakkaita.

## 2 Radon

Radon on hajuton, mauton ja näkymätön radioaktiivinen jalokaasu, jota esiintyy maaperässä maailmanlaajuisesti. Alueellisia eroja maaperän radonpitoisuuksissa on paljon. Maaperän tyyppi ja koostumus vaikuttaa merkittävästi radonpitoisuuksiin sekä radonin läpäisevyyteen maa-aineksen läpi. Ihminen altistuu radonsäteilylle rakennusten sisäilmästä hengitettynä sekä talousvedestä juotuna. Radon on luonnollinen radioaktiivinen alkuaine, joka kulkeutuu asuntoihin rakennuksen rakenteissa olevien rakojen kautta sekä talousveden mukana vesilähteestä. Radonpitoisuuden mittayksikkö on becquerel ja sen lyhenne on Bq. Becquerel on SI-järjestelmän radioaktiivisuutta mittaava yksikkö. Aineen radioaktiivisuus on 1 becquerel, kun annetussa ainemäärässä hajoaa yksi atomi sekunnissa. [5.]

Radon on alkuaine, jolla on useita eri isotooppeja. Isotooppi on alkuaineen erimassainen atomi, jonka ytimessä on alkuaineeseen verrattuna sama määrä protoneja, mutta eri määrä neutroneja. Suomessa esiintyvä radon on pääosin peräisin alfasäteilyä lähettävästä radon-222-isotoopista. Radon-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) on isotoopin uraani-238:n hajoamisketjun lopputuote, hajoamisketjuprosessi tapahtuu syvällä maaperässä. Toinen Suomessa esiintyvä radonisotooppi on radon-220, joka tunnetaan myös nimellä thoron. Thoron on isotoopin thorium-232 hajoamisketjun lopputuote. Radon-220-isotoopin puoliintumisaika on 55 sekuntia, kun taas isotoopin radon-222 puoliintumisaika on noin 3,8 vuorokautta. Huomattavasti pidemmän puoliintumisaikansa vuoksi radon-222-isotooppia havaitaan merkittävästi radon-220-isotooppia useammin. Valtaosa radon-220:sta ehtii hajota maaperässä ennen säteilyn pääsyä asuntoon tai kaivoveteen. [6.]

### 2.1 Terveyshaitat

Juomavedessä esiintyvä radon altistaa ihmisen vatsalaukun radioaktiiviselle säteilylle nieltynä, mikä lisää riskiä sairastua vatsanseudun syöville. Ruoanlaiton yhteydessä veden höyrystyessä sekä suihkussa käydessä vedessä oleva radonsäteily vapautuu ilmaan, ja ihminen altistuu radonsäteilylle hengitysteiden kautta. Hengitysteiden kautta radonsäteilylle altistuminen lisää merkittävästi riskiä sairastua keuhkosyöpään. Suomessa todetuista keuhkosyöpätapauksista noin 15 prosentissa aiheuttajana on ollut radon tai sairastumisen on todettu liittyvän radonaltistumiselle. [5.]

Edellä mainittujen syöpäriskien lisäksi ei ole tiedossa, että radonilla olisi muita terveyshaittoja tai vaikutuksia ihmisen hyvinvoinnille tai aisteille. Radonsäteilyllä ei ole havaittu olevan vaikutusta rakenteisiin, esineisiin tai elintarvikkeisiin. Korkealle radonsäteilylle altistuneiden esineiden ja elintarvikkeiden pinnoille muodostuu kuitenkin radonkerros. Tutkimuksissa on havaittu, että radonkerros katoaa muutamissa tunneissa, kun esine tai elintarvike on siirretty tilasta pois. [5.]

## 2.2 Viitearvot ja mittaukset

Sosiaali- ja terveysministeriö eli STM on asetuksissaan määrittänyt laatuvaatimuksen sekä laatusuosituksen asuntojen radonpitoisuuksille talousvedessä sekä laatuvaatimuksen sisäilmassa. Näillä asetuksilla pyritään minimoimaan radonperäisten terveyshaittojen syntymistä. [8; 12.]

STM:n laatiman asetuksen 1352/2015 mukaan vesilaitoksista saatavan talousveden laatuvaatimus on 1 000 Bq/l ja laatusuositus 300 Bq/l. Mikäli veden radonpitoisuus ylittää annetun laatusuosituksen, vesilaitoksen tulee suorittaa riskienarviointi, jonka perusteella arvioidaan tarve ryhtyä korjaaviin toimenpiteisiin. Asetuksen laatuvaatimus sekä -suositus koskevat ainoastaan vesilaitoksia, mutta niitä käytetään yleisesti myös yksityisten kaivovesien viitearvoina radonin aiheuttaman terveysriskin vuoksi. Mikäli veden radonpitoisuus on yli 1 000 Bq/l, suositellaan vedestä mitattavan myös uraanipitoisuus. [12.]

Kaikkien uusien asuntojen sisäilman radonpitoisuuden laatuvaatimus on STM:n asetuksen 1044/2018 mukaisesti 200 Bq/m<sup>3</sup>. Asuntojen suunnittelu ja toteutus tulee suorittaa niin, että asunnon radonpitoisuus jää tämän alapuolelle. Olemassa olevien asuntojen sisäilman radonpitoisuuden laatuvaatimus on saman asetuksen mukaisesti 300 Bq/m<sup>3</sup>. Mikäli pitoisuus ylittyy, tulisi korjaaviin toimenpiteisiin ryhtyä. [8.] STM:n asetuksissa laaditut radonpitoisuuden raja-arvot on esitetty taulukossa 1.



Taulukko 1. Radonpitoisuuksien raja-arvot [8; 12].

Sosiaali- ja terveysministeriön asettamat raja-arvot radonpitoisuuksille			
	Suositus	Vaatimus	Yksikkö
Talousvedessä	< 300	< 1 000	Bq/l
Huoneilmassa	-	< 300	Bq/m <sup>3</sup>
Huoneilmassa, uudisrakennus	-	< 200	Bq/m <sup>3</sup>

Sisäilman radonpitoisuudet lasketaan vuosikeskiarvosta, joka saadaan radonmittauskaudella 1.9.–31.5. suoritetun mittauksen tuloksesta kertomalla se arvolla 0,9. Sisäilman radonpitoisuus mitataan yleensä radonmittauspurkillä. Mittauspurkki asetetaan asunnon alimpaan asuinkerrokseen ja purkki sijoitetaan tyypillisesti lipaston tai muun korkean huonekalun päälle. Mittauspurkkia pidetään koko mittausjakson ajan samassa huoneessa, jotta mittauksista saadaan luotettava. Mittausjakson jälkeen purkki toimitetaan analysoitavaksi mittauspurkin toimittaneelle yritykselle. Mittausmenetelmiä ja -laitteita on purkkimittauksen lisäksi myös muita. Kaikkien mittalaitteiden ja mittausmenetelmien tulee olla Säteilyturvakeskuksen eli STUK:n hyväksymiä. Mittalaitteet täytyy kalibroida laitevalmistajan ohjeistuksen mukaisesti määräajoin. [8; 5.] Taulukossa 2 on esitetty tyypillisimmät sisäilman radonkorjausmenetelmät sekä arvio kunkin toimenpiteen vaikutuksesta radonpitoisuuteen.

Taulukko 2. Eri korjausmenetelmiä sisäilman radonpitoisuuden laskuun [5].

Korjausmenetelmä	Radonpitoisuuden lasku, %
Radonimuri	65–90
Radonkaivo	75–95
Ryömintätilan tuuletus	30–80
Kellarin ilmanvaihdon parantaminen	20–60
Ilmanvaihdon tehostaminen	10–50

### 2.3 Radon talousvedessä

Radonin esiintyvyys talousvedessä on yleistä koko Suomessa. Radonia saattaa esiintyä talousvedessä yksityisten kaivojen lisäksi myös vesilaitoksista peräisin olevassa vedessä, jossa pitoisuudet ovat kuitenkin yleensä erittäin pieniä. STM:n asetuksen 401/2001 mukaan vesilaitosten vedenlaatua pitää valvoa talousveden laadusta ja käyttäjämäärästä riippuen 1–3 vuoden välein tehtävin tutkimuksin. Kunkin kunnan terveys- ja suojeluviranomainen voi kuitenkin määrittää tutkimusten välin myös tätä tiheämmäksi, mikäli kokee sille tarvetta. Jos vesilaitoksen radonpitoisuus ylittää asetetut raja-arvot, sinne asennetaan radoninpoistolaitteisto. [9.]

Vesilaitosten vedenlähteenä voi olla yksi tai useampi vedenottamo. Veden radonpitoisuuteen vaikuttaa vedenottamon raakaveden lähde. Jos raakaveden lähteenä on kalliopohjavesi, on hyvin todennäköistä, että veden radonpitoisuus saattaa olla viitearvojen yläpuolella. Pintavettä raakavesilähteenä käyttävien ottamoiden veden radonpitoisuus on yleisesti erittäin alhainen. Muita vesilaitosten raakaveden lähteitä ovat maaperän pohjavesi sekä tekopohjavesi. [16.] Taulukossa 3 on esitetty vesilaitosten raakavesilähteiden radonpitoisuuksien keskiarvot sekä ottamoiden lukumäärät eri raakavesilähteillä.

Taulukko 3. Vesilaitosten raakaveden eri lähteiden radonpitoisuuksien keskiarvot [16].

