

Master's Programme in Water and Environmental Engineering

Betonikorroosio vesihuollon allasrakenteissa

Syyt, seuraukset ja ratkaisut

Nina Poutanen

Copyright ©2023 Nina Teresa Poutanen

Tekijä Nina Poutanen

Työn nimi Betonikorroosio vesihuollon allasrakenteissa: syyt, seuraukset ja ratkaisut

Koulutusohjelma Master's Programme in Water and Environmental Engineering

Pääaine Vesi- ja ympäristötekniikka

Vastuuopettaja/valvoja Prof. Anna Mikola

Työn ohjaaja(t) Prof. Jouni Punkki, TkT Risto Mannonen

Päivämäärä 24.04.2023 **Sivumäärä** 71+3 **Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Erilaiset vedenpuhdistusprosessit ja veden vaihteleva laatu ovat mahdollisia korroosion aiheuttajia vedenpuhdistuslaitosten ja jätevedenpuhdistamoiden betonissa allasrakenteissa. Allaskorroosion ongelmia, esimerkiksi kiviaineksen kertymistä prosessialtaan pohjalle, on viime vuosina tullut esille jätevedenpuhdistamoilla. Allaskorroosio johtaa ongelmiin prosessissa ja laitteistojen toiminnassa, vaikutusten torjuminen taas aiheuttaa ylimääräisiä huoltokatkoja ja kustannuksia. Tavallisesti betonirakenteet mitoitetaan 50...100 vuoden käyttöiälle, minkä takia on tärkeää selvittää korroosion syyt ja siihen vaikuttavat seikat jo laitoksen suunnitteluvaiheessa. Näitä ovat esimerkiksi saostuskemikaalien käyttömäärä ja betonin rasisluokkayhdistelmä.

Prosessivedessä korroosioriskejä voivat aiheuttaa veden vaihteleva happamuus, ammoniumin, kloridin ja aggressiivisen hiilidioksidin konsentraatiot sekä rautapohjaisten saostuskemikaalien käyttö. Prosesseissa puolestaan vaihtelevat esimerkiksi hapellinen ja hapeton olosuhde sekä niissä tapahtuvat biokemialliset reaktiot. Suomessa ja Pohjoismaissa raakavesi on tyypillisesti pehmeää. Talousveden laatu heijastuu jäteveteen, joten on tärkeää käsitellä Pohjoismaita erityisryhmänä, vaikka allaskorroosiota on tutkittu myös muualla Euroopassa.

Diplomityössä selvitettiin korroosion kannalta oleellisia betonin ominaisuuksia. Vedenkäsittelyprosessien erityispiirteisiin perehdyttiin esittelemällä raaka- ja jäteveden laadun sekä vedenpuhdistus- ja jätevedenkäsittelyprosessien yhteyttä allasrakenteiden korroosioriskeihin. Työssä arvioitiin nykyisiä suunnitteluohjeita ja esiteltiin tapausesimerkkejä vesilaitoksilta. Kirjallisuuskatsauksen tukena haastateltiin vesilaitoksien edustajia, prosessialtaita suunnittelevia konsultteja sekä urakoitsijoita tilannekuvan muodostamiseksi.

Toteutettu diplomityö toimii tietolähteenä vesihuoltolaitoksille, suunnittelijoille ja betoniteollisuudelle prosessiolosuhteiden säätöjen ja betonilaatujen valinnassa. Nykyaikaisten käsittelyprosessien vaikutukset korroosioriskeihin tulisi ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Vesilaitosten edustajat toivoivat suunnitteluun käytännön kokemusta ja kykyä soveltaa säädöksiä vesilaitoksen kaltaisessa erityisrakentamiskohteessa. Vaihtoehtona nähtiin altaiden pinnoitus, joka arvioitiin toimivaksi ja edulliseksi ratkaisuksi. Pinnoittamisen lisäksi kussakin tapauksessa on kuitenkin selvitettävä korroosion juurisyyt.

Avainsanat jätevedenkäsittely, betoni, korroosio, suunnittelu, betonirakentaminen

Author Nina Poutanen

Title of thesis Concrete Corrosion in Water Treatment Plants: Origin, Effects and Solutions

Programme Master's Programme in Water and Environmental Engineering

Major Water and Environmental Engineering

Thesis supervisor Prof. Anna Mikola

Thesis advisor(s) Prof. Jouni Punkki, D.Sc. (Tech) Risto Mannonen

Date 24.04.2023 **Number of pages** 71+3 **Language** Finnish

Abstract

Advanced water treatment processes and variations in water quality may cause stress and deterioration to the concrete structures in municipal wastewater treatment plants. In addition to hydrogen sulphide corrosion, well known in the context of sewage networks, other corrosion mechanisms such as carbonisation caused by aggressive carbon dioxide have been identified but not yet extensively studied. The effects of corrosion may cause additional maintenance breaks and related costs. The concrete structures are usually designed to operate from 50 to 100 years, and therefore care should be taken in selecting the type of concrete to be used. The use of suitable additives in the concrete mix should also be considered both for improved chemical properties and as a replacement of high-carbon cement.

Varying water quality parameters, such as pH, alkalinity and the concentrations of ammonium, chloride, and aggressive carbon dioxide, are associated with the corrosion of concrete structures. Furthermore, oxic and anoxic conditions and biochemical reactions vary in the treatment basins. The water bodies used for drinking water production in the Nordics typically provide soft and low-alkaline water, which should be considered when selecting cementitious products especially for drinking water production. That is why it is important to do research as a Nordic co-operation.

In the Master's Thesis, the properties of concrete relevant to corrosion were investigated. The water treatment processes were discussed by introducing the quality parameters of raw water, wastewater, and the treatment processes that cause corrosion risks in the treatment basins. The thesis commented on the current design guidelines and presented case examples from selected water utilities. Besides the literature review, representatives of water utilities, process basin designers, and contractors were interviewed to summarise the present state.

The thesis serves as a reference for water treatment facilities, designers, and the concrete producing industry in the selection of process conditions and concrete types. The effects of modern treatment processes on the corrosion risks could be well examined in the planning phase. The water utility representatives called for practical experience and the ability to apply the regulations in such specialised construction sites. Coating of the basins was seen as a functional and affordable option. However, the root causes of the corrosion must be determined in each case.

Keywords wastewater treatment, concrete, corrosion, deterioration, designing, concrete construction

Sisällys

Esipuhe	7
Merkinnät ja lyhenteet.....	8
Sementtikemian merkinnät	9
1 Johdanto	10
2 Betonin ominaisuudet ja rasitusmekanismit.....	13
2.1 Betonimassan koostumus	13
2.1.1 Sementti.....	13
2.1.2 Vesi ja mineraalien hydrataatioreaktiot	15
2.1.3 Kiviaines	16
2.1.4 Seosaineet, lisäaineet ja kuidut	16
2.2 Kovettuneen betonin kestävyysominaisuudet	18
2.3 Betonirakenteisiin kohdistuva rasitus	19
2.3.1 Fysikaaliset rasitusmekanismit	20
2.3.2 Kemialliset rasitusmekanismit.....	21
2.3.3 Rakenteisiin kohdistuva biologinen rasitus.....	24
2.4 Betonin käyttöikäsuunnittelu ja rasitusluokat	25
2.5 Keinot betonin korroosion ehkäisemiseksi	28
2.5.1 Seosaineiden käyttö betonirakenteissa	28
2.5.2 Betonirakenteessa käytettävät pinnoitteet	29
2.5.3 Korroosion tutkimus ja monitorointi.....	30
3 Vesihuollon prosessien erityispiirteet.....	31
3.1 Raakaveden laatu	31
3.2 Talousveden tuotanto.....	34
3.3 Vedenpuhdistuksen prosessit tyypillisessä pohja- ja pintavesilaitoksessa	34
3.3.1 Raakaveden tulopumppaus.....	35
3.3.2 Alkalointi- ja saostuskemikaalien lisäys	36
3.3.3 Saostus ja selkeytys	37
3.3.4 Suodatus	38
3.3.5 Jälkikäsittely.....	38
3.4 Tyypillinen jäteveden laatu Suomessa.....	38
3.5 Jätevedenkäsittelyn prosessit	40

3.5.1	Tulopumppaus ja mekaaninen esikäsittely.....	40
3.5.2	Biologinen ja kemiallinen käsittely	42
3.5.3	Mikrobiologiset prosessit biofilmeissä	43
3.5.4	Jälkiselkeyty- ja jälkikäsittelymenetelmät	44
4	Betonirakentaminen vesihuollossa.....	45
4.1	Esimerkitapauksia jätevedenpuhdistamoilta	45
4.2	Prosessialtaiden suunnittelukirjallisuus.....	47
4.2.1	Suunnittelukirjallisuuden arviointi.....	48
4.2.2	Teoksen ”by68 Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu- opas suunnittelijoille” analyysi.....	49
4.3	Asiantuntijoiden näkemyksiä allaskorroosion esiintymisestä Suomessa.....	52
4.3.1	Asiantuntijahaastattelujen tausta ja toteutus	52
4.3.2	Haastattelutulosten tiivistelmä	54
4.3.3	Johtopäätöksiä haastattelutuloksista	56
4.4	Tarvittavat jatkotutkimukset ja kehitysideat.....	57
5	Yhteenveto	60
	Lähdeluettelo	63
	Liite A. Puhdistamoiden edustajille kohdenneet haastattelukysymykset ..	72
	Liite B. Prosessialtaiden suunnittelijoille kohdenneet haastattelukysymykset.....	73
	Liite C. Urakoitsijoille kohdenneet haastattelukysymykset	74

Esipuhe

Oli hieno kokemus päästä luomaan yhteyksiä vesihuollon ja hyvän betonirakentamisen välille sekä oppimaan paljon uutta tämän diplomityön tekemisen myötä. Välillä itselleni uutta omaksuttavaa asiaa tuli pökerryttävää vauhtia, mutta nälkä vain kasvoi syödessä ja lopulta aiheesta riittäisi vielä paljon lisääkin tutkittavaa ja sanottavaa. Toivottavasti tämä diplomityö toimii inspiraationa tutkimustyön jatkumiselle aiheen ympärillä.

Tämä diplomityö sai alkunsa RIL ry:n Vesitekniikan tekniikkaryhmän käynnistämänä tutkimushankkeena, joka toteutettiin yhteistyönä Aalto-yliopiston Vesi- ja ympäristötekniikan tutkimusryhmän sekä Betonitekniikan tutkimusryhmän välillä. Lisäksi hankkeeseen osallistui HSY, Turun Seudun puhdistamo Oy, HS-vesi, Vaasan Vesi, Tampereen Seudun Keskuspuhdistamo Oy ja Vesilaitosyhdistys. Kiitos ohjausryhmälle työn viemisestä oikeaan suuntaan.

Kiitos diplomityön valvojalle professori Anna Mikolalle varmasta otteesta työn ohjauksessa. Sain vastauksia kaikkiin mieleissäni pyörineisiin kysymyksiin asiantuntevissa ja mukavissa keskusteluhetkissä. Kiitos myös ajastasi toimiessasi käytännössä kolmantena ohjaajana vesihuoltopuolen kokonaisuuteen liittyen.

Suuret kiitokset myös virallisille ohjaajilleni, professori Jouni Punkille ja tekniikan tohtori Risto Mannoselle. Huomattava kokemuksenne betonirakentamisesta oli työn edistymisen kannalta suureksi eduksi. Kiitos että jaotte laajaa tietämystä eteenpäin ja tarjositte samalla myös urainspiraatiota.

Kiitos myös kaikille haastatteluihin osallistuneille ja kyselyihin vastanneille arvokkaista mielipiteistänne ja ajastanne. Ilman teidän näkemyksiänne työ olisi jäänyt suppeaksi. Erityiskiitokset vierailumahdollisuuksien järjestämisestä haluan lähettää jätevedenpuhdistamoille (ja tulevalle puhdistamolle) Kakolanmäkeen, Paroille ja Sulkavuoreen. Oli hyvin mielenkiintoista ja silmiä avaavaa päästä välillä ruudun äärestä katsomaan käytännön toimintaa.

Kiitoksia myös perheelleni aina yhtä kannustavista kommenteista ja puolisolleni Antille kaikesta avusta ja kärsivällisyydestä.

Otaniemessä 24.04.2023



Nina Poutanen

Merkinnät ja lyhenteet

ASCE	American Society of Civil Engineers
BSA	biologinen rikkihappohyökkäys (biogenic sulfuric acid corrosion)
BOD₇	biologinen hapenkulutus
CaO_{vap}	vapaa kalkki
Ca(OH)₂	kalsiumhydroksidi
CaSO₂ · 2 H₂O	kipsi
Cl⁻	kloridi-ioni
COD	kemiallinen hapenkulutus (chemical oxygen demand)
DO	liuennut happi (dissolved oxygen)
EWRI	Environmental & Water Resources Institute
FeSO₄ · 7 H₂O	rautasulfaatti
N	typpi, kokonaistyyppi
NH₄⁺	ammoniumioni
OECD	Taloudellisen yhteistyön järjestö (Organisation for Economic Cooperation and Development)
P	fosfori
RIL	Suomen rakennusinsinöörien liitto
SDG	YK:n kestävän kehityksen tavoitteet (Sustainable Development Goals)
SOB	rikkiä hapettavat bakteerit (sulfur oxidizing bacteria)
SRB	sulfaattia pelkistävät bakteerit (sulfate-reducing bacteria)
SS	kiintoaine (suspended solids)
TS	kuiva-aine (total solids)
VS	hehkutushäviö (volatile solids)
WEF	Water Environment Federation

Sementtikemian merkinnät

C	CaO	kalsiumoksidi
S	SiO ₂	piidioksidi
A	Al ₂ O ₃	alumiinioksidi
F	Fe ₂ O ₃	rautaoksidi
M	MgO	magnesiumoksidi
H	H ₂ O	vesi
C-S-H	(CaO) _x · SiO ₂ · (H ₂ O) _y	kalsiumsilikaattihydraatti
C ₂ S	2CaO · SiO ₂	dikalsiumsilikaatti (beliitti)
C ₃ S	3CaO · SiO ₂	trikalsiumsilikaatti (aliitti)
C ₃ A	3CaO · Al ₂ O ₃	trikalsiumaluminaatti (aluminaatti)
C ₄ AF	4CaO · Al ₂ O ₃ x Fe ₂ O ₃	tetrakalsiumaluminaattiferriitti (ferriitti)

1 Johdanto

Vesihuolto kuuluu yhteiskunnan toimivuuden kannalta kriittisiin aloihin. Puhtaan veden ja sanitaation merkitystä korostetaan muun muassa Yhdistyneiden kansakuntien kestävä kehityksen tavoitteissa (engl. SDG, Sustainable Development Goals) (YK, 2022) ja Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö OECD:n julkaisemissa suosituksissa (mm. OECD, 2011). Vedenkäsittelyprosesseilla voidaan vaikuttaa talousveden ja ympäristöön laskettavan jäteveden laatuun. Yhteiskuntien mittakaavassa nämä toiminnot tapahtuvat yleensä keskitetyillä veden- ja jätevedenkäsittelylaitoksilla (Katko, 2013). Suomessa erityisesti jätevedenpuhdistamoilla on käytössä perinteinen rinnakkaissaostusprosessi, jossa orgaanisen aineksen poisto perustuu biologiseen aktiivilieteprosessiin ja fosforin poisto kemialliseen saostukseen (Karttunen, 2004). Nämä prosessit edellyttävät suuria allasrakenteita. Betoni on prosessialtaiden rakentamisessa laajasti käytetty materiaali saatavuutensa, soveltuvien ominaisuuksiensa ja kohtuullisen hintansa takia (Bennett ja Nixon, 2016).

