



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**BETONITYYPIN VAIKUTUS
KALSIUMHYDROKSIDIN LIUKENEMISEEN
VESIJOHTOVERKOSTOPUTKIEN
ASENNUSHUUHTELUSSA**

Joni Ruottinen

Prosessitekniiikan koulutusohjelma

Diplomityö

Syyskuu 2018



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**BETONITYYPIN VAIKUTUS
KALSIUMHYDROKSIDIN LIUKENEMISEEN
VESIJOHTOVERKOSTOPUTKIEN
ASENNUSHUUHTELUSSA**

Joni Ruottinen

Ohjaajat: Pekka Rossi ja Elsiangela Heiderscheidt.

Prosessitekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

Syyskuu 2018

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Prosessitekniikan koulutusohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Ruottinen Joni		Työn ohjaaja yliopistolla Rossi P, TkT ja Heiderscheidt E, TkT	
Työn nimi Betonityypin vaikutus kalsiumhydroksidin liukenemiseen vesijohtoverkostoputkien asennushuuhtelussa			
Opintosuunta Kemian prosessitekniikka	Työn laji Diplomityö	Aika Syyskuu 2018	Sivumäärä 57 s.
<p>Tiivistelmä</p> <p>Uusien betonoitujen teräsvesijohtoverkostoputkien käyttöönottoa ennen ne pitää huuhdella. Yksi syy miksi huuhtelua tarvitaan, on, koska betonin pinnalta liukenee veteen vapaata kalkkia tai kalsiumhydroksidia, joka nostaa veden pH:ta, alkaliteettia ja kalsiumpitoisuutta. Erityisesti veden pH voi nousta nopeasti niin korkealle, että vesi ei täytä hetkellisesti vedenlaadun kelpoisuusvaatimuksia. Huuhtelun aikana betonin pinnalla olevan kalsiumhydroksidin määrä laskee, joka johtaa liukenemisen vähenemiseen ja veden pH:n laskuun. Käytetyn huuhteluveden laatu vaikuttaa huuhteluun tarvittavaan aikaan ja liukenemiseen.</p> <p>Tässä työssä tutkittiin keinoja vähentää huuhteluveden pH-arvoa ja lyhentää putkien huuhteluaikaa. Kirjallisuustutkimuksessa on esitetty vedenhuollon peruseräatteen. Aikaisemmin tehty tutkimukset on käyty läpi ja ne ovat myös esitetty työssä. Löydetyt tiedot otettiin huomioon, kun laboratoriokoetta suunniteltiin. Betonityypin ja huuhteluveden laadun vaikutusta veteen liuenneiden alkalisten yhdisteiden määrään ja siitä johtuvan pH:n nousuun tutkittiin laboratorio-olosuhteissa tehdyllä liukenemiskokeella.</p> <p>Betonoitujen putkien liukenemistä voidaan vähentää usealla tavalla kuten maalien tai korroosionestoaineiden käytöllä tai osittain sementin korvaaminen aineilla kuten masuunikuonalla. Sementin korvaaminen muilla aineilla on johtanut hyviin tuloksiin ja se on kustannustehokasta. Tämän takia betonityypin (sulfaatinkestävää Portland-sementtiä 60% ja 40% masuunikuonaa) vaikutusta liukenemiseen tutkittiin laboratorio-olosuhteissa. Kokeessa tutkittiin myös huuhteluvedenlaadun vaikutusta betonin aineiden liukenemiseen. Kokeessa käytetyn korkean alkaliteetin vesi oli peräisin Keminmaalta ja matalan alkaliteetin vesi oli peräisin Helsingistä. Kokeessa betonipalat upotettiin veteen 34:ksi päiväksi, jonka aikana vedet vaihdettiin yhdeksän kertaa. Vesistä mitattiin pH ja sähkönjohtavuus paikan päällä ennen vedenvaihtoa. Vesistä otettiin näytteet, joista analysoitiin alkaliteetti, kalsiumpitoisuus, veden kovuus, alumiinipitoisuus, liuennut hiili ja vapaa kloori.</p> <p>Koetulosten perusteella masuunikuonasementit johtavat pienempään alkaliaineiden liukenemiseen ja samalla pienempään pH:n nousuun. Mitä enemmän masuunikuonaa betonissa on, sitä vähemmän pH nousee. Masuunikuonapitoisuus rajoitti myös alkaliteetin ja kalsiumpitoisuuden kasvua. Korkean alkaliteetin omaavan veden pH nousi vähemmän, kuin matalan alkaliteetin. Käytetyn veden laadulla on suurempi vaikutus liukenemiseen kuin sementtityypillä. Siksi, vaikka tietyillä alueilla vedenlaatua ei voida valita, pitää se ottaa huomioon sen liukenemisen vaikutuksen vuoksi. Tulosten perusteella voidaan suositella masuunikuonasementin käyttöä betonoiduissa putkissa Portland-sementin sijasta Pohjoismaisissa vesissä, joissa alkaliteetti on matala.</p>			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Process Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Ruottinen Joni		Thesis Supervisor Rossi P, PhD (tech.) and Heiderscheidt E, PhD (tech.)	
Title of Thesis Impact of concrete type on the leaching of calcium hydroxide during flushing of water distribution network pipes			
Major Subject Chemical Process Engineering	Type of Thesis Master's Thesis	Submission Date September 2018	Number of Pages 57 p.
<p>Abstract</p> <p>Before newly installed cement mortar lined steel pipes are put in operation, they have to be flushed. One of the reasons why flushing is required is leaching of free lime also known as calcium hydroxide from the concrete surface to the water. The dissolution of calcium hydroxide results in an increase in the water pH, alkalinity and calcium concentration of the water. The increase in pH in particularity, can be significant and reach levels far above drinking water requirements. During flushing the water is discarded and with time the available calcium hydroxide at the concrete surface will decrease, thus leaching is reduced and the effect on the water pH will decrease. The required flushing time and the leached concentration are depended on quality of the water used during the flushing.</p> <p>In this thesis, the suitability of different methods for reducing leaching from concrete lined pipes was investigated. Basics principles related to water supply networks are presented in the background section. Previous research conducted in the topic was reviewed and it is also presented. Main finding from the literary review was taken under consideration when designing practical experiments. The influence of concrete type and flushing water quality on the leaching of alkaline compounds and consequently on water pH was investigated via leaching experiment under laboratory conditions.</p> <p>In general, a number of solutions can be applied to minimize the leaching from concrete line pipes such as the use of paints and corrosion preventative additives and partial replacement of portions of the cement used in the concrete mixture with materials like blast-furnace slag. Among the suggested solutions, the addition of aggregate materials to the concrete mixture have achieved good results and is a cost-effective alternative. Therefore, the influence of cement type (sulphate resistant, normal Portland cement, 60% and 40% added slag content) on leaching of alkaline compounds was evaluated under laboratory conditions. Furthermore, the effect of flushing water quality was also investigated. High alkalinity water sample from Keminmaa and lower alkalinity water sample from Helsinki areas were used in the experiment. In the experiment, concrete pieces were submerged in water for 34 days during which the waters were changed nine times. Electric conductivity and pH where measured before the test and before each water change. Water samples (raw water and flushing water) were sent to an outsourced laboratory for analysis of alkalinity, calcium, aluminium, hardness, dissolved organic carbon and free chlorine.</p> <p>Results of the experiment shows that, the use of blast-furnace slag cement lead to lower leaching and consequently lower water pH. Increased amount of slag in the cement increased the effect. It follows that, blast-furnace slag limited the rise of alkalinity and calcium concentrations in the water. The increased pH observed in the high alkalinity water sample pH was lower than the one observed in the low alkalinity water sample. Overall, the influence of flushing water quality on leaching was higher than the influence of cement type. Therefore, although in a particular location the water quality cannot be selected, it must be taken under consideration due to the effect it has on leaching. Overall, the use of slag-furnace cement instead of Portland cement in cement mortal lined pipes can be recommended in Northern Europe based on the results of the experiment because the low alkalinity of the water.</p>			

ALKUSANAT

Diplomityön tarkoituksena oli vähentää betonoitujen putkien huuhteluaikaa. Aihe oli alustavasti aika laaja ja mahdollisuuksia täynnä mutta se rajattua sopivaan alueeseen, josta saatiin hyödyllisiä tuloksia.

Kiitoksia Miilupipelle ja SSAB:lle, jotka keksivät tämän aiheen ja rahoittivat työ. Etenkin haluan kiittää Seppälän Juhaa, joka auttoi ja vastasi työhön liittyviin asioissa ja kuljetti minut Raaheen ja takaisin, kun koepalat piti tehdä. Kiitos myös Miilupipen kavereille, jotka auttoivat kyseisten palojen tekemisessä. Kiitos Moilasen Esalle, joka heti työn alussa keräsi ja antoi työtä suuresti helpottavan tietopaketin. Kiitos myös vesien raahaamisesta Helsingistä Ouluun.

Haluaisin kiittää työni ohjaajia Tohtoreita Rossin Pekkaa ja Elisangela Heiderscheidtia. He varmistivat, että minä sain tarvittavat tiedot ja taidot ennen työn varsinaista aloitusta. Kiitos myös hyvästä ohjauksesta ja kannustuksista ja ymmärryksestä. Kiitos myös laboratoriotyön suunnittelussa ja mahdollistamisessa. Se oli opettava, palkitseva ja valaiseva kokemus. Kiitos myös laboratorioteknikko Tuomo Pitkäselle, joka opetti minulle laboratoriotyöskentelyn taidot ja auttoi kokeeni suunnittelussa ja toteuttamisessa.

Kiitos HSY:lle ja Kemin energialle ja vedelle, jotka antoivat tarvittavat vedet laboratoriotyöskentelyni.

Kiitos perheelle ja kavereilla, jotka ovat tukeneet ja olleet ymmärtäväisiä opiskeluni ajan.

Oulussa 26.6.2018

Joni Ruottinen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	9
2 Betonilla pinnoitetut vesiputket vedenjakelussa	10
2.1 Vedenjakelu.....	10
2.2 Vesijohtoputket	12
2.2.1 Pallografiittirauta	12
2.2.2 Teräs	13
2.2.3 Polyvinyylidikloridi	13
2.2.4 Kova polyeteeni	14
2.3 Betonilla pinnoitetut vesijohtoputket	14
2.3.1 Betonipinnoitteen levittäminen.....	14
2.3.2 Vaikutukset vedenlaatuun.....	15
2.3.3 Standardit.....	20
2.3.4 Sementtilaastipinnoitteen koostumus	20
3 Tutkimusmenetelmät.....	23
3.1 Koevalmistelut	23
3.1.1 Betonipalat.....	23
3.1.2 Käytetyt vesilaadut	25
3.1.3 Koelaitteisto	26
3.2 Laboratoriokoe	29
4 Tulokset ja tulosten analysointi.....	35
4.1 pH.....	35
4.2 Alkaliteetti.....	36
4.3 Veden kalsiumpitoisuus	38
4.4 Mittaustulokset.....	38
4.5 Arvioitu kalsiumpitoisuus	40
4.5.1 pH	40
4.5.2 Alkaliteetti	41
4.6 Veden kovuus.....	42
4.7 Veden alumiinipitoisuus.....	43

4.8 Liuennut orgaaninen hiili	44
4.9 Sähkönjohtavuus	44
4.10 Betonipalasten paino	45
4.11 Sakan muodostuminen	46
4.12 Muut tulokset	48
5 Johtopäätökset	49
6 Yhteenveto	54
Lähdeluettelo	55

MERKINNÄT JA LYHENTEET

(30/70)	Sementtisekoitus, jossa sementtiä on 30% ja masuunikuonaa 70%
(40/60)	Sementtisekoitus, jossa sementtiä on 60% ja masuunikuonaa 40%
A	Pinta-ala
CEM I	Portland-sementti
CEM II	Portland-seossementti
CEM III	Masuunikuonaselementti
DOC	Liuennut orgaaninen hiili
l	Pituus
M	Atomimassa
m	Massa
PEH	Kova polyeteeni
pH	Happamuus
pOH	Hydroksidi-ionien konsentraatio
PVC	Polyvinyylidikloridi
r	Säde
SR	Sulfaatin kestävä
V	Tilavuus

1 JOHDANTO

Betonoituja teräsputkia käytetään pohjoismaissa erityisesti isojen kaupunkien päävesiputkina tai silloin kun tarvitaan suuremman halkaisijan putkia suurten vesimäärien verkoston osissa. Sementtilaastipinnoitetta voidaan myös käyttää vanhan putken sisäpinnan saneeraukseen. Ennen käyttöönottoa uusi betonipinta pitää huuhdella. Huuhtelussa betonista liukenee veteen vapaata kalkkia tai kalsiumhydroksidia. Tämä voi aiheuttaa vedessä jyrkän pH:n, alkaliteetin ja kalsiumpitoisuuden nousemista. Putkia huuhdellaan, kunnes tarpeeksi vapaata kalkkia on liuennut huuhteluveteen ja läpimenevän veden pH oli halutun vedenlaadun tason alapuolella. Tämän työn tarkoitus selvittää miten vapaan kalkin liukenemista betonista voidaan hillitä. Tämä johtaisi veden pienempään pH:n nousemiseen ja huuhteluajan lyhentymiseen.

Työssä tutustuttiin lyhyesti yleisesti vesihuoltoon ja sitten betonoituihin putkiin sekä niiden vaikutuksiin vedenlaadussa. Tarkasteltiin miten Suomessa ja EU:ssa standardit määrittävät betonoitujen vesiputkien käyttöä ja mistä putkissa käytettävä betoni voi koostua. Myös tutustuttiin jo valmiiksi tehtyihin tutkimuksiin aiheesta. Tavoitteena oli löytää keino, jolla liukenemista voisi vähentää ja jota voisi kokeilla laboratorionkokeella.

Laboratoriotyössä mitattiin eri betonityyppien vaikutusta vedenlaadun ominaisuuksiin. Työssä vertailtiin eri betonityyppejä keskenään ja eri alkaliteetin vesiä keskenään. Samalla myös tarkasteltiin mitä muuta veteen liukenee ja tapahtuuko kokeen aikana vedenlaadulle tai koepaloille muita muutoksia. Työssä yritettiin myös arvioida liuenneen kalsiumin määrää betonista vesiin laskemalla käyttäen mitattuja pH:n ja alkaliteetin arvoja. Työn tavoitteena oli tutkia, liukeneeko masuunikuonasegmentistä vähemmän vapaata kalkkia veteen verrattuna portlandsementteihin ja kuinka suuri vaikutus betonin tyyppillä on verrattuna veden ominaisuuksiin.

Laboratoriotyössä käytetyt vedet saatiin HSY:ltä ja Kemin energialta ja vedeltä. Tutkimuksen betonipalat tehtiin Miilupipe:n Raahen tehtaalla ja koe suoritettiin Oulun yliopiston laboratoriotiloissa.

2 BETONILLA PINNOITETUT VESIPUTKET VEDENJAKELUSSA

2.1 Vedenjakelu

Vedenjakelusysteemin pääsääntöinen tarkoitus on toimittaa juomakelpoista vettä kuluttajille tarpeeksi ja tarpeeksi korkeassa paineessa. Vedenjakelusysteemit siirtävät juomakelpoista vettä asukkaille, kunnan sekä valtion laitoksille ja kaupallisille sekä teollisille yrityksille. Suurimman osan vedenjakelusysteemeistä pitävää pystyä myös toimittamaan muihinkin tarpeisiin, kuten tulen sammuttamiseen ja maan kasteluun. Kuntien vesihuoltojärjestelmät koostuvat yhdestä tai useammasta vedenlähteestä, veden puhdistuslaitoksista ja jakelusysteemistä. Veden lähteinä ovat joet, järvet, pohjavedet ja joissakin tapauksissa murto- ja merivedet. Vedenjakelusysteemi koostuu kolmesta pääosasta, jotka ovat vedenjakelun putkistoverkosto, vesisäiliöt ja pumppaamot. Vesisäiliöiden tarkoitus on mahdollistaa vedenjakelu, kun veden kysyntä vaihtelee. (Mays 2000:3.1-3.2)

Vedenjakelun putkiverkosto, vesisäiliöt ja pumppaamot ovat vedenjakelusysteemin komponentteja. Ne koostuvat alikomponenteista ja peruskomponenteista. Alikomponentit ovat komponenttien rakenneosia ja ne koostuvat peruskomponenteista, jotka ovat integroitu yhdeksi yhtenäiseksi toimivaksi elementiksi. Esimerkiksi veden pumppaamon pumppaus alikomponentti voi koostua putkista, venttiileistä, ajureista, voimansiirrosta ja kontrollin peruskomponenteista. Peruskomponentit ovat vedenjakelusysteemin perusrakenneosia ja näitä voi olla esimerkiksi edellä jo mainitut putket tai venttiilit. (Mays 2000:1.18)

Koska vedenlähteet ovat luonnosta, vedessä on luonnossa olevia kemikaaleja ja mikro-organismeja. Vedenpuhdistus ei poista kaikkia kemikaaleja ja mikro-organismeja vedestä ja vedenpuhdistuksessa käytetyt kemikaalit voivat jäädä veteen. Kun vesi on jakeluverkon sisällä, se on kontaktissa putkien seinille vuosien aikana muodostuneihin kemikaalikerrokseen ja biofilmeihin. Kun juomavesi tulee ulos hanasta tai letkusta, se on muuttunut kyseisten kontaktien takia. Putkien sisällä voi tapahtua paljon erilaisia kemiallisia tai biologisia vuorovaikutuksia ja fyysiset häiriöt kuten veden nopeus tai sisäinen paine voivat vaikuttaa muutoksiin. Näiden takia juomaveden lopulliseen laatuun ei ole yhtä tieteellistä kaavaa. (Cantor 2018:5)

