

Panu Räsänen

**JÄTEVESIPUMPPAAMON
VIRTAUSMITTAUKSEN TARKKUUDEN
PARANTAMINEN**

Opinnäytetyö
Energiatekniikka

Maaliskuu 2017



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät Panu Räsänen	Tutkinto Insinööri AMK	Aika Maaliskuu 2017
Opinnäytetyön nimi Jätevesipumppaamon virtausmittauksen tarkkuuden parantaminen		60 sivua 8 liitesivua
Toimeksiantaja Kymen Vesi Oy		
Ohjaajat Lehtori Hannu Sarvelainen, käyttöinsinööri Jukka Mäkitalo		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Viemäriverkoston kunnan ja jätevesipumppaamoiden toiminnan seuranta varten on tärkeää saada mahdollisimman luotettavaa tietoa jäteveden virtaamasta. Suurimmassa osassa Kymen Vesi Oy:n jätevesipumppaamoita on käytössä astiamittaukseen perustuva virtausmittaus, joka on todettu epätarkaksi mittaustavaksi aikoina, jolloin vettä pääsee viemäriverkoston normaalia määrää enemmän. Menetelmä on myös epätarkka pumppaamoissa, joiden ohjaustapana on taajuuskäyttö. Tämän työn tavoitteena oli kehittää astiamittausperiaatteeseen perustuvaa virtausmittausta tarkempi virtausmittausmenetelmä, sekä selvittää kehitetyn menetelmän luotettavuus.</p> <p>Työ aloitettiin selvittämällä käytettävissä olevien virtausmittausmenetelmien vahvuudet ja heikkoudet. Tämän tiedon perusteella valittiin kehitettäväksi nimellistuottomenetelmään perustuva virtausmittaus. Työssä käytiin läpi olennaiset jätevesipumpun suorituskykyyn ja paineviemäriin liittyvät käsitteet, sekä niiden laskentaperiaatteet. Virtausmittausta varten tarvittavan paineviemäriin lähtötietojen hankintatapaa vertailtiin teoreettisen laskennan ja käytännössä tehtävän painekoemittauksen välillä, josta luotettavammaksi valittiin painekoemittaus.</p> <p>Selvitettyjen tietojen pohjalta kehitettiin nimellistuottomenetelmään perustuvaan virtausmittaukseen kompensointi, jonka avulla otetaan huomioon pumppaamosäiliön pinnan korkeuden ja pumpunkäyntitaajuuden muutoksen vaikutus virtausmittauksen lopputulokseen. Kompensoituun nimellistuottomenetelmään perustuva mittalaitte toteutettiin Unitronics Vision 120 ohjelmoitavalla logiikalla, mihin parametroitavat raja-arvot laskettiin valmiiksi Excel-laskentapohjalla. Tulosten todentamiseksi kehitetyt mittalaitteet asennettiin ohjaustavaltaan porraskäyttöisiin pumppaamoihin, joissa on vertailumittauksena käytetty sähkömagneettinen virtausmittaus valmiiksi asennettuna. Tulosten seurantajakso kesti 14 vuorokautta ja tuloksiksi saatiin koko seurantajakson ajalta porraskäyttöisellä pumppaamolla 28,2 % suurempi vesimäärä kuin vertailumittauksella. Taajuuskäyttöisellä pumppaamolla saatiin vastaavasti 8,8 % vertailumittaukselta pienempi lukema.</p> <p>Saatujen tulosten perusteella toinen kehitetyistä mittalaitteista päätettiin jättää jatkuvaan käyttöön toiseen vertailukohteista, Kotkansaaren pumppaamolle. Tulevaisuudessa mittalaitetta tullaan käyttämään viemäriverkoston vuotovesien seurannassa ongelmialueiden jätevesipumppaamoilla.</p>		
Asiasanat virtausmittaus, kehittäminen, nimellistuottomenetelmä, jätevesi, pumppaamo		

Author (authors)	Degree	Time
Panu Räsänen	Bachelor of Engineering	March 2017
Thesis Title	60 pages	
Improvement of Flow Measurement Accuracy at Wastewater Pumping Stations	8 pages of appendices	
Commissioned by		
Kymen Vesi Oy		
Supervisors		
Hannu Sarvelainen, Senior Lecturer; Jukka Mäkitalo, production engineer		
Abstract		
<p>For monitoring sewer network condition and functions of wastewater pump stations, it is important to obtain reliable information on the wastewater flow. In the majority of wastewater pump stations in the operating area of Kymen Vesi Oy, volumetric flow measurement is used for measuring wastewater flow. This method has been found to be an inaccurate way of measuring flow at the times when more than the normal amount of water reaches the sewer system. This method is also inaccurate at pumping stations where pumps are controlled by a frequency controller. The objective of this study was to develop a flow measurement which is more accurate than volumetric flow measurement, as well as to investigate the reliability of the developed method.</p> <p>This study started by examining the strengths and weaknesses of the available flow measuring methods. Based on this information, the nominal value flow measurement method was selected to be developed. The relevant wastewater pump performance and pressure sewer related concepts as well as their calculation principles, were assessed. The baseline pressure pipe information required for nominal value flow measurement can be found through theoretical calculations or practical pressure test measurements. These two methods were compared and pressure test measurements were estimated to be more reliable.</p> <p>A compensation to the nominal value flow measurement method was developed, which takes into account the change of the pumping station tank level and change of the pump operating frequency on the flow measurement outcome. Compensated nominal value flow meter devices were created using Unitronics Vision120 programmable logic controllers, for which parametrized limit values were pre-calculated using a calculation form in Excel. In order to verify the results of the developed measuring devices, they were installed onto step- and frequency-operated pumping stations which already have a reliable known electromagnetic flow meter installed. The follow-up period lasted 14 days, and the results of the whole follow-up period was that 28.2% greater amount of water was recorded than the reference measurement at a step-operated pumping station. At a frequency-operated pumping station, the reading was 8.8% lower than the reference measurement.</p> <p>On the basis of this study, it was decided to leave one of the developed measuring devices for continuous use at the second comparison site, Kotkansaari pumping station. In the future, the measuring device will be used for tracking sewer network leaks at the waste water pumping stations in problem areas.</p>		
Keywords		
flowmeter, development, nominal value method, pumping station		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	VIRTAUSMITTAUKSEN TARVE VIEMÄRIVERKOSTOSSA	8
3	JÄTEVESIPUMPPAAMOT	8
3.1	Jäteveden pumppaamisen tarve.....	8
3.2	Jätevesipumppaamo.....	9
4	JÄTEVESIPUMPPAAMON OHJAUS	10
4.1	Pinnansäätölaite	10
4.1.1	Ohjelmoitava logiikka	11
4.1.2	Perusominaisuudet	11
4.1.3	Tietoliikenneyhteydet	11
4.2	Ohjaustapa 1: porraskäyttö.....	11
4.3	Ohjaustapa 2: taajuuskäyttö	12
4.4	Taajuusmuuttajan periaate	12
5	JÄTEVEDEN VIRTAAMAN MITTAUSTAVAT	12
5.1	Astiamittaus	13
5.2	Sähkömagneettinen virtausmittaus.....	16
5.3	Pumpun nimellistuottomenetelmään perustuva virtausmittaus	17
6	PAINEVIEMÄRI	18
6.1	Putkiston painehäviö.....	19
6.1.1	Kitkakerroin	19
6.1.2	Reynoldsin luku.....	20
6.2	Putken sisäpinnan suhteellinen karheus.....	20
6.3	Putken sisähalkaisija	21
6.4	Paikallisvastukset	21
7	ESIMERKKILASKELMA 1: PUTKISTON VASTUSKÄYRÄN MÄÄRITTÄMINEN	22
8	JÄTEVESIPUMPPU	26
8.1	Uppopumppu	26
8.2	Kuiva-asenteinen pumppu	27
8.3	Itseimevä kuiva-asenteinen pumppu	27

8.4	Pumpun ominaiskäyrä	28
8.4.1	Affiniteettisäännöt.....	28
8.4.2	Pumpun toimintapiste.....	29
9	ESIMERKKILASKELMA 2: AFFINITEETTISÄÄNNÖT	30
10	VERTAILUKOHDE 1: EKOPARKIN JÄTEVESIPUMPPAAMO.....	33
10.1	Ekoparkin jätevesipumppaamon teoreettinen tarkastelu	34
10.2	Ekoparkin pumppaamon kokeellinen tarkastelu	36
10.3	Ekoparkin pumppaamon vertailumittaus 1	38
10.4	Ekoparkin pumppaamon vertailumittaus 2	39
10.5	Ekoparkin pumppaamon yhteenveto	40
11	VERTAILUKOHDE 2: KOTKANSAAREN JÄTEVESIPUMPPAAMO	41
11.1	Kotkansaaren pumppaamon teoreettinen tarkastelu	41
11.2	Kotkansaaren pumppaamon käytännön tarkastelu.....	44
11.3	Kotkansaaren pumppaamon vertailumittaus.....	46
11.4	Kotkansaaren pumppaamon yhteenveto	47
11.5	Vertailukohdemittauksien päätelmät.....	48
12	KOMPENSOITUUN PUMPUN NIMELLISTUOTTOMENETELMÄÄN PERUSTUVAN MITTALAITTEEN SUUNNITTELU.....	48
12.1	Virtausmittaus ohjelman ominaisuudet	49
12.2	Ohjelmoitavan logiikan I/O liitynnät.....	50
12.3	Logiikan valinta.....	50
12.4	Raja-arvojen laskeminen	50
12.5	Kompensoidun tilavuusvirran laskeminen porraskäyttö ohjaustavalla.	52
12.6	Kompensoidun tilavuusvirran laskeminen taajuuskäyttö ohjaustavalla.....	52
12.7	Ohjelmointi.....	53
12.8	Ohjelman testaus	53
13	MITTALAITTEEN VALMISTUS JA KÄYTTÖÖNOTTO	54
13.1	Mittalaitteen valmistus	54
13.2	Käyttöönotto	55
13.3	Tulosten seuranta	56
13.4	Ekoparkin pumppaamon seurantajakso.....	56

13.5	Kotkansaaren pumppaamon seurantajakso	57
14	YHTEENVETO.....	58
	LÄHTEET.....	60
	LIITTEET	

Liite 1. Putken karheuden ohjearvoja
Muoviputkijärjestelmät veden johtamiseen ja paineviemäröintiin
Paikallisvastukset

Liite 2. Veden ominaisuuksia
Kitkakerroin kaavat

Liite 3. Moodyn käyrästä

Liite 4. Hidrostal D04M-EMU ominaiskäyrä

Liite 5. Grundfos S1.100.200.170.4.54L.S.285.G.N.D ominaiskäyrä

Liite 6. Flygt NP 3171 MT 3 ominaiskäyrä

Liite 7. Unitronics Vision120 V120-22-R2C ominaisuudet
Unitronics IO-AI4-AO2 ominaisuudet
Mittalaitteen komponenttien listahinnat

Liite 8. Sähkömagneettisen virtausmittauksen laitteistokustannukset

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan työnantajani Kymen Vesi Oy:n toimesta jätevesipumppaamoiden virtausmittauksen tarkkuuden parantamista kahdessa seurantakohteessa.

Tavoitteeksi on asetettu luotettavamman ja kustannustehokkaan virtausmittauksen kehittämisen nykyisen jätevesipumppaamoilla käytetyn astiamittauksen korvaajaksi, sekä kehitetyn menetelmän luotettavuuden todentaminen. Yleisesti käytetty sähkömagneettinen virtausmittaus on luotettava jätevesien mittaamisessa, kyseisen mittauksen huonona puolena on sen hankinta- ja asennuskustannus. Pumpun tuottoon perustuva virtausmittaus on puolestaan astiamittauksen tavoin pinnansäätölaitteen laskentaan perustuva mittaustapa, sen huonona puolena on epäluotettavuus. Juuri tätä mittausmenetelmää on tarkoitus kehittää luotettavammaksi kompensoimalla pumpun tuottoa nostokorkeuden muutoksen mukaan porraskäyttöisissä pumppaamoissa, sekä pumpun kierrosnopeuden muutoksella taajuuskäyttöisissä kohteissa.

Aiheen teoreettinen tarkastelu suoritetaan laskemalla putkiston vastuskäyrä ja tutkimalla pumpun ominaiskäyriä, sekä selvittämällä pumpun tuottoon perustuvaan mittaukseen vaikuttavat muuttujat. Saadut tiedot käsitellään Bernoullin lakiin perustuvalla laskennalla. Tämän jälkeen tehdään valituissa vertailukohteissa pumppaamoissa tarvittavat paineviemärin painekoemittaukset. Saatujen tulosten pohjalta valitaan luotettavampi virtaaman laskentatapa teoreettisen ja mittauksiin perustuvan väliltä.

Teoreettisen tutkimisen jälkeen suunnitellaan ohjelmoitavalla logiikalla toteutettava kompensoituun nimellistuottomenetelmään perustuva mittalaitte. Ohjelmoitava logiikka valitaan tarvittavien ominaisuuksien mukaisesti. Mittalaitteita on tarkoitus valmistaa kaksi kappaletta, joista toinen sijoitetaan ohjaustavataan porraskäyttöiseen pumppaamoon. Tällöin molemmista käytössä olevista ohjaustavoista saadaan vertailutietoa. Seurantakohteet valitaan pumppaamoista, joissa sähkömagneettinen virtausmittaus on valmiiksi asennettuna, tällöin voidaan verrata kehitetystä mittalaitteesta saatua virtaamietoa luotettavaksi todettuun mittaustapaan.

Työn laajuus on rajattu käsittelemään valmistettavan virtausmittauslaitteen luotettavuuden todentamista kahdessa eri ohjaustavalla toimivassa jätevesipumppaamossa. Teoria osuudessa tullaan käsittelemään ainoastaan Kymen Vesi Oy:n käytössä olevia jätevesipumppaamo- ja laitteistotyypppejä.

2 VIRTAUSMITTAUKSEN TARVE VIEMÄRIVERKOSTOSSA

Jätevesiverkoston kuntoa voidaan arvioida sadanta ja lämpötilatietojen, sekä asiakkaille toimitetun talousveden määrän mukaan. Arviointi tehdään vertaamalla kyseisiä tietoja jätevesipumppaamon virtaamaan. Yleisimpiä jätevesiverkoston ongelma kohtia ovat sekaviemäröinti, betonirengaskaivojen tiiveysongelmat, halkeamat putkistossa ja juurakoiden aiheuttamat vauriot. Näistä vaurioista hulevesi kulkeutuu jätevesiverkostoon aiheuttaen virtaaman lisääntymistä. (Pulkinen 2017.)

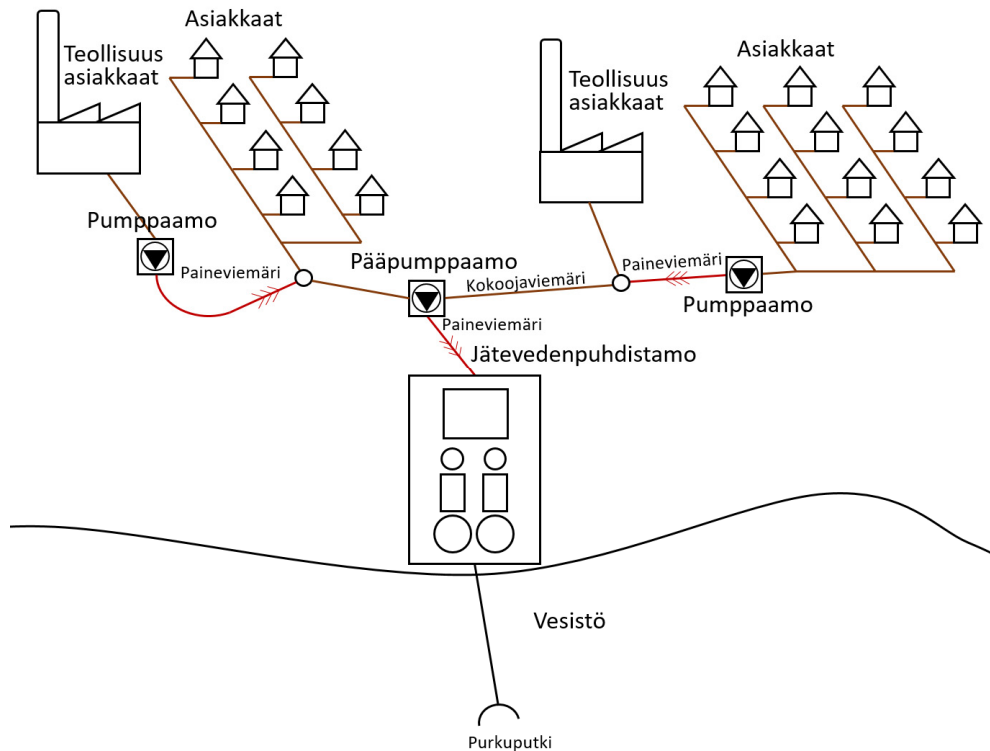
Paineputken molempiin päihin asennetulla virtausmittauksella voidaan todeta paineputken olevan vuotamaton, jolloin putken molemmissa päissä virtaaman tulee olla saman suuruinen. Pumppaamoissa esiintyvien ongelmien toteaminen ja selvittäminen helpottuvat mahdollisimman tarkan virtaamatiedon ansiosta. Pumppaamoiden ja verkostojen suunnittelussa on tärkeää saada mahdollisimman tarkkoja lähtötietoja, jotta mitoitus voidaan toteuttaa oikein. (Mäkitalo 2017.)

3 JÄTEVESIPUMPPAAMOT

Kymen Vesi Oy:n toimialueella, johon kuuluvat Kotka, Pyhtää ja Kouvola (entisen Anjalankosken alue) sijaitsee yhteensä 211 jätevesipumppaamo.

3.1 Jäteveden pumppaamisen tarve

Tarve pumpata jätevettä syntyy tilanteessa, jolloin jätevettä ei pystytä johtamaan painovoimaan perustuvana virtauksena viettoviemärissä. Syinä tähän ovat maaston korkeuserot, pitkä viettoviemäri, vesistön alitukset ja jätevesipuhdistamolle saapuvan veden riittävän korkeuseron aikaansaaminen, jotta vesi voi kulkea painovoimaisesti puhdistusprosessin läpi. (Karttunen 1999, 166–167.)



Kuva 1. Jätevesiverkoston periaatekuva

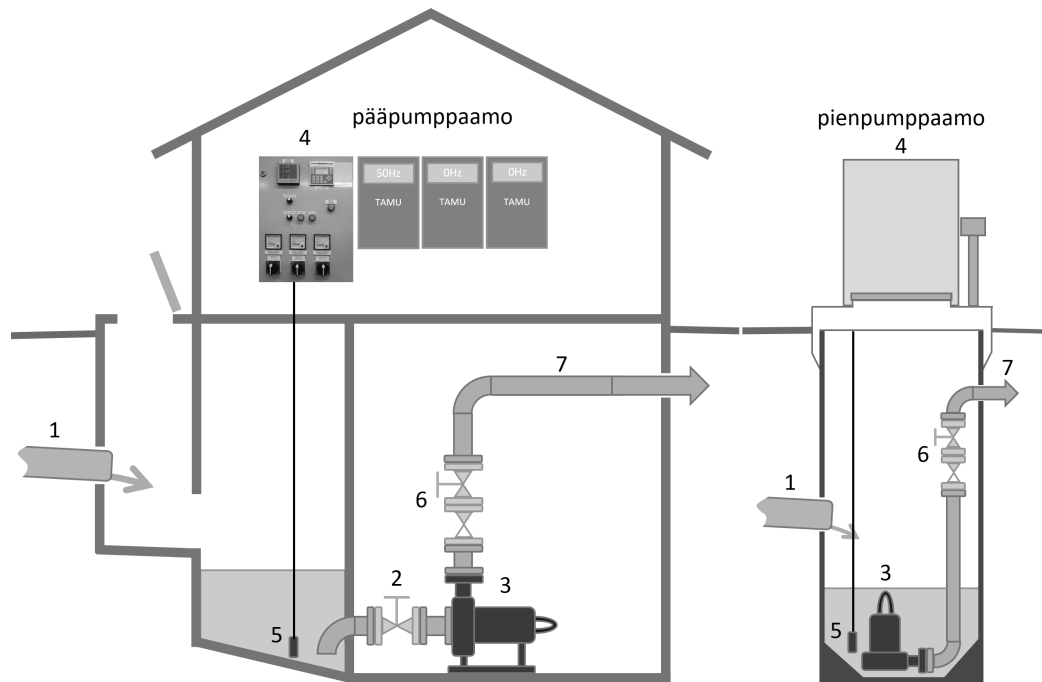
3.2 Jätevesipumppaamo

Jätevesipumppaamo koostuu jätevesisäiliöstä, rakennuksesta, koneistosta, sekä putkistosta. Säiliön materiaaleina käytetään lujitemuovia tai betonia. Suurimmissa pääpumppaamoissa käytetään kuivantilan pumppuja, jotka ovat sijoitettu pumppuhuoneeseen, ja vastaavasti pienpumppaamoissa käytetään jätevesisäiliöön sijoitettuja uppopumppuja. (Karttunen 1999, 168–171.)

Jätevesisäiliön tarkoitus on puskuroida eteenpäin pumpattavaa jätevettä, kunnes pinnansäätölaite ohjaa pumpun käyntitilaan. Säiliö on valmistettu pääpumppaamoissa betonista ja pienpumppaamoissa lujitemuovista.

Koneistoon kuuluvat jätevesipumput ja ohjauslaitteet. Pumppujen käyntiä ohjataan koneistolaitteistoon kuuluvalla pinnansäätölaitteella, joka on sijoitettu pumppaamon ohjauskeskukseen. Pinnansäätölaite ohjaa pumppujen käyntiä säiliöön sijoitetun paineanturin avulla. (Karttunen 1999, 168.)

Putkistoon kuuluvat pääpumppaamoissa imuputki, imuputken sulkuventtiili, takaiskuventtiili ja paineputken sulkuventtiili. Pienpumppaamoissa käytetään uppopumppuja, joten imuputkelle ei ole tarvetta.



Kuva 2. Jätevesipumppaamon periaatekuvat

Jätevesipumppaamon peruskomponentit:

1. Tuloviemäri
2. Imuputken sulkuventtiili
3. Jätevesipumppu
4. Ohjauskeskus
5. Pinnansäätölaitteen paineanturi
6. Takaisku- ja sulkuventtiili
7. Lähtevän jäteveden paineputki

4 JÄTEVESIPUMPPAAMON OHJAUS

Jätevesipumppaamon pumppujen ohjaus tapahtuu pinnansäätölaitteen avulla. Ohjaustapoja on kaksi, porraskäyttö ja taajuuskäyttö. Näistä porraskäyttö on yleisin.

4.1 Pinnansäätölaite

Kymen Vesi Oy:n käytössä on nykyaikaisia Ab Lining Oy:n valmistamia Aqva-Semi- ja AqvaMaxi-pinnansäätölaitteita, joista kaikki ovat etävalvottuja. Pinnansäätölaitteet perustuvat yleisesti saatavilla olevaan ohjelmoitavaan logiikkaan, joista Lining Automaatio on rakentanut pumppauskohteen ohjaus- ja valvontatuotteen (Lining AqvaSemi 2014, 1).

Pinnasäätölaite ohjaa ja valvoo pumppaamon toimintaa, sekä kerää historia-tietoa ja kommunikoi etävalvontajärjestelmän kanssa (Lining AqvaSemi 2014, 1).

