



Matti Talja

## **Ilman käyttäytyminen vesijohtoverkostossa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.  
Espoossa 25.2.2019

Valvoja: Professori Riku Vahala

Ohjaajat: DI Matti Heikkinen, TkT Riina Liikanen



---

**Tekijä** Matti Talja

---

**Työn nimi** Ilman käyttäytyminen vesijohtoverkostossa

---

**Maisteriohjelma** Vesi- ja ympäristötekniikka**Koodi** ENG29

---

**Työn valvoja** Professori Riku Vahala

---

**Työn ohjaajat** DI Matti Heikkinen, TkT Riina Liikanen

---

**Päivämäärä** 25.2.2019**Sivumäärä** 53**Kieli** Suomi

---

## Tiivistelmä

Tämän työn tavoitteena oli tutkia, miten ilma käyttäytyy vesijohtoverkostossa. Tutkimuskysymystä lähestyttiin teoreettisesti tekemällä kirjallisuustutkimus, haastatteleamalla suunnittelijoita, laitetoimittajia ja vesihuoltolaitoksia sekä tekemällä kokeellinen mittaus ilman poistumisesta ilmanpoistovenntiileistä vedensiirtolinjassa. Ilman käyttäytymistä on tutkittu paljon ja useita ilman kulkeutumista selittäviä malleja on luotu. Käytännön tason tuntemusta puuttuu kuitenkin eräistä kriittisimmistä kysymyksistä ja suomeksi tietoa on saatavilla vähän. Yksi tutkimuksen tarkoituksista oli selvittää, miten aihetta tunnetaan Suomessa ja vahvistaa tai kumota yleisimpiä käsityksiä.

Sekä teoriaosan että haastattelujen kautta työssä havaittiin, että ilma pääsee vesijohtoverkoston pitkälti pumppauksen, linjan käyttöönoton ja putkirikon yhteydessä. Vedessä on myös itsessään ilmaa kaksi tilavuusprosenttia, mutta koska vesi paineistetaan vesijohtoverkostossa, veteen mahtuukin enemmän ilmaa eikä se välttämättä erkaannu sieltä, jollei paine laske tai veden lämpötila nouse. Suurimpien ilman verkostoon aiheuttamien haittojen todettiin olevan kapasiteetin pieneneminen, energiahäviöt sekä pahenevat paineiskut. Haastatteluissa havaittiin, että suunnittelijat ja laitetoimittajat tunsivat teorian parhaiten ja vesihuoltolaitokset kertoivat havainnollisia esimerkkejä verkostojensa toiminnasta.

Ilmanpoisto tapahtuu joko ilmanpoistovenntiileistä, käyttäjien hanoista tai paloposteista. Vaikka suunnittelijoiden ja laitevalmistajien näkemykset teoriasta ovat hyvinkin samanlaiset, heidän näkemyksensä käytännön ilmanpoistosta eroavat. Laitetoimittajien suunnitteluohjeet suosittelevat ilmanpoistovenntiilien sijoittamisesta muun muassa 400 – 800 metrin välein huippukohtiin, pumpun yhteyteen, loiveneviin nousuihin tai jyrkkeneviin laskuihin ja tasaisille osuuksille. Suunnittelijat sijoittaisivat niitä vain huippukohtiin kilometrin, parin välein riippuen paljon linjan yleispiirteistä, halkaisijasta sekä venttiileiden kapasiteetista. Käytännössä vesihuoltolaitosten venttiilit sijaitsevat vain huippukohdissa, jos niitä on tai jos ne ovat toimintakuntoisia.

Työssä annettu suunnittelusuositus pitää linjan huippukohtia parhaimpina venttiilin sijoituspaikkoina. Jokaiselle huipulle ei kuitenkaan välttämättä pidä asentaa ilmanpoistoa, sillä linjan profiili, paine ja venttiilien välimatkat vaikuttavat asiaan. Vaikka linjasta ei arvioitaisi poistuvan ilmaa, ilmanpoistovenntiilejä on silti hyvä asentaa määrävällein poistamaan ja antamaan ilmaa poikkeustapauksia varten. Venttiilien määrä tulisi optimoida siten, että ne minimoivat ilman aiheuttaman haitan, mutta niitä olisi mahdollisimman vähän huollettaviksi. Huoltamattomat venttiilit aiheuttavat hygieniariskin vesijohtoverkostolle.

---

**Avainsanat** Vesijohtoverkosto, ilma, erkaantuminen, ilmanpoistovenntiili, suunnittelusuositus

---

---

**Author** Matti Talja

---

**Title of thesis** Air Conduction in a Water Network

---

**Master programme** Water and Environmental Engineering**Code** ENG29

---

**Thesis supervisor** Professor Riku Vahala

---

**Thesis advisors** M. Sc. Matti Heikkinen, D. Sc. Riina Liikanen

---

**Date** 25.2.2019**Number of pages** 53**Language** Suomi

---

## Abstract

The objective of this Master's Thesis was to study how air conducts in a water supply network. This thesis was conducted by making a literature review, interviewing designers, equipment suppliers and water supply departments as well as making an experimental research of air removal in a water supply network. Lots of research has been done about air conduction and several models have been created to represent how air moves in a pipeline. However, practical knowledge is lacking about some of the key areas and there is only little information available in Finnish. One of the aims of the study is to clarify how well the subject is known in Finland and to confirm or refute the most common conceptions.

Through the theoretical part and interviews, it was observed that air enters the water supply network from pumping, plumbing and pipe bursting. In addition, water itself contains two volumetric percentiles of air. However, since the water is pressurized, it can contain more air and it does not necessarily diverge, unless the pressure drops or the temperature rises. The reduction of pipe capacity, energy loss and surges were found to be the greatest harms of having air in the network. The designers and equipment suppliers knew the theory best, and the water supply departments were able to describe examples from their networks well.

Air removal occurs either from air valves, customers' taps or fire hydrants. Even though the designers and equipment suppliers had equal views over the theory, their views differed on how to remove air in practice. The design manuals recommend placing air valves in every 400 – 800 meters for example to the summits, decreasing upslopes, increasing downslopes, horizontal runs and near pumps. Designers would only place air valves to the summits every one or two kilometers depending on the diameter, the capacity of the valves and the general feature of the line. Practically, all the air valves locate only at the summits if they even exist or are functional.

The design manual given in this thesis considers the summits as the best location for the air valves. However, an air valve should not necessarily be placed in every summit, since the profile of the line, the pressure and the distance between the valves should be considered. Even though air is not estimated to be removed from a pipeline, air valves should be placed at regular intervals to give and remove air when an exception occurs. The number of air valves should be optimized so that they would minimize the harm from air with at least valves as possible, since they must be maintained. Unmaintained air valves are a hygienic risk for the water supply network.

---

**Keywords** Water network, air, separation, air valve, design recommendation

---

## Alkusanat

*Tämä työ on herättänyt laajaa kiinnostusta vesihuoltoalan eri toimijoissa. Haluan kiittää Rambollia, HSY:tä, Porvoon Vettä, Lining Oy:tä sekä VVY:tä työn rahoittamisesta, ja heidän yhteistyönsä ylipäättään mahdollisti ilman käyttäytymisen tutkimisen vesijohtoverkostossa. Työtä ohjaamassa oli myös Aalto-yliopisto.*

*Haluan kiittää Matti Heikkistä Rambollilta ja Riina Liikasta Aalto-yliopistolta asiantuntevasta ohjauksesta ja hyvistä kommentteista läpi työn. Pentti Keränen Rambollilta oli myös tärkeässä osassa työn ohjauksessa ja hänen mielenkiintonsa aihetta kohtaan vuosikymmenten ajalta oli inspiroivaa. Työn valvojana toimi Riku Vahala Aalto-yliopistosta.*

*Alun alkaen Henri Paatela Rambollilta värväsi minut tähän projektiin; kiitos luottamuksesta ja tuesta työn aikana. Työni kannalta tärkeitä ihmisiä olivat myös HSY:ltä Mitja Huttunen, Juha Pitkänen ja Pentti Janhunen sekä Lining Oy:ltä Tapio Mäki ja Mika Passila. Kiitos mielenkiinnosta ja kokeellisen mittauksen mahdollistamisesta organisaatioittenne kautta. Kiitos myös kaikille haastatteluun osallistuneille sekä työn oikolukijalle Teresa Harjulle.*

*Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni tuesta ja tsempeistä työn aikana.*

Helsingissä 25.2.2019

Matti Talja



# Sisällysluettelo

1 Johdanto .....	2
2 Kirjallisuuskatsaus.....	4
2.1 Ilman esiintyminen vesijohtoverkostossa .....	4
2.2 Ilman vaikutukset vesijohtoverkostossa .....	8
2.3 Virtausmekaniikka.....	11
2.4 Virtauksen mallintaminen .....	14
2.5 Kriittinen nopeus .....	18
2.6 Ilman poistaminen vesijohtoverkostosta.....	21
3 Menetelmät .....	25
3.1 Haastattelututkimus .....	25
3.2 Kokeellinen tutkimus.....	26
4 Tulokset .....	32
4.1 Haastattelututkimus .....	32
4.1.1 Onko vesijohtoverkostossa ilmaa?.....	32
4.1.2 Ilman alkuperä, erkaantuminen ja haitat .....	33
4.1.3 Ilman poistuminen ja ilmanpoistoventtiilit.....	35
4.2 Kokeellinen tutkimus.....	37
5 Tulosten tarkastelu ja yhteenveto.....	39
5.1 Ilman määrä vesijohtoverkostossa.....	39
5.2 Ilman käyttäytyminen vesijohtoverkostossa .....	40
5.3 Ilmanpoistoventtiilit.....	41
5.4 Suunnittelusuositus .....	44
5.5 Jatkotutkimus .....	47
Lähdeluettelo.....	49

# 1 Johdanto

Ilman käyttäytymiseen vesijohtoverkostossa on kiinnitetty huomiota jo 1930-luvulla, jolloin tehtiin ensimmäiset tutkimukset aiheesta (Lauchlan ym. 2005). Tästä eteenpäin tutkimuksia on julkaistu tasaisin väliajoin ja ilman kulkeutumista on onnistuttu mallintamaan usein erilaisin menetelmin (Taitel & Dukler 1976; Falvey 1980) ja matemaattisin teorioin (Escarameia 2007; Kent 1952; Pothof 2011; Wisner ym. 1975). Tutkimusten tulokset poikkeavat toisistaan jossain määrin ja jotkut voivat olla jopa ristiriidassa keskenään, sillä testausmenetelmät, löydösten kirjaaminen, määritelmät ja yhtälöiden muuttujat ovat olleet ajan saatossa erilaisia (Little 2002). Littlen mukaan muun muassa tästä syystä ei ole löytynyt yleisesti hyväksyttyä teoriaa, jolla voisi mallintaa ilmataskujen liikkumista tai edes yksinkertaisempia kuplavirtauksia vesijohtolinjassa. Kaiken kaikkiaan ilman kulkeutuminen ja sen poistamisen tarve ovat kohtuullisen hyvin tutkittuja aihealueita tähän päivään mennessä, mutta aihe sisältää myös monia vastaamattomia kysymyksiä.

Käytännön tasolla tilanne on Suomessa kuitenkin toisenlainen. Suomeksi ei ole juurikaan aineistoa tai ohjeistusta ilman kulkeutumisesta (Pulli 2016) ja poistosta laitevalmistajien ohjeita lukuun ottamatta. Tämä johtaa siihen, että suunnittelukäytännöt voivat olla sekavia ja puutteellisia, eikä asian tärkeyttä välttämättä ymmärretä tai arvosteta vesihuoltolaitoksilla ja suunnittelutoimistoissa. Tukeutuminen pelkästään käytännön suosituksiin tai laitevalmistajien ohjeisiin on ongelmallista, sillä venttiilien sijoittaminen ja koon valitseminen on haasteellista: todellisen venttiilin paikka ei ole välttämättä verrannollinen tyyppiratkaisuun, vaan suunnittelu vaatii ilman käyttäytymisen kokonaisvaltaista ymmärtämistä (Ramezani ym. 2015). Vaikka ilman kulkeutuminen on hyvin tutkittu aihe, muun muassa ilman erkaantumisesta vedestä ei ole tehty mitään tutkimusta vesijohtoverkoston kaltaisessa ympäristössä.

Aiheen tärkeyttä tulevaisuudessa korostaa Suomen vesijohtoverkoston kasvava korjausvaje. Äänekoskella 2016 talousvesi saastui ilmanpoistoverkoston kautta, joka oli sijoitettu virheellisesti samaan kaivoon viemärin ilmanpoiston kanssa. Vesijohtoverkostossa sattui todennäköisesti putkirikko, jonka arvellaan aiheuttaneen alipaineen ja saaneen ilmanpoistoverkoston imemään ilmanpoistokaivoon viemäristä tullutta jätevettä, mikä saastutti vesijohtoverkoston (Yle 2016). Mahdollisesti väärin sijoitetut, tarpeettomat tai hoidollisesti laiminlyödyt ilmanpoistoverkoston venttiilit ja venttiilikaivot ovatkin riski talousveden saastumiselle, kuten Äänekosken tapaus osoittaa. Lisäksi Suomessa rakennetaan uusia vesijohtolinjoja: esimerkiksi yhdelle suunnitteilla olevalle 40 km pitkälle vedensiirtolinjalle on alustavasti suunnitteilla yli 50 ilmanpoistoverkoston venttiiliä.

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia ilman käyttäytymistä vesijohtoverkostossa seuraavilla tutkimuskysymyksillä. Miten ilma vaikuttaa vesijohtoverkostossa? Onko vesijohtoverkostossa ilmaa ja minkä verran? Miten se siellä liikkuu? Kuinka paljon huomiota sen poistaminen vaatii? Minkälaisia käsityksiä löytyy vesihuoltolaitoksilla, laitetoimittajilla ja suunnittelijoilla ilmanpoistosta Suomessa? Erityisenä tarkastelun kohteena on vedensiirtolinjat, joihin tarvitaan ilmanpoistoverkoston venttiilejä parantamaan ja turvaamaan linjan toimintaa sekä poistamaan ja päästämään ilmaa sisään riippuen tilanteesta.

Työ koostuu kirjallisuus- ja haastattelututkimuksesta, joissa tarkastellaan ilman pääsemistä ja poistumista vesijohtoverkostossa, sen kulkeutumista, erkaantumisen syitä sekä ilman merkitystä energian kulutuksen ja painehäviöiden kannalta sekä sitä, mitä

vesijohtoverkostopuolen kentällä tiedetään ja ei tiedetä. Kokeellisessa osuudessa tarkastellaan pääkaupunkiseudulla olevaa vedensiirtolinjaa ja mitataan ilmavirtojen liikumista ilmanpoistovenkostiileissä. Osion tavoitteena on vahvistaa tai kumota tavallisimpia ilmanpoistoon liittyviä käsityksiä ja tuoda lisää ymmärrystä siitä, kuinka paljon ilmaa kertyy ja poistuu vesijohtoverkostosta. Lopuksi teorian ja kokeellisen osuuskien pohjalta laaditaan suositus, jossa esitellään konkreettisia ohjeita ja reunaehvoja ilmanpoistovenkostiilien tarpeeseen ja sijoitteluun.

Työn ovat rahoittaneet konsulttiyhtiö Ramboll, vesihuoltolaitokset HSY ja Porvoon Vesi, laitetoimittaja Lining Oy sekä Vesilaitosyhdistys VVY. Rahoittajien suuri kirjo osoittaa, että kiinnostus aihetta kohtaan on laajaa ja ilman käyttäytymisestä tarvitaan enemmän tietoa Suomessa. Työtä ovat ohjanneet Ramboll ja Aalto-yliopisto.

## 2 Kirjallisuuskatsaus

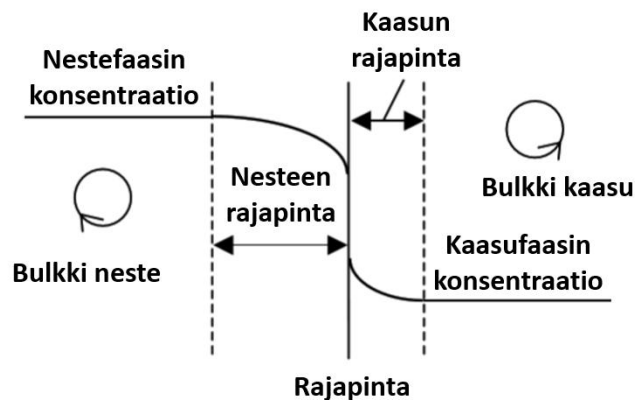
Tässä luvussa luodaan katsaus siihen, minkälaista ymmärrystä ja tutkimusaukkoja aiheesta löytyy viimeisten 80 vuoden aikana tehtyjen tutkimusten perusteella. Läpi käytäviä aihealueita ovat ilman pääseminen ja sen määrät verkostossa, mitä ilma aiheuttaa siellä, miten ilma kulkeutuu ja miten sitä voidaan mallintaa sekä miten ilmaa voidaan poistaa verkostosta. Jotta ilmasta tulisi ongelma vesijohtoverkostolle, täytyy verkostossa vallita seuraavat olosuhteet Escarameian ym. (2005) mukaan:

- 1) ilman lähde
- 2) ilman erkaantumista aiheuttava tekijä ja
- 3) otolliset olosuhteet ilman kertymiselle vesijohtolinjaan

Kirjallisuuskatsaus ja sen löydökset vaikuttavat siihen, miten kokeellisen osuus suoritetaan. Näiden molempien perusteella annetaan luvussa 5.4 suositus.

### 2.1 Ilman esiintyminen vesijohtoverkostossa

Vesijohtoverkostossa ei pitäisi olla ilmaa, vaan linjan pitäisi olla kokonaan paineistetun veden täyttämä. On kuitenkin yleisesti havaittu, että verkostossa on ilmaa erilaisista syistä. Jo normaali oloissa vedessä on todettu olevan noin kaksi tilavuusprosenttia ilmaa (AWWA 2001). Tämä aiheuttaa sen, että vesijohtoverkostossa on ilmaa – ainakin liuenneena – sillä sisään virtaava vesi tuo mukanaan vesijohtoverkoston ilmasta kylläisen liuoksen, joka on löytänyt tasapainotilan tietyn lämpötilan ja tavallisen ilmanpaineen kanssa. Ilman liukenemista auttavat vesimassan pyörteisyys, turbulenssit sekä vesisuihkut, jotka sekoittavat vettä ja mahdollistavat näin ilman liukenemisen kaasufaasista veteen (Lachlan ym. 2005; Schuit 2009). Henryn laki soveltuu kuvaamaan ilman liukenemista veteen, sillä eri kaasujen osuus verrattuna veden moolimassaan on hyvin pieni (Benjamin & Lawler 2005). Tällöin Henryn laki määrittelee ilman liukoisuuden ja se saavuttaa normaalissa ilmanpaineessa kahden prosentin kylläisyyden tilan, sillä ilmassa kaasuja on saatavilla riittävästi. Veden ollessa avoimessa uomassa tai säiliössä veteen liukenee samanaikaisesti yhtä paljon ilmaa kuin mitä siitä erkautuu takaisin ilmakehään. Tätä tasapainotilassa tapahtuvaa kaasun liikkumista kutsutaan kaksoisfilmitheoriaksi ja se on esitetty kuvassa 1. Olosuhteiden muuttuessa (paine, lämpötila) ilmaa joko liukenee lisää tai erkaantuu.



**Kuva 1.** Kaksoisfilmitheoria: miten kaasumolekyylit käyttäytyvät kaasun ja nesteen rajapinnassa (Benjamin & Lawler 2013).

Ilmaa voi päästä myös muilla tavoilla vesijohtoverkkoon: pumppauksessa, täytettäessä tai tyhjennettäessä linjaa, venttiileistä tai putken liitoksista alipaineen vallitessa sekä biologisten prosessien seurauksena (Lauchlan ym. 2005; Pulli 2016). Pozos (2010) arvioi, että pumppujen virtaamasta jopa 5 – 10 % voisi olla ilmaa, mikä on jo huomattavasti enemmän kuin alkuperäinen kaksi prosenttia. Pumppauksessa syntyvät pyörteet aiheuttavat ilman liukenemisen vesimassaan vedenottoaltaassa ja ilmiön vaikutusta voi pienentää huolehtimalla imuputken vedenottopään riittävästä syvyydestä (Schuit 2009). Toisaalta tavallisella paineenkorotusasemalla ei ole allasta eikä vesi ole kosketuksissa ilman kanssa, jolloin pumppu ei voi tuoda enempää ilmaa virtaukseen.

Ennen kuin putki täytetään vedellä, se on täynnä ilmaa. Ilmanpoistoenttiilien rooli korostuu juuri putkea täyttäessä ja tyhjentäessä. Venttiileitä on oltava tarpeeksi tiheästi, jottei putki vaurioituisi täyttöjen ja tyhjennysten aikana, ja jotta putkeen ei jäisi ilmaa. Suositellut täyttö- ja tyhjennysnopeudet ovat samat kuin venttiilin ilman anto- tai poistamiskapasiteetti (noin 0,3 m/s täyttöön ja 0,6 m/s tyhjennykseen), jotta ilmaventtiilit pysyisivät auki ja ilman aiheuttamat ongelmat voitaisiin minimoida (AWWA 2001; Ramezani ym. 2015).

Alipaine on ei-toivottu tilanne vesijohtoverkostossa. Normaalikäytössä sitä ei pitäisi ilmetä, mutta esimerkiksi paineisku tai putkirikko voivat aiheuttaa alipaineen. Vesijohtoverkostossa on aina myös jonkin verran mikrobiologista toimintaa, vaikka taudinaiheuttajat poistetaan ja talousveden mikrobiologinen stabiilius pyritään turvaamaan vedenkäsittelyssä. Mikrobiologisen toiminnan vaikutus vesijohtoverkostossa olevan ilman määrään on kuitenkin tuntematon.

Seuraavaksi aihetta tarkastellaan teoreettisemmasta näkökulmasta. Puhdas ilma koostuu lähinnä typestä ja hapestä, jolloin ne ovat vallitsevat veteen liuenneet kaasut. Hiilidioksidilla on yli 20-kertainen vesiliukoisuus happeen nähden ja 50-kertainen typpeen, jolloin sitä voi olla liuenneena huomattavia määriä, kunhan hiilidioksidia on saatavilla vettä ympäröivässä ilmassa. Henryn lain liukoisuusvakiot riippuvat lämpötilasta ja ne ovat nähtävissä taulukosta 1 edellä mainittujen kaasujen ilmakehän mooliosuuksien kanssa. Henryn lain mukaan tasapainotilassa olevan kaasun liukoisuuskonsentraatio määräytyy liukoisuusvakion, kaasun mooliosuuden sekä kaasufaasin paineen funktiona (3.1) (Pothof 2011).

$$C_l = H m p \quad (2.1)$$

missä	$C_l$ [mol/m <sup>3</sup> ]	liukoisuuskonsentraatio
	$H$ [mol/m <sup>3</sup> bar]	Henryn lain vakio
	$m$ [-]	kaasun mooliosuus
	$p$ [bar]	kaasufaasin paine

**Taulukko 1.** Henryn lain liukoisuusvakiot 15 °C asteessa\* (Pothof 2011) ja kaasujen osuudet ilmakehässä\*\* (North Carolina Climate Office 2018). Kaasujen liukoisuus ilmakehän paineessa on laskettu edellä esitellyllä kaavalla (3.1).

Kaasu	$H$ [mol/m <sup>3</sup> bar]*	$m$ [-]**	$C_i$ [mol/m <sup>3</sup> ]
O <sub>2</sub>	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,21	$2,73 \cdot 10^{-4}$
N <sub>2</sub>	$6,5 \cdot 10^{-4}$	0,78	$5,07 \cdot 10^{-4}$
CO <sub>2</sub>	$3,4 \cdot 10^{-2}$	0,001	$3,4 \cdot 10^{-5}$

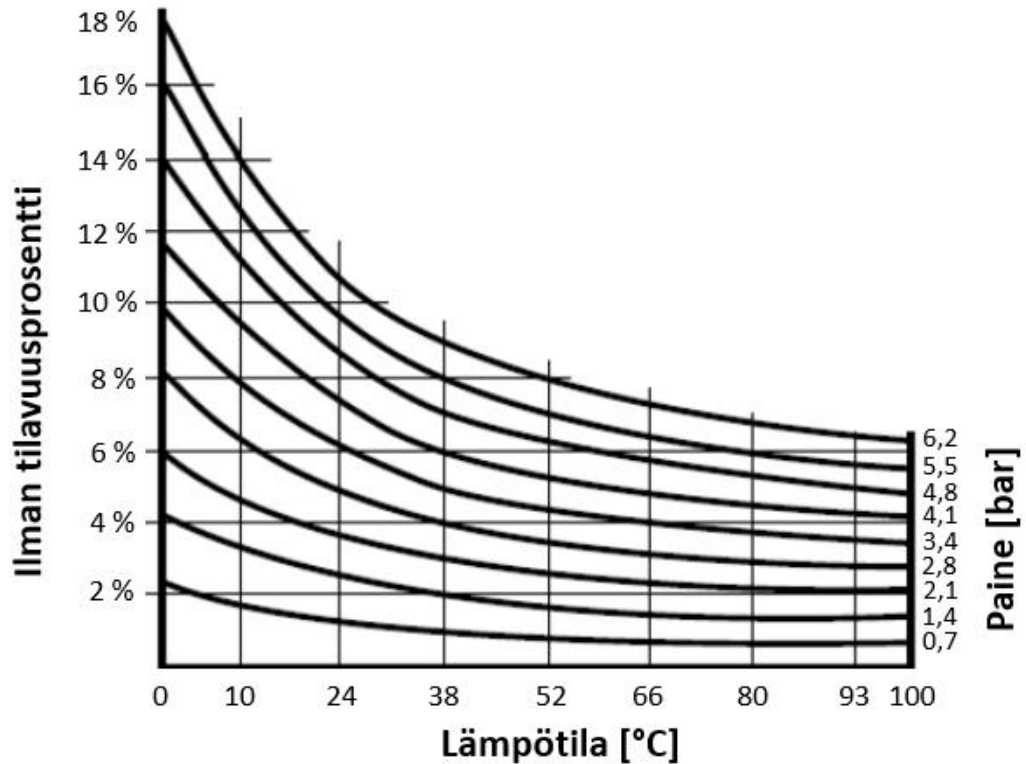
Taulukossa 1 on myös laskettuna tavallisessa ilmanpaineessa liukenevien kaasujen määrät. Tästä huomataan, että typpi on liuennein kaasu, mutta jos esimerkiksi säiliössä on hiilidioksidia ilmassa enemmän kuin 0,1 %, niin jo reilun prosentin ilman pitoisuudella hiilidioksidia liukenee veteen enemmän kuin vetyä. Tämä johtuu hiilidioksidin huomattavasti suuremmasta Henryn lain liukoisuusvakiosta. Kun kaasuista täysin kylläinen vesi etenee paineistettuun vesijohtoverkoston, se saavuttaa Henryn lain mukaisen uuden liukoisuustasapainon, jossa veteen mahtuuikin enemmän kaasuja, sillä paine on kasvanut. Tällöin ilman erkaantuminen vaikeutuu ja kaikki kaasu saattaa liueta veteen. Suomessa vesijohtoverkoston vedenpaine vaihtelee kolmesta seitsemään bariin (RIL 2010), jolloin hapen, typen ja hiilidioksidin liukoisuudet ovatkin kolme- tai jopa seitsemänkertaiset tavalliseen ilmanpaineeseen nähden.