Vesihuolto on yksi yhteiskunnan peruspalveluja, joten sen on täytettävä useita kriteerejä. Jos halutaan, että vesihuoltopalvelut ovat toimivia ja kestäväällä pohjalla, pitää niiden olla sosiaalisesti ja yhteiskunnallisesti kestäviä, turvallisia ja toimintavarmoja, ympäristöllisesti kestäviä, taloudellisesti tehokkaita ja kestäviä, joustavia sekä hyvin johdettuja ja resursoituja. Jotta vesihuolto olisi sosiaalisesti ja yhteiskunnallisesti kestävä, pitää palveluiden täyttää asiakkaiden muuttuvat tarpeet, olla tasapuolisia ja edistää kestävästä yhdyskunta- ja aluekehitystä. (Silfverberg 2017: 5)

Vesihuoltojärjestelmä pitää olla tekniseltä toimintavarmuudeltaan hyvä ja sen pitää täyttää terveys- ja turvallisuusvaatimukset. Vesihuollon palvelusten pitää myös olla toimintavarma erityistilanteissa, kuten onnettomuustilanteissa tai kun on teknillisiä häiriöitä. Raakaveden otto, vedenkäsittely ja jätevesien käsittely pitää olla ympäristön kannalta kestäviä. Niitä pitää myös kehittää ympäristövaatimuksia vastaaviksi ja ilmastonmuutoksen vaikutukset tulee ottaa huomioon. (Silfverberg 2017: 5)

Vesihuoltolaitosten rahoitus pitää olla varmallalla pohjalla, sen pitää mahdollistaa vesihuoltolaitoksen pitkäaikaisen ylläpidon ja kehittämisen ja palvelujen pitää olla asiakkaille kohtuuhintaiset ja tasapuoliset. Yhteiskuntarakenteen muutostilanteessa hyvät vesihuoltopalvelut pitää turvata ja järjestää tarvittaessa. Tällaisia tilanteita voi olla esimerkiksi väestön muutos tai verkostoon liittyneiden yritysten vedenkäytön määrän muutos. Vesihuoltolaitoksen henkilöstöresurssit pitää olla riittävät, jotta tehokas ja luotettava palvelu voidaan turvata. Sisäisen johtaminen pitää olla ammattimaista ja asiakas sekä omistajaohjaus tehokasta ja avointa. Vesihuollon teknillisten ratkaisujen elinkaari on yli 50 vuotta tai jopa 100 vuotta. Tällöin kriteereiden täyttäminen vaatii pitkäjänteisyyttä kehityksessä ja pitkän ajan tarpeet on kyettävä havainnoimaan suunnitellessa. (Silfverberg 2017: 5-6)

Suomessa kunta on vastuussa vesihuollon järjestämisestä alueellaan ja käytännössä kaikki yhdyskuntia palvelevat vesihuoltojärjestelmät ovat kuntien omistuksessa. Aluksi vesihuollon paikalliset tarpeet tyydytettiin paikallisilla ratkaisuilla. Raakavesilähteet haluttiin olevan mahdollisimman lähellä ja jätevedet vietiin vain niin etäälle, että niistä ei ollut enää haittaa. Koska kaikilla kunnilla ei ollut tarpeeksi paljon tai tarpeeksi hyviä vesilähteitä omilla alueillaan, jouduttiin joskus keskustelemaan naapurikuntien kanssa yhteistyöstä. Myös vedenpuhdistuksen vaatimusten kiristyminen johti kuntien väliseen yhteistyöhön. Kun Suomi liittyi EU:hun, osa päätöksenteosta siirtyi kansainväliseltä

tasolta EU:lle mutta Suomen vesihuollon ja sen lainsäädösten korkean tason takia ei Suomen tarvinnut merkittävästi kiristää sen määräyksiä tai uudistaa vedenjakeluverkostoaan. (Pietilä et. al. 2010: 17-18)

2.2 Vesijohtoputket

Vesijohtoputket ovat osa vedenjakelujärjestelmiä ja niiden läpi juomakelpoinen vesi liikkuu asiakkaille. Vesijohtoputkia on rakennettu ja rakennetaan erilaisista materiaaleista. Eri materiaaleilla on omat vahvuudet ja heikkoudet ja eri materiaalit sopivat paremmin eri halkaisijaltaan oleville putkille.

2.2.1 Pallografiittirauta

Pallografiittirautaputket ovat yleisiä vesijohtoputkia. Niitä käytetään paljon Yhdysvalloissa sekä pienissä vedenjakelujärjestelmien päälinjoissa, että isoissa veden siirtolinjoissa. Pallografiittiputket ovat valurautatuotteita, jotka on kaadettu joko hiekka- tai metallimuottiin. Pallografiittirautaa saadaan lisäämällä rautaan magnesiumia, jolloin vapaa grafiitti muodostuu palloiksi tehden raudasta teräksen vahvuista.

Sementtilaastisisäpinta on suosituin ja hyödyllisin vuoraus pallografiittiraudan sisäpinnalle. Se on halpa ja sillä on pitkä elinikä ja pysyvä sileys. Vaikka sementtilaastivuoraus on yleensä kestävä, voivat vedet olla kemiallisesti aggressiivisia sementtiä kohtaan tietyissä tilanteissa. Tällöin vaihtoehtoinen sisäpinnoitetta kannattaa miettiä. On myös suositeltu, että pallografiittirautaputket peitettäisiin polyeteenituubeilla. Asfalttinen maalipinta on myös suosittu ulkopinnalle ei-korrodoivissa olosuhteissa. Korrosoivissa olosuhteissa on käytetty muuta pinnoitetta, kuten muovikääreitä. (Mays 2000:3.14-3.18)

Suomessa pallografiittiputkien asennetaan kokoluokissa 80-2000 mm halkaisijaltaan ja siitä tehdään liittimiä sekä venttiilien runkoja. Ne kestävät suuria paineita, roudan rasitusta ja ne säilyttävät muotonsa hyvin. Tällöin pallografiittirautaputki on hyvä materiaali raskaasti liikennöidyillä alueilla. Nykyään putket ovat lähes aina sisäpuolelta pinnoitettu. Ennen bitumi oli yleisin pinnoite mutta nykyisin se on sementtilaasti. Ulkopinta on pinnoitettu lähes aina korroosion estämiseen. (Kekki et al. 2007: 47-48)

2.2.2 Teräs

Teräsputket valmistetaan teräksestä, jonka hiilipitoisuus on 0,05-0,25%. Se voi myös sisältää mangaania, piitä, kuparia ja kromia sekä epäpuhtauksia kuten fosfori tai rikki. Saumalliset teräsputket valmistetaan teräsnauhoja hitsaamalla, kierresaumaputket tehdään jauhekaarimenetelmällä ja pituussaumahitsatut putket liitetään induktiohitsauksella. Teräsputket ovat kestäviä mekaanista rasitusta vastaan. Putkien valmistusviat ovat harvinaisia ja ne ovat tasa-aineisia. Teräsputkilla on hyvä paineenkestävyys ja dynaamisten rasitusten kestävyys. Teräsputket ovat erityisen sopivia isoiksi päävesijohtoputkiksi. Suomessa teräsputkia on asennettu kokoon 2140 mm asti. (Kekki et al. 2007: 48-49)

Käytännössä kaikki vesijohtoputkiksi toimitetut teräsputket on pinnoitettu sekä sisä- että ulkopinnalta korroosionkestävyyden saavuttamiseksi. Teräs syöpyy happipitoisen kosteuden vaikutuksesta ja sen seurauksena syntyy rautaoksideja ja -hydrokseja. Lionnut rauta voi lisätä raudan pitoisuutta vedessä ja se voi muuttaa veden ruskeaksi. 1980-luvulla sisäpinnoitteena käytettiin bitumia ja epoksia mutta 1980-luvun lopulla näistä siirryttiin sementtilaastiin. (Kekki et al. 2007: 49-50)

2.2.3 Polyvinyylidikloridi

Polyvinyylidikloridi tai PVC on suosittu muoviputki vedenjakelussa. PVC on korroosionkestävää, se on kevyt, sen painon ja lujuuden suhde ovat hyvät, asennus on helppoa ja sen sisäpinnan pinta on sileää. PVC on muovi, joka on pursotettu lämmön alla kestromuoviksi ja se on lähes inertti, kun se on kosketuksissa happojen, alkalien, polttoaineiden ja syövyttävien aineiden kanssa. Auringonvalolle altistuminen heikentää PVC iskunsitkeyttä, joten sitä ei kannata käyttää maan päällä olevissa linjoissa. PVC-putket eivät vaadi pinnoitteita. (Mays 2000:3.18-3.20)

Suomessa valmistetaan PVC-putkia ja liitoskappaleita. Halkaisijaltaan putket ovat 90-640 mm. Standardin mukaan putkia voidaan käyttää 1000 mm asti ja ennen käytettiin myös yli 63 mm halkaisijaltaan olevia putkia. PVC-putkia on saatavilla paineluokissa PN6 - PN20 (Kekki et al. 2007: 41). Suomessa PVC putkia saa käyttää vain kylmään veteen ja niitä on käytetty pää- ja jakelujohtoina. (Kekki et al. 2007: 62)

2.2.4 Kova polyeteeni

Kova polyeteeni, PEH tai HDPE on Suomen käytetyin putkistomateriaali ja sen käyttö on lisääntynyt koko ajan. Se koostuu yhteen liittyneistä monomeereista ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$). Paineellisissa olosuhteissa käyttölämpötila on $-51 - 60$ °C. Polyeteenit eivät vaadi sisäisiä pinnoitteita. Nokimustaa käytetään UV-suojan ja jännityssäröilyn estämiseksi. Suomessa PEH-putkien paineluokkia ovat PN3,2 - PN20. Putkien koot vaihtelevat 16-1600 mm välillä ja PEH:ta käytetään myös liittimissä. PEH-putkien edut ovat korroosionkestävyys, keveys, hyvä painon ja lujuuden suhde, korkea halkeamisen vastustuskyky, sileä sisäpinta ja kestävyys seismisten tapahtumien aikana (Mays 2000: 3.29). PEH-putket ovat vanhin ja käytetyin saneerausmateriaali vedenjako- ja viemäriverkostojen putkissa. Sitä käytetään sekä pitkä- että pakkosujutuksessa. (Kekki et al. 2007: 58-59)

2.3 Betonilla pinnoitetut vesijohtoputket

Vuonna 1836 Ranskan tiedeakatemiassa tutkittiin sementtilaastia suojaavana pinnoitteena päävesilinjoissa mutta vasta 1930-luvulla kehitettiin käytännölliset pinnoituskeinot. Ensimmäinen kentällä tehty sementtilaastipinnoitus tapahtui vuonna 1933 USA:ssa. Positiivisen tuloksen takia yli 8000 m jo asennettua putkistoa pinnoitettiin uudelleen sementtilaastilla. Tämä pinnoitus lopetti kaikki vuotamiset kyseisellä pätkällä. Noina vuosina pienin putki, jota voitiin pinnoittaa, oli 600 mm halkaisijaltaan, koska ihmisen piti mennä pinnoituslaitteen mukana putken sisällä. 1950-luvulla kehitettiin kauko-ohjattava pinnoituslaite, joka mahdollisti pienempien putkien pinnoittamisen jopa 100 mm halkaisijaltaan olevaan putkeen asti (AWWA 2000: 9). Suomessa sementtilaastipinnoitteita alettiin käyttämään saneerausmenetelmänä 1980-luvulla (Pelto-Huikko ja Kaunisto 2012: 63).

2.3.1 Betonipinnoitteen levittäminen

Sementtilaastipinnoitus voidaan levittää putken sisäpintaan yleensä kolmella eri tavalla. Linkoamisella, ruiskutuksella tai manuaalisesti. Linkouksessa koko putken pituudelle levitetään sementtilaastia ja putkea pyöritetään korkealla kierrosnopeudella. Tällöin laastin kiinteät ainesosat keskipakovoiman vaikutuksesta puristuvat putken pintaan. Tällöin putken sisäpintaan muodostuu tasainen pinnoite. Laastin vesipitoisuudesta osa puristuu ulos. Osittain kuiva pinnoite voidaan kuljettaa kovettumispaikalle. (SFS 2005: 9)

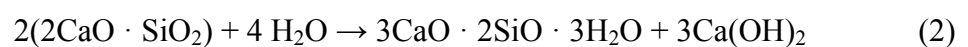
Ruiskutuksessa ruiskun pää vedetään putken läpi ja ruiskuun johdetaan sementtilaastia. Ruisku pyörii ja ruiskuttaa laastia tasaisesti putken sisäpinnalle. Ruiskutus käyttää keskipakovoimaa ruiskutuksessa. Ruiskun nopeutta putken läpi tarkkaillaan jatkuvasti, jotta laastin paksuus on toivottu. Ruiskutuksen jälkeen sementtilaastipinnoitus suojataan ja annetaan kovettua 12-24 tuntia (Rockaway ja Ball 2007:4). Ruiskutuksen jälkeen pinnoitetta voidaan vielä tasoittaa putkea hitaasti pyörittämällä tai mekaanisesti hiertämällä (SFS 2005: 9).

Manuaalisessa levityksessä laasti tasoitetaan teräsputkenputken sisäpintaan manuaalisesti käsin esimerkiksi lastalla. Tätä käytetään yleensä virheiden paikkauksessa tai sellaisten putken osien pinnoituksessa, mihin edellä mainittujen keinot eivät sovellu. (SFS 2005: 9)

Sementtilaastipinnoitusta voidaan levittää kahdessa tilanteessa. Tehtaassa tai in-situ eli kentällä, jolloin putki on jo maassa ja siihen lisätään sementtilaastipinnoitus. Tehtaassa levitetty sementtilaastipinnoitus erottuu huomattavasti kentällä levitetystä. Tehtaassa ei ole väliä levitetäänkö sementtilaasti putken sisäpintaan linkoamalla vai ruiskutuksella. Molemmissa tapauksissa putkea pyörittämällä voidaan tiivistää pinnoitetta. Tuloksena pinnoitteen pinta on sileä ja huokoisuus ja sisäpinnan karkeus ovat hyvin pieniä. Kentällä sementtilaasti voidaan levittää ruiskuttamalla mutta sitä ei voida tiivistää, kuten tehtaalla. (Zielina et al. 2014: 724)

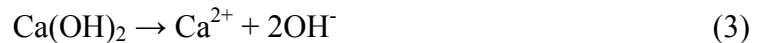
2.3.2 Vaikutukset vedenlaatuun

Kun sementtiä sekoitetaan veteen, tapahtuu siinä monimutkaisia kemiallisia reaktioita. Näissä reaktioissa eri yhdisteet muodostavat hydraatteja. Näistä reaktioista erityisen tärkeitä ovat kalsiumsilikaattien hydrataatio. Trikalsiumsilikaatin hydrataation ja dikalsiumsilikaatin hydrataation kemialliset reaktiot muodostavat kalsiumhydroksidia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (kaavat 1 ja 2).



Kalsiumhydroksidia muodostuu myös muista hydrataatioreaktioista, jotka ovat additioreaktioita, joissa molekyyliin liitetään vettä. Kalsiumhydroksidi liukenee

betonista veteen, jolloin kalsiumhydroksidi vapauttaa veteen kalsium- ja hydroksidi-ioneita (kaava 3). (Douglas et al. 1996: 100)



Kalsiumhydroksidin liukeneminen veteen johtaa veden pH:n, alkaliteetin ja kalsiumpitoisuuden nousuun (Douglas et al. 1996: 101). Mitä aggressiivisempi vesi on, sitä enemmän kalsiumhydroksidia liukenee betonista veteen. Putken halkaisijalla on käänteinen suhde kalsiumhydroksidin liukenemiseen. Aggressiivisella vedellä tarkoitetaan tässä tapauksessa vettä, jolla on pieni pH, pieni alkaliteetti ja vähäinen määrä kalsiumia. Tällöin vesi on myös pehmeää. (Bonds 2005:5) Pääasiallinen vedenlaadun ominaisuus kalsiumhydroksidin liukenemiselle on matala alkaliteetti (Douglas et al. 1996: 102).

Alkaliteetti on veden kykyä vastustaa pH:n muutoksia. Tämän se saavuttaa neutralisoimalla happoja. Hydroksidit (OH^-), bikarbonaatit (HCO_3^-) ja karbonaatit (CO_3^{2-}) muodostavat veden alkaliteetin (kaava 4). Alle 0,6 mmol/l aiheuttaa metallisten materiaalien syöpymistä. Suomessa talousvesille ei ole asetettu määräyksiä tai suosituksia alkaliteetin määrästä. (Keinänen-Toivola et al. 2007:76)

$$\text{Alkaliteetti} = [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] \quad (4)$$

Korkean alkaliteetin tilanteissa kalsiumhydroksidista muodostuneet kalsiumionit voivat reagoida veden karbonaatti-ionien kanssa muodostaakseen kalsiumkarbonaattia, joka muodostaa suojaavan pinnoitteen betonin pinnalle, joka hankaloittaa kalsiumhydroksidin liukenemistä veteen. Aggressiivisten vesien kohdalla tätä pinnoitetta ei voi muodostua. (Douglas et al. 1996: 101)

Pohjois-Euroopan kaupunkien vesien alkaliteetti on matalampaa, kuin keski-Euroopassa (Taulukko 1). Suomessa talousvesien alkaliteetit ovat keskimäärin noin 1 mmol/l tai alle 1 mmol/l. Alkaliteetti on korkeampi kaivo- ja pohjavesien porakaivojen vesissä, joissa se on noin 1,7 mmol/l. Matalimmat alkaliteetti-arvot ovat lähteissä ja lähdekaivoista otetuissa pohjavesissä. Norjan talousvesien alkaliteetin keskiarvo on 0,3 mmol/l, jolloin se on keskimäärin matalampi kuin suomessa. Ruotsin alkaliteetti vesijohtovesissä on samalla tasolla, kuin Suomessa. (Keinänen-Toivola et al. 2007:76)

Taulukko 1. Eri eurooppalaisten kaupunkien vesijohtovesien alkaliteetti-arvoja. Arvot on saatu juomavesien tarjoajien vedenlaatutaulukoista.