Raakavesilähde	Vedenottamot [kpl]	Radonpitoisuus KA [Bq/l]
Pintavesi	129	< 3
Tekopohjavesi	12	38
Maaperän pohjavesi	743	69
Kalliopohjavesi	46	320

Yksityisten kaivovesien radonpitoisuudet ovat vesilaitosten veteen verrattuna yleisesti huomattavasti suurempia. Porakaivoja ja rengaskaivoja vertailtaessa porakaivojen radonpitoisuudet ovat huomattavasti suurempia kuin rengaskaivojen, keskimäärin noin kymmenkertaiset. Tämä selittyy sillä, että porakaivovesi on kalliopohjavettä. Kalliopohjavesi on koko ajan kosketuksissa radonpitoisiin kalliomineraaleihin, jolloin radon liukenee kalliomineraaleista veteen. Koska kalliopohjan maaperä on erittäin tiivistä ja

ympäristö on ilmatonta, radon ei pääse ilmastumaan pois vedestä. Rengaskaivojen vesi on yleisesti pintavettä. Pintavettä ympäröivä maaperä ei ole yhtä radonpitoista kuin kalliopohjaveden maaperä. Lisäksi huokoisen maa-aineksen vuoksi pintavesi pääsee ilmastumaan huomattavasti paremmin kuin kalliopohjavesi.[1]

Kalliopohjaveden merkittävin radioaktiivinen aine on radon, jota syntyy kalliopohjassa uraanin hajoamistuotteena. Uraania maaperään vapautuu uraanipitoisista kallion kiviainesta, varsinkin graniitista. Pohjaveden radonpitoisuuteen vaikuttaa muun muassa veden yleinen laatu ja ympäröivän maa-aineksen hengittävyys. Vedenlaadulla on vaikutusta siihen, kuinka hyvin radon sitoo itsensä veteen. Paljon epäpuhtauksia sisältävä vesi on herkempi sitomaan radonia kuin vesi, jossa epäpuhtauksia ei esiinny samassa määrin. Maa-aineksen hengittävyys edesauttaa pohjaveden ilmastumista, koska radonia poistuu vedestä ilmastumisen yhteydessä. Radon on jalokaasu, joten se ei reagoi maaperän muihin aineisiin ja näin ollen se pystyy liikkumaan maaperässä huomattavasti helpommin kuin muut maaperän radioaktiiviset aineet. Kaasuna radon liukenee kiinteää tai nestemäistä ainetta helpommin veteen. Jos porakaivovedessä on radonia, siinä on hyvin todennäköisesti muitakin radioaktiivisia aineita, tosin huomattavasti pienimpiä määriä. [1; 16.]

Porakaivojen radonpitoisuuksia ei pystytä luotettavasti ennustamaan alueellisesti. Esimerkiksi viereisillä tonteilla olevissa porakaivoissa voi olla merkittäviäkin eroavaisuuksia radonpitoisuuksien suhteen. Kalliopohjavesi saattaa kulkeutua kaivoihin eri reittejä ja eri kalliohalkeamien kautta, vaikka kaivot olisivat hyvin lähekkäin. Eri kohdissa kalliopohjaa voi esiintyä suuriakin vaihteluita kalliomateriaalin radonpitoisuuksissa sekä radonin liukenumistehokkuudessa. Kaivovesien radonpitoisuudet saattavat myös vaihdella vedenkäytön ja vuodenaikojen mukaan riippuen siitä, kuinka hyvin vesi pääsee porakaivossa vaihtumaan. [1.]

Porakaivojen radonpitoisuudet ovat usein suuria ja ylittävätkin monesti talousvedelle asetetun laatusuosituksen. Suomessa on arvion mukaan noin 100 000 vakituksessa käytössä olevaa yksityistä porakaivoa, joilla on yhteensä noin 200 000 käyttäjää. Porakaivoista arviolta noin 10 000:ssa ylittyy veden laatusuositus eli 1 000 Bq/l ja noin 1 000 porakaivossa radonpitoisuus on yli 10 000 Bq/l. Korkein porakaivoveden radonpitoisuus on mitattu Askolassa Itä-Uudellamaalla, 130 000 Bq/l. Tämä on tiettävästi maailman

korkein vesikaivosta mitattu radonpitoisuus. Radon on kaasu, jonka vuoksi se siirtyy erittäin helposti vedestä ilmaan veden käytön yhteydessä. Talousveden radonpitoisuudella onkin merkittävä vaikutus sisäilman radonpitoisuuteen. Veden radonpitoisuuden ollessa 1 000 Bq/l sisäilman radonpitoisuus nousee arviolta 50–200 Bq/m<sup>3</sup>. Ottaen huomioon, että sisäilman radonpitoisuuden viitearvo on 300 Bq/m<sup>3</sup>, talousvedestä käytön yhteydessä vapautuvan radonin määrä on merkittävä. Korkean sisäilman radonpitoisuuden vuoksi korjaustöitä suunnitellessa onkin erittäin tärkeää tarkistuttaa myös kaivoveden radonpitoisuus. [10.] Taulukosta 4 käyvät ilmi talousveden radonpitoisuuksien keskiarvot.

Taulukko 4. Talousvesien radonpitoisuuksien keskiarvot [10].

Talousveden radonpitoisuuksien keskiarvot		
Vesilaitoksista saatava verkostovesi	27	Bq/l
Rengaskaivovesi	50	Bq/l
Porakaivovesi	460	Bq/l

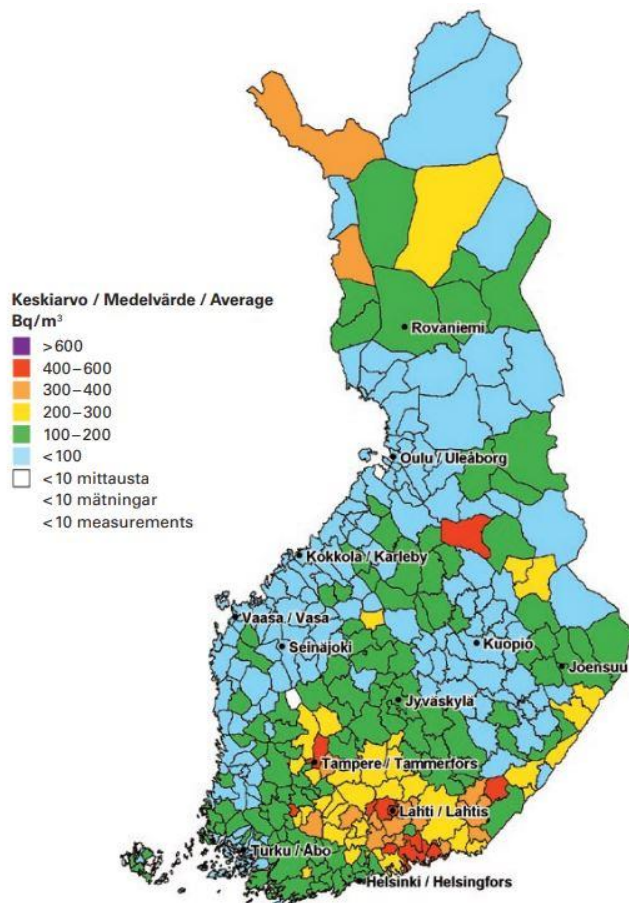
## 2.4 Esiintyvyys

Radonia esiintyy Suomessa ja muissa Pohjoismaissa muuhun maailmaan verrattuna paljon, ja radonpitoisuudet ovat asunnoissa yleisesti ottaen suuremmat kuin muualla maailmassa. Radonin esiintyvyyteen vaikuttavat monet tekijät. Merkittävimpinä tekijöinä ovat maaperän uraanipitoisuus sekä maaperän läpäisevyys. Hyvin ilmaa läpäisevä hiekka- sekä soramaa-aines päästää radonsäteilyä läpi huomattavasti enemmän kuin esimerkiksi kallioperäinen maa tai savimaa. [6; 7.]

Radonin esiintyvyys vaihtelee merkittävästi alueittain, myös kaivoveden ja sisäilman radonpitoisuuksissa on paikallisia eroja. Joillain alueilla kaivoveden radonpitoisuudet saattavat olla suuria, mutta samalla alueella sisäilman radonpitoisuudet niihin verrattuna vähäisiä. Tämä saattaa johtua maaperän tiiveydestä ja koostumuksesta. Radon pääsee kulkeutumaan syvältä maaperästä hyvin läpäisevän huokoisen maa-aineksen läpi sisäilmaan, mutta saman huokoisen maaperän ansiosta kalliopohjavesi pääsee paremmin

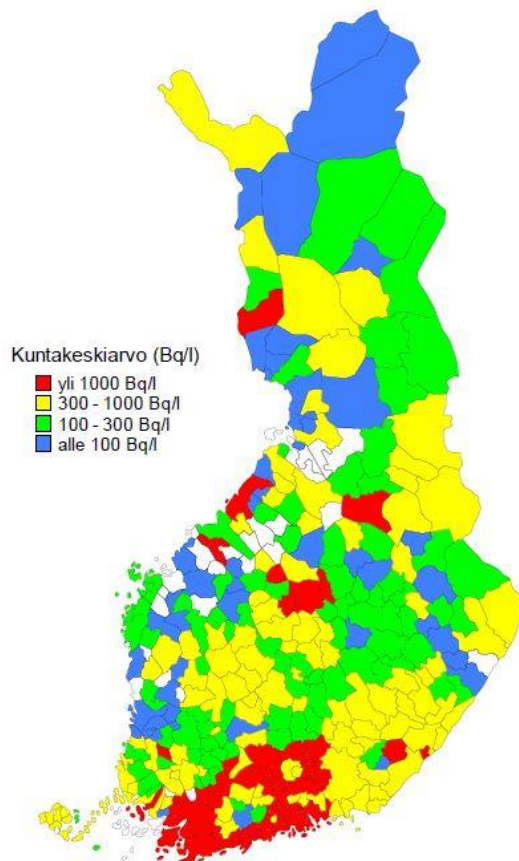
ilmastumaan. Näin ollen sisäilman radonpitoisuus saattaa olla korkea ja kaivoveden radonpitoisuus alhainen. [1; 2; 14.]

Pientalojen sisäilman radonpitoisuuksien osalta suurimmat radonpitoisuudet löytyvät harju- ja reunamuodostuma-alueilta, joissa maaperä koostuu pääosin sorasta ja hiekkakerroksella, johon radonpitoinen huokosilma pääsee hyvin varastoitumaan ja tätä kautta kulkeutumaan asuntojen sisäilmaan. Maakunnista keskiarvallisesti suurimmat radonpitoisuudet löytyvät Uudenmaan, Kymenlaakson, Etelä-Karjalan, Pirkanmaan sekä Päijät- ja Kanta-Hämeen maakunnista. Kaikissa edellä mainituissa sisäilman radonpitoisuuden keskiarvo on yli 200 Bq/m<sup>3</sup> ja keskiarvon ylitysten osuus kussakin maakunnassa on yli 30 prosenttia. [14.] Kuvassa 1 esitetystä kartasta selviää sisäilman radonpitoisuuden kuntakohtaiset keskiarvot.



Kuva 1. Pientalojen kuntakohtaiset sisäilman radonpitoisuuksien keskiarvot kunnittain [14].