Paineen lisäksi ilman liukoisuus veteen on riippuvainen lämpötilasta, koska Henryn lain vakio on sidottu tiettyyn lämpötilaan. Kuvassa 2 on kuvattuna veteen liuenneen ilman tilavuusprosentti lämpötilan sekä paineen funktiona. Kun lämpötila laskee tai paine nousee, veteen voi liueta lisää ilmaa, ja kun paine laskee tai lämpötila nousee, vedestä voi erkaantua ilmaa, jos se ei mahdu sinne Henryn lain mukaisesti. Esimerkiksi 10 Celsius-asteen lämpötilassa veteen mahtuuikin viiden barin ylipaineessa melkein 14 % ilmaa. Jos ilman lähtötilavuus vedessä on 2 % ja vaikka pumppauksessa liuenneen ilmanmäärä olisikin 5 – 10 % (Pozos 2010), niin tällöinkään vedestä ei pitäisi erkaantua lainkaan ilmaa, paitsi jos pumppausprosessi on huonosti suunniteltu ja olosuhteet muuttuvat. Ramezani ym. (2015) toteaaakin kirjallisuustutkimuksessaan, että ilman erkaantuminen on yksi suurimmista tietämysaukoista, jota tulisi tutkia enemmän, sillä ilma voi sekä erkaantua tai olla erkaantumatta ja ilman erkaantumismäärät ovat tuntemattomia.

Vesijohtoverkoston tapahtuvaa paineiden vaihtelua kuvaa hyvin Bernoullin yhtälö (3.2), joka ilmaisee energian säilymisen veden virtauksessa. Yhtälön mukaan kahta eri pistettä voi vertailla toisiinsa paineen, asemakorkeuden sekä nopeuden energiakomponentteina, mutta matkalla tapahtuu myös kertahäviöitä sekä jatkuvaa kitkahäviötä. Tällöin voidaan päätellä, että putken paine voi pienentyä nopeuden kasvaessa, asemakorkeuden noustessa (esimerkiksi mäelle nouseminen) tai jos putkessa tapahtuu häviöitä. Tällöin ilma voi erkaantua sopivissa olosuhteissa.

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h \quad (2.2)$$

missä  $h$  [m] asemakorkeus  
 $p$  [Pa] paine  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] nesteen tiheys  
 $g$  [m/s<sup>2</sup>] gravitaatiokiihtyvyyys



**Kuva 2.** Ilman liukoisuus veteen lämpötilan ja absoluuttisen paineen funktiona (American Wheatley 2018).

$v$  [m/s]      nopeus  
 $\Delta h$  [m]      häviöt

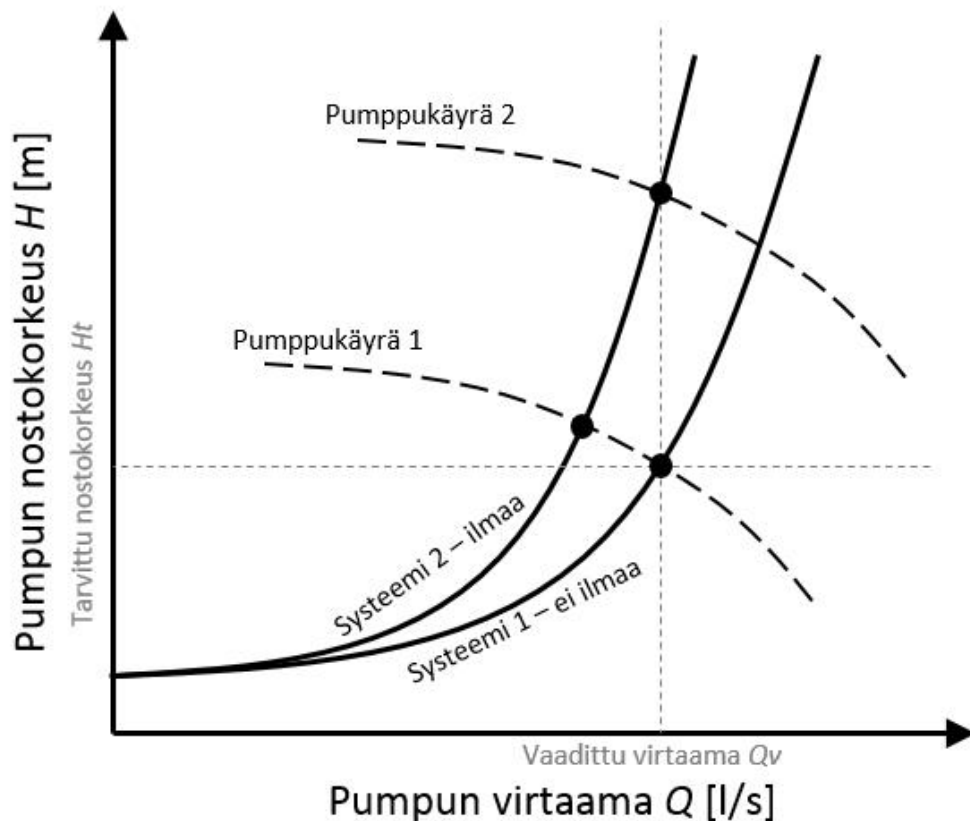
Ilman erkaantumisen lisäksi se voi Henryn lain mukaisesti liueta veteen myös vesijohtoverkostossa olevista ilmataskuista (Schuit 2009). Näin voi käydä, jos vesi ei ole kylläinen kyseessä olevasta kaasusta. Aiheesta ei ole kunnollista tutkimusta, sillä se liittyy muun muassa ilmataskujen hajoamisaikaan, jossa osa ilmasta liukenee veteen ja loppu kulkeutuu virtauksen mukana (Schuit 2009). Pienemmillä tilavuuksilla ja virtausnopeuksilla liukenemisen on kuitenkin todettu olevan kaasun pääkulkeutumistapa, jolloin ilman kylläisyys vaikuttaa vesijohtoverkostossa oleviin ilmamääriin (Pothof 2011). Pullikin (2016) mainitsee ohimennen mahdollisuuden ilman liukenemiselle, mutta toteaa ilman erkaantuvan helpommin kuin liukenevan takaisin. Haastattelun kautta selkenee, että Pulli tarkoittaa tällä sitä, kun olosuhteet ovat muuttuneet (paine vähentynyt ja/tai lämpötila noussut) ja ilma on erkaantunut vedestä, eikä ilma tässä muuttuneessa olosuhteessa enää liukene takaisin.

Ilmaa voi myös ”huokoistua” (liueta turbulenttisen virtauksen rajapintaan joko ilmakuplina tai vesipisaroina – englanniksi *surface entrainment*) virtauksen yläkerroksiin esimerkiksi vesikynnyksen yhteydessä. Vaikka aiheesta ei ole tutkimuksessa löytynyt havaintoja, huokoistumisen on arveltu lisäävän ilman kulkeutumista etenkin suurissa putkissa, kunhan Reynoldsin luku ja putken halkaisija ovat tarpeeksi suuret (Pothof 2011). Näiden lisäksi veden pinnassa täytyy olla turbulenttinen pintajännityksen rikkova rajapinta, joka mahdollistaa ilman huokoistumisen (Brocchini & Peregrine 2001). Virtauksen täytyy myös olla tarpeeksi nopeaa, jotta ilma voi kulkeutua vesipisaroiden (yli 10 m/s) tai ilmakuplien (pienemmissä nopeuksissa) mukana ilmataskusta virtaukseen (Rein 1998).

Paineen ja lämpötilan salliessa vedestä erkaantuva ilma muodostaa kuplia tai taskuja ja näin vesijohtoverkostossa voi virrata sekä nestettä että kaasua yhtä aikaa. Näiden virtausmekaniikkaa sekä mallintamista käsitellään 2.3 luvusta eteenpäin.

## 2.2 Ilman vaikutukset vesijohtoverkostossa

Ilmasta on vesijohtoverkostossa monenlaista haittaa. Ilmataskut pienentävät putken poikkileikkauspinta-alaa, mikä aiheuttaa kasvavia painehäviöitä ja pieneneviä virtaamia sekä saattaa ääritilanteessa jopa estää virtauksen (Lauchlan ym. 2005). Tämä nostaa energian kulutusta, sillä ilmataskujen aiheuttama painehäviö voi olla  $0,95L \sin(\theta)$  mittaluokkaa, kun  $L$  on putken pituus [m] ja  $\theta$  [°] on putken kulma (Pothof & Clemens 2010) ja saman virtaaman saamiseksi vettä pitää pumpata suuremmalla teholla. Kuvassa 3 on demonstroitu, mitä kasvava ilmanmäärä aiheuttaa vesijohtoverkostossa. Ilmataskujen kasvaessa ja painehäviöiden suurentuessa systeemikäyrä jyrkkenee *Systeemi 1* -käyrästä *Systeemi 2*:ksi. Tällöin vaaditun virtaaman saavuttamiseksi tarvitaan tehokkaampi pumppu, sillä tarvittava nostokorkeus on kasvanut häviöiden takia eikä *Pumppukäyrä 1* pysty tuottamaan vaadittua virtaamaa tarvittavalla nostokorkeudella. Tämän vuoksi virtaama pienenee, jos jatketaan vanhalla pumpulla. Tehokkaampi *Pumppukäyrä 2* pystyy vastaamaan muuttuneeseen tilanteeseen, mutta samalla se kuluttaa enemmän energiaa ja pumpun vaihtaminen aiheuttaa investointikustannuksia.

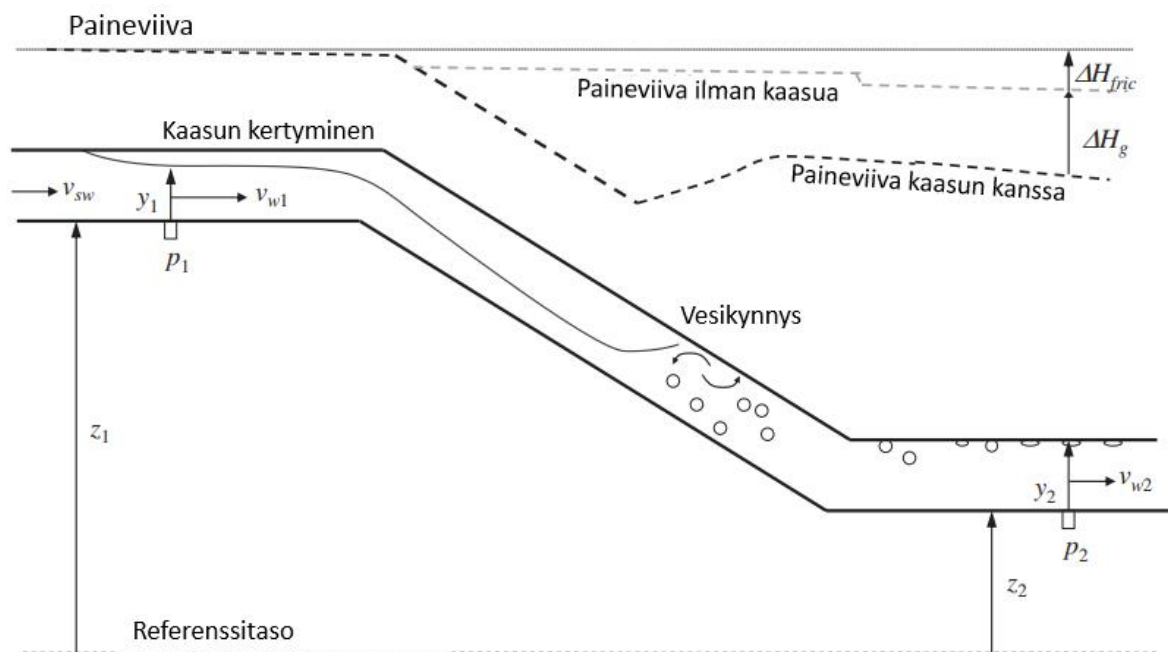


**Kuva 3.** Painehäviöiden kasvaessa systeemikäyrä jyrkkenee, jolloin vaadittuun virtaamaan  $Q_v$  tarvitaan tehokkaampi pumppu, sillä tarvittava nostokorkeus  $H_t$  on kasvanut.

Kuvassa 4 kuvataan, miten ilmatasku vaikuttaa paineviivaan – se pienentää sitä  $\Delta H_g$  -komponentin verran. Tällöin pumpun täytyy pumpata  $\Delta H_g$  -komponentin verran enemmän saavuttaakseen saman virtaaman kuin ilman kaasua. Ilman kaasun kertymistä paineviivaan

vaikuttaa lähinnä kitka: putken pinnan ja veden välinen kitka vastustaa jatkuvasti virtausta ja putken suunnan tai koon muuttuminen aiheuttaa kertahäviöitä. Elämäntyönsä vesijohtoverkoston parissa tehneen kanadalaisen Thomasin (2003) mukaan veden pumppaukseen käytetty energia vastaa usein noin 75 % vesijohtoverkoston käyttökustannuksista ja ilmataskut voivat vähentää energiatehokkuutta jopa 30 %. Tavallisesti luku on 20 % tietämällä, jolloin pumppujen tehoa pitää nostaa häviöiden verran. Hyvinkäällä pohjavesilaitoksilla veden pumppaus vesijohtoverkoston vastaa 30 – 70 % kokonaisenergian kulutuksesta (Kuronen 2014), joten luvut voivat olla hyvin vaihtelevia ja paikkasidonnaisia Suomessa.

Otetaan pumppaushäviöiden havainnollistamiseksi esimerkki. Kun vesijohtoverkoston ei ole ilmaa, pumppaus vastaa 70 % käyttökustannuksista. Jos ilmaa kuitenkin alkaa kertyä verkostoon eikä sitä poisteta sieltä, tavallinen energiahäviö on 20 %. Tällaisessa tapauksessa kokonaiskustannukset kasvavat 14 %:lla alkuperäisestä tilanteesta ja pumppaus vastaa uudessa tilanteessa 74 % kustannuksista.



**Kuva 4.** Ilman vaikutus paineviivaan ja näin myös energian kulutukseen. Paine laskee sekä kitkan että ilmataskujen vaikutuksesta (Pothof & Clemens 2011).

Muita ilman aiheuttamia ongelmia ovat veden virtauksen ja sen ominaisuuksien muuttuminen (nesteen tiheyden ja elastisuuden muutokset ilman määrän lisääntyessä sekä ilmakuplien nosteen aiheuttamat häiriöt virtauskentässä), veden laadun heikkeneminen (veden samentuminen, biologisen aktiivisuuden lisääntyminen ja ilman mahdollinen reagoiminen putken kanssa) sekä mittareiden virhelukemat (Lauchlan ym. 2005; Escarameia ym. 2005). Myös paineiskut ja kavitaatio ovat merkittävä riski. Tämä on mahdollista, kun pumppaus on epätasaista tai se pysähtyy sähkökatkoksen takia; venttiileitä avataan ja suljetaan äkillisesti tai näitä tehdään väärässä järjestyksessä, linja täytetään käyttöönotossa liian nopeasti tai putkissa on epäjatkuvuuskohtia kuten putken koon äkillinen muutos tai jyrkkä mutka (Pozos 2010; Pulli 2016). Burrows (2003) ja Jönsson (1992) ovat osoittaneet, että etenkin pienet ilmataskut lisäävät paineiskujen voimakkuutta puristuessaan kasaan ja kerätessään suuret määrät energiaa, joka voi aiheuttaa jopa putken räjähtämisen (Ramezani

ym. 2015). Thorley (2004) on huomannut, että tarpeeksi suuret ilmataskut voivat toisaalta myös pehmentää paineiskuja. Ilman muiden huonojen vaikutusten, kasvavan energiankulutuksen sekä hallitsemattomuuden takia vesijohtoverkoston ei kuitenkaan kannata suunnitella sisältämään tällaisia taskuja.

Edellä mainitut syyt voivat aiheuttaa paineiskun, joka muodostuu Parmakianin (1955) ja Wattersin (1980) mukaan siitä, kun virtaus äkillisesti muuttuu ja jäykkä neste alkaa painautua kasaan nopeasti kasvavan paineen vuoksi. Tällöin nesteen tiheys ja putken halkaisija kasvavat, ja näihin vaikuttavat sekä putken että nesteen elastisuus ja dimensiot. Yksinkertaisessa ympäristössä paineen muutos noudattaa Joukowskyn yhtälöä (3.3), jossa äänennopeudella etenevä paineaalto, nesteen tiheys sekä nopeuden muutos määrittävät paineiskun suuruuden.

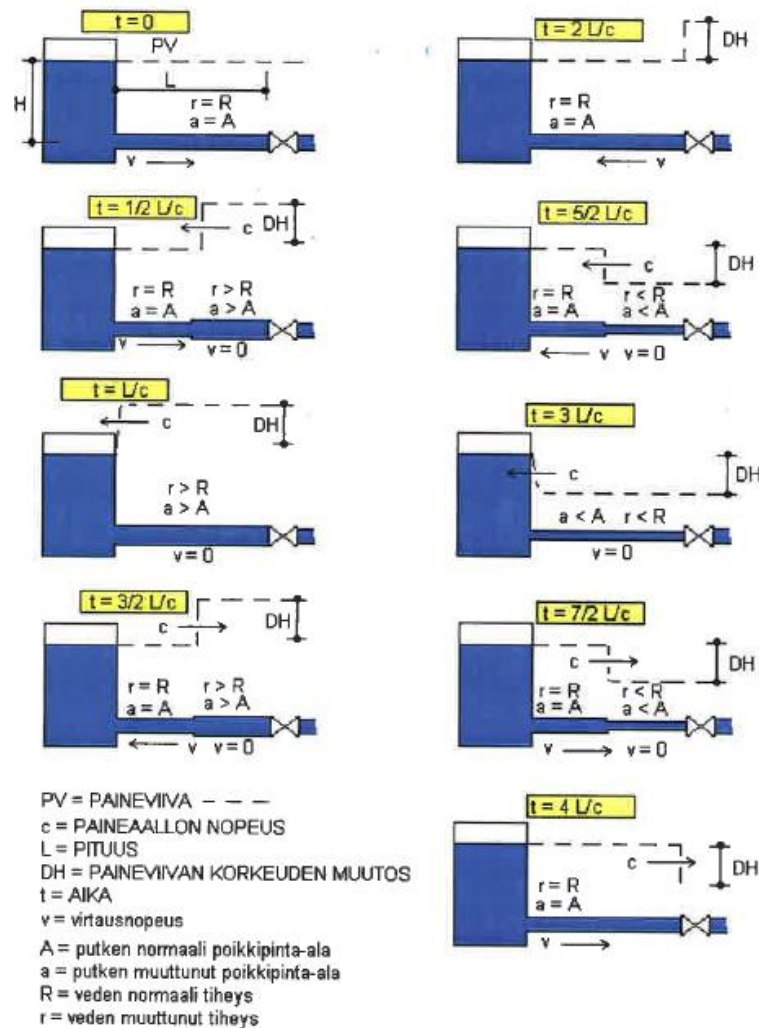
$$\Delta P = \rho c \Delta v \quad (2.3)$$

missä	$\Delta P$ [Pa]	paineen muutos
	$c$ [m/s]	äänennopeus
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	nesteen tiheys
	$\Delta v$ [m/s]	nopeuden muutos

Pulli (2016) kuvailee, miten paineisku jatkuu tästä siten, että paine yrittää tasaantua ja saavuttaa tasapainotilan. Ylipaineinen ja paisunut linjapää muodostaa näin käänteisen virtauksen, jolloin paine tasaantuu pullistuneessa päässä, kun putken muoto palautuu. Syntynyt virtaus aiheuttaa kuitenkin toiseen päähän seuraavan ylipaineen, jolloin alkuperäiseen päähän syntyy alipaine ja siellä putki supistuu alipaineen voimasta. Alipaine saa virtauksen palaamaan takaisin, jolloin päädytään lähtötilanteeseen, kun aikaa on kulunut neljä kertaa putken pituus jaettuna äänennopeudella. Tämä toistuva edestakainen virtaustilanne eli oskillointi jatkuu, kunnes paine- ja energiahäviöt ovat käyttäneet vapautuneen energian loppuun. Kuvassa 5 on esitelty tämä kuvattu paineaallon eteneminen.

Painevaihtelut voivat vahingoittaa putkea ja alipaine aiheuttaa hygieniariskin, sillä putken liitoksista, saumoista tai rei'istä pääsee ympäröivästä maaperästä vettä, partikkeleita ja bakteereita sisään (Lauchlan ym. 2005). Alipaine voi aiheuttaa myös kavitaation, jolloin nesteen paine alittaa höyrystymispaineen, jolloin vesihöyrykin erkaantuu vedestä kaasuksi ja paineen palautuessa tiivistyy takaisin aiheuttaen paineiskun (Pulli 2016).

PAINEAALLON KULKEMINEN YKSINKERTAISESSA PUTKIJÄRJESTELMÄSSÄ



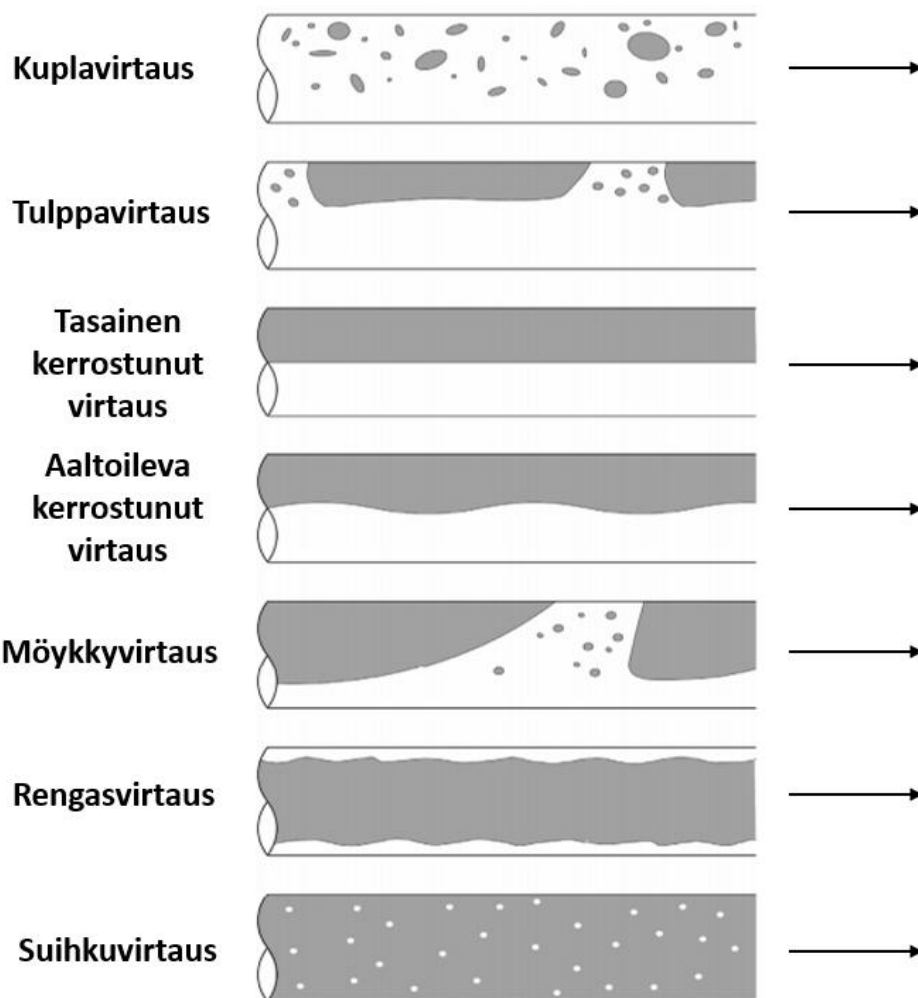
Kuva 5. Paineaallon eteneminen yksinkertaisessa vesijohtolinjassa (Pulli 2016).