Betoniset allasrakenteet mitoitetaan tavallisesti 50...100 vuoden käyttöiälle (Suomen Betoniyhdistys ry, 2016). Ennenaikaiset ongelmat betonin kestävyudessa aiheuttavat puhdistamoille kustannuksia ylimääräisten huoltokatkosten ja korjaustoimenpiteiden myötä. Rakenteiden pitkä käyttöikä on huomioitava laitoksen suunnitteluvaiheessa, sillä on mahdollista, että puhdistamoilla käytössä olevat puhdistusprosessit sekä veden laatu muuttuvat merkittävästi alkuperäisistä suunnitelmista. Uusia vedenpuhdistuksen tehokkuuteen liittyviä vaatimuksia kohdistetaan kansalliseen lainsäädäntöön ja puhdistamoille muun muassa EU:n suunnalta (COM/2022/541). Pitkällä aikavälillä kunnallisille puhdistamoille saapuvan jäteveden laatu taas voi muuttua muun muassa ihmisten energiansaannissa kasvavan proteiiniolosuhteen, vuotovesien hallinnan tai uuden alueellisen teollisuuden myötä. Nämä tekijät voivat vaikuttaa muun muassa laitokselle saapuvan veden tyyppikuorumaan.

Kunnianhimoisten hiilineutraaliustavoitteiden myötä viime vuosina on alettu kiinnittää yhä enemmän huomiota vesihuollon aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin. Varsinaisiin vedenkäsittelyprosesseihin liittyvät kasvihuonekaasupäästöt ovat parhaillaan aktiivinen tutkimuskohde. Vesihuoltoalan näkökulmasta tarkasteluissa usein sivuutetaan laitoksien ja verkoston rakentamisesta syntyvät päästöt. Nämä päästöt ovat kuitenkin merkittäviä rakentamisessa käytetyn betonin ja teräksen suuren määrän vuoksi. (Andersen ja Madsen, 2022). Betonin hiilijalanjäljestä suuri osa tulee sementin tuotannosta. Tavanomaista sementtiä voitaisiin osittain korvata muilla sideaineilla, mutta erilaisten sideaineiden soveltuvuudesta ja kestävydestä juuri vedenkäsittelylaitosten kaltaisissa erityisrakentamiskohteissa ei ole saatavilla järjestelmällistä tutkimustietoa. Perinteisesti puhdistamoiden rakentamisessa tärkeimpinä arvoina on pidetty laitoksen tehokkuutta, hintaa ja kestävyttä.

Muuttuvat vedenkäsittelyprosessit, prosessiveden ominaisuudet, ympäristötavoitteet ja monen suomalaisen puhdistamon lähestyvä saneerausikä tekevät ajankohtaiseksi tutkimuksen allaskorroosion esiintymisestä ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Tämä diplomityö toimii tutkimukselle alkukartoitukseksi.

Voimakkaan, usein rikkivetytaustaisen betonikorroosion esiintymistä viemäriverkostoissa on tutkittu kohtuullisen kattavasti (mm. Anwar, Liu ja Zhang, 2022), mutta allaskorroosioon keskittyvää tutkimusta on tehty vähemmän. Esimerkiksi nitrifikaatioon liittyviä rasisusmekanismeja ovat tutkineet vain muutamat tutkimusryhmät, muun muassa Sveitsissä ja Ranskassa (Bischof ym., 2010, Leemann ym., 2010a ja Lewi ym., 2020). Lisäksi Suomessa on havaittu ja tutkittu jätevedenpuhdistamolla esiintynyttä poikkeuksellisen voimakasta korroosiota ilmastusaltaissa ja erityisesti jälkiselkeytysaltaissa (Valtari, 2020). Tutkimustiedon vähäisyyden vuoksi on tarpeen kerätä tietoa korroosiotilanteesta suomalaisilla puhdistamoilla ja verrata saatua tietoa kansainväliseen aineistoon. Tietoa voidaan soveltuvin osin hyödyntää eri kokoisilla puhdistamoilla ja kansainvälisestikin esimerkiksi Pohjoismaissa.

Diplomityönä selvitettävät tärkeimmät tutkimuskysymykset ja niiden alakysymykset muotoiltiin seuraavasti:

1. Miten vedenkäsittelyprosessit, veden laatu ja betonin ominaisuudet ovat yhteydessä allasrakenteiden korroosioon?
 - Ovatko nykyiset prosessialtaiden suunnitteluohjeet ajantasaiset ja huomioivatko ne muuttuneet vedenkäsittelyprosessit?
2. Mikä on suomalaisten jätevedenpuhdistamoiden prosessialtaiden nykytila? Esiintyykö altaissa merkkejä korroosiosta?
 - Jos merkkejä korroosiosta esiintyy, millaisia ne ovat ja millä aikavälillä ne ovat syntyneet?

Tutkimuskysymyksiin pyrittiin vastaamaan kattavasti diplomityön laajuuden rajoissa. Ensimmäistä tutkimuskysymystä lähestyttiin pääasiallisesti kirjallisuuden avulla. Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli koota yhteen taustoittavaa tietoa betonin ominaisuuksista ja vedenkäsittelyn prosesseista. Lähdemateriaalina käytettiin alojen perusteoksia, ajankohtaisia tutkimusartikkeleita, soveltamisoppaita ja henkilökohtaisia tiedonantoja. Kerätyn tiedon pohjalta pyrittiin luomaan vahvempia tiedollisia yhteyksiä betonirakentamisen soveltamiseksi vedenkäsittelylaitosten suunnittelussa ja arvioimaan, ovatko nykyisissä soveltamisoppaissa esitetyt tiedot ajankohtaisia. Toiseen tutkimuskysymykseen pyrittiin vastaamaan erityisesti teemahaastattelussa kerätyn aineiston pohjalta. Työtä varten haastateltiin asiantuntijoita suomalaisilta puhdistamoilta, suunnittelutoimistoista ja rakennusurakointiyrityksistä. Haastattelujen tuloksia verrattiin kirjallisuuskatsauksen tuloksiin tarkempaa analyysia ja suositusten antamista varten.

Diplomityön toiseen ja kolmanteen lukuun on koottu pohjustavaa tietoa betonin ominaisuuksista rakennusmateriaalina sekä vedenkäsittelyn prosessien erityispiirteistä. Luku kaksi alkaa katsauksella betonin ominaisuuksiin, räsitusluokkiin ja mitoituksiin. Lisäksi esitellään mahdollisia betonin korroosiomekanismeja sekä korroosion ehkäisykeinoja. Luvussa kolme esitellään talousveden ja jätevedenkäsittelyyn liittyvien prosessien erityispiirteitä, sekä luonnehditaan prosesseissa esiintyvien vesien laatuominaisuuksia. Lukujen on tarkoitus toimia helppolukuisina tietolähteinä, ja edistää tiedonvaihtoa vesihuolto-, rakentamis- ja suunnittelualan ammattilaisten välillä.

Luvussa neljä yhdistetään ja sovelletaan aiemmissa luvuissa esitettyä tietoa ja perehdytään tarkemmin vedenkäsittelyn prosessialtaisiin betonirakentamisen erityiskohteena. Luvussa esitellään tapausesimerkkejä jätevedenpuhdistamoilla esiintyneistä korroosiotapauksista. Lisäksi luvussa arvioidaan suunnittelukirjallisuutta. Kirjallisuuskatsausta täydentävät asiantuntijahaastattelut. Luku viisi toimii työn yhteenvetona.

2 Betonin ominaisuudet ja rasmusmekanismit

Tämän työn keskiössä ovat betonista valmistetut allasrakenteet. Betoni on allasrakenteissa yleisesti käytetty materiaali hyvän saatavuutensa, soveltuvien ominaisuuksiensa ja edullisen hintansa takia (Bennett ja Nixon, 2016). Korroosion ja vaurioiden syntymekanismien arvioimiseksi sementin ja betonin perusominaisuudet tulee tuntea perusteellisesti. Tässä luvussa esitellään betonin ja sementin koostumusta ja työn kannalta keskeisiä ominaisuuksia ja rasmusmekanismeja.

2.1 Betonimassan koostumus

Betoni on komposiittimateriaali, jota voidaan yksinkertaisimmillaan valmistaa sementistä, vedestä ja kiviaineksesta kuten hiekasta tai sorasta. Betonimassan ja kovettuneen betonin ominaisuuksien parantamiseksi käytetään tavallisesti erilaisia seos- ja lisäaineita sekä kuituja. Osa-aineiden suhteita ja laatua muuttamalla eli suhteituksella voidaan vaikuttaa betonin ominaisuuksiin.

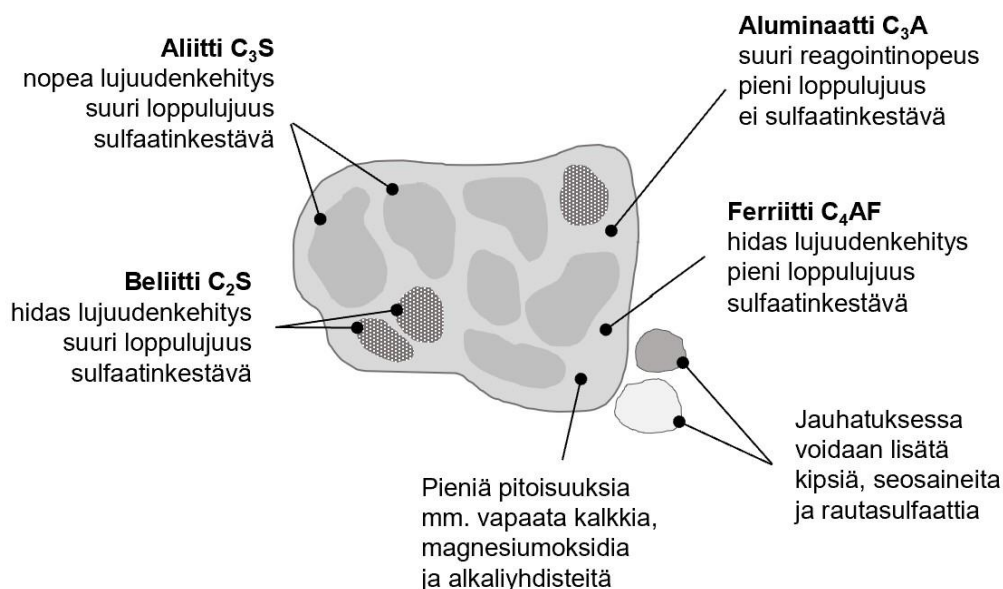
2.1.1 Sementti

Tärkein yksittäinen osa-aine betonin ominaisuuksien kannalta on sementti. Betonimassasta sen osuus on yleensä alle 10 tilavuusprosenttia. Reagoitessaan veden kanssa sementti muodostaa lujan betonikiven ja saa siten betonin kovettumaan. Suomessa sementin valmistukseen käytetään pääsääntöisesti kalkkikivestä saatavaa kalsiumkarbonaattia CaCO_3 . Lisänä käytetään kalkkikiven prosessoinnin sivuvirroista saatavaa piidioksidia (SiO_2 , sementtikemialla lyhenne S), alumiinioksidia (Al_2O_3 tai A) ja rautaoksidia (Fe_2O_3 tai F). (Mannonen 2022).

Sementtiklinkkeriä eli nystyrämäisistä mineraaleista koostuvaa materiaalia valmistetaan prosessissa, jonka pääperiaatteisiin kuuluu jauhattujen raaka-aineiden sekoittaminen halutussa suhteessa ja muodostuneen seoksen kuumentaminen. Matalammassa lämpötilassa (n. 900 °C) tapahtuu kalsinoituminen, jossa CaCO_3 hajoaa kiinteäksi kalsiumoksidiksi (CaO tai C) ja hiilidioksidiksi (CO_2). CaO on pääasiallinen komponentti tavallisimmassa Suomessa valmistetussa klinkkerissä, portlandklinkkerissä. Klinkkerimineraalit saavat lopullisen muotonsa kiertoilmauunissa tapahtuvan polton myötä. Raaka-aineet sulavat uunin korkean lämpötilan vaikutuksesta, mikä johtaa klinkkerimineraalien muodostumiseen. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018). Alla olevassa kuvassa 1 on esitetty klinkkerin rakenne sekä yleisimpiä klinkkerimineraaleja ja niiden ominaisuuksia. Mineraalien suhteita voidaan muuttaa haluttujen ominaisuuksien mahdollistamiseksi. Esimerkiksi

sulfaatinkestävässä SR-klinkkerissä on suhteellisesti vähemmän alumiinaattia (C_3A) kuin tavallisessa portlandklinkkerissä. (Juenger ym., 2011).

Klinkkerireaktioiden vaatimat korkeat lämpötilat mahdollistetaan yleensä kivihiiltä tai muita fossiilisia polttoaineita polttamalla. Tämä yhdessä hiilidioksidin muodostumisen kanssa johtaa sementin ja sitä kautta betonin korkeaan hiilijalanjälkeen, ja luovat tarpeen kehittää vähähiilisiä sementtilaatuja ja etsiä betoniin vaihtoehtoisia seosaineita sementtiä korvaamaan (Gartner, 2004).



Kuva 1. Sementtiklinkkerissä tyypillisesti esiintyviä mineraaleja ja niiden ominaisuuksia. (Mukaihen: Suomen betoniyhdistys ry, 2018, 26–28).

Varsinaista sementtiä valmistetaan jauhetusta klinkkeristä, kipsistä ja mahdollisista seosaineista. Sementtejä, joita käytetään betonin valmistukseen, tulee täyttää standardin SFS-EN 197-1 vaatimukset sekä oltava CE-merkittyjä. Standardissa SFS-EN 197-1 sementit jaetaan viiteen päälajiin:

- CEM I Portlandsementti
- CEM II Portlandseossementti
- CEM III Masuunikuonaseimentti
- CEM IV Pozzolaaniseimentti
- CEM V Seossementti.

2.1.2 Vesi ja mineraalien hydrataatioreaktiot

Betonin valmistamiseksi sementtiin sekoitetaan vettä, joka muodostaa betonimassasta noin 20 tilavuusprosentin osuuden. Lisäämällä sementtiin vettä mahdollistetaan spontaanit ja eksotermiset hydrataatioreaktiot. Monivaiheisen reaktion tärkeimmät lopputuotteet ovat amorfinen kalsiumsilikaattihydraattigeeli (C-S-H) ja kiteinen kalsiumhydroksidi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Virola ja Raivio, 2000). Kovettunutta sementtiä sanotaan sementtikiveksi, joka tuo betonille sen tärkeimmät ominaisuudet kuten puristuslujuuden ja emäksisyyden.

Hydrataatioreaktiot ovat monivaiheisia ja kompleksisia. Lisäksi tarkemmista reaktiomekanismeista on esitetty useampia vaihtoehtoisia malleja. (Virola ja Raivio, 2000). Prosessista, joka alkaa veden lisäämisestä sementtijauheeseen ja päättyy sementtiliiman kovettumiseen, voidaan kuitenkin karkeasti erotella seuraavat vaiheet (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018a):

1. Veden lisäys ja hydrataatioreaktiot, mikrorakenteen muodostuminen
2. Sitoutuminen, plastisuuden vähentyminen ja lujittumisreaktiot
3. Kovettuminen ja sementtikiven muodostuminen, varsinaiset lujittumisreaktiot ja lujuudenkehitys.