Porakaivoveden korkeita radonpitoisuuksia havaitaan varsinkin sellaisilla alueilla, joissa maaperän kiviaines on pääosin graniittia. Graniittisissa kivilajeissa on havaittu esiintyvän muihin kivilajeihin verrattuna huomattavan suuria uraanipitoisuuksia. Graniittialueiden porakaivojen korkeat radonpitoisuudet selittyvätkin osaltaan tällä, koska radon on uraanin hajoamistuote. Suurimmat graniittikivialueet ovat Uudenmaan, Varsinais-Suomen, Etelä-Karjalan sekä Kanta- ja Päijät-Hämeen alueilla. Näissä maakunnissa onkin suurimmat radonpitoisuuksien keskiarvot. Suuria graniittialueita löytyy myös Pohjanmaalta sekä Lapista, mutta nämä esiintymät eivät kuitenkaan näy radonpitoisuustilastoissa samalla tavalla kuin muut graniittialueet. Pohjanmaan osalta tämä saattaa selittyä vähäisellä porakaivojen määrällä. Etelä- ja Keski-Pohjanmaalla mitattuja porakaivoja on yhteensä ainoastaan 73, kun taas esimerkiksi Uudellamaalla mitattuja porakaivoja on yhteensä 4 558. Lapin osalta tämä saattaa selittyä graniittialueen erittäin harvasta asutuksesta ja alueella tehtyjen mittausten alhaisesta määrästä. [1; 2; 15; 16.] Kuvassa 2 on esitetty kuntakohtaiset porakaivojen radonpitoisuuksien keskiarvot.



Kuva 2. Porakaivojen radonpitoisuuksien kuntakohtaiset keskiarvot [2].

Maakunnista Uudellamaalla mitattuja porakaivoja on eniten, ja mitatuissa kaivoissa radonpitoisuuden keskiarvo on maakunnista korkein. Uudellamaalla väestötiheys on lisäksi Suomen ylivoimaisesti suurin, ja haja-asutusalueilla porakaivoja on paljon. Graniittisen maaperän vuoksi radonpitoisuudet Uudellamaalla sijaitsevissa porakaivoissa ovat suuria. Uudenmaan porakaivojen radonpitoisuuksien keskiarvo on 1 400 Bq/l. Tämä on reilusti korkeampi kuin STM:n asetuksessa esitetty viitearvo 1 000 Bq/l, jonka ylittäviä pitoisuuksia pidetään huomattavina terveysriskeinä. [2; 9.]

### 3 Rikkivety

Rikkivety ( $H_2S$ ) on myrkyllinen, väritön ja voimakashajuinen kaasu, joka tunnetaan myös nimellä vetysulfidi. Rikkivedylle on ominaista vahva mädän kananmunan haju, jonka perusteella rikkivety on helppo tunnistaa ja havaita. Rikkivety voi olla huomattava turvallisuusriski erinäisiä sulfideja käyttävissä teollisuuden laitoksissa. Sulfidiliuosten ja erinäisten happojen sekoittuessa ilmaan voi vapautua suuriakin pitoisuuksia rikkivetyä. Myös jätevedenkäsittelyn yhteydessä voi syntyä rikkivetyä. Jäteveden orgaanisen aineen lämpötilan ja pH-arvon ollessa sopivia, orgaanisen aineen mikrobit alkavat tuottamaan rikkivetyä. Tällaisia olosuhteita on esimerkiksi jäteveden käsittelylaitosten sakka-altaissa sekä isojen maatilojen lietealtaissa. [17; 18.]

Rikkivetyä voi muodostua myös kallioisessa maaperässä. Osassa kivilajeista esiintyy luonnostaan paljon rikkiä. Näitä kivilajeja ovat esimerkiksi eri mustaliuskeket. Rikkipitoisista kivilajeista koostuvassa maaperässä rikki saattaa reagoida muiden maaperän aineiden kanssa tuottaen maaperään rikkivetyä. Näitä aineita ovat esimerkiksi maaperän kasviperäisten orgaanisten aineiden hajoamistuotteet. Rikkivety on helposti veteen liukeneva kaasu, joten se liukenee usein maaperästä kalliopohjaveteen. Kalliopohjavedestä rikkivety pääsee kulkeutumaan asuntoihin porakaivon kautta. [3; 19.]

#### 3.1 Rikkivety talousvedessä

Rikkivety on suhteellisen yleinen talousveden epäpuhtaus. Se on yleisintä porakaivovedessä. Pintavesikaivoissa rikkivetyä havaitaan hyvin harvoin, ja vesilaitoksilta peräisin olevissa talousvesissä ei ole rikkivetyongelmia. Porakaivoveteen rikkivetyä syntyy kalliopohjassa. Etenkin suoalueiden läheisyydessä olevissa porakaivoissa havaitaan usein rikkivetyä, koska maaperässä on paljon kasviperäistä orgaanista ainetta. Vedestä rikkivetyä vapautuu ilmaan veden käytön yhteydessä, esimerkiksi vettä hanasta valuttamalla. Lämmintä vettä käytettäessä haju saattaa olla voimakkaampaa kuin kylmää vettä käytettäessä. Tämä selittyy sillä, että veteen liuennut rikkivetykaasu vapautuu ilmaan sitä helpommin mitä korkeampi veden lämpötila on. Esimerkiksi suihkussa käydessä rikkivedyn etova haju voikin olla erittäin voimakasta. Vaikka rikkivetyä sisältävä kaivovesi haisee erittäin voimakkaasti, kaivoveden rikkivetypitoisuudet ovat yleensä hyvin pieniä, alle 1 ppm. Ihmisen hajukynnys rikkivedylle on arviolta n. 0,008 ppm. [3; 18; 19.]



Talousveden rikkivedyllä on hajuhaitan lisäksi muitakin haittoja asuinympäristössä. Veden korkea rikkivetypitoisuus voi aiheuttaa korroosiota eri metallimateriaaleissa, esimerkiksi kuparissa, messingissä ja teräksessä. Näin ollen kupariputket, sekoittajat, putkiston eri osat sekä lämmityslaitteet altistuvat suuremmalle korroosioriskille, mikäli talousvedessä on rikkivetyä. Rikkivety saattaa myös tummentaa hopeaesineitä sekä värjätä muita metalleja. Kylpyhuoneen laatat ja saumat saattavat myös rikkiveden vaikutuksesta värjäytyä kellertäväksi tai tummua. [19.]

Rikkivetyä sisältävällä vedellä voi olla vaikutusta myös elintarvikkeisiin, mikäli vettä käytetään ruoanlaiton yhteydessä. Ruoka saattaa värjäytyä tai rikkivety voi muuttaa ruoan makua. Esimerkiksi kahvi ja tee voivat rikkivetypitoisen talousveden käytön seurauksena värjäytyä tai rikkiveden epämiellyttävä maku saattaa maistua juoman läpi. Vettä keittämällä suurin osa veden rikkivedystä haihtuu ilmaan. [19.]

### 3.2 Terveyshaitat

Rikkivety on suurina pitoisuuksina ihmiselle tappavan myrkyllistä, mutta esimerkiksi kaivo-veden kautta tulevat pienet rikkivetypitoisuudet eivät ole terveydelle haitallisia. Kaivo-veden rikkivetypitoisuuksien suurempana haittana on mätää kananmunaa muistuttava voimakas haju sekä rikkivedyn aiheuttama kohonnut korroosioriski. [17; 18.]

Suurempina määrinä rikkivety on ihmisen terveydelle erittäin haitallista. Kun ilman rikkivetypitoisuus on noin 10–20 ppm, se aiheuttaa ärsytysoireita silmille. Pidempikestoinen tai toistuva altistus saattaa johtaa silmän side- tai sarveiskalvontulehdukseen. Ilman rikkivetypitoisuuden ollessa 50–100 ppm, siitä aiheutuu silmien kyynelvuotoa, polttavaa kipua sekä näön sumentumista. Samalla myös hengityselinten limakalvot ärsyyntyvät aiheuttaen myös nenän ja kurkun ärsytystä. Pidempi tai toistuva altistus saattaa aiheuttaa limaista nuhaa, yskää sekä hengenahdistusta. [18.]

Kun ilman rikkivetypitoisuus on 100–150 ppm, ihmisen hajuasti lamaantuu, eikä ihminen enää haista rikkivedyn voimakasta hajua. Pitoisuudessa 100–500 ppm rikkivety aiheuttaa voimakasta päänsärkyä, pahaa oloa sekä huimausta. Pitoisuuden ollessa yli 500 ppm ihmiselle alkaa muodostua hermostollisia oireita sekä mahdollisesti jo tajuttomuutta. Yli 5 minuutin altistus pitoisuudessa 500 ppm voi aiheuttaa ihmisen hengityskeskusten

lamaantumista ja yli puolen tunnin altistus mahdollisesti jo kuoleman hengityksen lamaantumisen vuoksi. Rikkivetypitoisuuden ollessa 1 000 ppm tai enemmän, tämä ihmiselle välittömän tajunnan menetyksen ja kuoleman hengityskeskukseen lamaannuttua kokonaan. [18.] Taulukossa 5 on esitetty rikkivetypitoisuuksien vaikutukset ihmiselle.

Taulukko 5. Rikkivetypitoisuuden vaikutukset ihmisen terveydelle [18].

Rikkivetypitoisuuden vaikutukset ihmisen terveydelle		
	Pitoisuus	Yksikkö
Hajukynnys	0,008	ppm
Silmän ärsytysoireet	10–20	ppm
Silmien polttava kipu ja näön sumentuminen	50–100	ppm
Hajuaistin lamaantuminen	100–150	ppm
Päänsärky, huimaus ja pahoinvointi	100–500	ppm
Hermostolliset oireet ja pidemmässä altistumisessa tajuttomuus	500–1 000	ppm
Välitön tajuttomuus ja kuolema hengityksen lamannuttua	yli 1 000	ppm

Toistuva altistuminen korkeille rikkivetypitoisuuksille saattaa aiheuttaa ihmiselle kroonista väsymystä, huimausta, ärtyneisyyttä sekä päänsärkyä. Joissain tapauksissa on todettu toistuvan altistumisen johtaneen krooniseen silmän sidekalvontulehdukseen eli niin kutsuttuun kaasusilmään. Kaasusilmään sairastunut ihminen voi saada silmien ja muiden limakalvojen ärsytysoireita rikkivetypitoisuuden ollessa jopa alle 1 ppm. [18.]

## 4 Poistomenetelmät

Jos talousvedessä esiintyy radonia tai rikkivetyä, suositellaan niiden poistamista, vaikka määrät olisivatkin vähäisiä. Vaikka veden radonpitoisuus olisikin vähäinen, nostaa se sisäilman radonpitoisuutta vedenkäytön yhteydessä ilmaan vapautuessaan. Radonin poistolla pystytään ehkäisemään radonsäteilyn aiheuttamia terveyshaittoja ja rikkivedyn poistamisella voidaan merkittävästi parantamaan asumisviihtyvyyttä, vaikka talousveden rikkivetypitoisuudet eivät aiheuta terveyshaittoja. Eri poistomenetelmien vedenkäsittelylaitteiden hinnat vaihtelevat muutamista sadoista euroista useisiin tuhansiin. [3; 5.]