Kaupunki	Veden alkaliteetti (mmol/l)
Helsinki	0,73
Kemi (Keminmaa)	3,7
Tukholma	0,84
Göteborg	0,95
Oslo	0,65
Tallinna	2,74
Berliini	2,05
Wien	1,42

Kun vesijohtoputki täyttyy vedellä, vesi tunkeutuu betonin huokosiin. Tällöin kalsiumhydroksidi reagoi veden kalsiumbikarbonaatin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia. Tämä kalsiumkarbonaatti tukkii huokokset ja estää muun veden pääsyä sinne. Tämä myös vähentää veden kykyä liottaa betonin kalsiumhydroksidia. (Bonds 2005:4)

Sementin koostumus vaikuttaa kalsiumhydroksidin liukenemisen määrään. Tyypin 1 Portland sementissä on kalsiumhydroksidia, jota kutsutaan myös vapaaksi kalkiksi, 1,5% (Kirmeyer 2000:83). Jos osa sementistä korvataan esimerkiksi masuunikuonalla, vähentyy samalla vapaan kalkin määrä betonissa, jolloin veteen liukenevan kalsiumhydroksidin määrä vähentyy.

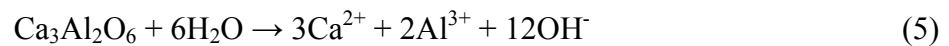
Betonissa sementtiä on korvattu eri aineilla. Näitä aineita ovat esimerkiksi lentotuhka ja masuunikuona. Melandin (1999:8-9) tutkimuksessa verrattiin erilasten sementtien kykyä liuottaa kalsiumhydroksidia. Siinä huomattiin, että masuunikuonasegmenttiä kannattaa käyttää keskivertovesissä verrattuna muihin sementteihin. Aggressiivisissa vesissä tutkimus suositteli käyttävän korkean alumiinioksidipitoisuuden sementtiä.

Ongin ja Wongin (2018:1-2) tutkimuksessa päädyttiin tulokseen, että masuunikuonasegmenttiä kannattaa käyttää puhtaan sementin sijasta, koska siinä on vähemmän kalsiumhydroksidia. Tutkimuksessa testattiin neljää eri sementtisekoitusta, jotka olivat Portland-sementti, kaksi masuunikuonan ja sementin sekoitusta ja kalsiumaluminaattisementti. Masuunikuonan ja sementin sekoitukset olivat 70%

Portland-sementtiä ja 30% masuunikuonaa sekä 30% Portland-sementtiä ja 70% masuunikuonaa.

Ongin ja Wongin tutkimuksen tuloksissa nähdään, että 70% masuunikuonaa sisältävästä sekoituksesta liukeni vähiten kalsiumia veteen. Portland-sementistä liukeni kalsiumia eniten ja 30% masuunikuonaa sisältävästä sekoituksesta liukeni vähemmän kuin Portland-sementistä mutta enemmän, kuin 70% masuunikuonaa sisältävästä sekoituksesta. Näiden kolmen välillä pH:n arvojen järjestys oli myös sama. Tutkimuksessa suositeltiin 70% masuunikuonaa sisältävän sekoituksen käyttöä, koska siinä on vähemmän vapaata kalsiumhydroksidia, kuin puhtaasti sementtiä sisältävässä betonissa. Tutkimuksen mukaan myös yleinen vastustuskyky aineiden liukenemiseen nousi, kun kuonan määrä nousi sementissä. (Ong ja Wongin 2018:3-4)

Betonista voi myös liueta alumiinia kosketuksissa olevaan veteen. Betonin muodostumisessa tapahtuu trikalsiumaluminaatin hydrataatio (kaava 5).



Portland-sementissä alumiinia on 5% ja masuunikuonasegmentissä sitä on 13% alumiinioksidina (Al_2O_3). Alumiini on vakava terveysriski hemodialyysipotilaille. Aggressiivinen vesi lisää alumiinin liukenemista veteen (EPA 2002:11-12). Suomessa alumiinin raja-arvo juomavedessä on 0,2 mg/l (STM 2015).

Vaikka, masuunikuonasegmentissä on enemmän alumiinia, kuin Portland-sementissä Melandin (1998:8) tutkimuksessa masuunikuonasegmentistä liukeni vähiten alumiinia muihin sementteihin verrattuna. Młyńskan ja Zielinan (2017: 5-7) tutkimuksessa tutkittiin alumiinin liukenemista veteen sementtilaastipinnoitteesta. Tutkimuksessa vertailukohteena oli Portland-sementistä manuaalisesti tehty pinnoite (CEM 1) ja valmiiksi tehtaalla tehty masuunikuonasegmenttipinnoite (CEM III). Siinä huomattiin, että manuaalisesti levitetyn pinnoitteesta liukeni yli 300 kertaa enemmän alumiinia, kuin tehtaassa tehdystä pinnoitteesta. Manuaalisesti tehdystä pinnoitteesta liukeni ensimmäisen viiden päivän aikana yli 20 mg/m² ja 56 päivän jälkeen liuenneen alumiinin määrä oli 160 mg/m², jonka jälkeen siitä ei enää lionnut alumiinia. Tehtaassa tehdystä pinnoitteesta liukeni ensimmäisen kahden päivän aikana 0,14 mg/m² ja kokeen päätyttyä siitä oli lionnut 0,50 mg/m². Lopussa tutkimuksessa todettiin, että molemmissa pinnoitteissa on veden saastumisen riski alumiinin kohdalla.

Tutkimuksessa myös tutkittiin raskasmetallien liukenemista betonista veteen, kuten kromia, lyijyä ja kadmiumia. Niiden liukeneminen veteen oli hyvin vähäistä tai merkityksetöntä.

Sementtilaastin liukenemisiä on koitettu vähentää aggressiivisissa vesissä lisäämällä siihen maalipinnan. Epoksimaalia on käytetty sementtilaastin pinnan tiivistämiseen 150-250 µm paksuisena maalina (Twort 2000:571). USA:ssa on myös käytetty bitumimaalia sementtilaastipinnoissa. Se vähensi huomattavasti kosteuden vähentymistä hydrataatioreaktion aikana, joka johti hallittuun sementin kovettumiseen. Samalla maalikerros vähensi betonista aineiden liukenemista pehmeissä ja aggressiivisissa vesissä. Käytön vähentymisen aiheutti ilman saastuminen. Käytetyssä bitumimaalissa haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, jotka eivät olleet haitallisia juomavedelle mutta maalipinnan laittamisen ja kovettumisen aikana nämä ilmalle haitalliset yhdisteet saattoivat haihtua. (Bonds 2005: 2-3)

Metallivesiputkien pinnoilla tapahtuvaa korroosiota on pienennetty käyttämällä korroosionestoaineita. Näitä ovat esimerkiksi polyfosfaatti tai ortofosfaatti. Rautaputkissa näitä käytetään, että liikaa ruostetta tai rautaa ei päätyisi vesijohtoveteen. Virtaavan veden laboratoriokokeet ovat olleet lupaavia mutta matalan virtauksen tai liikkumattomassa vedessä korroosionestoaineilla ei ole paljon tai ollenkaan vaikutusta. McNeillin ja Edwardsin (2000:26-27, 38) tutkimuksessa näillä aineilla ei ollut positiivisia vaikutusta rautaputken korroosioon virtaamattomassa vedessä. Clark (2000: 88) tutki kokeessaan korroosionestoaineiden vaikutusta sementtilaastipinnoille. Kokeessaan hän lisäsi veteen näitä korroosionestoaineita ja vertasi siellä olevien CEM II sementistä tehtyjen betonipalasten pH:ta, alkaliinisyyttä, kovuutta ja metallien pitoisuutta samanlaisiin betonipaloihin, joita ei oltu käsitelty korroosionestoaineilla. Yhdentoista päivän jälkeen korroosionestoaineiden vesien pH-arvot alkoivat laskemaan kontrolliveteen verrattuna. On mahdollista, että korroosionestoaineet muodostavat suojaavan kalvon betonin pintaan. Ne myös saattavat parantaa muiden aineiden saostumista. Polyfosfaatin veden pH laski eniten. Alkaliinisyyteen ja kovuuteen näillä aineilla ei tämän tutkimuksen mukaan ole suurta vaikutusta mutta ne vähensivät alumiinin liukenemista betonista kahden viikon jälkeen huomattavasti.

2.3.3 Standardit

Suomessa betonoitujen vesijohtoputkien säädöksiä määrittelee eurooppalainen standardi SFS-EN 10298. Tämä standardi määrittelee sementtilaastipinnoitteiden tekoa ja niiden käyttöä mutta standardi ei koske in-situ asennettuja pinnoituksia tai kunnossapitopinnoituksia. Standardin mukaan sementtilaastipinnoite ei saa muuttaa vedenlaatua, niin että vedenlaatu olisi eurooppalaisten vaatimusten alapuolella. Standardissa määritetään, miten sementtilaastipinnoitukset luokitellaan seostyyppin, seosaineiden ja käyttötavan mukaan. Luokitteluissa pitää myös ilmoittaa levitystapa. Standardissa määritetään myös laastin koostumus ja mitä seosaineita saa käyttää ja kuinka paljon, sementtilaastin levitystavat, käytettävä sementtilaastipinnoitteen vaaditut ominaisuudet, pinnoitteen korjaukset, merkinnät ja pinnoitettujen osien käsittely, kuljetus sekä varastointi. (SFS 2005: 4-6)

Standardissa viitataan myös muihin standardeihin, mitkä määrittävät tarkemmin tiettyjä asioita. Yksi viitatuista standardeista on SFS-EN 197-1, joka määrittää sementin yleisen koostumuksen, ominaisuudet ja toimivuudet (SFS 2000: 4).

2.3.4 Sementtilaastipinnoitteen koostumus

Standardin mukaan laastin pitää olla sekoitus sementtiä, hiekkaa, vettä ja joitain seosaineita voi olla. Märän sementtilaastin hiekka-sementti- ja vesi-sementtisuhteet pitää määrittää, koska niillä on suuri merkitys kovettuneen laastin ominaisuuksiin. Tuoreen laastin hiekka-sementtisuhte on 1,0-2,5. Vesi-sementtisuhte määräytyy pinnoituksen levitystavasta. Linkoamalla levitetyn sementtilaastipinnoituksen vesi-sementtisuhte on $\leq 0,42$. Ruiskuttamalla levitetyn laastin vesi-sementtisuhte riippuu sen hiekka-sementtisuhteesta (taulukko 2). Pinnoituksen pitää olla sileä eikä siinä saa olla vieraita esineitä, paisumia tai kovettuneita laastinpaloja. (SFS 2005: 6-9)

Taulukko 2. Sallittu vesi-sementtisuhte eri hiekka-sementtisuhteissa (SFS 2005:9).

Hiekka-sementtisuhte	2,5	1,7	1
Vesi-sementtisuhte	$\leq 0,42$	$\leq 0,4$	$\leq 0,37$

Sementin täytyy olla standardin EN 197-1 laadun mukaista. Hiekan on oltava pääosin kvartsipitoisia partikkeleita ja ne eivät saa liueta emäksiin. Hiekan partikkelikoostumuksen pitää olla tasainen ja sen pitää vaihdella hienosta karkeaan. Sen

pitää koostua kovista, stabiileista, vastustuskykyisistä ja epäaktiivisista partikkeleista. Hiekan pitää olla puhdasta eikä siinä saa olla orgaanisia aineita tai näkyvää savea. Juomavesille tarkoitettuihin vesijohtoputkien sementtilaastipinnoitteeseen käytetty vesi pitää olla juomavettä. Laastissa voi olla seosaineita, jos niistä on sovittu ja ne eivät vaikuta negatiivisesti vedenlaatuun tai pinnoitteen toimintaan. Juomaveden kohdalla seosaineet pitää olla käyttömaan vaatimusten mukaisia. Pozzolaanisia täyteaineita voi käyttää 10% sementin massasta ja ei-pozzolaanisia täyteaineita 3%. Pozzolaaniset täyteaineet ovat luonnon aineita, jotka koostuvat silikaateista tai alumiinisilikaateista. (SFS 2005: 6-7)

Sementti on hydraulinen sideaine ja kun sitä sekoittaa kiviaineen ja veden kanssa, se tuottaa betonia tai sementtilaastia, joka kovettumisen jälkeen pitää tietyt lujuustasot. Kalsiumoksidin ja piioksidin summan pitää olla vähintään 50%. Sementin pääosa-aineet ovat Portlandklinkkeri ja masuunikuona. Portlandklinkkeri tehdään raaka-aineesta, joka muodostuu oksideista kuten CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ja pienistä määristä muita aineita. Tämä aine kuumennetaan sintrauslämpötilaan, jolloin Portlandklinkkeri muodostuu. Portlandklinkkerissä vähintään kaksi kolmasosaa on kalsiumsilikaatteja ja $(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$ painosuhte pitää olla vähintään 2,0. Granuloitu masuunikuona on nopeasti jäädytettyä rautamalmin masuunissa sulatuksen aikana olevaa masuunikuonaa. Kalsiumoksidin, piioksidin ja magnesiumoksidin pitää muodostaa vähintään kaksi kolmasosaa granuloidun kuonan massasta ja loppuosa on enimmäkseen alumiinioksidia. $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ painosuhteen pitää olla yli 1,0. (SFS 2000: 7-8)

Muita osa-aineita, joita voi olla sementissä standardin EN 197-1 mukaisesti on Pozzolaaniset materiaalit, lentotuhkat, poltettu liuske, kalkkikivi, pii, kalsiumsulfaatti ja muut lisäaineet. Näille kaikille on määritetyt koostumukset ja sallitut määrät (SFS 2000: 8-10). Sementit voidaan jakaa viiteen päälajiin ja ne ovat CEM I – CEM V. CEM I on Portlandsementti, CEM II on Portland-seossementti, CEM III on masuunikuonasementti, CEM IV on Pozzolaaniselementti ja CEM V on seossementti (SFS 2000:11). Juomaveteen siirtävien sementtilaastipinnoitettujen putkien sementtilaastiin voidaan käyttää CEM I, CEM I-HS, CEM III A ja CEM III B sementtejä. Niiden koostumuksista nähdään, että vesijohtoputkiin voidaan käyttää sementtejä, joissa on vain Portlandklinkkeriä tai masuunikuonaa (taulukko 3) (SFS 2005: 18). CEM I-HS tai SR-sementti on Portlandsementtiä, joka on sulfaatinkestävää,

joka soveltuu erityisesti kemiallisesti rasitettuihin kohteisiin ja se valmistetaan klinkkeristä, jonka C3A pitoisuus on alle 3% (Finnsementti 2018: 25).

Taulukko 3. Vesijohtoputkien sallittujen sementtilaastien koostumukset (SFS 2000: 12).

Sementti	Klinkkeri	Masuunikuona	Muu
CEM I	95-100	0	0-5
CEM III A	35-64	36-65	0-5
CEM III B	20-34	66-80	0-5

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli mitata veteen kosketuksissa olevan betonin vaikutusta vedenlaatuun ja erityisesti sen vaikutusta veden pH-arvoon. Tätä testattiin upottamalla koostumukseltaan erilaisia betonipaloja veteen ja mittaamalla veden eri laatua kuvaavia parametrejä 34 päivän ajan. Kokeen aikana vesi, johon betonipalat olivat upotettuna, virtasi 15 ml/min astian päästä toiseen sekoittaen vettä astian sisällä.

3.1 Koevalmistelut

3.1.1 Betonipalat

Kokeessa käytettiin neljää eri sementtiseosta, jotka olivat SR-, pika-, 60/40- ja 30/70-sementtiseokset. SR- ja pikasementti olivat puhtaita tyyppin I Portland sementtejä ja 60/40- sekä 30/70-sementtiseokset olivat Portland-sementin ja masuunikuonan seoksia. 60/40-sementtiseoksessa käytettiin 60% Portland sementtiä ja 40% masuunikuonaa. Vastaavasti 30/70-sementtiseoksessa käytettiin 30% Portland sementtiä ja 70% masuunikuonaa. Kaikki betonipalat tehtiin samalla 6/5/2 hiekka/sementtiseos/vesi-suhteella. Kokeissa olevien betonityyppien koostumukset näkyvät taulukosta 4.

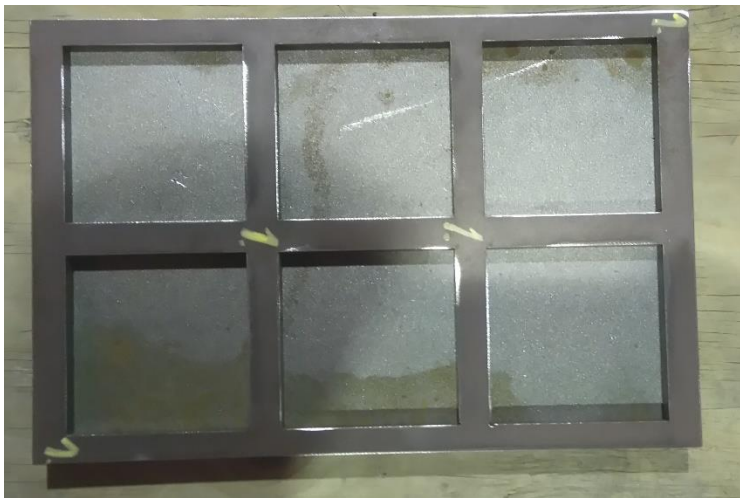
Taulukko 4. Kokeissa käytettävät sementtiseokset ja niiden koostumukset.