Ensimmäisinä reagoivat aluminaatit C_3A ja C_3AF . Reaktionopeutta hidastetaan kipsin lisäyksellä. Reaktiot ovat tärkeitä varhaisreaktioiden vuoksi, mutta merkittävämmiin betonin lujuudesta vastaavat aliitin C_3S ja beliitin C_2S hydrataatioreaktiot. Molemmista klinkkerimineraaleista muodostuu reaktiotuotteina sekä C-S-H-geeliä että kiteistä $\text{Ca}(\text{OH})_2$:a. Verrattaessa C_2S :n reaktionopeus on hitaampi ja C-S-H geeliä muodostuu enemmän C_3S :n hydrataatioon verrattuna. Aluksi sementtihiukkasten ympärille muodostuvat hiukkaset ovat geelimäisiä, mutta muuttavat pian sauvamaisiksi ja levymäisiksi sitoutumisvaiheen käynnistyttyä. Sitoutuminen alkaa tavallisesti portlandsementin hydrataatiossa noin kolmen tunnin kuluttua. (Virola ja Raivio, 2000).

Sitoutumisvaiheessa sementtihiukkasten pinnalla olevien hydrataatiotuotteiden määrä kasvaa voimakkaasti ja ne alkavat myös täyttää vesitilaa. Sementtigelin jähmettyminen alkaa. Jähmettymisnopeus on riippuvainen monen tekijän yhteisvaikutuksesta, mutta siihen voivat vaikuttaa muun muassa sementin laatu, raekoko sekä ilman lämpötila (Scanlon, 1997). Esimerkiksi liian matala lämpötila voi johtaa hitaaseen lujuudenkehitykseen ja heikkoon huokosrakenteeseen ja tiiveyteen (Ortiz ym., 2005).

Sementin puristuslujuus kehittyy kovettumisen aikana. Tapahtuvat reaktiot ovat riippuvaisia betonimassan käytettävissä olevan vesi- ja sementtimäärän suhteesta, eli vesi-sementtisuhteesta. Tyypillisesti betonin kovettuminen ja täydellinen hydrataatio on mahdollinen, kun vettä on vähintään 40 % sementin painosta. Hydrataatiotuotteet sitovat itseensä vettä, joten vettä löytyy vielä kovettuneestakin sementistä. Vapaata vettä jää myös betonin

kapillaarihuokosiin. Kun betoni kuivuu, vapaa huokosvesi poistuu. Tämä johtaa tavallisesti betonin tilavuuden muutokseen, käytännössä betonin kutistumiseen.

2.1.3 Kiviaines

Suurin osa betonimassan tilavuudesta koostuu kiviaineksesta. Betonimassasta sen osuus on noin 70 tilavuusprosenttia. Kiviaines on yleensä hiekkaa, soraa tai murskattua kalliota. Kiviaines voidaan louhia luonnosta tyypillisesti läheltä betoniasemaa, tai betonimassassa voidaan käyttää synteettistä tai kierrätettyä kiviainesta. Käytettävän materiaalin tulee olla CE-merkitty ja sen tulee täyttää alkuperä-, puhtaus- ja muut ominaisuudet, jotka määritellään standardissa SFS-EN 12620.

Suomalaisesta kallio- ja maaperästä saatava kiviaines on tyypillisesti luja, kestävä ja testattua, mikä on eduksi betonin kemiallisen kestävyuden kannalta. Käytännössä merkittävämpää varsinkin kemiallisen korroosiokestävyyden kannalta onkin kiviaineksen väliin jäävä sideaine ja sen mikrorakenne. Koska kiviaineksen määrä betonimassassa on kuitenkin suuri, on sillä huomattavia vaikutuksia betonin ominaisuuksiin. Esimerkiksi kiviaineksen raekoko ja rakeisuus, eli erikokoisten rakeiden painosuhte, vaikuttavat merkittävästi betonin työstettävyyteen ja lujuuteen. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018a).

2.1.4 Seosaineet, lisäaineet ja kuidut

Seosaineita voidaan käyttää muun muassa parantamaan betonin kestävyyttä ja tiiveysominaisuuksia. Seosaineiden osuus vaihtelee sementin seosainemäärän ja betonirakenteen rasitusluokan mukaan. Seosaineet voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin. Tyypin I käytännössä reagoimattomia seosaineita ovat pigmentit ja fillerit. Tässä työssä keskitytään tyypin II seosaineisiin, jotka osallistuvat kemiallisiin reaktioihin.

Standardi SFS-EN 197-1 nimeää betonissa hyväksyttäviksi seosaineiksi masuunikuonan (S), kalkkikiven (L tai LL), silikan (D), lentotuhkan (V tai W) ja poltetun liuskeen (T). Sulfaatinkestävyyttä, joka voi perustua esimerkiksi $C_3A:n$, masuunikuonan tai pozzolaanisten seosaineiden määrätyn pitoisuuteen käyttöön, merkitään tunnuksella SR. Suomessa yleisesti käytettyjä seosaineita ovat etenkin lentotuhka, masuunikuona ja silika. Lentotuhka ja silika ovat pozzolaanisia aineita, eli ne osallistuvat aiemmin mainittuun C-S-H-geelin muodostumiseen reagoimalla kalsiumhydroksidin kanssa, joka on yksi hydrataation reaktiotuotteista. Masuunikuona on piilevästi hydraulinen aine. Sen lujuus kehittyy kalsiumhydroksidin vaikutuksesta, mutta ei merkittävästi sitä kuluttaen. Seosaineiden laatuvaatimukset on esitetty vastaavissa standardeissa SFS-EN 450-1, SFS-EN 15167-1 ja SFS-EN 13263-1.

Lisäaineita käytetään hyvin pieniä määriä betonin ominaisuuksien parantamiseksi. Lähtökohtaisesti niitä on nykyään käytössä lähes kaikissa tavallisesti käytetyissä betoneissa. Standardin SFS-EN 934-2 nimeämät lisäaineet voidaan jakaa notkistimiin, huokostimiin, kiihdyttimiin ja hidastimiin. Lisäksi voidaan käyttää standardin ulkopuolisia lisäaineita, jos niistä ei ole haittaa betonin rakenteelle ja ne on hyväksytty vähintään kansallisella tasolla. Vesihuoltoympäristössä tärkeimpiin lisäainetyyppeihin kuuluvat notkistimet, jotka mahdollistivat tiiviin ja kestävä, matalan vesi-sementtisuhteen betonin käytön. Lisäksi markkinoille on tullut erilaisia mikrobikasvua estäviä lisäaineita, joiden käyttö vesihuoltoympäristössä voisi olla hyödyllistä (Grengg, 2018). Tutkimusta ja etenkin käyttökokemuksia on kuitenkin saatavilla vielä niukasti (Anwar ym., 2022).

Betonissa käytettävien lisäaineiden tarkkaa koostumusta ei ole pakko ilmoittaa; lisäaineet eivät kuulu esimerkiksi EU:n Reach-kemikaaliasetuksen piiriin. Uusia lisäaineita käyttäessä tulisikin huomioida niiden soveltuvuuden lisäksi myös niiden turvallisuus, varsinkin talousveden käsittelyn yhteydessä. Vaikka lisäaineiden käyttömäärät ovat kohtuullisen pieniä ja niiden on tarkoitus pysyä betonin sisällä, ei tarkkoja tutkimuksia jokaisen aineen mahdollisesta käyttäytymisestä, etenkin kosteissa ympäristöissä ole saatavilla. (Pulkkinen, 2013).

Myös erilaisia kuituja voidaan käyttää parantamaan betonirakenteen lujuutta ja iskunkestävyyttä. Tavallisesti käytetään teräksestä tai polymeerista valmistettuja kuituja. Tässä työssä kuitujen ominaisuuksia ei käsitellä mainintaa enempää, sillä vesihuoltorakentaminen ei kuulu kuitubetonin tyyppiin käyttökohteisiin (Suomen Betoniyhdistys ry., 2018b).

Tavanomaisesti betoni raudoitetaan sen vetolujuuden vahvistamiseksi. Raudoituksia on kahta tyyppiä: mustasta tai ruostumattomasta teräksestä valmistettuja raudoitteita. Vaikka myös raudoitteet voivat altistua rasiutukselle ja siten vaurioittaa betonia, niiden teknisiä ominaisuuksia ei käsitellä tässä työssä tarkemmin.

2.2 Kovettuneen betonin kestävyysominaisuudet

Kovettuneen betonin ominaisuudet ja kemiallinen kestävyys perustuvat pääosin osa-aineiden keskinäiseen suhteeseen ja laatuun sekä ympäristötekijöihin (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018a). Betonin kestävyuden kannalta tärkeimpiin ominaisuuksiin lukeutuvat sen lujuus ja tiiveys. Betonin tiiveyteen vaikuttavat erityisesti vesi-sementtisuhde ja betonin huokoisuus.

Vesi-sementtisuhde on tärkeimpiä parametrejä säilyvyyden kannalta. Sementtimäärää kasvattamalla rakenteesta tulee lähtökohtaisesti tiiviimpi. Sementtipartikkeleiden etäisyys toisiinsa nähden pienenee, mikä vaikuttaa sementtikiven huokoisuuteen. Toisaalta tavoiteltu matala vesi-sementtisuhde saattaa aiheuttaa ongelmia betonimassan notkeuden suhteen, ja siten vaikuttaa työstettävyyttä. Ongelman ratkaisemiseksi betonimassaan voidaan lisätä notkistimia. (Punkki ja Ojala, 2018).

Hydraataation aikana muodostunut verkottunut huokosrakenne vaikuttaa merkittävästi betonin lujuuteen. Huokosia esiintyy eri kokoluokissa. Sementtigeelissä esiintyvät säteeltään nanometriluokkaa olevat geelihuokokset ovat kestävyuden kannalta melko harmittomia veden täyttämiä huokosia, joissa vesi liikkuu hitaasti eikä myöskään ole altis jäätymiselle. Huokosista haitallisempia ovat mikrometreissä mitattavat sementtikivessä esiintyvät kapillaarihuokokset. Kapillaarihuokosissa oleva vesi voi liikkua rakenteessa kuljettaen samalla haitallisia aineita. Aineet voivat päätyä huokosvesiin läpäisyn, diffuusion tai kulkeutumisen kautta. Vesi voi myös jäätyä ja aiheuttaa halkeilua. Kapillaarihuokosten muodostumista voidaan ehkäistä matalalla vesi-sementtisuhteella (Punkki ja Ojala, 2018).

Betonissa esiintyvät huokokset voivat jopa parantaa sen kestävyttä tiettyjä rasiusmekanismeja vastaan. Suojahuokokset ovat säteeltään noin 0.1 mm kokoisia ilmatäytteisiä huokosia, joista on jopa hyötyä pakkasenkestävää betonia tavoiteltaessa. Kapillaarihuokosissa oleva vesi voi jäätyessään veden paineen takia siirtyä suojahuokosiin ja siten suojata halkeilulta. Sulaessaan vesi kulkeutuu takaisin kapillaarihuokosiin. Huokosissa olevan veden laatu vaihtelee, mutta lähtökohtaisesti se on tuoreessa betonissa alkalista. Veden laatu voi kuitenkin muuttua siihen tunkeutuvien aineiden myötä. Huokoisuudesta johtuva betonin läpäisevyys vaikuttaa myös merkittävästi betonin käyttöikänsä. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018a).

2.3 Betonirakenteisiin kohdistuva rasitus

Vedenkäsittelylaitoksilla betonirakenteet altistuvat voimakkaalle ulkoiselle rasitukselle. Rakenteet altistuvat virtaavan veden ja siinä olevien partikkelien fysikaaliselle rasitukselle, prosessiveteen liuenneiden aineiden aiheuttamalle kemialliselle rasitukselle sekä mahdollisesti myös biologiselle rasitukselle. (Bennett ja Nixon, 2016). Huomioitavaa on, että rakenteet voivat altistua useille rasitusmekanismeille samanaikaisesti, millä voi olla joko rasitusta voimistava, heikentävä tai neutraali vaikutus (Kerkhoff, 2007).

Tässä luvussa esitellään vesilaitoksilla mahdollisia rasituksen mekanismeja jakaen ne fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin mekanismeihin. Yhteenveto mekanismeista, taustasyistä ja alkuperästä vesilaitosympäristössä on koottu alla olevaan taulukkoon 1. Mekanismit esitellään yksityiskohtaisemmin taulukon jälkeen.

Taulukko 1. Merkittävimmät vesihuoltoympäristössä betonia rasittavat tekijät mekanismeineen ja niiden esiintyminen vesihuoltoympäristössä.

Mekanismit		Merkittävät taustasyyt	Taustasyiden alkuperä
Fysikaaliset	Pakkasrapautuminen	Lämpötila, huokosvesi	Ilmasto, prosessivesi
	Hankaus- ja kulumisvauriot	Virtaava vesi, partikkelit	Prosessivesi
Kemialliset	Happohyökkäys	Hapot (H ⁺)	Prosessivesi, puhdistusprosessit
	Aggressiivinen CO ₂	Vapaa CO ₂	Prosessivesi, puhdistusprosessit
	Sulfaattihyökkäys	Sulfaatit (SO ₄ ²⁻)	Prosessivesi, puhdistusprosessit
	Ioninvaihto	Ammonium (NH ₄ ⁺), magnesium (Mg ²⁺)	Prosessivesi, puhdistusprosessit
	Alkali-kiviainesreaktio	Kiviaineksen laatu, lämpötila, korkea kosteus	Allasmateriaalit, prosessiolosuhteet
	Kloridien aiheuttama korroosio	Kloridi (Cl ⁻), huokosvesi	Prosessivesi, puhdistusprosessit
Biologiset	Biologinen rikkihappohyökkäys	Biologinen aktiivisuus, matala happipitoisuus	Prosessiolosuhteet

2.3.1 Fysikaaliset rasitusmekanismit

Betoniin kohdistuva fysikaalisten tekijöiden aiheuttama rasitus ilmenee usein betonipinnan kulumisena, rapautumisena ja halkeiluna. Sitoutumisvaiheessa ja kovettumisen aikana halkeilua aiheuttavat muun muassa kutistumat ja lämpötilamuutokset. Tällainen halkeilu betonissa on hyvin yleistä ja lyhyellä aikavälillä esiintyvää. Tärkeintä onkin keskittyä halkeilun hallintaan kiinnittämällä huomiota betonin koostumukseen, rakennustyön laatuun ja rakenteiden jälkihoitoon. Tämä pian valun jälkeen tapahtuvan halkeilun tarkempi käsittely jätetään työn ulkopuolelle, sillä sitä esiintyy käytännössä kaikissa betonirakenteissa eikä se suoraan liity rasituksen ja kulutuksen aiheuttamaan korroosioon. Seuraavassa esitellään tärkeimpiä vesilaitoksilla vaikuttavia fysikaalisia rasitusmekanismeja, joita ovat pakkasrapautuminen sekä hankaus- ja kulumisvauriot abraasio, eroosio ja kavitaatio. (Bennett & Nixon, 2016).

Ympäristön lämpötila on betonirakenteiden kestävyysvaikuttava tekijä. Käytännössä vesilaitosympäristöissä ei esiinny normaalia säävaihtelua korkeampia lämpötiloja, joten suuremman uhan betonirakenteille aiheuttavat matalat lämpötilat. Pakkasrapautumiselle ovat alttiita erityisesti ulkona sijaitsevat puhdistamoiden altaat, kun taas kalliopuhdistamoissa lämpötilat pysyvät vakaampina. (Bennett & Nixon, 2016). Pakkasrapautumisessa kapillaarihuokosissa oleva vesi laajenee jäätyessään, kohdistaa betoniin suuremman paineen ja lopulta murtaa betonin. Seurauksena on betonin halkeilu, joka vuosien kuluessa etenee rapauttaen lopulta betonin rakenteen. Pakkasrapautumista voidaan ehkäistä käyttämällä lujaa, pakkasenkestävää betonia. (Eglinton, 2003).

