

Vesihuoltolaitosten kehittämisrahasto

Loppuraportti

Legionella-bakteerin esiintyminen ja hallinta talousveden jakeluverkostoissa

1 Työryhmä

Eila Torvinen, yliopistonlehtori, vastuullinen johtaja, Itä-Suomen yliopisto, Ympäristö- ja biotieteiden laitos
Sallamaari Siponen, väitöskirjatutkija, Itä-Suomen yliopisto, Ympäristö- ja biotieteiden laitos
Tarja Pitkänen, apulaisprofessori, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL), Mikrobiologiayksikkö ja Helsingin yliopisto, Elintarvikehygienian ja ympäristöterveyden osasto
Marjo Niittynen, erikoistutkija, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL), Mikrobiologiayksikkö

2 Johdanto

Talousvesi sisältää aina mikrobeja, joista suurin osa on terveydelle harmittomia. Terveystieteistä riskiä talousvesi saattaa aiheuttaa, jos verkostoon pääsee kontaminaation seurauksena esim. ulosteperäisiä taudinaiheuttajia tai jos verkostossa tavallisesti esiintyvät ns. opportunistiset taudinaiheuttajabakteerit pääsevät lisääntymään suuressa määrin. Tunnetuin näistä opportunistisista taudinaiheuttajabakteereista on legionellabakteeri, joka voi aiheuttaa vaarallista keuhkokuumetta, legioonalaistautia, tai influenssan kaltaista infektiota, Pontiac-kuumetta. Bakteeri ei yleensä ole vaarallinen perusterveille ihmisille, mutta voi sairastuttaa henkilöitä, joiden vastustuskyky on esim. perussairaudesta tai iän myötä heikentynyt (ECDC 2021).

Legionellan esiintyminen talousvesiverkostoissa voi lisääntyä, jos verkoston olosuhteet muuttuvat bakteerille suotuisiksi. Tähän vaikuttavat esim. veden lämpötila ja muut fysikaalis-kemialliset ominaisuudet, mikrobien välinen kilpailu ja verkoston virtausolosuhteet. Ilmastonmuutoksen myötä talousveden lämpötilan ennustetaan nousevan, mikä voi lisätä legionellan kasvua jakeluverkostoissa. Myös energiatehokkuuteen tähtäävät lämpimän käyttöveden alhaisempi lämpötila ja säästeliäs veden käyttö voivat luoda bakteerille suotuisimmat kasvuolosuhteet. Samaan aikaan väestön vanheneminen voi lisätä legionellalle alttiin väestön määrää.

Talousveden mikrobikasvua hillitään vesilaitoskäsittelyillä ja desinfiointilla. Nämä menetelmät tuhoavat myös legionellaa, joka kuitenkin on desinfiointeja vastaan kestävämpi kuin ulosteperäiset taudinaiheuttajabakteerit, joiden tuhoamiseksi käsittelyt on ensisijaisesti kohdennettu. Desinfiointi voi vaikuttaa koko verkostoveden ja seinämien biofilmien mikrobiyhteisöihin ja eri desinfiointiaineiden vaikutus voi olla erilainen. Mikrobiyhteisön muutokset voivat edelleen vaikuttaa esim. legionellan esiintymiseen rikastaen sitä muiden mikrobien kustannuksella.

EU:n uusi juomavesidirektiivi 2020/2184 ja sen myötä Suomen lainsäädäntö (STM 2023) velvoittavat arvioimaan ns. ensisijaisten tilojen vesijärjestelmien legionella-riskiä ja tarvittaessa seuraamaan kiinteistössä käytetyn veden legionellapitoisuuksia. Ensisijaisia tiloja ovat tilat, joissa oleilee suuri määrä mahdollisesti puolustuskyvyltään heikentyneitä ihmisiä, mm. sairaalat, vuodeosastolliset terveyskeskukset, tehostetun palveluasumisen ja laitoshoidon yksiköt, hotellit ja kylpylät.

Ilmastonmuutoksen, väestön ikääntymisen ja uuden lainsäädännön myötä/vuoksi on tärkeää selvittää legionellan esiintymistä ja aktiivisuutta eri tavoin desinfioiduissa verkostoissa legionellariskien tunnistamiseksi ja niiden ehkäisemiseksi. Tutkimuksen tavoitteena oli tunnistaa legionellabakteerin kasvun riskitekijöitä verkostovedessä ja löytää keinoja mikrobikasvun hallintaan selvittämällä veden

laatumuuttujien, putkimateriaalien ja klooripohjaisten desinfiointimenetelmien vaikutusta legionellabakteeriin kirjallisuuskatsauksen, täyden mittakaavan vesilaitostutkimusten ja pilot-mittakaavan tutkimusten avulla.