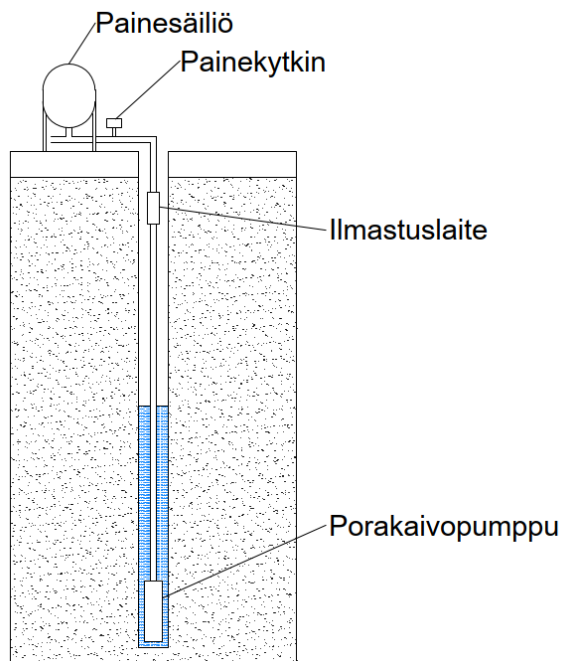
Kaivovedessä esiintyvät radon ja rikkivety ovat kummatkin olomuodoltaan kaasuja, joten niitä pystytään poistamaan vedestä samankaltaisin keinoin. Rikkivedyn ja radonin yleisin ja todennäköisesti edullisin poistomenetelmä on veden ilmastus. Ilmastustapoja on useita erilaisia ja ilmastusmenetelmissä on pieniä eroavaisuuksia. Toinen vaihtoehto radonin poistolle on aktiivihiihisuodatus. Rikkivedyn poistolle vaihtoehtona on myös veden otsonointi, jossa vedessä oleva rikkivety poistetaan otsonikaasun avulla. Tämä on kuitenkin huomattavasti harvinaisempi menetelmä veden ilmastukseen verrattuna. [3; 4; 19.]

### 4.1 Ilmastus

Veden ilmastukseen tarkoitettuja ilmastuslaitteita ja ilmastusmenetelmiä on useita erilaisia, esimerkiksi ilmastussäiliöratkaisuja, ilmastusputkia sekä suoraan porakaivoon syöttövesijohtoon asennettavia ilmastuslaitteita. Laittevalintaan vaikuttaa poistettava aine sekä ympäristö, johon laite tullaan asentamaan. Rikkivedyn poistamiseen tarkoitettujen ilmastuslaitteiden ja radonin poistoon tarkoitettujen ilmastuslaitteiden ovat erilaisia. Radonin poistossa laitteen ilmanvaihdon toteutus on huomattavasti tärkeämpää kuin rikkivedyn poistossa. Rikkivety poistuu huonostikin tuulettuvassa tilassa esimerkiksi porakaivon reiässä, kun taas radon vaatii tehokkaan tuuletuksen tilaan tai laitteeseen, missä radonia poistetaan. Mikäli radonia ei tuuleteta tehokkaasti, se liukenee takaisin veteen tai kulkeutuu esimerkiksi asuntoon sisälle. Asuintiloihin radon voi kulkeutua, jos radoninpoistolaite on sijoitettu rakennuksen sisälle esimerkiksi tekniseen tilaan. [1; 3; 4; 5.]

Rikkivedyn poistoon käytetään yleensä hapetusputkea tai suoraan porakaivoon asennettavaa veden ilmastuslaitetta. Hapetusputki asennetaan pystyasentoon vedenottolaitteiston yhteyteen ja hapetusputken toimintaperiaatteena on hapettaa vettä ilman avulla. Kun vesipumppu ei käy, hapetusputki on paineettomassa tilassa. Vesipumpun käynnistyessä vesi virtaa hapetusputken yläosasta laitteen läpi samalla pisaroituen laitteen ilmatilassa. Ilmassa pisaroituessaan vesi hapettuu ja rikkivety haihtuu pois vedestä, jolloin puhdas vesi jatkaa verkostoon. Vesipumpun pysähtyessä hapetusputki tyhjenee viemäriin ottaen samalla korvausilmaa hapetusputken yläosassa olevan alipaineventtiilin kautta. [21.]

Vaihtoehtona hapetusputkelle on suoraan porakaivoon asennettava ilmastuslaite. Ilmastuslaite asennetaan porakaivoon muutaman metrin syvyyteen syöttövesijohtoon. Porakaivopumpun käydessä ilmastuslaite sumuttaa vettä kaivossa niin, että vesi pisaroituu ja veteen liennut rikkivety vapautuu ilmaan. Toimivuuden varmistamiseksi porakaivo ei saa olla ilmatiivis, vaan kaivon kannessa täytyy olla ilma-aukko, josta rikkivetykaasut pääsevät poistumaan. Laite on varustettu yksisuuntaventtiilillä, jotta laitteen yläpuolinen vesimassa ei tyhjene laitteen kautta kaivoon pumpun ollessa pois päältä. [22.] Kuva 3 on periaatekuva porakaivoon asennettavasta veden ilmastuslaitteesta.

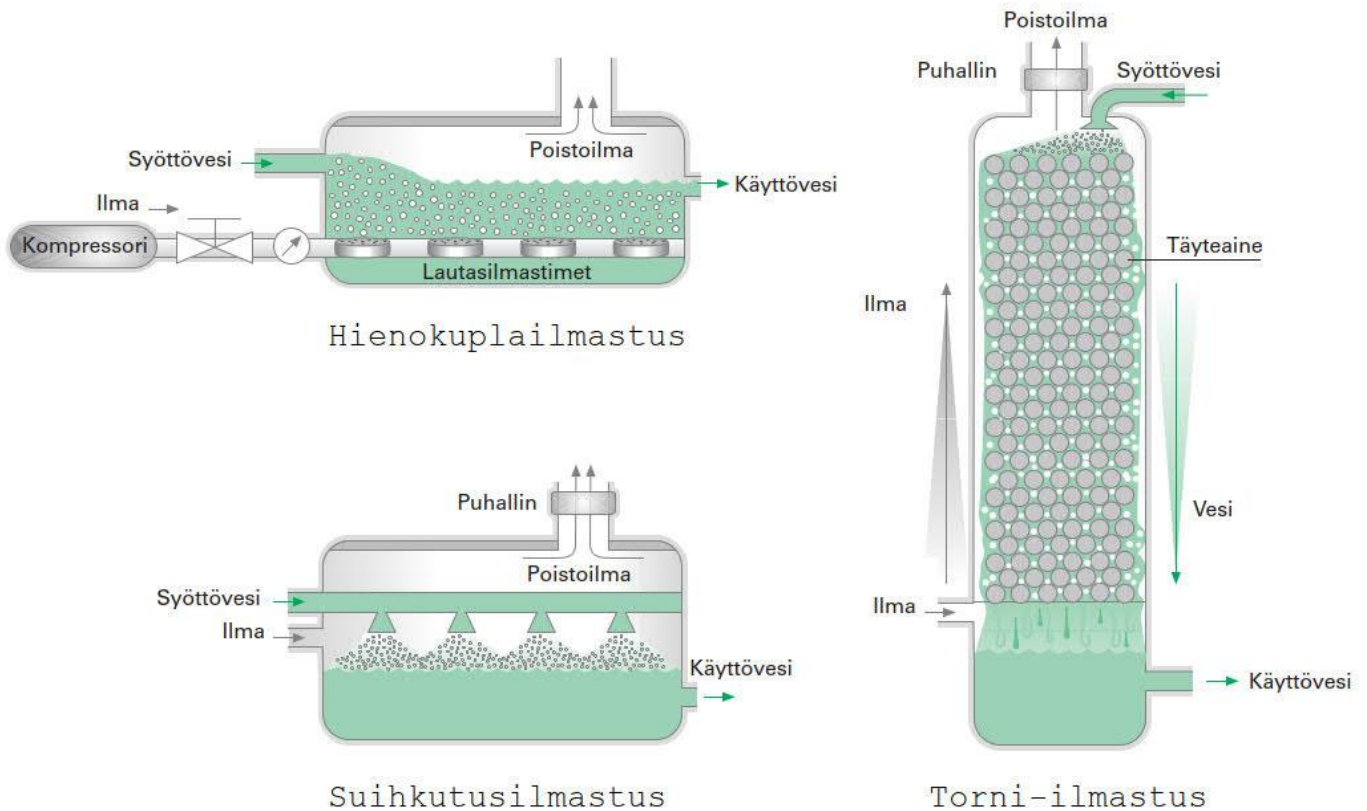


Kuva 3. Veden ilmastuslaite porakaivossa. Kuva tehty AutoCAD 2020 -ohjelmalla.

Radonin poistoon tarkoitetut ilmastuslaitteet ovat rikkivetyyn tarkoitettuja laitteita hieman järeämpiä ja myös kustannuksiltaan korkeampia. Radonin poiston tehokkuus oikein mitoitetuilla laitteilla on yli 90 prosenttia, ja ilmastuslaitetta voidaan käyttää kuinka korkeille radonpitoisuuksille tahansa. Ilmastus tapahtuu yleensä säiliössä, jotta laitteen mitoitus onnistuu parhaiten ja veden määrää sekä virtaamaa pystytään kontrolloimaan. Suoraan kaivossa tapahtuvan veden ilmastuksen mitoitus on hankalaa, sillä tärkeä radoninpoistoon vaikuttava tekijä on veden vaihtuvuus eikä porakaivossa tähän pystytä vaikuttamaan. Jos porakaivoveden vaihtuvuus on heikkoa, ilmastuksen tehokkuus on parempi. Porakaivoveden vaihtuvuuden ollessa nopeaa, on ilmastuksen tehokkuus heikompaa. Säiliössä tapahtuvassa radonin ilmastuksessa veteen syötetään koneellisesti ilmaa, yleensä noin 5–10-kertaisesti veden määrään verrattuna. Radonilmastimet poistavat vedestä myös rikkivetykaasut. [1; 5; 16; 20.]