Hankaus- ja kulumisvaurioita voi syntyä eri mekanismien kautta. Abraasiolla betonirakennetta pitkin liikkuva asia, vesilaitosympäristössä esimerkiksi laaha tai partikkelit, raapivat ja kuluttavat rakenteen pintaa (Bennett & Nixon, 2016). Abraasio kuluttaa etenkin sementtiä, mikä johtaa lopulta kiviaineksen irtoamiseen. Eroosiota aiheuttaa etenkin virtaavan veden ja sen mukana betonirakenteen suuntaisesti liikkuvien partikkelien sementtiä kuluttava vaikutus. Kavitaatio puolestaan liittyy voimakkaisiin pyörteisiin virtaavassa vedessä. Pyörteissä ilmakuplien luhistuessa syntyy paine-eroja, jotka kuluttavat betonin pintaa. Seurauksena on usein nopeutuva sykli, jossa sementtiä ja kiviainesta irtoaa betonista kerroksittain vuorotellen. Eroosioon verrattuna kavitaation aiheuttama betonin kulumisen näyttöä yleensä karkeammaksi kuluneena pintana. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018a).

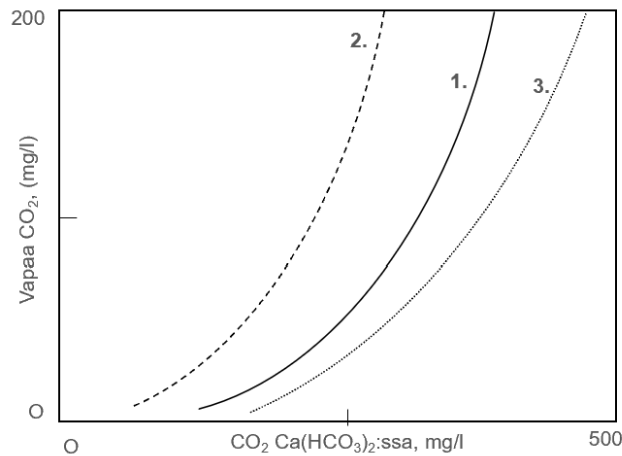
2.3.2 Kemialliset rasiusmekanismit

Vesilaitosympäristö on betonille aggressiivinen veden fysikaalisten ominaisuuksien lisäksi myös veden kemiallisen laadun aiheuttaman rasiuksen takia. Talousveden ja jäteveden laatuominaisuuksia on esitelty täsmällisemmin luvussa 3. Mahdollisia vedenpuhdistuksessa esiintyviä kemiallisia korroosiomekanismeja ovat happohyökkäys, aggressiivinen hiilidioksidi, sulfaattihiökkäys, ioninvaihto, alkali–kiviainesreaktio ja kloridien aiheuttama korroosio. (Bennett & Nixon, 2016).

Betonin pH on korkea, noin 13, mikä tarkoittaa sitä, että hapot ovat sille erityisen haitallisia. Hapot tuhoavat betonin pintaa tavanomaisten happoemäs reaktioiden kautta. Reaktiotuotteet ovat usein kalsiumsuoloja, joissa kalsium on peräisin sementistä. Happohyökkäys havaitaan sementtikiven kulumisena melko tasaisesti betonin pinnassa. Happohyökkäyksen voimakkuuteen vaikuttavat hapolle altistumisen kesto ja esiintymistiheys, lämpötila ja virtaus. (Eglinton, 2003). Virtaus tehostaa happohyökkäyksen etenemistä kuljettamalla materiaalia pois (Kerkhoff, 2007).

Vesissä esiintyy monenlaisia happoja, ja hapon voimakkuus vaikuttaa happohyökkäyksen vakavuuteen. Hapot voidaan jakaa heikkoihin ja vahvoihin happoihin; mitä matalampi pH, sitä aggressiivisempi olosuhde. Tyypillinen heikko happo on hiilidioksidin vesiliuoksessa muodostuva hiilihappo. Reagoidessaan sideaineen kanssa nämä hapot tuottavat yleensä melko niukkaliukoisia yhdisteitä, joten heikkojen happojen aiheuttama betonin vaurioituminen on yleensä kohtuullisen hitaasti etenevää. Vahvat hapot, kuten tyypihappo ja rikkihappo, aiheuttavat voimakkaampaa rasiusta. (Kerkhoff, 2007). Happoja voi syntyä myös biologisen aktiivisuuden myötä. Biologisen rasiuksen mekanismeja on esitelty tarkemmin luvussa 2.3.3.

Liuennot hiilidioksidi heikentää betonin sideainetta myös toisella, happohyökkäystä nopeammalla tavalla. Suurin osa veteen liuenneesta hiilidioksidista on kaasumaisessa olomuodossa, joka voi riittävän suurissa pitoisuuksissa aiheuttaa kalsiumkarbonaatin liukenemistä. Tällaista hiilidioksidia sanotaan vapaaksi tai aggressiiviseksi hiilidioksidiksi. Aggressiivisen hiilidioksidin määrä riippuu veden alkaliteetista eli vetykarbonaattitasapainosta. Hiilidioksidi osallistuu kalsiumvetykarbonaatin stabiloimiseen kuvan 2 mukaisesti. Kuvasta voidaan havaita, että vetykarbonaattipitoisuuden kasvaessa tarvittavan hiilidioksidin määrä kasvaa (käyrä 1). Myös muut liuoksessa esiintyvät suolat vaikuttavat tasapainoon. Käyrä 2 on esimerkki tapauksesta, jossa liuoksessa esiintyy muita kalsiumsuoloja, esimerkiksi sulfaattia, ja vetykarbonaatin stabiloimiseksi tarvittavan hiilidioksidin määrä kasvaa. Käyrä 3 kuvaa päinvastaista vaikutusta. Tarvittavan hiilidioksidin määrä pienenee vesiliuoksen muiden suolojen, esimerkiksi kloridien vaikutuksesta. (Eglinton, 2003).

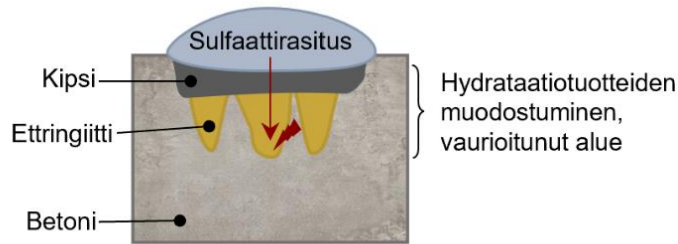


1. CO₂:n ja Ca(HCO₃)₂:n välinen tasapainokäyrä, kun liuoksessa ei ole muita suoloja.
2. Tasapainokäyrä, kun liuos sisältää myös muita kalsiumsuoloja, esimerkiksi sulfaattia.
3. Tasapainokäyrä, kun liuos sisältää myös muita suoloja, esimerkiksi klorideja.

Kuva 2. Havainnollistava tasapainokäyrä vapaan hiilidioksidin ja vetykarbonaatin suhteessa eri tilanteissa. (Mukaiillen Eglinton, 2003, 332).

Sulfaattihiökkäyksessä sulfaatti-ionit (SO₄²⁻) reagoivat kemiallisesti erityisesti sementin sisältämän C₃A:n kanssa muodostaen erinäisiä hydrataatiotuotteita. Sulfaattihiökkäyksessä pääasiallinen rasisitusmekanismi on paisuminen. Muodostuvat hydrataatiotuotteet ovat tavallisesti tilavuudeltaan alkuperäisiä reaktiotuotteita suurempia. Tämä johtaa kovettuneen betonin tapauksessa paisumiseen ja lopulta rakenteen vahingoittumiseen, kun ilman ja huokosten sisältämä tilavuus rakenteen sisällä on käytetty loppuun. (Rahman ja Bassuoni, 2014).

Sulfaattien aiheuttaman rasisituksen mekanismit riippuvat sulfaattityypistä. Sulfaattisuoloja voivat muodostaa esimerkiksi kalsium, natrium ja magnesium. Todellisuudessa reaktiomekanismit ovat monimutkaisia ja moninaisia, mutta sulfaattihiökkäyksen peruseriaatteista on olemassa kohtuullinen tieteellinen konsensus (Rahman ja Bassuoni, 2014). Yksinkertaisesti klassisessa sulfaattihiökkäyksessä (kuva 3) oletetaan hiökkäyksen käynnistyvän sulfaattien reagoidessa vesiympäristössä kalsiumhydroksidin CaOH₂ kanssa. Hiökkäykseen on liitetty hauraan kalsiumsulfaattihydraatin eli kipsin muodostuminen. Muodostunut kipsi ja sementissä muodostuneet aluminaattiyhdisteet reagoivat edelleen sulfaatti-ionien kanssa muodostaen muun muassa ettringiittiä. Ettringiitin tilavuus on moninkertainen lähtöaineiden tilavuuteen verrattuna, mikä johtaa mikrohalkeamiin kovettuneen betonin rakenteessa.



Kuva 3. Havainnollistava kuva sulfaattihyökkäyksen etenemisestä tavanomaisessa portlandsementistä valmistetussa betonissa. (Mukaillen Anwar ym., 2022).

Vesilaitosympäristössä myös ioninvaihto voi heikentää betonin sideaineen ominaisuuksia. Ioninvaihdossa sideaineen kalsiumionit voivat korvautua veden sisältämällä magnesium- tai ammoniumioneilla, jolloin materiaalin sideaineominaisuudet menetetään. Ammoniumsuolat ovat magnesiumsuoloja aggressiivisempia, sillä niiden reaktioissa muodostuu kiinteiden huokosia suojaavien reaktiotuotteiden sijaan haihtuvaa kaasumaista ammoniakia. Ammoniumia esiintyy varsinkin jätevedenkäsittelyssä kohtuullisen runsaasti. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018a).

Alkali-kiviainesreaktio on yhteydessä betonin sementtikiven alkaleiden reaktioihin kiviaineksen mineraalien kanssa. Reaktion tuloksena muodostuu alkaligeeliä, joka sitoessaan ympäristöstä vettä alkaa paisua ja siten aiheuttaa betonin halkeamia. Reaktiota edesauttaa korkea kosteuspitoisuus ja lämpötila, reaktiivinen kivilaji sekä alkalinen rasitus. Suomessa reaktiota pidetään harvinaisena, mutta periaatteessa sen esiintymiselle myös vesilaitosympäristössä olisi olemassa edellytykset (Wouters, 2018). Reaktion esiintymisestä jätevedenpuhdistamoilla on kuitenkin raportoitu ulkomailla (kts. luku 4).

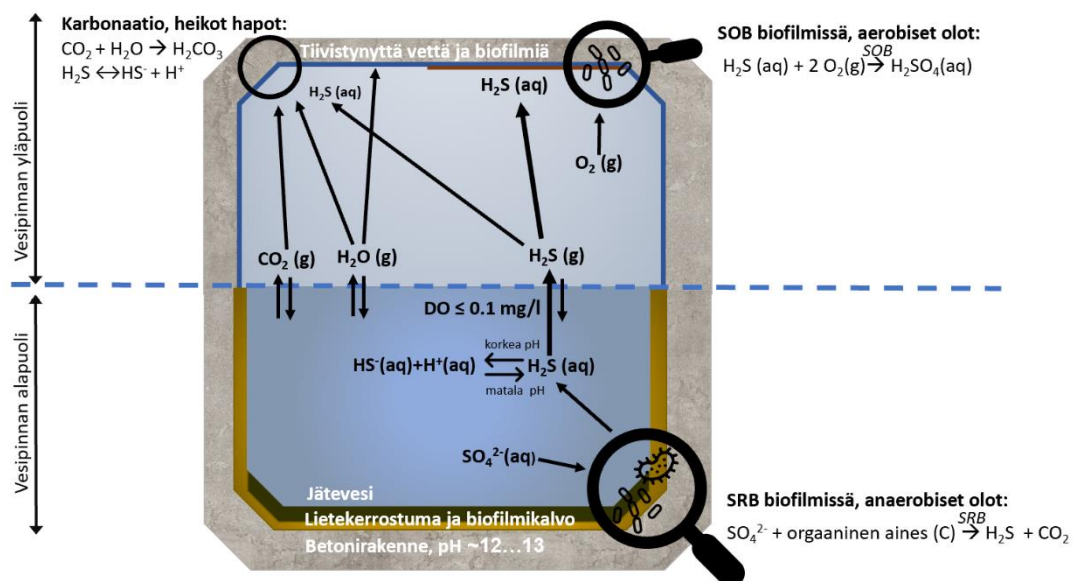
Kloridien aiheuttama rasitus betonirakenteille liittyy sen tunkeutumiseen betonin läpi ja siten aiheuttaen betoniterästen ruostumista. Huokosvedessä kulkeutuvat kloridit voivat betoniteräkset saavuttaessaan vahingoittaa teräksen passiivikalvoa ja mahdollistaa terästen ruostumisen. Raudan korroosiotuotteina syntyy rautaoksiedeita. Tämä voi johtaa teräksen paisumiseen, koska korroosiotuotteiden tilavuus on suuri. Seurauksena on lopulta halkeilua ja säröjä betonin rakenteessa. (Eglinton, 2003).

2.3.3 Rakenteisiin kohdistuva biologinen rasitus

Mikrobitoiminta betonirakenteiden pinnoilla aiheuttaa merkittävää rasi-
tusta etenkin jätevedenpuhdistamoilla ja verkostossa (mm. Anwar ym.,
2022; Hauduc ym., 2019; Sherief ym., 2022). Tyypillisen rikkivetykorroosion
pelkistetty mekanismi on kuvattu alla (kuva 4).

Biologinen rikkivetykorroosio saa alkunsa vedenpinnan alapuolelta. Jäte-
vesiputken tai säiliön pohjalle kertyy lietettä biologisen aktiivisuuden tai ma-
talan virtausnopeuden myötävaikutuksesta. Hapettomissa oloissa anaerobi-
set rikkiä pelkistävät bakteerit (engl. sulfate-reducing bacteria, SRB), joita
esiintyy altaan seinämiä peittämässä biofilmissä, muuttavat orgaanista ai-
netta (C) ja sulfaattia (SO_4^{2-}) rikkivedyksi (H_2S) ja hiilidioksidiksi (CO_2).
Muodostunut H_2S liukenee jäteveten. Osa muodostuneesta rikkivedystä
siirtyy kaasufaasiin. Tasapaino on riippuvainen jäteveden pH:sta ja liuen-
neesta happipitoisuudesta (engl. dissolved oxygen, DO). Tasapainoja muo-
dostuu myös muiden kaasujen, kuten hiilidioksidin ja vesihöyryn, välille.
(Anwar ym., 2022).

Vedenpinnan yläpuolelle säiliön tai rakenteen kattoon tiivistyy varsinkin
tuulettamattomissa olosuhteissa vettä, joka mahdollistaa myös biologisen
aktiivisuuden. Aerobiset, rikkiä hapettavat bakteerit (engl. sulfur oxidizing
bacteria, SOB) hapettavat liuenneen rikkivedyn rikkihapoksi. Reaktiota kut-
sutaan myös biologiseksi rikkihappohyökkäykseksi (engl. biogenic sulfuric
acid corrosion, BSA). Rikkihappo voi edelleen aiheuttaa betonin liukene-
mistä ja betonin paisumista. Myös biologisesti muodostuneet kaasut voivat
vahingoittaa betonia liuottavasti.