### 2.3 Virtausmekaniikka

Vesijohtoverkosto on melkein kokonaan vaakatasossa tai se laskee ja nousee loivasti. Tämän vuoksi veden ja ilman virtausta tarkastellaan seuraavaksi vain vaakatasossa, jolloin virtaus ei ole symmetristä, vaan ilmalla on taipumus kertyä putken yläpinnalle, jossa siihen vaikuttaa virtauksen, painovoiman ja nosteen lisäksi myös putken pinnan aiheuttama kitka (Lauchlan ym. 2005). Virtausolosuhteissa ilmalla on myös taipumus ”venyä” pitkiksi, ohuiksi ja kapeiksi ilmataskuiksi. Ilman virtauksen eri muotoihin vaikuttavat nesteen ja kaasun virtausmäärät, niiden fysikaaliset ominaisuudet sekä putken halkaisija ja kulma (Lauchlan ym. 2005). Erilaisia virtaustyyppejä pienemmästä ilmamäärästä suurempaan on esitelty kuvassa 6. Näitä ovat (Falvey 1980):

- Kuplavirtaus – ilma erkautuu pieniksi kupliksi putken halkaisijan ylemmälle puolikkaalle, kun vesi on selkeästi hallitseva virtauselementti. Veden ja ilman virtaamat ovat noin yhtä suuret, sillä kuplat kulkevat veden mukana. Tällaiset kuplat ovat halkaisijaltaan pienempiä kuin 2 mm (Mosvell 1976).

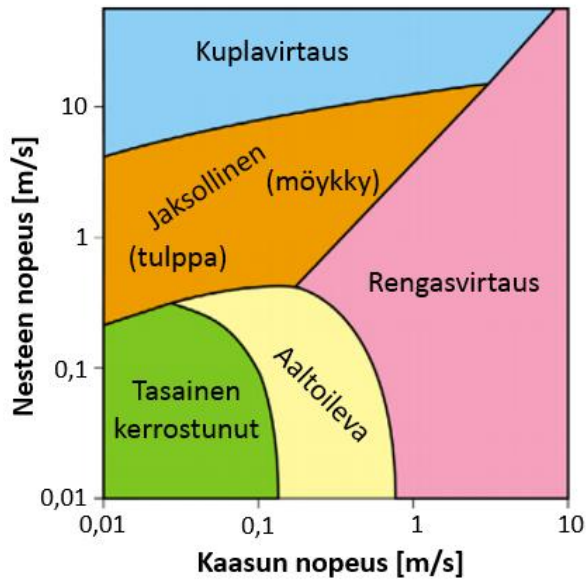
- Tulppavirtaus – ilmakuplat kasvavat yhteen jaksollisiksi virtauskuvioiksi, joita vesi kuljettaa putken yläpintaa pitkin tai ne jäävät ilmataskuiksi putken taitekohtiin.
- Tasainen kerrostunut virtaus – vesi ja ilma ovat selkeästi erillään ja ilma muodostaa tasaisen kerrostuman. Ilman määrä on suhteellisen pieni verrattuna veteen.
- Aaltoileva kerrostunut virtaus – tasaisesta kerrostuneesta virtauksesta tulee aaltoileva, kun ilman määrä kasvaa.
- Möykkyvirtaus – veden virtaus on hetkellisesti tarpeeksi laajaa, että se pystyy vaahdotessaan täyttämään melkein koko putken. Ilma kulkee putkessa nopeammin kuin vesi.
- Rengasvirtaus – ilman virtaus on niin suurta, että se kulkee putken keskiössä pakottaen veden putken laiduille rengasmaisesti. Ilman virtaus on huomattavasti nopeampaa kuin veden.
- Suihkuvirtaus – äärimmäisen suuri ilman virtaus, jossa rengasvirtauksessa putken pinnoille pakotettu vesi irtoaa ilmanvirtauksen voimasta yksittäisiksi vesipisaroiksi.



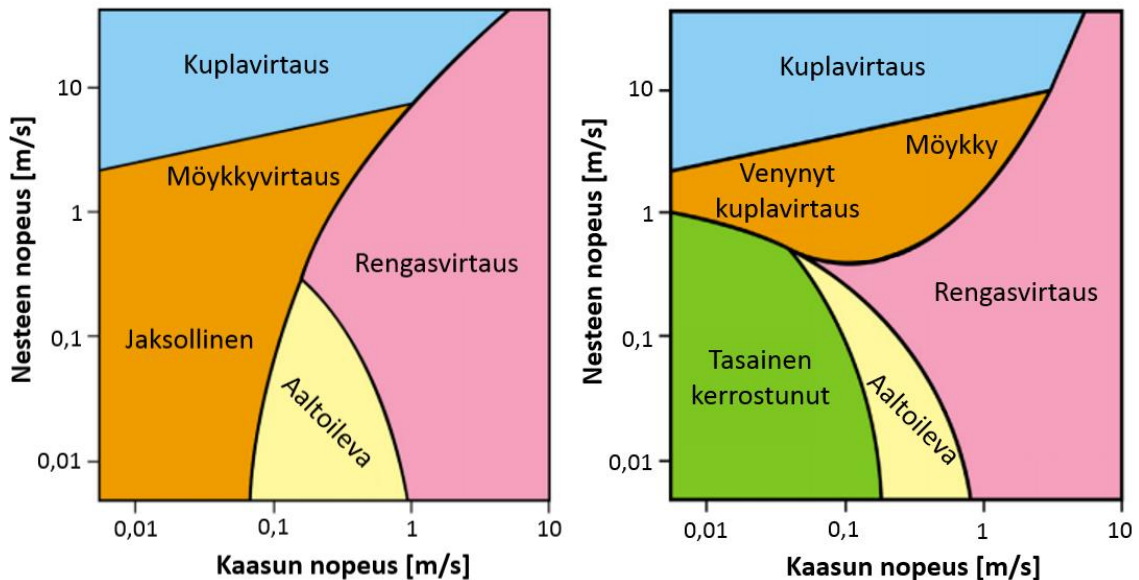
**Kuva 6.** Eri virtaustyyppit: kupla-, tulppa-, tasaisesti kerrostunut, aaltoileva kerrostunut, möykky- ja rengasvirtaukset (Falvey 1980).

Taitel ja Dukler (1976) kehittivät virtaustyyppiopin kaksifaasiselle kaasu-neste virtaukselle, joka on kuvassa 7. Tyyppi riippuu veden ja kaasun keskinäisistä virtausnopeuksista. Tämä oppi erittelee eri virtaustyypeiksi kuplavirtauksen, jaksottaisen tulppa- ja möykkyvirtauksen,

tasaisesti ja aaltoilevasti kerrostuneen virtauksen, sekä rengasvirtaukset. He tutkivat myös sitä, miten putken kaltevuus vaikuttaa virtaustyyppiin ja huomasivat, että alaspäin viettävässä putkessa tarvitaan huomattavasti suurempia nopeuksia, jotta kerrostuneesta virtauksesta tulisi jaksottaista. Ylöspäin nousevassa putkessa tilanne oli päinvastainen: jaksollisen virtauksen alueet kasvoivat ja tasaista virtausta ei esiinny. Tätä tutkivat myös Barnea ym. (1980) ja he saivat laadittua virtaustyyppikuvat  $\pm 10^\circ$  asteen kulmille, jotka ovat kuvassa 8. Tätä suuremmille kulmille ei ole laadittu vastaavaa virtaustyyppimäärittystä (Lauchlan ym. 2005).



**Kuva 7.** Yleistetty virtaustyyppioppi vaakatasossa olevalle kaksifaasiselle virtaukselle (Taitel & Dukler 1976).



**Kuva 8.** Virtaustyyppit nousevalle (vasemmanpuoleinen) ja laskevalle (oikeanpuoleinen) virtauksille (Barnea ym. 1980).

Virtausnopeudet ovat varsin hitaita vesijohtoputkistoissa: Suomessa ohjeistus on 0,6 – 1,2 m/s maksiminopeuksille (RIL 2010). Ilman virtaus on myös yleensä hitaampaa kuin veden – kokeellisessa ympäristössä ilman nopeus vaihtelee sadasosasta melkein veden nopeuteen, sillä putken yläpinnassa kiinni olevaan ilmakuplaan kohdistuu virtauksen vetovoiman lisäksi putken aiheuttamaa kitkavoimaa (James & Silberman 1958; Lubbers & Clemens 2005, 2006). Tällöin virtaustyypin ratkaisee lähinnä veden virtausnopeus, ja vesijohtoverkoston ilmataskut liikkuvat tyypillisesti joko kuplavirtauksena, jaksottaisena tulppa- tai möykkyvirtauksena tai sitten tasaisena kerrostuneena virtauksena. Kuten yllä olevista kuvista voi havainnoida, ilmalla on tapana kasvaa isommiksi kupliksi alaspäin viettävillä osuuksilla ja taas ylämäessä jakautua pienemmiksi kupliksi. Isommat kuplat ovat hitaampia, koska niihin kohdistuu enemmän nostetta ja kitkaa, ja siksi niillä on suurempi riski kulkea vastavirtaan alamäessä (Kent 1952).

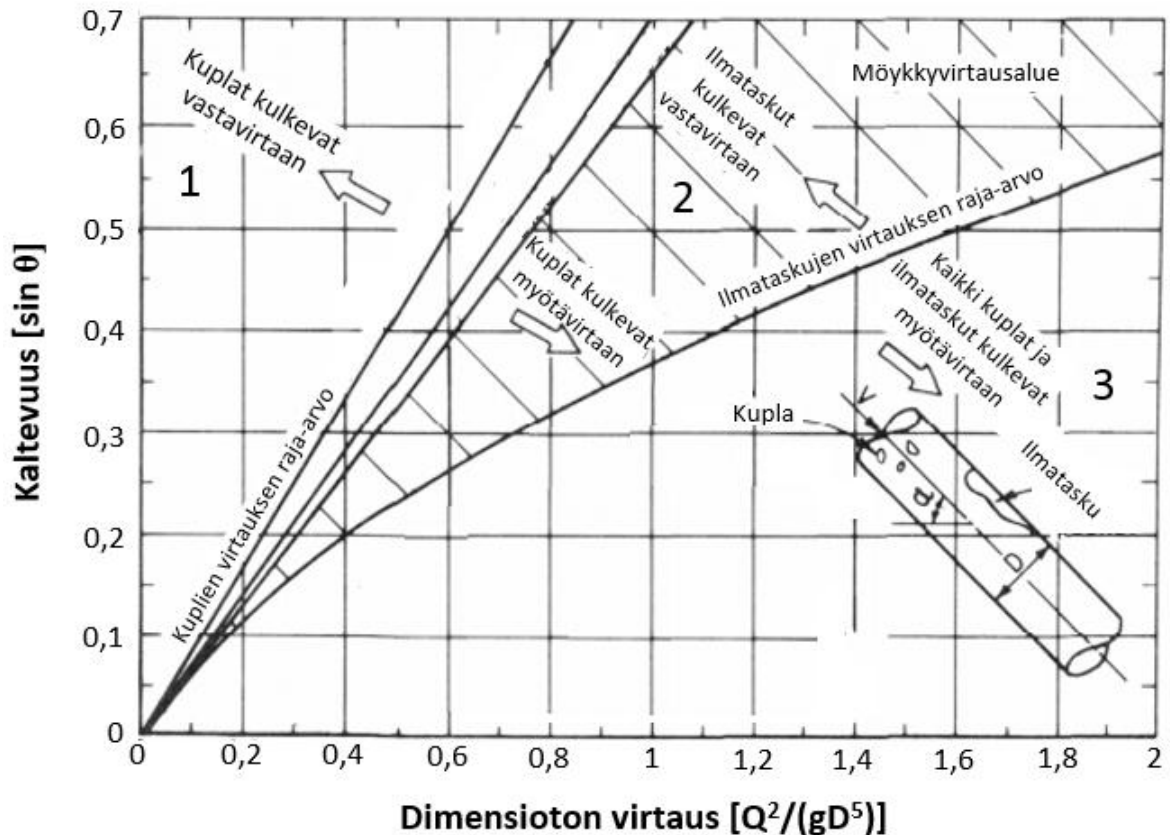
## 2.4 Virtauksen mallintaminen

Kobus (1991) kertoo, että virtauksen kyky kuljettaa ilmaa on riippuvainen lähinnä veden virtausnopeudesta ja ilman nosteesta sekä näiden välisestä suhteesta. Noste ja kaltevuus vaikuttavat puolestaan kitkan suuruuteen. Seisovalla vedellä ei ole ollenkaan kuljetuskapasiteettia, sillä ilmakupliin vaikuttaa pelkästään noste. Hitaassa virtauksessa vesi alkaa kuljettaa erkaantunutta ilmaa ja näiden kuplien tai taskujen liike voi aiheuttaa virtauskentässä huomattavia muutoksia. Virtausnopeuden ja turbulenssin kasvaessa kulkeutuneen ilman määrä kasvaa. Myös sillä on merkitystä, mihin suuntaan noste vaikuttaa virtaukseen nähden, eli auttaako noste kuplan liikettä ylöspäin mentäessä vai vastustaako noste virtauksen mukana kulkemista alamäessä. Kobuksen mukaan kuljetuskapasiteetti on suurimmillaan pystysuorasti ylöspäin mentäessä ja pienimmillään pystysuorasti alaspäin etenevässä virtauksessa, mutta pienimmän kuljetuskapasiteetin kulmasta löytyy eriäviä tutkimustuloksia. Kobuksen ajatus vaikuttaa loogiselta, mutta ilmakuplan vastukseen vaikuttaa noston ja kitkan lisäksi myös sen muoto (miten virtaus vetää sitä ja kuinka paljon kitkapinta-alaa sillä on putkessa), jolloin Kobuksen ehdotusta pienemmällä kulmilla saavutetaan suurin vastus. Jos noste ja siitä aiheutuva kitka ylittävät virtauksen kuljetuskapasiteetin, ilmaa kertyy taskuksi putken ylälaitteeseen.

Kuljetuskapasiteetin tutkituin tunnusluku on kriittinen nopeus. Se kertoo, kuinka suuri virtausnopeuden täytyy olla, että virtaus kykenee kuljettamaan kaiken ilman virtauksen mukana eteenpäin. Tätä aihetta tarkastellaan lisää seuraavassa luvussa. Leijumisnopeus kuvastaa puolestaan virtausnopeutta, joka ylläpitää olemassa olevaa ilmataskua vakaassa ympäristössä. Se on 0,8 – 0,9 kertainen kriittiseen nopeuteen nähden (Escarameia ym. 2005).

Tarkemmista vesi-ilma-virtauksen yksityiskohdista asiantuntijoilla on vähän eriäviä tuloksia. Pullin (2016) mukaan 0,3 m/s virtaus riittää kuljettamaan ilmaa vaakasuorassa putkessa eteenpäin, mutta vaadittava nopeus kasvaa alaspäin viettävässä putkessa 0° kulmasta aina 50° kulmaan asti. Falvey (1980) taas määrittelee, että ylöspäin nousevissa ja vaakatasossa olevissa putkissa virtaus riittää kuljettamaan ilmaa eteenpäin, kun taas laskevissa putkissa ilma voi joko liikkua virtauksen mukana tai nousta vastavirtaan putken ylälaitteeseen asti. Kuvassa 9 on Falvey'n luonnos ilman kulkeutumisesta alaspäin viettävässä putkessa virtauskulman ja -nopeuden funktiona. Kuvassa on kolme erilaista vyöhykettä: 1) kaikki kuplat liikkuvat vastavirtaan ja yhdistyvät 2) pienet kuplat liikkuvat myötävirtaan, mutta isommat ilmataskut liikkuvat vastavirtaan ja 3) kaikki ilma liikkuu

virtauksen mukana. Dewhirst (1991) päätyi kuitenkin tutkimuksessaan tulokseen, että ilmakuplan tai -taskun koko ei juurikaan vaikuttaisi kriittiseen nopeuteen. Muun muassa Escarameia ym. (2007) ja Lubbers (2007) ovat pyörtäneet tämän.



**Kuva 9.** Ilman eteneminen virtauksen mukana riippuu virtauksen nopeudesta ja kaltevuudesta. Falvey (1980) jakaa virtaukset kolmeen kategoriaan: 1) kaikki ilma kulkee vastavirtaan, 2) pienemmät kuplat etenevät myötävirtaan, mutta ilmataskut eivät, ja 3) kaikki ilma kulkee myötävirtaan.

On osoitettu, että vaakatasossa olevassa putkessa pitää olla kriittisen nopeuden ylittävä virtaus, jotta ilma liikkuisi eteenpäin (Escarameia ym. 2005). Pothof (2011) kuitenkin toteaa, että virtaus kykenee kuljettamaan ilmakuplia sekä tasaisessa että ylöspäin viettävässä putkessa, mutta huomauttaa, ettei alaspäin viettävässä putkessa ole vielä voitu selittää perustavanlaatuisella teorialla, milloin ilmakuplasta tai -taskusta tulee seisova. Pothof sekä Lubbers & Clemens (2007) ovatkin tutkineet aihetta ja tulleet siihen lopputulokseen, että kriittisen nopeuden maksimi olisi kulmavälillä  $10^\circ - 20^\circ$  johtuen ilmakuplan muodosta – jyrkemmissä alamäissä kuplan pinta-ala virtauksen suuntaan kasvaa, jolloin siihen kohdistuva virtauksen vetovoima olisi suurempi ja näin virtauksen kuljetuskapasiteetti kasvaisi. Näin ollen ilman kulkeutumisesta vaakatasossa sekä kriittisen nopeuden maksimikulmavälistä ei löydy konsensusta.

Ilmatasku pyrkii usein pysähtymään putken ylätaiteeseen, koska sen kulkeutumisen edellytykset ovat heikommät alaspäin viettävässä putkessa kuin tasaisella tai ylöspäin suuntaavalla putkella johtuen kitkasta, nosteesta ja virtauksen vetovoimasta (Dewhirst 1991; Kent 1952). Ylätaiteessa olevassa ilmataskussa nämä voimat ovat tällöin tasapainossa keskenään. Kentin mukaan virtaus voi turbulenttisissa olosuhteissa irrottaa vetovoimalla

ilmataskusta pienempiä kuplia, mutta jos sen virtausnopeus ei ylitä kriittistä nopeutta, ilmatasku pysyy ylätaiteessa. Tämä johtuu siitä, että vaikka ilmatasku pienenee pienien ilmakuplien irtautuessa siitä, niin samalla pienentyy siihen kohdistuva virtauksen vetovoima, kun ilmataskun pinta-alan kutistuu, jolloin vetovoima ei pysty enää irrottamaan kuplia ilmataskusta.

Kaltevuuskulman lisäksi on ehdotettu, että alaspäin viettävän putken pituus vaikuttaa ilman kulkeutumiseen (Ervine 1998). Ervine jakoi putkien pituudet kolmeen eri luokkaan:  $L/D < 5$ ,  $5 < L/D < 20$  ja  $L/D > 20$ , jossa  $L$  on putken pituus ja  $D$  on putken halkaisija. Kun ilmakupla tai -tasku lähtee liikkeelle ylätaiteesta, se on täysin virtauksen viettäviissä. Alaspäin viettävän osuuden pituus vaikuttaa siihen, että ehtiikö ilma kerääntyä nosteen vaikutuksesta jälleen putken yläpintaan, jolloin kitkavoima alkaa vastustaa kulkeutumista. Lyhyissä putkissa kaikki ilma etenee, koska noste ei ehdi nostamaan niitä putken yläpintaan kiinni. Alaspäin viettävän osuuden pidentyessä putken yläpintaan ehtivät nousta ensin isommat kuplat ja lopulta pienemmätkin. Siellä ilmakuplat jäävät yleensä ensin paikoilleen. Yhdistyessään muiden ilmakuplien kanssa ne kasvavat ja lähtevät lopulta nousemaan vastavirtaan kohti ylätaiteita, jos virtaus ei ole riittävä.  $L/D > 20$  -nousuissa ainoastaan kriittisen nopeuden ylitys kuljettaa ilmakuplia eteenpäin.

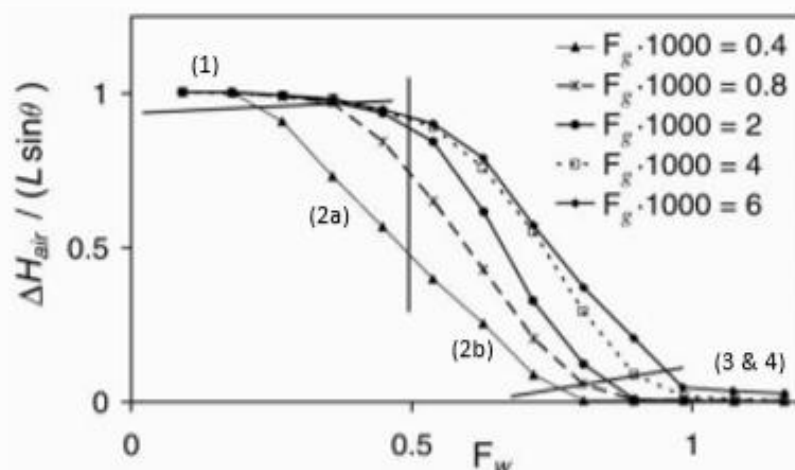
Muita ehdotettuja ilman kulkeutumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat pintajännitys, viskositeetti, ilman ja veden virtausluvut, putken kitkavoima ja jossain määrin myös veden kyllästysaste ilmakuplien ja -taskujen kaasuista (James & Silberman 1958; Pothof 2011). Pintajännityksestä ja viskositeetista on hyvin vaihtelevia käsityksiä: on osoitettu, ettei kriittinen nopeus ole riippuvainen pintajännityksestä tai viskositeetista, jos putken halkaisija on tarpeeksi suuri – suurempi kuin 175 mm (Viana ym. 2003; Zukoski, 1966). Mittakaavan vaikutuksen arvellaan kuitenkin lisäävän pintajännityksen merkitystä (Escarameia ym. 2005) ja hollantilaiset ovatkin huomioineet sen ja viskositeetin vaikutukset tutkimuksessaan (Pothof 2011). Virtausluvut vaikuttavat puolestaan virtaustyyppiin, ja putken kitkavoiman on arvioitu olevan samaa luokkaa tai vähän korkeampi (James & Silberman 1958), jos veden lisäksi putkessa kulkee kaasufaasissa olevaa ilmaa.

Riittävän suuret ilmataskut muodostavat putkeen vesikynnyksen. Ilmatasku kuristaa virtauksen tilaa ja pakottaa sen kiitovirtaukseen. Kun ilmatasku loppuu, vedellä on taas enemmän tilaa virrata ja kiitovirtaus hidastuu verkkavirtaukseksi muodostaen vesikynnyksen, jossa virtaus muuttuu hyvin turbulenttiseksi veden kasvattaessa virtaussyvyyyttä. Vesikynnyksen kohdalla virtauksen vetovoima kykenee irrottamaan ilmaa mukaansa. Vesikynnykset voivat jopa luoda avouomavirtauksen tyyppisiä olosuhteita linjaan (Dewhirst 1991) ja pahimmillaan ilmatasku on koko alamäen mittainen. Pothof & Clemens (2010) kuvasivat  $10^\circ$  alaspäin viettävässä putkessa (halkaisija 0,192 m ja  $L/D$  on 209) tapahtuvaa neljää erilaista virtaustilannetta, jotka ovat myös esiteltyinä kuvissa 10 ja 11:

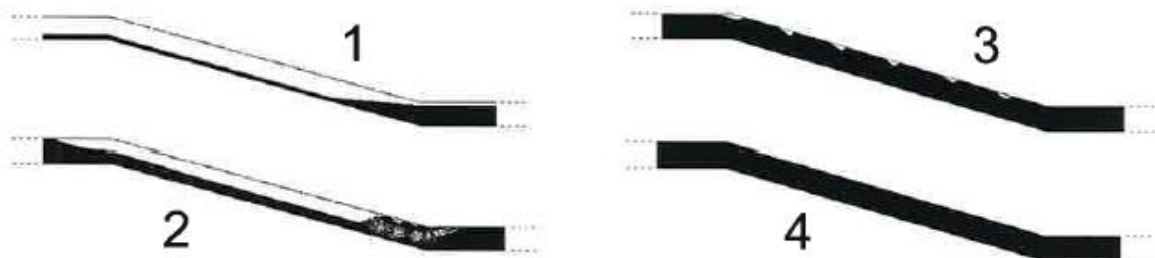
- 1) Kerrostunut virtaus: ilmatasku täyttää putken yläosan koko alamäen matkalta aiheuttaen maksimaalisen painehäviön. Taskusta irtautuu ilmaa virtauksen viettäväksi vasta alamäen jälkeen. Painehäviö on suurempi kuin  $0,95L \sin(\theta)$ , kun  $L$  on putken pituus [m] ja  $\theta$  [°] on putken kulma.
- 2) Vastavirtaan etenevä ilman virtaus: alamäessä on yksi tai useampi ilmatasku, joista irtautuu ilmakuplia vesikynnysten yhteydessä. Ilmataskut liikkuvat vastavirtaan, mutta kokonaisuudessa ilmaa kulkeutuu veden virtauksen mukana enemmän, sillä

vesikynnykset irrottavat isommista taskuista pienempiä kuplia. Kun virtausmäärää kasvatetaan, painehäviöt pienenevät ja yhden suuren yhtenäisen ilmataskun (alue 2a kuvassa 10) sijaan alamaässä on useampi taskuja (alue 2b).

- 3) Tulppavirtaus: putkessa kulkee useita tulpan muotoisia taskuja, jotka liikkuvat putken yläpintaa pitkin. Vesikynnyksiä ei ole ja painehäviöt ovat pienempiä kuin  $0,05L \sin(\theta)$ . Virtaus vastaa vaakatasossa tapahtuvaa tulppavirtausta (Ruder & Hanratty 1990).
- 4) Ei ilmaa: kaikki ilma kulkeutuu erillisinä pieninä kuplina tai pieninä tulppina putken yläpintaa pitkin. Painehäviöt ovat lähellä nollaa.



**Kuva 10.** Neljä eri virtausvaihetta (1-4), joissa painehäviöt  $\Delta H_{air}$  pienenevät veden virtausluvun  $F_w$  (veden virtausnopeuden suhde putken halkaisijaan ja gravitaatiokiihtyvyyteen) kasvaessa. Koeputkeen syötetty ilman määrä (kaasun virtausluku  $F_g$ ) vaikuttaa siihen, kuinka suuria painehäviöitä tapahtuu (Pothof & Clemens 2010).