Näytteen tunnus	Sementtiseos	Sementtilaji	Hiekka (kg)	Sementti (kg)	Vesi	
					Kuona (kg)	(kg)
SR	SR-Sementti	CEM I	6	5	0	2
Pika	Pikasementti	CEM I	6	5	0	2
60/40	SR-sementti/kuona	CEM III/A	6	3	2	2
30/70	SR-sementti/kuona	CEM III/B	6	1,5	3,5	2

Kaikista betonityypeistä tehtiin 13kg massaa, jota käytettiin koepalasten tekemiseen. Koepalasten kooksi valittiin 80 mm x 80 mm x 10 mm. Tällöin koepalaset ovat

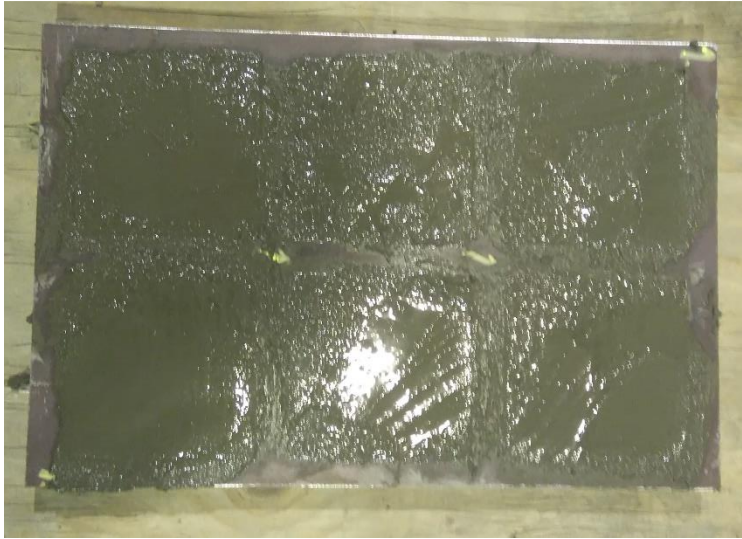
tarpeeksi isoja, että voidaan saada luetettavia tuloksia mutta ei niin isoja, että kokeessa ei tarvittaisi liikaa vettä.

Betonipalat valettiin valurautaisiin muotteihin, joiden koko oli 300 mm x 200 mm (kuva 1). Muotti koostui kahdesta valurautalevystä, joista alempi oli 300 mm x 200 mm. Tämän päälle asetettiin samankokoinen valurautalevy, jossa oli kuusi 80 mm x 80 mm x 10 mm kokoista reikää tasaisin välein. Betonipaloja valmistettiin siis kuusi kappaletta per tyyppi, vaikka niitä tarvitaan maksimissaan neljä per tyyppi. Kahdesta neljään ylimääräistä betonipalaa tehtiin varmuuden vuoksi, jos jotkin palat vahingoittuisivat tai niille tapahtuu jotain muuta haitallista. Levyjen jokaiselle sivulle hitsattiin pieni metallinappi, jotka pitivät levyjä kiinni toisissaan.



Kuva 1. Betonipalasten valmistukseen käytetty tyhjä muotti.

Betonit tehtiin ensin laittamalla kuiva-aineet eli hiekka, sementti ja kuona tyhjiin pestyyn muoviastiaan. Kuiva-aineet sitten sekoitettiin keskenään. Tähän sekoitukseen lisättiin vesi. Lopuksi astiassa oleva seos sekoitettiin käyttämällä käsillä operoitavaa sekoituskonetta ja vispilää. Sekoituksen jälkeen betonia kaadettiin muotteihin ja sen pinta valettiin tasaiseksi (kuva 2).



Kuva 2. SR-sementistä vastavalettu betoni muotissa.

Valamisen jälkeen muotit ja betonipalat suojattiin muovilla ja betonin annettiin kovettua 24 tuntia. Tämän jälkeen betonipalat kasteltiin vesijohtovedellä ja ne suojattiin muovilla uudestaan. Betonipalat annettiin olla näin seitsemän vuorokautta, jonka jälkeen niistä kuivatettiin jäljellä oleva kosteus pois.

Muottien ideana oli, että kun sivuissa olevat metallinapit poistetaan esimerkiksi kulmahiomakoneella, voidaan levyt irrottaa toisistaan, jolloin betonipalat irtoisivat myöskin. Todellisuudessa levyt irtosivat toisistaan mutta betonipalat olivat ylemmässä levyssä tiukasti kiinni, eikä niitä voitu irrottaa rikkomatta muotteja. Levyjen toisistaan irrottamisessa jotkin palat halkesivat hieman pohjasta ja osa betonista jäi pohjalevyyn kiinni. Betonipalat saatiin lopulta irrotettua ylemmästä levystä hajottamalla kehikko kulmahiomakoneella. Ylemmän levyn sivut leikattiin irti kulmahiomakoneella, jolloin betonipala irtosi ehjänä levystä. Kokeisiin valitut 12 ehjät tai vähiten vahingoittuneet betonipalat säilytettiin saman suljetun muovipussin sisällä, jossa ne eivät koskeneet toisiaan, A4 paperien päällä kokeen alkamiseen asti.

3.1.2 Käytetyt vesilaadut

Testissä käytettiin kahta eri vettä. Ensimmäinen vesi oli peräisin Helsingistä ja sitä käytettiin kokeessa päävetenä ja sitä käytettiin kaikkien betonityyppien testaamisessa, jossa niiden tuloksia verrattiin keskenään. Toinen vesi oli peräisin Keminmaasta ja sitä käytettiin vain SR- ja (30/70) -palojen tutkimisessa. Tavoite oli verrata näitä palojen

tuloksia keskenään ja myös verrata saman betonityypin mutta eri vesien tuloksia keskenään. Tällöin nähdään, kuinka suuri vaikutus vesijohtoveden alkaliteetilla on sen kykyyn liuottaa kalsiumia ja muita aineita betonista. Helsingin veden alkaliteetti on hyvin matala ja Keminmaan vesi valittiin kontrastina vertailukohteeksi, koska sen alkaliteetti on hyvin korkea suomalaiseksi vesijohtovedeksi. Helsingistä saadun veden alkaliteetti on HSY:n mukaan 0,73 mmol/l (FINAS 2018). Keminmaan veden alkaliteetin annettu arvo on noin 3,7 mmol/l.

Helsingistä saatu vesi saatiin HSY:n vedenpuhdistamolta. Vesi kerättiin käsittelyn jälkeen mutta ennen vesijohtojärjestelmään menoa. Kyseinen vesi oli Helsingin Pitkäkoskelle tarkoitettua vettä. Pitkäkoski sijaitsee Pohjois-Helsingissä Helsinki-Vantaan lentokentän itäpuolella. Vettä kerättiin noin reilu 300 l. Vesi laskettiin kymmeneen 30 l muovikanistereihin. Muovikanisterit olivat käyttämättömiä ja ne huuhdeltiin kyseisellä vedellä ennen täyttöä.

Keminmaan vesi saatiin Meri-Lapin Vesi oy:n vedenkäsittelylaitoksesta. Tämäkin vesi kerättiin käsittelyn jälkeen mutta ennen vesijohtojärjestelmään menoa. Kyseinen vesi oli Lautiosaarelle tarkoitettua vettä. Lautiosaari sijaitsee Keminmaassa ja se on Kemijoen länsipuolella. Sitä kerättiin noin 150 l. Astiat ja veden keräys olivat samat, kuin Helsingin vedellä mutta vain 5 kanisteria täytettiin. Laboratoriossa vedet säilytettiin kokeen ajan alkuperäisissä kanistereissa laboratorion kylmähuoneessa noin 4 °C lämpötilassa.

3.1.3 Koelaitteisto

Kokeeseen valmisteltiin 12 astiaa, joihin jokaiseen upotettiin veteen yksi koepala. Astiat olivat viiden litran muoviämpäreitä. Niihin kiinnitettiin pumpuista tulevat syöttö- ja ottoletkut, joilla vettä voitiin kierrättää. Veden kierrätys aiheuttaa virtauksen. Tällöin koepalat eivät ole kosketuksissa saman pienen vesimäärän kanssa. Samalla myös vesi sekoittuu ja koepalasta liukenevat aineet ovat tasaisesti vedessä. Koelaitteistoon liitetyt pumput olivat mallia Gilson Minipulse 3. Kokeessa käytettiin kahta pumppua, joihin kumpaankin liitettiin kuusi astia/letkukokonaisuutta. Yhden letkun päät olivat kiinni yhdessä sangossa. Tällöin molemmat pumput kierrättivät vettä kuuteen astiaan. Pumput kävivät 30 kierrosta minuutin tahdissa ja ne pumppasivat vettä noin 15 ml/min astiasta pois ja takaisin.

Kokeessa oli kuusi erilaista betonityypin ja veden konfiguraatiota ja niiden kaksoiskappaleet (taulukko 5). Vasemmanpuolimmainen pumppu kierrätti vettä kuuteen eri konfiguraatioon ja oikeanpuolimmainen pumppu kierrätti vettä näiden kuuden konfiguraation kaksoiskappaleisiin. Tällöin pumppujen mahdolliset erot tai yhden pumpun rikkoutuminen ei eliminoisi minkään konfiguraation.

Taulukko 5. Vesisangoissa olevat betonipalan ja veden yhdistelmät.

Koepala	Tunnus	Vesi	Pumppu
1	SR	Helsinki	Vasen
2	Pika	Helsinki	Vasen
3	(60/40)	Helsinki	Vasen
4	(30/70)	Helsinki	Vasen
5	SR	Keminmaa	Vasen
6	(30/70)	Keminmaa	Vasen
7	SR	Helsinki	Oikea
8	Pika	Helsinki	Oikea
9	(60/40)	Helsinki	Oikea
10	(30/70)	Helsinki	Oikea
11	SR	Keminmaa	Oikea
12	(30/70)	Keminmaa	Oikea

Veden määrä kaikissa astioissa on 2,34 l ja se on sama joka huuhtelukerralla. Tämä saatiin käyttämällä samaa metodologia, kuin Clark (2009:20). 2,34 l saadaan laskemalla putken A/V-suhde ja kertomalla se koepalan kaikkien sivujen pinta-alojen summalla. A/V suhde tässä tapauksessa tarkoittaa sisäisen betonipinnoitteen pinta-alaa jaettuna saman putken sisäpuolen tilavuudella tämän pinta-alan kohdalla. Tässä tapauksessa lasketaan DN600x8 -putken A/V-suhde, joka on 0,0069 mm⁻¹. Tämä putki valittiin, koska se on suosittu koko betonoiduissa vesijohtoputkissa. A on betonoidun putken betonin pinta-ala 100 mm:llä ja V on samalla mitalla putken tilavuus. Kaava A/V-suhteen laskemiseen nähdään yhtälössä 6. Siinä r on putken säde ja l on putken pituus.

$$A/V = \frac{2\pi r l}{\pi r^2 l} \quad (6)$$

Tarvittava vesimäärä V_v saadaan, kun koepalan kaikkien sivujen pinta-alojen summasta A_p jaetaan A/V-Suhde. Tämä nähdään yhtälöstä 7.

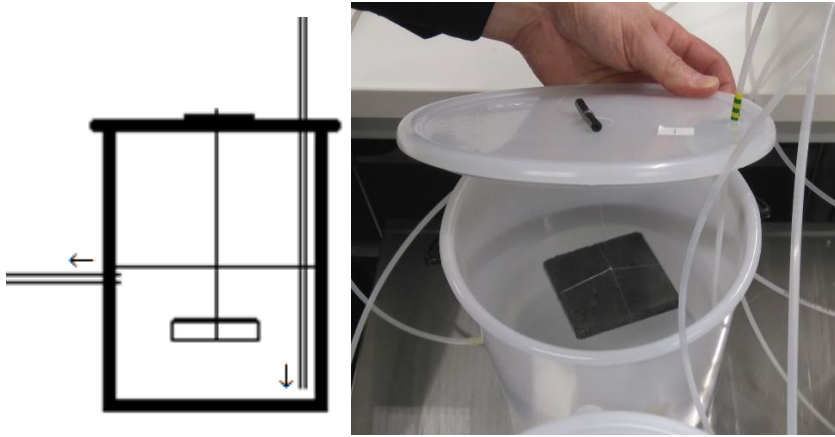
$$V_v = \frac{A_p}{A/V} \quad (7)$$

Kun tiedetään, kuinka paljon vettä yksi astia per erä tarvitsee, voidaan laskea vedentarve eri huuhtelukertojen määrille (taulukko 6). Taulukon 6 laskuissa Helsingistä saatua vettä käyttää kahdeksan palaa ja Keminmaasta saatua vettä käyttää neljä palaa. Nämä määrät saadaan kaavasta 6. Nähdään, että Helsingistä haettu 300 l ja Keminmaasta haettu 150 l vettä riittävät kymmenen huuhtelukerran kokeisiin.

Taulukko 6. Tarvittava veden määrä per huuhtelukerta.

Vesierän määrä	Helsingin veden tilavuus (l)	Keminmaan veden tilavuus (l)
1	18,688	9,344
2	37,376	18,688
3	56,064	28,032
4	74,752	37,376
5	93,44	46,72
6	112,128	56,064
7	130,816	65,408
8	149,504	74,752
9	168,192	84,096
10	186,88	93,44

Kokeessa 2,34 l vettä kaadettiin 5 litran sankoihin. Noin 1 cm veden pinnan alle porattiin reikä, jonka läpi laitettiin veden ottoputki, joka ottaa veden kiertoan. Muovisangon kanteen porattiin myös reikä, jonka läpi laitettiin veden syöttöputki. Kyseinen syöttöputkea syötettiin reiän läpi niin paljon, että sen pää oli sangon pohjalla. Syöttö ja ottoputki olivat myös sangon toisilla puolilla (kuva 3). Tällöin kierrätetty vesi meni sangon puolelta toiselle ja ylhäältä alas.



Kuva 3. Kuvaus kokeessa käytetystä systeemistä.

Koepala oli kiinni kalastussiimassa. Kyseinen siima oli sidottu kiinni pätkään muoviputkea, joka oli muovisangon kannen päällä. Kun koepala roikkui siimassa, ei mikään sen sivuista koskenut sangon reunoihin tai pohjaan ja mikään osa ei ollut vedenpinnan yläpuolella. Tällöin koepalan kaikki pinnan olivat kosketuksessa veteen lukuun ottamatta hyvin pientä osaa, joka oli kontaktissa ohuen siiman kanssa. Koepala leijui astiassa poikittain, koska veden pinta ei ollut tarpeeksi korkea, että koepala olisi voinut olla astiassa pitkittäin. Tällöin koepalan alaosa oli kontaktissa pohjaan tai yläosa tuli pinnan yläpuolelle.

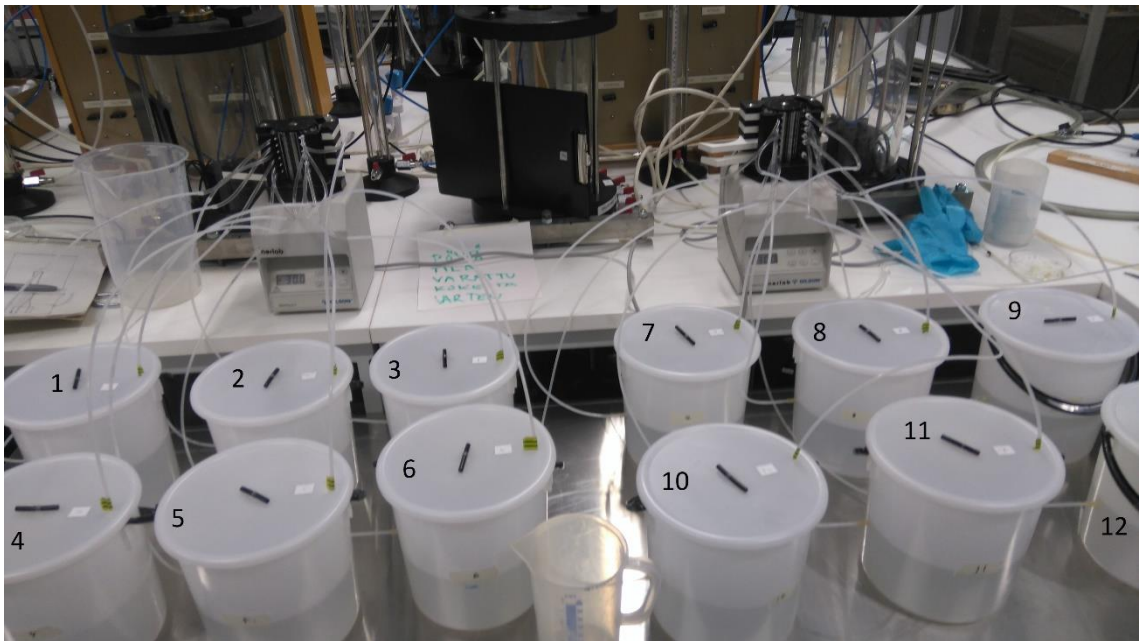
3.2 Laboratoriokoe

Ennen kokeen aloittamista valittiin tehdyistä betonipaloista ehjät ja vähiten vahingoittuneet koepaloiksi. Neljä SR- ja (30/70) -betonipalasta valittiin, joista kaksi upotettiin Helsingin veteen ja kaksi Keminmaan veteen. Helsingin veden konfiguraatiot mietittiin tärkeämmiksi, joten vähemmän vahingoittuneet palaset valittiin niihin ja enemmän vahingoittuneet palaset valittiin Keminmaan veden konfiguraatioihin. Kaksi pika- ja (60/40) -betonipalasta valittiin ja ne menivät vain Helsingin vesiin.

Valitut kuivat palat punnittiin vaa'alla ennen muovisangon kanteen kiinnittämistä. Sitten betonipalat kiinnitettiin kansissa oleviin muoviputkeen siimalla yksi kerrallaan. Muovisangot, joihin kyseiset betonipalat upotettiin, asetettiin pöydälle pumppujen eteen. Ne asetettiin kahteen 2x3 riveihin. Nämä sangot sitten numeroitiin siten, että numerot 1-6 ovat sangoissa, jotka ovat putkilla kiinni vasemmassa pumpussa. Numerot

6-12 olisivat tällöin sangot, jotka ovat kiinni oikeassa pumpussa. Järjestys molemmissa oli, että ensimmäinen tai ylempi rivi tulisi ensin ja sitten alempi rivi. Tämä voidaan nähdä kuvasta 4. Sangot ja niitä vastaavat kannet merkittiin näillä numeroilla, jotta ne eivät sekoittuisi keskenään.