Kuva 4. Biologisen korroosion mekanismi.

Kuvattu mekanismi on tyypillinen varsinkin verkostoissa, jossa veden ja lietteen happipitoisuudet ovat alhaisia. Yleisesti puhdistamoaltaat ovat hyvin tuuletettuja, mikä ehkäisee rikkivetykaasun muodostumista (Anwar ym., 2022). Toisaalta yleistyvä pienten, paikallisten puhdistamoiden korvaaminen keskuspuhdistamoilla voi kasvattaa jäteveden kuljetusmatkoja ja siten myös pidentää veden viettämää aikaa verkostoissa. Verkosto-olosuhteissa vesi saattaa alkaa osittain mätänemään jo ennen puhdistamolle pääsyä, mikä voi aiheuttaa ongelmia puhdistamolla. Puhdistamolle voidaan tuoda käsiteltäväksi myös voimakkaasti mädäntyneitä sakokaivolietteitä (Laitinen ym., 2014). Ongelmia voi siten esiintyä etenkin esikäsittelyssä ja mekaanisessa puhdistuksessa, esimerkiksi tulopään liitoskaivoissa.

Yleisesti biologisen korroosion riskitekijöinä voidaan pitää korkeaa sulfaattikonsentraatiota jätevedessä, pitkiä viipymäaikoja viemäreissä ja korkeita H₂S kaasun konsentraatioita kaasufaasissa. Mikrobiologista aktiivisuutta tehostaa myös kosteus ja korkea lämpötila. Biologisella aktiivisuudella voi olla toisaalta myös positiivisia vaikutuksia, sillä biofilmi voi myös suojata vesirajan alapuolista osaa eroosiolta (Kekki, 2008). Biofilmien esiintymisestä erityisesti jätevedenkäsittelyyn tarkoitetuissa altaissa kerrotaan lisää luvussa 3.5.3.

2.4 Betonin käyttöikäsuunnittelu ja rasitusluokat

Hyvä betonirakentaminen edellyttää käyttöikäsuunnittelua, eli rakenteiden kestävyuden arviointia säilyvyyden osalta. Perusperiaatteena on, että puhdistamon tilaaja valitsee tavoitteellisen käyttöiän, jonka jälkeen suunnittelija määrää rakennukselle karkean suunnittelukäyttöiän. Vesihuoltolaitosten tapauksessa suunnittelukäyttöiät ovat noin 50–100 vuotta. Lisäksi jokaiselle rakenteelle määritellään oma suunnittelukäyttöikänsä. Käyttöiän ja projektiokohtaisten tietojen mukaan voidaan täten valita rakenteiden rasitusluokkayhdistelmät. On tärkeä huomata, että suunnittelukäyttöikä on vain karkea termi ja todellinen käyttöikä voi olla pidempi tai lyhyempi. Käyttöiän saavuttaminen vaatii huolellista huoltoa. Käyttöikää voidaan pidentää korjaustöiden avulla. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2016).

Rasitusluokat on määritelty standardissa SFS-EN 206. Ne on jaettu kuuheen ryhmään rasitusmekanismien mukaan:

- Xo Ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä
- XC1–4 Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio
- XD1–3 Kloridien aiheuttama korroosio, kloridit muualta kuin merivedestä
- XS1–3 Kloridien aiheuttama korroosio, kloridit merivedestä
- XF1–4 Jäädytys-sulatusrasitus jäänsulatusaineille tai ilman niitä
- XA1–3 Kemiaallinen rasitus.

Rasitusluokat voivat olla myös päällekkäisiä. Suunnittelijan tulee aina valita rasitusluokkaryhmä toteutuvan rasituksen perusteella. Ylimoittaminen ei aina johda parempaan tulokseen, vaan voi aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia ja esimerkiksi olosuhteisiin nähden liian paksun betonipinnan halkeilua. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2016).

Standardi SFS-EN 206 osoittaa aggressiivisuuden suhteen raja-arvot sulfaattipitoisuudelle, pH:lle, hiilidioksidille, ammoniumpitoisuudelle ja magnesiumipitoisuudelle rasitusluokissa XA1–XA3. Jos kaksi tai useampi ominaisuuksista johtaa samaan luokkaan, luokitellaan ympäristö yhtä luokkaa korkeampaan rasitusluokkaan. Arvot on kuitenkin tarkoitettu soveltumaan maaperän ja pohjaveden aiheuttamalle kemialliselle rasitukselle, eikä vastaavia arvoja ole saatavilla standardoidusti esimerkiksi jätevedenkäsittelyyn soveltuvina. Usein tuleekin suorittaa laboratoriotutkimus spesifien olosuhteiden selvittämiseksi, sillä jätevedessä on läsnä edellä mainittujen lisäksi myös muita aineita, jotka voivat olla potentiaalisesti aggressiivisia.

Tyypillisesti suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla prosessialtaiden sisäpinnat on valmistettu luokan XA2 betonista (Mannonen, 2023). Ulkopintoihin voidaan käyttää myös luokkien XC ja XF betoneita. Tässä työssä keskitytään erityisesti prosessialtaiden sisäpintoihin, ja sen takia seuraavassa esitellään tarkemmin kemialliseen rasitukseen liittyviä seikkoja.

Soveltamisstandardissa SFS 7022:2019 on esitetty eri rasitusluokkien mukaiset betonin vesi-sementtisuhteen, lujuusluokan, sementtimäärän ja ilmamäärän raja-arvot 50 vuoden ja 100 vuoden suunnittelukäyttöäälle (kuva 5). Kuten kuvassa esitetyistä taulukkoarvoista nähdään, kemiallisesti aggressiiviseen ympäristöön suositellaan matalaa vesi-sementtisuhdetta (0.50–0.4), korkeita lujuusluokkia (C30/37–C40/50) ja suurta sementtimäärää (300–330). Rasitusluokassa XA sallitut sementtityypit ja sideaineet on esitetty kuvassa 6. Korkeissa rasitusluokissa XA2 ja XA3 sideaineen valinta on suunnittelijan vastuulla, mutta yhteistyö betonin valmistajan kanssa on toivottavaa parhaan lopputuloksen varmistamiseksi. Rasitusluokkiin XA2 ja XA3 suositellaan sulfaatinkestävää sementtiä silloin, kun ympäristö on sulfaattipitoinen. Rakentamisessa tulisi kuitenkin tapauskohtaisesti huomioida, onko rakenteeseen kohdistuva todellinen sulfaattirasitus tarpeeksi suuri perustelemaan sulfaatinkestävän sementin käyttöä (Mannonen, 2023).

Ominaisuudet ja koostumus	Rasitusluokat, suunnittelukäyttöikä 50 vuotta																	
	Ei rasitusta	Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio				Kloridien aiheuttama korrosio						Jäätymis-sulamisrasitus ¹				Kemiallisesti aggressiivinen ympäristö		
						Merivedestä			Muusta kuin merivedestä									
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
V/S (maksimi)		0.90	0.80	0.60	0.60	0.50	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45	0.60	0.50	0.50	0.45	0.50	0.45	0.40
Lujuusluokka (minimi)	C12 /15	C20 /25	C20 /25	C30 /37	C30 /37	C30 /37	C35 /45	C35 /45	C30 /37	C30 /37	C35 /45	C30 /37	C30 /37	C30 /37	C35 /45	C30 /37	C35 /45	C40 /50
Sementtimäärä (minimi) (kg/m ³)		160	160	250	250	300	320	320	300	300	320	270	330	300	360	300	320	330
Ilmamäärä (%)												4.0	5.0	4.0	5.0			

Ominaisuudet ja koostumus	Rasitusluokat, suunnittelukäyttöikä 100 vuotta																	
	Ei rasitusta	Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio				Kloridien aiheuttama korrosio						Jäätymis-sulamisrasitus ¹				Kemiallisesti aggressiivinen ympäristö		
						Merivedestä			Muusta kuin merivedestä									
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
V/S (maksimi)		0.90	0.80	0.60	0.60	0.45	0.40	0.40	0.50	0.50	0.40	0.55	0.45	0.50	0.40	0.50	0.45	0.40
Lujuusluokka (minimi)	C12 /15	C20 /25	C20 /25	C30 /37	C30 /37	C30 /37	C35 /45	C35 /45	C30 /37	C30 /37	C35 /45	C30 /37	C30 /37	C30 /37	C35 /45	C30 /37	C35 /45	C40 /50
Sementtimäärä (minimi) (kg/m ³)		160	160	250	250	300	320	340	300	300	320	270	330	300	360	300	320	330
Ilmamäärä (%)												5.5	5.0	5.5	5.0			

¹ Jäätymis-sulamisrasituksen suhteen lisärajoituksia käytetyn sementtilaadun mukaan.

Kuva 5. Soveltamisstandardi SFS 7022:2019:n mukaiset betonin vesi-sementtisuhteen, lujuusluokan, sementtimäärän ja ilmamäärän raja-arvot 50 vuoden ja 100 vuoden suunnittelukäyttöiälle. Kuvassa harmaalla merkitty rasitusluokat X0, XS ja XD, joita ei juuri sovelleta suomalaisessa allasrakentamisessa. (Mukailtu Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, 37–38).

	Rasitusluokat		
	Kemiallisesti aggressiivinen ympäristö		
	XA1	XA2	XA3
Sallitut sementtityypit	I II/A–S II/B–S II/A–D II/A–V II/B–V II/A–LL II/A–M ² II/B–M III/A III/B	1) 2)	1) 2)
Esimerkki sallitusta seosainelisäyksestä (% CEM I painosta) ³			
Silika	11	1)	1)
Lentotuhka	45	1)	1)
Masuunikuona	375	1)	1)

- 1) Suunnittelija valitsee käytettävän sideaineen rasituksen mukaan (yhdessä betonin valmistajan kanssa).
- 2) Sulfaattipitoisessa ympäristössä käytetään joko sulfaatinkestävää sementtiä (SFS-EN 197-1) tai sideaineen tulee sisältää masuunikuonaa vähintään 70 % sideaineen kokonaismäärästä.
- 3) Kaikki sallittujen sementtien ja seosaineiden yhdistelmät ovat sallittuja, jos täytetään standardin SFS-EN 197-1 vaatimukset.

Kuva 6. Sallitut sementtityypit ja sideaineet rasitusluokissa XA1–XA3. (Mukailtu Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, 32)

2.5 Keinot betonin korroosion ehkäisemiseksi

Jos rakenteisiin kohdistuvat potentiaaliset rasitusmekanismit osataan arvioida ja tiedostaa jo suunnitteluvaiheessa, voidaan betonin laatu valita vastaamaan mahdollisimman hyvin säilyvää rakennetta (Punkki, 2017).

Yleispäteviä keinoja korroosion ehkäisemiseksi ovat veden laadun muuttaminen ja rakenteiden valinta rasituksen mukaan. Jätevedenpuhdistamoille saapuvan veden laatuun voidaan vaikuttaa vain vähän. Teollisuudesta tuleville virroille voidaan kuitenkin edellyttää esikäsittelyä ja näin vaikuttaa puhdistamolle saapuvan jäteveden laatuun. Rakenteiden valinnan suhteen on esimerkiksi tärkeä varmistaa verkostosta puhdistamolle saapuvan veden riittävä virtausnopeus ja laatu, jotta voidaan ehkäistä etenkin jäteveden laadun heikkenemistä verkostossa. Rakenteiden suunnittelun suhteen tarvitaan siis laadukasta verkostosuunnittelua ja tuuletuksen riittävyyden huomiointia.

Prosessialtaiden materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa rakenteiden kestävyteen rajallisesti. Kuten jo aikaisemmin luvussa 2.3 todettiin, esimerkiksi vahvat hapot ovat hyvin aggressiivisia betonille rasitusluokasta riippumatta. Työssä jo aikaisemmin käsitelty sideaineen valinta, käytettävien metallirakenteiden tyyppi ja pinnoitteen käyttö ovat esimerkkejä kestävyteen vaikuttavista materiaalivalinnoista. Seuraavassa käsitellään lyhyesti seosaineiden ja pinnoitteiden käyttöä erityisesti prosessialtaissa. Lopuksi nostetaan vielä esille seikkoja korroosion havaitsemisesta ja tutkimuksesta puhdistamoilla.

2.5.1 Seosaineiden käyttö betonirakenteissa

Seosaineiden käytöllä voidaan parantaa betonin ominaisuuksia ja vaikuttaa etenkin sen tiiveyteen. Seosaineet ja kovettuneen betonin ominaisuudet, joihin seosaineiden käytöllä voidaan vaikuttaa, on esitelty alla olevassa taulukossa 2.

Taulukko 2. Betonimassassa käytettäviä seosaineita ja niiden koostumuksia sekä betonin ominaisuuksia, joihin seosaineita käyttämällä voidaan vaikuttaa.

	Lentotuhka	Masuunikuona	Silika
Pääasiallinen koostumus ¹	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ (> 70 %)	CaO, MgO, SiO ₂ (>67 %)	SiO ₂ (> 80 %),
Karbonatisoitumisnopeus ²	+	+	+
Sulfaatinkestävyys	+/-	+++ ³	+
Biologinen korrosio ⁴	+/-	+/-	+/-

Merkkien selitykset: + kestävyyttä parantava, ++ kestävyyttä selkeästi parantava, +/- ei yksiselitteistä vaikutusta

1. Perustuu standardeihin SFS-EN 450-1, SFS-EN 15167-1, SFS-EN 13263-1.
2. Seosaineen käyttö voi heikentää kestävyyttä, mutta tehdä betonista tiiviimpää ja täten hidastaa rasiuksen etenemistä. (Suomen betoniyhdistys ry, 2017.)
3. Kun yli 70 % sideaineesta. (Suomen betoniyhdistys ry, 2017.)
4. Vahvojen happojen aiheuttamaa liukenemistä ei voi ehkäistä betoniteknisin keinoin. (Suomen betoniyhdistys ry, 2016.)

Taulukossa 2 kuvatut ominaisuudet ovat yleistäviä, ja todellisuudessa so- piva sideaine ja sekoitussuhde pitää harkita tapauskohtaisesti ympäristöte- kijät ja todellinen rasitus huomioon ottaen. Seosaineiden käytöllä ei voida kuitenkaan estää kaikkea rasiutusta; esimerkiksi vahvojen happojen aiheutta- maa rasiutusta ei voida täysin estää sideainevalinnalla. Lisäksi kokemusta eri betoniresepteistä, joita on käytetty juuri vesilaitosympäristössä, tarvittaisiin enemmän.

2.5.2 Betonirakenteessa käytettävät pinnoitteet

Pinnoittamisella voidaan lisätä betonipinnan kemikaalinkestävyyttä. Veden- käsittelylaitoksilla pinnoitteita on käytössä joillakin puhdistamoilla. Tyypil- lisintä pinnoitteiden käyttö on kuitenkin verkostossa, esikäsittelyssä ja liet- teenkäsittelyssä. Tavallisimpia pinnoitetyyppejä ovat epoksi, polyuretaani, akryyli, sementtipolymeeriseos, vinyylisterit ja polyurea. Jätevedenpuhdis- tamoille valitaan tyypillisesti pinnoitteita, joilla on erinomainen mekaanisen ja kemiallisen rasiuksen kestävyys (Vuorikoski 2022). Pinnoite tulee valita tapauskohtaisesti, eikä yleispätevää ohjetta ole. Suosituksia pinnoitteista voidaan kuitenkin antaa.