3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

3.1 Vesilaitostutkimus

Tutkimuksessa hyödynnettiin aineistoa, joka oli kerätty aikaisemmin toteutetussa DWDSOME-hankkeessa (Ikonen 2017). Hankkeessa oli mukana viisi vesilaitosverkostoa eri puolelta Suomea, joiden raakavesi, vedenkäsittely ja desinfiointi poikkesivat toisistaan. Kaksi verkostoa jakoi desinfiomatonta tekopohjavettä, kaksi desinfiotua pintavettä ja yksi desinfiotua pohjavettä. Jokaisen vesilaitoksen verkostosta oli kerätty talousvesivesinäytteitä kolmelta eri etäisyydeltä (1 – 36 km) vesilaitoksesta neljänä eri vuodenaikana ja lämpimän käyttöveden näytteitä yhdestä verkoston kohdasta. Vesinäytteiden lisäksi näytteitä oli kerätty verkoston biofilmeistä putkikeräimillä ja vesimittareista. Yhteensä näytteitä oli noin 180. Koko aineisto koostui näiden näytteiden sisältämästä bakteeriyhteisödatasta, veden ja biofilmien fysikaalis-kemiallisesta datasta sekä vedenkäsittelytiedoista.

Näytteiden bakteeriyhteisön koostumus selvitettiin menetelmillä, jotka perustuvat mikrobien geneettisen aineksen tutkimiseen molekyylibiologian ja bioinformatiikan keinoin. Vesi- ja biofilminäytteiden sisältämän bakteeriyhteisön DNA ja RNA tutkittiin Illumina-syväsekvensointimenetelmällä. DNA-tutkimus antaa tietoa sekä elävistä että kuolleista mikrobeista niitä erottelematta. RNA:ta tuottavat vain elävät ja aktiiviset mikrobit ja RNA-tutkimusta käytetään kuvaamaan aktiivisen mikrobiston osuutta. Sekä DNA- että RNA-datasta etsittiin tietoa legionellabakteerin esiintymisestä ja aktiivisuudesta ja niihin vaikuttavista tekijöistä. Bakteeriyhteisötutkimuksen lisäksi legionellabakteeri analysoitiin vesi- ja biofilminäytteistä legionellasuvulle (*Legionella* sp.) ja *L. pneumophila* -lajille spesifisillä kvantitatiivisilla qPCR-menetelmillä.

3.2 Koeverkostotutkimus

Koeverkostotutkimuksessa selvitettiin hypokloriitin ja klooriamiinin ja kupari- ja muoviputkimateriaalin (ristisilloitettu polyeteeni, PEX) vaikutusta neljän koeverkoston (hypokloriitti + Cu, hypokloriitti + PEX, klooriamiini + Cu ja klooriamiini + PEX) bakteeriyhteisön koostumukseen ja aktiivisuuteen edellä mainituilla DNA- ja RNA-menetelmillä. Koeverkoston syötetty vesi oli perinteisellä käsittelyllä (saostus, flotaatio, hiekkasuodatus) puhdistettua pintavettä. Koeverkostoa seurattiin 6 viikon ajan ilman desinfiointia ja 10 viikon ajan desinfiointin aloittamisesta. Vesi- ja biofilminäytteistä (N = 107) selvittiin bakteeriyhteisön koostumus ja siitä etsittiin legionellabakteeria koskeva tieto ja mahdollinen yhteys ympäristömuuttujiin samoilla menetelmillä kuin täyden mittakaavan vesilaitostutkimuksessa.

3.3 Kirjallisuustutkimus

Vesilaitos- ja pilot-tutkimuksissa saatujen tulosten lisäksi tietoa legionellan esiintymisestä kylmässä talousvedessä ja lämpimässä käyttövedessä, legionellariskiä vaikuttavista tekijöistä ja desinfiointin ja putkimateriaalin vaikutuksista kerättiin vertaisarvioituista artikkeleista.

4 Tulokset

4.1 Legionellabakteerin esiintyvyys verkostovesissä

Viiden vesijohtoverkoston bakteeriyhteisödatasta löytyi 38 erilaista legionellasekvenssiä, mikä oli 0,3 %:ia kaikesta verkostojen bakteeristosta. Legionellaa esiintyi kaikkien viiden verkoston vesinäytteissä ja biofilminäytteissä. Kaikista verkostoista legionellaa havaittiin RNA-näytteistä, mikä osoittaa legionellan olevan aktiivisessa muodossa. Legionellaa esiintyi yhtä paljon tai enemmän kohteiden kylmässä vedessä kuin kuumassa vedessä. Kylmän veden näytteiden lämpötila oli 3 - 20 °C ja kuuman veden lämpötila 50 - 62 °C lukuun ottamatta kolmea näytettä (42 – 49 °C).