4.1.1 Ohjelmoitava logiikka

Ohjelmoitava logiikka on itsenäisesti toimiva automaatiojärjestelmä, joka suorittaa siihen ladattua vaiheittaisesti etenevää sovellusohjelmaa (Kippo & Tikka 2008, 54). Laite koostuu digitalisista ja analogisista tuloista ja lähdöistä, keskusyksiköstä ja muistista. Laitteen perusajatuksena on ohjata tulotietojen mukaan sovellusohjelman tekemät päätellyt laitteen lähtöihin. (Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry 1991, 193.)

4.1.2 Perusominaisuudet

Perusominaisuuksiin kuuluvat pumppujen kunnonvalvonta, sisältäen virranmittauksen ja suojalaittevalvonnan. Suojalaitteita ovat lämpörele ja vaihevahti, sekä pumpun sisäinen kosteusrele ja sähkömoottorin staattorin lämpösuoja. (The Sewage Pumping Handbook 2004, 90.)

Pumppaamosäiliön pinnankorkeutta mitataan paineanturilla, joka on sijoitettu lähelle pumppaamon pohjaa (The Sewage Pumping Handbook 2004, 89). Pinnankorkeuden mukaan voidaan määrittää pumppujen käynnistys- ja pysäytysrajat, sekä pumppaamosäiliön ylä- ja alahälytysrajat.

4.1.3 Tietoliikenneyhteydet

Kommunikointiin etävalvontajärjestelmän kanssa käytetään yleisesti GPRS-modeemia, muita yhteystapoja ovat radiomodeemi, sekä suora Ethernet IP-verkko yhteys (Lining AqvaSemi 2014, 1). Etävalvontajärjestelmän kautta voidaan vastaanottaa pumppaamon historiatietoja ja hälytyksiä. Pinnansäätölaitteen säätöarvoja voidaan myös muuttaa etävalvontajärjestelmän kautta.

4.2 Ohjaustapa 1: porraskäyttö

Porraskäytöllä pumppuja käytetään käynnistys- ja pysäytysrajojen välissä täydellä kierrosnopeudella, tätä voidaankin kutsua on/off ohjaustavaksi (Lining AqvaSemi 2014, 2). Porraskäyttöisiä pumppuja on yhdestä kolmeen kappaleeseen jätevesipumppaamoilla riippuen tulovirtaaman suuruudesta. Normaali-

kana pumput käyvät yksitellen ja vuorotellen, jolloin niiden käyntiajat ovat tasaisia. Lumien sulaessa ja rankkasateilla täytyy viemärirakenteesta johtuen osassa pumppaamoita käyttää useampaa pumppua samanaikaisesti. Tämä tapahtuu pinnan noustessa lisärajalte. Tämän ohjaustavan vahvuuksia ovat yksinkertainen ohjaus ja edullinen perustamiskustannus.

4.3 Ohjaustapa 2: taajuuskäyttö

Taajuuskäytöllä tarkoitetaan pumpun kierrosnopeuden muuttamista pumppaamon säilön pinnankorkeuden mukaan. Pinnansäätölaite ohjaa taajuusmuuttajaa lisäten pumpun kierrosnopeutta pumppaamosäiliön pinnan noustessa ja vastaavasti vähentää sitä pinnankorkeuden laskiessa, joten näin pinnansäätölaite pitää pinnan tasapainotilassa (Borg & Sarvanne 1979, 82). Tämä ohjaustapa on käytössä kaikilla Kymen Vesi Oy:n pää- ja siirtolinjapumppaamoilla. Suurimpana etuna kyseisessä ohjaustavassa on pumppaamolta uloslähtevän virtaaman tasaisuus. Jos pumppu käy porraskäytöllä ja käytössä on taajuusmuuttaja, voidaan pumpun toimintapistettä muuttaa säätämällä kierrosnopeutta, jolloin on mahdollista säästää sähköenergiaa (The Sewage Pumping Handbook 2004, 78).

4.4 Taajuusmuuttajan periaate

Taajuusmuuttajalla voidaan vaikuttaa sähkömoottorikäytölle syötettävän vaihtojännitteen ja -virran taajuuteen. Taajuuden muunto tapahtuu kolmessa vaiheessa. Ensin sähköverkosta saatava 50 Hz:n kolmivaiheinen jännite muutetaan sykkiväksi tasajännitteeksi tasasuuntaajaosassa. Seuraavaksi tasajännitteen välipiiri suodattaa sykkivän tasajännitteen tasaiseksi. Viimeisessä vaiheessa vaihtosuuntaajayksikkö tekee tasasähköstä halutun taajuista ja jännitteellistä vaihtosähköä, jolloin sähkömoottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia voidaan kontrolloida portaattomasti prosessin vaatimalla tavalla. (Kauppila, Tiainen & Ylinen 2008, 36).

5 JÄTEVEDEN VIRTAAMAN MITTAUSTAVAT

Suurimassa osassa Kymen Vesi Oy:n toimialueella sijaitsevilla jätevesipumppaamoissa on käytössä pinnansäätölaitteeseen integroitu virtausmittaus, jonka toiminta perustuu astiamittausperiaatteeseen. Astiamittaus on useimmissa jätevesipumppaamoissa riittävän tarkka vesimäärän mittausmenetelmä

toiminnan seuraamiseen. Mittausvirhettä syntyy kuitenkin kohteissa, joihin kulkeutuu suuria määriä vuoto- ja hulevettä rankkasateilla ja keväisin lumien sulassa.

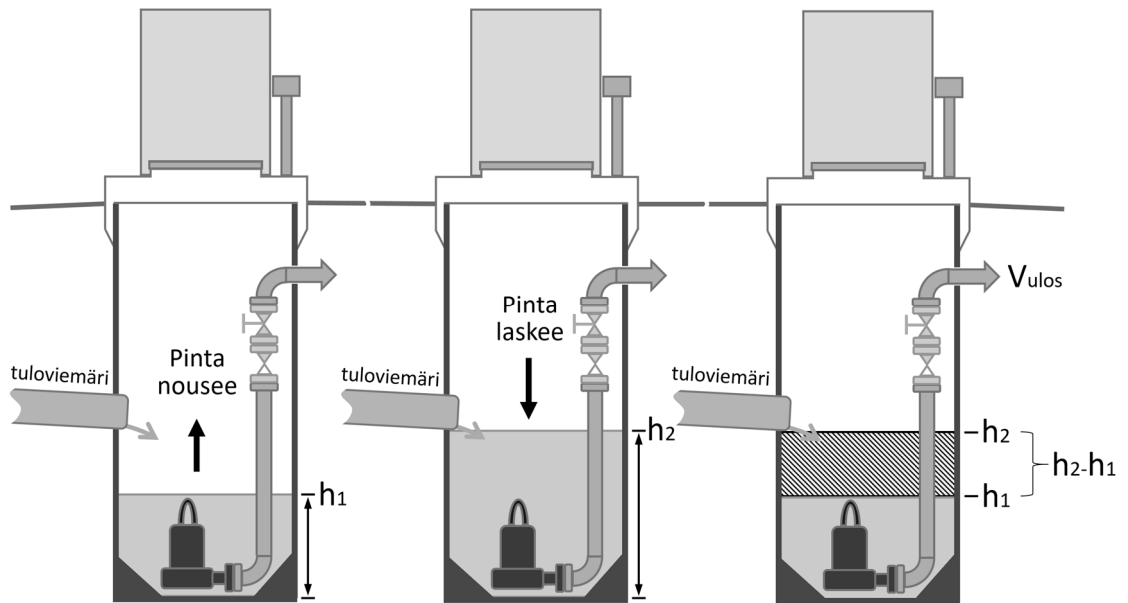
Toinen pinnansäätölaitteeseen integroitu virtausmittaustapa on nimellistuotto-menetelmä. Tätä menetelmää ei kuitenkaan ole otettu käyttöön Kymen Vesi Oy:n pumppaamoilla, koska se ei osaa laskea pumpun kunnon seuraamiseen tarvittavaa laskennallista tuottoa. Menetelmän toinen heikkous on asetusarvoksi annettavan pumpun nimellistuoton määrittäminen, koska siihen vaikuttavat useat tekijät.

Kymen Vesi Oy:n pääpumppaamoiden ja teollisuusjätevesisopimuksen mukaisen laskutettavien jätevesien mittaamiseen käytetään luotettavaksi tunnettuja sähkömagneettisia virtausmittareita. Jälkikäteen asennettuna sähkömagneettisista virtausmittareista aiheutuu huomattava kustannus, koska suurimassa osassa pumppaamoita ei ole tilaa sisäiselle asennukselle. Tällöin virtausmittari on asennettava erilliseen maahan asennettavaan mittakaivoon.

5.1 Astiamittaus

Astiamittaus on jätevesipumppaamon pinnansäätölaitteeseen integroitu toiminto, joten sen käyttöönotto ei aiheuta lisäkustannuksia. Kyseinen mittaus on käytössä suurimassa osassa Kymen Vesi Oy:n jätevesipumppaamoita.

Astiamittaus perustuu nimensä mukaisesti astian tilavuuden mukaan tehtävään nesteen määrän mittaamiseen. Pumpattavan nesteen määrä voidaan laskea säiliön pohjan pinta-alan ja nesteen pinnankorkeuden muutoksen mukaan. Pumppaamosäiliön täyttymis- ja tyhjentymissaikojen ollessa tiedossa, voidaan menetelmällä myös määrittää pumppaamoon tulevan nesteen virtaama ja pumpun tuotto. (The Sewage Pumping Handbook 2004, 92.)



Kuva 3. Astiamittausperiaate

Poistuvan veden tilavuus lasketaan pumppaamosäiliön maksimi- ja minimi pinnankorkeuksien, säiliön pohjan pinta-alan, sekä täyttymis- ja tyhjentymisaikojen perusteella. Maksimi pinnankorkeus on useasti pumpun käynnistysraja, sekä minimipinnankorkeus pysäytysraja. Pysäytysrajan jälkeen veden pinnan on kuitenkin mahdollista laskea, johtuen paineputkiston geodeettisesta korkoerosta, joka voi saada aikaan lappoilmiön. Kun tiedossa ovat pumppaamosäiliön täyttymis- ja tyhjentymisaikat, voidaan laskea poistuvan veden tilavuus. (Isohanni 2016.)

$$V_{ulos} = \frac{A \cdot (h_2 - h_1)}{t_{täyttö}} \cdot t_{tyhj} + A \cdot (h_2 - h_1) \quad (1)$$

jossa	V_{ulos}	pumppausjakson vesimäärä	[m ³]
	A	pumppaamosäiliön pohjan pinta-ala	[m ²]
	h_2	mittausjakson maksimipinnankorkeus	[m]
	h_1	mittausjakson minimipinnankorkeus	[m]
	$t_{täyttö}$	pumppaamosäiliön täyttymisaika	[s]
	t_{tyhj}	pumppaamosäiliön tyhjentymisaika	[s]

Kymen Vesi Oy käyttää pääasiassa Lining Oy:n valmistamia AqvaSemi pinnansäätölaitteita pumppaamoiden valvomiseen ja ohjaamiseen. Lining Oy on lisännyt kaksi ominaisuutta astiamittaukseen, jotka parantavat sen luotetta-

vuotta. Ensinnäkin pumppujen tuotto lasketaan 10 pumppauksen keskiarvosta, joten pienet virtaaman muutokset eivät vaikuta pumppujen laskennalliseen tuottoon. Toinen lisätty ominaisuus on pumpun tulovirtaaman mittaaminen pinnan noustessa viimeisen 10 cm:n matkalta. Näin mitattaessa saadaan tarkempi tulovirtaaman arvo sen ollessa epätasaista. Tällainen tilanne on esimerkiksi pitkien siirtolinjojen yhteydessä, jolloin edellinen pumppaamo pumppaa veden ryöppynä seuraavalle. Toisena etuna tästä on, ettei pumpun tuottoon ole vaikutusta, vaikka huoltokäynnin yhteydessä pinnankorkeutta mittaava paineanturi laskettaisiin puhdistuksen jälkeen liian nopeasti takaisin pumppaamosäiliöön. (Isohanni 2017.)

Lumien sulaessa ja rankkasadeaikoina astiamittaus ei pysty mittaamaan virtaamaa luotettavasti tilanteessa, jolloin pumppaamoon tulee pitkällä aikajaksolla enemmän vettä, kuin se pystyy siirtämään eteenpäin. Tästä johtuen pumppaamosäiliön pinta nousee, vaikka kaikki pumput kävisivät jatkuvasti. Pumppaamon käydessä pitkiä ajanjaksoja pinnan saavuttamatta pysäytysrajaa, pinnansäätölaite tulkitsee pumpun laskennallisen tuoton alenevan ja laskennallisen virtaaman tämän vuoksi pienenevän. Astiamittauksen virhe kasvaa myös säiliön vedenpinnan ylittäessä hetkellisesi pumppaamon tuloputken, tällöin pumppaamon säiliön tilavuus lisääntyy tuloviemäriin mahtuvan jäteveden verran. Näistä rajoituksista johtuen ei ole myöskään mahdollista käyttää astiamittausta taajuusmuuttajaohjattujen pumppujen kanssa, koska taajuuskäytöllä jätevettä pumpataan tasaisesti mahdollisimman pitkiä ajanjaksoja. (Mäkitalo 2017.)

Vahvuudet

- Edullinen, toiminto sisältyy jätevesipumppaamon pinnansäätölaitteeseen.
- Kertoo myös pumpun laskennallisen tuoton.

Heikkoudet

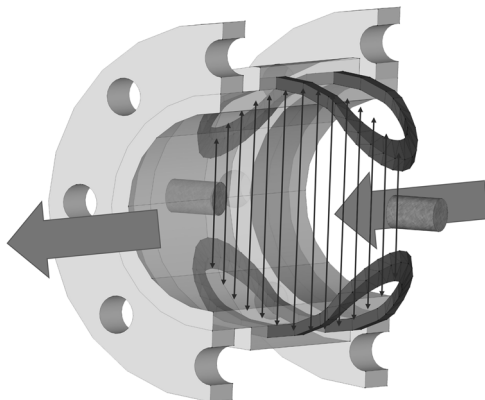
- Luotettava ainoastaan tasaisella virtaamalla.
- Epäluotettava tilanteissa, jolloin pumppaamolle tulevan veden määrä ylittää pumpun maksimituoton.
- Ei toimi taajuusohjatuissa pumppaamoissa, jos ajetaan tasapintaa.

- Vaatii pinta-anturin kunnan seuraamista, koska virityksen eläminen aiheuttaa mittavirhettä.

5.2 Sähkömagneettinen virtausmittaus

Sähkömagneettinen virtausmittaus on todettu luotettavaksi mittaustavaksi jäteveden virtaaman mittauksessa. Koska mittaus vaatii mittaelementin olevan täynnä nestettä, virtausmittarin mittaelementti asennetaan pumppaamon sisäiseen paineputkeen tai pumppaamon ulkopuolelle paineviemärin mittakaivoon. Nykyään on saatavilla myös vajaan putken sähkömagneettisia virtausmittareita. Kyseistä mallia ei ole kuitenkaan otettu käyttöön jätevesipumppaamoilla, johtuen täyden putken virtausmittareihin nähden huomattavasti korkeammasta hintatasosta. Mittaelementin sisähalkaisijan suuruus vaikuttaa myös hankintakustannukseen ja koska pumppaamon tuloputki on vähintään kaksi kertaa paineputkea suurempi, ei tulopuolelle asennettavalle virtausmittaukselle ole perusteita.

Sähkömagneettinen virtausmittaus perustuu Faradayn induktioperiaatteeseen: Johtimen liikuessa kohtisuoraan magneettikentän voimaviivoja vasten, indusoituu johtimeen jännite. Sähkömagneettisessa virtausmittarissa johtimen sijasta käytetään virtaavaa nestettä. Indusoitunut jännite on lineaarisesti riippuvainen nesteen virtausnopeudesta, eikä siihen vaikuta nesteen tiheys, viskositeetti, paine tai lämpötila. Mittari ei ole herkkä epäpuhtauksille, eikä se aiheuta paineputkistoon virtausvastusta käytännössä lainkaan. (Bohl 1984, 232–233.)



Kuva 4. Sähkömagneettisen virtausmittarin periaatekuva

Virtausmittauksen virtaamatieto voidaan siirtää hetkellisarvona pinnansäätölaitteen analogiatuloon hetkellistä seuranta varten. Kumulatiivinen virtaamatieto on yhdistetty pinnansäätölaitteen pulssituloon, johon virtausmittari antaa

yhden kuutiometrin välein vesimääräpulssein ja pinnansäätölaite siirtää tiedon talteen pumppaamovalvontajärjestelmän tietokantaan.

Sähkömagneettisen virtausmittauksen huonona puolena on laitteen asennuskustannus olemassa oleviin kohteisiin, jolloin joudutaan tekemään uusi mittakaivo, paineviemäri-, sähköasennus- ja maansiirtotöitä. Huonoihin puoliin kuuluu myös mittauselementin mahdollinen liettyminen, aiheuttaen virhettä mitaustarkkuuteen.

Vahvuudet

- Luotettava riippumatta pumppaamon ohjaustavasta.
- Luotettava riippumatta jäteveden laadusta.

Heikkoudet

- Asennuksesta nykyisiin pumppaamoihin aiheutuu runsaasti kustannuksia, joita ovat maansiirtotyöt, mittakaivon hankinta, putkistomuutokset, työnäkainen ohipumppaus ja sähkötyöt.
- Teollisuusjätevesiä pumpattaessa joudutaan virtausmittauselementti ajoittain irrottamaan paineputkistosta puhdistuksen ajaksi.

5.3 Pumpun nimellistuottomenetelmään perustuva virtausmittaus

Nimellistuottomenetelmään perustuvaa virtausmittausta ei ole käytetty Kymen Vesi Oy:n jätevesipumppaamoilla, koska suurimpana haittana verrattuna astiamittaukseen on pumpun laskennallisen tuoton puuttuminen. Laskennallista tuottotietoa käytetään pumpun kunnon seurantaan. Koska pumpun tuottoon vaikuttavat pumppaamosäiliön pinnankorkeus ja pumpun käyntitaajuus, ei nimellistuottomenetelmää voi pitää luotettavana virtausmittaus tapana.

Pumpun nimellistuottoon perustuvassa mittaustavassa lasketaan pumpun nimellistuoton ja käyntiajan tulo, josta saadaan tulokseksi lähtevä vesimäärä, kuten kaavassa 2 on esitetty (Lining AqvaSemi 2014, 7).

$$V_{ulos} = q_{pump} \cdot t_{pump} \quad (2)$$

jossa	V_{ulos}	pumppausjakson vesimäärä	[l]
	q_{pump}	pumpun nimellinen tuotto	[l/s]
	t_{pump}	pumppaus aika	[s]

Mittauksen luotettavuutta voidaan parantaa tekemällä painekoemittaukset pumppaamon paineputkeen asennettavalla painemittarilla. Saatuja tuloksia verrataan pumpun ominaistuottokäyrään, jolloin saadaan selville tarkka pumpun tuotto. Jätevesipumppaamon säiliön pinnan tulee olla mittaushetkellä pumpun käynnistys- ja pysäytysrajojen keskiarvossa, koska pumppaamosäiliön pinnankorkeus on pumpun nostokorkeuden muuttuja. Jos käytössä on useampi pumppu ja ohjaustapa sallii yhtäaikaisen käytön, täyttyy painekoe suorittaa myös näiden yhtäaikaisella käynnillä.

Vahvuudet

- Tarkka mittaustapa tasaisella virtaamalla ja oikein määriteltynä.
- Paineanturin eläminen ei vaikuta virtaamaan.

Heikkoudet

- Käyttöönotto hankalaa, vaatii painekokeen ja pumpun ominaiskäyrän tutkimista.
- Ei toimi oikein pumppaamoissa, joiden ohjaustapana on taajuussäätö.
- Ei ota huomioon pinnankorkeuden muutosta, joka vaikuttaa pumpun tuottoon.
- Pumpun kunnon seurantaan tarvittavaa laskennallista tuottoa ei ole mahdollista laskea.

6 PAINEVIEMÄRI

Jätevesiverkoston paineen alaisena toimivia johto-osia käytetään johdettaessa jätevettä maaston alemmasta kohdasta ylempään kohtaan, sekä vesistöjen alituksessa. Paineviemäri alkaa jätevedenpumppaamosta ja päättyy purkukai-
voon tai jätevedenpuhdistamolle. (RIL 124-2 Vesihuolto II 2004, 470–471.)
Putkimateriaaleina käytetään PEH-muovia, valurautaa ja terästä. Staattisella nostokorkeudella tarkoitetaan yksinkertaisimmillaan paineviemäriin alku- ja

loppupään vesipinnan korkeuseroa ja dynaamisella nostokorkeudella putkiston sisäistä virtausnopeuden mukaan muuttuvaa virtausvastuksesta johtuvaa painehäviötä.

Putkiston staattisen ja dynaamisen nostokorkeuden mukaan voidaan määrittää sen virtausominaisuuksia kuvaava putkiston vastuskäyrä, josta selviää tilavuusvirran suhde nostokorkeuteen.

6.1 Putkiston painehäviö

Suoran putken dynaaminen painehäviö lasketaan Bernoullin lakiin perustuvalla kaavalla 3. Kaavassa on otettu huomioon kitkakertoimen ja paikallisvastusten vaikutus putken painehäviöön. Koska putkiston vastuskäyrässä käsitellään dynaamista nostokorkeutta painehäviön sijaa, voidaan dynaaminen painehäviö muuttaa dynaamiseksi nostokorkeudeksi kaavalla 4 tai laskea suoraan dynaamiseksi nostokorkeudeksi kaavalla 5. (Centrifugal Pump Handbook 2011, 188.)

$$\Delta p_{dyn} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (3)$$

$$\Delta H_{dyn} = \frac{\Delta p_{dyn}}{\rho g} \quad (4)$$

$$\Delta H_{dyn} = \frac{\left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{1}{2} \rho w^2}{\rho g} \quad (5)$$

jossa	Δp	painehäviö	[Pa]
	λ	kitkakerroin	[-]
	l	putken pituus	[m]
	d	putken sisähalkaisija	[m]
	$\sum \xi$	paikallaisvastusten summa	[-]
	ρ	virtaavan nesteen tiheys	[kg/m ³]
	w	virtausnopeus	[m/s]
	g	painovoiman kiihtyvyys	[m/s ²]

6.1.1 Kitkakerroin

Kitkakertoimen laskemiseksi täytyy ensin ratkaista Reynoldsin luku. Tämän jälkeen tarvitaan tiedot putken sisäpinnan suhteellisesta karheudesta ja sisähalkaisijasta, jotta kitkakerroin voidaan ratkaista.