Puolalainen tutkimusryhmä (Woyciechowski ym., 2021) esittää tutkimuk- sessaan EN-standardeihin EN 1504-2 ja Puolan kansallisiin liitteisiin pohja- ten suosituksia pinnoitteiden laadulle jätevedenpuhdistamoilla. He suositta- vat pinnoitteille muun muassa korkeaa kemikaalinkestävyyttä eli luokkaa II tai III (PN-EN 13529, 2005), matalaa kaasunläpäisevyyttä (Luokka III, EN ISO 7783-1/2), minimikeskipaksuutta 1000 µm, matalaa veden läpäisevyyttä

(alle $0.1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0.5}$, EN 1062-3), vähimmäistuntalujuutta 1.5 MPa (EN 1542) ja hankauskestävyyden maksimiarvoa 3000 mg (EN ISO 5470-1). Lisäksi he edellyttävät kokemusta pinnoitteen käytöstä valitussa ympäristössä.

Pinnoitteita markkinoivan yhtiön edustaja Vuorikoski (2022) kertoo kyttäessä suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla käytetyistä pinnoiteratkaisuista ja -tuotteista. Esille nostetaan esimerkiksi epoksipohjainen ja polyureapohjainen järjestelmä. Esitellyt pinnoitteet täyttävät valmistajan antamien tietojen mukaan edellä esitetyt suositukset.

Bennett ja Nixon (2016) opastavat kiinnittämään lisäksi huomiota yleisesti seuraaviin seikkoihin pinnoitteita käytettäessä ja asentaessa: Pinnoitteet tulisi asentaa puhtaille pinnoille valmistajan ohjeiden mukaisesti ammattimaista henkilöstöä käyttäen, eri valmistajien pinnoitteita ei tulisi käyttää samanaikaisesti ilman todistettua yhteensopivuutta, ja standardien ja laatuvaatimusten noudattamista tulisi korostaa.

2.5.3 Korroosion tutkimus ja monitorointi

Korroosion esiintymistä voidaan tarkastella silmämääräisesti kuntoarvioita suorittamalla. Kuntoarvioita voidaan sisällyttää esimerkiksi normaaleihin altaiden huoltosykleihin. Tyypillisesti kuntoarvion tekeminen ei vaadi rakenteiden rikkomista, vaan se voidaan toteuttaa esimerkiksi silmämääräisellä tarkastelulla ja ajankohtaisiin vedenlaatutietoihin perehtymällä. Havainnot on hyvä kirjata ylös ja esiintyneet ongelmat korjata mahdollisimman pian. Tarvittaessa voidaan tilata tarkempi kuntotutkimus, joka antaa yksityiskohtaisempaa tietoa puhdistamon rakenteiden tilasta. Kuntotutkimukseen voidaan sisällyttää tarkkoja jätevesi- ja ilmanlaatuanalyysijä sekä koekappaleiden analysoimista. Täten voidaan saada tietoa rakenteisiin kohdistuvasta rasituksesta, vaikka se ei silmämääräisesti näkyisikään. (Bennett ja Nixon, 2016).

3 Vesihuollon prosessien erityispiirteet

Vedenpuhdistamot voidaan jakaa talousvettä tuottaviin ja raakavettä käsitteleviin vedenpuhdistamoihin sekä yhdyskuntien ja teollisuuden jätevesiä käsitteleviin jätevedenpuhdistamoihin. Vedenpuhdistamoissa ja jätevedenpuhdistamoissa vesi voidaan käsitellä erilaisilla prosesseilla vastaamaan lainsäädännössä vaadittuja ja tavoiteltuja kriteereitä. Vedenkäsittelyssä käytettävät allasrakenteet on tavallisesti valmistettu betonista. Tunnistettuja betonialtaisiin kohdistuvan kemiallisen rasituksen riskitekijöitä ovat muun muassa prosesseissa lisättävät sulfaattipitoiset kemikaalit sekä käsittelyssä tapahtuvat biokemialliset reaktiot ja niiden lopputuotteiden vaikutus käsiteltävän veden laatuun (Jedidi ja Benjeddou, 2018). Tässä luvussa esitellään tyypillistä raaka-, talous- ja jäteveden laatua Suomessa ja Pohjoismaissa. Luvussa eritellään erilaisten puhdistamotyyppien tavallisimpia ja keskenään vaihtoehtoisia käsittelyprosesseja sekä niiden mahdollisia korroosioriskitekijöitä.

3.1 Raakaveden laatu

Suomessa talousvettä valmistetaan kotitalouksien käyttöön muutamilla vaihtoehtoisilla tavoilla. Talousvesi valmistetaan vesilaitoksissa yleensä pohjavedestä, pintavedestä tai tekopohjavedestä. Vuonna 2019 raakaveden lähteet suurilla vedenjakelualueilla olivat pohjavesi (42 %), pintavesi (38 %) ja tekopohjavesi (20 %) (Zacheus, 2022).

Pohjavesi on muodostunut suodattamalla huokoisten maakerroksien läpi. Luontainen suodattuminen ja biokemialliset reaktiot maakerroksissa vähentävät pohjaveden puhdistustarvetta. (Sogaard 2013). Pohjavesiesiintymät ovat kuitenkin kohtuullisen pieniä, ja juomavedentuotannossa joudutaan suuremmissa kaupungeissa usein käyttämään järvestä tai joesta johdettua heikompilaatuista pintavettä (Jokela ym., 2017). Suomessa pintavesilähteenä toimii tyypillisesti joesta tai järvestä johdettu vesi. Myös tekopohjavettä voidaan käyttää. Tekopohjavettä valmistetaan käyttämällä esikäsiteltyä pintavettä, joka imeytetään maakerrokseen sadettamalla, allas- tai kaivoimeyttämällä. Eri jakeita voidaan myös sekoittaa.

Raakaveden laatu vaihtelee vesilähteen mukaan. Lähtökohtaisesti raakaveden lähteenä käytetään mahdollisimman hyvälaatuisia vesilähdettä, jonka määrä kuitenkin riittää turvaamaan riittävän vedenjakelun. Tarvittavat puhdistusprosessit määräytyvät raakaveden laatuominaisuuksien mukaan.

Talousveden syövyttävyyteen vaikuttavia muuttujia ovat muun muassa veden pH, kloridipitoisuus, sulfaattipitoisuus ja sähkönjohtavuus (Valvira 2020). Alla olevaan taulukkoon 3 on koottu syövyttävyyteen vaikuttavia laatuominaisuuksien arvoja talousveden tuotantoon Suomessa käytettävistä pohja- ja pintavesistä. Lisäksi taulukossa on esitetty suositusarvot (Valvira

2020) talousveden syövyttävyyden minimoimiseksi vedenjakuverkostossa. Suositukset eivät koske ainoastaan betonirakenteita; verkostossa käytetään muitakin materiaaleja kuten muovia ja metallia. Arvot ovat suuntaa antavia ja ne on määritelty siten, että ne pätevät karkeasti verkoston kaikissa osissa.

Huomioitavaa on myös, että taulukossa esitetyt arvot ovat keskimääräisiä ja alueellisia vaihteluita on paljon. Esimerkiksi veden kovuus ja pH voivat olla korkeampia runsaskalkkisilla alueilla. Sen sijaan happamalla sulfaattimailla Suomen rannikkoseuduilla voidaan havaita korkeita sulfaattipitoisuuksia ja veden happamuutta (Autiola ym., 2022). Myös suureiden ristikkäisriippuvuudet ja arvojen aikavaihtelu vaikuttavat syövyttävyyteen käytännössä (Valvira 2020).

Taulukko 3. Keskiarvoisia laatuominaisuuksia raakavetenä käytettävässä suomalaisessa pohjavedessä ja pintavedessä. Arvoissa voi esiintyä huomattavaa vaihtelua vesilähteen mukaan. Lisäksi taulukossa on esitetty laatuominaisuuksien suositukset käsitellyn talousveden syövyttävyyden ehkäisemiseksi vesijohtoverkostossa.

	Raakavesi, pohjavesimuodostumasta ¹	Raakavesi, pintavesilähteestä ¹	Lähtevä vesi, suositukset syövyttävyyden vähentämiseksi ²
pH	6...7	6...7	yli 7.5
Alkaliteetti (mmol/l)	0.6...1.3	0.6...0.8	yli 0.6
Kokonaiskovuus (mmol/l)	0.3...0.7	0.6...1.2	0.5
Sähkönjohtavuus (µS/cm)	100...300	200...400	<250
Cl ⁻ (mg/l)	10...100	<10	<25
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	5...25	25...70	<150
O ₂ (mg/l)	-	-	yli 2

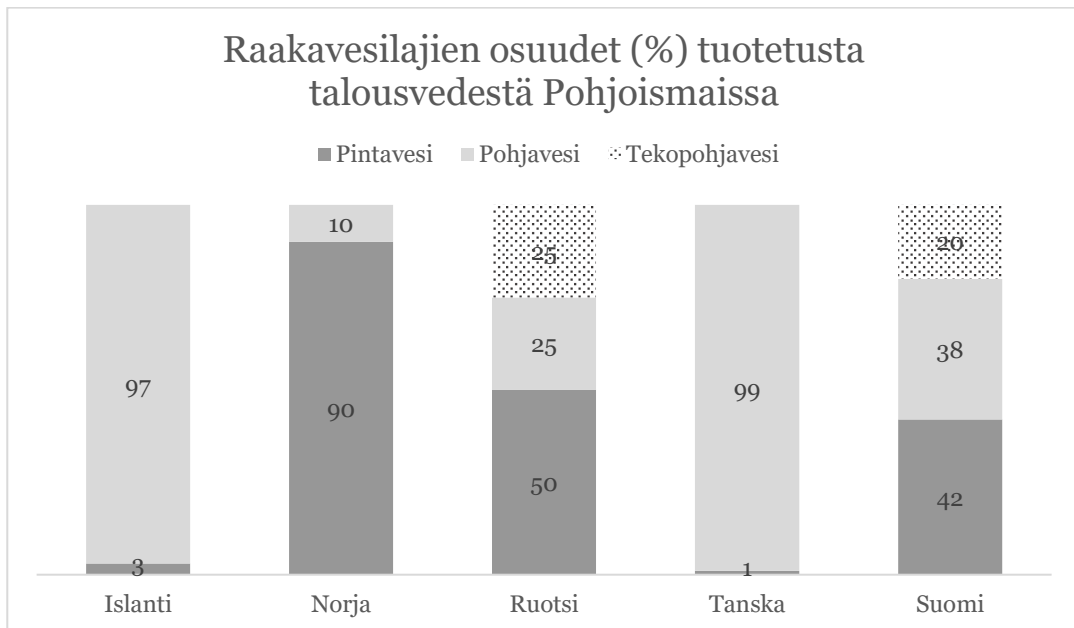
¹ Ahonen ym., 2008

² Valvira, 2020

Happipitoisuuden arvot puuttuvat.

Betonin kannalta potentiaalisimmat kemiallisen rasituksen riskit ovat yhteydessä veden happamuuteen ja sen mahdolliseen pehmeyteen. Etenkin betonin pinnassa havaittava kuluminen voi olla seurausta vetykarbonaatti-ionin tai humushappojen kaltaisten heikkojen happojen aiheuttamasta liukenemisestä (Kerkhoff, 2007). Erityisen kova vesi taas voi jopa suojata betoni pintaa muodostuvan kalsiittikerroksen myötä (Leeman 2010a).

Muissa Pohjoismaissa talousvettä tuotetaan myös pääosin pinta-, pohja- ja tekopohjavedestä, mutta raakaveden tuottoon käytettyjen vesien suhteosuudet vaihtelevat. Tätä voidaan selittää muun muassa Pohjoismaiden erilaisilla maa- ja kallioperällä (Skjelkvåle ym, 2001). Alla olevassa kuvassa (kuva 7) on esitetty talousveden tuottamiseen käytetyn raakaveden lähteitä muissa Pohjoismaissa.



Kuva 7. Raakaveden lähteet prosentteina (%) tuotetusta talousvedestä Islannissa (Samorka, 2022), Norjassa (Steinberg ym., 2021), Ruotsissa (Svenskvatten, 2022), Tanskassa (Duer, 2021) ja Suomessa (Zacheus, 2022). Luvut ovat arvioita, eivätkä huomioi Huippuvuoria, Färssaaria, Grönlantia ja Ahvenanmaata.

Islannissa ja Tanskassa raakaveden lähteenä käytetään lähes yksinomaan pohjavettä. Islannin vesilähteet ovat hyvälaatuisia eikä käsittelyä yleensä tarvita; 97 % kuluttajille johdetusta vedestä on käsittelemätöntä (Samorka, 2022). Tyypillinen tanskalainen raakavesi on kovempaa kuin muissa Pohjoismaita muistuttaen enemmän eurooppalaista vesilaatua (Kaunisto ym., 2017). Sen sijaan raakaveden laatuominaisuuksien arvot Norjassa, Ruotsissa ja Suomessa ovat lähellä toisiaan (Kaunisto ym. 2017). Näissä maissa talousvettä puhdistetaan vastaavilla menetelmillä pääosin suurissa vesilaitoksissa. Tämän vuoksi Norja ja Ruotsi olisivat parhaita verrokkimaita tämän työn havainnoille.

3.2 Talousveden tuotanto

Suurten vesilaitoksien tuottaman talousveden laatua koskevat vaatimukset on säädetty sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa (A 1352/2015, 4 §). Asetus asettaa vaatimuksia veden laadullisille kriteereille, joihin kuuluvat muun muassa mikrobiologiset, kemialliset ja radioaktiivisuuteen liittyvät raja-arvot. Lisäksi talousveden laatua ja käyttökelpoisuutta tulee valvoa (A 1352/2015, 7 §). Laatuvaatimusten ja tavoitteiden täyttämiseksi tulee raakavesi usein esikäsitellä ja desinfioida. Suomalainen pohjavesi on yleensä laadultaan hyvää (Ahkola, 2020), jolloin sitä voidaan käyttää sellaisenaan tai kevyesti esikäsiteltynä. Tarvittaessa vesi voidaan myös desinfioida. Laitoksissa, joissa talousveden valmistukseen käytetään pintavettä, vesi tulee esikäsitellä ja desinfioida (A 1352/2015, 20 a §). Puhdistusprosesseja käsitellään luvussa 3.3.

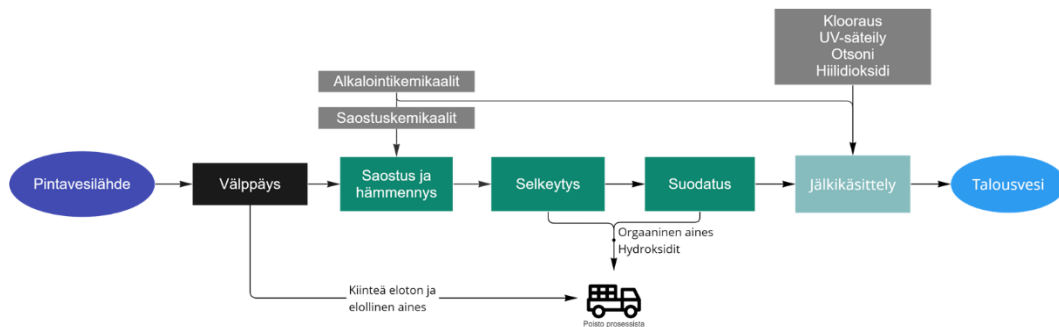
Asetusta muutettiin tammikuussa 2023 vastaamaan Euroopan unionin Juomavesidirektiiviä 2020/2184 (A 2/2023). Uudistusten myötä muutoksia tulee muun muassa veden kemiallisiin laatuvaatimuksiin sekä tarkennuksia laadunvalvontaan ja raportointiin. Juomavesidirektiivi velvoittaa myös Euroopan kemikaaliviraston laatimaan talousveden kanssa kosketuksissa olevista materiaaleista positiivilistan, eli sallittujen materiaalityyppien luettelon, vuoden 2025 alkuun mennessä. Näihin materiaalityyppeihin kuuluvat esimerkiksi sementti ja metalleja sisältävät materiaalit.