Legionellan aktiivista muotoa löytyi kaikkien viiden verkoston talousvedestä ja biofilmeistä myös legionellan sukuspesifisellä qPCR-menetelmällä. Pitoisuudet talousvedessä olivat suurimpia klooriamiinidesinfioidussa verkostossa (keskiarvo RNA, $2,4 \times 10^5$ geenikopiota/100 ml vettä, N=23) ja pienimpiä verkostoissa, jotka jakoivat vapaalla kloorilla desinfioidua pintavettä (keskiarvo RNA, 326 geenikopiota/100 ml, N=22) tai pohjavettä (keskiarvo RNA, 168 geenikopiota/100 ml, N=23). Legionellaa esiintyi tilastollisesti selvästi enemmän kylmässä (keskiarvo RNA, $6,2 \times 10^4$ geenikopiota/100 ml, N=117) kuin lämpimässä vedessä (RNA 3000 geenikopiota/100 ml, N=40) (Kruskal-Wallis test, $P < 0,001$) myös tällä menetelmällä tutkittuna. Verkoston eri pisteiden välisissä legionellapitoisuuksissa ei ollut selviä eroja, vaan legionellaa löytyi hajanaisesti eri verkostojen eri pisteiden välillä. Eri pisteiden väliset klooripitoisuudet tai kylmän veden lämpötilat eivät selittäneet legionellalöydöksiä. Ihmisissä eniten tautia aiheuttavaa *Legionella pneumophila* seroryhmää 1 havaittiin vain desinfiomatonta tekopohjavettä jakavan laitoksen verkostosta, neljästä talousveden näytteestä ja yhdestä lämminvesinäytteestä.

4.2 Putkimateriaalin ja desinfiointiaineen vaikutus legionellaan koemittakaavan verkostossa

Koemittakaavan verkoston bakteeriyhteisödatan perusteella legionellaa esiintyi koeverkostoon syötetyssä vedessä, mutta selvästi enemmän koeverkostosta ulostulevissa vesissä, joissa veden lämpötila oli tutkimuksen aikana 15 – 22 °C. Legionellaa oli hieman, mutta ei tilastollisesti merkitsevästi, enemmän klooratuissa kuin klooriaminoiduissa vesinäytteissä, eniten klooratun PEX-putkilinjan vesissä ja vähiten klooriaminoidun kupariputkilinjan vesissä. Kuparilinjoissa legionellaa oli hieman, mutta ei tilastollisesti merkitsevästi, vähemmän kuin PEX-linjoissa. Eri tavalla käsiteltyjen linjojen biofilminäytteissä ei havaittu eroja legionellan esiintymisessä. Desinfioiduissa vesinäytteissä legionellaa todettiin enemmän aktiivisessa osuudessa (RNA-osuus) kuin kokonaisuudessa (DNA-osuus), mikä kertoo legionellan aktiivisuudesta ja elinkyvystä näissä näytteissä. Kaiken kaikkiaan näytteistä löytyi 97 erilaista legionellasekvenssiä. Niistä ainoastaan kaksi tunnistui lajitasolle ja olivat *Legionella moravica* -lajia.

4.3 Kirjallisuustutkimus

4.3.1 Veden laadun ja iän vaikutukset legionellaan

Liuenneen hapen pitoisuus (DO), heterotrofinen pesäkeluku (HPC), orgaanisen hiilen määrä (DOC ja TOC) ja veden ikä on osoitettu liittyvän legionellan esiintymiseen rakennusten vesijärjestelmissä (Julien ym. 2022). Legionella on korreloinut DOCin, TOCin ja alkaliteetin kanssa samalla tavalla kuin kokonaismikrobien lukumäärä (TCC) ja HPC, mikä osoittaa, että nämä tekijät suosivat samalla tavalla legionellaa ja muita tavallisia verkoston mikrobeita. Negatiivinen korrelaatio liuenneen hapen määrään on ollut legionellalla heikompi kuin muilla mikrobeilla (TCC ja HPC), minkä vuoksi legionellan arvellaan selviävän paremmin vähähappisissa ympäristöissä muihin mikrobeihin verrattuna (Falkinham ym. 2015). Veden ikä ja biofilmien