**Kuva 11.** Neljä eri virtausvaihetta alaspäin viettävässä putkessa: (1) kerrostunut virtaus, (2) vastavirtaan etenevä ilman virtaus, (3) tulppavirtaus sekä (4) ei ilmaa (Schuit 2009).

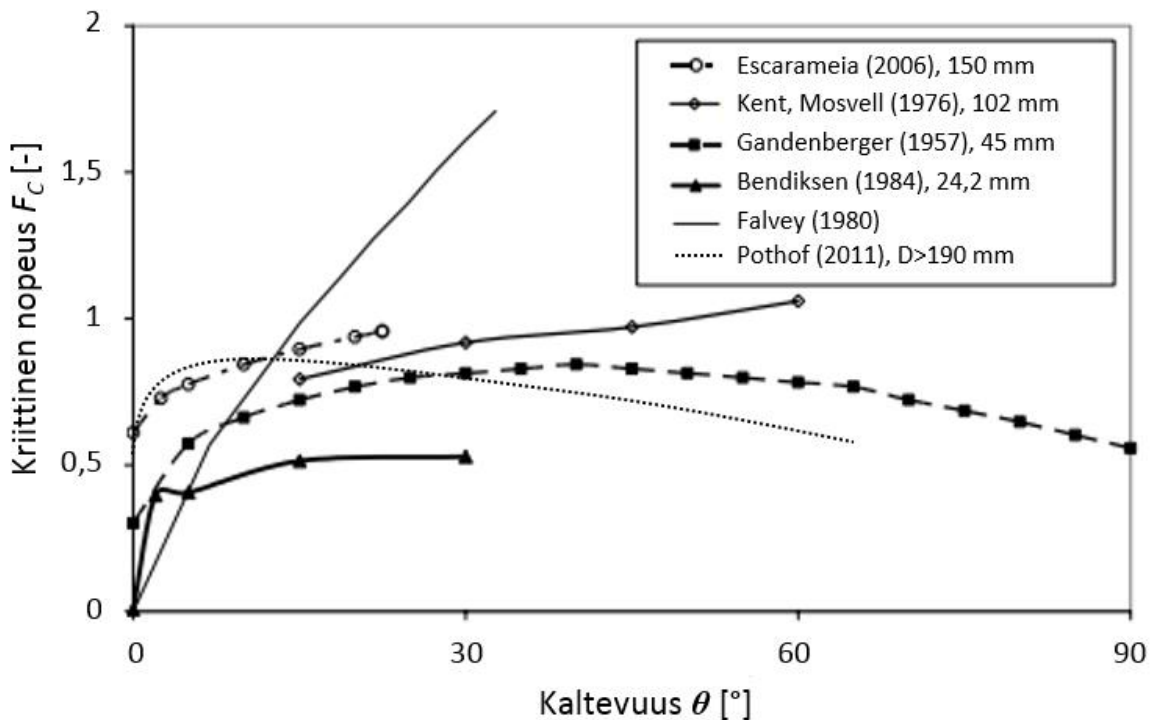
Jotta putki tyhjenisi ilmasta, veden täytyy saavuttaa kriittinen nopeus ja käydä nämä edellä mainitut vaiheet läpi. Suuret ilmataskut aiheuttavat painehäviöitä ja näin ollen myös pienentävät vedenvirtausnopeutta, mikä hidastaa tyhjentymisprosessia (Lubbers 2007). Pothofin & Clemensin (2010, 2011) kokeessa huomattiin myös ilman liukenevan veteen, kun vettä ei ollut kyllästetty ilmalla. Tätä tapahtui etenkin vesikynnyksissä. Tämä havainto tukee ajatusta siitä, että ilmataskut pienentyvät tiettyyn pisteeseen itsestään, kun olosuhteet ovat sopivat.

## 2.5 Kriittinen nopeus

Tässä luvussa keskitytään kriittisen nopeuden laskemiseen, joka kuvaa virtausnopeutta, jolla kaikki ilmataskut lähtevät liikkeelle. Kriittinen nopeus esitetään tieteellisessä tutkimuksessa usein Frouden luvun tai veden virtausluvun avulla (3.4), jotka ovat vaihtoehtoinen tapa ilmaista veden virtausominaisuuksia. Frouden luku kertoo, onko virtaus verkas- ( $F_W < 1$ ) vaiko kiitovirtausta ( $F_W > 1$ ). Kriittisen nopeuden saavuttamiseen riittää usein verkasvirtaus, kuten kuvassa 12 esitetyistä tunnetuimmista tutkimustuloksista ilmenee. Ainoastaan Falveyn käyrä menee selvästi kiitovirtauksen puolelle kaltevuuden ollessa suurempi kuin  $15^\circ$ . Tässä tutkimuksessa ollaan kuitenkin enemmän kiinnostuneita kriittisen nopeuden arvosta kuin Frouden tai veden virtausluvuista, joten loput yhtälöt on ratkaistu nopeuden suhteen.

$$F_C = F_W = \frac{v_c}{\sqrt{gD}} \quad (2.4)$$

Missä	$F_C$ [-]	kriittinen nopeus
	$F_W$ [-]	Frouden luku/veden virtausluku
	$v_c$ [m/s]	veden kriittinen nopeus
	$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	gravitaatiokiihtyvyys
	$D$ [m]	putken halkaisija



**Kuva 12.** Tutkimustuloksia vuosilta 1957 – 2011 kriittisestä nopeudesta Frouden luvun ja kaltevuuden funktioina (Pothof 2011).

Erään vanhimmista putkivirtaustutkimuksista ovat tehneet Kalinske ja Bliss (1943). He tutkivat erilaisia virtaustyyppäjä ja määrittelivät dimensiottoman veden virtauksen  $Q^2/(gD^5)$ , joka vie mukanaan ilmakuplia vesikynnyksestä. Kalinskella ja Blissillä oli käytössään 100

ja 150 mm putket ja he päätyivät yhtälöön, jolla kriittinen nopeus voitiin laskea kaltevuuskulman ja putken halkaisijan avulla (3.5). Saatua arvoa oli tosin heidän havaintoihinsa nähden liian pieni.

$$v_c = \left( \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{\sin(\theta)}{0,71}} \right) \times \sqrt{gD} \quad (2.5)$$

Missä	$v_c$ [m/s]	veden kriittinen nopeus
	$\theta$ [°]	putken kulma
	$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	gravitaatiokiihtyvyys
	$D$ [m]	putken halkaisija

Kent (1952) jatkoi työtä 33 mm ja 102 mm putkilla luomalla niihin vakioilavuudellisen ilmataskun 15° – 60° kulmissa ja sai aikaan yhtälön (3.6). Erona Kalinsken ym. tutkimuksiin oli se, että Kent syötti kulkeutuvan ilman tilalle lisäilmaa alavirrasta, kun aiemmin se oli tehty ylävirrasta. Tämä aiheuttaa lisäepätarkkuutta tuloksiin, sillä vain tarpeeksi suuret ilmakuplat nousevat vastavirtaan ylätaitteeseen, kun olosuhteet ovat sopivat. Tutkimuksensa pohjalta Kent pystyi kuitenkin laskemaan nostevoiman, joka on tasapainossa virtausvoiman kanssa, sillä tällaisessa tilanteessa ilmatasku pysyy paikallaan.

$$v_c = (1,23\sqrt{\sin(\theta)}) \times \sqrt{gD} \quad (2.6)$$

Kentin yhtälössä ja tutkimusjärjestelyissä oli kuitenkin ongelmia ja muun muassa Kentin luoma yhtälö (3.5) ei sovi hänen tekemälleen suoralle. Etenkin loivissa nousuissa virhe on suuri, sillä Kent tutki yli 15° kulmia, joista hän johti tuloksensa myös alle 15° kulmille (Pothof 2011). Wisner ym. (1975) tekivät paremman yhtälön (3.7) Kentin tutkimustulosten perusteella, joka on yhteensopiva Kentin saaman käyrän kanssa. Tämä tapahtui lisäämällä ylimääräinen vakio lausekkeeseen.

$$v_c = (0,55 + 0,5\sqrt{\sin(\theta)}) \times \sqrt{gD} \quad (2.7)$$

Kentin tekemät tulokset on vahvistettu myöhemmillä tutkimuksilla (Gandenberger 1957), mutta Wisner ym. (1975) huomasivat, että aiemmin esitellyt tutkimukset eroavat tuloksiltaan toisistaan. He arvelivat, että hajonta johtui eri kokoisista putkista ja käyttivät siksi huomattavasti suurempaa 245 mm putkea kiinteässä 18° kulmassa, mikä antoi heille taas uudet kertoimet (3.8):

$$v_c = (0,825 + 0,25\sqrt{\sin(\theta)}) \times \sqrt{gD} \quad (2.8)$$

Edellä olevat kaavat ovat hyvin lähellä toisiaan, joten kriittinen virtausnopeus on usein ja yksinkertaisesti määritetty vain putken halkaisijalla sekä kaltevuuskulmalla. Tutkimustulosten erot johtuvat tutkimustapojen eroista; niissä käytetyistä kulmista ja putkikoista (Little 2002; Pothof 2011). Tällainen lähestymistapa soveltuu siihen, kun virtausten oletetaan olevan täysin turbulentsia, jolloin viskositeetin, Reynoldsin luvun sekä pintajännityksen oletetaan olevan pieniä ja merkityksettömiä verrattuna painovoimaan, putken kokoon ja nosteeseen. Tämä on kuitenkin todellisuuden yksinkertaistamista, etenkin kun aiemmat kokeet on tehty suhteellisen pienillä putkikoilla, jolloin esimerkiksi pintajännityksen mittakaavan vaikutukset voivat olla suurempia (Escarameia ym. 2005).

Tämän vuoksi hollantilaiset (Lubbers & Clemens 2007; Pothof 2011; Pothof & Clemens 2011) ovat kehittäneet monimutkaisempia yhtälöitä (3.9), joissa huomioidaan halkaisijan ja kaltevuuskulman lisäksi viskositeetti, pintajännitys, ilman kertyminen sekä veden ja kaasun virtausluvut. Näiden kautta ilman määrä ja ilmataskujen koko vaikuttavat kriittiseen nopeuteen. Kokeita tehtiin 80 – 500 mm putkilla, mutta pääpaino oli 220 mm putkella. Tarkemmin yhtälöön voi tutustua heidän tutkimuksestaan, sillä monimutkainen yhtälö sisältää useamman yhtälön, mutta se kuvaa ja selittää ilman kulkeutumista paremmin kuin aiemmat tutkimukset.

$$F_C = F(\theta) \times \left( \frac{\sigma}{0,072} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{D}{0,19} \frac{10^{-6}}{\nu} \right)^{\frac{3}{14}} \times \ln \left[ \left( \frac{F_g \times 10^7}{1,87} \right)^{\frac{1}{9}} \right] \quad (2.9)$$

Missä	$F(\theta)$ [-]	veden virtausluku
	$\sigma$ [N/m]	pintajännitys
	$D$ [m]	putken halkaisija, kun se on > 190 mm
	$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	kinemaattinen viskositeetti
	$F_g$ [-]	kaasun virtausluku

Yhtälö (3.8) on voimassa, kun Eötvösinkin luku (3.10) on suurempi kuin 5 000 tai putken halkaisija on suurempi kuin 190 mm (Pothof & Clemens 2011). Tällöin kriittiset nopeudet skaalautuvat ilman kulkeutumisen kanssa hyvin. Jos putken halkaisija tai Eötvösinkin luku on pienempi, kulkeutuvan ilman määrä kasvaa vähän kriittisen nopeuden pienentyessä (Pothof 2011). Eötvösinkin luku käsittelee pintajännityksen ja painovoiman suhdetta.

$$Eo \equiv \rho_w g D^2 / \sigma \quad (2.10)$$

Missä	$Eo$ [-]	Eötvösinkin luku
	$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	tiheys
	$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	gravitaatiokiihtyvyyden
	$D$ [m]	putken halkaisija
	$\sigma$ [N/m]	pintajännitys

Kun tarkastellaan kuvaa 12, huomataan, että Escarameian ym. (2007) luoma yhtälö (3.11) vastaa hyvin hollantilaisten luomaa monimutkaista yhtälöä, kun kulma on pienempi kuin 15°. Kyseisen yhtälön tavoite onkin laajentaa Kentin tekemää yhtälöä alle 15° kulmille. Tätä yhtälöä käytetään tässä diplomityössä ilman kulkeutumisen määrittämiseen, koska yhtälö on huomattavasti yksinkertaisempi ja vastaa riittävän hyvin todellisuutta, vaikka siinä on osin samoja heikkouksia kuin Kentin yhtälössä (Pothof 2011). Kuitenkin verrattuna aiempiin samanmuotoisiin yhtälöihin, yhtälö (3.10) huomioi ilmataskun koon. Käytännössä ilmataskun koko on silti vaikea määrittää ja tällöin voidaan varautua pahimpaan mahdolliseen tilanteeseen, jolloin muuttuja  $a$ :n arvona käytetään 0,61.

$$v_c = (a + 0,56\sqrt{\sin(\theta)}) \times \sqrt{gD} \quad (2.11)$$

Missä $a$ on	0,45	kun	$n < 0,06$
	0,50	kun	$0,06 \leq n < 0,12$
	0,57	kun	$0,12 \leq n < 0,30$
	0,61	kun	$0,30 \leq n < 2$

Ja  $n$  on ilmataskun koko  $n = 4V/(\pi D^3)$ , jossa  $V$  [m<sup>3</sup>] on ilmataskun tilavuus ja  $D$  [m] putken halkaisija.

## 2.6 Ilman poistaminen vesijohtoverkostosta

Jos ja kun ilmaa on vesijohtoverkostossa tai sitä kertyy sinne, se täytyy poistaa, sillä se aiheuttaa monenlaisia häiriötä, kuten tähän mennessä on todettu. Ilmaa poistuu vesijohtoverkostosta sekä veden mukana, kun sitä juoksutetaan pois verkostosta, että kaasuna erikseen poistoa varten suunnitelluista ja sijoitetuista ilmanpoistoveniileistä tai manuaalisesti käytettävistä paloposteista.

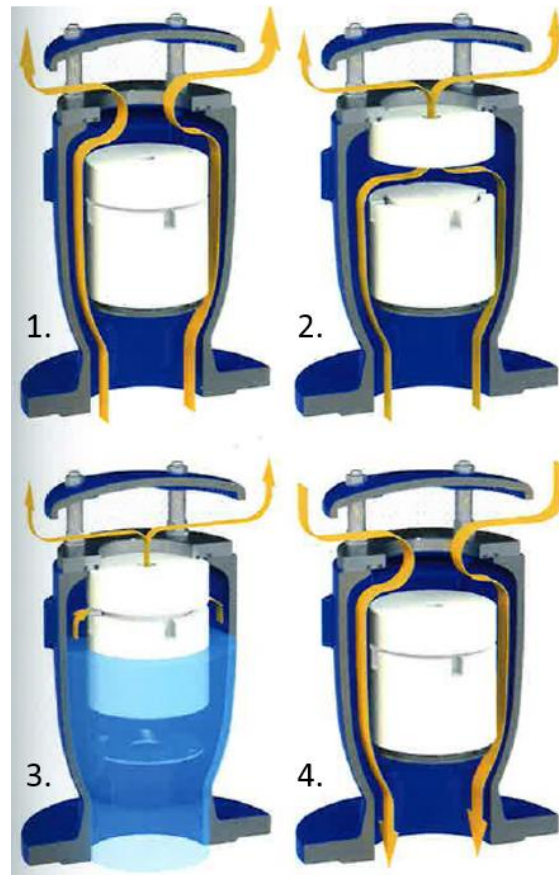
Reader ym. (1997) määrittelevät, että “ilmanpoistoveniili on sijoitettu strategiseen kohtaan verkostossa ilman poistamiseksi normaalin käytön aikana tai kun putkea täytetään, tai sitten ilman päästämiseksi systeemiin, kun sitä tyhjennetään”. Ilmanpoistoveniilillä voi siis olla kolme eri tehtävää: poistaa suuria määriä ilmaa putken täytön aikana, poistaa pienempiä määriä ilmaa käytön aikana tai päästää putkeen suuria määriä ilmaa tyhjennyksen aikana. Yhdellä veniilillä voi olla yksi tai useampi näistä kolmesta ominaisuudesta. Veniilit luokitellaankin yksi-, kaksi- tai kolmitoimisiksi. Yksitoimisella veniilillä voidaan tarkoittaa mitä tahansa ilmanpoistoveniiliä, jolla on vain yksi toiminto. Yleensä yksitoimiset veniilit poistavat ilmaa - joko suuria tai pieniä määriä. Kaksitoimisella ilmanpoistoveniilillä tarkoitetaan veniileitä, jotka tarvittaessa antavat ja poistavat suuria määriä ilmaa. Kolmitoimisessa veniilissä on käytettävissä kaikki kolme eri ominaisuutta.

Ilmanpoistoveniileitä luokitellaan myös yksi- tai kaksikammioisiksi, sillä normaalikäytössä ilmaa poistuu huomattavasti vähemmän kuin putken täyttämisen- tai tyhjentämistilanteissa, jolloin myös veniileiden kammioiden kokoluokat eroavat toisistaan. Jos veniili on kolmitoiminen, se on tästä syystä usein kaksikammioinen toimiakseen tehokkaasti, mutta nykyään valmistetaan myös yksikammioisia veniilejä, joissa on kaikki kolme toimintoa (CSA 2017).

Ilmanpoistoveniilit toimivat samankaltaisilla periaatteilla, joissa ilman kulkeutumista ohjaa uimuri tai koho, joka avaa tai sulkee ilmanotto- tai -poistoaukon joko ilmanpaineen tai veden liikkeen vaikutuksesta. Tämän vuoksi kammion koko vaikuttaa uimurin tai kohon kokoon, jotka puolestaan vaikuttavat veniilin herkkyyteen reagoida paineen tai veden pinnan muutoksiin. Pieniä ilmamääriä päästävien veniilien kammio ja suuaukko ovat pienempiä. Kuvassa 13 on kolmitoiminen ja yksikammioinen veniili kahdella koholla.

- 1) Esimerkiksi silloin, kun tyhjää putkea ryhdytään täyttämään, ilmaa on paljon ja tästä syystä tarvitaan suurta ilmanpoistamiskapasiteettia, jotta ilmaa saadaan poistettua tehokkaasti. Tällöin molemmat kohot ovat alhaalla ja ilmalla on suuri kapasiteetti virrata.
- 2) Kun täyttönopeus on tarpeeksi hidas, koho pysyy alhaalla kuten vaiheessa yksi. Jos täyttönopeus kasvaa liian suureksi, jolloin ilmanpaine kasvaa, kohon ylimmäinen osa nousee ja ilma pääsee ulos hallitummin nousseen kohon pienemmästä reiästä. Tämä toiminto vaimentaa paineiskuja ja hidastaa veniiliin nousevaa vesipatsasta.
- 3) Vaiheessa kolme linja on käytössä ja vesi on nostanut koko kohon ylös, jolloin ilmaa ei poistu eikä tule sisäänkään. Ilman kertyessä veniiliin sen paine kasvaa ja vähitellen paine työntää veden pintaa alemmaksi, jolloin kohot erkanevat ja pieni ilmavirta pääsee ulos.

- 4) Putkea tyhjentäessä tai putkirikon sattuessa putken paine laskee. Tällöin veden pinta voi laskea dramaattisesti ja jopa alipainetta voi ilmentyä. Tällöin koho painuu alas ja päästää suurella kapasiteetilla korvausilmaa sisään.



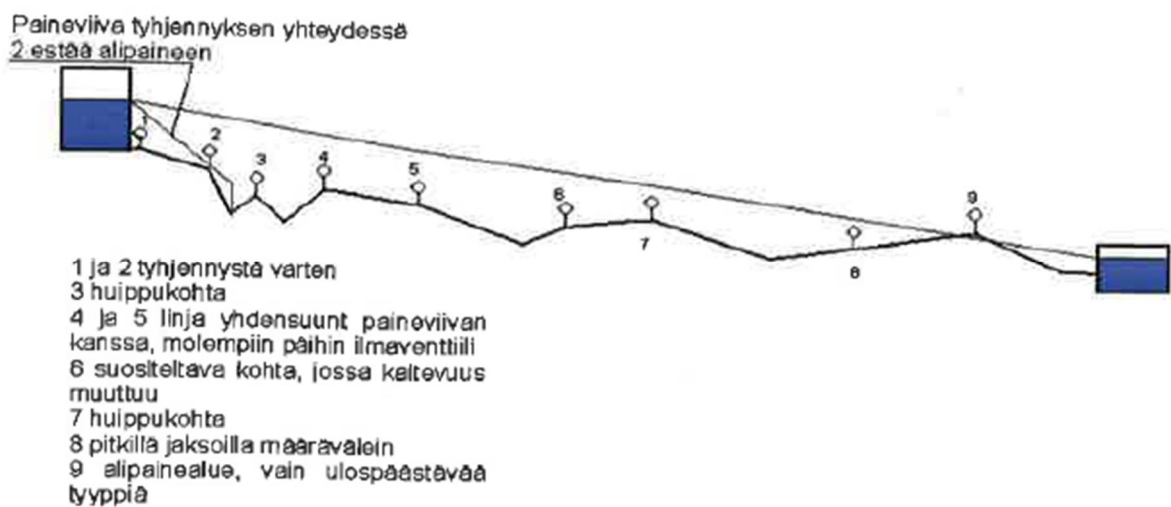
**Kuva 13.** Ilmanpoistoverkoston toiminta (CSA 2017).

Lauchlanin ym. (2005) mukaan ilmanpoistoverkoston toiminnasta löytyvä tieto on lähinnä venttiilivalmistajien itse tuottamaa ja aiheesta on vähän teoreettista tietoa. Muun muassa venttiilien mitoitus voi olla teoreettisesti laskettu tai testattu yksinkertaisesti puhaltamalla ilmaa venttiilin läpi, mutta nämä menetelmät antavat vaihtelevia ja epätarkkoja lukuja. Lauchlanin ym. mielestä venttiileitä pitäisi testata siihen erikoistuneissa olosuhteissa kuten tuulitunneleissa. Venttiilin suorituskykyyn vaikuttavat eniten sen toimintaperiaate sekä venttiilin suun koko. Pulli (2016) huomauttaa, että venttiiliä mitoittaessa on tärkeää tuntee venttiilin mittojen lisäksi jäännöstilavuus, joka jää ilmataskuksi venttiiliin sen sulkeutuessa. Pullin mukaan tällainen ilmatasku vaimentaa mahdollisia paineiskuja. Jäännöstilavuuden vuoksi samankokoisilla venttiileillä voi olla erilainen suorituskyky. Myös venttiilien materiaali valuraudasta ruostumattomaan teräkseen sekä toimintamekanismit antavat niille erilaisia ominaisuuksia, jolloin keskinäinen vertailu on mahdotonta. Venttiilien välinen paremmuus onkin hyvin kiistanalaista (Radulj 2007; Ramezani ym. 2015).

Kuten aiemmissa kappaleissa on esitelty, ilma kertyy vesijohtolinjan ylätaiteisiin ja alaspäin viettävät osuudet ovat haasteellisia ilman kulkeutumiselle. Tämän perusteella olisi järkevää sijoittaa ilmanpoistoverkoston jokaiseen huippukohtaan (Falvey 1980). Kuitenkin huippukohtien lisäksi esimerkiksi AWWA (2001), Pulli (2016) ja Willis (1990) suosittelevat huomattavasti tiheämpää ilmanpoistoverkoston sijoittamista. Huippukohtien lisäksi he suosittelevat venttiileitä taitekohtiin, joissa nousu loivenee tai lasku jyrkkenee, sekä

tarpeeksi pitkille matkoille, jos muuten ilmaventtiiliä ei ole sijoitettu, esimerkiksi 400 – 800 metrin välein. Tämän lisäksi Pulli suosittelee ilmanpoistoverteilleitä tyhjennystä varten, alipainealueille tai paineviivan kanssa yhdensuuntaisille putkipätkille. Alipainealueita ei tosin pitäisi olla vesijohtoverkostossa lainkaan, vaan kyseinen suositus liittyy pikemminkin jätevesiviemäriin. AWWA suosittelee venttiilien sijoittamista vieläkin tiheämmin: pitkille nousuille tai laskuille 400 – 800 metrin välein, tasaisille osuuksille 400 metrin välein, pumppujen jälkeen sekä Venturi- tai imuputkien luo.

Mikään lähde ei kuitenkaan kerro, mitkä ilmaventtiilit ovat toisia kriittisempiä eikä ilman kertymisestä tai ideaaleista venttiilien sijoittamispaikoista ole tehty tutkimusta. Kumpikin vaikeuttavat venttiilien sijoittamista (Ramezani ym. 2015). On kuitenkin havaittu, että ilman poiston tehostamiseksi ilmanpoistoverteili olisi hyvä sijoittaa hieman huippukohtasta alamäkeen päin, sillä ilmatasku kehittyy juuri tuohon kohtaan (Lauchlan ym. 2005; Ramezani ym. 2015). Kuvassa 14 näkyy, miten Pulli suosittelee sijoittamaan ventteilleitä.



**Kuva 14.** Ilmanpoistoverteilien sijoitteluperiaatteet (Pulli 2016).

Ramezani ym. (2015) kuvaavat, miten monimutkaista ja haastavaa ilmaventtiilien sijoittaminen on: ”liian harvassa olevat ventteilit eivät suojele verkostoa riittävästi ja niiden sijoittaminen liian tiheästi on vähintäänkin pääoman ja huoltoresurssien tuhlausta”. Heidän mukaansa etenkin pienten ilmanpoistoverteilien määrä ja koot ovat usein liioiteltuja, sillä ei kaikki verkostossa oleva ilma erkane kovan paineen alla normaalikäytössä. Tällöin pumpusta seuraava tai linjan huippukohtassa oleva venttiili poistaa kaasuksi vapautuneen ilman, mutta seuraavalle ilmanpoistoverteilille ei välttämättä jää mitään poistettavaa.