3.3 Vedenpuhdistuksen prosessit tyypillisessä pohja- ja pintavesilaitoksessa

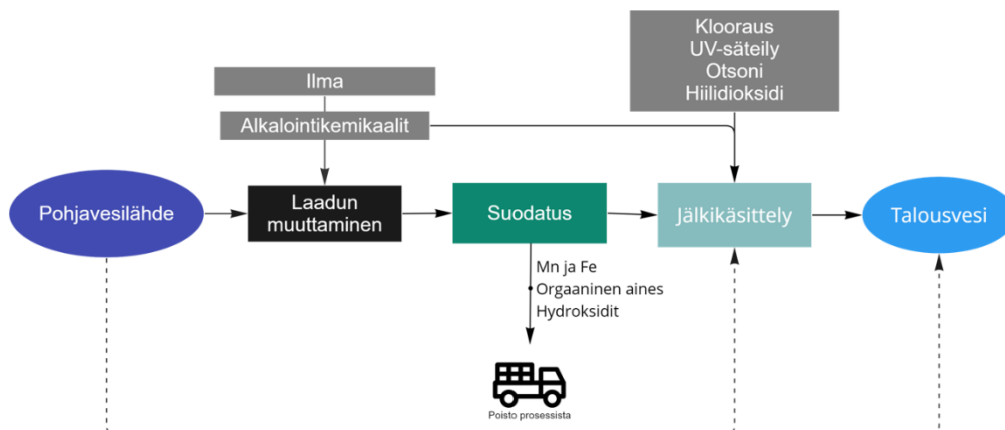
Tässä alaluvussa esitellään mahdollisia puhdistusprosessin vaiheita pohjavesilaitoksessa ja pintavesilaitoksessa. Käytettävät prosessit vaihtelevat vesilaitoskohtaisesti ja ovat vahvasti riippuvaisia raakaveden laadusta. Luvussa esiteltävät prosessikuvaukset pohjautuvat yleisesti suomalaisilla puhdistamoilla käytössä olevaan tekniikkaan (Lahti ym., 2011).

Pohjaveden puhdistus ei aina ole välttämätöntä, sillä suomalainen pohjavesi on yleensä hyvälaatuista (Ahkola, 2020). Tässä työssä keinotekoisesti tuotetun pohjaveden puhdistaminen rinnastetaan pohjavedenpuhdistusprosessiin, eikä tekopohjaveden tuottamisvaiheen prosessivaiheita käsitellä. Pohjavesilaitoksilla käytössä olevia prosesseja on esitetty alla olevassa viitteellisessä kuvassa 8. Tavallisia, useilla puhdistamoilla käytössä olevia vaiheita ovat esimerkiksi saostus partikkeleihin poistamiseksi, suodatus veden laatuominaisuuksien parantamiseksi, veden alkalointi verkoston suojaamiseksi sekä desinfiointi.

Pintavesilaitoksien puhdistusprosessi on usein monivaiheisempi pohjavesilaitokseen verrattuna. Puhdistustapoja on moninaisia, mutta alla (kuva 9) on esitelty yleisimpiä löytyvimpiä vaiheita ja käytettyjä kemikaaleja.



Kuva 8. Tyypillisimpiä pintavesilaitoksella esiintyviä prosessivaiheita. Kuva on viitteellinen. Kaikki kuvatuista prosessivaiheista eivät ole käytössä kaikilla puhdistamoilla.



Kuva 9. Tyypillisimpiä pohjavesilaitoksella esiintyviä prosessivaiheita. Kuva on viitteellinen. Kaikki kuvatuista prosessivaiheista eivät ole käytössä kaikilla puhdistamoilla.

3.3.1 Raakaveden tulopumppaus

Kuvien 8 ja 9 mukaisesti ensimmäinen vaihe prosessissa on pumpaamalla suoritettu raakavedenotto. Vettä voidaan kuljettaa esimerkiksi tunnelia pitkin myös kauempana sijaitsevasta vesilähteestä.

Pintavesilaitoksilla raakavesi pumpataan yleensä järvestä, joskus myös joesta. Suurimmat epäpuhtaudet kuten kasvit, oksat ja roskat erotetaan välppämällä ja poistetaan prosessista.

Erityisesti pohjavesilaitoksilla veden laatua saatetaan muuttaa ennen muita käsittelyvaiheita. Esimerkiksi pohjavedessä happamuuden aiheuttava hiilidioksidi voidaan poistaa ilmastamalla. Hiilidioksidin desorptio ilmastuksen yhteydessä nostaa veden pH-arvoa, mikä voi edesauttaa puhdistamon betonirakenteiden säilymistä. Happikaasun absorptio mahdollistaa etenkin rautayhdisteiden hapettumisen poistamista varten. (Lahti ym., 2011).

3.3.2 Alkalointi- ja saostuskemikaalien lisäys

Veden alkaloinnin tavoitteena on kasvattaa veden alkaliteettia, eli sen kykyä vastustaa pH-arvon muutoksia. Veden kokonaishappamuus muodostuu vapaan hiilidioksidin (CO_2), vetykarbonaatin (HCO_3^-) ja karbonaatin välisestä (CO_3^{2-}) tasapainosta. Happamissa olosuhteissa ($\text{pH} < 5$) hallitseva muoto on vapaa hiilidioksidi. pH-arvon noustessa vetykarbonaatin osuus kasvaa. Taulusveden pH-alueella vallitseva muoto on vetykarbonaatti. Vetykarbonaatin osuus vähenee merkittävästi pH-arvon 10 jälkeen, jonka jälkeen vallitseva muoto on karbonaatti-ioni. (VVY, 2002). Veden alkaliteettiin voivat vaikuttaa myös muut suolat, kuten aikaisemmin esitettiin (kuva 2).

Tyypillisesti alkalointi toteutetaan kemiallisesti. Kemikaaleilla toteutettavassa alkaloinnissa käytetään suomalaisilla vesilaitoksilla esimerkiksi kalkkivettä ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), soodaa (Na_2CO_3) ja lipeää (NaOH). Käsiteltävän veden alkaliteettia voidaan nostaa myös kalkkikivisuodattimilla (CaCO_3). (VVY, 2002).

Pintavedestä valmistettavan veden sisältämät partikkelit voidaan poistaa kemiallisella saostuksella. Yleisesti käytössä olevia saostuskemikaaleja ovat muun muassa ferrisulfaatti ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), alumiinisulfaatti ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), ferrikloridi (FeCl_3) ja niihin pohjautuvat markkinoilla olevat valmisteet (AFRY Finland Oy, 2022).

Betonirakenteiden kestävyuden kannalta on oleellista, että sekä alkalointikemikaalien että saostuskemikaalien käyttö vaikuttaa veden alkaliteettiin ja pH-arvoon. Taulukossa 4 esitetään alkaloinnissa ja saostuksessa käytettäviä kemikaaleja sekä niihin liittyvät oleelliset veden alkaliteettiin ja pH-arvoon vaikuttavat reaktioyhtälöt.

Taulukko 4. Kemiallisesti suoritettavaan alkalointiin ja saostukseen käytettäviä kemikaaleja ja alkaliteettiin ja pH-arvoon liittyviä reaktioyhtälöitä.

	Kemikaali	Reaktioyhtälö
Alkalointi	Kalkkivesi $\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{Ca}(\text{OH})_2 (\text{aq}) + 2 \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$
	Sooda (Na_2CO_3)	$\text{Na}_2\text{CO}_3 (\text{aq}) + \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{Na}^+ + \text{HCO}_3^-$
	Lipeä (NaOH)	$\text{NaOH} (\text{aq}) + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{HCO}_3^-$
	Kalkkikivi (CaCO_3)	$\text{CaCO}_3 (\text{s}) + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$
Saostus	Ferrisulfaatti ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 6 \text{HCO}_3^- \rightarrow 2 \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3 \text{SO}_4^{2-} + 6 \text{CO}_2$
	Alumiinisulfaatti ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 6 \text{HCO}_3^- \rightarrow 2 \text{Al}(\text{OH})_3 + 3 \text{SO}_4^{2-} + 6 \text{CO}_2$
	Ferrikloridi (FeCl_3)	$\text{FeCl}_3 + 6 \text{HCO}_3^- \rightarrow 2 \text{Fe}(\text{OH})_3 + 6 \text{Cl}^- + 6 \text{CO}_2$

Kuten taulukossa 4 esitetyistä reaktioyhtälöistä nähdään, alkalointikemikaalien käyttö lisää vetykarbonaatti-ionien määrää, kun taas saostuskemikaalien käyttö kuluttaa niitä. Reaktioyhtälöistä voidaan myös havaita, että kalkkivesi ja kalkkikivi nostavat alkaliteettia suhteessa parhaiten. Veden alkaliteetin nosto suojelee myös betonirakenteita. Mahdollisten emäksisten alkalointikemikaalien roiskeet kohtuullisella altistuksella eivät myöskään lipeää lukuun ottamatta aiheuta merkittävää uhkaa betonipinnoille niiden emäksisyyden vuoksi (Kerkhoff, 2007).

Saostuskemikaalien käyttö lisää vapaan hiilidioksidin määrää vedessä ja siten kasvattaa veden happamuutta. Talousveden käsittelyssä tämä ei kuitenkaan aiheuta suurta uhkaa betonirakenteille, sillä vesi alkaloidaan joka tapauksessa verkoston suojaamiseksi. On kuitenkin mahdollista, että saostuskemikaalien käytön yhteydessä joudutaan käyttämään suhteessa enemmän alkalointikemikaaleja. Saostuskemikaalit ovat yleensä happamia (pH noin 6), ja pitkäaikaisen altistuksen myötä emäksiseen betonipintaan voi muodostua vaurioita. Saostuskemikaalien turvallisella annostelulla voidaan vaikuttaa riskeihin. Esimerkiksi sprinklerillä ruiskutettu saostuskemikaali leviää tasaisesti käsiteltävään veteen, mutta pienet roiskeet saattavat aiheuttaa riskejä ympäröiville betonirakenteissa.

Reaktioyhtälöistä nähdään, että kalkkiveden ja kalkkisuodattamien käyttö tuottaa veteen kalsiumioneja, jotka nostavat veden kovuusarvoa. Betonirakenteille kalsiumionit eivät ole haitallisia, vaan ne voivat jopa paikata jo syntyneitä vaurioita. Saostuskemikaalien käyttö voi käytetyn kemikaalin mukaan lisätä joko veden rauta-, sulfaatti- tai kloridipitoisuutta. Rautayhdisteet voivat aiheuttaa betonirakenteisiin kosmeettisia virheitä, lähinnä värjäytymistä. Sulfaatti- ja kloridi-ionit on jo aikaisemmin todettu aggressiivisiksi betonille. Näiden ionien konsentraatiot jäävät kuitenkin kohtuullisen matalaksi, eivätkä todennäköisesti aiheuta merkittävää riskiä betonirakenteille.

3.3.3 Saostus ja selkeytys

Saostuskemikaalit muodostavat humuksesta tai levistä lähtöisin olevien partikkeleiden kanssa koagulaatio-flokkulaatioreaktioiden kautta suurempia hiutaleita. Reaktion onnistumisen turvaamiseksi voidaan käyttää erilaisia hämmentimiä (Lahti ym., 2011).

Muodostuneet flokit poistetaan selkeytysvaiheessa. Muodostuneet hiutaleet voidaan nostaa ilmastamalla eli ilmakuplien avulla pinnalle vaahtona ja poistaa prosessista pintakaapimia käyttäen. Jos flokkien tiheys on vettä suurempi, ne voidaan laskeuttaa altaan pohjalle vaakaselkeytysaltaassa. Liette poistetaan prosessista joko laahalla tai huuhtelulla. Tämän vaiheen korroosioriskit betonipinnoille eivät ole erityisen merkittäviä. Kyse on lähinnä veden virtauksesta aiheutuvasta mekaanisesta rasituksesta (Jacobsson, 2016).

3.3.4 Suodatus

Suodatuksessa voidaan poistaa veteen selkeytyksen jälkeen veteen jääneet flokit. Erityisesti pohjavesilaitoksilla suodatusta käytetään menetelmänä huumuksen, mangaanin ja raudan poistamiseen. Hiekkasuodatuksessa voidaan käyttää hiekkaa, kalkkikivisuodattimia tai niiden sekoitusta. Suodatus poistaa vedestä pienemmätkin epäpuhtaudet ja saostuksessa muodostuneet yhdisteet kuten ferrihydroksidin. Veden alkaliteettia voidaan myös tässä vaiheessa prosessia nostaa, jos käytössä on kalkkikivisuodattimia. (Lahti ym., 2011).

Hiekkasuodatus voidaan toteuttaa useilla tavoilla. Pikahiekkasuodattimissa käytetään yleensä hiekkaa tai soraa, jonka läpi vesi johdetaan. Hitaassa hiekkasuodatuksessa (n. 10 h) suodatus perustuu hiekan biokemiallisiin reaktioihin. Hiekan pinnalla kasvaa levistä ja bakteereista muodostuva biokalvo, jossa tapahtuvat biokemialliset reaktiot poistavat vedestä hajun ja maun. (Lahti ym., 2011).

Myöskään suodatusvaiheessa merkittävää rasiitusta ei rakenteisiin kohdistu veden aiheuttaman rasiituksen lisäksi. Suodatusaltaat sijaitsevat kuitenkin usein ulkona, joten pakkasvauriot ovat mahdollisia. (Jacobsson, 2016).

3.3.5 Jälkikäsittely

Jälkikäsittelyllä varmistetaan veden laatu ja talousvesiasetuksen kriteerien täyttyminen. Jälkikäsittelymenetelmistä tavallisemmin käytettyjä ovat esimerkiksi UV-käsittely, klooraus ja otsonointi. (Lahti ym., 2011).

UV-käsittelyllä pyritään parantamaan veden mikrobiologista laatua. Käytetyn UV-säteilyn teho riittää vaikuttamaan lähinnä orgaaniseen ainekseen, eikä se riitä vahingoittamaan betonipintoja. Veden mikrobiologinen laatu voidaan varmistaa myös klooraamalla. Kloorausta edellytetään pintavesilaitoksilla (A 1352/2015, 20 a §). Tavallisesti käytössä on esimerkiksi klooriamiinia. Klorideiksi muuttuessaan riski raudoitusten korroosioon voi kasvaa, mutta käytännössä käyttömäärät Suomessa ovat maltillisia ja klooripohjaisten desinfiointiaineiden riskit liittyvät lähinnä kemikaaliroiskeisiin. Otsonointi voi vaikuttaa haitallisesti betonin rakenteeseen, ja altistuviin rakenteisiin tulisi valita tiivistä betonia (WEF, 2010, 10–44).

3.4 Tyypillinen jäteveden laatu Suomessa

Jätevettä muodostuu kotitalouksissa ja teollisuuden prosesseissa. Suurin osa kotitalouksien tuottamasta jätevedestä tulee peseytymiseen käytetystä harmaasta vedestä. Jäteveden laatu vaihtelee suuresti keräysalueen ja ajankohdan mukaan. Vuodenaikojen vaihtelu ja lomasesongit näkyvät kerättävän veden määrässä ja laadussa. Myös esimerkiksi puhdistamoille johdetut

paikallisista teollisuuslaitoksista tulevat jätevedet voivat vaikuttaa vedenkäsittelylaitoksen prosessisuunnitteluun merkittävästi. (Laitinen ym., 2014).