Kuvassa 4 olevat numerot täsmäävät taulukossa 5 oleviin koepalan numeroihin. Taulukko 5 siis kertoo, missä sangossa mikäkin betonipala on. Kuvasta 4 ja taulukosta 5 huomataan, että kaikki kuusi yhteen pumppuun yhdistetyt sankojen sisäiset konfiguraatiot ovat uniikkeja ja, että toiseen pumppuun kiinnitetyt sankojen konfiguraatiot ovat samoja ja samassa järjestyksessä, kuin ensimmäisessä sangossa. Kuvasta 4 nähdään myös käytetyt pumput ja putket.



Kuva 4. Kuva koejärjestelyistä.

Ensin sankoon yksi laskettiin 2,34 l Helsingin vettä. Raakavettä ensin kaadettiin 3 l mitta-astiaan, johon oli merkitty 2,34 l raja. Vettä kaadettiin ensin vapaalla kädellä muovikanisterista mitta-astiaan suunnilleen merkittyyn kohtaan. Tämän jälkeen mitta-astiaan lisättiin tai poistettiin raakavettä 40 ml ruiskulla, johon oli kiinnitetty pätkä käyttämätöntä muoviputkea. ruiskulla saatiin tarkasti veden pinta merkin kohdalle. Tämän jälkeen sangon vastaava kansi, johon sitä vastaava betonipala on kiinnitetty, lasketaan sangon päälle. Kansi painetaan kiinni. Sitten kantta raotettiin ja tarkistettiin,

että betonipalanen on täysin veden alla, eikä se kosketa reunoja. Samalla katsotaan, että kannessa kiinni oleva putki ylittää pohjalle.

Nämä kaikki toimenpiteet toistetaan sankoille kahdesta neljään ja seitsemästä kymmeneen. Niihin kaikki tulee Helsingin vettä, kuten voidaan nähdä taulukosta 5, joten ne täytetään ensin. Sitten nämä toimenpiteet toistetaan sangoille neljä, viisi, yksitoista ja kaksitoista mutta nämä täytetään Keminmaan vedellä ja siksi ne täytetään viimeisenä. Helsingin veden sangot ja Keminmaan veden sangot täytettiin käyttämällä samaa mitta-astiaa mutta se huuhdeltiin aina ennen vaihtoa kyseisellä vedellä. Tämän takia Kaikki Helsingin veden sangot täytettiin ennen Kemin veden sankoja, eikä vain puhtaasti numerojärjestyksessä. Molemmille vesille oli kuitenkin omat ruiskut.

Kun kaikki sangot oli täytetty vedellä ja niihin oli kiinnitetty vastaavat sangot ja betonipalat ovat niiden sisällä, käynnistettiin pumput. Tämän jälkeen jokaisen sangon kantta raotettiin ja nostettiin siihen kiinnitetty putkea. Tämän tarkoitus oli tarkastaa, että pumppu ja putket toimivat ja vesi virtasi niiden lävitse. Sitten pumput, sangot ja niiden sisällä olevat vedet ja betonipalat jätettiin rauhaan, kunnes oli aika tehdä mittauksia tai vaihtaa vesiä.

Paikan päällä laboratoriossa vedestä mitattiin pH, lämpötila ja sähkönjohtavuus. Nämä arvot mitattiin inoLab Multi 9420 laitteella. Mittalaite antoi pH-arvon sadasosan tarkkuudella, joka pyöristettiin kymmenesosaan, koska sadasosan arvo ei pysynyt samana. Mittalaite antoi lämpötilan kymmenesosana ja sähkönjohtavuuden $\mu\text{S}/\text{cm}$ yksikön tarkkuudella. Aina ennen mittauksia pH elektrodi ja laitteisto kalibroitiin laitteen ohjeiden mukaisesti. pH 7 ja pH 10 vesiä käytettiin kalibrointiliuoksina. Ennen sangoissa olevien vesien mittausta, huuhdeltiin elektrodi tislattulla vedellä. Sähkönjohtavuuden mittaukseen käytettyä anturi kalibroitiin ennen ensimmäistä mittausta. Se myös huuhdeltiin tislattulla vedellä ennen ensimmäistä mittausta.

Ensimmäisenä sangon numero 1 kantta raotettiin ja pH elektrodi laskettiin veteen ja sillä sekoitettiin vettä hieman. Elektrodin annettiin olla paikalla yhden minuutin, jonka jälkeen pH ja lämpötila arvot kirjattiin ylös. Sangosta poistamisen jälkeen huuhdeltiin elektrodi taas tislattulla vedellä. Tämän jälkeen siirryttiin sankoon numero 2 ja toistettiin jo sangossa yksi tehdyt toimenpiteet. Kun pH elektrodi oltiin asetettu sankoon 2, asetettiin sähkönjohtavuuden anturi sankoon yksi. Taas se annettiin olla kontaktissa

veden kanssa yhden minuutin ja tulokset otettiin ylös. Tästä eteenpäin, kun pH elektrodia siirrettiin, otti sähkönjohtavuuden anturi sen paikan.

Mittaukset tehtiin samassa järjestyksessä, kuin veden syöttö ja betonipalasten upotus. Eli edettiin sangoissa numerojärjestyksessä mutta Keminmaan vettä sisältävät sangot mitattiin viimeisenä. Tällöin vedet, joissa betonipala on ollut eniten aikaa, mitattiin ensimmäisenä ja vedet, jossa betonipalat olivat olleet vähiten, mitattiin viimeisenä. Tällöin aika, jolloin betonipalat ovat kosketuksissa veteen ennen mittausta tasoittuu.

Ensimmäinen yllä olevien arvojen mittaus tapahtui tunnin ensimmäisestä betonipalojen upotuksesta. Koska alussa kalsiumin liukeneminen tapahtuu nopeasti, haluttiin tätä ilmiötä mitata. Sen jälkeen mittaukset tehtiin ennen veden näytteiden ottamista ja veden vaihtoa.

Laboratoriotyössä mittaus, näytteenotto ja huuhtelu eli veden vaihtaminen tehtiin peräkkäin. Tarkoituksena oli saada veden eri arvot pitkän altistumisajan jälkeen. Tämä haluttiin toistaa useasti, jotta nähdään betonissa olevan vapaan kalkin vähenemisen vaikutus vesien laatuun. Tämän takia ämpärit huuhdeltiin tai toisin sanoen niistä poistettiin vanha vesi ja lisättiin uusi annos raakavettä. Tämä imitoi uutta vettä putken käyttöönoton huuhtelussa ja vesijohtovedessä jatkuvasti virtaavaa tuoretta vettä.

Ensimmäinen huuhtelu tapahtui vuorokausi laboratoriotyön aloituksesta. Tässä kuten ensimmäisessä mittauksessa tarkoitus oli tarkastella alussa tapahtuvia nopeita vaikutuksia vedenlaatuun. Tämän jälkeen vesiä vaihdettiin kolmesta viiden päivän väleillä. Taulukosta 7 voidaan nähdä huuhtelujen määrä, kuinka monta vuorokautta niiden välissä oli ja kokeen kumulatiivinen kesto.

Taulukko 7. Huuhtelujen aikataulu.

Vesierä	Kesto edellisestä huuhtelusta (vrk)	Kumulatiivinen aika (vrk)
1	0	0
2	1	1
3	3	4
4	3	7
5	4	11
6	3	14
7	5	19
8	3	22
9	4	26
10	3	29
Loppu	5	34

Taulukossa 7 Vesierä 1 on ensimmäinen vesi, jota käytettiin kokeessa ja vesierä 10 on viimeinen. Vesierän 10 jälkeen ei sankoihin enää kaadettu lisää vettä. Alkuperäinen tarkoitus oli, että ensimmäisen huuhtelu olisi vuorokauden päästä aloituksesta ja viimeinen olisi viisi päivää edellisen jälkeen. Muut välit suunniteltiin olevan kolme tai neljä vuorokautta pitkiä, jolloin koepalaiset saavat olla tarpeeksi kauan veden kanssa kontaktissa, että betonista liukenee reilusti kalsiumia veteen. Tällöin huuhtelu tapahtuisi kahdesti viikossa ja sitä ei tarvitsisi tehdä viikonloppuna. Vesierän 6 vaihdossa kesti viisi vuorokautta, koska pääsiäinen ja siihen liittyvät juhlapyhät estivät huuhtelun. Tämän jälkeen palattiin suunniteltuun rytmiin.

Kuten jo mainittiin, vedestä näytteenotto analyysiin ja huuhtelu tapahtui toistensa peräjälkeen. Vesinäytteet kerättiin vesianalyysilaboratoriolta saatuihin muovipulloihin. pH, lämpötilan ja sähkönjohtavuuden mittaamisen jälkeen pumput sammutettiin. Sangon yksi kansi irrotettiin sangosta. kansi ja siinä kiinnitetty betonipala ja putki siirrettiin viereen asetettuun tyhjään sankoon. Vesinäytteelle tarkoitettu pullo asetettiin metallikulhoon. Metallikulhon tarkoitus oli estää vettä roiskumasta muihin sankoihin kaataessa. Tämän jälkeen sangossa olevaa vettä sekoitettiin lasisauvalla. Sekoituksen jälkeen sangossa olevaa vettä kaadettiin pulloon, niin että pullo täyttyi. Pullon täyttämisen jälkeen loput sangossa olevat vedet kaadettiin tyhjään astiaan. Sangon kansi ja vastaava betonipala siirrettiin sitten takaisin niiden omaan nyt tyhjään sankoon. Tämä toistettiin kaikille sangoille. Raakavedestä myös kaadettiin kahteen pulloon näytteet.

Lasisauva huuhdottiin tislattulla vedellä joka sangon välissä. Näytteenoton ja huuhtelun aikana käytettiin laboratorion kertakäyttökäsineitä ja silmänsuojaimia. Näillä haluttiin

estää korkean pH arvon vettä koskettamasta ihoa tai silmiä. Kun kaikki sangot olivat tyhjiä vedestä, irrotettiin sankojen kansista syöttöputket ja ne kerättiin tyhjäan astiaan. Pumput sitten käynnistettiin ja niitä pidettiin niin kauan päällä, kunnes putket olivat tyhjiä edellisistä vesistä. Samalla tarkistettiin, että kaikissa putkissa virtasi vesi.

Kun sangot ja putket olivat tyhjäät edellisistä vesistä. Kaadettiin sankoihin uudet erät raakavettä. Toimenpiteet ja veden määrä olivat samat, kuin ensimmäistä kertaa veden laskiessa ämpäreihin. Kun tämä oli tehty ja pumput olivat käynnissä ja putket tarkistettu, vietiin loput raakavedet takaisin laboratorion kylmävarastoon ja sitten vesinäytteet toimitettiin analyysilaboratorioon analysoitavaksi.

Analyysilaboratoriossa vedestä analysoitiin kuusi eri asiaa. Nämä ovat alkaliteetti, DOC eli liuennut orgaaninen hiili, vapaa kloori, kovuus sekä kalsiumin ja alumiinin määrä (taulukko 8). Kaikkia ei aina analysoitu kaikista vesistä kaikkina kertoina. Kaikista sangoissa olevista vesinäytteistä analysoitiin samat asiat samoihin aikoihin. Raakavesinäytteistä analysoitiin samat asiat mutta vesinäksestä 1 otettiin myös DOC ja vapaa kloori.

Taulukko 8. Kuvaus, milloin mikäkin analyysi on tehty vesille. x solussa osoittaa milloin mikäkin analyysi on tehty näytteistä.

Vesiannos	Alkaliteetti	Kovuus	Kalsium	Alumiini	DOC	Vapaa kloori
1	x	x	x	x		
2	x					
3	x					
4	x					
5	x					
6	x	x	x	x		
7	x					
8	x					
9	x					
10	x	x	x	x	x	x

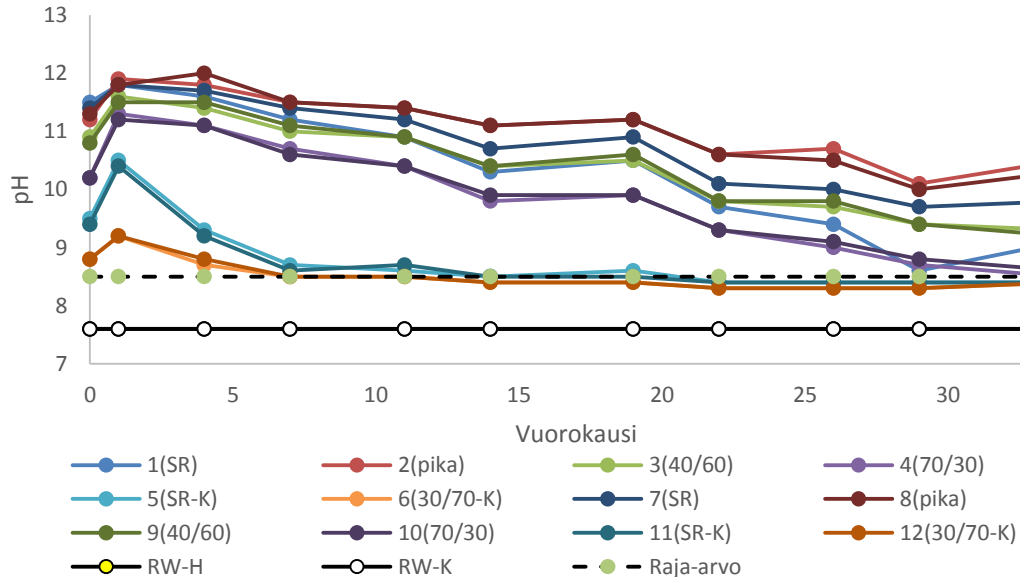
Alkaliteetti mitattiin menetelmällä SFS-EN ISO 9963-1 muunneltu, joka on ”Sisäinen menetelmä, titraus pH 4,5 ja 4,2”. Kovuus, kalsiumpitoisuus ja alumiinipitoisuus mitattiin menetelmällä SFS-EN 11885. DOC mitattiin menetelmällä SFS-EN 1484. Vapaa kloori mitattiin menetelmällä SFS-EN ISO 7393-1. (Ahma Ympäristö Oy 2018)

4 TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI

Kokeiden tekeminen ja tulosten ylös kirjaaminen onnistuivat ongelmitta suunnitteleman mukaan. Pumput ensimmäisestä käynnistyksestä viimeiseen sammuttamiseen pumppasivat aina vettä putkien läpi ja mikään astia tai johto ei vuotanut kokeen aikana. Mittaukset, näytteiden otto ja huuhtelut tapahtuivat suunniteltuina ajankohtina ja ne tapahtuivat aina samalla tavalla samassa järjestyksessä. Raakavesi ei loppunut kokeen aikana kesken.

4.1 pH

Veden pH kasvoi hyvin nopeasti betonipalasten upottamisen jälkeen (kuva 5). Voidaan myös huomata, että Helsingin vesien pH oli korkeimmillaan ensimmäisen kahden huuhtelukerran ajan, jolloin pH-arvot ovat välillä 11,2-12 kaikille Helsingin vesille. Tämän jälkeen ne alkavat laskemaan. Kokeen lopussa Helsingin vesien pH-arvot ovat välillä 8,5-10,5.



Kuva 5. pH:n muutokset eri huuhteluilla. RW-H:n viiva on RW-K: alapuolella, koska vesien pH. Raja-arvo on haluttu veden pH huuhteluiden jälkeen.

Keminmaan vesien pH taas nousee huippuunsa ensimmäisellä huuhtelukerralla, jolloin ne ovat 10,5 SR-sementin vedelle ja 9,2 (30/70) -sementin vedelle. Molempien vesien

pH-arvot laskevat tämän jälkeen, kunnes ne tasoittuvat kolmannen huuhtelukerran jälkeen pH-arvoihin 8,3 ja 8,4.

Molemmissa vesissä tapahtuu hetkellisiä pH:n nousuja kuten viidennen ja kuudennen vedenvaihtokerran välillä. Tämä johtuu ajasta, kuinka kauan betonipala oli uppoutuneena vedessä. Jos verrataan huuhteluja, joissa veden pH nousee hetkellisesti taulukon 7:n keston edellisestä huuhtelusta, nähdään korrelaatio. Lopussa tapahtuva pH nousu johtuu myös tästä, koska viimeinen mittaus tehtiin viiden vuorokauden upotuksen jälkeen. Tämä kertoo siitä, että betonista, pH nousi vielä neljän vuorokauden jälkeen.

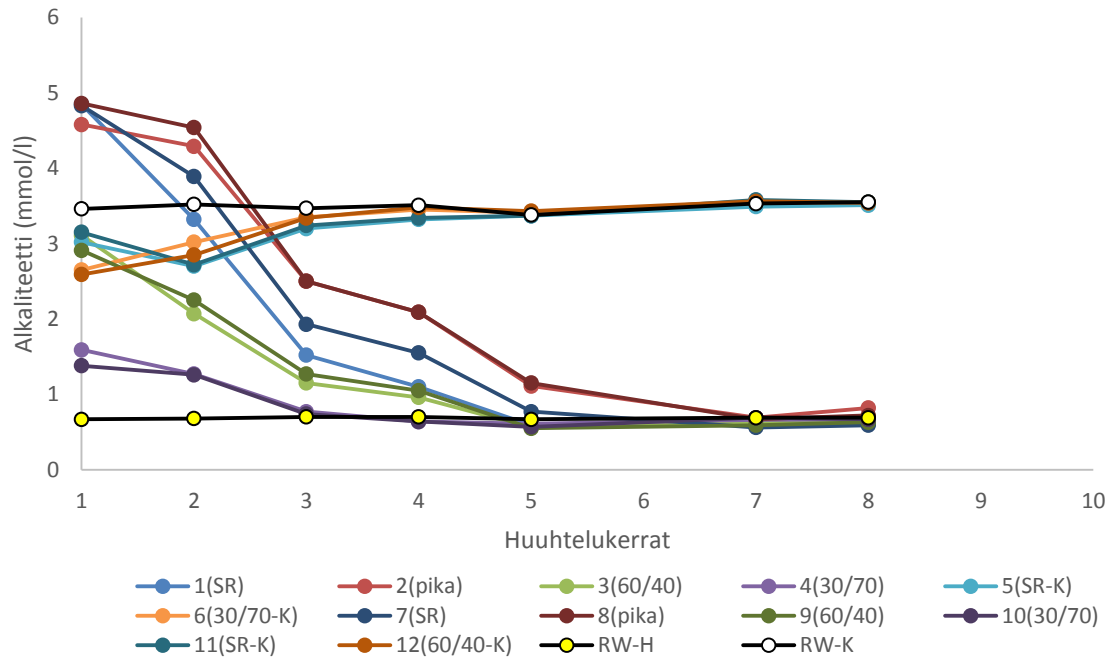
Helsingin vesien pH käyrät käyttäytyvät samanlaisesti mutta eri sementeistä tehtyjen betonipalasten pH arvoissa on eroa ja tämä ero pysyy samankokoisen lähes koko testin ajan. Tämä käyttäytyminen täsmää Ongin ja Wongin (2018:3) tuloksiin. Pika-sementin veden pH-arvot pysyvät korkeimpina, SR-sementin veden pH-arvot ovat kolmanneksi korkeimpia ja (60/40) -sementin veden pH-arvot ovat niiden alapuolella. (30/70) -sementin veden pH-arvot ovat matalimmat Helsingin vesistä.