Sen sijaan suuret ilmanpäästö- ja -poistoverteilit ovat kriittisiä putken täyttämässä sekä tyhjentämässä ja näillä ventteilleillä on havaittu olevan positiivisia vaikutuksia alipaine- ja paineiskutilanteissa (Collins ym. 2012). Ne pitää kuitenkin sijoittaa oikeille paikoille oikean kokoisena, ettei niiden jäännöstilavuuden ilmamäärä pahenna painehuippuja tai -iskuja (Lee 1999; Stephenson 1997). Isommat ventteilit toimivat yleensä parhaiten pienemmillä ulospäästö- ja suuremmilla sisäänpäästökapasiteeteilla, sillä niiden on huomattu pienentävän paineiskujen aiheuttamia painehuippuja ja alipainetta (Espert ym. 2008; Lee & Leow 1999).

Pulli (2016) huomauttaa, että venttiilejä mitoittaessa on hyvä huomioida myös ilmavirtausten lämpötilavaihtelut, jotka saattavat vaihdella -50 ja +180 Celsius-asteen välillä ilman termodynaamisen puristumisen tai laajenemisen vaikutuksesta. Usein nämä ovat hetkellisiä, muutamia sekunteja kestäviä tilanteita, joiden vaikutus venttiilin rakenteisiin voidaan arvioida vähäiseksi. Pidemmässä prosesseissa, kuten linjantyhjennyksessä, on kuitenkin hyvä varmistaa, että venttiilin kapasiteetti korvausilman sisäänsyöttötarpeeseen on riittävän suuri. Näin voidaan ehkäistä venttiilin jäätyminen ja tätä kautta alipainetilanteen syntyminen.

Ilmanpoistoventtiilit olisi hyvä tarkastaa ja huoltaa kerran vuodessa (DVGW 2005) Tämä on vaikeaa, sillä monet venttiilit on sijoitettu hankalasti tai niitä on jopa mahdoton tavoittaa. Kun esimerkiksi Houstonissa tutkittiin yli 30 vuotta vanhoja ilmanpoistoventtiilejä, niistä puolet (31 venttiiliä) eivät toimineet ja lopuista puolet vuosivat tai niiden luokse ei päästy (Gregory ym. 2006). Eli mitä enemmän on venttiileitä, sitä enemmän on huoltokustannuksia ja vaivaa pitää venttiilit toimintakykyisinä. Tästä syystä saksalaisten suunnitteluohje DVGW (2005) suosittelee, että ilmanpoistoventtiilejä sijoitetaan harkitusti, sillä venttiilit aiheuttavat hygieniariskejä ja väärin mitoitettut suuret venttiilit päästävät verkostoon myös turhaa ilmaa. Tieteellistä tutkimusta ilmaventtiilien riittävästä määrästä ei löydy.

### 3 Menetelmät

Tässä luvussa kuvataan, miten tutkimushaastattelut ja kokeellinen osuus on suoritettu. Haastattelututkimuksesta esitellään haastateltavat sekä heille esitetyt kysymykset ja kokeellisesta tutkimuksesta perustellaan mittauspaikkojen valinnat ja kerrotaan perustietoja tutkittavasta vedensiirtolinjasta.

#### 3.1 Haastattelututkimus

Haastattelututkimukseen kutsuttiin suunnittelijoita, yllä- ja kunnossapitovastaavia eri vesihuoltolaitoksilta sekä laitetoimittajia. Haastateltavia oli kymmenen ja tarkoitus oli saada yleiskuvaa siitä, miten ilmanpoistollisiin asioihin suhtaudutaan Suomessa ja mitä aiheesta tiedetään tai ei tiedetä. Myös eriäviä mielipiteitä yritettiin kartoittaa. Haastateltavat olivat olleet useista vuosista vuosikymmeniin alalla ja tekemisissä aihepiirin kanssa.

Suunnittelijoita oli tutkimuksessa yhteensä neljä. Heistä kaksi toimivat suunnittelutehtävissä, kun taas toiset kaksi olivat mallinnus- ja tutkimustehtävissä. Laitetoimittajia haastateltiin kahdesta suuresta yrityksestä ja yhteensä neljää henkilöä yllä- ja kunnossapidon henkilökunnasta eri vesihuoltolaitoksilta Etelä- ja Varsinais-Suomen alueelta. Heidät on lajiteltu taustansa mukaan eri kategorioihin Taulukossa 2. Tulosten käsittelyssä viitataan myös välillä ryhmien sisällä oleviin ryhmiin, mutta haastateltavat pidetään anonyymeinä.

**Taulukko 2.** *Haastateltujen taustat.*

<b>Suunnittelija</b>	2 x konsulttitoimiston suunnittelija
	1 x mallintaja
	1 x tutkija
<b>Laitetoimittaja</b>	2 x ilmanpoistoventtiilien maahantuoja
<b>Vesihuoltolaitoksen yllä- ja kunnossapito</b>	2 x > 60 000 asukkaan vesihuoltolaitosta
	2 x ≤ 60 000 asukkaan vesihuoltolaitosta

Koska haastateltavien taustat ja heidän tietämyksensä eri osa-alueista ovat erilaisia, heitä haastateltiin kunkin osaamistaustaan liittyvillä kysymyksillä. Nämä eri kysymyssarjat löytyvät Taulukosta 3.

Haastattelut toteutettiin kesä – lokakuussa joko kasvotusten, puhelimen välityksellä tai sähköpostitse. Yksittäinen haastattelu kesti noin 15 – 30 minuuttia.

**Taulukko 3.** *Haastateltaville esitetyt kysymyspatteristot.*

Suunnittelijat	Laitetoimittajat	Vesihuoltolaitokset
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Onko vesijohtoverkostossa ilmaa?</li> <li>• Mistä ilma on peräisin? Onko ilman erkaantumista jollain tavalla havainnoitu? Miten ilma poistuu verkostosta?</li> <li>• Miten ilmanpoistoventtiilejä tulisi sijoittaa? Minkälaisia toiminnoltaan erilaisia venttiilityyppejä näihin pisteisiin tulee? Minkälaisia periaatteita käytetään ilmaventtiilin koon valinnassa?</li> <li>• Arvioidaanko ilmanpoistotarvetta tai ilman kulkeutumista laskennallisesti? Miten?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Onko vesijohtoverkostossa ilmaa?</li> <li>• Mistä ilma on peräisin? Onko ilman erkaantumista jollain tavalla havainnoitu? Miten ilma poistuu verkostosta?</li> <li>• Miten ilmanpoistoventtiilejä tulisi sijoittaa? Minkälaisia toiminnoltaan erilaisia venttiilityyppejä näihin pisteisiin tulee? Minkälaisia periaatteita käytetään ilmaventtiilin koon valinnassa?</li> <li>• Kuinka paljon kunnossapitoa venttiilit vaativat?</li> <li>• Arvioidaanko ilmanpoistotarvetta tai ilman kulkeutumista laskennallisesti? Miten?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Onko vesijohtoverkostossa ilmaa?</li> <li>• Onko siitä ollut haittaa? Miten se on ilmennyt?</li> <li>• Mistä ilma on peräisin? Onko ilman erkaantumista jollain tavalla havainnoitu? Miten ilma poistuu verkostosta?</li> <li>• Miten ilmanpoistoventtiilejä on sijoitettu ja minkälaisia eri venttiilityyppejä on käytössä?</li> <li>• Kuinka paljon kunnossapitoa venttiilit vaativat?</li> </ul>

### 3.2 Kokeellinen tutkimus

Kokeellisen tutkimuksen tarkoitus oli tehdä havaintoja ilman poistumisesta ilmanpoistoventtiilien kautta normaalissa käyttötilanteessa ja näin vahvistaa tai kumota yleisimpiä käsityksiä ilman kulkeutumisesta. Diplomityötä varten osoitettiin pääkaupunkiseudulta normaali, käytössä oleva halkaisijaltaan 800 mm siirtolinja, jota voitiin käyttää tutkimustarkoituksiin. Siirtolinja oli teräs- ja valurautaputki, joka oli vuorattu betonilla. Tutkimus toteutettiin kiinnittämällä ilmanvirtausta havaitseva mittari ilmanpoistoventtiiliin. Ennen mittaria ilma kuristetaan, jotta mittarissa oleva koho lähtisi liikkeelle ilman nosteen vaikutuksesta. Kuvassa 15 on esitelty käytetyn mittarin toimintaa. Mittari soveltuu mittaamaan veden tai kaasun virtaamia yhdestä litrasta useisiin tuhansiin litroiin tunnissa (Krohne 2017). Koska ilmaa ei tässä tapauksessa poistu jatkuvasti näin suuria määriä, mittaus kertoo enemmänkin siitä, että liikkuuko ilmanpoistoventtiilissä ylipäättään ilmaa vai ei. Mittarin yhteyteen asennetaan myös tietojenkeruulaite, joka kerää mittarin lukemia ja lataa tiedot verkkopalvelimille (Krohne 2011).

Tutkimuskohteet määräytyivät kerätyn teorian perusteella. Koska ilman todettiin kerääntyvän ylätaiteisiin (Dewhirst 1991; Kent 1952) ja etenkin alaspäin virtaaminen veden mukana oli ilmalle erityisen hankalaa (Falvey 1980; Pothof 2011), oli selvää, että tutkimuskohteiksi kannatti valita huippukohtia. Kyseisen siirtolinjan kaikki

ilmanpoistovennttiilit sijaitsivatkin linjan huippukohdissa. 10 kilometriä pitkällä linjalla sijaitsi 16 ilmanpoistovennttiiliä ja neljä palopostia, joista ilmaa voitiin myös poistaa. Linjan yleinen profiili on esitelty kuvassa 16. Ilmanpoistovennttiilejä oli sijaitettu suhteellisen tasaisesti riippuen maaston muodoista, mutta pisimmät välit olivat jopa yli kilometrin mittaisia (pisin 1 300 metriä).



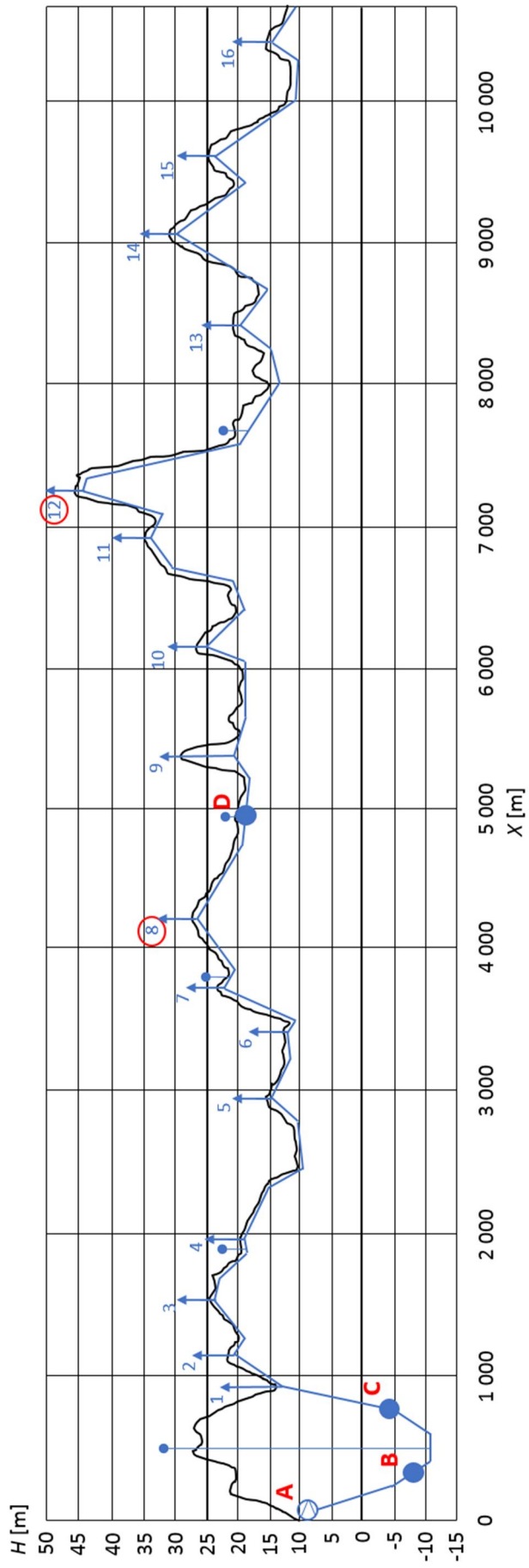
**Kuva 15.** Vesijohtoverkostosta poistuvan ilman mittaamiseen käytettävä rotametri. Ulosvirtaavan määrän kertoo koho, johon vaikuttaa poistuvan ilman noste  $F1$ , kohon muodon vastus  $F2$  sekä kohon paino  $F3$ , jotka ovat tasapainossa  $F3 = F1 + F2$  (Krohne 2017).

Kuten teoriaosassa on kuvattu, ilmaa päätyy verkostoon etenkin pumppauksesta (Lauchlan ym. 2005; Pozos 2010) ja sitä voi erkaantua, kun paine laskee tai lämpötila nousee. Jos kyseisessä siirtolinjassa on ilmaa, sen pitäisi siis olla havaittavissa (1) heti pumpun jälkeen – etenkin kohdassa, jossa linja nousee jyrkästi ja saavuttaa huippukohdan, (2) alueellisesti korkeimmassa kohdassa sekä (3) koko linjan korkeimmassa kohdassa. Korkeimmissa kohdissa paine vaihtuu Bernoullin yhtälön mukaan asemakorkeudeksi, joten useilla metreillä aleneva paine voi aiheuttaa ainakin periaatteessa ilman erkaantumista huippukohdissa. Myös putken virtausta vastustava kitka aiheuttaa paineen pienentymistä. Teoriaosassa on esitetty, miten ilman kulkeutumista voi mallintaa Escaramean ym. (2007) luomalla yhtälöllä (4.1), joka soveltuu alle  $15^\circ$  kaltevuuksille:

$$v_c = (a + 0,56\sqrt{\sin(\theta)}) \times \sqrt{gD} \quad (3.1)$$

Missä	$v_c$ [m/s]	veden kriittinen nopeus	
	$\theta$ [ $^\circ$ ]	putken kulma	
	$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	gravitaatiokiihtyvyys	
	$D$ [m]	putken halkaisija	
Ja $a$ on	0,45	kun	$n < 0,06$
	0,50	kun	$0,06 \leq n < 0,12$
	0,57	kun	$0,12 \leq n < 0,30$
	0,61	kun	$0,30 \leq n < 2$

Kun  $n$  on ilmataskun koko  $n = 4V/(\pi D^3)$ .



Kuva 16. Suuntaa-antava pituusleikkaus tutkimuskohteesta, ja ilmanpoistoventtiilien (nuolet ja numerot), palopostien (pallot) sekä mittauspisteiden (kirjaimet) sijainnit.

Alaspäin suurin kaltevuus oli venttiili 12 (kuvassa 16) jälkeen, jolloin mäki oli 11° jyrkkä. Ylöspäin noustessa ilman kulkeutumisen pitäisi olla helpoimmillaan, joten muun muassa mittauspiste C:n jyrkkä ylämäki ei tuota ilman kulkeutumiselle vaikeuksia. Käyttämällä kaavaa (4.1) saatiin mallinnetuksi, ettei ilma pysty kulkeutumaan alamäkeä pitkin lainkaan, sillä putken suuri halkaisija (800 mm) aiheutti sen, että jo tasaisella kriittinen virtausnopeus oli 1,7 m/s, kun ilmakuplien oletettiin olevan mahdollisimman suuria. Jyrkimmässä alamäessä kriittinen nopeus oli 2,4 m/s. Pienimmällä ilmakuplan koolla vaadittava nopeus tasaisella osuudella oli 1,26 m/s. Putken vesihuoltolaitokselta saadut virtausnopeudet eivät kuitenkaan olleet lähelläkään edes näitä lukuja. Teorian mukaan kaikki vesijohdossa oleva ilma kertyi tällöin kaiken kokoisiin huippukohtiin ja niihin tarvittiin ilmanpoistoventtiilit, jotta normaalikäytössä erkaneva ilma ei jäisi häiriötekijäksi siirtolinjaan. Näillä perusteilla ilmanpoistoventtiilit 8 ja 12 valikoituivat tutkimuskohteiksi selvittämään, oliko kyseisessä siirtolinjassa erkanevaa ilmaa, sillä ne sijaitsivat alueellisesti korkeimmassa sekä koko linjan korkeimmassa kohdassa. Myös venttiileitä 1 ja 2 harkittiin, mutta niiden kaivot olivat liian ahtaita mittarin asennukselle.

Kuvaan 16 on myös merkitty virtaus- ja painemittauspaikat kirjaimin A, B, C ja D. Piste A oli myös tarkastellun linjan ainoa paineenkorotusasema. Siirtolinjasta otettiin vettä muille asuinalueille noin 100 m<sup>3</sup>/h pisteestä B ja 50 m<sup>3</sup>/h pisteestä D, jotka olivat säätöventtiiliäseamia. Näin ollen virtaama linjan lopussa oli  $Q_A - Q_B - Q_D$ . Piste C virtaamamittari näytti puolestaan antavan epäluotettavia lukuja tarkastelujaksolla huhtikuussa, joten niitä ei otettu huomioon. Myös B:n ja D:n keskiarvovirtaamat poikkesivat vesihuoltolaitoksen ilmoittamista luvuista. Virtausnopeuslaskelmat suoritettiin ilmoitetuilla arvoilla, sillä minimivirtaamat olivat olleet myös hetkellisesti negatiivisia, jolloin taulukoitujen virtaama-arvojen keskiarvot ovat liian pienet. Taulukossa 4 on esitelty huhtikuun 2018 virtaus- ja painetietoja. Paine-erot tarkoittavat pienimmän ja suurimman paineen välistä erotusta mittausaikana. Taulukossa oleva ”mmp” tarkoittaa metriä merenpinnasta eli kuinka korkealle merenpintaan nähden vesi voisi nousta paineen vaikutuksesta. Näin taulukon avulla voitiin verrata paine- ja energiahäviöitä linjassa. Taulukossa 5 on laskettu mittauspaikkojen virtaamat ja virtausnopeudet päälinjassa. Vesi tulee kyseiseen siirtolinjaan lähinnä vedenpuhdistuslaitokselta, mutta mahdollisesti myös vesitornista. Vesitornissa vesi on kosketuksissa tavallisessa ilmanpaineessa olevan ilman kanssa, jolloin siihen liukenee vain kaksi tilavuusprosenttia ilmaa, eikä pumppua tarvita veden paineistamiseen.

**Taulukko 4.** Vedensiirtolinjan virtaus- ja painetietoja huhtikuussa 2018.

	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] ka	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] max	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] min	$P$ [bar] ka	$\Delta P$ [bar]	mmp [m]
A	950	1500	460	7,40	0,30	71,5
B	78	165	0	5,54	0,30	71,1
C	–	–	–	5,09	0,33	70,7
D	40	63	0	5,09	0,51	69,4

**Taulukko 5.** Vedensiirtolinjan virtaamat ja nopeudet huhtikuussa 2018.

	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] ka	$v$ [m/s] ka	$v$ [m/s] max
A	950	0,52	0,83
B	850	0,47	–
D	800	0,44	–

Kuten jo aiemmin todettiin, siirtolinjan vedenvirtausnopeudet eivät kyenneet siirtämään ilmataskuja laskennallisen mallin mukaan. Huippunopeus jäi 0,83 m/s, kun pienimpien ilmakuplien liikuttamiseen tarvittaisiin tasaisella 1,26 m/s nopeus. Tutkijat olivat kuitenkin eri mieltä siitä, että liikkuko ilma tämän kaltaisessa putkessa (Escarameia ym. 2005; Pothof 2011; Pulli 2016). Todellisuudessa putket eivät kuitenkaan ole juuri koskaan täysin vaakatasossa ja tästä syystä ilma kulkeutuu joko virtauksen mukana tai virtausta vastaan seuraavaan ylätaitteeseen, jossa oikein asennettu ja mitoitettu ilmanpoistovenkki voi poistaa ilman.

Myös vedensiirtolinjan paineet olivat korkeat. Lähellä pumppua ne olivat 7,4 baria, mutta muuten linjassa oli 5,1 – 5,5 baria ylipainetta. Tämä tarkoittaisi, että lämpötilaltaan 10 celsiusasteiseen veteen mahtuisi melkein 14 % ilmaa, jolloin ilman erkaantuminen vedestä olisi teoriaosuuden perusteella epätodennäköistä. Painevaihtelut olivat myös hyvin pieniä. Mmp-arvoista päätellen vaikuttaa siltä, että putkessa tapahtuvat energiahäviöt olivat hyvin pieniä, mikä ei anna viitteitä siitä, että linjassa olisi suuria haittatekijöitä, kuten esimerkiksi huomattavia määriä ilmaa. Ilmaa ei siis tuolloin kertynyt kyseisessä siirtolinjassa, ja jos sitä erkaantui, ilmanpoistovenkit poistivat sen. Toisaalta mittareiden lukemat saattoivat olla myös virheellisiä, mutta ne olivat ainakin lähellä uskottavia tuloksia.

Jotta ilmanpoistumista mittaavat mittarit voitiin asentaa ilmanpoistovenkitteihin, näiden ulkosuulakkeiden tyyppi ja koko piti selvittää. Tätä varten tehtiin maastotutkimus venkitteille 1, 2, 8 ja 12, sillä paikallisella vesihuoltolaitoksella ei ollut tarkkoja tietoja maastoon asennetuista ilmanpoistovenkitteistä. Maastossa selvisi, että tarkastettujen ilmanpoistovenkittien kanssa oli ollut ongelmia, jolloin alkuperäisten ja mitoitettujen venkittien tilalle oli vaihdettu perinteisemmät venkitit. Näissä venkitteissä on ongelmana se, että niitä saatetaan käyttää kolmitoimisina, vaikka ne ovat enemmän yksitoimisia. Kuvissa 17 ja 18 on esiteltynä venkki 1 siirtolinjalta. Kuten kuvassa 18 näkyy, venkitin päällä oli halkaisijaltaan parin millimetrin reikä, joka esti isomman mittakaavan ilman poistamisen tai ottamisen, vaikka venkitin koko olisi muuten mitoitettu oikein. Alun perin siirtolinjaan oli suunniteltu 100 mm ilmanpoistovenkittejä ja täytön tai tyhjennyksen yhteydessä käytettäisiin myös paloposteja. Laittoimittajat suosittelivat 150 mm ilmanpoistovenkitteä tämän kokoiseen linjaan.

Siirtolinjan työntekijät kertoivatkin, että käyttöönottovaiheessa ilmanpoistovenkitit vinkuivat pitkään koväänisesti merkinä siitä, että ilmaa poistui linjasta, joskin kovalla paineella, mikä aiheutti vinkunan. Tämä ei ole ihanteellista, sillä liian pieni mitoitus aiheuttaa pitkän ilman poistumisajan eikä kapasiteetti riitä suojaamaan linjaa alipainetilanteilta. Pitkä poistumisaika taas pidentää lisääntyntä energiankulutusta. Myös linjan tyhjentäminen hidastuu merkittävästi. Lisäksi suuret painemuutokset aiheuttavat ilmavirtauksessa lämpötilavaihteluja, jotka Pullin (2016) mukaan voivat esimerkiksi jäädyttää ilmanpoistovenkitin alipainetilanteessa.

Tämän löydöksen vuoksi linjan kaikki ilmanpoistovenkitit tarkistettiin, sillä ne määrittävät siirtolinjan ilmanpoisto- ja ilmanottokapasiteetit. Löydetyt venkitimallit altistavat riittämättömyydellään linjan vahingoittumiselle sekä hitaammille täyttö- ja tyhjennysnopeuksille. Kokeellista tutkimusta varten venkitit vaihdettiin laitoimittajan suosittelemiin venkitteihin.



**Kuva 17.** 800 mm siirtolinja ja ilmanpoistoventtiili.



**Kuva 18.** Ilmanpoistoventtiilin pieni ilmanotto- ja poistoreikä näkyy läpän alla.

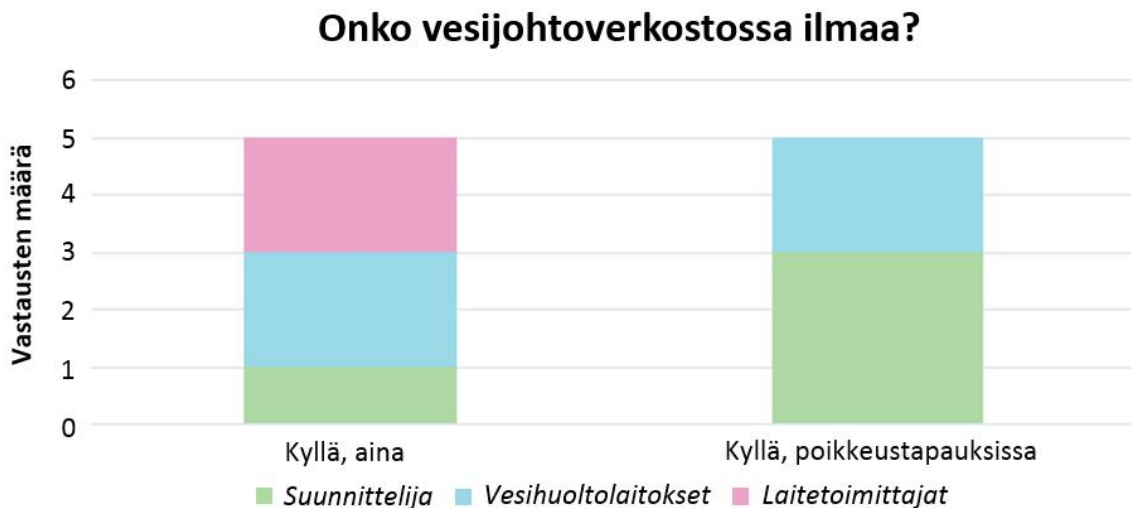
## 4 Tulokset

Tässä luvussa esitellään haastattelututkimuksen ja kokeellisten mittausten tulokset. Haastattelujen löydökset käydään läpi teemoittain, mutta tulosten käsittely tehdään selkeyden vuoksi seuraavassa pääluvussa. Kokeellisesta tutkimuksesta käydään läpi mittaustulokset ja vedensiirtolinjan yleinen toiminta mittausajanjaksolla.