irtoaminen ovat parhaiten kuvanneet veden laadun muutoksia verkostossa (Julien ym. 2022). Veden ikä ja legionellan ilmeinen kesto vähähappisuudelle viittaavat siihen, että pitkäkestoinen veden seisominen tai vanheneminen voivat olla edellytys legionellan kasvulle verkostossa. Tarkemmat tiedot veden iästä esim. merkkiainetutkimuksin tai hydraulisen mallinnuksen avulla, voisivat auttaa legionellan ja muiden opportunististen taudinaiheuttajien riskin tunnistamisessa (Julien ym. 2022, LeChevallier ym. 2024). Myös tavalliset verkostosta mitattavat muuttajat, kuten veden lämpötila ja desinfiointiaineen ja desinfiointin sivutuotteiden pitoisuudet, voivat antaa arvokasta tietoa mahdollisista seisovan veden verkostokohdista (LeChevallier ym. 2024). Putkistojen biofilmejä voivat irrottaa veden virtaussuunnan vaihtelut ja paineiskut, jolloin veden bakteeripitoisuus voi nousta jopa kymmenkertaisesti. Myös yksin raskaan liikenteen aiheuttaman värinän on todettu irrottavan biofilmejä (LeChevallier ym. 2024).

Legionella pystyy lisääntymään vesijärjestelmissä 20 – 45 °C:een lämpötiloissa (ESGLI 2017) ja vesijärjestelmien yleiset lämpötilavaatimukset on annettu pääasiassa tämän pohjalta. Lämpimän veden järjestelmissä lämpötilan pitää suomalaisen säädöksen mukaan olla uudisrakennusten käyttöpisteissä vähintään 55 °C (YM 2017). WHO (2018) suosittaa lämmönvaihtimelta lähtevän veden lämpötilaksi yli 60 °C ja lämpimän veden lämpötilaksi koko järjestelmässä vähintään 50 °C. Talousvedessä riittävän kylmä lämpötila hillitsee viljelyllä havaittavien eli jakaantumiskykyisten legionellojen esiintymistä. Esim. viljelyllä havaittavaa *L. pneumophila* on 12 talousvesiverkostoa käsitäneen USAlaisen tutkimuksen mukaan löytynyt näytteistä (N = 1087) vain, jos lämpötila on ollut vähintään 18 °C ja suurimmat pitoisuudet havaittiin, kun veden lämpötila oli 24–28 °C (LeChevallier 2019). *Legionella*-suvun DNA:ta ja pieniä määriä myös *L. pneumophila* DNA:ta voidaan sen sijaan todeta myös kylmemmistä talousvesijärjestelmistä (Lu ym. 2015). Suomessa kylmävesilaitteistossa olevan veden lämpötila saa olla enintään 20 °C ja vähintään kahdeksan tunnin käyttämättömän jakson jälkeen se saa olla enintään 24 °C (YM 2017). WHO (2018) suosittaa kylmän veden lämpötilaksi alle 25 °C, mutta mieluummin alle 20 °C. Ilmaston lämmitessä kylmän veden lämpötilojen pitäminen näiden rajojen alapuolella voi tulla vaikeaksi ja siksi muut kontrollitoimet legionellakasvun hillitsemiseksi tulevat entistä tärkeämmiksi (LeChevallier ym. 2024).

4.3.2 Putkimateriaalin vaikutus legionellan esiintymiseen

Kupari tunnetaan antimikrobisena materiaalina (Domek ym. 1984, Lin ym. 2002, Lehtola ym. 2004). Se on vähentänyt legionellan esiintymistä biofilmeissä sekä kylmässä että kuumassa vedessä (Proctor ym. 2017, Buse ym. 2019), mutta ei kuitenkaan kaikissa tutkimuksissa (Lu ym. 2014, Gião ym. 2015, Inkinen ym. 2016). Aloraini ym. (2023) tutkivat mm. legionellan esiintymistä 16S rRNA syväseksenointimenetelmällä kolmella eri putkimateriaalilla (galvanoitu teräs, kupari ja PEX) kahdessa eri lämpötilassa (22 °C ja 32 °C). Kuuden viikon seurantajakson aikana legionellaa havaittiin kaikissa näytteissä kaikilla kolmella materiaalilla molemmissa lämpötiloissa.