6.1.2 Reynoldsin luku

Reynoldsin luku on dimensioton suhdeluku, jonka avulla ilmaistaan virtaukseen vaikuttavien hitausvoimien ja viskositeettivoimien suhde. Suhdeluvun avulla voidaan päätellä virtausmuoto, joita ovat laminaarinen ja turbulenttinen virtaus. Pienemmillä virtausnopeuksilla Reynoldsin luvun ollessa alle 2 320 on virtaus laminaarista, tällöin nesteen osaset liikkuvat kerroksittain putken suuntaisesti, eivätkä osaset sekoitu keskenään. Tässä tapauksessa putken sisäpinnan karheus ei vaikuta virtausvastukseen. Suuremmilla virtausnopeuksilla Reynoldsin luvun ollessa suurempi kuin 2 320 on virtaus turbulenttista eli pyörteisessä, mikä aiheuttaa nesteen osasten jatkuvan sekoittumisen keskenään. Putken seinämän karheus aiheuttaa tämän vuoksi virtausvastuksen lisääntymistä. Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 6. (Bohl 1984 87–88.)

$$Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{\rho wd}{\mu} \quad (6)$$

jossa	<i>Re</i>	Reynoldsin luku	[-]
	<i>w</i>	virtausnopeus	[m/s]
	<i>d</i>	putken sisähalkaisija	[m]
	μ	nesteen dynaaminen viskositeetti	[kg/(ms)]
	ν	nesteen kinemaattinen viskositeetti	[m ² /s]
	ρ	veden tiheys	[kg/m ³]

6.2 Putken sisäpinnan suhteellinen karheus

Putken sisäpinnan tekninen karheus *k* riippuu putken materiaalista ja käytöstä. Putken käytöstä aiheutuu sisäpinnan syöpymistä ja siihen saattaa muodostua ruostumista, joka pienentää putken sisähalkaisijaa. Tämä on otettava huomioon, koska sisähalkaisijan muutos virtaaman turbulenttisella alueella vaikuttaa virtausvastukseen likimain läpimitan viidennessä potenssissa. Putken materiaali ja jäteveden laatu vaikuttavat putken karheuden muutokseen. Putken sisäpinnan suhteellinen karheus lasketaan teknisen karheuden ja sisähalkaisijan mukaan kaavalla 7. (Borg & Sarvanne 1979, 36.)

$$h = \frac{k}{d} \quad (7)$$

jossa	h	putken suhteellinen karheus	[-]
	k	putken tekninen karheus	[mm]
	d	putken sisähalkaisija	[m]

Putken sisäpinnan teknisen karheuden määrittämiseksi käytetään valmiiksi laskettuja taulukkoarvoja, jotka on esitetty liitteessä 1.

6.3 Putken sisähalkaisija

Putken seinämän vahvuus voidaan selvittää ulkohalkaisijan ja paineluokan mukaan liitteestä 1. Sisähalkaisija lasketaan kaavalla 8.

$$d = d_n - 2 \cdot e_n \quad (8)$$

jossa	d	putken sisähalkaisija	[mm]
	d_n	putken nimellinen ulkohalkaisija	[mm]
	e_n	putken seinämän suhteellinen vahvuus	[mm]

6.4 Paikallisvastukset

Muutokset putken sisähalkaisijassa ja muodossa, sekä siihen kiinnitetyt putkistokomponentit aiheuttavat kitka- ja pyörrehäviöitä. Nämä paikallishäviöt lasketaan kaavalla 9. (Borg & Sarvanne 1979, 36.)

$$H_{jn} = \xi \frac{w^2}{2g} \quad (9)$$

jossa	H_{jn}	paikallisvastustenhäviöt	[m]
	ξ	paikallisvastuskerroin	[-]
	w	virtausnopeus	[m/s]
	g	painovoiman kiihtyvyys	[m/s ²]

Virtauksen ollessa tasaista, voidaan putkistokomponenttien paikallisvastukset summata yhteen. Valmiiksi laskettuja paikallisvastusarvoja on saatavilla alan kirjallisuudesta ja putkistokomponenttien valmistajilta. Tässä työssä käytetään valmiiksi laskettuja paikallisvastusarvoja, jotka on esitetty liitteessä 1.

7 ESIMERKKILASKELMA 1: PUTKISTON VASTUSKÄYRÄN MÄÄRITTÄMINEN

Esimerkkilaskelma putkiston vastuskäyrän määrittämisestä annetulla lähtötiedoilla.

Paineviemäriin lähtötiedot

Staattinen nostokorkeus	[m]	7,06
Nimellinen halkaisija d_n	[mm]	315
Paineluokka PN	[bar]	10
Materiaali	[-]	PEH muovi
Pituus	[m]	2 600
Käyttöönottovuosi	[-]	1997
Veden lämpötila	[°C]	20

Putkistokomponentit

Paikallisvastukset

Pallotakaisu	[ξ]	2,25
Kumiluistiventtiili	[ξ]	0,2
T-haara	[ξ]	1,28
90° mutka	[ξ]	0,15
Kumiluistiventtiili	[ξ]	0,2
90° mutka	[ξ]	0,15
Virtausmittari	[ξ]	0,10
Paikallisvastukset yhteensä	[$\Sigma\xi$]	4,33

Pumppujen lähtötiedot

3 kpl rinnankytkettyjä uppopumppua.

Maksimituotto yhteensä 85,5 l/s.

Lasketaan putken sisähalkaisija PEH-putki d_n 315, PN 10 mukaisilla arvoilla, putken seinämän vahvuus katsotaan liitteestä 1. Laskentaan käytetään kaavaa 8.

$$d = 315\text{mm} - 2 \cdot 18,7\text{mm} = 277,6\text{mm}$$

Lasketaan veden virtausnopeus pyöreässä putkessa kaavalla 10. Paine-
viemärin virtausnopeudeksi valitaan jäteveden laadun mukaan suunnitteluvai-
heessa 0,3 - 0,5 m/s, jolloin putkisto ei ahdistavasta virtausta liikaa ja virtausnopeus
pystyy kuljettamaan pois kiintoaineet, kuten hiekan ja orgaanisen aineen
(Borg & Sarvanne 1979, 41).

$$w = \frac{4q_v}{\pi d^2} \quad (10)$$

jossa	w	virtausnopeus	[m/s]
	q_v	tilavuusvirta	[l/s]
	d	putken sisähalkaisija	[m]

$$w = \frac{4 \cdot 0,1 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot (0,2776 \text{ m})^2} = 1,652 \text{ m/s}$$

Reynoldsin luku voidaan nyt ratkaista kaavalla 6.

Veden tiheys ja dynaaminen viskositeetti on esitetty liitteessä 2.

$$Re = \frac{998,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,65 \text{ m/s} \cdot 0,2776 \text{ m}}{0,001 \text{ kg/(ms)}} = 456\,010$$

Re on yli 2320, joten virtaama on turbulენტista.

Jotta putkiston kitkakerroin λ voidaan selvittää Moodyn käyrästä, täytyy en-
sin laskea rajoitus, jonka mukaan tulkitaan käyrästä oikealla alueella.

$$Re \cdot \frac{k}{d} \quad (11)$$

jossa	Re	Reynoldsin luku	[-]
	k	putken tekninen karheus	[mm]
	d	putken sisähalkaisija	[mm]

$$456\,010 \cdot \frac{0,25 \text{ mm}}{277,6 \text{ mm}} = 411$$

Rajoituksen ollessa alle 65 on kyseessä hydraulisesti sileät putket.
 Rajoituksen ollessa yli 1300 on kyseessä hydraulisesti karheat putket.
 Rajoituksen ollessa arvojen 65 ja 1300 välissä on kyseessä ylimenoalue.

Rajoitus on 411, joten Moodyn käyrästä tutkitaan ylimenoalueella.

Lasketaan putken suhteellinen karheus h laskennallisen karheuden ja putken sisähalkaisijan mukaan kaavalla 7. Laskennallisena karheutena käytetään liitteen 1 taulukkoarvo 0,25 mm, joka vastaa vanhan muoviputken arvoa.

$$h = \frac{0,25 \text{ mm}}{277,6 \text{ mm}} = 9,01 \cdot 10^{-4}$$

Putkiston kitkakerroin voidaan nyt selvittää Reynoldsin luvun ja putken suhteellisen karheuden h mukaan Moodyn käyrästä. Kitkakerroin voidaan myös laskea turbulenttisen virtauksen vastuskerroin kaavoilla, jotka on esitetty liitteessä 2. Moodyn käyrästä on esitetty liitteestä 3.

$$\lambda = 0,0198$$

Dynaaminen nostokorkeus määritetään kaavan 5 avulla.

$$\Delta H_{dyn} = \frac{\left(0,0198 \cdot \frac{2\,600 \text{ m}}{0,2776 \text{ m}} + 3,30\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot 998,2 \text{ kg/m}^3 \cdot (1,65 \text{ m/s})^2}{998,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 26,10 \text{ m}$$

Putkiston nostokorkeuden kuvaajaa varten täytyy laskea vakiokerroin k kaavalla 12.

$$k = \frac{H_{dyn}}{q_v^2} \quad (12)$$

jossa	k	vakiokerroin	[-]
	H_{dyn}	dynaaminen nostokorkeus	[m]
	q_v	tilavuusvirta	[l/s]

$$k = \frac{26,10 \text{ m}}{(100 \text{ l/s})^2} = 2,61 \cdot 10^{-3}$$

Pumpun maksimituoton ollessa tiedossa, voidaan putkiston vastuskäyrä määrittää tilavuusvirtapisteiden mukaan. Pisteet lasketaan esimerkiksi 20 l/s välein alueelle 0 – 100 l/s. Laskentaan käytetään kaavaa 13.

$$H = H_{sta} + k \cdot q_v^2 \quad (13)$$

jossa	H	nostokorkeus	[m]
	H_{sta}	staattinen nostokorkeus	[m]
	K	vakiokerroin	[-]
	q_v	tilavuusvirta	[l/s]

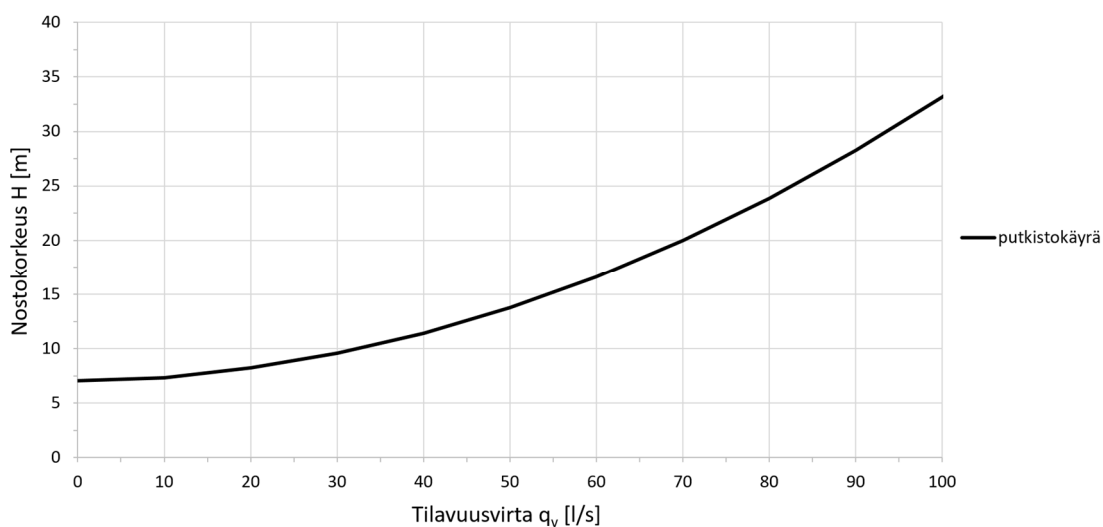
Sijoitetaan tulokseksi saadut arvot taulukkoon 1.

Taulukko 1. Lasketut putkiston vastuskäyrän arvot

q_v [l/s]	H [m]
0	7,1
20	8,2
40	11,4
60	16,6
80	23,9
100	33,1

Tulokseksi saaduista arvoista voidaan piirtää putkistokäyrän kuvaaja.

Kuvan 5 mukaisesta putkiston vastuskäyrästä nähdään tilavuusvirran q_v suhde nostokorkeuteen H .



Kuva 5. Putkiston vastuskäyrä

8 JÄTEVESIPUMPPU

Jätevesipumput eroavat rakenteeltaan puhtaanveden keskipakopumpuista läpäisykyvyn ja akselitiivisteiden osalta. Jätevesipumpun juoksupyörän ja tiivistyksen suunnittelussa on otettu huomioon pumpattavan nesteen seassa olevat kiintoaineet, sekä kuidusta koostuvat sitkeät kappaleet. Pumpun suorituskykyä kuvataan valmistajan mittaamalla ominaiskäyrällä.

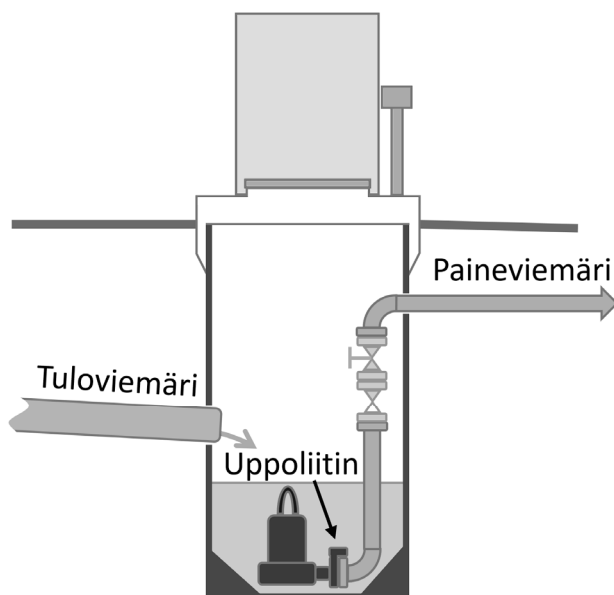
Kymen Vesi Oy:n toimialueella on käytössä kolmea keskipakoperiaatteella toimivaa jätevesipumpputyyppeä. Näitä ovat uppopumppu, kuiva-asenteinen pumppu, sekä itseimevä kuiva-asenteinen pumppu.

Pumpun suorituskykyä kuvataan laitevalmistajan mittaamalla ominaiskäyrällä, joka on riippuvainen affiniteettisääntöjen mukaan pumpun kierrosnopeudesta.

8.1 Uppopumppu

Uppopumput ovat hallitsevassa asemassa viemäriverien pumppaamisessa, koska niillä toteutetut jätevesipumppaamot ovat hankintahinnaltaan edullisimpia. Jätevesipumpuista on muodostunut muista keskipakopumpuista selkeästi poikkeava tuoteryhmä, koska jätevesien sisältämät epäpuhtaudet ovat vaikuttaneet niiden muotoiluun ja teknisiin ratkaisuihin. (Borg & Sarvanne 1979, 5.)

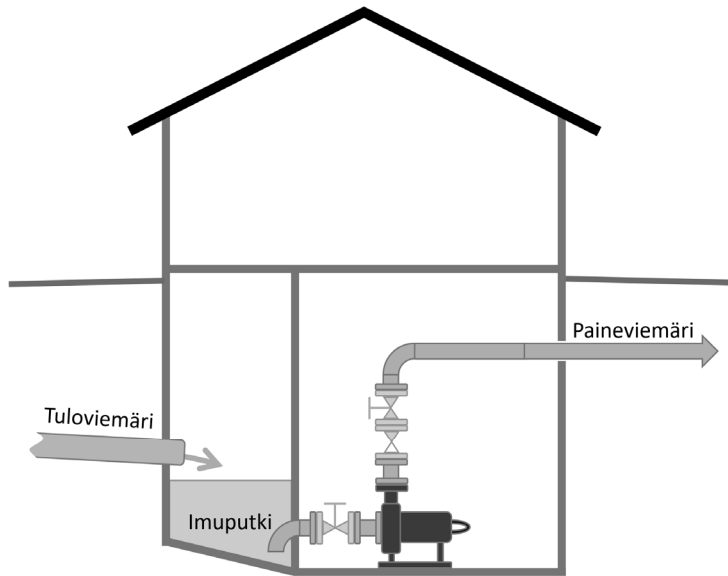
Uppopumppu kiinnittyy paineputkistoon uppoliittimen avulla, tämän liitostavan avulla on mahdollista nostaa pumppu säilöstä ylös ilman mekaanista irrottamista.



Kuva 6. Uppopumpun periaatekuva

8.2 Kuiva-asenteinen pumppu

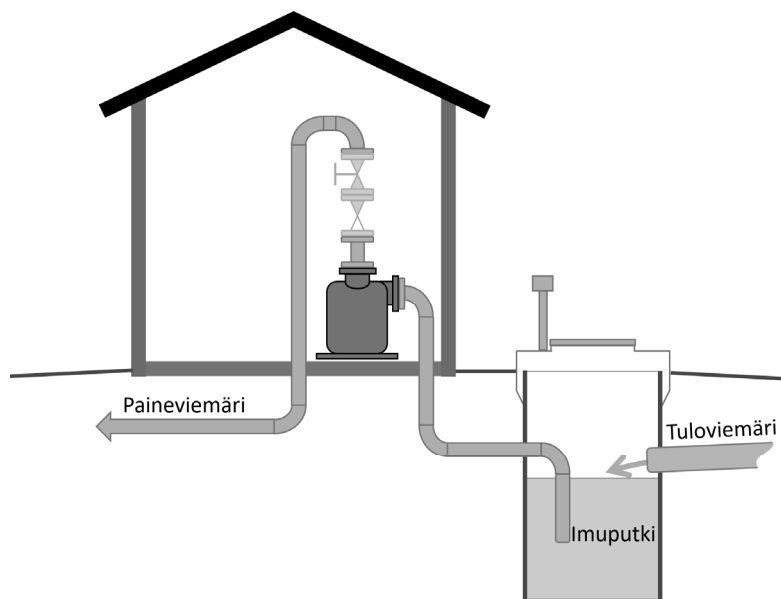
Kuiva-asenteisia pumppuja käytetään rakennusmallisissa pumppaamoissa, joita ovat pääsääntöisesti pääpumppaamot. Kuivantilanpumpun suurin rakenteellinen eroavuus on uppopumppuun verrattuna sähkömoottorin jäähdytys, joka on toteutettu kierrättämällä pumpattavaa vettä sähkömoottorin staattorin ulkopuolella olevassa vaipassa. Tätä pumpputyyppiä on myös saatavilla ilmajäähdytteisellä sähkömoottorilla.



Kuva 7. Kuiva-asenteisen jätevesipumpun periaatekuva

8.3 Itseimevä kuiva-asenteinen pumppu

Itseimeviä kuiva-asenteisia pumppuja käytetään huoltorakennuksella varustetuissa pumppaamoissa, joiden imusäiliö on sijoitettu huoltorakennuksen ulkopuolelle. Tässä pumpputyyppissä käytetään ilmajäähdytteistä sähkömoottoria, joten pumpun akselitiivisteiden pettäessä ei sähkömoottoriin pääse vettä. Pumpun vesikammion tyhjentäessä vedestä huollon yhteydessä, saadaan ilma poistettua itseimu ominaisuuden avulla.



Kuva 8. Itseimevän kuiva-asenteisen jätevesipumpun periaatekuva

8.4 Pumpun ominaiskäyrä

Pumpun ominaiskäyrä kuvaa pumpun nostokorkeuden H riippuvuutta tilavuusvirrasta Q (Borg & Sarvanne 1979, 32). Ominaiskäyrän toimittaa pumppu valmistaja ja se pitää sisällään nostokorkeus / tilavuusvirta (H/Q) käyrän lisäksi useasti myös teho (P/Q) ja hyötysuhde (η/Q) käyrät. Tässä työssä käsitellään ainoastaan pumpun H/Q käyriä, joten teho- ja hyötysuhdekäyriä ei esitetä.

8.4.1 Affiniteettisäännöt

Affiniteettisääntöjen mukaan voidaan tutkia pumpun kierrosnopeuden muutoksen vaikutusta tilavuusvirtaan, hyötysuhteeseen ja tehoon.

Tilavuusvirta on suoraan verrannollinen kierrosnopeuteen, suhde lasketaan kaavalla 14 (Wirzenius 1973, 75).

$$\frac{q_{v,1}}{q_{v,2}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (14)$$

jossa	$q_{v,1}$	tilavuusvirta kierrosnopeudella 1	[l/s]
	$q_{v,2}$	tilavuusvirta kierrosnopeudella 1	[l/s]
	n_1	kierrosnopeus 1	[rpm]
	n_2	kierrosnopeus 2	[rpm]

Nostokorkeus on neliössä verrannollinen kierrosnopeuteen, suhde lasketaan kaavalla 15 (Wirzenius 1973, 76).

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (15)$$

jossa	H_1	nostokorkeus kierrosnopeudella 1	[m]
	H_2	nostokorkeus kierrosnopeudella 2	[m]
	n_1	kierrosnopeus 1	[rpm]
	n_2	kierrosnopeus 2	[rpm]

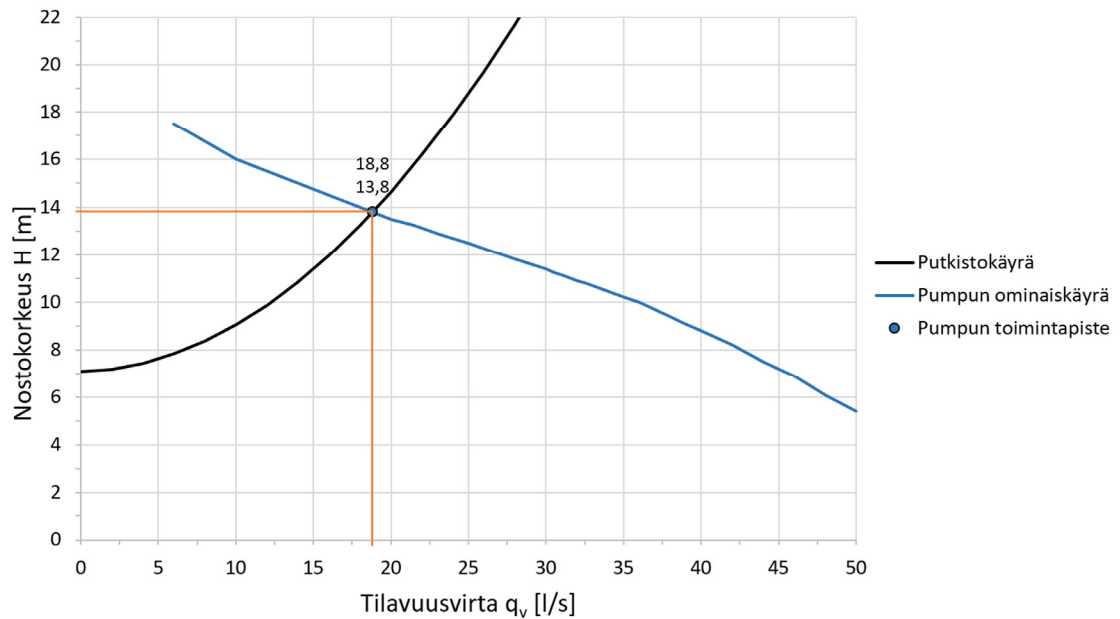
Teho on kolmannessa potenssissa verrannollinen kierrosnopeuteen, suhde lasketaan kaavalla 16 (Wirzenius 1973, 76).

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (16)$$

jossa	P_1	teho kierrosnopeudella 1	[kW]
	P_2	teho kierrosnopeudella 1	[kW]
	n_1	kierrosnopeus 1	[rpm]
	n_2	kierrosnopeus 2	[rpm]

8.4.2 Pumpun toimintapiste

Sijoitettaessa putkiston vastuskäyrä ja pumpun ominaiskäyrä samaan kuvaan on toimintapiste näiden kuvaajien risteävässä kohdassa. Toimintapisteestä nähdään pumpun tuotto ja nostokorkeus. Kuvassa 9 on esitetty toimintapisteen esimerkki, josta nähdään seuraavat arvot: tilavuusvirta 18,8 l/s nostokorkeus 13,8 metriä.



Kuva 9. Pumpun toimintapisteen esimerkki

9 ESIMERKKILASKELMA 2: AFFINITEETTISÄÄNNÖT

Esimerkkilaskelmassa esitetään pumppukäyrän muutos pumppujen kierrosnopeutta muuttamalla. Pumppukäyrät piirretään luvun 7 putkiston vastuskäyrä esimerkin kanssa samaan kuvaan, jolloin nähdään kierrosnopeuden vaikutus pumpun tilavuusvirtaan.