Ilmastuksen toteutuksen suunnittelussa tulee myös ottaa huomioon radonin hajoamistuotteet, jotka jäävät veteen, vaikka radon itsessään saadaan poistettua vedestä. Hajoamistuotteet ovat kuitenkin suhteellisen lyhytikäisiä, ja ne hajoavat yli 99-prosenttisesti jo noin neljässä tunnissa. Ilmastuksen jälkeen vettä pitäisikin varastoida tarpeeksi kauan ennen vedenkäyttöä. Tämä tarkoittaa usein sitä, että vettä varastoidessa kylmän käyttöveden lämpötila kohoaa. Varsinkin kesällä jääkylmää vettä ei tässä tapauksessa ole välttämättä mahdollista saada ollenkaan. [1.]

Radonin ilmastuksen tehokas toiminta perustuu radonkaasun hyvään veden ja ilman väliseen siirtymiskykyyn. Merkittävimmät siirtymisen tehokkuuteen vaikuttavat tekijät ovat radonpitoisen veden sekä ilman välinen kontaktiaika ja -pinta-ala sekä ilman määrä suhteessa veden määrään. Tärkeää on myös käyttää ilmastuksessa mahdollisimman radonvapaata ilmaa, jotta vedessä oleva radon saadaan mahdollisimman tehokkaasti siirrettyä ilmaan. Ilman ja veden kontaktipinta-ala pyritään saamaan aina mahdollisimman suureksi. Tämä onnistuu syöttämällä ilmaa veteen mahdollisimman pienikokoisina kuplina tai vastaavasti sumuttamalla vettä ilmaan niin pieninä pisaroina kuin mahdollista. Kolme yleisintä tapaa radonin ilmastamiseen ovat hienokuplailmastus, suihkutustilastus sekä torni-ilmastus. [1; 16.] Eri ilmastusmenetelmät on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Eri ilmastusmenetelmien toiminta [16].

Hienokuplailmastuksessa käytetään yleensä umpinaista säiliötä, josta poistoilma johdetaan suoraan ulkoilmaan. Porakaivosta tuleva vesi syötetään säiliöön. Säiliön pohjalle asennetaan ilmasuuttimet, jotka kytketään kompressoriin. Säiliön täytyttyä vedellä kompressori käynnistyy ja puhaltaa ilmaa suuttimien kautta veteen. Veden läpi kulkevat ilmakuplat sitovat veden radonia itseensä ja pinnalle päästyään radon vapautuu säiliön ilmaan. Radonpitoinen ilma kulkee poistoilmakanavan kautta ulkoilmaan. Radon poistuu sitä tehokkaammin, mitä pienemmäksi ilmakuplien koko saadaan, mitä pidempään ilmastusta suoritetaan ja mitä suurempi ilman ja veden suhde on. Paras radonpoiston tehokkuus saadaan ilma-vesisuhteen ollessa noin 10:1. Veteen syötettävän ilmamäärän kasvaessa yli kymmenkertaiseksi ei radonpoiston tehokkuus merkittävästi kasva. [1; 16.]

Hienokuplailmastuksen suunnittelussa tulee ottaa huomioon myös ilmasuuttimien ja vedenpinnan välinen etäisyys. Etäisyyden määrittämisessä tulee ottaa huomioon, että ilmakuplat pystyvät sitomaan itseensä vain tietyn määrän radonia. Radoninpoistotehon

kannalta paras lopputulos saadaan, kun ilmakuplat ovat sitoneet itseensä maksimimäärän radonia sillä hetkellä, kun ne saavuttavat vedenpinnan. Vedenpinnan ja ilmastussuuttimien etäisyyden ollessa liian suuri kuluttaa ilman pumppaaminen ja kuplien tuottaminen ylimääräistä energiaa saavuttamatta yhtään parempaa radoninpoistotehoa. Jos etäisyys on liian pieni, ilmakuplat eivät ehdi sitomaan itseensä maksimimäärää radonia. Tämä vaatii huomattavasti suuremman ilmamäärän puhaltamista veteen poistaakseen radonia yhtä suuren määrän. [1.]

Suihkutusilmastus tapahtuu kuplailmastuksen tapaan säiliössä, mutta säiliöön ei puhalleta ilmaa kompressorin avulla. Säiliön yläosaan tulee ulkoilmaan johtava poistoilmakanava, joka varustetaan puhaltimella, tarvittavan ilmanvaihtuvuuden saavuttamiseksi. Lisäksi säiliöön tuodaan korvausilmakanava puhtaasta ulkoilmasta, joka asennetaan säiliön vedenpinnan yläpuolelle. Kaivosta tulevaan vesijohtoon asennetaan sumutussuuttimet, jotka sumuttavat vettä säiliöön mahdollisimman pieninä pisaroina, vapauttaen veteen liuenneen radonin säiliön ilmatilaan. Hyvin mitoitettu säiliön ilmanvaihto poistaa radonpitoisen ilman säiliöstä. Mitä pienempiä pisaroita säiliöön saadaan sumutettua, sitä tehokkaammin radon vapautuu ilmaan. Tästä syystä sumutussuuttimilla on suuri merkitys suihkutustilastuksen lopullisessa radoninpoistotehokkuudessa. [16; 20.]

Veden ilmastus voidaan toteuttaa myös hienokupla- ja suihkutustilastusta yhdistellen. Yhdistetyssä järjestelmässä vesi tuodaan koneellisella poistoilmapuhaltimella varustettuun säiliöön sumutussuuttimien kautta. Lisäksi säiliön pohjalla on ilmasuuttimet, joiden kautta kompressorilla puhalletaan ilmaa veteen. Tässä toteutustavassa vesi ilmastetaan kahden kertaan. Vesi syötetään säiliöön sumutussuuttimien läpi ja ilmaan vapautuva radon poistuu ilmanvaihdon kautta ulkoilmaan. Sumutuksen jälkeen kompressorilla tuottaa ilmasuuttimien kautta veteen kuplia, jotka pintaan päästyään vapauttavat vedestä sitomansa radonin säiliön ilmatilaan. Ilmanvaihto poistaa radonpitoisen ilman säiliöstä. Yhdistelmäjärjestelmällä radon saadaan poistettua vedestä erittäin tehokkaasti. Poistotehokkuus yhdistelmäjärjestelmällä on noin 95–99 prosenttia. [1; 16 ; 20.]

Torni-ilmastuksessa ilmastustilastus on tornimainen säiliö, joka on täytetty täyteaineella, esimerkiksi muovisilla palloilla. Vesi syötetään säiliön yläosasta sisään ja ilma puhalletaan kompressorin avulla säiliön alaosasta sisään. Ilma kulkee säiliön läpi alhaalta ylöspäin poistuen ulkoilmaan säiliön yläosasta. Vesi valuu säiliön läpi muodostaen

täyteaineena olevien pallojen pinnoille ohuita vesikerroksia ja poistuu säiliön alaosaan kohti käyttövesijärjestelmää. Täyteaineen pinnoille muodostuneista vesikerroksista radon siirtyy suuren kosketuspinta-alan ansiosta erittäin tehokkaasti ilmaan. Keskeiset torni-ilmastimen tehokkuuteen vaikuttavat tekijät ovat säiliön ja täyteainemassan korkeudet. Tarvittavan radonpoistotehokkuuden saavuttamiseksi säiliön korkeus kasvaa usein liian suureksi pientalokäyttöön. Tämän lisäksi torni-ilmastusjärjestelmän suhteellisen kallis hinta saattaa olla pientaloasujan kohdalla ratkaiseva tekijä, minkä takia päädytään johonkin muuhun järjestelmään. [1; 16; 20.]

Huomioitavaa kaikissa laitteissa on se, että ilmastus tapahtuu normaalissa ilmanpaineessa, jolloin ilmastuslaitteessa ei vallitse verkostopaine. Porakaivopumppu tuo veden ainoastaan ilmastuslaitteelle asti. Tämän vuoksi joudutaan käyttämään erillistä pumpua, jolla ilmastettu vesi saadaan syötettyä eteenpäin käyttövesiverkostoon. Kaikissa ilmastusmenetelmissä tulee huomioida, että ilmastuksessa käytettävän korvausilman tulee olla radonvapaata. Muuten radonin poiston tehokkuus heikkenee merkittävästi. Korvausilma tulisi myös suodattaa ennen ilmastukseen johtamista. Suodattamalla minimoidaan ilmassa olevien epäpuhtauksien pääsy ilmastettavaan veteen ja ilmastuslaitteistoon. [1.]

Veden ilmastaminen vaikuttaa myös veden laatuun, sillä ilmastus poistaa vedestä radonin ja rikkivedyn lisäksi hiilidioksidia ja lisää veden happipitoisuutta. Kun veden hiilidioksidipitoisuus pienenee, veden pH-arvo nousee. Veden korkea pH-arvo sekä happipitoisuus saattavat aiheuttaa vedessä olevan raudan ja mangaanin hapettumista ja saostumista. Rauta- ja mangaanisakka tulisi aina poistaa ennen käyttövesiverkostoon pääsyä. Sakan poisto onnistuu esimerkiksi vesijohtoon asennettavalla mekaanisella vaihtopatruneasuodattimella. [1.]