### 4.1 Haastattelututkimus

#### 4.1.1 Onko vesijohtoverkostossa ilmaa?

Kaikkien haastateltujen välillä vallitsee konsensus siitä, että vesijohtoverkostossa on tai voi olla ilmaa kuten kuvassa 19 näkyy. Näkemykset kuitenkin vaihtelevat: yksi suunnittelija totesi, ettei tiedä varmasti, muttei usko vesijohtoverkostossa olevan suuria määriä ilmaa kaasuna. Toinen suunnittelija oli puolestaan saanut toimeksiannon pirkanmaalaiselta vesijohtolaitokselta, jonka vesijohtoverkostossa on niin paljon ilmaa, että se on ongelma ja verkostoa on jouduttu mallintamaan ja huuhtelemaan, jotta ilmaa saataisiin pois. Tapauksesta tehdään Tampereen teknilliselle yliopistolle diplomityötä, joka keskittyy ilman käyttäytymiseen erityisesti verkostoissa. Muut suunnittelijat joko erittelevät, milloin ilmaa voi olla tai toteavat, että ilman olemiselle on edellytykset, mutta kokemusta tai sen tuomaa varmuutta asiasta ei ole. Laittoimittajat sanovat, että ilmaa on aina, kun taas vesihuoltolaitosten henkilökunta kertoo, miten heidän verkostonsa toimii ja millä tavalla siellä on ilmennyt ilmaa. Kaikista vastauksista ilmenee luonnollisesti omasta kokemuksesta nouseva ymmärrys tai ainakin teoreettinen näkökulma aiheesta, jos henkilökohtainen kokemus puuttuu.



**Kuva 19.** Vastausjakauma ilmasta vesijohtoverkostossa.

Mielenkiintoisen haastattelukierrokselta tekee se, että yhdessä haastattelussa käy ilmi, että alle 60 000 asukkaan vesihuoltolaitoksen vesijohtoverkostossa ei ole ollenkaan ongelmia ilman kanssa. Tämä perustuu ylläpitopuolen huomioihin siitä, ettei ilmaa ole havaittu mitenkään, siitä ei ole tullut asiakkailta valituksia eikä verkostossa ole lainkaan toimivia ilmanpoistventtiilejä. Haastateltava toteaa, että pumppauksessa saattaa olla energiahäviöitä ilman takia, mutta kun mitään ei ole havaittu, niin mahdollista ongelmaa on vaikea

paikantaa. Ilmattomuudelle ei ole myöskään löydetty syitä. Alueen suurimmat korkeuserot ovat noin 40 metriä ja verkostossa on kaksi noin kahdeksan kilometrin pituista vedensiirtolinjaa. Vuotoprosentti on noin 20 %. Haastateltu henkilö tiedostaa verkostonsa ainutlaatuisuuden.

Toisessa samankokoisessa vesihuoltolaitoksessa tilanne on päinvastainen: valituksia asiakkailta tulee kuukausittain – välillä jopa viikoittain – kun ilma aiheuttaa laatumuutoksia. Etenkin häiriötilanteet (asennus-, vuoto- tai liitostyö) näkyvät asiakkaille putkista irtoavana sakkana tai ilmana. Vesihuoltolaitos on huomannut, että erityisesti verkoston perukoilla ja mäkien päällä on asiakaspalautteen perusteella tämän kaltaisia ongelmia. On myös arvioitu, että osa ongelmista johtuu vanhoista 70 – 80 -luvuilla rakennetuista ilmanpoistovenntiileistä, joita on asennettu putkien kylkeen tai liian pienellä yhteellä, jolloin ne eivät ole riittäviä verkoston tarpeisiin.

Suuremmassa vesihuoltolaitoksessa haastateltiin verkostopäällikköä, jolla oli kokemusta siirtolinjoista. Hänen kokemuksensa mukaan ilmaa on aina, mutta hyvällä suunnittelulla ja huollolla ilmasta on harvemmin haittaa. Ongelmia syntyy, jos ilmanpoistovenntiili on kiinni tai viallinen, jolloin ilman kertyessä putken kapasiteetti pienenee ja vedenlaatu kärsii. Haastaviksi kohdiksi siirtolinjoissa mainittiin etenkin jyrkät alamäet, mutta samalla todettiin myös, ettei ilmaa juuri kerry normaalitilanteessa.

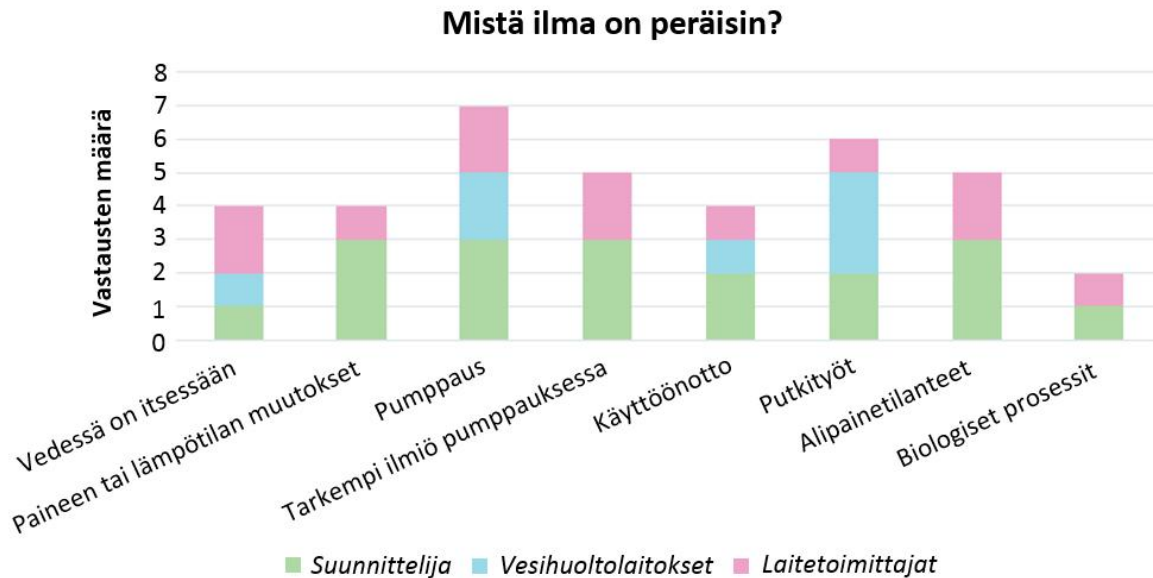
Toisen suuren vesihuoltolaitoksen haastattelusta ilmeni, ettei ilma aiheuta heillä juuri mitään ongelmia, paitsi että sitä saattaa kulkeutua välillä asiakkaalle asti. Heidän käytössään olevat ilmanpoistovenntiilit ja palopostien kautta tehtävät verkostohuuhtelut toimivat siis riittävän hyvin verkoston tarpeisiin nähden.

#### *4.1.2 Ilman alkuperä, erkaantuminen ja haitat*

Mallinnuksen parissa työskentelevä suunnittelija osasi selittää ilman alkuperän asiantuntevimmin. Muillakin suunnittelijoilla ja laitetoimittajilla oli kirjallisuusosion kaltaisia ehdotuksia ilman alkuperästä: vedenotto ja pumpun imuputken riittämätön korkeus (tai jopa pumppausaltaan tyhjeneminen), pyörteisyyys vedenottoaltaassa, huonosti järjestelty pumppausprosessi ja putket, putkityöt (putkien käyttöönotto ja hajoaminen), alipainetilanteet sekä verkostossa tapahtuvat biologiset prosessit. Yksi suunnittelija osasi myös mainita, että ilmaa saattaa päästä verkostoon hyydeilmien; etenkin Pohjois-Suomessa. Siinä virtaus on tarpeeksi hidasta ja tasaista, että alijäähtynyt vesi pääsee jäätymään. Näin voi käydä, kun kova tuuli puhaltaa vedenotto paikalla ja putkeen päästessään alilämpöinen vesi jäätyy vapauttaen ilmaa. Vesihuoltolaitoksissa aiheen tuntemus oli selkeästi vajaan: ilman alkuperästä osattiin sanoa, että vedessä on itsessään ilmaa ja sitä pääsee pumppauksen, putkirikkojen tai käyttöönoton yhteydessä verkostoon.

Kuvassa 20 näkee tarkemmin, miten vastaukset jakautuivat. Kuvan vaihtoehdoista suunnittelijat osasivat nimetä 56 %, vesihuoltolaitokset 22 % ja laitetoimittajat 75 % kaikista mahdollisista vaihtoehdoista. Suunnittelijoiden tutkija ei toisaalta vastannut tähän kysymykseen ollenkaan, joten korjattu suunnittelijoiden prosentti olisi 75 %. Yksi vesihuoltolaitoksen edustaja ei myöskään vastannut kysymykseen ja heidän korjattu prosenttinsa on 29 %. Yleisin vastaus oli pumppaus tai jokin tarkempi ilmiö siinä sekä putkityöt ja alipainetilanteet. Biologiset prosessit oli harvinaisin vastaus. Kaikki suunnittelijat osasivat selittää ilman olevan peräisin paineen tai lämpötilan muutoksista,

pumppauksesta ja sen ilmiöistä sekä alipainetilanteista. Molemmat laitetoimittajat osasivat puolestaan mainita, että ilmaa on vedessä itsessään, pumppauksessa ja sen ilmiöissä sekä alipainetilanteissa. Kaikki vesihuoltolaitokset osasivat mainita ainoastaan putki- ja korjaustyöt.



**Kuva 20.** Vastausjakauma ilman alkuperästä.

Ilman erkaantuminen ja sen laajuus tuntui olevan haastateltavillekin jonkinlainen arvoitus. Ilmaa sanottiin olevan yleisesti vesijohtoverkostossa, mutta sen erkaantumisesta ei ole juurikaan havaintoja. Osa haastateltavista totesi korjauksen tai vian yhteydessä havainneensa vesijohtoverkostossa kaasufaasissa olevaa ilmaa. Ilmasta tehdyiksi havainnoiksi ilmoitettiin myös asiakkaiden ”räkivät” hanat ja vesilasiin kaadettuun veteen syntyvät ilmakuplat. Muutama suunnittelija ja yksi laitetoimittaja nimesivät erkaantumisen tapahtuvan lämpötilan nousun tai paineen laskun seurauksena – toisaalta tästä lainalaisuudesta ei haastattelussa kysytty suoraan. Kukaan ei arvioinut erkaantuvan ilman määriä. Yksi suunnittelija pohti myös ilman takaisin liukenemisen mahdollisuutta, mutta ymmärsi, että se on hidas, mahdollisesti jopa vuosia vievä prosessi.

Ilman haitat nousivat myös puheenaiheeksi. Tuntui olevan yleisesti tiedossa, että ilmasta on haittaa: energiahäviöt, pienentynyt kuljetuskapasiteetti, oskillaatio eli paineen huojunta, paineiskut, lisääntynyt biologinen aktiivisuus ja veden esteettisyys mainittiin. Ilmasta eroon pääseminen on yhden laitetoimittajan mukaan tuonut 70 % energiansäästöt eräässä savolaisessa kaupungissa. Toinen laitetoimittaja totesi, että haitat ja ilman poistamisen tarve ovat yleisesti tiedossa, mutta välttämättä ei ymmärretä tarvetta vesijohtolinjan suojaukselle alipainetilanteita varten. Vain yksi suunnittelija mainitsi haastattelun aikana alipaineen vaaran. Vesihuoltolaitoksella – jossa ei ole venttiileitä käytössä – tiedostetaan alipaineen riski, mutta siihen ei ole varauduttu. Heidän mukaansa alipainetilanteet ovat harvinaisia, eikä niitä tapahdu melkein koskaan. Muutenkin vesihuoltolaitoksilla mainittiin haittana lähinnä kapasiteetin pieneminen ja vedenlaadun heikkeneminen. Asiakkaat ovat jokaisen vesihuoltolaitoksen pääasiallinen tiedonlähde haitoista.

### 4.1.3 Ilman poistuminen ja ilmanpoistoverkkoventtiilit

Ilman poistuminen vaikutti selkeämmältä teemalta. Ilmanpoistumista venttiilien kautta vedensiirtolinjoissa ja käyttäjien hanojen kautta verkoston puolella pidettiin jopa itsestäänselvyytenä. Myös manuaaliset palopostit mainittiin. Kaksi suunnittelijaa mainitsivat kriittisen nopeuden olevan vaatimuksena, jotta ilma voi kulkeutua verkostossa eteenpäin, ja että se pääsee hanoista tai venttiileistä ulos. Etenkin laitetoimittajat arvostelivat nykyäänkin hyvin yleisiä vanhan mallisia ilmanpoistoverkkoventtiileitä (kuvattu luvussa 3.2, kuvat 17 ja 18), joita käytetään usein väärin kolmitoimisina venttiileinä, mutta eivät välttämättä toimi ollenkaan. Se johtuu liian pienestä ilmausaukosta, ja näitä vanhan mallisia venttiileitä asennetaan vesijohto- ja viemäriverkostoihin ymmärtämättä niiden mitoitusperiaatteita. Koska ne eivät näistä syistä toimi kunnolla, laitetoimittajat kertovat kyseisten venttiilien pilaavan koko ilmanpoistoverkkoventtiilien maineen ja aiheuttavan epäluuloja näitä kohtaan.

Suunnittelijoilta ja laitetoimittajilta tuli eriäviä vastauksia ilmanpoistoverkkoventtiilien sijoittamisesta. Yksi suunnittelijoista ilmaisi jopa epäluottamusta laitevalmistajien tekemiä arvioita kohtaan ja totesi, ettei ilmanpoistoverkkoventtiilejä tarvitse olla 200 metrin välein. Laitetoimittajat myös kertoivat, että asiakkaat vähentävät venttiileiden määrää, koska niitä on heidän mielestään ehdotettu liian paljon. Ratkaisevin ero tuntui olevan siinä, että suunnittelijoiden mielestä ilmanpoistoverkkoventtiilejä oli tarpeellista sijoittaa vain selkeisiin ylätaitteisiin 1 – 2 kilometrin välein, kun taas laitetoimittajat ehdottivat niitä sijoitettavaksi 500 tai 800 metrin välein. Laitetoimittajat sijoittaisivat Pullin (2016) aiemmin esitellyn kuvan 14 mukaisesti venttiilejä myös muihin paikkoihin. Yksi suunnittelijoista sijoittaisi venttiileitä myös pumppaamoiden jälkeen. Kahden suunnittelijan mielestä huomiota tulisi kiinnittää erityisesti putken profiiliin ja panostaa siihen, jotta ilmanpoistoverkkoventtiileitä ei tarvittaisi niin paljon.

Vain laitevalmistajat ovat tehneet ilmanpoistoverkkoventtiileiden suunnittelua varten mallinnusohjelmia, joita laitetoimittajat ovat kertoneet myyneensä myös eri suunnittelutoimistoille. Ohjelmat ovat suurimpien venttiilivalmistajien tuottamia ja niiden mainitseminen herätti osassa haastatelluissa suunnittelijoissa pientä epäluottamusta. Kukaan haastatelluista suunnittelijoista ei kertonut käyttävänsä laitevalmistajien mallinnusohjelmia.

Vesihuoltolaitoksilla taas murehditaan siitä, että onko konsulttitoimistoilla tarpeeksi osaavaa työvoimaa arvioimaan ilmanpoistotarvetta, etenkin kun siinä pitäisi ottaa huomioon käyttöönotto, normaali toiminnallisuus sekä vikatilanteet. Eräässä projektissa suunnittelija oli laittanut 400 mm kokoiseen ja 14 kilometriä pitkään vedensiirtolinjan suunnitelmaan neljä ja laitetoimittaja kolmisenkymmentä ilmanpoistoverkkoventtiiliä. Lopullisten venttiilien sijaintien ja kokojen päättäminen vaati vesihuoltolaitokselta perehtyneisyyttä ja tässä tapauksessa kyseiseen linjaan valikoitui lopulta kymmenen ilmanpoistoverkkoventtiiliä. Tämä todettiin hyväksi, vaikkei lukumäärä olisikaan laskennallisesti riittävä. Ilmanpoistoverkkoventtiilit sijoitettiin ainoastaan huippukohtiin. Tämä olikin yleinen trendi vesihuoltolaitoksilla; kun venttiilien sijainneista kysyttiin, ainoastaan huippukohdat osattiin mainita.

Suunnittelijoiden ja laitetoimittajien suosimat venttiilityypit riippuivat pitkälti heidän näkemyksestään siitä, että erkaantuuko vesijohtoverkossa ilmaa. Etenkin suunnittelijat ehdottivat suurikammioisia ilmanpoistoverkkoventtiilejä, joita sijoitetaan varsinkin käyttöönottoa ja vikatilanteita varten. Yksi heistä totesi, että pelkkää ilmaa poistavia venttiilejä sijoitetaan enemmän, sillä kaksitoiminen venttiili voi väärinsijoitettuna olla riski vesijohtoverkostolle.

Venttiilin valinnassa pitää myös huomioida jäätymisen riski. Laitetoimittajilla on käytössä taulukot, joissa on paineeseen ja virtaamiin perustuvia eri kokoisten venttiilien käyriä, joiden perusteella ilmanpoistovenntiileitä mitoitetaan. Toinen laitetoimittaja suosisi kolmitoimista venttiiliä, sillä se toimii kaikissa tilanteissa ja heidän tarjoamansa malli soveltuu melkein kaikkialle.

Haastateltujen vesihuoltolaitosten yleisin malli on kaksitoiminen ilmanpoistovenntiili, mutta se riippuu paikkakunnasta ja linjan iästä, sillä vanhemmissa linjoissa yksitoimiset saattavat olla yleisempiä. Kolmitoimiset ovat harvinaisimpia siksi, että ne ovat olleet markkinoilla vähemmän aikaa, mutta uusimmat asennettavat venttiilit ovat nykyään pääsääntöisesti kolmitoimisia. Toisella pienemmistä vesihuoltolaitoksista on käytetty kaivojen sijaan pystyposteja jo vuosikymmenien ajan. Nämä koettiin helpommiksi ja turvallisimmiksi ratkaisuksi kuin perinteiset kaivot, etenkin jos venttiilin tarkoituksena on myös antaa ilmaa vesijohtoverkoston. Tällöin mahdolliset tulvatilanteet eivät ole riskinä. Pystypostit ovat rosteriputkessa ja ne on suojattu betonikartiolla vesitiiviisti. Laitetoimittaja huomauttaa, että ilmanpoistovenntiilin tulee olla mahdollisimman lähellä putkea ja yhteen tulee olla koko ajan nouseva, jotta ilmanpoistovenntiili olisi mahdollisimman toimiva. Tämän vuoksi syvällä kulkevilla putkilla pystypostit voivat olla ongelmallisia.

Kaikki kolme haastatteluryhmää kertoivat ilman poiston yhteydessä tarvittavasta T-haarasta, joka kerää vapautuneen kaasun tehokkaasti putken ylätaiteeseen tehtyyn ulokkeeseen, josta kaasu voi nousta yhdettä pitkin ilmanpoistovenntiilille ja poistua verkosta. On kriittistä sijoittaa T-haara putken yläpinnalle, sillä ilma kulkee putken yläpintaa pitkin. Yksi suunnittelijoista ja pari vesihuoltolaitosta ovat nähneet, että ilmanpoistovenntiilejä on myös asennettu joko T-haaralla tai ilman putkien kylkeen, jolloin asennetulla venttiilillä ei ole edellytyksiä toimia.

Yksi suunnittelija oli myös sitä mieltä, että suunnitelma ja toteutus ilmanpoistovenntiilien kohdalla poikkeavat liian usein toisistaan. Hän totesi, ettei kukaan lopulta tiedä, mitä venttiilejä linjaan päätyy, sillä asentajat asentavat niitä, joita on kullakin hetkellä saatavilla eikä tieto kulkeudu välttämättä eteenpäin. Kustannussyistä voisi hänen mukaansa laittaa isoja venttiilejä harvemmin tai sitten kunnollisia pienempiä tiheämmin.

Laitetoimittajien mukaan vesijohtoverkoston ilmanpoistovenntiilien huolto ei ole venttiilin toimintavarmuuden puolesta yhtä kriittistä kuin viemäripuolen. Viemärit on hyvä tarkistaa muutaman kerran vuodessa ja vesijohtoverkosto ainakin vuosittain. Tämä johtuu siitä, että vesijohtoveden puolella ei pitäisi olla roskia, jotka saattavat tukkia putken tai venttiilin. Perushuoltoon kuuluu venttiilin avaus ja tiivisteiden puhdistaminen. Toinen laitetoimittajista sanoi, että riittää, kun kaivo tarkistetaan kerran vuodessa ja katsotaan, että venttiilillä on kaikki päällisin puolin kunnossa.

Todellisuudessa vesihuoltolaitoksilla on hyvin erilaiset huoltotavat. Yhdellä vesihuoltolaitoksella kriittisimmät venttiilit tarkistetaan kerran viikossa ja kaikki venttiilit tulevat tarkistetuiksi vähintään kaksi kertaa vuodessa. Tällainen huolto varmistaa, että venttiilit toimivat ja ongelmia on verkostossa vähän. Toisella laitoksella tiedostetaan huollon merkitys, mutta kaikkia venttiileitä ei pystytä käymään läpi vuodessakaan. Kriittisimmät venttiilit tarkistetaan vuosittain. Kolmannella laitoksella ei ole lainkaan ilmanpoistovenntiilejä, joten niiden huollosta ei tarvitse huolehtia ja neljännellä venttiileitä pyritään tarkistamaan vuosittain.

Ilmanpoistontarvetta tai ilman kulkeutumista ei juuri arvioida laskennallisesti. Venttiilivalmistajilla sekä muualla Euroopassa on käytössä mallinnusohjelmia ja vain yksi suunnittelija kertoi mallintaneensa ilmankulkeutumista. Hän oli käyttänyt teoriaosuudessa esiteltyä (2.6) kaavaa ilman kulkeutumisen mallintamiseen ja totesi putken kulman, koon sekä virtausnopeuden vaikuttavan ilmankulkeutumiseen. Paineiskuja sen sijaan mallinnetaan yleisemmin, etenkin suunniteltaessa pitkiä siirtolinjoja.

## 4.2 Kokeellinen tutkimus

Kokeellinen tutkimus alkoi mittareiden testaamiselle ja asennuksella 12.12.18. Ilman poistumista tarkkailevat mittarit asennettiin kuvan 16 mukaisesti linjan alueelliseen huippukohtaan 8 sekä korkeimmalle huipulle 12. Kokeellisessa tutkimuksessa ilmanpoistoventtiileistä ei poistunut lainkaan ilmaa mittausaikana, jota kesti joulukuun 12. päivästä tammikuun 31. päivään asti. Tutkimusajankohtana kaikki vesi tuli vedenpuhdistuslaitoksen pumppaamolta käymättä vesitornissa.

Mittausaikana linjassa oli pitkälti samankaltaiset olosuhteet kuin huhtikuussa. Tammikuun puolivälissä vesihuoltolaitoksella oli ollut ongelmia verkostoautomaation kanssa ja tästä syystä muutamia arvoja puuttuu. Tammikuun viimeisenä päivänä tutkittavan vedensiirtolinjan kautta tehtiin verkostotestejä, jolloin virtaamamäärät olivat hetkellisesti rajusti suurempia kuin yleensä. Nämä eivät kuitenkaan vaikuttaneet mittauksiin, sillä ilmaa ei poistunut lainkaan.

Taulukoista 6 ja 7 voi verrata joulukuun olosuhteita aiemmin esiteltyihin arvoihin. Keskivirtaama päälinjassa oli 34 m<sup>3</sup>/h pienempi kuin huhtikuussa ja maksimi- ja minimivirtaamat olivat 150 m<sup>3</sup>/h ja 197 m<sup>3</sup>/h pienemmät. B-pisteen virtaamat kasvoivat lähes kaksinkertaisiksi, kun taas D-pisteen keskivirtaama väheni kahdella m<sup>3</sup>/h, mutta maksimi kasvoi yli kaksinkertaiseksi. Painekeskiarvot olivat A- ja B-pisteissä samat, C- ja D-pisteissä paineet kasvoivat hiukan. Painevaihteluerot minimin ja maksimin välillä sen sijaan kasvoivat melkein kaksinkertaisiksi. Metrejä merenpinnasta -paine (mmp) pysyi samana pisteessä A, väheni B:ssä ja C:ssä, mutta suureni D:ssä. Muutokset vaikuttivat lähinnä veden virtaamiin ja nopeuksiin päälinjassa, mutta pienentyneet virtaamat ja nopeudet eivät vaikuta ilman kulkeutumismahdollisuuksiin. Suurentuneet painevaihteluvälit olisivat voineet auttaa ilmaa erkaantumaan enemmän.