4.3.3 Desinfiointin vaikutus legionellaan

Vapaalla kloorilla desinfiotaessa planktoniset eli vedessä vapaana elävät legionelat ovat tutkimusten mukaan tuhoutuneet 0,7 mg/l pitoisuuksilla 30 minuutissa, 1,2 mg/l pitoisuuksilla 10 minuutissa (Gião ym. 2009) ja 2 mg/l pitoisuuksilla jopa kolmessa minuutissa (Miyamoto ym. 2000). Verkostossa biofilmit ja alkueläimet antavat suojaa legionellalle ja esim. alkueläinten kystissä legionelat ovat kestäneet 25-kertaisia pitoisuuksia jopa 18 tunnin ajan verrattuna planktonisten legionellojen tuhoutumiseen 2 mg/l pitoisuuksilla kolmessa minuutissa (Miyamoto ym. 2000). On kuitenkin esitetty, että pysyvällä vapaan kloorin pitoisuudella vähintään 0,1 mg/l voidaan rajoittaa tehokkaasti *L. pneumophila* lisääntymistä verkostossa (LeChevallier 2019). USEPA on harkitsemassa suositusta, jonka mukaan legionellojen torjumiseksi verkostossa pitäisi ylläpitää jatkuvasti vapaan kloorin pitoisuutta vähintään 0,2 mg/l (LeChevallier ym. 2024).

Monoklooriamiinin eli sidotun kloorin pitoisuus 0,31 mg/l on ollut tehokas vähentämään legionellan esiintymistä rakennuksen vesijärjestelmässä (Lin ym. 2011) ja eräissä laboratoriotutkimuksissa monoklooriamiinin pitoisuudella 0,5 mg/l legionellapitoisuus väheni alle määritysrajan kolmessa päivässä ja pysyi sellaisena yhden kuukauden tutkimusajan loppuun saakka (LeChevallier ym. 2024). Kuitenkin yksittäistapauksissa, luultavasti ameeboiden tai biofilmien suojaamina, *L. pneumophila* on löytynyt vesijärjestelmistä, joissa klooriamiinipitoisuus on ollut jopa 3 mg/l (Dupuy ym. 2011). Klooriamiini on useassa tutkimuksessa osoitettu vapaata klooria tehokkaammaksi torjumaan legionellariskiä. Tämä on todennettu sekä kiinteistöjen vesijärjestelmiin liittyvissä tutkimuksissa (Kool ym. 1999, Heffelfinger ym. 2003, Flannery ym. 2006) että kokeellisissa biofilmitutkimuksissa (Gomez-Alvarez ym. 2012, Donohue ym. 2019). Busen ym. (2019) mukaan klooriamiini on ollut tehokkaampi legionellaa vastaan kupariputken biofilmeissä verrattuna vapaaseen klooriin. Planktonisten legionellojen suhteen tulos on kuitenkin ollut päinvastainen ja vapaa kloori on ollut tehokkaampi (Buse ym. 2019). Klooriamiinin tehokkuus legionellaa vastaan voi liittyä sen parempaan diffuusioon biofilmeihin. Toisaalta on esitetty, että tehokkuus välittyisi klooriamiinin vaikutuksiin ameeboissa ja sitä kautta legionellaan (Johnson ym. 2018).

Klooridioksidi on klooriamiinin tapaan tehokas tunkeutumaan biofilmeihin. Klooridioksidi (0,5 mg/l), vapaa kloori (2,4 mg/l) ja klooriamiini (0,5 mg/l) vähensivät legionellapitoisuuksia yhtä tehokkaasti koverkoston vedessä ja biofilmeissä, mutta klooridioksidin vaikutus säilyi pisimpään ja se kykeni ainoana hävittämään legionellan myös kohdissa, joissa vesi vaihtui huonoiten (Loret ym. 2005). Klooridioksidi on osoittautunut tehokkaaksi sairaaloiden vesijärjestelmissä (Walker ym. 1995) ja sitä käytetään tässä tarkoituksessa myös Suomessa (Kusnetsov ym. 2019).

5 Tulosten tarkastelu

Vesilaitostutkimus osoitti, että legionellan nukleiinihappoja löytyy yleisesti vähäisessä määrin talous-vesiverkoston kylmän veden näytteistä ja biofilmeistä, vaikka veden lämpötila on alle 20 °C ja riippumatta siitä, millainen on raakavesilähde tai vedenkäsittely (Siponen ym. 2024). Kylmää vettä pienemmät legionellalöydökset lämpimän veden näytteissä osoittavat, että riittävän korkealla lämpimän veden lämpötilalla voidaan ehkäistä legionellan esiintymistä ja että yli 50 °C:een lämpötilavaatimus on tässä suhteessa toimiva. Kylmän veden legionellalöydökset eivät ole poikkeavia, vaan legionellan nukleiinihappoja löydetään kylmästä vedestä myös muissa maissa (Lu ym. 2015, Kim ym. 2024). Vaikka legionellaa löytyi vesijärjestelmistä, sen osuus vesijärjestelmien koko bakteeristosta oli hyvin pieni, mikä on yhteneväinen tulos aikaisempien tulosten kanssa (Inkinen ym. 2016, 2018). Legionella-DNA:n tai aktiivisuutta osoittavan RNA:n esiintymisestä, tai *L. pneumophila* qPCR-tuloksista ei voida päätellä vesijärjestelmien legionellan taudinaiheuttamispotentiaalia, vaan sen arvioimiseksi pitää käyttää viljelymenetelmää ja noudattaa sille annettua toimenpiderajaa 1000 pmy/l (STM 2023). Vesilaitostutkimuksessa näytepisteen kylmän veden klooripitoisuus tai lämpötila ei liittynyt legionellalöydöksiin, mikä viittaa siihen, että muilla kiinteistön sisäisillä tekijöillä on vaikutusta legionellojen esiintymiseen.