#### 4.2 Aktiivihiilisuodatus

Radonin poistamiselle on ilmastuksen lisäksi vaihtoehtona veden aktiivihiilisuodatus. Suodatus tapahtuu tornimaisessa 20–100 litran suodatinsäiliössä, joka on täytetty aktiivihiilellä. Aktiivihiilen radoninpoistokyky perustuu sen kykyyn sitoa radonia hiilen pinnalle. Hiilen pinnalta radon hajoaa puoliintumisaikansa kuluttua, joka on noin 3,8 vuorokauden. Käyttöön otetussa suodattimessa aktiivihiili saavuttaa tasapainotilan noin 10

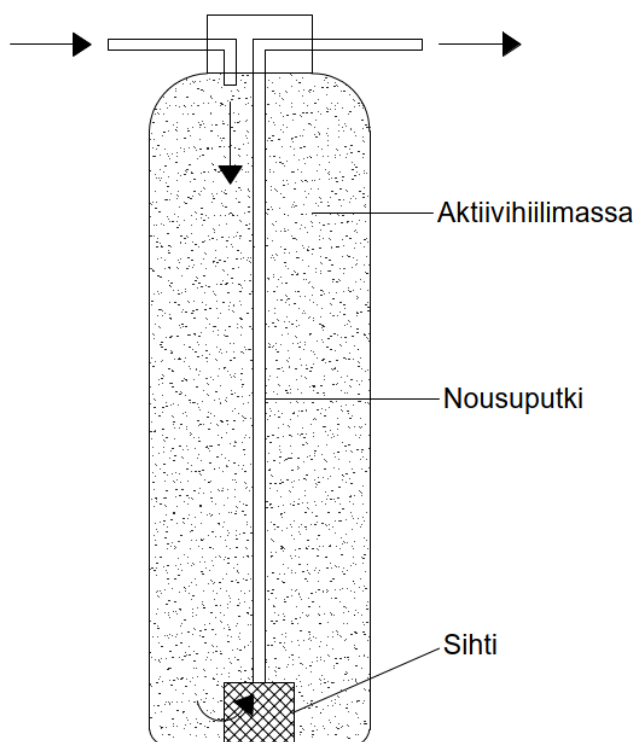


vuorokauden kuluttua käyttöön otosta, mikäli suodattimen virtaama pysyy suhteellisen vakiona. Tasapainotilalla tarkoitetaan tilannetta, jossa aktiivihiili hajottaa radonia samaan tahtiin, kun se sitoo veden mukana tulevaa uutta radonia. Aktiivihiilisuodatin sitoo hiilimassaansa merkittäviä määriä hajoavaa radioaktiivista ainetta. Radonin hajoamisprosessissa syntyy radioaktiivisia hajoamistuotteita, jotka lähettävät radioaktiivista gammasäteilyä ympäröivään tilaan. Gammasäteilyn vuoksi aktiivisessa käytössä oleva suodatin on suuri säteilyn aiheuttaja ympäröivälle tilalle. Suodattimen pinnalla havaittava radioaktiivinen säteily saattaa olla jopa tuhat kertaa normaalia taustasäteilyä voimakkaampaa. Tästä syystä aktiivihiilisuodatinta ei saa sijoittaa asuinrakennukseen, vaan suodatinta varten tarvitaan erillinen rakennus. Aktiivihiilisuodattimen aiheuttaman korkean gammasäteilyn vuoksi suodatinta ei suositella kohteisiin, joissa raakaveden radonipitoisuus on yli 5 000 Bq/l. [1; 16; 20.]

Mikäli raakavesi ei sisällä aktiivihiilimassaan kasautuvia ja massaa tukkivia epäpuhtauksia, voi tasapainotilassa oleva aktiivihiilisuodatin toimia tehokkaasti jopa kymmenen vuoden ajan samalla hiilimassalla. Aktiivihiilimassan tukkeutumisen ehkäisemiseksi suositellaan asennettavaksi esisuodatin, joka kerää vedessä olevat epäpuhtaudet, estäen niiden pääsyn aktiivihiilisuodattimeen. Hiilimassan vaihtoväli riippuu aktiivihiilen läpi virtaavan veden määrästä sekä suodattimeen virtaavan veden laadusta. Veden epäpuhtaudet kasaantuvat aktiivihiilimassaan heikentäen suodattimen radoninpoistotehokkuutta. Radoninpoistotehokkuutta tulisi seurata säännöllisesti vesinäytteiden avulla, jotta pystytään määrittämään aktiivihiilimassan vaihdon tarve. Ensimmäisen aktiivihiilimassan radoninpoistotehokkuutta tulisi seurata suhteellisen tiuhaan, esimerkiksi muutaman kuukauden välein. Ensimmäisen aktiivihiilimassan käyttöajan perusteella voidaan arvioida tulevat vaihtovälit eikä radoninpoistotehokkuutta tarvitse seurata yhtä tiuhaan. Tyypillinen aktiivihiilimassan vaihtoväli on noin 2–3 vuotta. [1; 16.]

Kun raakavesi sisältää paljon rautaa, aktiivihiilisuodatin tulisi varustaa takaisinvirtausautomaattilla. Takaisinvirtausohjelma huuhtelee hiilimassan johdattamalla vettä normaalin vedenvirtaussuunnan vastaisesti suodattimen läpi. Huuhdeltu vesi johdetaan tämän jälkeen poistoputkea pitkin viemäriin. Takaisinvirtaustoiminnon pystyy ajastamaan laitteen ominaisuuksista riippuen esimerkiksi kerran kuukaudessa käytettäväksi tai manuaalisesti käynnistettäväksi. Ohjelmaa ei pidä kuitenkaan käyttää liian usein, koska se heikentää aktiivihiilisuodattimen radonin poistotehokkuutta hetkellisesti. [1; 16; 20.]

Aktiivihiihisuodatin on verkostopaineessa toimiva laite. Raakavesi syötetään suodattimen yläosasta sisään ja vesi kulkee aktiivihiihimassan läpi poistuen kohti käyttövesiverkostoa suodattimen pohjasta lähtevää nousuputkea pitkin. Nousuputken suojana on sihti, joka estää aktiivihiihimassan kulkeutumisen veden mukana suodattimesta pois. [20.] Aktiivihiihisuodattimen rakenne on esitetty kuvassa 5. Kuvassa esitetyt nuolet kuvaavat veden virtaussuuntaa.



Kuva 5. Aktiivihiihisuodatin. Kuva tehty AutoCAD 2020 -ohjelmalla [16].

Veden uraanipitoisuudella on suuri merkitys aktiivihiihisuodattimen radoninpoistotehokkuuteen. Aktiivihiihisuodatin toimii myös uraaninpoistajana, mutta samalla radoninpoistotehokkuus heikkenee. Aktiivihiihi sitoo uraania samalla tavalla kuin radonia, mutta pitkän hajoamisaikansa vuoksi uraania kerääntyy aktiivihiiheen enemmän kuin sitä samassa ajassa vapautuu. Lopulta aktiivihiihimassan varastointikapasiteetti täyttyy, eikä se enää sido uraania ja radonia. Varastointikapasiteettiin vaikuttaa aktiivihiihimassan määrä sekä veden uraani- ja radonpitoisuudet. Jos veden uraanipitoisuus on korkea, tulisi uraani poistaa ennen veden aktiivihiihisuodatusta. [1.]

#### 4.3 Yhteenveto poistomenetelmistä

Ilmastus- ja aktiivihiihisiuodatusjärjestelmiä valittaessa ja vertailtaessa tulee ottaa huomioon asennettavan kohteen vedenlaatu ja radonpitoisuus. Aktiivihiihisiuodatusta ei suositella käytettävään kohteissa, joiden raakavedessä esiintyy merkittäviä määriä epäpuhtauksia ja rautaa. Kun raakaveden radonpitoisuus on yli 5 000 Bq/l, aktiivihiihisiuodatinta ei suositella käytettäväksi. Ilmastinmenetelmien käytölle ei ole radonpitoisuuden ylärajaa. Kun ilmastetaan korkeita radonpitoisuuksia sisältävää vettä, tulee huolehtia ilmastuksessa käytetyn radonpitoisen ilman asianmukaisesti poistosta. Poistoilma on hyvä ohjata ilmastimesta esimerkiksi rakennuksen katolle. [1; 5; 16; 20.]

Vedenkäsittelylaitteiden toimintaperiaatteet ja asennustavat saattavat hieman vaihdella riippuen laitteen valmistajasta sekä asennuskohteesta. Joissain tapauksissa perinteisiä malleja ei pystytä käyttämään, vaan joudutaan vedenkäsittelylaitteet räätälöimään kohdekohtaisesti. Lisäksi valmistajakohtaiset radoninpoistotehokkuudet saattavat vaihdella. [4; 16.] Taulukossa 6 on esitetty eri poistomenetelmien radoninpoistotehokkuudet prosentteina.

Taulukko 6. Eri poistomenetelmien tehokkuus radoninpoistossa [16].

Poistomenetelmä	Poistotehokkuus [ % ]
Hienokuplailmastus	70–90
Suihkutusilmastus	65–98
Torni-ilmastus	90–99
Yhdistelmä hienokupla- ja suihkutustuksesta	95–99
Aktiivihiihisiuodatin	60–99

Radoninpoistoon tarkoitettujen järjestelmien toimivuutta on muistettava tarkkailla säännöllisesti. Ilmastimen tai suodattimen tehokkuus saattaa muuttua käytön aikana, tai suodatin voi tukkeutua veden epäpuhtauksien vuoksi. Myös kaivoveden laatu voi muuttua ajan saatossa. Parhaiten veden laatua voi seurata tutkituttamalla talousvettä laboratorioanalyysin säännöllisesti. Osa Suomessa toimivista yksityislaboratorioista suorittaa

veden radonpitoisuuksien mittauksia, mutta yleensä radioaktiiviseen säteilyyn liittyvät tutkimukset suoritetaan Säteilyturvakeskuksen toimesta. [4.]

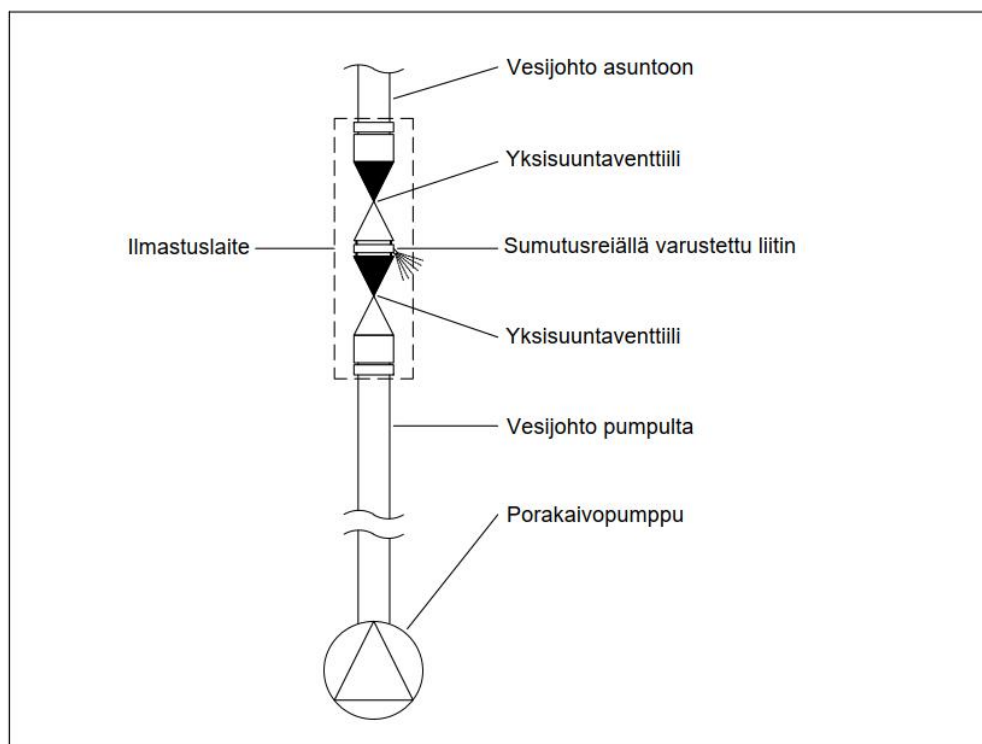
## 5 Tutkimus

Osana insinööriyötä suoritin tutkimuksen itse kehitellyllä ilmastuslaitteella. Laite on alkujaan suunniteltu rikkivedyn poistoon, mutta sillä on huomattu olevan mahdollisesti vaikutusta myös veden radonpitoisuuksiin. Tässä tutkimuksessa olikin tarkoituksena selvittää ilmastuslaitteen radoninpoistotehokkuutta. Tutkimus tehtiin yhteistyössä Säteilyturvakeskuksen sekä LVIS-Kauppila Oy:n kanssa. Säteilyturvakeskus hoiti tutkimuksen yhteydessä otettujen vesinäytteiden analysoinnin ja LVIS-Kauppila Oy suoritti ilmastuslaitteiden asennukset tutkimuskohteisiin. Säteilyturvakeskuksesta yhteyshenkilönäni toimi Pia Vesterbacka ja LVIS-Kauppila Oy:n yhteyshenkilönä Raimo Kauppila. Tutkimus suoritettiin syksyllä 2019.