Keminmaan veden pH arvot nousevat ja laskevat keskenään samaan aikoihin mutta SR-sementin veden pH muutokset ovat suurempia. SR-sementin veden pH-arvot ovat korkeampia, kuin (30/70) -sementin veden pH-arvot. Molemmat Kemianmaan veden pH-arvot ovat matalammat, kuin Helsingin veden pH-arvot.

Sangon 1 pH:n käyttäytyminen eroaa sen kaksoiskappaleesta 7. Sen käyttäytyminen eroaa myös muista näytekappaleista. Syytä tälle poikkeavuudelle ei kokeen suorittamisesta löytynyt.

4.2 Alkaliteetti

Helsingin vesien alkaliteetit alkavat korkeina ja laskevat kohti raakaveden arvoa (kuva 6). Mielenkiintoisesti Kemianmaan veden alkaliteetit ovat alussa vastaavaa raakavettä alempana mutta lopulta nekin nousevat raakaveden tasolle, joka on noin 3,50 mmol/l mutta ei koskaan sitä huomattavasti korkeammalle.



Kuva 6. Alkaliteetin muutokset eri huuhteluilla ja raakavesien arvot.

Helsingin vesien alkaliteeteissa nähdään suuria eroja eri palasten välillä. Pika- ja SR-sementin vesien alkaliteetti on alussa lähes 5 mmol/l verrattuna raakaveden alkaliteettiin, joka on 0,67 mmol/l. (60/40) -sementin veden alkaliteetti on taas alussa noin 3 ja (30/70) -sementin noin 1,5 mmol/l.

Kaikki Helsingin vesien alkaliteetit päätyivät lopulta raakaveden alkaliteettiin mutta ne vedet, joilla 1. huuhtelukerralla alkaliteetti oli matalampi, laskivat sinne nopeammin. (30/70) -sementin veden alkaliteetti saavutti raakaveden arvon kolmannella huuhtelukerralla. (60/40) -sementin ja SR-sementin veden alkaliteetti taas saavutti sen viidennellä huuhtelukerralla. Pika-sementin veden alkaliteetti saavutti raakaveden alkaliteetin seitsemännellä huuhtelukerralla.

Samaa sementtiä ja vettä sisältävät näyteparit tuottivat lähes samoja tuloksia paitsi taas sangon 1 tulokset, jotka erosivat sangosta 7 huomattavasti. Myös huuhtelukerran 6 alkaliteetti tuloksia ei näy kuvassa 6, koska ne olivat vialliset. Młyńska et al. (2015:149) tutkimuksessa putkesta ulostulevan veden alkaliteetti on myös alussa alle sisään menevän veden, kuten Keminmaan veden alkaliteetit.

Taulukosta 9 voidaan nähdä betonipalan veden alkaliteetin kumulatiivinen ero raakaveteen verrattuna kymmenen huuhtelukerran jälkeen. Tulokset laskettiin rinnakkaiskappaleiden alkaliteettien keskiarvosta. Helsingin veden SR-sementin tuloksiin ei otettu sangon 1 tuloksia huomioon, vaan laskussa on käytetty vain sangon 5:n alkaliteettiä.

Taulukko 9. Alkaliteetin lopun kumulatiivinen muutos.

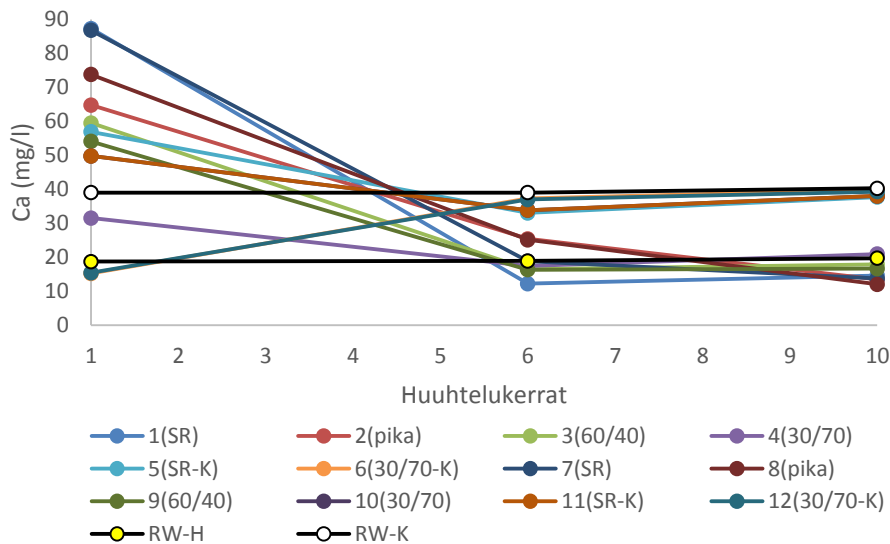
Sementti	Vesi	Kumulatiivinen alkaliteetin muutos (mmol/l)
SR	Helsinki	9,2
pika	Helsinki	11,275
60-40	Helsinki	4,34
30-70	Helsinki	1,45
SR	Keminmaa	-1,465
30-70	Keminmaa	-1,31

Helsingin vesillä mitä korkeampi alkaliteetti on alussa, sitä suurempi kumulatiivinen ero on lopussa. Tässäkin nähdään eri sementtien välillä suuria eroja. Siitä näkyy myös, että vaikka SR- ja pika-sementin vesien alkaliteetti olivat alussa hyvin lähellä toisiaan, nousee pika-sementin kumulatiivinen alkaliteetti lopulta korkeammalle. Ei kuonaa sisältävien sementtien kumulatiivinen alkaliteetti erot ovat myös moninkertaisia verrattuna kuonaa sisältäviin sementteihin. Kuvasta 6 nähdään myös, että Keminmaan vesien alkaliteetin kumulatiivinen ero on myös negatiivinen eli Keminmaan vesien alkaliteetti ei missään vaiheessa noussut vastaavan korkealle raakaveteen verrattuna, kuten alun alhainen alkaliteetti.

4.3 Veden kalsiumpitoisuus

4.4 Mittaustulokset

Lukuun ottamatta (30/70-K) -betonipaloja, muiden vesien kalsiumpitoisuudet ovat korkeita suhteessa verrattaviin raakavesiin (kuva 7). Kuten alkaliteetti, ne kuitenkin laskevat ja lopulta tasoittuvat vastaaviensa raakavesien arvojen lähelle.

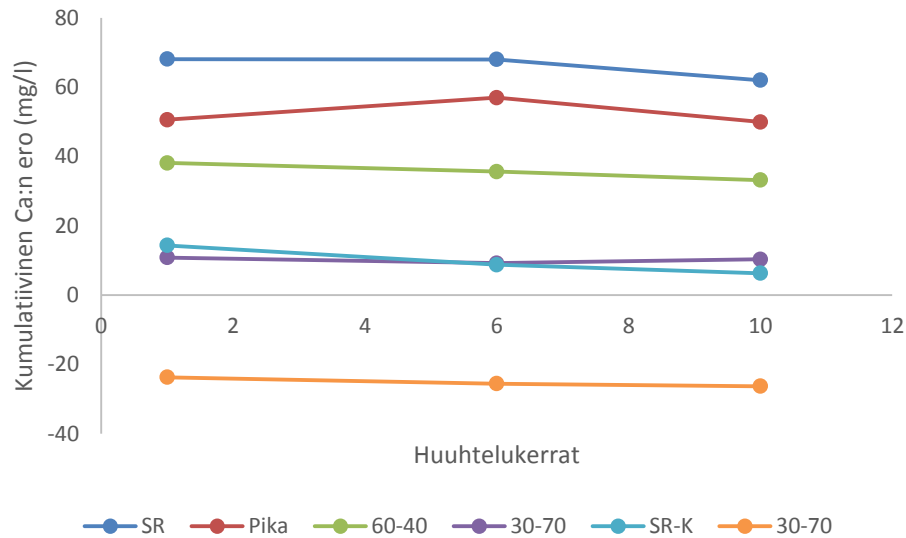


Kuva 7. Kalsiumpitoisuuden muutokset eri huuhteluilla ja raakavesien arvot.

Kuten Helsingin vesien pH:ssa ja alkaliteeteissä, kuonaa sisältävien sementtien vesien kalsiumpitoisuudet ovat alussa huomattavasti pienemmät, kuin SR- ja pikasementin vesissä. Toisin kuin alkaliteetissä, SR-sementin veden kalsiumarvot ovat alussa korkeammat, kuin pikasementin. Kuudennen huuhtelukerran jälkeen SR-sementti on kuitenkin laskenut pikasementin alle.

Keminmaan vesien kalsiumpitoisuudet eroavat toisistaan paljon. SR-sementin veden kalsiumpitoisuus alkaa vähän vastaavan raakaveden arvon yläpuolella ja (60/40) -sementin veden kalsiumpitoisuus on alussa huomattavasti alle vastaavan raakaveden pitoisuuden. Se lähestyy raakaveden pitoisuutta mutta ei mene koskaan sen yli. Kuvasta nähdään myös, että muissakin vesinäytteissä vesien kalsiumpitoisuudet ovat välillä alle vastaavan raakaveden pitoisuuden.

Vaikka sangon (60/40-K) -betonipalasten pinnoille oli jo ensimmäisen päivän jälkeen muodostunut näkyvä sakka (katso kappale 4.11), on niiden vesien kalsiumpitoisuus korkeampi kuin (30/70-K), joissa ei ollut näkyvää sakkaa ensimmäisen päivän jälkeen. Koska SR-sementistä tehdystä betonipalassa on enemmän vapaata kalkkia, kuin (30/70) -sementin ja kuonan sekoituksessa, on mahdollista, että SR-sementistä tehdyt betonipaloista liukeni niin paljon enemmän kalsiumia verrattuna kuonaa sisältävään betoniin, että se pystyi muodostamaan enemmän sakkaa ja silti pitämään korkeamman kalsiumpitoisuuden vedessä.



Kuva 8. Kalsiumpitoisuuden kumulatiivinen muutos eri huuhteluilla.

Kuvasta 8 nähdään, että kaikkien vesien kumulatiivisen kalsiumpitoisuuden ero suhteessa raakaveteen on pienempi lopussa kuin alussa. Tämä tarkoittaa, että kaikissa vesissä on vähemmän kalsiumia, kuin vastaavassa raakavedessä ainakin yhdellä huuhtelukerralla. Kalsiumpitoisuuden pieneneminen raakaveteen verrattuna tapahtui myös Clarkin (2009:39) kokeessa.

Kun kalsiumpitoisuus koevesissä on pienempi, kuin raakavesissä, liukenee betonipaloista vähemmän kalsiumia, kuin mitä sitä kuluu betonipaloissa ja sangon pinnoilla olevaan sakan muodostamiseen. Sakan muodostuessa kalsiumkarbonaatin määrä vähenee vedessä, joka voi selittää myös raakaveden alapuolella olevat alkaliteetti-arvot.

4.5 Arvioitu kalsiumpitoisuus

4.5.1 pH

Jos oletetaan, että pH:n nousu aiheutuu ainoastaan kalsiumhydroksidin liukenemisestä, voidaan arvioida, kuinka paljon kalsiumia on liuennut betonista veteen. Tässä tapauksessa mitä korkeampi veden pH on, sitä tarkempi arvio on, koska suurempi osa

veden pH:sta on liunneen kalsiumhydroksidin takia. Tällöin hydroksidi-ionin määrän voi laskea pH:n avulla ja siitä saadaan kalsiumionien määrän (kaava 8 ja 9).

$$pH + pOH = 14 \quad (8)$$



Tällä oletuksella arviointi onnistuu vain, kun veden pH on yli 11 (taulukko 10). Tällöin veden laskettu kalsiumpitoisuus on korkeampi, kuin mitattu kalsiumpitoisuus. Tällöin sakan muodostumisten on laskenut veden kalsiumarvon pienemmäksi, mitä sen pitäisi olla laskujen mukaan. Alle 11 pH vesissä laskettu kalsiumpitoisuus on pienempi, kuin mitattu kalsiumpitoisuus. Tällöin jokin muu liennut aine on myös nostanut veden pH:ta ja veden kalsiumarvo ei ole noussut täysin veden pH:n kanssa.

Taulukko 10. Mitatun ja lasketun kalsiumin erotus (mg/l). Alle 11 pH:n tulokset on kursivoitu.

vuorokausi/sementti	SR	pika	60/40	30/70	SR-K	30/70-K
1	-39,64	-73,51	-14,77	-6,37	47,66	14,98
19	2,88	-6,51	9,24	15,71	33,33	37,10
34	12,44	7,53	16,89	20,73	37,80	39,50

4.5.2 Alkaliteetti

Jos oletetaan, että alkaliteetin muutos on täysin liunneen kalsiumhydroksidin hydroksidi-ionin takia, voidaan liunneen kalsiumin määrä arvioida ensin laskemalla liunneen hydroksidi-ionien määrä mitatusta alkaliteetin muutoksesta raakaveteen verrattuna (kaava 10). V on testissä käytetyn astian veden määrä tilavuutena. Tämän jälkeen voidaan laskea liunneen kalsiumin määrä liunneen hydroksidi-ionin määrästä. Jos liunneen kalsiumin määrä voidaan arvioida laskemalla, voidaan laskea kalsiumpitoisuudet huuhtelukerroille, jolloin niitä ei mitattu ja sitten voidaan laskea, kuinka paljon betonipaloista liukeni kalsiumhydroksia ja niitä voidaan verrata keskenään.

$$[\text{CaCO}_3] \times M(\text{CaCO}_3) \times 0,34 \times V = m(\text{OH}^-) \quad (10)$$

(Ca. Waterboards 2018)

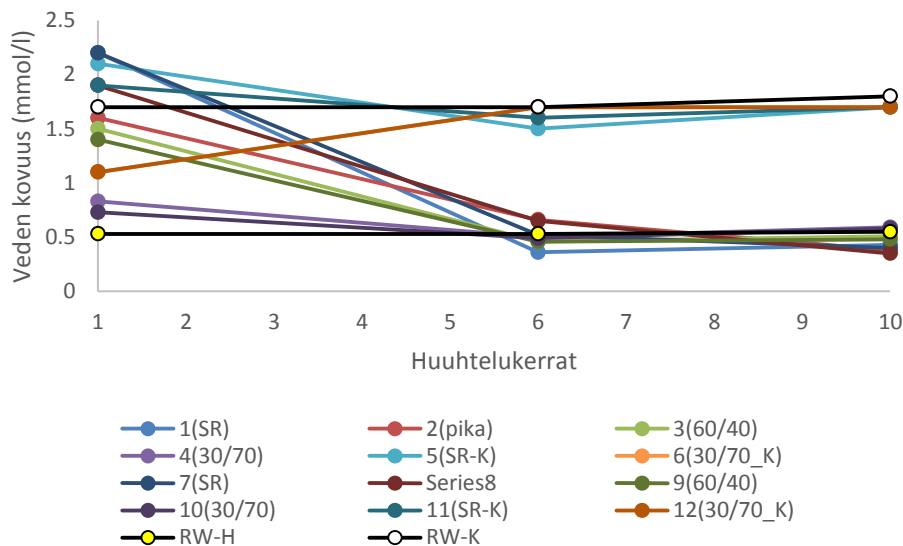
Kun alkaliteetti on korkea, on laskettu kalsium määrä vedessä moninkertainen vedestä mitattuun kalsiumin määrään verrattuna (taulukko 11). Pienien alkaliteettierojen kohdalla lasketun ja mitatun kalsiumpitoisuuden suhde voi vaihdella moninkertaisesta murto-osaan. Kun taulukossa 11 jokin suhde on negatiivinen, silloin näytteen ja raakaveden alkaliteettiero sekä kalsiumpitoisuuden ero ovat olleet vastakkaiset. Eli toinen arvoista on ollut pienempi kuin raakaveden arvo ja toinen suurempi. Varsinkin, kun kalsiumpitoisuuden erot näytteen ja raakaveden lähellä tasoittuvat, nousee suhde hyvin korkealle.

Taulukko 11. Lasketun kalsiumpitoisuuden määrä suhteessa mitattuun.

vuorokausi/sementti	SR	pika	60/40	30/70	SR-K	30/70-K
1	2,45	3,23	2,47	3,06	-1,07	1,42
19	-1,08	4,35	0,74	0,47	0,75	0,83
34	0,47	0,56	0,32	4,58	0,89	1,20

4.6 Veden kovuus

Veden kovuuden vaihtelu (kuva 9) on samanlainen, kuin kalkin pitoisuuden vaihtelu (kuva 7). Koska veden kovuus on sen kalsium- ja magnesiumsuolojen määrä vedessä (Cantor 2018:147), veden kalsiumpitoisuus vaikuttaa suuresti sen kovuuteen.