Tutkimuksissa ei saatu selvää yhteyttä desinfiointimenetelmän tai putkimateriaalin vaikutuksesta legionellojen esiintymiseen (Siponen ym. 202x). Vesilaitostulokset viittasivat siihen, että vapaa kloori olisi legionellaa vastaan hieman tehokkaampi kuin sidottu kloori, mutta pilotverkoston tulokset viittasivat päinvastaiseen. Pilotverkostossa nähtiin hienoinen kuparin legionellaa hillitsevä vaikutus biofilmeissä, mutta ei vesissä. Myös kirjallisuuden mukaan kupariputkien vaikutus legionellaan pitkällä aikavälillä on hieman ristiriitainen (Lu ym. 2014, Gião ym. 2015, Inkinen ym. 2016, Proctor ym. 2017, Buse ym. 2019). Koverkon näytteissä legionellaa esiintyi enemmän kuin sinne syötetyssä vedessä, mikä osoittaa legionellan pystyvän lisääntymään sekä PEX- että kupariputkien verkostoissa, kun lämpötila on 15 – 22 °C.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että legionellan esiintymiseen vesijärjestelmissä ei saada yksinkertaista ratkaisua esim. vain desinfiointiaine- tai materiaalivalinnoilla. Todelliset verkostot ovat yksilöllisiä, monimutkaisia kokonaisuuksia, joihin vaikuttavat myös kiinteistöjen sisäiset tekijät. Pääasiallisina keinoina legionellan torjunnassa ovat edelleen veden hyvä yleinen mikrobiologinen ja kemiallinen laatu, mesofiilisen lämpötila-alueen välttäminen ja veden säännöllinen käyttö. Tutkimus lisäsi tietoa legionellan nukleiinihappomenetelmien käytettävyydestä, joista erityisesti aktiivisuutta osoittavilla RNA-menetelmillä on vielä varsin lyhyt historia. Tutkimus osoitti myös, että sekä vesi- että biofilminäytteiden tutkiminen on verkoston kokonaiskuvan saamiseksi oleellista, sillä näytetyyppien tulokset voivat poiketa toisistaan.

Kiitokset

Kiitämme kaikkia tutkimukseen osallistuneita vesilaitoksia.

Lähteet

- Aloraini S., Alum A., Abbaszadegan M. 2023. Impact of pipe material and temperature on drinking water microbiome and prevalence of *Legionella*, *Mycobacterium*, and *Pseudomonas* species. *Microorganisms* 11, 352. doi: 10.3390/microorganisms11020352.
- Buse H.Y., Morris B.J., Struewing I.T., Szabo J.G. 2019. Chlorine and monochloramine disinfection of *Legionella pneumophila* colonizing copper and polyvinyl chloride drinking water biofilms. *Appl. Environ. Microbiol.* 85(7), e02956-18. doi: 10.1128/AEM.02956-18. Erratum in: *Appl. Environ. Microbiol.* 2022, 88(7), e0022322.
- Domek M.J., LeChevallier M.W., Cameron S.C., McFeters G.A. 1984. Evidence for the role of copper in the injury process of coliform bacteria in drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.* 48, 289-293. doi: 10.1128/aem.48.2.289-293.1984.
- Donohue M.J., Vesper S., Mistry J., Donohue J.M. 2019. Impact of Chlorine and Chloramine on the Detection and Quantification of *Legionella pneumophila* and *Mycobacterium* Species. *Appl. Environ. Microbiol.* 85(24), e01942-19. doi: 10.1128/AEM.01942-19.
- Dupuy M., Mazoua S., Berne F., Bodet C., Garrec N., Herbelin P. ym. 2011. Efficiency of water disinfectants against *Legionella pneumophila* and *Acanthamoeba*. *Water Res.* 45, 1087–1094. doi: 10.1016/j.watres.2010.10.025.
- ECDC 2021. Legionnaires' disease - Annual Epidemiological Report for 2019. European Centre for Disease Prevention and Control.
- ESGLI 2017. European Technical Guidelines for the Prevention, Control and Investigation, of Infections Caused by *Legionella* species. June 2017.
- EU Directive 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption.
- Falkinham J.O., Pruden A., Edwards M. 2015. Opportunistic premise plumbing pathogens: increasingly important pathogens in drinking water. *Pathogens* 4(2), 373-86. doi: 10.3390/pathogens4020373.
- Flannery B., Gelling L.B., Vugia D.J., Weintraub J.M., Salerno J.J., Conroy M.J., Stevens V.A., Rose C.E., Moore M.R., Fields B.S. ym. 2006. Reducing *Legionella* colonization of water systems with monochloramine. *Emerg. Infect. Dis.* 12, 588–596.