Jos kahta pumppua käytetään rinnakkain kytkettynä, tuplaantuu pumpuilla tuotettu tilavuusvirta ja nostokorkeus pysyy ennallaan. Sarjaan kytkettäessä pumppujen nostokorkeus vastaavasti tuplaantuu ja tuotto pysyy ennallaan.

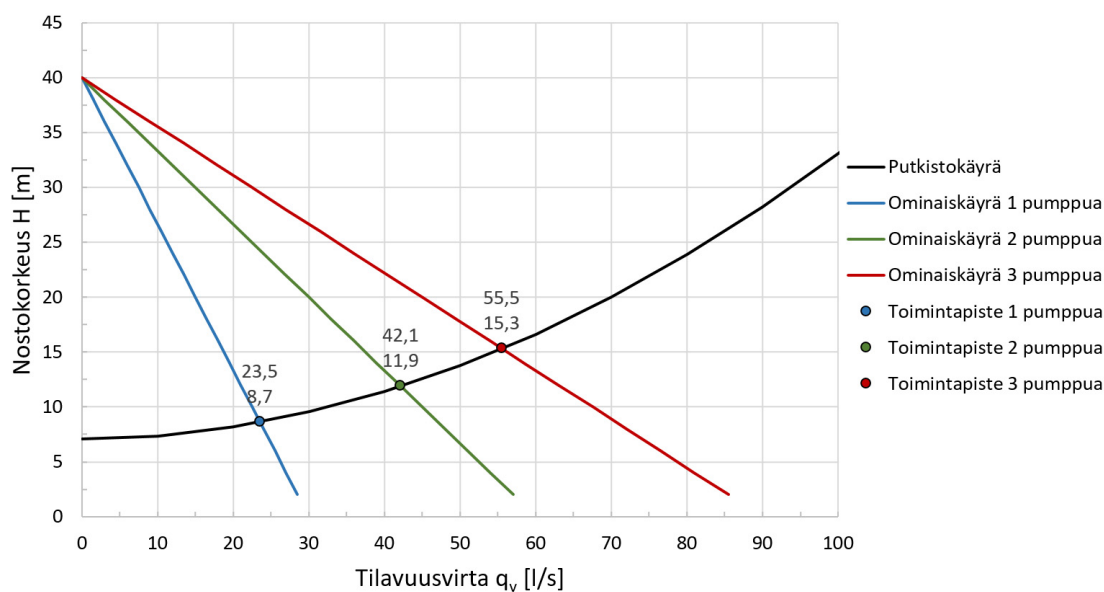
Lähtötiedot

Pumppuja	[kpl]	3
Pumpun tuotto	[l/s]	0 – 28,5
Pumpun nostokorkeus	[m]	40 – 2
Taajuusmuuttajan toiminta-alue	[Hz]	35 – 50
Pumpun nimellinen kierrosnopeus	[rpm]	1455

Taulukko 2. Valmistajan ilmoittamat pumppujen nostokorkeudet ja nimellistuotot

Nostokorkeus H [m]	1 Pumppua q _v [l/s]	2 Pumppua q _v [l/s]	3 Pumppua q _v [l/s]
40	0	0	0
30	8	15	23
18	17	33	50
8	24	48	72
2	29	57	86

Piirretään kuvaajat lähtötietojen mukaisten pumppujen tuotto- ja nostokorkeusarvojen mukaan putkiston ominaiskäyrä kuvaan.



Kuva 10. Putkiston vastuskäyrä ja 3 pumpun ominaiskäyrät 50 Hz, 1455 rpm

Kuvaajasta voidaan huomata putkistovastuksen vaikutuksen pumppujen tuottoon. Yksi pumppu tuottaa toimintapisteessä 23,5 l/s, kaksi pumppua 42,1 l/s ja kolme pumppua 55,5 l/s. ilman putkistovastusta kolmen pumpun yhteinen tuotto olisi 85,5 l/s.

Pumppujen minimitaajuudeksi on lähtötiedoissa annettu 35 Hz, lasketaan pumppujen tuotot ja nostokorkeudet matalimmalla kierrosnopeudella kaavalla 17 (Wirzenius 1973, 75).

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{f_1}{f_2} \quad (17)$$

jossa	n_1	kierrosnopeus 1	[rpm]
	n_2	kierrosnopeus 2	[rpm]
	f_1	taajuus 1	[Hz]
	f_2	taajuus 2	[Hz]

$$n_2 = n_1 \cdot \frac{f_2}{f_1} \rightarrow n_2 = 1\,455 \text{ rpm} \cdot \frac{35 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 1\,018,5 \text{ rpm}$$

Lasketaan 1 018,5 rpm mukaiset nostokorkeuden arvot kaavalla 15.
Esimerkkinä yhden pumpun suurin nostokorkeuden arvo.

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \rightarrow H_2 = 40 \text{ m} \cdot \left(\frac{1\,018,5 \text{ rpm}}{1\,455,0 \text{ rpm}}\right)^2 = 19,6 \text{ m}$$

Lasketaan 1 018,5 rpm mukaiset tilavuusvirran arvot kaavalla 14.
Esimerkkinä yhden pumpun suurin tilavuusvirran arvo.

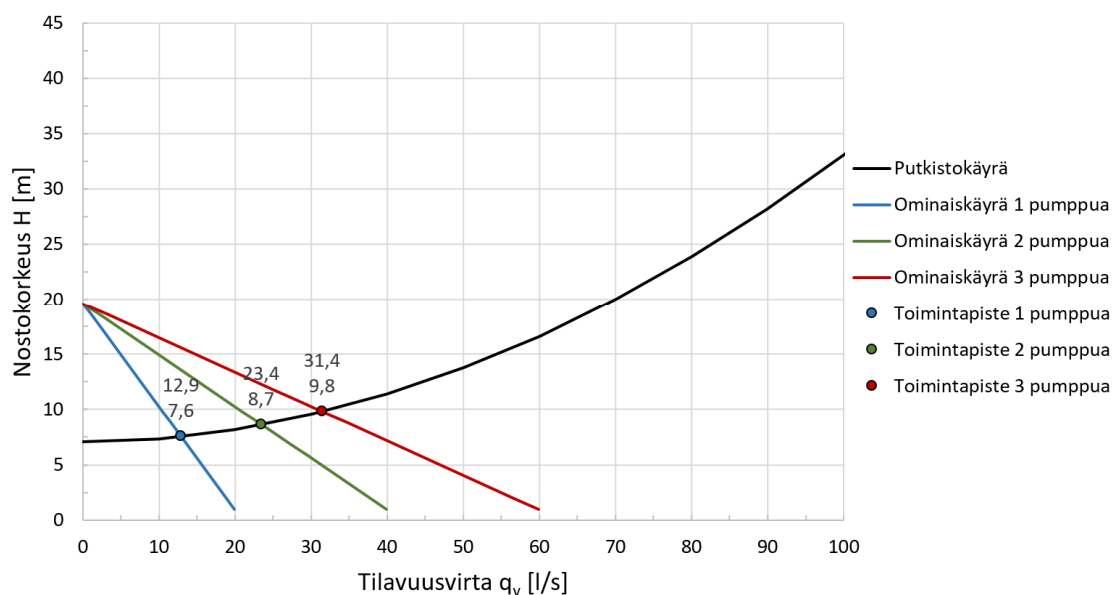
$$q_{v2} = q_{v1} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \rightarrow q_{v2} = 28,5 \text{ l/s} \cdot \left(\frac{1\,018,5 \text{ rpm}}{1\,455,0 \text{ rpm}}\right) \approx 20,0 \text{ l/s}$$

Lisätään saadut arvot taulukkoon 3.

Taulukko 3. Lasketut alennetun kierrosnopeuden mukaiset pumppujen nostokorkeudet ja nimellistuotot

Kierrosnopeus n [rpm]	Nostokorkeus H [m]	1 Pumppua q _v [l/s]	2 Pumppua q _v [l/s]	3 Pumppua q _v [l/s]
1018,5	19,6	0,0	0,0	0,0
1018,5	14,7	5,3	10,5	15,8
1018,5	8,8	11,6	23,1	34,7
1018,5	3,9	16,8	33,6	50,4
1018,5	1,0	20,0	39,9	59,9

Piirretään laskettujen arvojen mukaiset kuvaajat putkistokäyrän kuvaan.

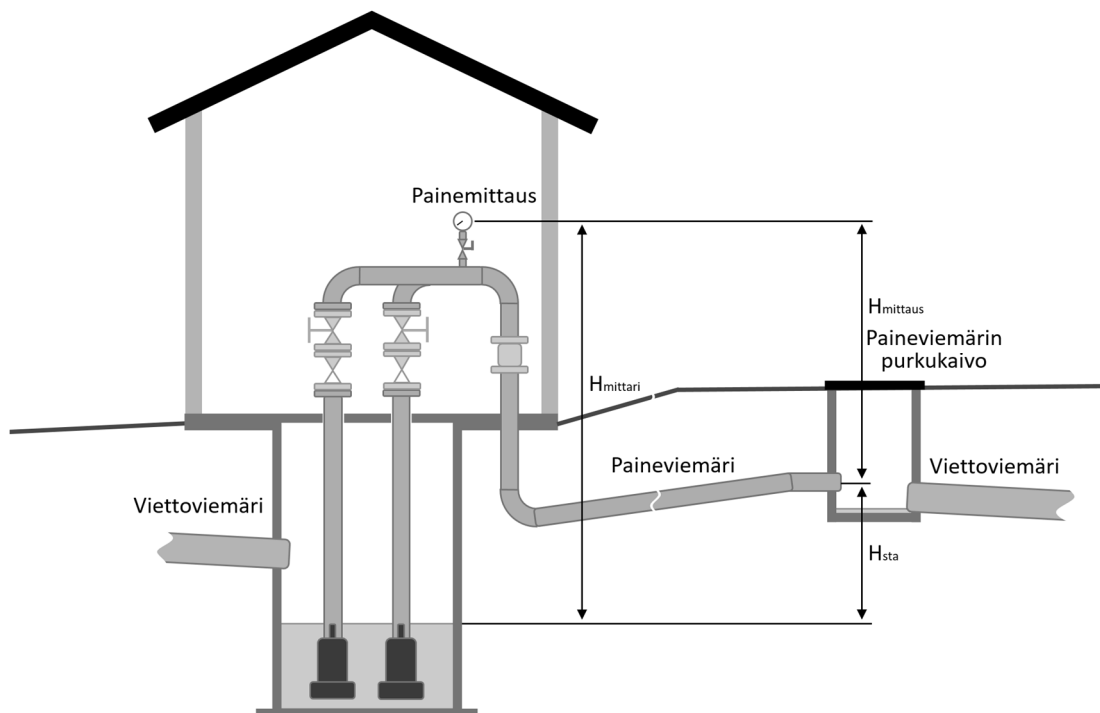


Kuva 11. Putkiston vastuskäyrä ja 3:n pumpun ominaiskäyrät 35 Hz, 1019 rpm

Kierrosnopeuden alentaminen minimiin vaikuttaa vähiten yhden pumpun toimintapisteeseen ja eniten kolmen yhtäaikaisesti toimivan pumpun toimintapisteeseen, johtuen putkiston vastuskäyrän muodosta.

10 VERTAILUKOHDE 1: EKOPARKIN JÄTEVESIPUMPPAAMO

Ekoparkin pumppaamo on Kouvolan Myllykoskella sijaitseva huoltorakennuksella varustettu kahden porraskäyttöisen pumpun pienpumppaamo. Sähkömagneettinen virtausmittari on asennettu pumppaamon sisäiseen paineputkistoon ja kytketty pumppaamon pinnansäätölaitteeseen, joten virtaaman historiatiedot ovat saatavissa pumppaamovalvontaohjelmistosta. Pumppaamolle on johdettu jätevesiä ainoastaan läheisiltä teollisuusyrityksiltä, joten virtaamamäärät ovat riippuvaisia yritysten teollisuusprosessien käyttöasteesta.



Kuva 12. Ekoparkin jätevesipumppaamon periaatekuva

10.1 Ekoparkin jätevesipumppaamon teoreettinen tarkastelu

Ekoparkin pumppaamon teoreettinen tarkastelu aloitettiin selvittämällä pumppun ominaiskäyrä lähtötiedosta (liite 4) ja laskemalla teoreettinen putkiston vastuskäyrä. Laskentaan on käytetty esimerkkilaskelma 1 mukaisia kaavoja, joten pelkät tulokset on esitetty. Veden lämpötilana on laskennassa käytetty pumppuvalmistajan lähtötiedoissa ilmoitettua 20 °C.

Paineviemärin lähtötiedot

Staattinen nostokorkeus	[m]	7,10
Materiaali	[-]	PEH – muovi
Nimellinen halkaisija d_n	[mm]	160
Paineluokka PN	[bar]	10
Pituus	[m]	399
Käyttöönottovuosi	[-]	1996

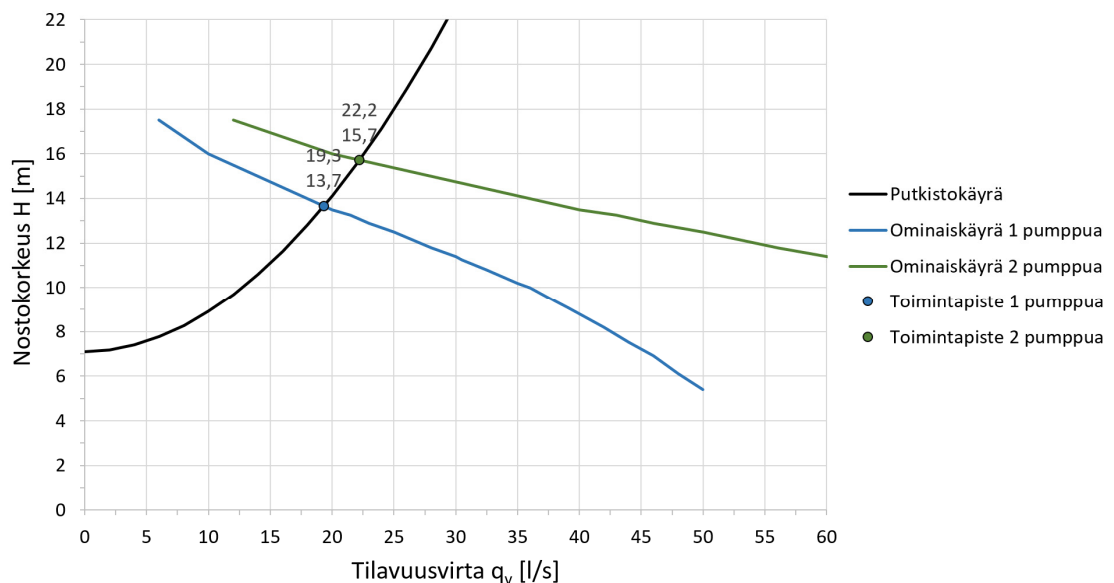
Paikallisvastukset

Pallotakaisku	[ξ]	2,0
Kumiluistiventtiili	[ξ]	0,25
T-haara	[ξ]	1,28
90° mutka	[ξ]	0,36
Virtausmittari	[ξ]	0,08
90° mutka	[ξ]	0,36
Paikallisvastukset yhteensä	[Σξ]	4,33

Pumppujen lähtötiedot

Pumppuja	[kpl]	2
Merkki	[-]	Hidrostal
Malli	[-]	D04M-EMU
Ominaisteho	[kW]	5,5
Tuotto	[l/s]	6 – 50
Nostokorkeus	[m]	17,5 – 5,4
Läpäisykyky	[mm]	75
Kierrosnopeus	[rpm]	1455

Laskennallisen putkiston vastuskäyrän mukaan tuotto yhdellä pumpulla on 19,3 l/s nostokorkeuden ollessa 13,7 metriä ja kahdella pumpulla 22,2 l/s nostokorkeudella 15,7 metriä. Tulokset on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Ekoparkin pumppaamon pumppukäyrät ja laskennallinen putkiston vastuskäyrä

10.2 Ekoparkin pumppaamon kokeellinen tarkastelu

Ekoparkin pumppaamolla suoritettiin paineviemärin painekoemittaukset yhdellä pumpulla ja kahden pumpun yhtäaikaisella käynnillä. Pumppujen pesän ja juoksupyörän kunto tarkastettiin ennen mittauksia ja niiden välinen päittäisväly säädettiin vastaamaan valmistajan antamia ohjearvoja. Mittaus suoritettiin paineputken T-haaran huuhteluyhteeseen kiinnitetyllä analogisella 0-2,5 baarin mittarilla. Painemittariin asennettiin myös ilmausventtiili, joten T-haaraan kertynyt ilma voitiin poistaa ennen mittauksia, jolloin vältyttiin mittaustuloksen vääristymiseltä. Mittaukset suoritettiin 31.1.2017. Tulokset on kirjattu taulukkoon 4.



Kuva 14. Ekoparkin pumppaamon painemittausjärjestelyt

Painemittauksen p_{mittaus} perusteella voidaan laskea painemittauksen geodeettiseen korkeuspisteeseen vaikuttava korkeusero H_{mittaus} (kaava 18).

$$H_{\text{mittaus}} = \frac{p_{\text{mittaus}}}{\rho \cdot g} \cdot 100\,000 \text{ Pa} \quad (18)$$

jossa	H_{mittaus}	p_{mittaus} painetta vastaava korkeus	[m]
	p_{mittaus}	painemittarin lukema	[bar]
	ρ	veden tiheys	[kg/m ³]
	g	painovoiman kiihtyvyys	[m/s ²]

$$H_{mittaus} = \frac{0,9 \text{ bar}}{998,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} \cdot 100\,000 \text{ Pa} = 9,5 \text{ m}$$

Kokonaisnostokorkeus H lasketaan kaavalla 19.

$$H = H_{mittaus} + H_{mittari} \quad (19)$$

jossa $H_{mittaus}$ $\rho_{mittaus}$ painetta vastaava korkeus [m]

$H_{mittari}$ painemittarin geodeettinen korkeuspiste
pumppaamosäiliön vedenpinnasta [m]

$$H = 9,5 \text{ m} + 4,0 \text{ m} = 13,5 \text{ m}$$

Koska painemittariin vaikuttaa jatkuvasti 0,3 baarin paine pumppujen ollessa pysähtyneenä, täytyy tämä ottaa huomioon staattisen nostokorkeuden laske-
misessa. Staattinen nostokorkeus lasketaan kaavalla 20.

$$H_{sta} = H_{mittaus,0p} + H_{mittari} \quad (20)$$

jossa H_{sta} staattinen nostokorkeus [m]

$H_{mittaus,0p}$ painemittarin painetta vastaava nostokorkeus,
kun yksikään pumppu ei käy [m]

$H_{mittari}$ painemittarin geodeettinen korkeuspiste
pumppaamosäiliön vedenpinnasta [m]

$$H_{sta} = 3,1 \text{ m} + 4,0 \text{ m} = 7,1 \text{ m}$$

Dynaaminen nostokorkeus lasketaan kaavalla 21.

$$H_{dyn} = H - H_{sta} \quad (21)$$

jossa H_{dyn} dynaaminen nostokorkeus [m]

H kokonaisnostokorkeus [m]

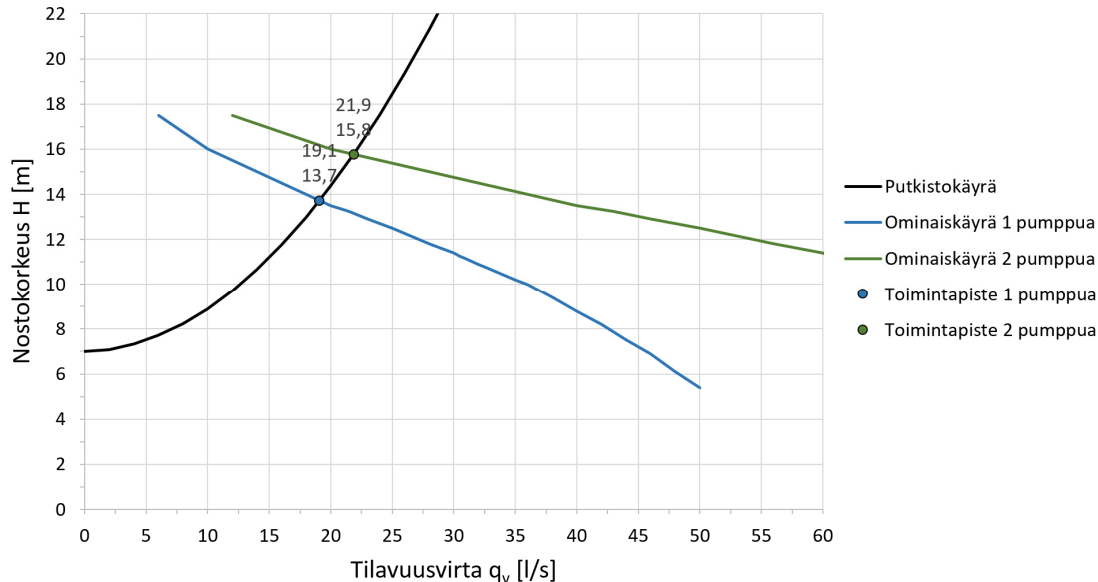
H_{sta} staattinen nostokorkeus [m]

$$H_{dyn} = 13,5 \text{ m} - 7,1 \text{ m} = 6,4 \text{ m}$$

Taulukko 4. Ekoparkin pumppaamon painekoemittauksen tulokset

Pumppuja [kpl]	p_{mittaus} [bar]	H_{mittaus} [m]	H_{mittari} [m]	H [m]	H_{dyn} [m]	H_{sta} [m]
0	0,3	3,1	-	-	-	-
1	0,9	9,5	4,0	13,5	6,4	7,1
2	1,2	12,1	3,8	15,9	9,0	6,9

Keskimääräisten mittaustulosten mukaan piirrettiin putkiston vastuskäyrä pumppujen ominaiskäyrien kanssa samaan kuvaan 15.



Kuva 15. Ekoparkin pumppaamon pumppukäyrät ja painemittausten perusteella sovitettu putkiston vastuskäyrä

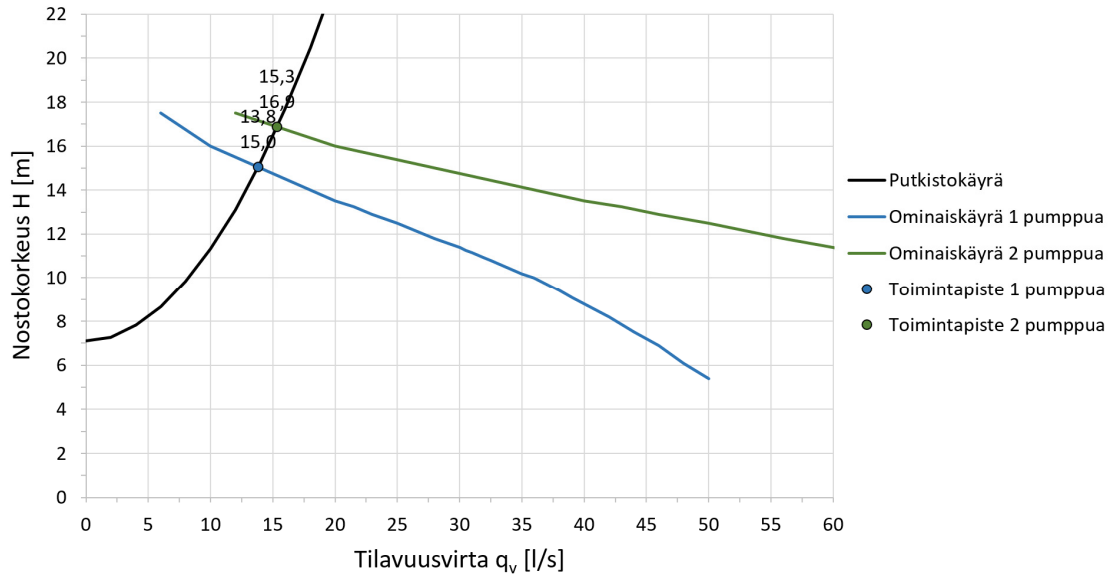
10.3 Ekoparkin pumppaamon vertailumittaus 1

Sähkömagneettinen virtausmittari on asennettu pumppaamon sisään T-haararan jälkeiseen uloslähtevään paineputkeen. Virtausmittarin hetkellislukemat luettiin samaan aikaan painekoemittauksen kanssa, tulokset kirjattiin taulukoon 5.