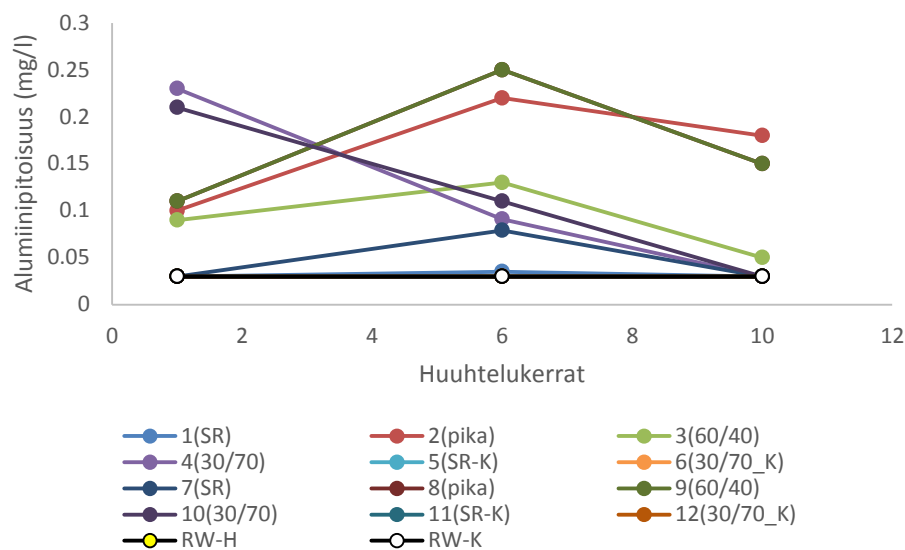


Kuva 9. Veden kovuuden muutos eri huuhteluilla ja raakavesien arvot.

Koska kovuuden muutos on lähes identtinen, kalsiuminpitoisuuden muutokseen, voidaan todeta, että joko magnesiumia ei liukene betonista veteen, tai sen liukeneminen on hyvin vähäistä verrattuna kalsiumin liukenemiseen, että se ei vaikuta huomattavasti veden kovuuteen.

4.7 Veden alumiinipitoisuus

Osa analyysituloksista merkitsi veden alumiinipitoisuudeksi $<0,03$ mg/l, kun kyseinen arvo oli alle tuon 0,03 mg/l. Nämä tapaukset on merkitty arvolla 0,03 mg/l kuvaan 10.



Kuva 10. Veden alumiinipitoisuuden muutos eri huuhteluilla ja raakavesien arvot. Raakavesien arvot ovat lähes identtiset, joten RW-H:n viiva on RW-K:n viivan alla.

SR-sementin vesien alumiinipitoisuudet ovat lähes samat, kuin raakavesissä. Helsingin vesien pika- ja (60/40) -sementtien vesien alumiinipitoisuus on raakavettä korkeampi alussa. Se sitten nousee vielä kuudennella huuhtelukerralla ja laskee sen jälkeen. Pika-sementin alumiinipitoisuus on lopussa 0,15 ja 0,18 mg/l, joka on reilusti korkeammaksi, kuin raakaveden 0,03 mg/l. 60/40) -sementtien vesien alumiinipitoisuus laskee lopussa lähelle raakavesien arvoa. (30/70) -sementin vesien alumiinipitoisuus on alussa korkein arvoissa 0,21 ja 0,23 mg/l mutta se laskee lopulta raakavesien arvoihin. Kaikki Keminmaan vesien alumiinipitoisuudet ovat arvioissa 0,03 mg/l

4.8 Liuennut orgaaninen hiili

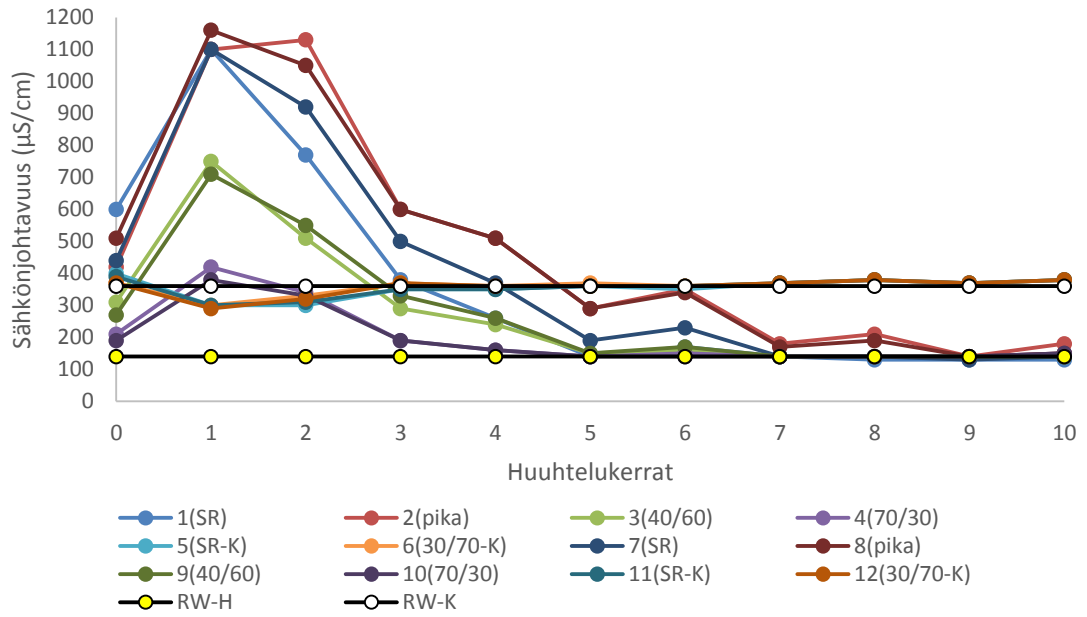
Liuenneen orgaanisen hiilen määrä kasvaa kaikissa vesissä raakavesiin verrattuna (taulukko 12). Huomataan myös, että sementit, joissa on 70% kuonaa, liuottavat hieman enemmän orgaanista hiiltä, kuin muut sementit. Keminmaan raakavedessä on enemmän liuennutta orgaanista hiiltä, kuin missään Helsingin testivesissä. Helsingin veden suurin DOC arvo oli 3,1 mg/l, joka oli (30/70) -betoniseoksesta tehdyn betonipalan testivedessä. Keminmaan raakaveden DOC oli taas 3,9 mg/l. Keminmaan vesiin liuenneen orgaanisen hiilen määrän kasvu on myös suurempi, kuin Helsingin vesissä.

Taulukko 12. Viimeisen huuhteluveden DOC- arvot.

Betonipala	DOC (mg/l)
RW-H	2
1(SR)	2,6
7(SR)	2,7
2(pika)	2,6
8(pika)	2,6
3(60/40)	2,5
9(60/40)	2,7
4(30/70)	2,9
10(30/70)	3,1
RW-K	3,9
5(SR-K)	4,9
11(SR-K)	5
6(30/70_K)	5,1
12(30/70_K)	5,3

4.9 Sähkönjohtavuus

Helsingin vesien sähkönjohtavuus käyttäytyy samalla tavalla, kuin niiden pH (kuva 11). Järjestyskin on sama. Aluksi sähkönjohtavuus nousee rajusti alussa, kunnes se alkaa hitaasti laskeutumaan kohti raakavesien arvoja. Toisin kuin pH-arvoissa, nämä arvot laskevat raakaveden tasolle jo viimeistään huuhtelukerralla 7. Parhaimmillaan sähkönjohtavuuden arvot nousevat 1160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ joka on moninkertainen raakaveden 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ -arvoon nähden. Keminmaan vesien sähkönjohtavuus muistuttaa taas alkaliteettiä. Aluksi se on vähän alle raakaveden arvon mutta nousee nopeasti sen tasoille mutta ei mene koskaan sen yli.



Kuva 11. Sähkönjohtavuuden muutokset eri huuhteluilla ja raakavesien arvot.

4.10 Betonipalasten paino

Ennen kokeen aloitusta, siinä käytetyt koepalat punnittiin vaa'alla. Kokeen jälkeen koepalojen annettiin kuivua noin vuorokausi huoneen lämmössä, joka on noin 21 °C, jonka jälkeen ne punnittiin uudestaan. Erotus on laskettu vähentämällä paino kokeen jälkeen painosta ennen koetta.

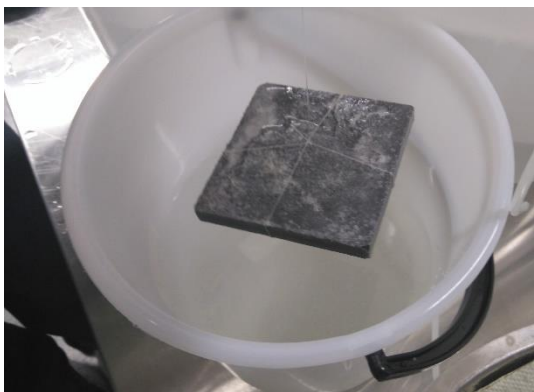
Kaikki painojen erotukset ovat negatiivisia (taulukko 13). Tämä tarkoittaa, että kaikki kokeessa olleet betonipalat saivat massaa kokeen aikana. Painon lisääntyminen on kaikilla paloilla alle 2,5%. Huomataan myös, että samasta sementtikoostumuksesta tehdyissä betonipalojen painoissa on eroja, vaikka ne kaadettiin samankokoisiin muotteihin. Myös nähdään, että kokeissa olevien kaksoiskappaleiden painoissa ja painon erotuksissa on eroja. Kemin vesissä uppoutuneena olevat betonipalaset saivat enemmän painoa, kuin Helsingin vesissä olleet betonipalat.

Taulukko 13. Betonipalasten painon vertaus ennen ja jälkeen kokeen.

Betonipala	Paino ennen koetta (g)	Paino kokeen jälkeen (g)	Erotus (g)
1(SR)	134,12	135,33	-1,21
7(SR)	134,06	135,04	-0,98
2(pika)	150,56	152,19	-1,63
8(pika)	147,09	147,56	-0,47
3(60/40)	142,75	143,76	-1,01
9(60/40)	150,5	151,12	-0,62
4(30/70)	139,52	141,22	-1,7
10(30/70)	141,51	143,6	-2,09
5(SR-K)	128,32	131,3	-2,98
11(SR-K)	138,4	140,87	-2,47
6(30/70_K)	134,94	137,3	-2,36
12(30/70_K)	147,15	149,35	-2,2

4.11 Sakan muodostuminen

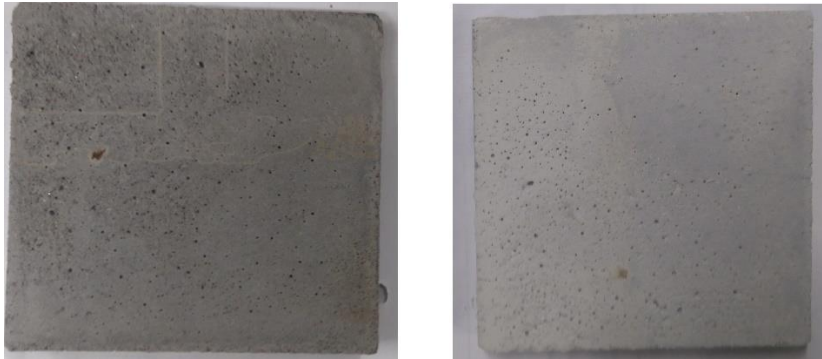
Kokeen aikana huomattiin, että betonipalojen ja kokeessa käytettyjen ämpärien pinnoille muodostui valkoinen sakka. Jo ensimmäisen vuorokauden jälkeen kokeen aloittamisesta, Keminmaan vedessä olevien SR-sementistä tehtyjen betonipalojen pinnalla nähtiin valkoista sakkaa (kuva 12). Kyseisten sankojen vesi oli myös muita sameampaa.



Kuva 12. Valokuva betonipalassa olevasta sakasta.

Muissa betonipaloissa ei samaan aikaan näkynyt kyseistä sakkaa. Kun betonipalojen upottaminen vesissä päättyi, voitiin kaikissa paloissa nähdä valkoista sakkaa kaikilla pinnoilla. Kuvassa y voidaan nähdä esimerkki kyseisestä sakasta. Kuvassa y on ennen ja jälkeen vertailu samasta betonipalasta. Kuvassa 6 oleva betonipala on sangosta 9.

Betonipala on (60/40) -sementtisuhteesta tehty ja sangon vesi oli peräisin Helsingistä. Kuvan y vasen betonipala on ennen kokeen aloitusta ja oikea betonipala on kokeen jälkeen sama betonipala, joka on kuivanut vuorokauden noin 21 °C lämpötilassa.



Kuva 13. Saman betonipalan pinnan vertaus ennen ja jälkeen koetta.

Kokeen jälkeen huomattiin myös, että kaikissa kokeissa käytetyissä sangoissa oli valkoista sakkaa. Tätä sakkaa oli erityisesti sangon pohjalla mutta sitä oli myös reunoilla pohjasta siihen korkeuteen, missä veden pinta oli ollut (kuva 14). Pohjalla oleva sakka ei ole yhtenäinen, vaan siinä nähdään kohtia, joissa sangon muovipohja näkyy. Nämä jäljet tulivat, kun sangossa olevaa vettä sekoitettiin lasisauvalla kokeen aikana.



Kuva 14. Valokuva kokeessa olevan muovisangon sakasta.

Sakan muodostuminen astiaan, jossa betonipala oli upotettu veteen, tapahtui myös Clarkin työssä (2009:32). Siinä myös arvoitiin, että sakka olisi kalsiumkarbonaattia. Koska muovisankoon muodostui sakkaa, jota ei muodostuisi vesijohtoputken sisällä,

sisältäisi putken läpi menevä vesi enemmän kalsiumia ja sen alkaliteetti olisi korkeampi, kuin tämän kokeen tuloksissa. Tämä vaikuttaisi vain tuloksiin, jonka aikana sakka muodostui ja sen jälkeen tällä ei pitäisi olla vaikutusta.

4.12 Muut tulokset

pH:ta mitatessa mitattiin myös veden lämpötilaa. Joka mittauskerralla veden lämpötila oli 21-22 °C, joka on myös lähellä huoneen lämpötila. Vesien välinen lämpötilaero oli maksimissaan 0,2 °C. Vesistä mitattiin myös vapaa kloori. Kaikissa mittauksissa sen arvot olivat <10 mg/l.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Testissä simuloitiin olosuhteita, mitä voisi olla tietyissä vesijohtosysteemeissä. Näihin kuuluu fyysiset järjestelyt, jotka yrittävät vastata isompaa vesijohtoputkea, jota huuhdellaan vesiannoksilla. Kokeeseen otettiin mukaan kaksi eri vettä, joiden alkaliteetti oli joko hyvin matala tai hyvin korkea. Tämä ominaisuus on sementtilaastipinnoitetun putken vapaan kalkin liukoisuuteen vaikuttavin tekijä. Kahdella eri vedellä tarkasteltiin, kuinka suuri ero tulevan veden alkaliteetillä on sementtilaastipinnoitteen kalkin liukoisuuteen.

Aiheeseen tutustumisen jälkeen arvioitiin, että veden pH-arvo, alkaliteetti ja kalsiumpitoisuus nousisivat, kun vesi on kontaktissa uuteen betoniin. Aiempien tutkimusten perusteella arvioitiin myös, että betoni, joka sisältää masuunikuonaa, nostaa kontaktissa olevan veden pH:ta vähemmän. Kokeesta saatu data kertoo, että kokeesta saadut tulokset olivat linjassa alkuperäisten arvioiden kanssa. Alussa pH-arvot nousivat rajusti, jonka jälkeen ne alkoivat laskeutua hitaasti. Veden pH-arvot voivat olla normaalia korkeampia vielä viikkojenkin jälkeen. Kaikki matalan alkaliteetin vesien pH:t käyttäytyivät samalla lailla mutta kuonaa sisältävät betonit nostivat veden pH-arvoa vähemmän kuin vain sementtiä sisältävät betonit. Mitä enemmän kuonaa oli betonissa, sitä vähemmän pH nousi. Tämä tarkoittaa sitä, että betonin kalkki, joka nostaa veden pH-arvoa on peräisin sementistä. Masuunikuonassa ei ole kyseistä vapaata kalkkia, joten veden pH ei nouse niin paljoa, kun sitä on sekoitettu sementin sijasta. SR-sementin veden pH-arvot olivat alhaisemmat, kuin pikasementin veden.

Isoin ero pH:ssa oli kuitenkin eri vesien välillä. Keminmaan veden, jonka alkaliteetti oli paljon korkeampi kuin Helsingin veden, pH-arvot olivat paljon matalampia kuin Helsingin vesien pH-arvot. Ne myös laskivat paljon nopeammin. Kokeen lopussa tai ennen sitä Kemin vedet sekä Helsingin vedet, joiden betonissa oli kuonaa, saavuttivat suositetun pH-arvon, joka on alle 9,5 (STM 2015). Vain (30/70) -sementti Helsingin vesistä saavutti lopussa 8,5 pH:n rajan. Muita betoneita pitäisi huuhdella vielä enemmän, että niiden pH-arvot tippuisivat niin alas. Betonit, joissa oli vain sementtiä, jäivät sen yläpuolelle.

Jos sementtilaastipinnoitettujen teräsputkien huuhteluveden pH:ta ja samalla huuhteluaikaa halutaan vähentää, masuunikuonaa sisältävien sementtien käyttö on

suositeltavaa. Mitä enemmän sementtiä korvaa masuunikuonalla, sitä paremman tuloksen saa pH:n ja huuhteluajan suhteen. Tämä koskee varsinkin matalan alkaliteetin vesiä, joissa huuhteluajat ovat pitkiä ja pienikin vähennys pH-arvoon voi vähentää huuhteluaikaa huomattavasti. Korkean alkaliteetin vesissä masuunikuonaa sisältävät sementit ovat parempia, kuin Portland-sementti mutta siellä huuhteluajat ovat niin paljon lyhyempiä, että vaikutus on paljon pienempi, varsinkin jos putkia pitää huuhdella kauemmin jonkin muun syyn takia.