Tutkimukseen osallistui kaksi LVIS-Kauppila Oy:n asiakasta, joiden porakaivojen vesinäytteistä oli todettu korkeita radonpitoisuuksia. Tutkimuskohteet sijaitsivat Lohjalla sekä Kirkkonummella. Kummassakin kunnassa on suoritettu yhteensä satojen kaivojen radonpitoisuuksien mittauksia. Lohjalla suoritettuja mittauksia on tehty yhteensä 298, ja näiden kaivojen radonpitoisuuksien keskiarvo on ollut 795 Bq/l. Kirkkonummella suoritettuja mittauksia on tehty yhteensä 673, ja näiden kaivojen radonpitoisuuksien keskiarvo on ollut 1426 Bq/l. [2.]

### 5.1 Ilmastuslaite

Tutkimuksissa käytetty ilmastuslaite on täysin mekaaninen ja sen toiminta perustuu veden sumutukseen. Sumutus aiheuttaa veden pisaroitumisen ja pisaroituessaan veteen liuennut radon ja rikkivety siirtyvät ympäröivään ilmaan. Radon- ja rikkivetypitoinen ilma poistuu kaivon ilman vaihtuessa. Kaivon ilmanvaihto tapahtuu painovoimaisesti. Laite asennetaan porakaivoon vedenpinnan yläpuolelle, pumpulta tulevaan vesijohtoon. Pumpun käydessä ilmastuslaite sumuttaa vettä porakaivossa. Pumpun seisahtuessa laite lopettaa sumuttamisen ja valuttaa laitteen sisälle jääneen veden takaisin kaivoon. Ilmastuslaite varustetaan yksisuuntaventtiileillä, jotta varmistetaan, että laitteen yläpuolinen käyttövesiverkosto ei valu tyhjäksi porakaivoon. Kuvassa 6 on esitetty ilmastuslaite, kuva on tehty AutoCAD 2020 -ohjelmalla.



Kuva 6. Ilmastuslaite. Kuva tehty AutoCAD 2020 -ohjelmalla.

Laite on kehitetty noin 15 vuotta sitten rikkivedyn poistoa varten, ja laitteita on asennettu Uudenmaan alueella satoihin porakaivoihin. Laite on kaikissa kohteissa poistanut vedestä rikkivedyn hajun kokonaan. Muutamassa kohteessa kaivoon on jouduttu asentamaan ilmaputki tehostamaan ilmastimen toimintaa. Ilmaputken avulla kaivon ilman vaihtuvuus parantuu ja ilmastus tehostuu. Ilmastuslaite ei vaadi säännöllistä huoltoa. Porakaivossa on kuitenkin hyvä käydä aika ajoin tarkastamassa, että pumpun käydessä laitteen sumutus toimii moitteettomasti. Samalla on hyvä varmistaa, ettei laite ole mennyt epäpuhtauksien tai veteen päässeiden roskien vuoksi tukkoon. Laitteen käyttöikä on yli 15 vuotta. [22.]

## 5.2 Mittaukset

Vesinäytettä otettaessa on tärkeää valuttaa vettä riittävästi ennen näytteenottoa, jotta painesäiliössä ja putkistossa seissyt vesi saadaan verkostosta pois. Kun vettä on valutettu riittävästi, voidaan täyttää näytteenottopullo verkostovedellä. Hanasta otetaan poreresuutin pois, jotta vältetään veden ilmastukselta ja radonin haihtumiselta. Tämän

jälkeen vettä valutetaan erittäin pienellä virtaamalla näytteenottopulloon. Vettä täytetään pullon kaulaan asti ja korkki suljetaan tiiviisti. [2.]

Tutkimuksessa tehtyjä mittauksia varten kohteista otettiin vesinäytteitä ennen ilmastuslaitteen asennusta ja laitteen asennuksen jälkeen. Vesinäytteitä varten STUK:n laboratoriosta Helsingistä haettiin tukeainetta sisältäviä näytteenottopulloja. Pulloissa olevan tukeaineen tarkoitus on sitoa veden radonia ja estää radonin haihtumista vesinäytteestä. Tutkimuksen vesinäytteenottoja varten sain vielä erillisen ohjeistuksen STUK:sta. Näytteet pitäisi ottaa aikaisintaan 2 päivää laitteen asennuksen jälkeen, ja vesinäytteitä tulisi ottaa juoksutuksen funktiona esimerkiksi 5 näytettä 2 minuutin välein. Näin saadaan tietää, muuttuuko ilmastimen tehokkuus kovassa kulutuksessa. Vesinäytteet toimitettiin näytteenottopäivänä takaisin STUK:een. Vesianalyysin tulokset tulivat muutaman päivän kuluttua näytteiden jättämisestä.

Kirkkonummella sijainneen kohteen radonpitoisuuden lähtöarvo oli noin 3 300 Bq/l ja Lohjalla sijainneen kohteen noin 2 500 Bq/l. Tutkimuksessa Kirkkonummen kohde on esitetty kohteena 1 ja Lohjan kohde kohteena 2. Taulukossa 7 on esitetty vesianalyysien tulokset sekä mittaustulosten epävarmuus. Näytteitä otettiin ohjeistuksen mukaisesti 5 kappaletta 2 minuutin välein. Mittaustulosten noin 10 prosentin epävarmuus muodostuu kalibroitikertoimesta, pipetoinnista sekä statistiikasta aiheutuvista epävarmuuksista. Kalibroitikertoimen epävarmuus eli hajonta on 5 prosenttia. Näytteiden pipetoinnista eli pipetointitarkkuudesta aiheutuva epävarmuus on 0,5 prosenttia. Statistiikasta aiheutuva epävarmuus riippuu mittauksen aktiivisuudesta sekä käytetystä mittaussajasta. Tähän tutkimukseen liittyvissä mittauksissa Säteilyturvakeskus on laskenut statistiikasta aiheutuvaksi epävarmuudeksi 4,5 prosenttia. [23.]

Taulukko 7. Tutkimuksessa otettujen vesinäytteiden analyysit. [23.]

Säteilyturvakeskuksen suorittamien vesianalyyseiden tulokset				
	Kohde 1		Kohde 2	
	Tulos [ Bq/l ]	Epävarmuus [Bq/l]	Tulos [ Bq/l ]	Epävarmuus [Bq/l]
Näyte 1	1 153	± 116	1 838	± 185
Näyte 2	1 213	± 122	1 677	± 169
Näyte 3	1 058	± 107	2 000	± 201
Näyte 4	996	± 100	2 024	± 204
Näyte 5	1 310	± 132	2 142	± 216
Keskiarvo	1 146		1 936	

Mittaustulosten perusteella voi päätellä, että tutkimuksen kohteena olleella ilmastuslaitteella on vaikutusta veden radonpitoisuuteen. Kohteessa 1 radonpitoisuus laski noin 65 prosenttia ja kohteessa 2 pitoisuus laski noin 23 prosenttia. Ero kohteiden välillä on melko suuri ja tämä selittyy todennäköisesti kohteen 1 kaivon paremmalla tuuletuksella. Kohteessa 1 kaivoa ei ollut suljettu ilmatiivisti, kun taas kohteessa 2 kaivo oli suljettu tiiviillä solumuovieristeellä. Kaivon tiivis rakenne estää vedestä ilmaan siirtyneen radonin pääsyn pois porakaivosta. Veden juoksutuksella ei tutkimuksen perusteella ollut merkittävää vaikutusta veden radonpitoisuuteen.

### 5.3 Tutkimuksen lopputulema

Tutkimuksen perusteella voi päätellä, että ilmastuslaitteella on huomattava vaikutus veden radonpitoisuuteen. Radonpitoisuuden lasku tutkituissa kohteissa oli 65 sekä 23 prosenttia. Huomioitavaa on kaivossa olevan ilman vaihtuvuuden merkitys radoninpoiston tehokkuuteen. Kohteessa, jossa radonpitoisuus laski ainoastaan 23 prosenttia, kaivo oli suljettu erittäin tiiviisti eikä ilma päässyt kaivossa vaihtumaan. Toisessa kohteessa porakaivon ilma pääsi vaihtumaan vapaasti, koska kaivo oli varustettu korvausilmaputkella. Kahden kohteen otannalla ei kuitenkaan voida tehdä täysin luotettavia johtopäätöksiä, mutta kaivon ilman vaihtuvuuden voidaan olettaa olevan tärkeässä osassa. Mikäli ilma



ei pääse vaihtumaan kaivossa, iso osa ilmaan vapautuneesta radonista palautuu takaisin veteen.