Taulukko 5. Ekoparkin pumppaamon sähkömagneettisen virtausmittauksen arvot

Pumppuja [kpl]	q_v [l/s]	H_{sta} [m]
1	13,3	7,1
2	15,3	6,9

Sähkömagneettisen virtausmittauksen tulosten mukaan piirrettiin putkiston vastuskäyrä pumppujen ominaiskäyrien kanssa samaan kuvaan 15.



Kuva 15. Ekoparkin pumppaamon pumppukäyrät ja pumppaamon putkiston vastuskäyrä sovitettuna sähkömagneettisen virtausmittauksen mukaan

10.4 Ekoparkin pumppaamon vertailumittaus 2

Koska vertailumittaus 1 tuotti ristiriitaisen tuloksen teoreettisen ja kokeellisen mittauksen välillä, päätettiin suorittaa sähkömagneettisen virtausmittauksen lisäksi toinen vertailumittaus astiamittausmenetelmää käyttäen. Yhden pumpun tuotoksi saatiin 11,3 l/s ja kahden samanaikaisesti käyvän pumpun tuotoksi 11,6 l/s. Yhden ja kahden pumpun pumppausajan ero oli ainoastaan yksi sekunti ja yksi tuloviemäreistä padotti vettä lisäten pumpattavan veden määrää. Tästä johtuen astiamittauksen tulokset ovat suuntaa antavia. Laskentaan käytettiin kaavaa 22. Mittaus suoritettiin 14.2.2017. Tulokset on esitetty taulukossa 6.

$$q_v = \frac{V_{\text{säiliö}}}{t_{\text{pump}}} \quad (22)$$

jossa	q_v	tilavuusvirta	[l/s]
	$V_{\text{säiliö}}$	pumppaamosäiliön tilavuus	[l]
	t_{pump}	pumppausaika	[s]

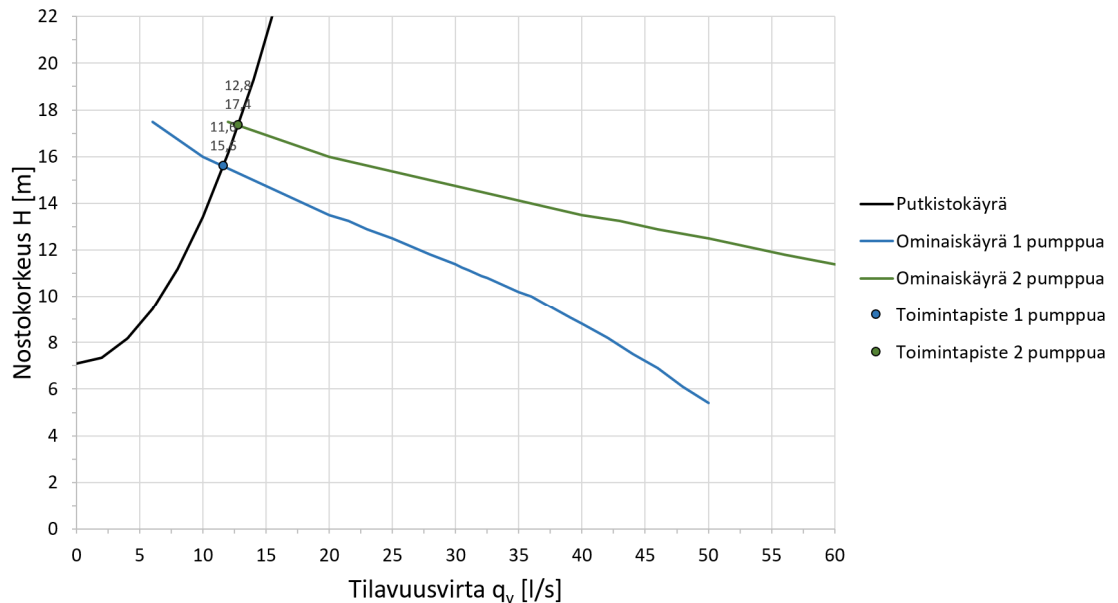
$$q_{v,1 \text{ pumppua}} = \frac{417 \text{ l}}{37 \text{ s}} \approx 11,3 \text{ l/s}$$

$$q_{v,2 \text{ pumppua}} = \frac{695 \text{ l}}{36 \text{ s}} \approx 11,6 \text{ l/s}$$

Taulukko 6. Ekoparkin pumppaamon astiamittaus arvot

Pumppuja [kpl]	q_v [l/s]
1	11,3
2	11,6

Astiamittauksen kahden pumpun tuloksen perusteella piirrettiin putkiston vastuskäyrä pumppujen ominaiskäyrien kanssa samaan kuvaan 16.



Kuva 16. Ekoparkin pumppaamon pumppukäyrät ja putkiston vastuskäyrä sovitettuna astiamittauksen mukaan

10.5 Ekoparkin pumppaamon yhteenveto

Mittausten perusteella voidaan havaita teoreettisen ja painekokeen välisen eron tilavuusvirran suuruudessa olevan pieni, noin 1,6 %. Jätevesien mittauksessa luotettavaksi tunnetun sähkömagneettisen virtausmittarin tilavuusvirran tulos yllätti, sen ollessa noin 30 % pienempi, kuin teoreettisen ja painekokeen tulos. Koska vertailumittauksen ja kokeellisen mittauksen välillä oli selittämättömän suuri ero, päätettiin suorittaa toinen vertailumittaus astiamittausmenetelmää käyttäen. Astiamittauksen tulokset olivat keskimäärin 22,4 % pienemmät, kuin sähkömagneettisen virtausmittauksen. Tuloksen luotettavuuden vaikutti kokeen aikana padottava tuloputki. Koska tämäkään koe ei antanut varmuutta sähkömagneettisen vertailumittauksen luotettavuudesta, tehtiin vielä yksi tarkistusmittaus 7.3.2017 siirrettävällä ultraääneen perustuvalla virtausmittarilla. Tulokseksi saatiin 0,2 m³/h ero mittausten välille, joten sähkömagneettinen virtausmittaus voitiin todeta luotettavaksi vertailumittaukseksi.

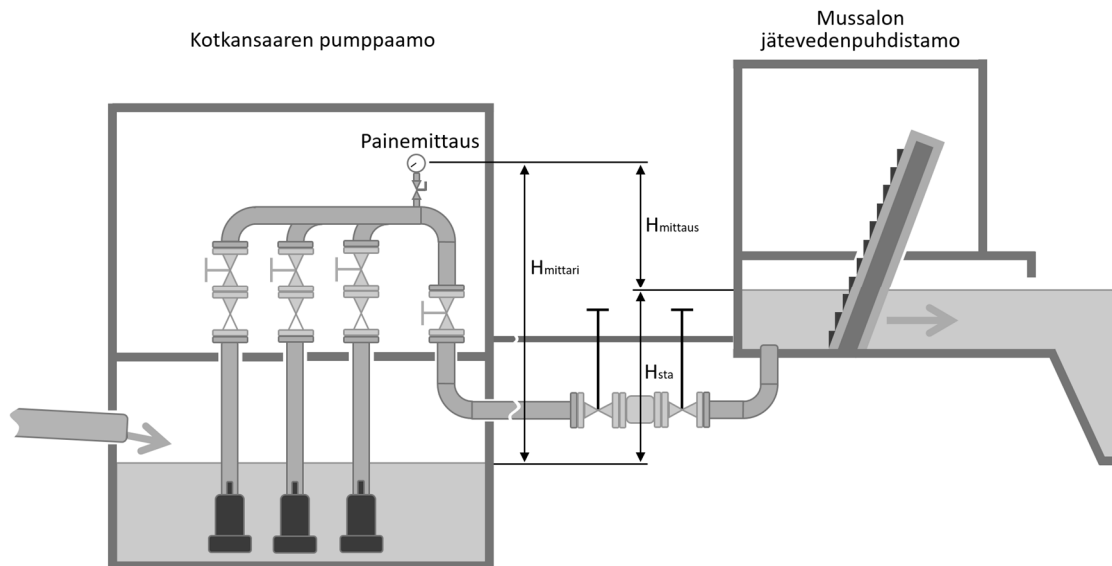
Ekoparkin pumppaamon laskennalliset ja mittauksissa saadut tulokset on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Ekoparkin pumppaamon yhdistetyt tulokset

Pumppuja [kpl]	$H_{sta, teor.}$ [m]	$q_{v, teor.}$ [l/s]	$H_{sta, painekoe}$ [m]	$q_{v, painekoe}$ [l/s]	$H_{sta, sähkömag.}$ [m]	$q_{v, sähkömag.}$ [l/s]	$q_{v, astiamittaus}$ [l/s]
1	7,1	19,3	7,1	19,1	7,1	13,8	11,3
2	7,1	22,2	6,9	21,9	6,9	15,3	11,6

11 VERTAILUKOHDE 2: KOTKANSAAREN JÄTEVESIPUMPPAAMO

Kotkansaaren jätevesipumppaamo on yksi kolmesta Mussalon jätevedenpuhdistamon pääpumppaamoista. Pumppaamossa on kolme taajuuskäyttöistä pumppua, joista kaksi on uusittuja 18,5 kW:n pumppuja ja yksi vanhempi 17,5 kW:n pumppu. Sähkömagneettinen virtausmittari on sijoitettu paineviemärin loppupäähän, Mussalon jätevedenpuhdistamon tuloputkien mittakaivoon. Virtausmittari on yhdistetty jätevedenpuhdistamon prosessiautomaatioon. Paineviemärin purkupää on sijoitettu vedenpinnan alle Mussalon jätevedenpuhdistamon välppämöön. Vedenpinta elää keskimäärin 0,3 metriä välppiä käynnin mukaan, joten staattisessa nostokorkeudessa on tämän verran huojuntaa.



Kuva 17. Kotkansaaren pumppaamon periaatekuva

11.1 Kotkansaaren pumppaamon teoreettinen tarkastelu

Kotkansaaren pumppaamon teoreettinen tarkastelu aloitettiin selvittämällä lähtötiedot ja laskemalla teoreettinen putkiston vastuskäyrä. Pumppujen ominaiskäyrät (liitteet 5 ja 6) sijoitettiin samaan kuvaan putkiston vastuskäyrän kanssa

maksimi- ja minimitaajuuksilla. Pumppujen pesän ja juoksupyörän kunto tarkastettiin ennen mittauksia ja niiden välinen päittäisvälitys säädettiin vastamaan valmistajan antamia ohjeita. Kolmen pumpun yhtäaikaisessa käynnissä on otettu huomioon yksi muista poikkeavan mallinen pumppu. Laskentaan on käytetty esimerkkilaskelma 1 ja 2 mukaisia kaavoja, joten pelkät tulokset on esitetty. Veden lämpötilana on laskennassa käytetty pumppuvalmistajan lähtötiedoissa ilmoitettua 20 °C.

Paineviemärin lähtötiedot

Staattinen nostokorkeus	[m]	7,06
Materiaali	[-]	PEH – muovi
Nimellinen halkaisija d_n	[mm]	500
Paineluokka PN	[bar]	10
Pituus	[m]	2 600
Käyttöönottovuosi	[-]	1997

Paikallisvastukset

Pallotakaisu	[ξ]	2,00
Kumiluistiventtiili	[ξ]	0,10
T-haara	[ξ]	1,28
Kumiluistiventtiili	[ξ]	0,10
90° mutka	[ξ]	0,36
90° mutka	[ξ]	0,36
Kumiluistiventtiili	[ξ]	0,10
Virtausmittari	[ξ]	0,08
Kumiluistiventtiili	[ξ]	0,10
Paikallisvastukset yhteensä	[$\Sigma\xi$]	4,48

Pumppujen lähtötiedot

Pumppuja	[kpl]	3
Pumppujen taajuusalue	[Hz]	30 – 50

Pumppu 1

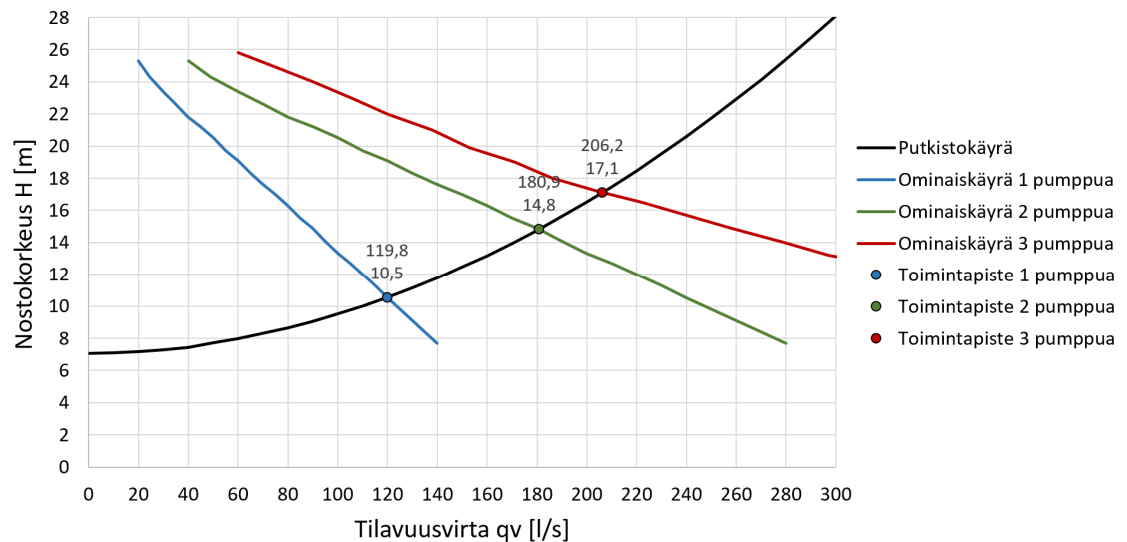
Merkki	[-]	Grundfos
Malli	[-]	S1.100.200.170.4. 54L.S.285.G.N.D

Nimellinen teho	[kW]	17
Tuotto	[l/s]	20 – 150
Nostokorkeus	[m]	4,8 – 25,7
Kierrosnopeus	[rpm]	1455

Pumppu 2 ja 3

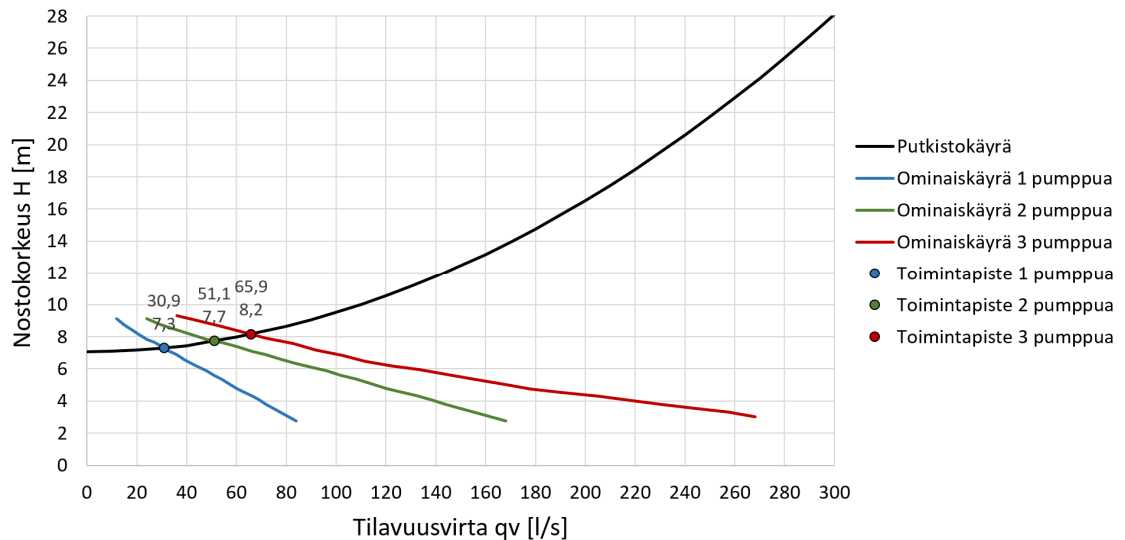
Merkki	[-]	Flygt
Malli	[-]	NP 3171 MT 3
Nimellinen teho	[kW]	18,5 kW
Tuotto	[l/s]	0 – 145
Nostokorkeus	[m]	7,0 – 31
Kierrosnopeus	[rpm]	1460

Laskennallisen putkiston vastuskäyrän mukaan tuotto yhdellä pumpulla ja täydellä pyörimistaajuudella on 119,8 l/s, nostokorkeuden ollessa 10,5 metriä. Kahdella pumpulla vastaava arvo on 180,9 l/s nostokorkeudella 14,8 metriä ja kolmella pumpulla 206,3 l/s nostokorkeudella 17,1 metriä.



Kuva 18. Kotkansaaren pumppukäyrät ja laskennallinen putkiston vastuskäyrä maksimitaajuudella

Laskennallisen putkiston vastuskäyrän mukaan tuotto yhdellä pumpulla ja minimipyörimistaajuudella on 30,9 l/s nostokorkeuden ollessa 7,3 metriä. Kahdella pumpulla vastaava arvo on 51,1 l/s nostokorkeudella 7,7 metriä ja kolmella pumpulla 65,9 l/s nostokorkeudella 8,2 metriä.



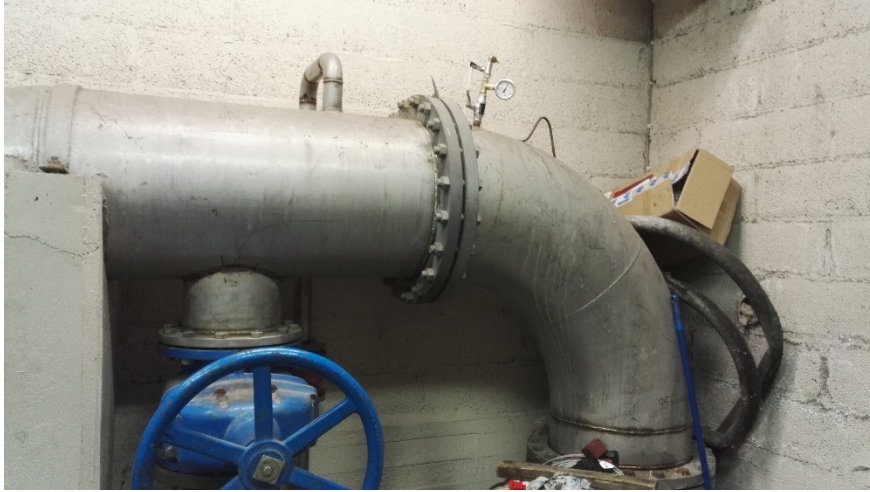
Kuva 19. Kotkansaaren pumppukäyrät ja laskennallinen putkiston vastuskäyrä minimitaajuudella

11.2 Kotkansaaren pumppaamon käytännön tarkastelu

Kotkansaaren pumppaamolla suoritettiin paineviemärin painekoemittaukset yhdellä pumpulla, sekä kahden ja kolmen pumpun yhtäaikaisella käynnillä. Pumppujen pyörimisnopeutta muutettiin maksimitaajuudesta minimitaajuuteen. Mittaus suoritettiin pumppaamon sisäiseen paineputkeen kiinnitetyllä analogisella 0-2,5 baarin mittarilla. Painemittariin asennettiin myös ilmausventtiili, joten mittausyhteeseen kertynyt ilma voitiin poistaa ennen mittauksia, jolloin välttyttiin mittaustuloksen vääristymiseltä. Mittaukset suoritettiin 3.2.2017. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 8.

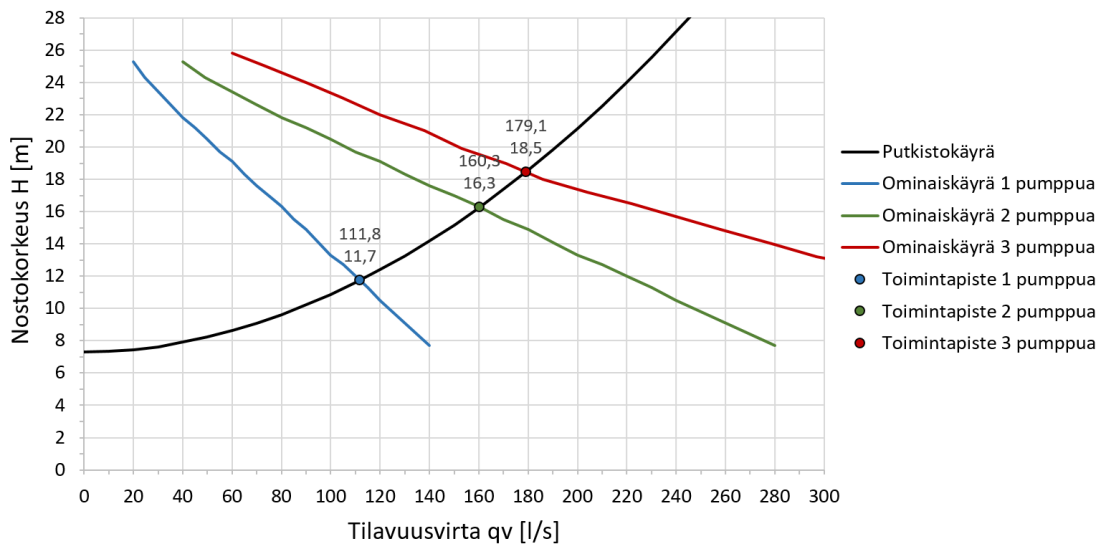
Taulukko 8. Kotkansaaren pumppaamon painekoemittauksen tulokset

Pumppuja [kpl]	f_{pumppu} [Hz]	p_{mittaus} [bar]	H_{mittaus} [m]	H_{mittari} [m]	H [m]	$H_{\text{dyn.}}$ [m]	H_{sta} [m]
0	-	0,3	2,8	-	-	-	-
1	50	0,7	7,1	4,5	11,7	4,4	7,3
1	30	0,3	3,1	4,5	7,6	0,3	7,3
2	50	1,2	11,7	4,5	16,3	9,0	7,3
2	30	0,4	3,7	4,5	8,2	0,9	7,3
3	50	1,5	14,8	4,5	19,3	12,1	7,3
3	30	0,4	4,1	4,5	8,6	1,3	7,3



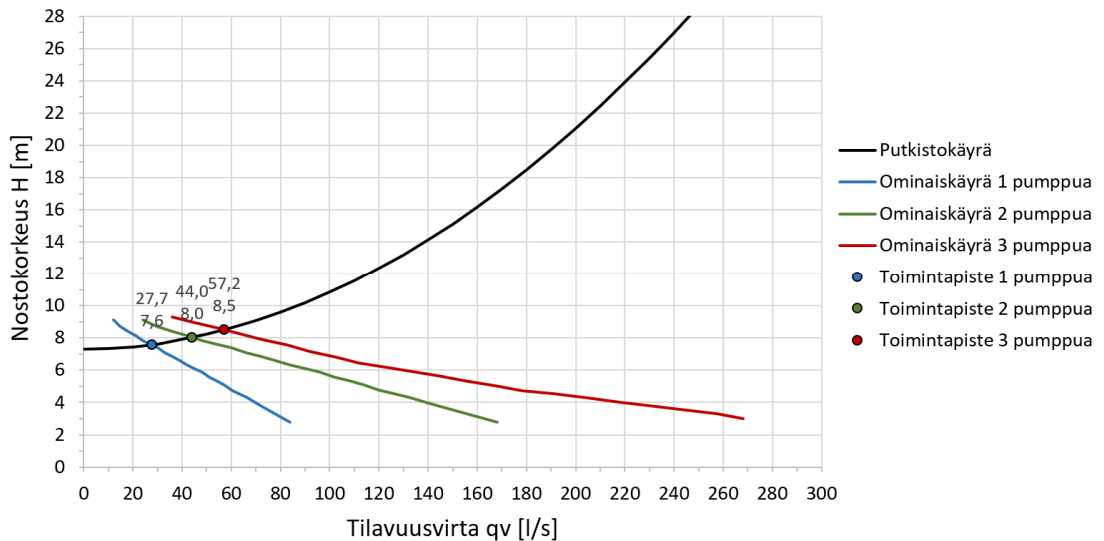
Kuva 20. Kotkansaaren pumppaamon mittausjärjestelyt.