**Taulukko 6.** Tutkimuslinjan virtaama- ja painetiedot mittausajalta 12.12. – 31.12.2018.

	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] ka	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] max	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] min	$P$ [bar] ka	$\Delta P$ [bar]	mmp [m]
A	916	1350	263	7,40	0,57	71,5
B	130	267	0	5,54	0,66	70,6
C	–	–	–	5,11	0,74	69,6
D	38	143	0	5,13	0,69	69,8

**Taulukko 7.** Vedensiirtolinjan virtaamat ja nopeudet mittausajalta 12.12. – 31.12.2018.

	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] ka	$v$ [m/s] ka	$v$ [m/s] max
A	916	0,51	0,75
B	816	0,45	–
D	766	0,42	–

Tammikuun olosuhteet on kuvattu taulukoissa 8 ja 9. Ne on käsitelty erikseen vertailun helpottamiseksi. Keskiarvovirtaamat ovat pienentyneet joulukuusta parilla kymmenellä m<sup>3</sup>/h, vaikka A- ja B-pisteille on hetkellinen maksimiikki 31.1., joka nostaa keskiarvoja. Poikkeuksellinen päivä ei kuitenkaan vaikuttanut koko linjan painekeskiarvoihin, metrejä merenpinnasta -paineeseen (mmp) eikä paine-erojen selkeään kasvuun pisteissä B ja D. Pisteessä C paine pieneni. Pienentyneistä virtaamista johtuen keskimääräiset virtausnopeudet pienenevät hieman, mutta maksimivirtausnopeus oli jopa 1,31 m/s, joka ylittää kriittisen nopeuden tasaisessa putkessa.

**Taulukko 8.** Tutkimuslinjan virtaama- ja painetiedot mittausajalta 1.1. – 31.1.2019.

	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] ka	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] max	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] min	$P$ [bar] ka	$\Delta P$ [bar]	mmp [m]
A	903	2371	222	7,40	0,61	71,5
B	109	~1300	0	5,55	0,96	70,6
C	–	–	–	5,10	0,51	69,6
D	19	145	0	5,13	0,91	69,8

**Taulukko 9.** Vedensiirtolinjan virtaamat ja nopeudet mittausajalta 1.1. – 31.1.2019.

	$Q$ [m <sup>3</sup> /h] ka	$v$ [m/s] ka	$v$ [m/s] max
A	903	0,50	1,31
B	803	0,44	–
D	753	0,42	–

## 5 Tulosten tarkastelu ja yhteenveto

Pitkälle menevien johtopäätöskien vetäminen edellä tutkitun perusteella on haastavaa. Suurin painoarvo tulee luonnollisesti antaa tuoreimmille tutkimuksille, mutta kirjallisuustutkimuksen lähteet ovat erimielisiä esimerkiksi ilman kulkeutumisesta, eikä tutkimusta ole tehty muun muassa ilmaongelmien yleisyydestä tai ilman erkaantumisesta vesijohtoverkostossa. Lähtökohdat ilman kulkeutumisen ymmärtämiselle ovat haastavat, koska luotettavaa materiaalia ei ole saatavilla suomeksi ja yleisestikin ilmasta ja sen käyttäytymisestä tiedetään Suomessa vähän. Mielestäni tämä selittää haastattelututkimuksen tulosten kirjavuutta ja eroavaisuuksia eri haastatteluryhmien välillä.

Täten on tärkeää tehdä tiedon ja mielipiteen välille selvä ero. Juuri siksi tarvitaankin tieteellistä tutkimusta aiheesta. Ilman objektiivista ja puolueetonta näkökulmaa näidenkin tutkimustulosten perusteella voisi ilman käyttäytymisestä sanoa melkein mitä tahansa, kunhan vain valitsee, ketä tai mitä uskoo. Lopulta on tärkeää tietää, tarvitaanko vedensiirtolinjalle neljä tai kolmisenkymmentä ilmanpoistoverkkoa vaiko jotain siltä väliltä, eikä sen pitäisi olla mielipideasia. Kuten Ramezani ym. (2015) totesikin: liian harvassa olevat venttiilit eivät suojele verkostoa riittävästi ja niiden sijoittaminen liian tiheästi on vähintäänkin pääoman ja huoltoresurssien tuhlausta”. Mutta mikä lopulta on riittävästi?

Tämä luku käy läpi saatuja tuloksia, nostaa huomioita ja vie eteenpäin pohdintaa siitä, miten vesijohtoverkostoja tulisi suunnitella, miten ilma käyttäytyy siellä ja mitä Suomessa tiedetään asiasta. Koska ilman käyttäytyminen ei ole täysin yksiselitteistä, valmiiden vastausten ja ”tee se näin” -ohjeiden sijaan annankin yleisen suunnittelusuosituksen ja mainitsen huomioon otettavia asioita suunnittelusta ja verkoston eri käyttövaiheista, sillä ilmanpoisto vaatii lopulta tapauskohtaista suunnittelua.

### 5.1 Ilman määrä vesijohtoverkostossa

Yksi keskeisimmistä tutkimuskysymyksistäni oli, että onko vesijohtoverkostossa ilmaa. Tämä haastatteluissa esitetty kysymys jättää tulkinnan varaa. Kysymyksen voi ymmärtää niin, että onko ilmaa ylipäättään tai onko ilmaa kaasuna vesijohtoverkostossa. Kuten teoriaosassa totesin, ilmaa on aina liuenneena veteen, mutta sen määrä on luonnostaan pieni, noin kaksi tilavuusprosenttia. Toisaalta korkeassa paineessa ilmaa voi mahtuakin veteen esimerkiksi 15 %, jolloin vedellä on mahdollisuus kuljettaa suurempiakin ilmamääriä vedenvirtauksen mukana. Mutta tärkeämpi kysymys näistä kahdesta on se, että onko vesijohtoverkostossa ilmaa kaasuna, jolloin se voi tarvita erillisiä poistotoimenpiteitä. Mielestäni esittämäni kysymys tulee tulkita tuolla tavalla ja näin se tulkittiinkin haastattelututkimuksessa.

Haastattelujen perusteella suunnittelijat olivat epäilevempiä sen suhteen, että ilmaa olisi aina läsnä kaasuna vesijohtoverkostossa. Molemmat laitetoimittajat olivat sitä mieltä, että vesijohtoverkostossa on aina ilmaa. Sekä suunnittelijoiden että laitetoimittajien näkemykset perustuvat pitkälti teorioihin, sillä kummallakaan ryhmällä ei ole ollut juuri kokemusta tai havaintoja ilman esiintymisestä verkostossa. Vesihuoltolaitokset sijoittuivat tässä kysymyksessä näiden kahden välimaastoon ja pystyivät kertomaan oman verkostonsa toiminnan kautta, miten asia todellisuudessa on: yhdellä laitoksella ei ole mitään ongelmia

ja toisella on todennäköisesti ilman kanssa kuukausittaisia tai jopa viikoittaisia haasteita. Haastattelujen pohjalta ei löytynyt suoraa selitystä eroihin. Laitoksilta sanottiin kuitenkin myös, että kun kaikki toimii, ongelmia ilman kanssa ei esiinny.

Miksi sitten toisilla vesihuoltolaitoksilla on ongelmia ilman kanssa ja toisilla ei? Jotta ilma aiheuttaisi ongelmia, sillä pitää olla lähde, syy erkaantua ja ilmaa keräävä putkiprofiili. Haastateltujen mukaan ongelmia onkin havaittu mäkien päällä tai verkostojen perukoilla, missä paineet ovat alhaisemmat. Vesihuoltolaitoksilla voi myös olla ilmaa verkostossa, vaikka sitä ei ole välttämättä havaittukaan. Ilman havaitseminen käytännössä onkin yllättävän vaikeaa ja haastatelluista kukaan ei sanonut havainneensa ilmaa vesijohtoverkoston muuta kuin putkirikon tai muun poikkeustapauksen yhteydessä, kun ilmamäärät ovat suurempia. Ehkä yleisin tapa ilman havaitsemiseen on se, että huomataan putken kapasiteetin pienentyminen ja tästä syystä kasvanut energian kulutus. Lubbers (2007) etsi tutkimuksessaan ilmaa vesijohtoverkoston luotaamalla virtauksen taajuuseroja. Jos putkessa on tarpeeksi ilmaa, se aiheuttaa oskillaatiota ja näin virtaukseen syntyy taajuuseroja. On myös mahdollista, etteivät ongelmat johdukaan ilmasta, vaan jostain muusta. Lienee vain helppoa syyttää ilmaa asiakkaiden ongelmista.

Kokeellisessa tutkimuksessa puolentoista kuukauden aikana vedensiirtolinjan korkeimmilta kohdilta ei poistunut lainkaan ilmaa. Olosuhteet olivat normaalin kaltaiset. Tällöin ilmalla ei ole lähdettä tai erkaantumista aiheuttavaa tekijää, sillä tutkimuslinjan halkaisija on niin suuri, ettei pienessäkin alamässä ilmataskun pitäisi kulkeutua eteenpäin. Toisaalta linjassa on korkea yli viiden barin paine, joka liuottaa huomattavasti enemmän ilmaa kuin tavallisessa ilmanpaineessa oleva vesi. Myös vedenpuhdistuslaitoksella on teknisesti hyvin toteutettu pumppausprosessi syvennetyllä pumppauspäädyllä, jolloin pumppauksesta ei pitäisi tulla paljoa ylimääräistä ilmaa verkostoon. Nämä lienevät suurimmat syyt, miksi kokeellisessa tutkimuksessa ei havaittu ilman poistumista. Myös mittarien epätarkkuus ja veden kylmyys talvella voi vaikuttaa tulokseen.

Kokeellisen osuuden tuloksia ei voi yleistää liikaa, sillä on hyvä huomioda, että koe toteutettiin yhdessä linjassa kahdella mittarilla vajaan kolmen viikon aikana. Toisaalta tulokset osoittavat, että tässä tapauksessa ilmaa ei ole, jolloin esimerkiksi huollossa voi huomioda vain poikkeustilanteita.

## **5.2 Ilman käyttäytyminen vesijohtoverkoston**

Teoriaosuudessa esiteltiin, että ilmaa pääsee vesijohtoverkoston erityisesti pumppausprosessissa, käyttöönnotossa ja putkitöissä, mutta myös alipainetilanteissa sekä biologisissa prosesseissa. Pozos (2010) arveli altaasta pumpatusta tilavuusvirrasta jopa 5 – 10 tilavuusprosenttia olevan ilmaa, mikä johtuisi esimerkiksi veden pyörteisyydestä pumppausprosessin aikana. Kiinnittämällä huomiota muun muassa imuputken vedenottoisyvyyteen tätä saadaan kuitenkin vähennettyä. Muista tavoista ja niiden kriittisyydestä ei löytynyt arvioita, mutta käyttöönnotto ja putkityöt ovat ilmeisimmät ja suurimmat yksittäiset tavat ilman pääsulle sisään vesijohtoverkoston. Siksi niihin tulee kiinnittää erityistä huomiota valitsemalla riittävän suuria ilmanpoistventtiileitä tai käyttämällä palopostia, jotta verkoston poistuu tehokkaasti suuria määriä ilmaa. Alipainetilanteet ovat harvinaisempia, mutta altistavat vesijohtolinjan vaurioitumiselle. Siksi myös ilmaa nopeasti sisään päästäviä ilmanpoistventtiileitä tarvitaan. Nämä toimivat

myös linjan tyhjennyksen yhteydessä kuten manuaaliset palopostitkin. Biologiset prosessit ovat todennäköisesti niin pieniä, että ne eivät juuri vaikuta ilman määrään, mutta voivat toisinaan vaikuttaa veden laatuun.

Jotta näistä eri lähteistä peräisin oleva ilma erkaantuisi ja pysyisi kaasuna paineellisessa vesijohtoverkostossa, pitää ilmaa olla joko ylenpalttisesti paineen ja lämpötilan luomiin olosuhteisiin nähden tai sitten paineessa ja/tai lämpötilassa pitää tapahtua muutoksia, jotka mahdollistavat tämän. Teoriaosassa todettiin, että ilma voi liueta takaisin, jos virtaus ei ole kylläinen ilmasta. Tällöin suuret ilmaongelmat johtuvat jostain pysyvästä häiriöstä, kuten siitä, että verkostoon pääsee jatkuvasti ilmasta kylläistä vettä tai että paine pääsee laskemaan alhaiseksi jossain osassa verkostoa.

Haastatteluiden perusteella ilman alkuperän tuntemus on vaihtelevaa. Laitetoimittajat ja suunnittelijat osasivat nimetä 75 % ja vesihuoltolaitokset 29 % edellä mainituista tavoista, miten ilmaa päätyy vesijohtoverkostoon. Eroa ryhmien välillä selittää paljon se, ettei vesihuoltolaitoksilla tarvita tällaista tietotaitoa, mitä suunnittelijoilla ja laitetoimittajilla on. Toisaalta vesihuoltolaitokset tuntuivat olevan tietoisia verkostonsa tilasta, mutta syvempi ymmärrys ilman käyttäytymisestä auttaisi myös heitä ymmärtämään verkostonsa tarpeita sekä syy-seuraussuhteita paremmin ja pitämään näin verkoston paremmin toimivana.

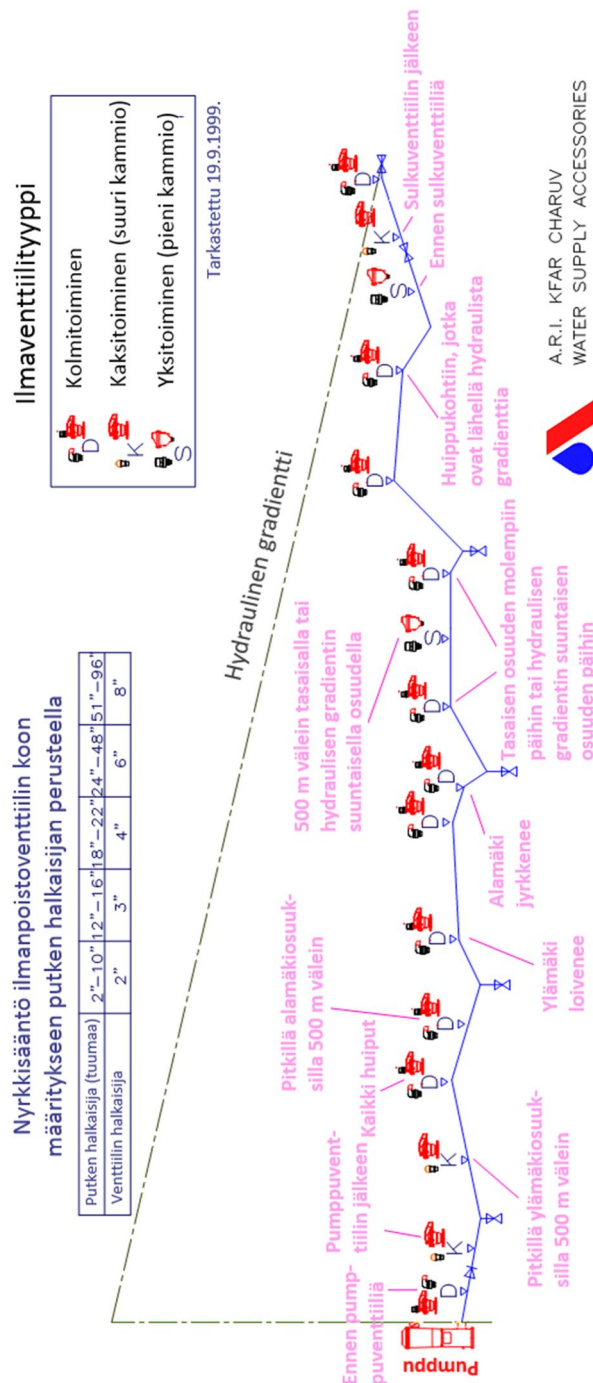
Sen sijaan ilman tavat poistua tunnettiin todella hyvin. Ilmaa poistuu vesijohtoverkostosta ilmanpoistovennttiilien, asiakkaiden käyttöliittymien eli hanojen sekä palopostien kautta. Vaikka nämä olivat yleisesti tunnettuja, kentällä ei välttämättä juuri ymmärretä miksi nämä toimivat tai miten ilma kulkeutuu verkostossa. Yhtä suunnittelijaa lukuun ottamatta kukaan ei ollut miettinytkään ilman liikkumisen mallintamista. Ilman kulkeutumista vesijohtolinjassa on tutkittu paljon myös tieteellisesti ja näitä löydöksiä on esitelty teoriaosuudessa, mutta tutkimuksista selkeästi puuttuu käytännöllinen lähestymistapa ongelmaan: se, että miten käytännön vesijohtoverkostot oikeasti toimivat ja mikä aiheuttaa siellä ongelmia.

Haastattelut osoittavat, että sekä suunnittelijoiden että laitetoimittajien asiantuntemus ilmankäyttäytymisestä on hyvää. Toisaalta haastateltaviksi päätyi enemmän tai vähemmän ilmaan erikoistuneita asiantuntijoita. Laitospuolella haastateltiin suurimmaksi osaksi kokeneita huolto- ja kunnossapitohenkilöitä, joiden tietämys ilman käyttäytymisestä verkostossa oli heikohkoa. Esimerkiksi verkostossa olevan ilman haitoista osattiin usein mainita vain asiakkaalle ilmasta aiheutuva ”räkiminen”. Tiedon puute ja siitä johtuvat väärät toimenpiteet voivat lievimmillään tuhlaata energiaa ja vakavimmillaan vaurioittaa vesijohtoverkostoa tai aiheuttaa hygieniariskin. Sen takia myös vesihuoltolaitoksilla olisi hyvä ymmärtää paremmin ilman käyttäytymistä verkostossa. Mielenkiintoista on myös se, että vaikka laitetoimittajilla ja suunnittelijoilla on samankaltainen ja hyvä tietämys ilman alkuperästä ja käyttäytymisestä, heidän johtopäätöksensä ilman poistumisesta, sen tarpeista sekä venttiilien sijoittamisesta ovat erilaiset. Tutkimustulokset on kerätty suhteellisen pienellä otannalla, jolloin varmoja laajoja johtopäätöksiä ei voi tehdä.

### **5.3 Ilmanpoistovennttiilit**

Haastattelututkimuksen perusteella suunnittelijoiden ja laitetoimittajien näkemykset ilmanpoistovennttiilien sijoittamisesta ovat erilaiset. Venttiilien valmistajat tekevät omat suunnitteluohjeensa, joiden mukaan laitetoimittajat antavat suosituksensa. Kuvassa 22 on

A.R.I. -valmistajan ohje, joka on pitkälti samanlainen muidenkin laitevalmistajien, -toimittajien, AWWA:n (2001) sekä Pullin (2016) kanssa. Suunnittelijat sen sijaan sijoittaisivat venttiileitä lähinnä selkeisiin huippukohtiin 1 – 2 kilometrin välein ajatuksella, että ilmaa pitää ensisijaisesti poistaa tai päästää sisään käyttöönotossa, tyhjennyksessä sekä virhetilanteissa. Suunnittelijat varoivat antamasta liian pelkistettyjä ohjeita haastattelutilanteissa, sillä ilmanpoistovenntiilien määrä ja laatu on täysin kiinni linjan tarpeista. Laitetoimittajat taas arvioivat, että ilmaa erkaantuu jatkuvasti vedestä, jolloin venttiilejä tarvitaan poistamaan tätä ilmaa ja ilmanpoistoratkaisutkin voivat olla suhteellisen vakioita. Haastateltujen vesihuoltolaitosten perusteella ilmanpoistovenntiilien määrät ja sijoituspaikat vastaavat tällä hetkellä enemmän suunnittelijoiden käsitystä ilman käyttäytymisestä.



**Kuva 21. A.R.I. -ilmanpoistovenntiilivalmistajan suunnitteluohje (Lindbom 2016).**

Tilannetta kuvaa hyvin erään vesihuoltolaitoksen kertoma tarina uuden 14 kilometriä pitkän ja 400 mm paksun vedensiirtolinjan suunnittelusta, jossa suunnittelija laittaisi neljä ja laitetoimittaja kolmisenkymmentä ilmanpoistoverttiiliä. Haastatteluissa ilmeni juuri näistä erimielisyyksistä johtuen pientä epäluottamusta näiden kahden ryhmän välillä. Sen lisäksi vesihuoltolaitokset saattavat epäillä suunnittelijoiden ja laitetoimittajien pätevyyttä ilmanpoiston arvioimisessa, ja tässä tapauksessa he päätyivät toteuttamaan oman ratkaisunsa. Lisääntyvä objektiivinen tieto voisi hälventää epäluottamusta ja yhdenmukaistaa suunnitteluohjeita ja mielipiteitä.

Jos kyseistä tapausta miettii vaikutinnäkökulmasta, niin suunnittelijat saavat tuottonsa itse suunnitelmasta, johon ilmanpoistoverttiilien määrä ei vaikuta. Toisin on laitetoimittajilla, jotka saavat tuottoa myytyjen venttiilien määrästä, mikä voi toimia heidän motiivinaan antaa huomattavasti suurempia suosituksia niiden lukumäärästä. Tästä syystä laitetoimittajat voivat olla jäävejä antamaan suosituksia venttiilien määrästä, mutta toisaalta he tuntevat laitteistonsa parhaiten. Vesihuoltolaitoksen itse tekemä suunnittelu näiden kahden suosituksen perusteella on myös riski. Tässä tapauksessa he tiedostivat sen, ettei ilman laskennallinen poisto välttämättä riitä, mutta käytännössä linja on toiminut hyvin. Vesihuoltolaitosten omien ratkaisujen riskikerroin riippuu pitkälti henkilöstön asiantuntevuudesta.

Yksi haastattelututkimuksen vesihuoltolaitoksista on lisäksi ottanut riskin siinä, ettei heillä ole käytössä yhtään ilmanpoistoverttiiliä. Kuten edellä on esitelty, ilmanpoistoverttiilit ovat tarpeellisia ja ensisijaisen tärkeitä kanavia antamaan ja poistamaan ilmaa vesilinjan käyttöönotossa, tyhjennyksessä sekä virhetilanteissa. Niinpä vesijohtoverkostossa olisi näitä tilanteita silmällä pitäen hyvä olla ilmanpoistoverttiilejä ja niiden poisjättäminen tai huolloin laiminlyöminen voi aiheuttaa hygieniariskin, energiahäviöitä tai verkoston vahingoittumisen paineisku- tai putkirikkotilanteissa.

Suomessa ilmanpoisto on ollut pitkään huomioituna vesihuollossa ja vesihuoltolaitoksilla on käytössä monenlaisia ilmanpoistoverttiileitä. Käytännöt ja ylläpito vaihtelevat kuitenkin huomasti jo toteutetun haastattelututkimuksen laajuudessa, mikä herättää kysymyksiä ilmanpoiston riittävydestä sen ylimitoitukseen. Veden saastuminen Äänekoskella vuonna 2016 on hyvä esimerkki siitä, millaisia seurauksia huonolla suunnittelulla tai laiminlyödyllä huollolla voi olla. Edes hyvin järjestyneellä laitoksella ei välttämättä ole käytännön tietoa ilmanpoistoverttiilien todellisesta kunnosta ja venttiilejä voi olla niin paljon, ettei niitä ehditä huoltamaan ja tarkastamaan riittävän usein, mikä aiheuttaa riskejä vesijohtoverkostolle.

Yksi suunnittelija mainitsi myös tässä diplomityössä huomattun havainnon, että hyvinkin suunniteltu ilmanpoisto saatetaan tarvella asentamalla verkostoon mitä tahansa venttiileitä, joita sattuu olemaan käsillä. Tällöin vesihuoltolaitos ei edes tiedä, mitä laitteita heidän verkostossaan on. Tämän työn aikana havaittiin, että myös tutkimukseen käytetyllä linjalla oli käynyt näin ja vaihdetut venttiilit eivät olleet tarpeeksi suuria turvaamaan riittävää ilman poistumista tai saantia poikkeustapauksissa. Samoin useampi haastateltava oli havainnut, että asennustöissä ilmanpoiston tehostamiseksi asennettu T-haara oli sijoitettu putkien kylkeen yläpinnan sijaan, jolloin koko ilmanpoiston toteutus on hyödytön. Hyvät suunnitelmat eivät siis aina johda hyvään toteutukseen ja lopputulokseen. Tästä syystä myös asentajien asiantuntevuutta tai työmaaoijausta olisi hyvä lisätä.

Lisäksi ilmanpoistovenktiilien riittävä huolto on toimivan ja tehokkaan ilmanpoiston edellytys. DVGW:n (2005) ohjeiden ja haastattelukierroksen perusteella kerran vuodessa tehtävä venttiilien tarkastus ja mahdollinen huolto varmistaisi näiden toimivuuden. Sinällään tämä ei kuulosta liian vaativalta, mutta haastatelluista vesijohtolaitoksista vain yksi laitos täytti tämän vaatimuksen. Niinpä ilmanpoistovenktiilejä on tärkeää sijoittaa harkitusti, sillä ”ylimääräiset” lisäävät huoltotaakkaa.

## 5.4 Suunnittelusuositus

Tutkimustietojen perusteella annan vedensiirtolinjojen ilmanpoistoa koskevan suuntaa antavan suosituksen taulukossa 10, jossa perustelen syitä ilmanpoistovenktiilien sijoittamiselle. Kyseessä ei ole yksiselitteinen ”toimi aina näin” -ohje, vaan sen tarkoitus on pohtia ilman kokonaisvaltaista käyttäytymistä vesijohtoverkostossa. Ilmanpoistovenktiilien sijoittaminen on aina tapauskohtaista ja siksi perehtyneen asiantuntijan tulisi tehdä arvio siitä, että riittävätkö ilman poiston tai tuonnin kapasiteetit täytettäessä ja tyhjennettäessä putkea ja mahdollisissa häiriötilanteissa sekä huomioida se, että voiko putkeen kertyä ilmaa käytön aikana.

### Taulukko 10. *Suunnittelusuositus.*

#### **Huippukohdat**

Tehdyn tutkimuksen perusteella selkein paikka, jonne ilmanpoistovenktiili tulee sijoittaa. Kuten edellä on todettu, ilmalle on vaikeinta liikkua alaspäin viettävässä putkessa, sillä noste nostaa ilmakuplan putken yläpintaan, jossa kitkavoima vastustaa virtauksen mukana kulkeutumista ja noste kuljettaa ilmaa vastavirtaan. Optimaalisin kohta on sijoittaa T-haara hieman huipputaitekohdasta alamäkeen päin.