- Gião M.S., Wilks S.A., Azevedo N.F., Vieira M.J., Keevil C.W. 2009. Validation of SYTO 9/propidium iodide uptake for rapid detection of viable but noncultivable *Legionella pneumophila*. *Microb. Ecol.* 58, 56–62. doi: 10.1007/s00248-008-9472-x.
- Gião M.S., Wilks S.A., Keevil C.W. 2015. Influence of copper surfaces on biofilm formation of *Legionella pneumophila* in potable water. *BioMetals* 28, 329-339. doi: 10.1007/s10534-015-9835-y.
- Gomez-Alvarez V., Revetta R.P., Santo Domingo J.W. 2012. Metagenomic analyses of drinking water receiving different disinfection treatments. *Appl. Environ. Microbiol.* 78(17), 6095-102. doi: 10.1128/AEM.01018-12.
- Heffelfinger J.D., Kool J.L., Fridkin S., Fraser V.J., Hageman J., Carpenter J., Whitney C.G. 2003. Risk of hospital-acquired Legionnaires' disease in cities using monochloramine versus other water disinfectants. *Infect. Control Hosp. Epidemiol.* 24, 569–574. doi: 10.1086/502256.
- Ikonen, J.M., Hokajärvi, A-M., Heikkinen, J., Pitkänen, T., Ciszek, R., Kolehmainen, M. 2017. Drinking water quality in distribution systems of surface and ground waterworks in Finland. *J. Water Security* 3, 1-10. doi: 10.15544/jws.2017.004.
- Inkinen J., Jayaprakash B., Santo Domingo J.W., Keinänen-Toivola M.M., Ryu H., Pitkänen T. 2016. Diversity of ribosomal 16S DNA- and RNA-based bacterial community in an office building drinking water system. *J. Appl. Microbiol.* 120, 1723-1738. doi:10.1111/jam.13144.
- Inkinen J., Jayaprakash B., Ahonen M., Pitkänen T., Mäkinen R., Pursiainen A., Santo Domingo J.W., Salonen H., Elk M., Keinänen-Toivola M.M. 2018. Bacterial community changes in copper and PEX drinking water pipeline biofilms under extra disinfection and magnetic water treatment. *J. Appl. Microbiol.* 124, 611-624. doi: 10.1111/jam.13662.
- Johnson W.J., Jjemba P.K., Bukhari Z., LeChevallier M.W. 2018. Occurrence of *Legionella* in Non-Potable Reclaimed Water. *JAWWA* 110, 15–27. doi: 10.5942/jawwa.2018.110.0021.
- Julien R., Saravi B., Nejadhashemi A., Whelton A.J., Aw T.G., Mitchell J. 2022. Identifying water quality variables most strongly influencing *Legionella* concentrations in building plumbing. *AWWA Wat. Sci.* 4(1), e1267. doi: 10.1002/aws2.1267.
- Kim T., Zhao X., Hozalski R.M., LaPara T.M. 2024. Residual disinfectant effectively suppresses *Legionella* species in drinking water distribution systems supplied by surface water in Minnesota, USA. *Sci. Total Environ.* 940, 173317. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173317.
- Kool J.L., Carpenter J.C., Fields B.S. 1999. Effect of monochloramine disinfection of municipal drinking water on risk of nosocomial Legionnaires' disease. *Lancet* 353, 272–277. doi: 10.1016/S0140-6736(98)06394-6.
- Kusnetsov J., Räsänen P., Airaksinen P., Pursiainen A., Miettinen I.T., Turtiainen R., Horttanainen J.-M., Koivula I., Aalto A., Vepsäläinen H., Eriksson E., Kellokoski J., Pietikäinen S., Ackman M. 2019. *Legionella* bacteria in the hospital water systems treated with chlorine dioxide. The 6th meeting of the ESCMID Study Group for *Legionella* Infections (ESGLI), Athens, Greece, September 10–12, 2019. Poster 17.
- LeChevallier M.W. 2019. Occurrence of culturable *Legionella pneumophila* in drinking water distribution systems. *AWWA Wat. Sci.* 2019, e1139. doi: 10.1002/aws2.1139.
- LeChevallier M.W., Prosser T., Stevens M. 2024. Opportunistic pathogens in drinking water distribution systems - A review. *Microorganisms* 12(5), 916. doi: 10.3390/microorganisms12050916.
- Lehtola M.J., Miettinen I.T., Keinänen M.M., Kekki T.K., Laine O., Hirvonen A., Vartiainen T., Martikainen P.J. 2004. Microbiology, chemistry and biofilm development in a pilot drinking water distribution system with copper and plastic pipes. *Water Res.* 38, 3769–3779. doi: 10.1016/j.watres.2004.06.024.