Laitteen radoninpoistotehokkuutta pystyisi todennäköisesti tehostamaan merkittävästi ilman vaihtuvuutta parantamalla. Ilmastuslaite sumuttaa vettä suoraan porakaivoon, joten ilmanvaihtoputkisto pitäisi asentaa ilmastuslaitteen korkeudelle. Näin laitteen ilmaan vapauttama radon saataisiin parhaiten poistettua. Yhtenä toteutustapana voisi olla kaivoon asennettava puhaltimella varustettu poistoilmaputki. Putki johtaisi poistoilman suoraan ulos, ja korvausilma otettaisiin niin etäältä poistoilmaputkesta kuin mahdollista, jotta korvausilma olisi mahdollisimman radonvapaapata. Ongelmaksi tässä saattaisivat kuitenkin koitua talven kovat pakkaset. Kovilla pakkasilla ulkoa otettava korvausilma saattaa jäädyttää syöttövesijohdon ja ilmastuslaitteen. Talviaikaan ilmastuslaitteen toiminta vaatisi korvausilman esilämmitystä.

Tutkimustulokset ovat lupaavia, mutta laitteen kehitystyötä on jatkettava. Kehitystyö vaatii resursseja laitteen suunnitteluun sekä toteutukseen. Lisäksi laitteen testauksia varten tarvitaan kohteita, joissa on havaittu veden korkeita radonpitoisuuksia.

## 6 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää radonin sekä rikkivedyn esiintyvyyttä talousvedessä sekä eri menetelmiä niiden poistamiseksi. Lisäksi työssä käsiteltiin radonia ja rikkivetyä yleisesti. Insinööriyön yhteydessä suoritettiin myös tutkimuksia itse kehitellyllä ilmastuslaitteella.

Radon ja rikkivety ovat kumpikin olomuodoltaan kaasuja. Molemmat ovat lähinnä porakaivotalouksien ongelma, sillä radon- ja rikkivetypitoisuudet ovat pintavesikaivoissa erittäin pieniä, yleensä niitä ei esiinny ollenkaan. Vesilaitosten vedenlaatua seurataan jatkuvasti sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen 1352/2015 mukaisesti ja raakavedessä mahdollisesti esiintyvä radon sekä rikkivety poistetaan ennen veden syöttöä jakeluverkostoon.

Talousvedessä esiintyvä radon ja rikkivety on suositeltavaa poistaa, vaikka pitoisuudet olisivatkin pieniä. Radonin ja rikkivedyn poistomenetelmiä on useita, ja poistomenetelmät ovat radonille ja rikkivedylle periaatteeltaan hyvinkin samankaltaisia. Yleisimpiä poistolaitteita ovat aktiivihiihisuodattimet sekä erilaiset ilmastuslaitteet. Aktiivihiihisuodatin on talousvesiverkostoon kytketty paineen alainen suodatin säiliö, joka täytetään aktiivihiihimassalla. Aktiivihiihimassa sitoo vedessä olevaa radonia itseensä, ja hiileen sitoutunut radon hajoaa noin kahden päivän kuluttua. Aktiivihiihimassa täytyy vaihtaa säännöllisesti, jotta suodattimen radoninpoistokyky voidaan taata. Vaihtoväli vaihtelee yhdestä vuodesta jopa kymmeneen vuoteen. Vaihtoväli riippuu veden laadusta sekä radonpitoisuudesta.

Ilmastuslaitteita käytetään radonin sekä rikkivedyn poistoon. Laitteiden toiminta perustuu veden ja ilman väliseen kontaktiin, jossa vedessä oleva radon tai rikkivety siirtyy ilmaan ja ilma johdetaan laitteesta pois. Yleisimmät ilmastuslaitteet ovat suoraan kaivoon asennettavat ilmastuslaitteet, hapetusputket sekä erilaiset ilmastussäiliöratkaisut. Suoraan kaivoon asennettavat ilmastuslaitteet sumuttavat vettä kaivon ilmatilaan, jossa vesi pisaroituu ja veteen sitoutunut radon ja/tai rikkivety vapautuu ilmaan. Rikkivedyn poistoon voidaan käyttää myös hapetusputkea, jossa vesipumpun käynnistyessä vesi kulkee laitteen läpi ja pisaroituu ilmatilassa. Veden pisaroituessa vesi hapettuu, ja vedessä oleva

rikkivety haihtuu ilmaan. Vesipumpun seisahtuessa hapetusputki tyhjenee, ja putkessa oleva rikkivety tuulettuu pois.

Selvityksen perusteella tehokkaimmat ilmastusratkaisut radonin poistoon ovat ilmastussäiliöt. Ilmastussäiliöiden toiminta perustuu suihkutusilmastukseen, kuplailmastukseen tai torni-ilmastukseen. Suihkutusilmastuksessa vesi suihkutetaan säiliöön, jossa se pisaroituu säiliön ilmatilassa. Kuplailmastuksessa säiliön pohjassa on kompressoriin liitetyt ilmasuuttimet, jotka puhaltavat ilmaa veden läpi. Ilma sitoo radonia itseensä veden läpi kulkiessaan. Kun ilma saavuttaa veden pinnan, radon vapautuu säiliön ilmatilaan. Kummassakin järjestelmässä ilmatilaan vapautunut radon tuuletetaan ilmanvaihdon avulla ulkoilmaan. Torni-ilmastuksessa vesi syötetään täyteaineella varustetun tornimaisen säiliön läpi, ja vesi muodostaa täyteaineen pinnoille ohuen kerroksen. Ilmastuslaitteen pohjasta syötetään kompressorin avulla puhdasta ilmaa säiliöön, ja säiliön yläosassa oleva puhallin imee ilmaa säiliön läpi. Ilma sitoo täyteaineen pinnoille kertyneestä vedestä radonia itseensä ja poistuu säiliön yläosasta ulkoilmaan.

## Lähteet

- 1 Myllymäki Pauliina. 1996. Radonin ja uraanin poisto kalliopohjavedestä. Helsinki. Suomen ympäristökeskus.
- 2 Vesterbacka, Pia; Vaaramaa, Kaisa. 2013. Porakaivoveden radon- ja uraanikarstatot. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <<http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2014120250255>>. Luettu 29.10.2020.
- 3 Kysymyksiä kaivoista – Frågor om brunnar. 2018. Verkkoaineisto. Suomen ympäristökeskus. <[https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennushanke/Talotekniset\\_jarjestelmat\\_LVI/Vedenhankinta\\_kaivosta/Kysymyksiä\\_kaivoista](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennushanke/Talotekniset_jarjestelmat_LVI/Vedenhankinta_kaivosta/Kysymyksiä_kaivoista)>. Luettu 29.10.2019.
- 4 Kaivoveden käsittely. 2018. Verkkoaineisto. Suomen ympäristökeskus. <[https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennushanke/Talotekniset\\_jarjestelmat\\_LVI/Vedenhankinta\\_kaivosta/Kaivoveden\\_kasittely](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennushanke/Talotekniset_jarjestelmat_LVI/Vedenhankinta_kaivosta/Kaivoveden_kasittely)>. Päivitetty 14.1.2020. Luettu 29.1.2020.
- 5 Radon. 2019. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <<https://www.stuk.fi/aiheet/radon>>. Päivitetty 17.12.2019. Luettu 20.3.2020.
- 6 Radonin terveysvaikutukset / Kemiallisten aineiden terveysvaaran arviointineuvosto. 1998. Sosiaali- ja terveysministeriö.
- 7 Asumisterveysopas. 2009. 3. korjattu painos. Pori. Sosiaali- ja terveysministeriö.
- 8 Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä 1044/2018. 2018.
- 9 Sosiaali- ja terveysministeriön asetus pienten yksiköiden talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista 401/2001. 2001.
- 10 Elintarvikkeet ja juomavesi. 2019. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <<https://www.stuk.fi/aiheet/elintarvikkeet-ja-juomavesi/juomavesi>>. Päivitetty 18.12.2019. Luettu 29.1.2020.
- 11 Kaivoveden kemialliset epäpuhtaudet. 2019. Verkkoaineisto. Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. <<https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/talousvesi/kaivovesi/kaivoveden-kemialliset-epapuhtaudet/radon>>. Päivitetty 21.1.2019. Luettu 29.1.2020.
- 12 Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista 1352/2015. 2015.

- 13 Talousveden radioaktiivisuuden valvonta. 2019. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <<https://www.stuk.fi/stuk-valvoo/luonnonsateilylle-altistava-toiminta/talousveden-radioaktiivisuuden-valvonta>>. Päivitetty 27.2.2019. Luettu 4.3.2020.
- 14 Valmari, Tuomas; Mäkeläinen, Ilona; Reisbacka, Heikki; Arvela, Hannu. 2010. Suomen radonkartasto 2010. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <<http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2014120249757>>. Luettu 5.2.2020.
- 15 Uraanipitoisuudet Suomen kallioperässä ja vesistöissä. 2019. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <<https://www.stuk.fi/aiheet/kaivokset/uraanipitoisuudet-suomen-kallioperassa-ja-vesistossa>>. Päivitetty 31.1.2019. Luettu 6.2.2020.
- 16 Salonen, Laina; Vesterbacka, Pia; Mäkeläinen, Ilona; Weltner, Anne; Arvela, Hannu. 2003. Talousveden radioaktiiviset aineet. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <[https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirja2\\_5\\_2.pdf/af2650e6-ec9b-440d-aa5c-178feb6d926b](https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirja2_5_2.pdf/af2650e6-ec9b-440d-aa5c-178feb6d926b)>. Luettu 19.2.2020.
- 17 Kemikaalit ja työ. 2005. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131976/kemikaalit-ja-tyo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Luettu 20.2.2020.
- 18 OVA-ohje: Rikkivety. 2015. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/ova/rikkivet.pdf>>. Luettu 20.2.2020.
- 19 Sulfur gas, Hydrogen Sulfide, Rotten Egg Odors. Verkkoaineisto. Water research center. <<https://water-research.net/index.php/sulfur>>. Luettu 20.2.2020.
- 20 Vesterbacka, Pia; Turtiainen, Tuukka; Hämäläinen, Kai; Salonen, Laina; Arvela, Hannu. 2003. Talousveden radionuklidien poistomenetelmät, STUK-A197. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <<https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/124135/stuk-a197.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Luettu 20.2.2020.
- 21 WatMan suodatinesite. 2013. Verkkoaineisto. <[https://www.watman.fi/pdf/watman-suodatinesite\\_2013.pdf](https://www.watman.fi/pdf/watman-suodatinesite_2013.pdf)>. Luettu 20.2.2020
- 22 Kauppila, Raimo. 2020. LVIS-Kauppila Oy. Inkoo. Haastattelu. 20.2.2020.
- 23 Heikkinen, Tarja. 2020. Ympäristön säteilyvalvonta ja valmiusyksikön tarkastaja. Säteilyturvakeskus. Helsinki. Sähköpostikeskustelu 25.3.2020.