Kokeessa huomattiin myös se, että veden pH nousi vielä viiden vuorokauden upotuksen jälkeen. Milloin betonipalat ovat olleet upoksissa viisi vuorokautta, on vesien pH aikaisempia mittauksia korkeampi, vaikka muuten pH on laskenut muiden mittausten välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että betonista liukenee kalsiumhydroksidia veteen, vaikka betoni on ollut upoksissa samassa vedessä kauemman aikaa. Tämä voisi ottaa huomioon huuhtelussa siten, että huuhteluvettä voi viedä putken läpi hitaammin tai jopa jättää sitä sinne joksikin aikaa. Tällöin vapaa kalkki liukenee betonista huuhteluveteen mutta käytetyn veden määrä olisi pienempi. Tällöin veden pH olisi hitaamman huuhteluajan normaalia korkeampi mutta se normalisoituisi, kun vettä viedään putken läpi normaalilla nopeuksilla.

Matalan alkaliteetin vesissä betonista aineiden liukeneminen myös nostaa veden alkaliteettiä. Suurimmillaan alkaliteetti nousi 4 mmol/l. Helsingin vesien alkaliteetti nousi aluksi hyvin paljon, kunnes se laski raakaveden arvoihin. Kuonaa sisältävien betonien vesien alkaliteetti nousi alussa paljon vähemmän, kuin puhtaasti sementistä tehdyn betonien vedet. Ne laskeutuivat raakaveden arvoihin myös paljon nopeammin. Tämä täsmää vesien pH:n nousuun.

Korkean alkaliteetin vesissä alkaliteetti laski alussa jopa 0,8 mmol/l. Kahden huuhtelukerran jälkeen se kuitenkin nousi raakaveden arvoihin mutta ei koskaan noussut sen yli. Eli sementtilaastipinnoite putkessa tuskin nostaa korkean veden alkaliteettiä sen alkuperäisen alkaliteetti-arvoa korkeammaksi. Alkaliteetillä ei ole sallittua raja-arvoa (STM 2015). Putkien huuhtelun suhteen veden alkaliteetin haluttaisiin pysymään mahdollisimman korkealla, jolloin pH-arvo ei nousisi niin paljon.

Kalsiumpitoisuus matalan alkaliteetin vedessä nousi jopa 68 mg/l Helsingin raakaveden arvosta 18,7 mg/l. Kaikkien Helsingin vesien kalsiumpitoisuus nousi alussa. Taas kuonattomien betonien arvot olivat huomattavasti korkeampia kuin betonien, joissa oli

kuonaa. Kuudennen huuhtelukerran jälkeen kaikki arvot olivat hyvin lähellä raakaveden arvoja. Tällöin korkein ero oli 6 mg/l.

Korkean alkaliteetin vesissä veden kalsiumarvot käyttäytyivät erillä tavoin. SR-sementin veden nousi alussa noin 10 mg/l, jonka jälkeen se laskeutui raakaveden arvoon 39 mg/l. Kuonaa sisältävän sementin veden kalsiumpitoisuus taas laski alussa 25 mg/l. Tämän jälkeen se nousi raakaveden arvoon.

Kaikkien vesien kalsiumpitoisuus oli jossakin vaiheessa alhaisempi, kuin vastaavan raakaveden pitoisuus. Tämä tarkoittaa, että silloin kokeessa sakan muodostumiseen kului vedestä enemmän kalsiumia, mitä betonista liukeni veteen. Pitää ottaa huomioon, että kokeessa sakkaa muodostui betonipalasten pintojen lisäksi myös koeastioihin. Itse putkessa ainoa pinta kosketuksissa veteen on vain sementtilaastipinnoite. Tämä tarkoittaa sitä, että oikeassa tilanteessa sakkaa ei muodostu yhtä paljon, jolloin veden kalsiumpitoisuus ja alkaliteetti voivat olla korkeammat. Kalsiumpitoisuudella ei ole raja-arvoa juomavesissä (STM 2015).

Koska kalsiumpitoisuutta vedessä ei mitattu joka huuhtelukerralla, yritettiin laskemalla katsoa, voidaanko kalsiumpitoisuutta arvioida, kun sitä ei ole mitattu. Tällöin oltaisiin voitu laskea, kuinka paljon jokaisesta betonista on liuennut kalsiumhydroksidia veteen. Näitä voitaisiin sitten verrata keskenään ja nähdä lopullisesti, kuinka paljon parempia masuunikuonasementit ovat verrattavissa Portland-sementtiin. Tällöin oltaisiin myös voitu tehdä arvioita, kuinka paljon kalsiumhydroksidia betoneista liukenesi eri veden alkaliteeteilla. Kalsiumpitoisuuden arvoiminen pH:ta käyttäen ei sovi tähän kokeeseen, koska tarkka arviointi on mahdollista vain yli 11 pH-arvoilla. Vesien pH ovat näin korkeita vain kokeen alussa, joten suurinta osaa kokeesta ei voida tarkoin arvioida.

Alkaliteettiäkään ei voitu käyttää tarkkaan arviointiin. Tavoitteena oli saada lasketut arvot 20 % etäisyydelle mitatuista arvoista mutta tämä ei onnistunut. Tällöin tämä keino ei ole hyvä arvioimaan veden kalsiumpitoisuuksia. Kun alussa alkaliteetit olivat korkeat, oli lasketut kalsiumpitoisuudet todellisuutta paljon korkeammalla. Tämä tarkoittaa sitä, että erityisesti alussa betonista liukenee muitakin aineita, jotka nostavat veden alkaliteettiä. Huomattiin myös, että välillä alkaliteetti ja kalsiumpitoisuudet voivat olla raakaveden arvojen alapuolella, kun toinen on taas yläpuolella. Tämä tarkoittaa, että alkaliteetillä ja kalsiumpitoisuudella ei ole täysin suoraviivainen suhde.

Vesien kovuudet käyttäytyivät samalla tavoin, kuin vesien kalsiumpitoisuudet. Tämä osoittaa, että tässä tilanteessa kovuuden muutosta hallitsee kalsiumpitoisuuden muutos ja magnesiumia liukenee suhteessa niin vähän, että se ei näytävästi vaikuta kovuuden arvoihin. Suurimmillaan molempien vesien kovuus nousi arvoon 2,2 mmol/l.

Matalan alkaliteetin vesissä betonista liukeni veteen huomattava määrä alumiinia. Aluksi korkean määrän masuunikuonaa sisältävästä betonista liukeni yli 0,2 mg/l alumiinia veteen. Tämä määrä kuitenkin laski huomattavasti kuudenteen huuhtelukertaan mennessä. Pikasementin veden alumiinipitoisuus taas alkoi matalana mutta nousi yli 0,2 mg/l kuudennella huuhtelukerralla. Se laski vähän sen jälkeen. SR-sementistä liukeni veteen alumiinia vain hyvin pieni määrä, joten sulfaatinkestävyys sementissä todennäköisesti myös vähentää alumiinin liukenemistä. Korkean alkaliteetin vesien alumiinipitoisuus ei noussut ollenkaan, joten veden alkaliteetti näyttää vaikuttavan sen kykyyn liuottaa betonista alumiinia. Viimeisellä huuhtelukerralla kaikkien vesien alumiinipitoisuus oli alle sallitun rajan, joka on 200 µg/l tai 0,2 mg/l (STM 2015). Matalan alkaliteetin vesissä kannattaa veden alumiinipitoisuus tarkistaa, jos putkia on huuhdeltu vain vähän aikaa ennen käyttöön ottoa. Jos putkia huuhdellaan, kunnes pH on laskeutunut hyväksytylle tasolle, on alumiininkin pitoisuudet tippuneet raja-arvojen alapuolelle. SR-sementin käyttö on myös suositeltua, koska siitä näyttää liukenevan alumiinia vähän.

Kaikista testatuista betoneista liukeni veteen liuottunutta orgaanista hiiltä. Helsingin vesissä korkein arvo oli 3,1 mg/l ja Kemin vesissä korkin arvo oli 5,3 mg/l. Kuonaa sisältävistä betonit nostivat DOC:ä vähän enemmän kuin kuonattomat betonit. Korkean alkaliteetin veden DOC nousi enemmän kuin matalamman alkaliteetin veden. Vaikka Helsingin veden hiilen määrä nousi, on se silti korkeimmillaankin Kemin veden alhaisimman arvoa pienempi. Orgaaninen hiili vedessä ei ole sellaisenaan terveydelle vaarallista mutta se voi tuoda veteen väriä sekä makua ja se voi vähentää definoitkemikaalien tehoa (Keinänen-Toivola et al. 2007:38). Suomessa juomaveden DOC-arvolle ei ole asetettu raja-arvoa. (STM 2015).

Kaikki sähkönjohtavuuden arvot olivat huomattavasti sallitun rajan alapuolella, joka on 2500 µS/cm. Korkein mitattu sähkönjohtavuuden arvo oli alle puolet raja-arvosta. Tällöin betonoitujen putkien liukeneminen ei aiheuta vedenlaadulle ongelmia sähkönjohtavuuden suhteen. Kuonaa sisältävien betonien vesien sähkönjohtavuudet

eivät nousseet yhtä korkealle, kuten kuonaa sisältämättömien betonien sähkönjohtavuudet. Ne myös laskivat nopeammin. Korkean alkaliteetin vesien sähkönjohtavuus käyttäytyi, kuin niiden alkaliteetti. Ne ensin laskivat vähän ja nopeasti nousivat raakaveden arvoihin. Tämä osoittaa, että tässä tilanteessa veden sähkönjohtavuuden ja alkaliteetin välillä on korrelaatio.

Ennuste oli, että betonipalasten paino putoaisi hieman, koska siitä liukenee aineita veteen. Kaikkien betonipalojen massa kuitenkin nousi hieman. Tämä voi johtua mahdollisesti niiden pintaan muodostuneesta sakasta, tai betonin poreisiin imeytyneestä kalsiumkarbonaatista. Huokosiin on voinut myös jäädä vettä. Betonin koostumuksella tai vedellä ei ollut vaikutusta veden lämpötilaan tai vapaan kloorin määrään vedessä.

6 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin kalsiumhydroksidin liukenemista betonista veteen. Tarkemmin sanottuna vaikuttaako sementin koostumus betonissa kalsiumhydroksidin liukenemiseen ja samalla pienempään pH:n nousuun. Työn laboratorioskoe toimi odotetusti ja se näytti, että masuunikuona sementissä vähentää kalsiumhydroksidin liukenemista veteen ja samalla pienentää veden pH:ta ja huuhtelu-aikaa. Samalla näytettiin, että masuunikuona rajoittaa myös alkaliteetin, kalsiumpitoisuuden ja kovuuden nousua vedessä, jotka ovat kaikki kalsiumhydroksidin liukenemisen seurauksia. Kokeesta myös nähtiin, että veden alkuperäisellä alkaliteetilla oli suurempi vaikutus liukenemiseen, kuin betonin koostumuksella. Veden valmiiksi korkea alkaliteetti johti pienempiin veden pH-arvoihin ja vielä lyhyempään huuhteluun. Työssä mitattiin myös veden alumiinipitoisuutta, liuenutta orgaanista hiiltä ja sähkönjohtavuutta mutta ne eivät ylittäneet raja-arvoja, varsinkin jos putkea huuhdellaan pH:n laskemiseksi.

Työssä yritettiin myös arvioida liuenneen kalsiumin ja samalla kalsiumhydroksidin määrää eri huuhtelukerroilla. Näitä arviointeja yritettiin tehdä veden pH:n ja alkaliteetin pohjalta oletuksilla, että niiden nousu johtuu ainoastaan kalsiumhydroksidin liukenemisestä. Tällöin voitaisiin laskea liuenneen kalsiumin määrä niissä huuhteluissa missä niitä ei mitattu ja voitaisiin laskea jokaiselle betonille liuenneen kalsiumhydroksidin kokonaismäärä ja niitä voitaisiin verrata keskenään. Kummallakaan keinolla ei kuitenkaan saatu tarpeeksi tarkkoja tuloksia, että liuenneen kalsiummääriä kannattaisi arvioida niissä huuhteluissa, jossa kalsiumin määrää ei mitattu. Samalla huomattiin, että veden alkaliteetti ja sen kalsiumpitoisuus ei kulje käsi kädessä ainakaan koetilanteessa.

Kokeen aikana myös huomattiin, että betonista liukenee veteen kalsiumhydroksidia vielä neljänkin vuorokauden jälkeen, tarkoittaen sitä, että betonista vapaan kalkin poistamiseen ei huuhtelutilanteessa tarvitse välttämättä vetää vettä läpi suurilla nopeuksilla. Tulevana tutkimusmahdollisuutena voisi olla kokeilu, jossa mitataan, kuinka paljon ja kuinka nopeasti vettä kannatta vetää betonoidun vesiputken läpi huuhtelussa

LÄHDELUETTELO

1352/2015. 2015. Sosiaali- ja terveysministeriön (STM) asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista.

Ahma ympäristö Oy. 2018. Vesinäytteet. Saatavilla: <http://www.suomenymparistopalvelu.fi/index.php?p=Vesinaytteet> [10.5.2018]

American Water Works Association (AWWA). 2000. AWWA Standard for Cement-Mortar Lining of Water Pipelines in Place 4 in. (100 mm) and Larger. 34 s.

Bonds R. W. 2005. Cement-Mortar Lining for Ductile Iron Pipe. DIRPA. Saatavilla: <https://www.dipra.org/ductile-iron-pipe-resources/technical-publications/hydraulics?download=17:cement-mortar-linings-for-ductile-iron-pipe> [14.5.2018]

California Water Boards. 2018. Drinking Water Labs Alkalinity Conversion. Saatavilla: https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/documents/drinkingwaterlabs/AlkalinityConversions.pdf [20.6.2018]

Cantor A. 2018. Water Distribution System Monitoring. Boca Raton: CRC Press. 165 s.

Clark D. D. 2009. Water quality, aesthetic and corrosion inhibitor implications of newly installed cement mortar lining used to rehabilitate drinking water pipelines, Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.

Douglas B. D., Merrill D. T. ja Catlin J. O. 1996. Water quality deterioration from corrosion of cement-mortar linings. American Water Works Association Journal, 88.7: 99.

Finnsementti. 2018. Suomalainen sementti. Saatavilla: http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS_Suomalainen_sementti_kirjanen_071112.pdf [24.6.2018]

Kekki T. K., Keinänen-Toivola M. M., Kaunisto K. ja Luntamo M. 2007. Talousveden kanssa kosketuksissa olevat verkostomateriaalit suomessa. Turku: Vesi-instituutti, 101 s.

Keinänen-Toivola M. M., Ahonen M. H. ja Kaunisto T. 2007. Talousveden laatu suomessa vuonna 1984-2006. Turku: Vesi-instituutti, 107 s.

Kirmeyer G. J. 2000. Distribution System Water Quality Changes Following Corrosion Control Strategies. American Water Works Association. 335 s.

Mays L. W. 2000. Water Distribution System Handbook. McGraw-Hill. 912 s.

Meland I. S. 1999. Durability of Mortar Linings in Ductile Iron Pipes. Durability of Building Materials and Components 8. Institute for Research in Construction, Ottawa ON, K1A 0R6, Canada, 170-179.

Młyńska A., ja Zielina M. 2017. The influence of prefabricated pipe cement coatings and those made during pipe renovation on drinking water quality. E3S Web of Conferences 17, 00061

Młyńska A., Zielina M. ja Żaba T. 2015. Experimental Research on Deterioration of Drinking Water Quality After Cement Mortar Pipe Lining. Technical Transactions, 4-B: 147-151

Ong T. C. ja Wong S. F. 2018. Leaching of Cement Lining in Newly-Laid Water Mains (part II). Singapore: Nanyang Technological University. Saatavilla http://www3.ntu.edu.sg/eee/urop/congress2003/Proceedings/abstract/NTU_CEE/Ong%20Tuan%20Chin.pdf [10.5.2018]

Pelto-Huikko A. ja Kaunisto T. 2012. Vesijohtojen saneerauspinnoitus. Vesi-instituutin raportteja 4.

Pietilä P., Katko T., & Kurki V. 2010. Vesi kuntayhteistyön voiteluaineena. Kunnallisan kehittämissäätiön tutkimusjulkaisut: 109 s.

Rockaway T. D. ja Ball R. T. 2007. Guidelines to Minimize Downtime During Pipe Lining Operations. American Water Works Association. 138 s

SFS-EN 197-1. 2000. Sementti. Osa 1: Tavallisten Sementtien Koostumus, Laatuvaatimukset Ja Vaatimustenmukaisuus: 26 s.

SFS-EN 10298. 2005 Onshore- Ja Offshore-Putkistoissa Käytettävät Teräsputket Ja Putkenosat. Sisäpuoliset Sementtilaastipinnoitteet: 11 + 14 s.

Silferberg P. 2017. Vesihuollon suuntaviivat 2020-luvulle. Helsinki: Vesilaitosyhdistys. 42s. Saatavilla:
https://valtioneuvosto.fi/documents/1410837/1516651/Vesihuollon+suuntaviivat+2020-luvulle_final_20170622.pdf/cb687a80-dd57-4733-88c7-f3962e4bf9f4 [17.6.2018]

U.S Environmental Protection Agency (EPA). 2002. Permeation & Leaching. Saatavilla:
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/permeationandleaching.pdf> [20.5.2018]

Twort A. C., Ratnayaka D. D., & Brandt M. J. 2000. *Water supply*. London: Arnold/IWA Pub. 677 s.

Zielina M., Dabrowski W. ja Radziszewska-Zielina E. 2014. Cement mortar lining as a potential source of water contamination. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering, 8(10), 723-726.