Mittaukset suoritettiin pumppujen maksimitaajuudella. Yhden ja kahden samanaikaisesti käyvän pumpun ominaiskäyrät sovitettiin täydellisesti putkiston vastuskäyrän kanssa samaan kuvaan. Kolmen yhtäaikaisesti käyvän pumpun ominaiskäyrässä on noin 4 %:n ero laskettuun arvoon. Mittaustulosten mukaan piirrettiin pumppujen ominaiskäyrät ja putkiston vastuskäyrä samaan kuvaan 21.



Kuva 21. Kotkansaaren painemittausten perusteella piirretty putkiston vastuskäyrä maksimitaajuudella

Mittaukset tehtiin pumppujen minimitaajuudella. Pumppujen uudet ominaiskäyrät laskettiin minimitaajuuden mukaan affiniteettisäännöllä. Yhden pumpun uusi nostokorkeus osui täysin kohdalleen ja kahden pumpun käynnissä on noin 3 %:n ja kolmen pumpun käynnissä 1 %:n ero painekoemittauksen arvoihin. Mittaustulosten mukaan piirrettiin pumppujen ominaiskäyrät ja putkiston vastuskäyrä samaan kuvaan 22.



Kuva 22. Kotkansaaren painemittausten perusteella piirretty putkiston vastuskäyrä minimitaajuudella

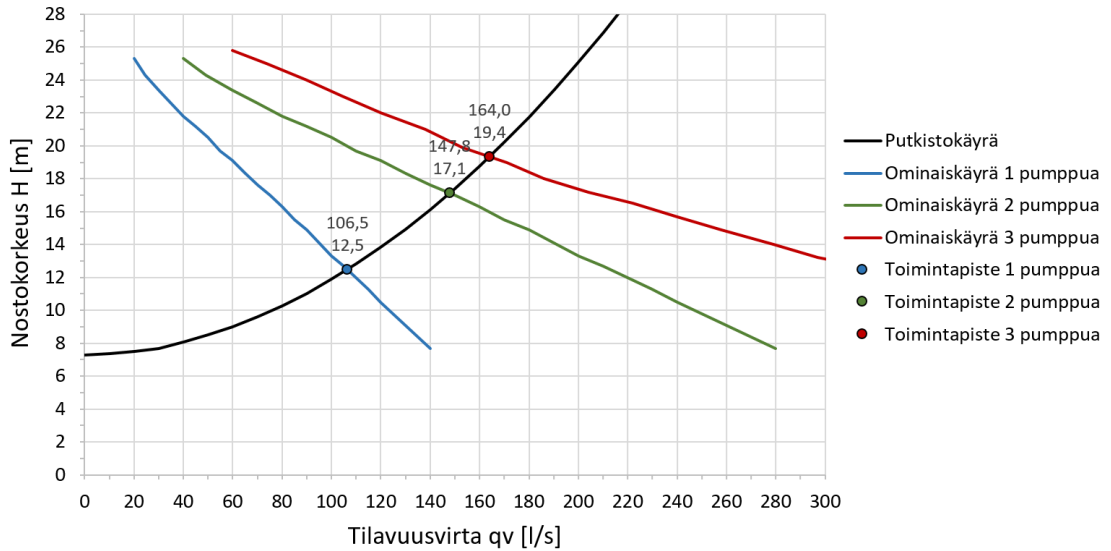
11.3 Kotkansaaren pumppaamon vertailumittaus

Sähkömagneettinen virtausmittari on asennettu paineviemäriin purkupään läheisyyteen Mussalon jäteveden puhdistamolle. Virtausmittarin lukemat luettiin Mussalon jätevedenpuhdistamon prosessiautomaatiojärjestelmän historiatiedoista. Saatuihin tuloksiin vaikuttaa huojunta, jonka aiheuttaa 2 600 metriä pitkään paineviemäriin kertynyt ilma. Paineviemäri kulkee merenpohjaa myöden ja sen profiilissa on yksi karikko, jonka yli paineviemäri tekee nousun. Tämä ylimääräinen nousu on otollinen paikka ilman kertymiselle paineviemäriin, mikä aiheuttaa pumpun käynnistyessä epätasaista virtaamaa. Tulokset merkittiin taulukkoon 9.

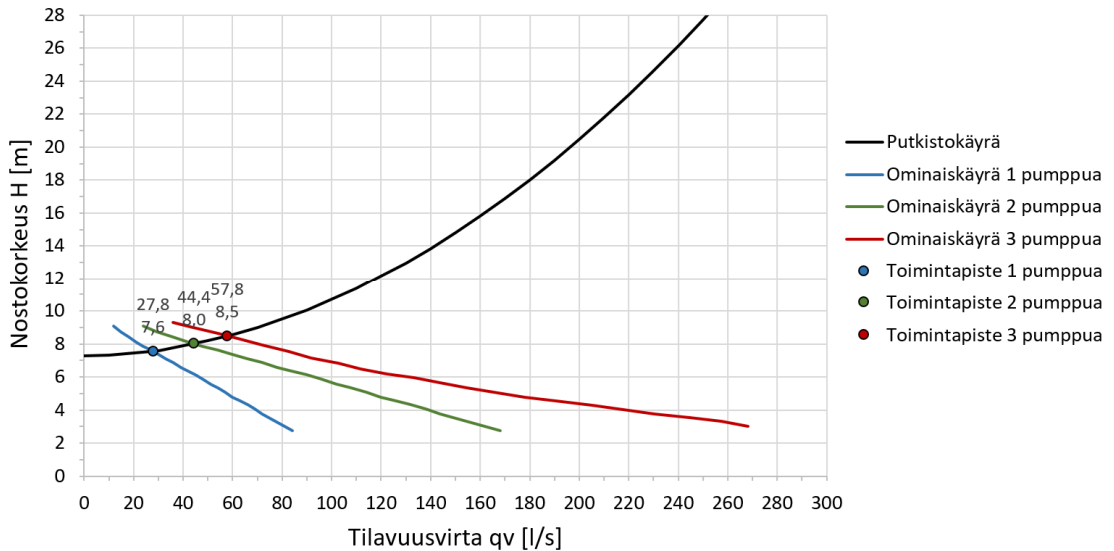
Taulukko 9. Kotkansaaren pumppaamon sähkömagneettisen virtausmittauksen arvot

Pumppuja [kpl]	f_{pumppu} [Hz]	q_v [l/s]	H_{sta} [m]
1	50	100,3	7,3
1	30	29,2	7,3
2	50	147,8	7,3
2	30	44,4	7,3
3	50	164,4	7,3
3	30	55,3	7,3

Kotkansaaren pumppaamon putkiston vastuskäyrä sovitettiin kahden pumpun yhtäaikaisen käynnin mukaan maksimitaajuudella kuvaan 23 ja minimitaajuudella kuvaan 24.



Kuva 23. Kotkansaaren pumppaamon putkiston vastuskäyrä sähkömagneettisen virtausmittauksen mukaan pumppujen maksimitaajuudella



Kuva 24. Kotkansaaren pumppaamon putkiston vastuskäyrä sähkömagneettisen virtausmittauksen mukaan pumppujen minimitaajuudella

11.4 Kotkansaaren pumppaamon yhteenveto

Mittausten perusteella voidaan todeta teoreettisen ja painekokeen välisen eron tilavuusvirran suuruudessa olevan keskimäärin 11,5 %. Painekokeen ja sähkömagneettisen virtausmittarin välinen ero on suurimmillaan kolmen pumppun yhtäaikaaisella käynnillä täydellä pyörimisnopeudella 8,4 %, keskimääräinen ero on 3,1 %. Tuloksissa tulee ottaa huomioon paineviemäriin kertynyt ilma, joka aiheuttaa sähkömagneettisen virtausmittarin lukemaan huojumista pumppauksen alkaessa. Johtuen pienestä tulovirtaamasta, ei mittausajankohdina pumppuja pystytty ajamaan täydellä nopeudella riittävän pitkiä aikoja, jotta virtaama olisi täysin tasaantunut. Tulokset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Kotkansaaren pumppaamon yhdistetyt tulokset

Pumppuja [kpl]	f_{pumppu} [Hz]	$H_{\text{sta, teor.}}$ [m]	$q_{\text{v, teor.}}$ [l/s]	$H_{\text{sta, painekoe}}$ [m]	$q_{\text{v, painekoe}}$ [l/s]	$H_{\text{sta, sähkömag.}}$ [m]	$q_{\text{v, sähkömag.}}$ [l/s]
1	50	10,5	119,8	11,7	111,8	12,5	106,5
1	50	14,8	180,9	16,3	160,3	17,1	147,8
2	50	17,1	206,3	18,5	179,1	19,4	164,0
2	30	7,3	30,9	7,5	27,7	7,6	27,8
3	30	7,7	51,1	8,0	44,0	8,0	44,4
3	30	8,2	65,9	8,5	57,2	8,5	57,8

11.5 Vertailukohdemittauksien päätelmät

Ekoparkin pumppaamon teoreettinen tarkastelu ja painekoemittaus tuottivat samankaltaiset tulokset. Koska luotettavaksi todetulla sähkömagneettisella virtausmittarilla tehty vertailumittaus 1 antoi ristiriitaisen tuloksen kahteen edelliseen verrattuna, tehtiin vielä vertailumittaus 2 astiamittausperiaatetta käyttäen. Astiamittauskokeen tulos ei vastannut täysin vertailumittaus 1 tulosta, johtuen mittauksen aikana padottavasta tuloviemäristä. Tämän vuoksi päätettiin sähkömagneettisen virtausmittarin luotettavuus varmistaa vielä kertaalleen 7.3.2017 tehdyllä kokeella. Koe toteutettiin siirrettävällä ultraääneen perustuvalla virtausmittarilla ja tulokseksi saatiin samat lukemat molemmilla mittauksilla, joten sähkömagneettinen virtausmittaus voitiin todeta luotettavaksi. Koska vertailumittaus 1 todettiin luotettavaksi, täytyy teoreettisen tarkastelun ja painekoemittauksen ristiriitaisten tulosten johtua pumppaamon sisäisen paineputkiston oletettua suuremmasta virtausvastuksesta. Asennettaessa kehitettävä mittalaite jätevesipumppaamolle, ei välttämättä ole mahdollista todentaa virtaaman määrää vertailumittauksella, joten painekoemittaus tällöin luotettavin tapa selvittää paineviemäriin muuttajat.

Kotkasaaren pumppaamon painekoemittauksen ja vertailevan sähkömagneettisen mittauksen tulokset olivat lähempänä toisiaan, kuin teoreettisen tarkastelun tulokset. Tästä voimme päätellä painekoemittauksen olevan luotettavin tapa selvittää tässä kohteessa paineviemäriin muuttajat.

12 KOMPENSOITUUN PUMPUN NIMELLISTUOTTOMENETELMÄÄN PERUSTUVAN MITTALAITTEEN SUUNNITTELU

Tarkoituksena on parantaa pumpun nimellistuottomenetelmään perustuvan virtausmittauksen luotettavuutta kompensoimalla putkiston vastuskäyrää pumppaamoilla, joiden ohjaustapana on porraskäyttö. Taajuuskäyttöisillä

pumppaamoilla kompensoidaan putkiston vastuskäyrän lisäksi myös pumppujen ominaiskäyriä. Mittalaitte tulee perustumaan yleisesti saatavilla olevaan näytöllä ja näppäimistöllä varustettuun ohjelmoitavaan logiikkaan. Mittalaitteen suunnittelu aloitettiin määrittelemällä tarvittavat ohjelman ominaisuudet ja I/O liityntäpisteet. Laskennallinen raja-erottaa Excel-laskentapohjalla esilasketut mittalaitteeseen syötettävät raja-arvot ja mittalaitteessa reaaliajassa laskettavan tilavuusvirran arvon. Laskenta tapahtuu porraskäyttöisessä pumppaamossa pumppaamosäiliön pinta-anturin ja pumpun käyntitiedon perusteella. Taajuuskäyttöisessä pumppaamossa pinta-anturin lisäksi hetkittäisen tilavuusvirran laskentaan käytetään käynnissä olevien pumppujen pyörimistaajuutta. Tilavuusvirran kumulatiivisen laskennan tuloksena mittalaitte antaa ulos yhden kuutiometrin vesimääräpulssein, joka luetaan pumppaamon pinnansäätölaitteella. Koska pinnansäätölaitteessa on tietoliikenneyhteys pumppaamovalvontajärjestelmään, ovat virtaaman historiatiedot saatavilla pumppaamovalvontajärjestelmän historiatietokannasta.

12.1 Virtausmittaus ohjelman ominaisuudet

Mittalaitteen ohjelmaan tarvittavat ominaisuudet

- Mittaustavan valinta porras- tai taajuuskäytön väliltä.
- Pinta-anturin ja taajuusmuuttajan analogisten tulojen minimi- ja maksimiarvojen skaalaus.
- Hetkellisen kompensoidun tilavuusvirran laskeminen.
- Tilavuusvirran laskuri, jonka avulla hetkellisen tilavuusvirran arvo summataan sekunnin välein mittalaitteen tilavuusvirtalaskurin muistipaikkaan, kunnes saavutetaan 1 000 litran arvo. Tällöin mittalaitte antaa ulos yhden kuutiometrin vesimääräpulssein, jonka jälkeen tilavuusvirtalaskurin muistipaikka nollataan.
- Pumppaamosäiliön vedenpinnan korkeustieto käännetyllä arvolla, koska säiliön pinnan korkeuden noustessa staattinen nostokorkeus laskee.
- Pumppaamosäiliön vedenpinnan korkeustiedon offset-säädön syöttö mahdollisuus, pinnamittauksen säätämiseksi vastaamaan staattista nostokorkeutta.
- Käynnissä olevien pumppujen lukumäärän tieto. Porraskäyttöisissä pumppaamoissa lukumäärätieto saadaan pumpun digitaalisen käyntitiedon mukaan ja taajuuskäyttöisissä pumppaamoissa erikseen määritetyn pumpun käynnistys- ja pysäytystaajuuden mukaan.
- Käynnistys- ja pysäytysviive pumpun käynnille, jolloin virtausmittauksen aloitus- ja lopetuskohtaa voidaan säätää, esimerkiksi taajuusmuuttajan käynnistysrampin mukaan.
- Raja-arvojen syöttö mahdollisuus, jolloin asetuksia voidaan muuttaa suoraan logiikan näppäimistön avulla.

12.2 Ohjelmoitavan logiikan I/O liitynnät

Mittalaitteen kytkentöjä varten tarvittavat I/O liitynnät

- | | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| • analoginen tulo 4-20 mA | pumppaamosäiliön pinta-anturi |
| • analoginen tulo 4-20 mA | paineputken paine-anturi (varaus) |
| • analoginen tulo 4-20 mA | taajuusmuuttaja 1 taajuusviesti |
| • analoginen tulo 4-20 mA | taajuusmuuttaja 2 taajuusviesti |
| • analoginen tulo 4-20 mA | taajuusmuuttaja 3 taajuusviesti |
| • digitalinen tulo +24v | pumppu 1 käyntitieto |
| • digitalinen tulo +24v | pumppu 2 käyntitieto |
| • digitalinen tulo +24v | pumppu 3 käyntitieto |
| • digitalinen relelähtö | vesimääräpulsssi |

12.3 Logiikan valinta

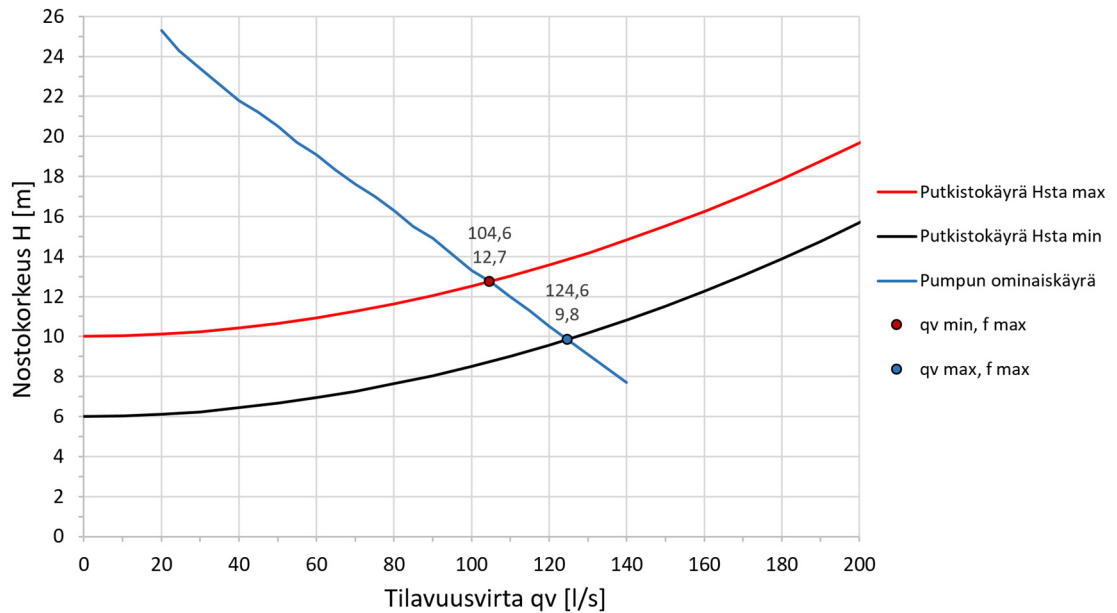
Mittalaite toteutetaan Unitronics Vision120 - ohjelmoitavalla logiikalla, laajenus adapterilla ja analogisella lisäkortilla. Käytettävän logiikan valintaan vaikutti käyttöliittymä, I/O liityntöjen määrä ja laitteiston saatavuus. Koska Kymen Vesi Oy:n käytettyjen laitteiden varastosta löytyi suoraan kaksi kappaletta tarvittavilla ominaisuuksilla varustettuja laitteistoja, ei muiden valmistajien laitteistojen käyttöön ollut perusteita. Unitronics Vision120 ja analogisen lisämoduulin IO-AI4-AO4 tekniset tiedot on esitetty liitteessä 3.

12.4 Raja-arvojen laskeminen

Tarvittavia laskutoimituksia varten tehdään Excel-laskentapohja kumpaakin ohjaustapaa varten. Laskentapohjaan tulee alempi ja ylempi staattisen nostokorkeuden mukaan laskettu putkiston vastuskäyrä, jolloin maksimi nostokorkeus voidaan määrittää pumppaamosäiliön pohjan koron perusteella ja miniminostokorkeus tuloviemärin ylivuodon mukaan. Kun nämä tiedot ovat selvillä, voidaan pumpun toimintapisteiden välisestä alueesta määrittää kulmakerroin, jonka muodostamaa janaa tilavuusvirran arvo seuraa staattisen nostokorkeuden mukaan. Taajuusohjatuissa pumppaamoissa lasketaan tämän lisäksi käynnissä olevien pumppujen ominaiskäyrät käytettävän taajuuden mukaan.

Excel-laskentapohjan putkiston vastuskäyrien laskentaan käytetään Bernoullin lakiin perustuvia kaavoja, jotka on esitetty luvussa 7. Pumpun ominaiskäyränä käytetään pumpputoimittajan ilmoittamia arvoja. Taajuuskäyttöisten pumppujen ominaiskäyrät on laskettu affiniteettisääntöjen mukaisesti, kaavat on esitetty luvussa 9.

Esimerkki porraskäyttöisen pumppaamon lasketuista raja-arvoista on esitetty kuvassa 25, sekä taulukossa 11.

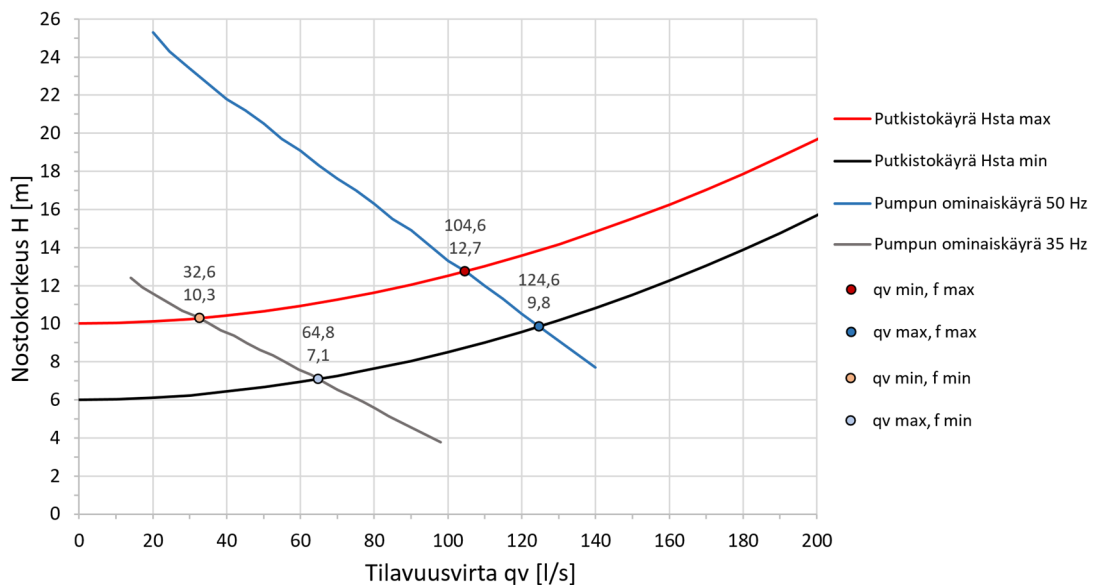


Kuva 25. Excel-laskentapohjalta saadut porraskäyttö ohjaustavan raja-arvot

Taulukko 11. Porraskäyttö ohjaustavan laskentapohjan raja-arvot

Piste	H [m]	qv [l/s]
qv min, f max	12,7	104,6
qv max, f max	9,8	124,6

Esimerkki taajuuskäyttöisen pumppaamon lasketuista raja-arvoista on esitetty taulukossa 12 ja kuvassa 26.