- Lin Y.E., Stout J.E., Yu V.L. 2011. Controlling *Legionella* in hospital drinking water: An evidence-based review of disinfection methods. *Infect. Control Hosp. Epidemiol.* 32, 166–173. doi: 10.1086/657934.
- Lin Y.E., Vidic R.D., Stout J.E., Yu V.L. 2002 Negative Effect of high pH on biocidal efficacy of copper and silver ions in controlling *Legionella pneumophila*. *Appl. Environ. Microbiol.* 68, 2711-2715. doi: 10.1128/AEM.68.6.2711-2715.2002.
- Loret J.F., Robert S., Thomas V., Cooper A.J., McCoy W.F., Lévi Y. 2005. Comparison of disinfectants for biofilm, protozoa and *Legionella* control. *IWA J. Water Health* 3, 423–433. doi: 10.2166/wh.2005.047.
- Lu J., Buse H.Y., Gomez-Alvarez V., Struewing I., Santo Domingo J., Ashbolt N.J. 2014. Impact of drinking water conditions and copper materials on downstream biofilm microbial communities and *Legionella pneumophila* colonization. *J. Appl. Microbiol.* 117(3), 905-18. doi: 10.1111/jam.12578.
- Lu J., Struewing I., Yelton S., Ashbolt N. 2015. Molecular survey of occurrence and quantity of *Legionella* spp., *Mycobacterium* spp., *Pseudomonas aeruginosa* and amoeba hosts in municipal drinking water storage tank sediments. *J. Appl. Microbiol.* 119, 278–288. doi:10.1111/jam.12831.
- Miyamoto M., Yamaguchi Y., Sastu M. 2000. Disinfectant effects of hot water, ultraviolet light, silver ions and chlorine on stains of *Legionella* and nontuberculous mycobacteria. *Microbios* 101, 7–13.
- Proctor C.R., Dai D., Edwards M.A., Pruden A. 2017. Interactive effects of temperature, organic carbon, and pipe material on microbiota composition and *Legionella pneumophila* in hot water plumbing systems. *Microbiome* 5(1), 130. doi: 10.1186/s40168-017-0348-5.
- Siponen S., Ikonen J., Gomez-Alvarez V., Hokajärvi A.-M., Ruokolainen M., Jayaprakash B., Kolehmainen M., Miettinen I., Pitkänen T., Torvinen E. 202x. Effect of pipe material and disinfectant on active bacterial communities in drinking water and biofilms. (käsi­kirjoitus lähetetty arvioitavaksi)
- Siponen S., Jayaprakash B., Hokajärvi A.-M., Gomez-Alvarez V., Inkinen J., Ryzhikov I., Räsänen P., Ikonen J., Pursiainen A., Kauppinen A., Kolehmainen M., Paananen J., Torvinen E., Miettinen I.T., Pitkänen T. 2024. Composition of active bacterial communities and presence of opportunistic pathogens in disinfected and non-disinfected drinking water distribution systems in Finland. *Water Res.* 248, 120858. doi: 10.1016/j.watres.2023.120858.
- STM 2023. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laadusta ja valvonnasta sekä rakennusten vesilaitteistojen riskienhallinnasta. 17.11.2015/1352.
- Walker J.T., Mackerness C.W., Mallon D., Makin T., Williets T., Keevil C.W. 1995. Control of *Legionella pneumophila* in a hospital water system by chlorine dioxide. *J. Ind. Microbiol.* 1995, 15, 384–390. doi: 10.1007/BF01569995.
- WHO (World Health Organization) 2018. WHO Housing and health guidelines.
- YM (Ympäristöministeriö) 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista 1047/2017.