Kaikki ilma etenee alaspäin viettävillä osuuksilla, jotka ovat lyhyempiä kuin viisi kertaa putken säde. Jos putken pituus on yli 20 kertaa putken säde, ilman kulkemiseen tarvitaan kriittinen nopeus eli riittävä virtausnopeus, joka kykenee kuljettamaan kaiken ilman mukanaan (Ervine 1998). Tällöin aivan pienimmille huipuilla ei tarvitse sijoittaa ilmanpoistovenktiiliä. Korkealla olevan huippukohdan jälkeen matalammille huippukohdille ei myöskään välttämättä tarvita ilmanpoistovenktiiliä, sillä kaiken erkaantuvan ilman voidaan arvioida poistuneen, jos paine ei alene korkeimmasta kohdasta. Ja ilmanpoistovenktiilin tarve voidaan kokonaan kyseenalaistaa silloin, kun veden virtaus ylittää kriittisen nopeuden, sillä silloin kaikki ilma kulkee virtauksen mukana.

Huippukohdat ovat selkein paikka sijoittaa ilmanpoistovenktiili, mutta sen ei tulisi olla kaavamaista. Prioriteetit venttiilin sijoitukselle ovat alueelliset huippukohdat ja linjan korkein kohta, mutta kokonaisuuden tulisi ratkaista sijoitetaanko venttiili vai ei. Kokonaisuuteen vaikuttaa eniten linjan profiili, venttiilien tiheys ja miten verkosto on paineistettu.

**Pumput**

Pozosin (2010) mukaan altaasta pumpatusta virtaamasta 5 – 10 % olisi ilmaa. Tällöin pumpun yhteyteen olisi järkevää sijoittaa ilmanpoistoveniilejä. Niitä ei ole kuitenkaan järkevä sijoittaa pumpun välittömään läheisyyteen, sillä T-haarakaan ei välttämättä onnistu keräämään ilmaa pyörteisestä virtauksesta, jossa kestää hetken aikaa, että erkaantunut ilma kertyy putken yläpintaan. Seuraava huippukohta lienee paras paikka kerätä ylimääräinen ilma. Toisaalta pumppu nostaa virtauksen painetta, jolloin mukana oleva ilma voi liueta veteen.

**Määrävälein**

Säännöllisin 400 – 800 metrin välein sijoitettavat ilmanpoistoveniilit on mainittu eri suosituksissa. Näiden logiikkana on taata vesijohtolinjan toiminta varsinkin poikkeustilanteissa: käyttöönotto, tyhjennys sekä putkirikko. Tällöin linjaan tulisi sijoittaa kaksitoimisia tai kolmetoimisia veniileitä, jotka antavat ja poistavat suuria määriä ilmaa.

Olellaiseksi kysymykseksi jää se, että mikä on riittävä määräväli. 400 – 800 metriä ei ole mitenkään perusteltu. Kokeellisen tutkimuksen linjalla pisimmät välit ovat yli kilometrin ja pisimmillään 1 300 metriä. Ja onko sekään pisin mahdollinen väli? Yksi suunnittelijoista sanoikin, että veniilien välinen sallittu etäisyys riippuu veniilien ja putken koosta. Hänen mukaansa jopa kahden kilometrin määrävälit voivat olla riittäviä. Tästä aiheesta olisi hyvä saada lisätutkimusta.

**Loiveneva nousu**

Suosituksissa ajatellaan, että ilmatasku jää jumiin tai kiinni putken taitteisiin. Kuitenkin esimerkiksi T-haaraa suositellaan asennettavaksi huippukohdan jälkeen eikä sen kohdalle. Tämä viittaisi siihen, ettei ilma jää paikoilleen taitteisiin. Nousevassa putkessa nostekin auttaa ilman kulkeutumista virtauksen mukana, jolloin veniiliä ei kannata sijoittaa paitsi erityistapauksissa.

**Jyrkkenevä mäki**

Taustalla on sama ajatus kuin loivenevissa nousuissa, että ilmatasku jää jumiin tai kiinni putken taitteisiin. Jyrkkenevä alamäki on kuitenkin haastavampi tilanne, sillä linjan jyrketessä nosteen aiheuttama vastus kasvaa. Toisaalta yli 20° kulmat pienentävät ilmataskun kitkaa, jolloin ilma kulkee helpommin virtauksen mukana. Tämä tapaus vaatii harkintaa, sillä ilma voi kulkea läpi ongelmitta, nousta huippukohtaan tai kerääntyä jyrkkenevään taitteeseen. Viimeisessä tapauksessa veniili on järkevä sijoittaa juuri tähän kohtaan.

**Tasainen osuus**

Täysin tasaisessa putkessa ilman pelätään jäävän paikoilleen. Tämä kumotaan teoriaosuudessa: ilma liikkuu virtauksen mukana jo hyvin alhaisilla nopeuksilla. Lisäksi täysin tasainen putki on harvinaisen tapaus. Tällöin huomio tulisi kiinnittää putken kulmiin ja ilmanpoistoveniilien määräväleihin.

### **Gradientin suuntaisuus**

Useammissa suosituksissa on ilmaistu, että ilmanpoistoveniileit tarviitan, kun vesijohdolinja on painegradientin suuntainen, mutta tälle näkemykselle ei ole esitetty mitnn perusteita. Tavallisessa vesijohdossa paine ja sen gradientti vaihtelevat ajankohdan mukaan, jolloin sen kulma ja suuntakin vaihtelevat. Tällöin linjan gradientin suuntaisuutta on hankala maritt. Suuntaisuusehto tarkoittaa myös sitä, että veden paine säilyy samana putkessa. Tämä ei ole teoriaosan mukaan riskipaikka veden erkaantumiselle. Sen sijaan paineen pieneneminen eli putken lähestyminen painegradienttia muuttaa olosuhteita otollisemmaksi ilman erkaantumiselle. Mahdollinen venttiili sijoitetaan huipulle, jonne ilma kertyy.

### **Sulkuventtiilit**

Samoin kuin gradientin suuntaisuus, tämäkin on mainittu useissa suosituksissa perusteluitta. Sulkuventtiilit aiheuttavat auki ollessaan pieniä painehäviöitä ja turbulenssia. Pienet painehäviöitä tuskin mahdollistavat ilman erkaantumista. Kiinni ollessaan sulkuventtiilit toimivat putken pin, jolloin oskillointia ja paineiskuja voi tapahtua. Pumppauskatkoksen aikana mahdolliset korkeuserot voivat aiheuttaa paineenalenemista, jolloin ilmaa erkaantuu, jos venttiiliä pidetn suljettuna pidempn. Riippuen lähimmän ilmanpoistoveniilin sijainnista tähän voi harkita ilmanpoistoveniilin sijoittamista edellä mainituista syistä.

Ilmanpoistoveniilien tärkein ominaisuus on turvata riittävä ilman poistuminen ja saaminen täyttämisen, tyhjentämisen sekä putkirikon yhteydessä. Tätä varten etenkin suurikokoisia venttiileitä tarviitan snnllisin välimatkoin, sillä niiden koko vaikuttaa sallittuun tytt- ja tyhjennysnopeuteen. Isommat venttiilit toimivat parhaiten pienemmillä ulospst- ja suuremmilla sisnpstkapasiteeteilla, sillä niiden on huomattu pienentävän paineiskujen aiheuttamia painehuippuja ja alipainetta (Espert ym. 2008; Lee & Leow 1999). Pienempiä mari ilmaa saattaa myös tulla virtauksen mukana tai erkaantua paineen pienentymisestä johtuen verkoston käyttötilanteessa, jolloin huippukohtiin saatetaan tarvita myös pieniä ilmamari poistavia venttiileitä. Käyttötilanteessa pienempien ilmamarien poisto tulee ottaa huomioon, jos:

- 1) Ilmalla on runsas lähde muun muassa huonosta pumppausjrjestelyst johtuen.
- 2) Paine ei ole riittävän suuri, jotta ilma liukenisi veteen tai pysyisi liuenneena. Myös lämpenevä vesi erkaannuttaa ilmaa vedestä.
- 3) Virtausnopeus ei pysty kuljettamaan ilmaa eteenpäin.

Kuten teoriaosassa on esitelty, ilmataskun on todettu kulkeutuvan käytännössä aina eteenpäin ylöspäin viettävässä ja vaakasuorassa putkessa. Alaspäin suuntaavat putket ovat haasteellisimpia ilman kulkeutumiselle ja sitä voidaan arvioida ja mallintaa Escarameian (2007) luoman yhtälön (5.1) kautta. Se ottaa huomioon putken kulman, halkaisijan ja kuplakoon. Yksinkertaisuudestaan huolimatta se vastaa hyvin monimutkaisempiakin yhtälöitä. Yhtälö on maritelty 15 kulmille asti. Jos Pothofin (2011) teoria pitää paikkaansa, noin 15 kulmassa voisi olla myös kriittinen maksiminopeus. Kuvassa 23 on laskettu kriittiset nopeudet eri kulmissa halkaisijaltaan 100, 200, 300, 500 ja 800 mm putkille. RIL:n (2010) mukaan suositellut maksiminopeudet ovat 0,6 – 1,2 m/s ja nämä nopeudet ovat 300 mm putkille asti tuolla maksiminopeusvlill. Käytännössä keskinopeudet

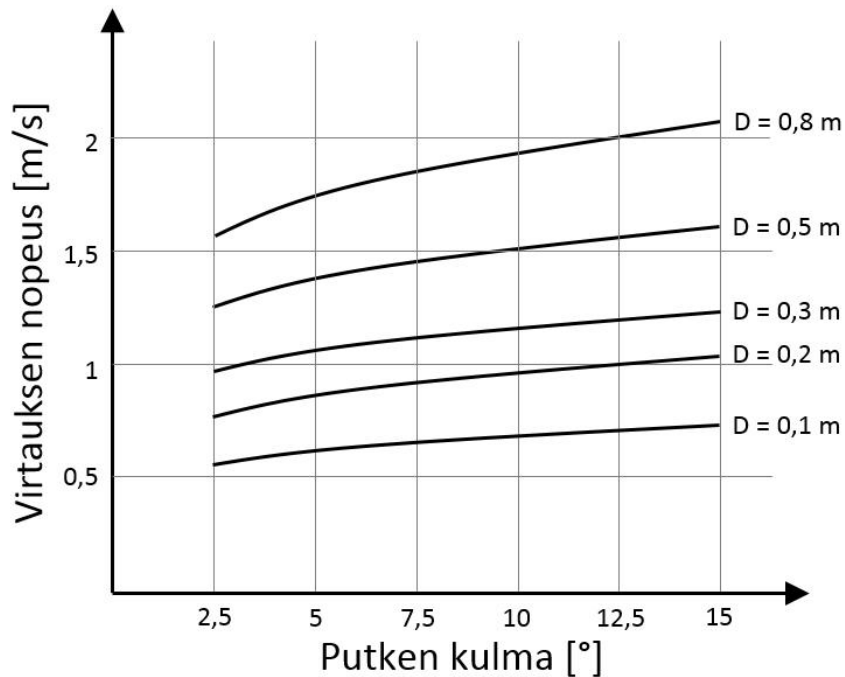
vedensiirtolinjoissa ovat usein näitä pienempiä, jolloin virtaus ei pysty siirtämään ilmaa eteenpäin. Jos päivittäinen maksiminopeus riittää tyhjentämään ilmataskun huippukohdasta, ilmanpoistovihti ei ole välttämätön.

$$v_c = (a + 0,56\sqrt{\sin(\theta)}) \times \sqrt{gD} \quad (5.1)$$

Missä	$v_c$ [m/s]	veden kriittinen nopeus
	$\theta$ [°]	putken kulma
	$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	gravitaatiokiihtyvyys
	$D$ [m]	putken halkaisija

Ja a on	0,45	kun	$n < 0,06$
	0,50	kun	$0,06 \leq n < 0,12$
	0,57	kun	$0,12 \leq n < 0,30$
	0,61	kun	$0,30 \leq n < 2$

Kun  $n$  on ilmataskun koko  $n = 4V/(\pi D^3)$ .



**Kuva 22.** Kriittinen nopeus, jolla virtaus kuljettaa pienimpiä ilmataskuja alaspäin viettävässä putkessa. Putkikoot ovat 100 ja 800 mm välillä.

## 5.5 Jatkotutkimus

Ilman käyttäytymisen teoriaa on tutkittu hyvin paljon 1930-luvulta lähtien ja siihen on löydetty hyviä ja päteviä teorioita ajan saatossa. Ilman pääsemisen, erkaantumisen, kulkeutumisen ja poistumisen tuntemus käytössä olevasta vesijohtoverkostosta on kuitenkin vajaata ja syy-seuraussuhteista ei ole juurikaan tehty tieteellistä tutkimusta. Myös teoreettisen tutkimuksen yhdistäminen käytäntöön on haastavaa, sillä koeolosuhteet eroavat todellisuudesta ja suurin osa tutkimuksesta on tehty myös tai pelkästään jätevesiverkostolle.

Näistä syistä johtuen aihepiirissä on paljon jatkotutkittavaa ja tämä diplomityö on vain pieni pintaraapaisu, jonka saatuja tuloksia olisi myös hyvä vahvistaa. Tämän työn aikana esille nousi seuraavia teemoja:

- Millä tavalla yksinkertaisemmat vedensiirtolinjat eroavat monimutkaisemmista vesijohtoverkostoista? Kerääntykö ilma myös verkostossa vai kulkeutuuko se helpommin virtauksen mukana?
- Voidaanko ilman käyttäytymistä mallintaa? Vastaako mallinnus nykyisillä teorioilla ilman todellista käyttäytymistä vesijohtoverkostossa?
- Miten ilma erkaantuu vesijohtoverkostossa ja mistä komponenteista se aiheutuu? Kuinka suurista määristä on kyse? Minkälaisilla ratkaisuilla erkaantumista tai esimerkiksi pumppujen ilman ottoa voidaan pienentää? Ja millä mekanismeilla ja ehdoilla ilma liukenee takaisin veteen, jos sitä on erkaantunut?
- Miten ilmanpoistoventtiilin koko voitaisiin optimoida venttiilien välimatkat huomioiden? Mikä on optimaalinen välimatka, joka turvaisi ilman saannin ja poistamisen, mutta minimoisi venttiilien määrän?
- Minkälaisissa vesijohtoverkostoissa ilma on ongelma? Voisiko ilmanpoistoventtiilien lisäksi ratkaisu ilmaongelmiin olla verkostojen säännöllinen huuhtelu palopostien kautta?

Tulevaisuus lisää vesijohtoverkoston digitalisaatiota ja teollinen internet voi kehittää vesialaakin. Voisiko digitaalisista resurssinhallintatyökaluista olla apua vesihuoltolaitosten omaisuuden hallinnassa? Myös lisääntyvä verkossa oleva tieto tuo lisää mahdollisuuksia hallita vesijohtoverkoston prosesseja ja esimerkiksi ilmataskuista johtuvien energiahäviöiden huomaaminen voi helpottaa.

## Lähdeluettelo

- American Wheatley. 2018. Air in water solubility. [Viitattu 12.6.2018]. Saatavissa: <https://irp-cdn.multiscreensite.com/5cfb9542/files/uploaded/Helpful-Hints-Air-In-Water-Solubility.pdf>
- AWWA (American Water Works Association). 2001. Manual of water supply practices – M51: Air-release, air-vacuum, and combination air valves, 1st Ed., Denver.
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. 1980. Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes. International Journal of Multiphase Flow, Pergamon Press, Vol. 6, s. 217 – 225.
- Benjamin, M. & Lawler, D. 2013. Water quality engineering: physical/chemical treatment processes. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, s. 157. ISBN: 978-1-118-16965-0.
- Brocchini, M. & Peregrine, D. 2001. The dynamics of strong turbulence at free surfaces. Part 1. Description. Journal of Fluid Mechanics 449, s. 225 – 254.
- Burrows, R. 2003. A cautionary note on the operation of pumping mains without appropriate surge control and the potentially detrimental impact of small air pockets. Intl. IAHR/IWA Conf. Pumps, Electro-mechanical Devices and Systems Applied to Urban Water Management PEDS-2003. Valencia, Spain.
- CSA 2017. Air valves for water, wastewater, industry and seawater – Automatic control valves – Direct acting pressure control valves – Float valves – Anti surge tanks. Manufacturer manual. Ponteghiara, Salsomaggiore Terme, Italy. Rev. 8/2017.
- Collins, R., Boxall, J., Karney, B., Brunone, B., and Meniconi, S. 2012. How severe can transients be after a sudden depressurization? Journal of American Water Works Association, 104(4), s. E243 – E251.
- Dewhurst, R. 1991. Optimising the use of air valves in piped water systems. Masters of Engineering Thesis, Department of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- DVGW (German Technical and Scientific Association for Gas and Water). 2005. Dynamic pressure variations in water supply systems. W303, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, Germany.
- Ervine, D. 1998. Air entrainment in hydraulic structures: a review. Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit. And Energy, Vol. 130, s. 142 – 153.
- Escarameia, M. 2007. Investigating hydraulic removal of air from water pipelines. Proceedings of the Institution of Civil engineers: Water Management 160(1), 25 – 34.
- Escarameia, M., Burrows, R., Little, M., Murray, S. 2005. Air problems in pipelines: A design manual. HR Wallingford, Oxfordshire. ISBN-13: 978-1-898485-11-7.

- Espert, V., García-Serra, J., Koelle, E. 2008. The use of air valves as protection devices in pressure hydraulic transients. Proc., Surge Analysis-System Design, Simulation, Monitoring and Control, 10th Int. Conf. on Pressure Surges, BHR Group, Bedfordshire, U.K., s. 183 – 197.
- Falvey, H. 1980. Air-water flow in hydraulic structures: a review. Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit. and Energy, Vol. 130, s. 142 – 153.
- Gandenberger, W. 1957. Über die wirtschaftliche und betriebssichere Gestaltung von Fernwasserleitungen. R. Oldenbourg Verlag, München.
- Gregory, J., Henry, P., Aaron, N. 2006. Meeting the standard — Air release valve and PCCP rehabilitation. Proc., Pipeline Division Specialty Conf., ASCE, Reston, VA, s. 49 – 56.
- Jönsson, L. 1992. Anomalous pressure transients in sewage lines. Proc. Intl. Conf. Unsteady Flow and Transients, BHRA. Durham, UK. S. 251 – 258.
- Kalinske, A., Bliss, P. 1943. Removal of air from pipe lines by flowing water. Proceedings of the American Society of Civil Engineers (ASCE) 13(10), s. 3.
- Kalinske, A., Robertson, J. 1943. Closed Conduit Flow. Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE) 108, s. 1435 – 1447.
- Kent, J. 1952. The entrainment of air by water flowing in circular conduits wit downgrade slopes. Doctoral thesis, University of California, Berkley, California.
- Kobus, H. 1991. Introduction to air-water flows. In air entrainment in free-surface flows. Edited by Ian Wood. IAHR Hydraulic structures design manual, AA Balkema, Rotterdam, s. 1 – 28.
- Krohne. 2011. KGA 42: Technical Datasheet. Datalogger with GSM/GPRS communication. Duisburg, Germany. Rev. 10/2011.
- Krohne. 2017. VA40 – VA45: Technical Datasheet. Variable area flowmeter. Duisburg, Germany. Rev. 8/2017.
- Kuronen, M. 2014. Energiatohokkuuden parantaminen talousveden jakelussa. Diplomityö, Aalto-yliopisto.
- Lauchlan, C., Escarameia, M. May, R., Burrows, R., Gahan, C. 2005. Air in Pipelines: A Literature Review. HR Wallingford. [Viitattu 14.6.2018]. Saatavissa: <https://static1.squarespace.com/static/588ab30e2994ca9f3980419f/t/58a3f956bf629a3dbe91ac9d/1487141213964/Air-in-Pipelines-HRW-Report+%281%29.pdf>
- Lee, T. 1999. Air influence on hydraulic transients on fluid system with air valves. Journal of Fluids in Engineering, 121(3), s. 646 – 650.

- Lee, T. & Leow, L. 1999. Numerical study on the effects of air valve characteristics on pressure surges during pump trip in pumping systems with air entrainment. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 29(6), 645 – 655.
- Lindbom, L. 2016. AVK:n tuotekoulutusmateriaali: A.R.I. -ilmanpoistoventtiilivalmistajan suunnitteluohje vuodelta 1999.
- Little, M. 2002. Air Transport in Water and Effluent Pipelines, 2nd International Conference on Marine Waste Discharges, Istanbul, September 16 – 20.
- Lubbers, C. 2007. On gas pockets in wastewater pressure mains and their effect on hydraulic performance. TU Delft.
- Lubbers, C., Clemens, F. 2005. Air and gas pockets in sewerage pressure mains. *Water Science and Technology* 52(3), s. 37 – 44.
- Lubbers, C., Clemens, F. 2006. Breakdown of air pockets in downwardly inclined sewerage pressure mains. *Water Science and Technology* 54(11-12), s. 233 – 240.
- Lubbers, C. & Clemens, F. 2007. Scale effects on gas transport by hydraulic jumps in inclined pipes; comparison based on head loss and breakdown rate, 6th Int. Conference on Multiphase Flow (ICMF), Leipzig.
- Mosvell, G. 1976. Luft I utslippsledninger, Prosjektkomiteén for rensing av avløpsvann, PRA report 8, NivA, Oslo, 1976.
- North Carolina Climate Office. 2018. Composition of the atmosphere. Verkkolähde. [Katsottu 17.7.2018]. Saatavissa: <https://climate.ncsu.edu/edu/Composition>
- Parmakian, J. 1955. Water Hammer Analysis. Dover Publications. Pressure surges and fluid transients in pipelines and open channels. 7th international conference, publication 10, BHR Group.
- Pothof, I. 2011. Co-current air-water flow in downward sloping pipes. Doctoral thesis, University of Delft. ISBN: 978-90-8957-018-5.
- Pothof, I., Clemens, F. 2010. On elongated air pockets in downward sloping pipes. *Journal of Hydraulic Research* Vol. 48, No. 4, s. 499-503. DOI: 10.1080/00221686.2010.491651.
- Pothof, I., Clemens, F. 2011. Experimental study of air-water flow in downward sloping pipes. *International Journal of Multiphase Flow*. Vol. 37, Issue 3, s. 278 – 292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.10.006>
- Pozos, O., Giesecke, J., Marx, W., Rodal E., A., & Alejandro Sanchez. 2010. Experimental investigation of air pockets in pumping pipeline systems. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 48, issue 2. S. 269 – 273. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221681003726262>
- Pulli, M. 2016. Virtaustekniikka: Vedensiirtojärjestelmien toiminnallinen suunnittelu nykyaikaisin menetelmin. Tammertekniikka, Tampere. ISBN-13: 978-952-5491-86-9.

- Radulj, D. 2007. The role of air valves in water distribution systems. B.Sc. thesis, Univ. of Toronto, Toronto.
- Ramezani, L., Karney, B., Malekpour, A. 2015. The Challenge of Air Valves: A Selective Critical Literature Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 141, Issue 10. DOI: [https://doi-org.libproxy.aalto.fi/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000530](https://doi-org.libproxy.aalto.fi/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000530)
- Reader, R., Kennard, M., Hay, J. 1997. Valves, pipework and associated equipment in dams – guide to condition assessment. CIRIA Report 170, CIRIA, s. 160.
- Rein, M. 1998. Turbulent open-channel flows: Drop-generation and self-aeration. *Journal of Hydraulic Engineering* 124(1), s. 98 – 101.
- Ruder, Z., Hanratty, T. (1990). A definition of gas-liquid plug flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 16(2), s. 233 – 242.
- Schuit, T. 2009. Capacity reduction of pressurized sewerage mains – Field test rig. Design, validation and measurements. Master thesis of TU Delft.
- Stephenson, D. 1997. Effects of air valves and pipework on water hammer pressures. *Journal of Transp. Engineering*, 10.1061/(ASCE)0733-947X(1997) 123:2(101), s. 101 – 106.
- Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 2010. Vesihuoltoverkkojen suunnittelu. Perusteet ja toiminnallisuus. RIL 237-1-2010. 177 s. ISBN 978-951-758-526-2.
- Taitel, Y. & Dukler, A. 1976. A model for predicting flow regime transition in horizontal and near horizontal liquid flow. *AIChE, Journal*. Vol. 22, No. 4, s. 47 – 55.
- Thomas, S. 2003. Air management in water distribution systems: a new understanding of air transfer. Clear water legacy. Ontario, Canada. [Viitattu 12.6.2018] Saatavissa: [http://www.hydrologic.ca/pdf/Air\\_Management\\_in\\_Water\\_Distribution\\_Systems.pdf](http://www.hydrologic.ca/pdf/Air_Management_in_Water_Distribution_Systems.pdf)
- Thorley, A. R.D. 2004. Fluid transients in pipeline systems, 2, London, UK: George Ltd.
- Viana, F., Pardo, R., Yanez, R., Trallero, J., Joseph, D. 2003. Universal Correlation for the rise velocity of long gas bubbles in round pipes. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 494, s. 379 – 398.
- Watters, G. 1980. Modern Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines. Ann Arbor Science.
- Willis, J. 1990. Design and positioning of air valves. South African Institution of Civil Engineers.
- Wisner, P., Mohsen, F., Kouwen, N. 1975. Removal of air from water lines by hydraulic means. *ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 101, HY2, s. 243 – 257.

Yle. 2016. Äänekosken vesikriisi: kaikki alkoi vääränlaisesta kaivosta – ja niitä voi olla ympäri Suomen. Verkkolähde. [Katsottu 7.6.2018] Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-9313106>

Zukoski, E. 1966. Influence of viscosity, surface tension and inclination on motion of long bubbles in closed tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, 25(4), s. 821 – 837.