Kuva 26. Excel-laskentapohjalta saadut taajuuskäyttö ohjaustavan raja-arvot

Taulukko 12. Taajuuskäyttö ohjaustavan laskentapohjan raja-arvot

Piste	H [m]	q_v [l/s]
$q_{v \min}, f_{\max}$	12,7	104,6
$q_{v \max}, f_{\max}$	9,8	124,6
$q_{v \min}, f_{\min}$	10,3	32,6
$q_{v \max}, f_{\min}$	7,1	64,8

12.5 Kompensoidun tilavuusvirran laskeminen porraskäyttö ohjaustavalla.

Porraskäyttö ohjaustavan Excel-laskentapohjalla ennalta laskettujen raja-arvojen ja pumppaamosäiliön pinnankorkeuden mukaan voidaan laskea hetkellinen tilavuusvirta $q_{v \text{ komp,H}}$. Nostokorkeus kompensoidun tilavuusvirran arvo on laskettu kaavalla 23.

$$q_{v \text{ komp,H}} = (H_{\text{sta max}} - H) \cdot \frac{q_{v \text{ max}} - q_{v \text{ min}}}{H_{\text{sta max}} - H_{\text{sta min}}} + q_{v \text{ min}} \quad (23)$$

jossa	$q_v H_{\text{komp}}$	nostokorkeus kompensoitu tilavuusvirta	[l/s]
	H	pumppaamosäiliön pinnankorkeus	[m]
	$H_{\text{sta max}}$	raja-arvo: staattinen maksimi nostokorkeus	[m]
	$H_{\text{sta min}}$	raja-arvo: staattinen minimi nostokorkeus	[m]
	$q_{v \text{ max}}$	raja-arvo: maksimi tilavuusvirta	[l/s]
	$q_{v \text{ min}}$	raja-arvo: minimi tilavuusvirta	[l/s]

12.6 Kompensoidun tilavuusvirran laskeminen taajuuskäyttö ohjaustavalla.

Taajuuskäyttö ohjaustavan Excel-laskentapohjalla ennalta laskettujen raja-arvojen ja pumppaamosäiliön vedenkorkeuden, sekä pumpun käyntitaajuuden mukaan voidaan laskea hetkellinen tilavuusvirta $q_{v \text{ komp,H+f}}$. Nostokorkeus ja taajuus kompensoidun tilavuusvirran arvo on laskettu kaavalla 24.

$$\begin{aligned}
q_{v \text{ komp}, H+f} &= \frac{(f - f_{\min})}{(f_{\max} - f_{\min})} \\
&\cdot \left(q_{v \min, f_{\max}} + \frac{(q_{v \max, f_{\max}} - q_{\min, f_{\max}}) \cdot (H_{\text{sta max}} - H)}{H_{\text{sta max}} - H_{\text{sta min}}} \right) \\
&- \left(q_{v \min, f_{\min}} + \frac{(q_{v \max, f_{\min}} - q_{\min, f_{\min}}) \cdot (H_{\text{sta max}} - H)}{H_{\text{sta max}} - H_{\text{sta min}}} \right) \quad (24) \\
&+ q_{v \min, f_{\min}} + \frac{(q_{v \max, f_{\min}} - q_{\min, f_{\min}}) \cdot (H_{\text{sta max}} - H)}{H_{\text{sta max}} - H_{\text{sta min}}}
\end{aligned}$$

jossa	$q_{v \text{ komp}, H+f}$	nostokorkeus ja taajuus kompensoitu tilavuusvirta	[l/s]
	H	pumppaamosäiliön pinnankorkeus	[m]
	f	taajuusmuuttajan taajuus	[Hz]
	f_{\min}	raja-arvo: minimitaajuus	[Hz]
	f_{\max}	raja-arvo: maksimitaajuus	[Hz]
	$H_{\text{sta max}}$	raja-arvo: staattinen maksimi nostokorkeus	[m]
	$H_{\text{sta min}}$	raja-arvo staattinen minimi nostokorkeus	[m]
	$q_{v \max, f_{\max}}$	raja-arvo: maksimi tilavuusvirta, maksimitaajuus	[l/s]
	$q_{v \max, f_{\min}}$	raja-arvo: maksimi tilavuusvirta, minimitaajuus	[l/s]
	$q_{v \min, f_{\max}}$	raja-arvo: minimi tilavuusvirta, maksimitaajuus	[l/s]
	$q_{v \min, f_{\min}}$	raja-arvo: minimi tilavuusvirta, minimitaajuus	[l/s]

12.7 Ohjelmointi

Kompensoidun pumpun nimellistuottomenetelmään perustuvan mittalaitteen ohjelman tekemiseen käytettiin ohjelmoitavan logiikan valmistajan Unitronics VisiLogic - ohjelmaa. Tiedonsiirto ohjelmoitavan logiikan ja tietokoneen välillä tapahtui RS-232 kaapelilla. Ohjelmointi suoritettiin Ladder-ohjelmointikielellä, sekä käyttöliittymän suunnittelu HMI-rajapinnalla.

12.8 Ohjelman testaus

Ohjelman testausta varten rakennettiin testausalusta, mihin asennettiin kytkimet pumppujen käyntitietojen, sekä potentiometrit pumppaamosäiliön pintatiedon ja taajuusmuuttajan taajuusviestin simuloimista varten. Testausalustan

avulla ohjelmasta saatiin poistettua virheet ja lopullinen ohjelmaversio kopioitiin molempien mittalaitteiden ohjelmoitaviin logiikkoihin.



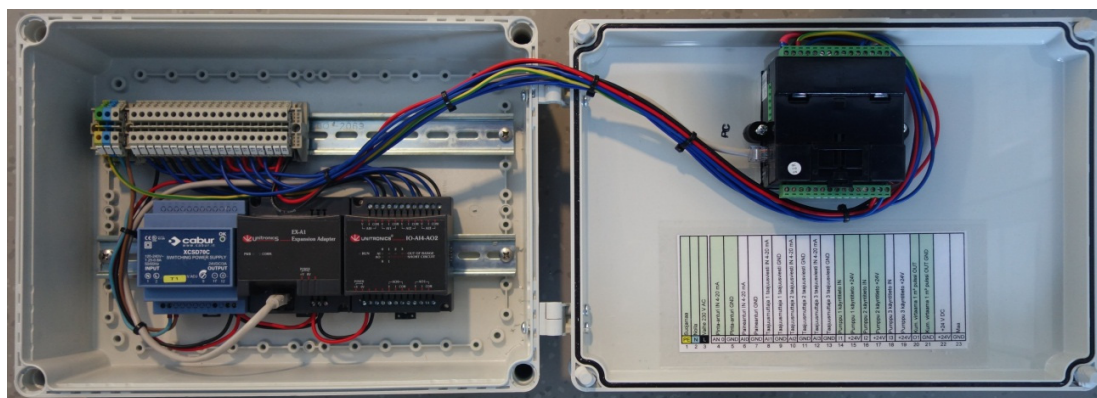
Kuva 27. Mittalaitteen testausalusta

13 MITTALAITTEEN VALMISTUS JA KÄYTTÖNOTTO

13.1 Mittalaitteen valmistus

Ohjelmoitava logiikka asenettiin polykarbonaatista valmistetun laitekotelon kanteen tehtyyn aukkoon ja laitteiston muut komponentit, sekä riviliittimet DIN-kiskoihin kotelon sisäpuolelle. Laittekotelon IP luokka on 66 ja ohjelmoitavan logiikan 65, joten mittalaitte tulee kestävämmän jätevesipumppaamoiden vaativat olosuhteet. Mittalaitteen riviliittimien kytkennät on esitetty kuvassa 29.

Laitteen listahintojen mukaiset valmistuskustannukset on esitetty liitteessä 7.



Kuva 28. Asennusvalmis mittalaite

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Suojamaa	Nolla	Vaihe 230 V AC	Pinta-anturi IN 4-20 mA	Pinta-anturi GND	Paineanturi IN 4-20 mA	Paineanturi GND	Taajuusmuttaja 1 taajuusviesti IN 4-20 mA	Taajuusmuttaja 1 taajuusviesti GND	Taajuusmuttaja 2 taajuusviesti IN 4-20 mA	Taajuusmuttaja 2 taajuusviesti GND	Taajuusmuttaja 3 taajuusviesti IN 4-20 mA	Taajuusmuttaja 3 taajuusviesti GND	Pumppu 1 käyntitieto IN	Pumppu 1 käyntitieto +24V	Pumppu 2 käyntitieto IN	Pumppu 2 käyntitieto +24V	Pumppu 3 käyntitieto IN	Pumppu 3 käyntitieto +24V	Vesimäärä 1 m ³ + 24V IN	Vesimäärä 1 m ³ pulssi OUT +24V	+24 V DC	Maa
PE	N	L	AN0	GND	AI0	GND	AI1	GND	AI2	GND	AI3	GND	I1	+24V	I2	+24V	I3	+24V	O1_1	O1_2	+24V	GND
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

Kuva 29. Mittalaitteen riviliitin

13.2 Käyttöönotto

Mittalaitteen käyttöönottoa varten sovittiin asennuspäivä (28.2.2017) sähköurakoitsijan kanssa molempia mittauskohde pumppaamoita varten. Asennuksen jälkeen suoritettiin laitteiden parametointi Excel-laskentapohjan mukaisin raja-arvoin ja pinnanmittauksen offset-säätö. Pinnansäätölaitteen vesimäärä-pulssin arvo asetettiin mittalaitteen kanssa samaksi, yksi kuutiometri vettä pulssia kohden. Ekoparkin pumppaamon raja-arvot on esitetty taulukossa 13 ja Kotkansaaren pumppaamon vastaavat parametrit taulukossa 14.

Taulukko 13. Ekoparkin pumppaamon raja-arvot

Pumppuja [kpl]	Muuttuja [-]	q_v [l/s]	H_{sta} [m]
1	$q_{v \max}$	20,1	6,0
1	$q_{v \min}$	16,9	9,0
2	$q_{v \max}$	22,9	6,0
2	$q_{v \min}$	19,6	9,0

Taulukko 14. Kotkansaaren pumppaamon raja-arvot

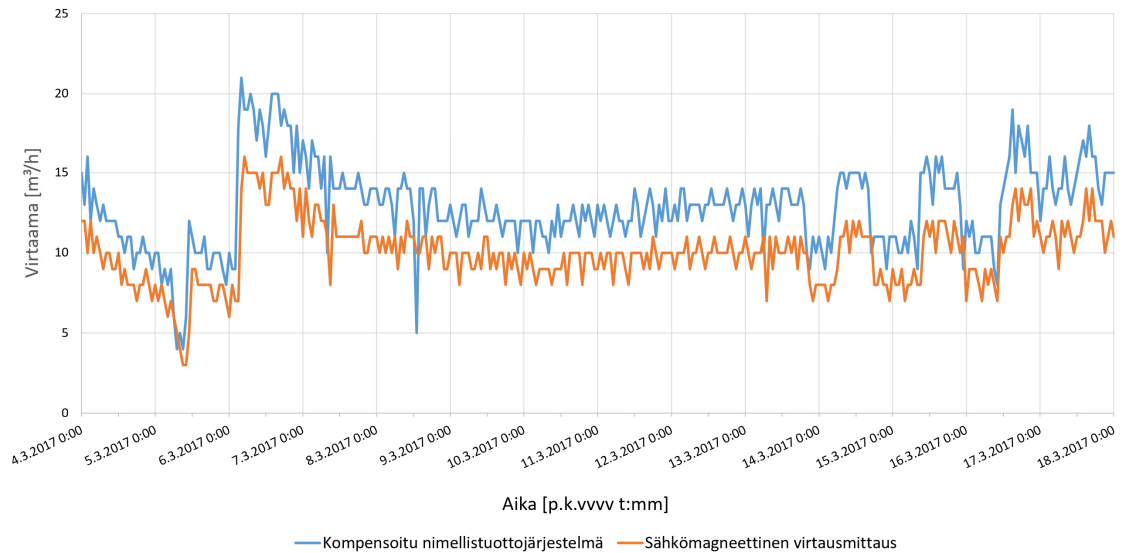
Pumppuja [kpl]	f_{pumppu} [Hz]	Muuttuja [-]	q_v [l/s]	H_{sta} [m]
1	50	$q_{v \text{ min}}, f_{\text{ max}}$	117,5	6,0
1	50	$q_{v \text{ max}}, f_{\text{ max}}$	98,8	10,0
1	30	$q_{v \text{ min}}, f_{\text{ min}}$	39,0	6,0
1	30	$q_{v \text{ max}}, f_{\text{ min}}$	6,2	10,0
2	50	$q_{v \text{ min}}, f_{\text{ max}}$	167,1	6,0
2	50	$q_{v \text{ max}}, f_{\text{ max}}$	144,5	10,0
2	30	$q_{v \text{ min}}, f_{\text{ min}}$	60,5	6,0
2	30	$q_{v \text{ max}}, f_{\text{ min}}$	11,5	10,0
3	50	$q_{v \text{ min}}, f_{\text{ max}}$	186,0	6,0
3	50	$q_{v \text{ max}}, f_{\text{ max}}$	163,8	10,0
3	30	$q_{v \text{ min}}, f_{\text{ min}}$	72,3	6,0
3	30	$q_{v \text{ max}}, f_{\text{ min}}$	18,0	10,0

13.3 Tulosten seuranta

Jotta mittalaitteen luotettavuudesta saataisiin mahdollisimman hyvä kokonaiskuva, tulisi seurantajakso ajoittaa keväälle lumen sulamisen ajankohtaan, jolloin saataisiin seurattua laitteen toimintaa myös maksimivirtaamalla. Koska tämän työn tekemiseen varattu aika oli rajallinen, tyydyttiin tekemään 14 päivän seuranta molempiin kohteisiin.

13.4 Ekoparkin pumppaamon seurantajakso

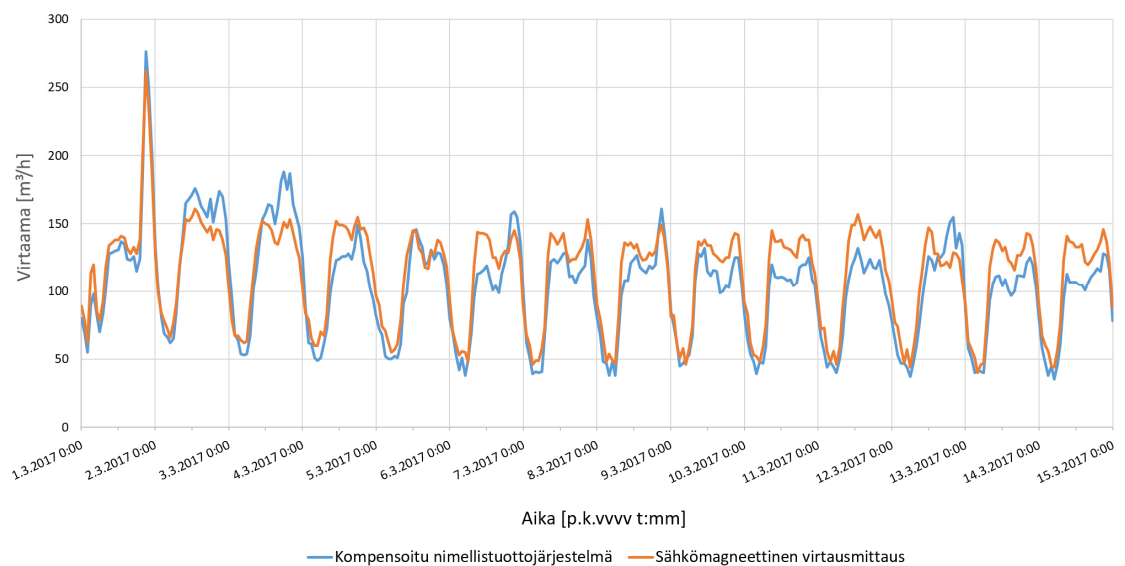
Ekoparkin pumppaamon seurantajakson 4.3.2017 – 18.3.2017 aikana oli virtaamaprofiilissa havaittavissa epäsäännöllisiä nousuja ja laskuja, nämä johtuvat teollisuusjätevesimäärien vaihtelusta. Mittalaitteen raja-arvojen laskentaan käytetyn painekoemittauksen tulos oli 29,8 % suurempi, kuin sähkömagneettisen vertailumittauksen. Tämä ero näkyy selvästi kuvassa 30 esitettyssä diagrammissa. Ekoparkin pumppaamolle asennettu mittalaite antoi koko seurantajakson ajalta 28,2 % suuremman vesimäärälukeman, kuin vertailumittauksena käytetty sähkömagneettinen virtausmittaus. Mittausten päiväkohtaiset vesimäärien erot olivat maksimissaan 87,5 % ja minimissään 0 %.



Kuva 30. Ekoparkin pumppaamon seurantajakson virtaama

13.5 Kotkansaaren pumppaamon seurantajakso

Kotkansaaren pumppaamon seurantajakson 1.3.2017 – 15.3.2017 alussa oli rankkasade, joka näkyy virtaamapiikkinä kuvassa 31. Kuvassa näkyy myös normaaliajan virtaaman vuorokausiprofiili, jossa virtaama laskee yöksi miniimiin ja nousee aamulla takaisin normaalilukemaan. Kotkansaaren pumppaamolle asennettu nimellistuottojärjestelmään perustuva mittalaite antoi koko seurantajakson ajalta 8,8 % pienemmän vesimäärälukeman, kuin vertailu mittauksena käytetty sähkömagneettinen virtausmittaus. Mittausten päiväkohtaisen vesimäärän ero oli maksimissaan 16,8 % ja minimissään 3,6 %.



Kuva 31. Kotkansaaren pumppaamon seurantajakson virtaama

14 YHTEENVETO

Tässä työssä kehitettiin astiamittaukseen perustuvalla virtausmittaukselle vaihtoehtoinen tapa mitata pumpatun jäteveden määrää Kymen Vesi Oy:n jätevesipumppaamoilla. Kehitetty mittalaitte perustuu nimellistuottomenetelmään.

Kehitetyn mittalaitteen tarkkuus todennettiin kahdessa eri ohjaustavalla toimivassa pumppaamossa 14 vuorokauden mittaisella virtaaman vertailujaksolla. Ekoparkin porraskäyttöisellä pumppaamolla saatiin kehitetyn mittalaitteen tarkkuudeksi koko vertailujaksolla 28,2 % suurempi vesimäärä, kuin vertailumittauksena käytetyllä sähkömagneettisella virtausmittauksella. Kotkansaaren taajuuskäyttöisellä pumppaamolla saatiin vastaavasti 8,8 % vertailumittausta pienempi vesimäärä.

Ekoparkin pumppaamon raja-arvojen laskemiseen käytetyt painekoemittauksen arvot olivat 29,8 % suuremmat, kuin vertailumittauksen vastaavat arvot. Kyseisiä arvoja päätettiin kuitenkin käyttää seurantajaksolla, koska suurimassa osassa seurantakohte pumppaamoita painekoemittaus on ainoa tapa selvittää paineviemärin muuttujat. Kotkansaaren pumppaamon raja-arvojen laskentaan käytetyt painekoemittauksen arvot olivat keskimäärin 3,1 % pienemmät, kuin vertailumittauksen vastaavat arvot. Tuloksista voidaan päätellä mittalaitteen tarkkuuden olevan verrannollinen lähtötietojen luotettavuuteen.

Saatujen tulosten perusteella päätettiin jättää toinen valmistetuista mittalaitteista jatkuvaan käyttöön Kotkansaaren pumppaamolle. Pumppaamon paineviemäri on 2 600 metriä pitkä ja se kulkee vesistön alitse Mussalon jätevedenpuhdistamolle, missä purkupään läheisyydessä sijaitsee sähkömagneettinen virtausmittari. Koska paineputken molemmissa päissä on nyt virtausmittaus, mahdollinen paineviemärin vuotovaurio on havaittavissa vertaamalla keskenään lähtö- ja purkupään virtaamatietoja.

Mittalaitetta tullaan käyttämään viemäriverkoston vuotovesimäärien seurantaan ongelma-alueiden jätevesipumppaamoilla. Koska seuranta tehdään tietyllä ajanjaksolla, ei kiinteästi asennettavalle virtausmittaukselle ole tarvetta. Seurantajakson jälkeen laite voidaan sijoittaa seuraavaan seurantakohteeseen. Kiinteästi asennetun sähkömagneettisen virtausmittauksen laitteistokus-

tannukset, johon kuuluvat mm. DN150 virtausmittauselementti, signaalin vahvistin, sekä laitekaivo, ovat n. 8 200 €, alv 0 %, tuote-erittely on esitetty liitteessä 8. Kustannuksissa ei ole otettu huomioon maansiirtotöitä, eikä paineviemäriin muutostöitä, koska asennuspaikkojen maaperä, sekä putkistomateriaalit eroavat toisistaan. Kehitetyn mittalaitteen valmistuskustannukset ovat lisähintojen mukaan 1 557 €, alv 0 %, joten laitteen käyttäminen seuranta-mittauksiin on kustannustehokasta.

Mittalaitetta voidaan kehittää lisäämällä ohjelmoitavaan logiikkaan paineputken paineen mittausohjelma, jolloin pumpun käydessä voidaan mitattavan paineen mukaan selvittää tätä vastaava nostokorkeus. Nostokorkeuden mukaan voidaan laskea suoraan putkistokäyrältä sitä vastaava tilavuusvirta. Tähän mittaustapaan ei vaikuta pumpun kuluminen tai tukkeutuminen. Huonona puolella on painelähttimen hankinnasta ja paineputki asennukseen tarvittavan yhteen lisäämisestä aiheutuvat lisäkustannukset.

LÄHTEET

Bohl, W. 1984. Teknillinen virtausoppi. 5. painos. Tampere: Oy Sonator Ab.

Borg, H. & Sarvanne, H. 1979. Sarlin uppopumppukirja. 1. painos. Helsinki: Oy E. Sarlin Ab.

Centrifugal Pump Handbook. 2011. Third Edition. Sulzer Pumps Ltd.

Isohanni, J. 2016. Automaatioinsinööri. AB Lining Oy. Automaatio-osasto. Haastattelu 21.9.2016. Kotka: Sakkaran jätevesipumppaamo.

Karttunen, E. 1998. Vesihuoltotekniikan perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy.

Lining AqvaSemi. 2014. Ohjaus- ja valvontayksikkö käyttöohje, versio 3.0. Oy Lining Ab.

Mäkitalo, J. 2017. Käyttöinsinööri. Kymen Vesi Oy. Puhdistamoyksikkö. Haastattelu 23.2.2017. Kotka: Mussalon jätevedenpuhdistamo.

Pulkkinen, J. 2017. Putkimestari. Kymen Vesi Oy. Verkostoyksikkö. Haastattelu 17.1.2017. Kotka: Mussalon jätevedenpuhdistamo.

RIL 124-2 Vesihuolto II. 2004. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Vammala: Vammalan kirjapaino Oy.

The Sewage Pumping Handbook. 2004. Grundfos wastewater. Grundfos.

Wirzenius, A. 1973. Keskipakopumput. Ensimmäinen painos. Tampere: Kustannusyhtymä Tampere.

Putken karheuden ohjearvoja (Borg & Sarvanne 1979, 36)

	Uusi putki k	Vanha putki k
Materiaali	[mm]	[mm]
Muovi	0,01	0,25
Teräs	0,10	1,00
Valurauta	0,25	1,00
Haponkestävä teräs	0,10	0,25

Muoviputkijärjestelmät veden johtamiseen ja paineviemärointiin (SFS-EN 12201-2)

(http://www.pipelife.fi/_media/fi/infra/PL_PE_paineputkijarjestelmat_esite_060913.pdf)

Vakiomittasuhte [d _n /e _n]	SDR 6	SDR 7,4	SDR 9	SDR 11	SDR 13,6	SDR 17	SDR 21	SDR 26	SDR 33	SDR 41
PE 80 MOP [bar]	PN 25	PN 20	PN 16	PN 12,5	PN 10	PN 8	PN 6*	PN 5	PN 4	PN 3,2
PE 100 MOP [bar]		PN 25	PN 20	PN 16	PN 12,5	PN 10	PN 8	PN 6**	PN 5	PN 4
Jäykkyysluokka [kN/m ²]				SN 64	SN 32	SN 16	SN 8	SN 4	SN 2	SN 1
Ulkohalkaisija d _n [mm]	Seinämän vähimmäispaksuus e _n [mm]									
50	8,3	6,9	5,6	4,6	3,7	3,0	2,4	2,0		
63	10,5	8,6	7,1	5,8	4,7	3,8	3,0	2,5		
75	12,5	10,3	8,4	6,8	5,6	4,5	3,6	2,9		
90	15,0	12,3	10,1	8,2	6,7	5,4	4,3	3,5		
110	18,3	15,1	12,3	10,0	8,1	6,6	5,3	4,2		
125	20,8	17,1	14,0	11,4	9,2	7,4	6,0	4,8		
140	23,8	19,2	15,7	12,7	10,3	8,3	6,7	5,4		
160	29,9	24,6	20,1	16,4	13,3	10,7	8,5	6,9		
180	29,9	24,6	20,1	16,4	13,3	10,7	8,5	6,9		
200	33,2	27,4	22,4	18,2	14,7	11,9	9,6	7,7		
225	37,4	30,8	25,2	20,5	16,6	13,4	10,8	8,6		
250	41,5	34,2	27,9	22,7	18,4	14,8	11,9	9,6		
280	46,5	38,3	31,3	25,4	20,6	16,6	13,4	10,7		
315	52,3	43,1	35,2	28,6	23,2	18,7	15,0	12,1	9,7	7,7
355	59,0	48,5	39,7	32,2	26,1	21,1	16,9	13,6	10,9	8,7
400		54,7	44,8	36,3	29,4	23,7	19,1	15,3	12,3	9,8
450		61,5	50,3	40,9	33,1	26,7	21,5	17,2	13,8	11,0
500			55,8	45,5	36,8	29,7	23,9	19,1	15,3	12,3
560			62,5	50,8	41,2	33,2	26,7	21,4	17,2	13,7
630			70,3	57,2	46,3	37,4	30,0	24,1	19,3	15,4
710			79,3	64,5	52,2	42,1	33,9	27,2	21,8	17,4
800			89,3	72,6	58,8	47,4	38,1	30,6	24,5	19,6

* Todellinen paineluokka on PN 6,3

** Todellinen paineluokka on PN 6,4

Paikallisvastukset (Borg & Sarvanne 1979, 36–40)

Putkistokomponentti	Paikallisvastus [ξ]
Käyrä r/d ≤ 3	0,5
Käyrä r/d ≥ 3	0
T-haara 90° yhtyvät virtaukset	0,95 - 1,28
T-haara 90° eroavat virtaukset	-1,00 - 0,91
T-haara 45° yhtyvät virtaukset	0,90 - 0,48
T-haara 45° eroavat virtaukset	0,91 - 0,60
90° mutka r/d 1-20	0,36 - 0,41
Läppätakaiskuventtiili	1 - 2
Pallotakaiskuventtiili	1,5 - 2,5
Luistiventtiili	0,2

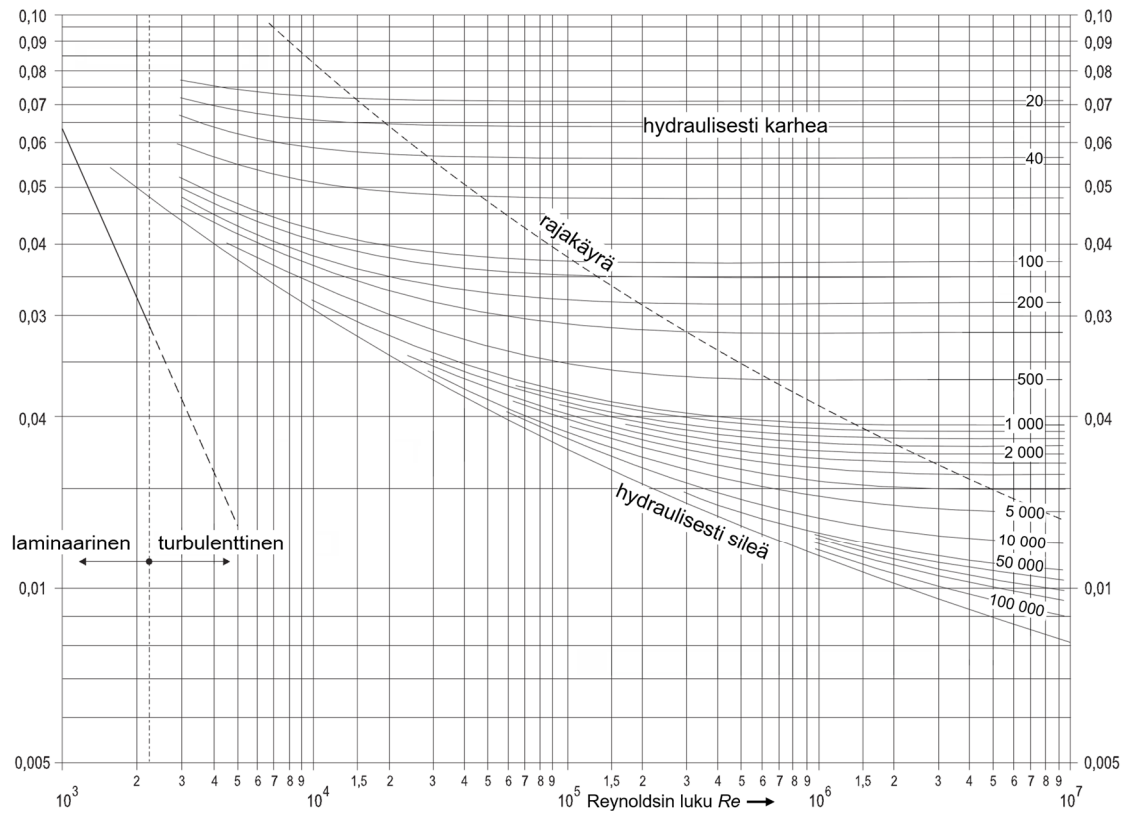
Veden ominaisuuksia (Centrifugal Pump Handbook 2008, 323)

t [°C]	p [bar]	ρ [kg/m ³]	μ 10 ⁻⁶ kg/m·s	ν 10 ⁻⁶ m ² /s
0,01	0,006112	999,8	1750	1,75
10	0,012271	999,7	1300	1,30
20	0,023368	998,3	1000	1,00
30	0,042417	995,7	797	0,80
40	0,073749	992,3	651	0,66
50	0,123340	988,0	544	0,55
60	0,199190	983,2	463	0,47
70	0,311610	977,7	400	0,41
80	0,473590	971,6	351	0,36
90	0,701080	965,2	311	0,32
100	1,013200	958,1	279	0,29

Kitkakerroin kaavat (Bohl 1984, 96–97)

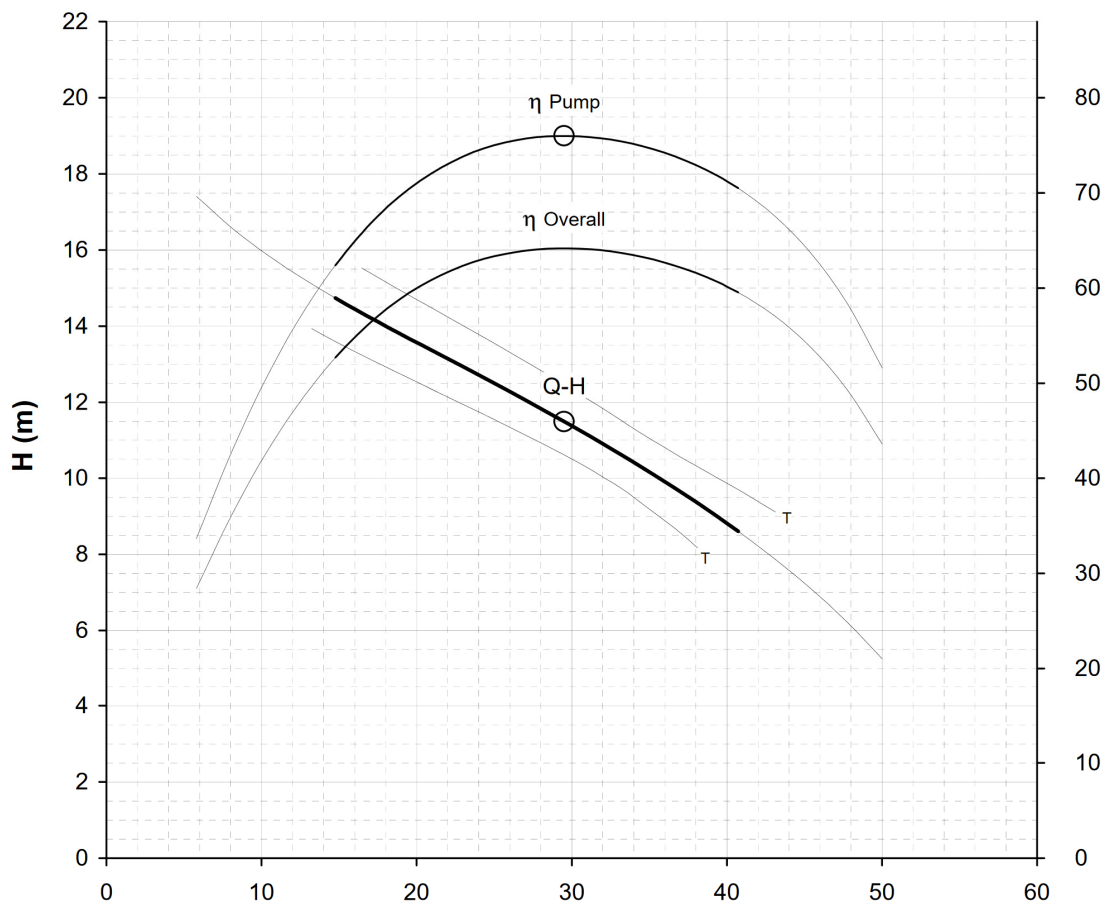
hydraulisesti sileät putket	hydraulisesti karheat putket	ylimenoalue
rajoitus: $Re \cdot \frac{k}{d} < 65$	rajoitus: $Re \cdot \frac{k}{d} > 1300$	rajoitus: $65 < Re \cdot \frac{k}{d} < 1300$
<p>alue liitetaulukossa 14</p> <p>log virtausvastuskerroin λ</p> <p>log Reynoldsin luku Re</p>	<p>alue liitetaulukossa 14</p> <p>log virtausvastuskerroin λ</p> <p>log Reynoldsin luku Re</p>	<p>alue liitetaulukossa 14</p> <p>log virtausvastuskerroin λ</p> <p>log Reynoldsin luku Re</p>
<p>λ:n lausekkeet Blasiuksen yhtälö Alue $2320 < Re < 10^5$</p> $\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25}$ <p>Nikuradsen yhtälö alueelle $10^5 < Re < 5 \cdot 10^6$</p> $\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237}$ <p>Prandtin ja v. Kármánin yhtälö alueelle $Re > 10^6$</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg (Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,8$	<p>λ:n lausekkeet Nikuradsen yhtälö</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{d}{k} + 1,14$ <p>Moodyn yhtälö</p> $\lambda = 0,0055 + 0,15 \left(\frac{k}{d} \right)^{1/3}$	<p>λ:n lausekkeet Prandtl-Colebrookin yhtälö</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{d} \cdot 0,269 \right]$

Moodyn käyrästä (<http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/assets/downloads/sewage-handbook.pdf>)



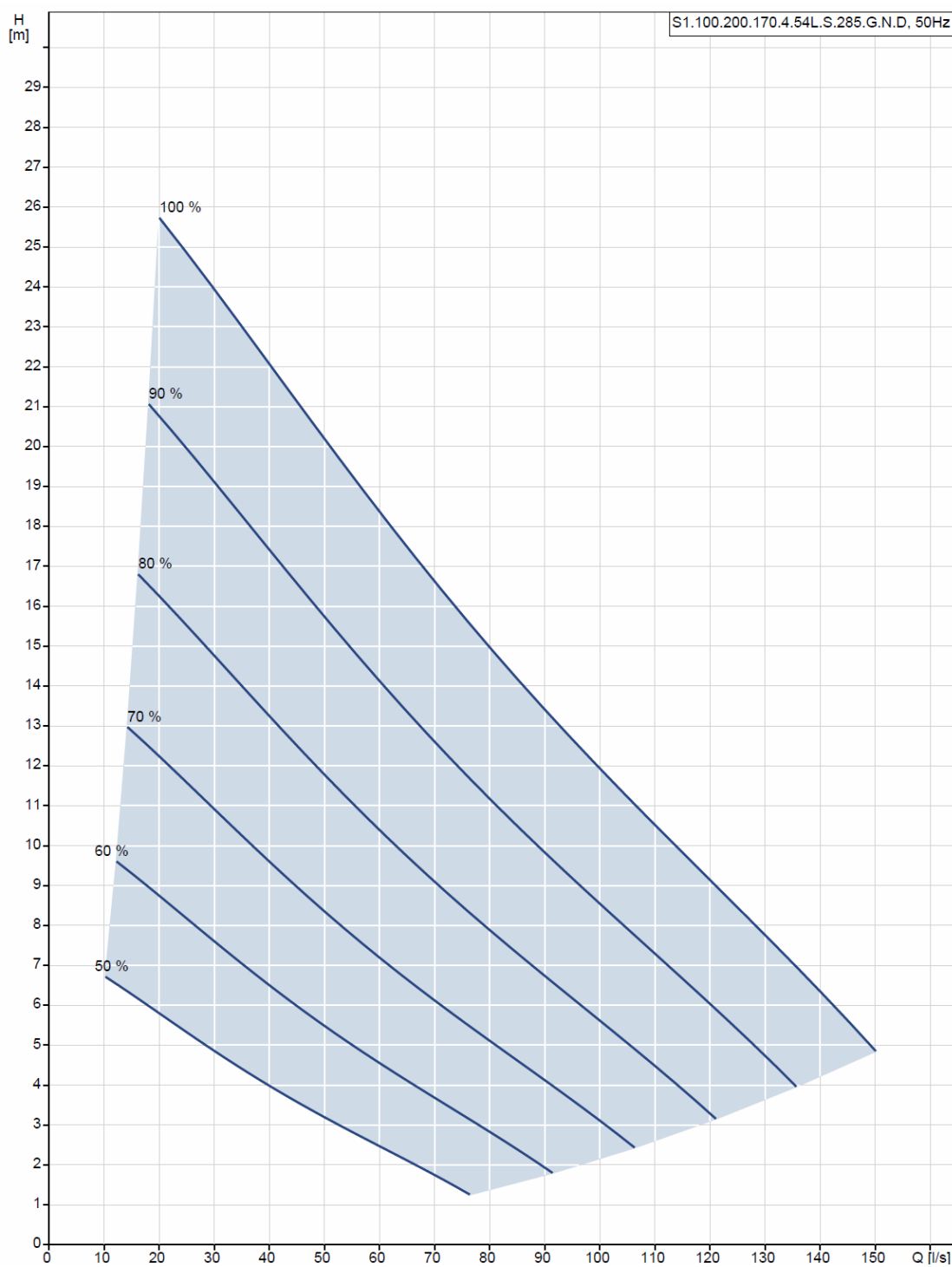
Hidrostral D04M-EMU ominaiskäyrä

(<https://www.hidrostral.com>)



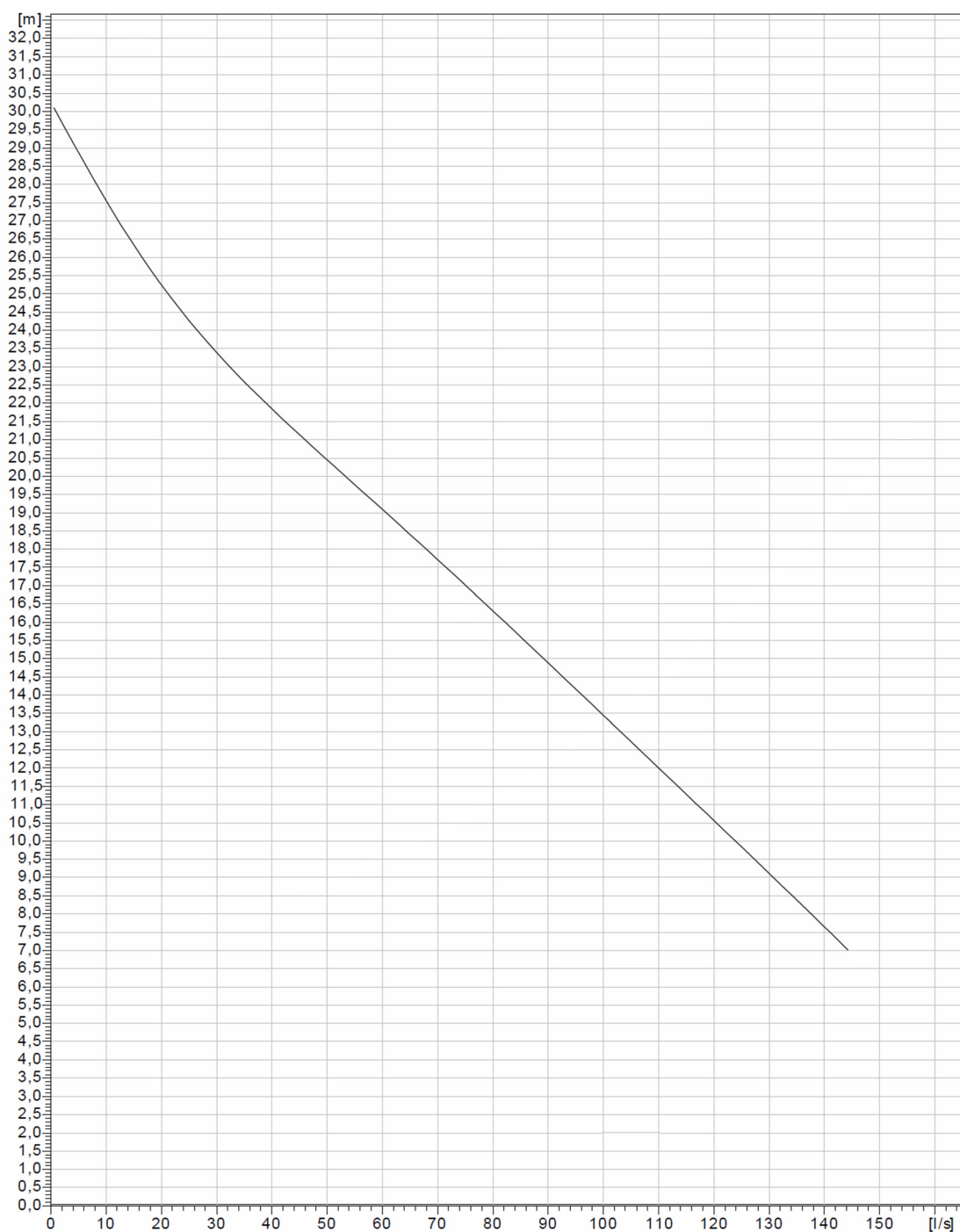
Grundfos S1.100.200.170.4.54L.S.285.G.N.D ominaiskäyrä

(<http://fi.grundfos.com/>)



Flygt NP 3171 MT 3 ominaiskäyrä

(www.xylemwatersolutions.com/scs/finland)



Ohjelmoitava logiikka Unitronics Vision120 V120-22-R2C ominaisuudet[\(https://unitronicsplc.com/vision-series-vision120/\)](https://unitronicsplc.com/vision-series-vision120/)

Käyttöjännite:	12/24 VDC
Sisäänmenot:	10 x digitalinen 2 x analoginen 0–20 mA, 4–20 mA 10-bit 3 x nopea 10 KHz, 32-bit
Ulostulot:	6 x rele

Laajennusmoduuli Unitronics IO-AI4-AO2 ominaisuudet[\(https://unitronicsplc.com/vision-series-vision120/\)](https://unitronicsplc.com/vision-series-vision120/)

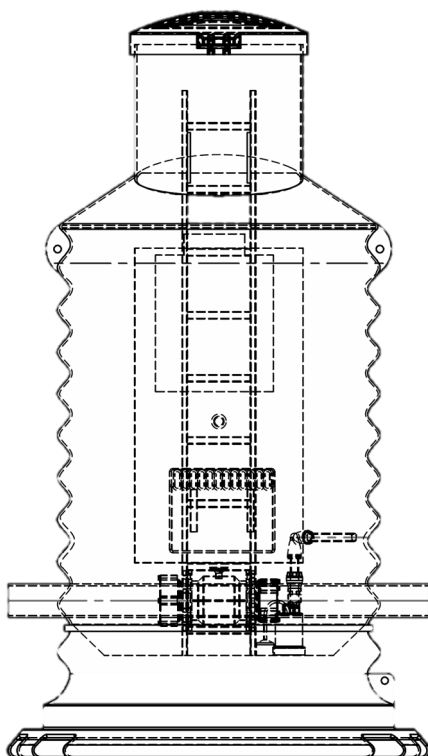
Sisäänmenot:	4 x analoginen 0–20 mA, 4–20 mA 12-bit
Ulostulot:	2 x analoginen 0–20 mA, 4–20 mA 12-bit

Mittalaitteen komponenttien listahinnat 2017

Ohjelmoitava logiikka - Unitronics V120-22-R2C	1 000 €	(www.klinkmann.fi)
Laajennusmoduuli - Unitronics EX-A1	100 €	(www.klinkmann.fi)
Analoginen I/O moduuli - Unitronics IO-AI4-AO2	238 €	(www.klinkmann.fi)
Teholähde Cabur XCSD70C 24 VDC 3A	101 €	(www.klinkmann.fi)
Laittekotelo – EK Fibox 380x280x130	88 €	(Onninen Oy)
Asennustarvikkeet	30 €	(Onninen Oy)
<i>Yhteensä</i>	<i>1 557 €</i>	<i>alv 0 %</i>

Sähkömagneettisen virtausmittauksen laitteistokustannukset

(Oy Lining Ab 2017)



Valmis tyyppikuvan mukainen kaivo:

Runkomateriaali PE100

Mieskuilu D=800, muovikannella ja lämpövälikannella

Tikkaat

Kuivanapitopumppu

Lämmitin ROTI 350 W

Virtausputki PE100, 160mm (hitsattu runkoon)

Sähkökeskus

Virtausmittari Krohne Optiflux 2000F d_n150

Vahvistin Krohne IFC300 VR (virtuaalireferenssi)

Virtausmittari kiinnitys Hawle 0400 liittimillä

Yhteensä n. 8 200 €, alv 0 %, vapaasti tehtaalla. (Oy Lining Ab 2017)