Alueellinen viemärijärjestelmä vaikuttaa puhdistamoille saapuvan jäteveden laatuun. Useimmilla suomalaispaikkakunnilla on nykyään käytössä erillisviemäröinti. Vanhoilla, tiheästi rakennetuilla kaupunkialueilla on pääsääntöisesti käytössä sekaviemäröinti. Tällöin hulevedet aiheuttavat merkittäviä muutoksia puhdistamolle päätyvän jäteveden määrään ja koostumukseen. Esimerkiksi runsaiden sateiden aikana puhdistamolle päätyy paljon hiekkaa ja hulevettä, joka laimentaa jätevettä. Puhdistamolle saapuvan jäteveden määrään vaikuttavat myös vuotovedet ja pohjaveden tihkuminen verkostoon. Alla olevassa taulukossa (taulukko 5) on esitelty jätevedelle tyypillisiä ominaisuuksia.

Taulukko 5. Jäteveden ominaisuuksia kolmella eri puhdistamolla.

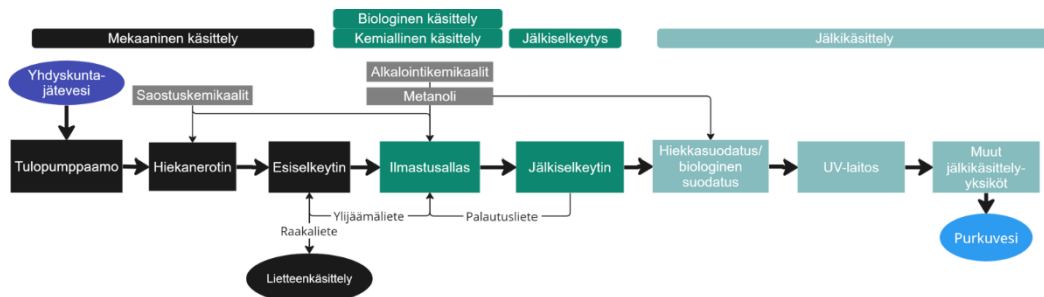
Puhdistamo		1	2	3
Tuleva vesi	Virtaama (m ³ /d)	279 755	103 717	83 500
	Lämpötila °C	12.3– 17.9	11.7– 18.9	9.6–18
	Kokonaistyyppi mg/l	53	69	50
	Ammoniumtyppi mg/l	35	46	38
	Kiintoaine mg/l	291	286	300
Biologisesti käsitelty vesi	Alkaliteetti mmol/l	2.0	1.4	2.0
	Kokonaistyyppi mg/l	4.6	16	7.2
	Ammoniumtyppi mg/l	1.4	1.9	0.6
	Kiintoaine mg/l	4.0	4.4	1.3

1. Viikinmäen jätevedenpuhdistamo 2021 (HSY, 2021)
2. Suomenojan jätevedenpuhdistamo 2021 (HSY, 2021)
3. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo (Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy, 2022)

Jätevedet tulee käsitellä puhdistamolle myönnetyn ympäristöluvan mukaisesti. Ympäristöluvan asettamat vaatimukset perustuvat valtioneuvoston asetukseen yhdyskuntajätevesistä (888/2006) sekä EU:n jätevesidirektiiviin (UWWTD). Jätevesidirektiiviä ollaan päivittämässä vastaamaan eurooppalaisten vesistöjen nykytilaa (COM/2022/541). Päivitetyllä direktiivillä pyritään muun muassa vähentämään vedenkäsittelyprosessien aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä sekä madaltamaan mikrosaasteiden, esimerkiksi lääkejäämien ja mikromuovien, konsentraatioita käsitellyssä jätevedessä. Nykyiset prosessit eivät huomioi näiden aineiden poistoa. Mahdollisia keinoja lääkejäämien poistamiseen ovat esimerkiksi aktiivihiihen käyttö ja otsonointi. Jätevedenpuhdistuksessa vedestä poistettavat aineiden konsentraatiot ovat yleensä suurempia kuin talousveden käsittelyssä, minkä vuoksi jälkikäsittelymenetelmien vaikutuksia betonirakenteisiin tulisi tutkia laajemmin.

3.5 Jätevedenkäsittelyn prosessit

Tässä luvussa käsitellään suomalaisilla puhdistamoilla yleisesti käytössä olevia jätevedenkäsittelyprosesseja ja niiden vaihtoehtoisia prosessivaiheita. Tiedot perustuvat jätevedenpuhdistamoiden parhaan käyttökelpoisen tekniikan (BAT) selvitykseen (Laitinen ym., 2014). Viitteellinen prosessikuvaus on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Tyypillisimpiä jätevedenpuhdistamoilla esiintyviä prosessivaiheita. Kuva on viitteellinen. Kaikki kuvatuista prosessivaiheista eivät ole käytössä kaikilla puhdistamoilla. Puhdistamoilla voi esiintyä myös prosesseja, joita ei tässä kuvauksessa esitetä.

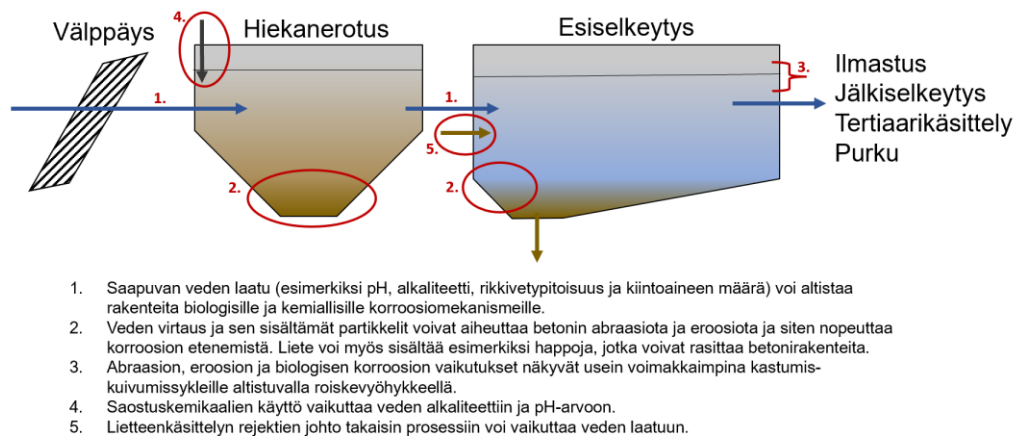
3.5.1 Tulopumppaus ja mekaaninen esikäsittely

Jätevesi voidaan kuljettaa keräysalueelta puhdistamolle usealla tavalla. Gravitaatioviemäreissä jäteveden kulku perustuu painovoimaan. Hapettomia olosuhteita ei yleensä pääse muodostumaan, sillä putkissa on jäteveden lisäksi aina ilmaa. Jätevesi saa happea ilmasta, mikä ehkäisee biologisen rikkivetykorroosion korroosion riskiä. Paineviemäreissä taas vallitsevat hapettomat olosuhteet, mikä mahdollistaa rikkivetyyn liittyvät biologisen korroosiomekanismin. Paineviemäreistä kulkeutuvat rikkivetykaasut ja rikkihappo voivat aiheuttaa korroosiota puhdistuslaitoksen tulopumppauksessa ja tuloputkessa. Puhdistamolle toimitetaan myös kotitalouksien ja teollisuuden sako- ja umpikaivolietteitä (Laitinen ym., 2014). Lietteitä säilytetään kaivoissa toisinaan jopa kuukausia ennen toimitusta puhdistamolle, jolloin aineksen mätäneminen on jo ehtinyt alkaa. Mätänemisessä muodostuu rikkivetyä, joka voi aiheuttaa riskin rakenteiden kemialliselle ja biologiselle korroosiolle. Voimakkaasti mädäntyneiden lietteiden lisäys prosessiin voi myös vaikuttaa esimerkiksi nitrifikaation tehokkuuteen (Laitinen ym., 2014).

Ensimmäinen kokonaan puhdistamolla tapahtuva puhdistusvaihe on välppäys. Jätevesi ohjataan väljän läpi, jossa siitä poistetaan suurimmat kiinteät aineet. Välppäyksessä betonirakenteille kohdistuu mahdollisesti

rasitusta partikkeleiden aiheuttamasta abraasiosta ja eroosiosta, veden laadusta ja verkostolähtöisestä biologisesta rasituksesta.

Hiekanerotuksessa jäteveden mukana mahdollisesti kulkeutuva hiekka laskeutetaan altaan pohjalle. Samalla on mahdollista tehdä myös rasvanerotus, jossa rasva nostetaan veden pintaan ja poistetaan pintakaavinnalla. Korroosioriskit ovat tässä vaiheessa vastaavat kuin välppäyksessä, ja ne on esitetty havainnollistavasti kuvassa 11. Kuten kuvasta nähdään, altaisiin kohdistuvaa rasitusta tutkittaessa tulisi kiinnittää huomiota saapuvan veden laatuun, kiinteän aineksen määrään ja viipymään sekä lisättävien kemikaalien laatuun.



Kuva 11. Mahdollisia betonirakenteisiin kohdistuvia rasituksia mekaanisessa käsittelyssä.

Seokseen voidaan hiekanerotuksen yhteydessä lisätä saostuskemikaaleja fosforin saostamista varten. Yleensä tässä vaiheessa prosessiin syötetään kaksiarvoista rautaa sisältäviä kemikaaleja kuten ferrosulfaattia, jotta rauta saadaan ensin hapetettua tehokkaammaksi, kolmenarvoiseksi raudaksi. Käytössä on samoja kemikaaleja kuin aikaisemmin esitetyillä talousvedenpuhdistamoilla (AFRY Finland Oy, 2022) ja betoniin kohdistuvat uhat vastaavat luvussa 3.3.2 esitetyjä.

Vanhemmilla jätevedenpuhdistamoilla saostuskemikaalit saatetaan lisätä esi-ilmastusaltaassa. Esi-ilmastus on vanhentuva prosessivaihe, jonka tehtävänä on ollut varmistaa jäteveden pysyminen hapekkaana. (Laitinen ym., 2014). Se on suunniteltu puhdistamoille, joilla ei vielä rakennusvaiheessa ole ollut kokonaistypenpoistovaatimusta. Typenpoistovaatimuksien muuttuessa altaita on alettu käyttää kemikaalien annostelu- tai ilman lisäämisaltaina.

Esiselkeytyksessä (kuva 11) suuri osa kiintoaineesta, mukaan lukien osa saostetusta fosforista, laskeutetaan altaan pohjalle. Myös esiselkeytykseen voidaan lisätä saostuskemikaaleja; tällöin käytetään usein tehokkaampaa, kolmenarvoista rautaa sisältävää kemikaalia. Esiselkeytyksessä muodostuu raakalietettä, joka ohjataan edelleen lietteenkäsittelyyn. Lietettä voidaan saakeuttaa myös esiselkeytysaltaan pohjalla, mikä voi johtaa lietteen

happipitoisuuden laskuun. Sakeutumisen aikana muodostuu myös helposti haihtuvia rasvahappoja kuten propionaattia ja butyraattia. Ainakin butyraatti on todettu heikkona happona betonia hitaasti hajottavaksi (Kerkhoff, 2007). Näitä rasvahappoja voidaan myös tuottaa erityisesti biologista fosforinpoistoa varten. Lietteen ikä pyritään kuitenkin pitämään kohtuullisena, jottei mätänemisprosessi etene liian pitkälle aiheuttaen esimerkiksi happipitoisuuden laskua ja mahdollista rikkivety-yhdisteiden muodostumista.

Puhdistamoilla, joiden prosessiin kuuluu biologinen fosforinpoisto, voi käytössä olla esifermentointi, joka tapahtuu usein esiselkeytysaltaassa tai sitä varten varatussa erillisessä altaassa. Esifermentointivaiheessa pyritään kasvattamaan vedessä olevien helposti haihtuvien rasvahappojen määrää, jotta niitä olisi runsaasti saatavilla biologisia fosforia varastoivia mikrobeja varten. Lietteen viipymä kuitenkin pyritään hallitsemaan niin, ettei mädätysprosessi etenisi liian pitkälle, ja johtaisi sitä kautta suuren rikkivety määrän muodostumiseen.

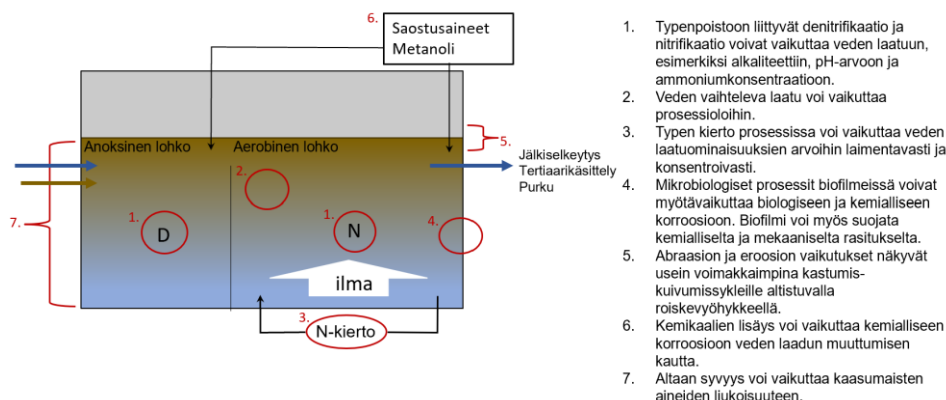
3.5.2 Biologinen ja kemiallinen käsittely

Esiselkeytystä seuraa kemiallisbiologinen käsittelyvaihe. Reaktiot tapahtuvat tavallisesti ilmastusaltaissa, joissa on tyypillisesti hapettomia ja hapellisia lohkoja puhdistustehon optimoimiseksi. Puhdistamoilla on käytössä aktiivilieteprosesseja ja kantoaineprosesseja, joista aktiivilieteprosessi on kantoaineprosessia tavallisempi suomalaisilla puhdistamoilla. Aktiivilieteprosessissa ilmastusaltaissa kasvaa vapaina mikrobeja, joiden aikaansaamien biokemiallisten reaktioiden kautta ravinteet saatetaan kiinteään ja poiskerätävään muotoon, käytännössä suoloiksi. (Laitinen ym., 2014).

Tärkeimmät mikrobien aikaansaamista reaktioista liittyvät typen poistoon. Nitrifikaatio on aerobinen, ilmastetuissa lohkoissa tapahtuva prosessi, jossa ammoniumtyppi hapetetaan nitrifikaatiobakteerien vaikutuksesta nitriitiksi ja nitraatiksi. Denitrifikaatiossa heterotrofiset bakteerit pelkistävät edelleen nitriitin ja nitraatin typpikaasuksi. Reaktio tapahtuu anoksisissa oloissa. (Water Environment Federation, 2010).

Biologinen typenpoisto voi laskea prosessiveden alkaliteettia ja samalla pH-arvoa. Etenkin nitrifikaatioreaktio voi olla herkkä prosessin häiriöille. Prosessihäiriöiden aikana biologisesti käsitellyn jäteveden laatuominaisuuksien arvot, kuten pH ja ammoniumkonsentraatio, voivat erota tavanomaisesti saavutettavista arvoista. Kuvassa 12 on esitetty ilmastusaltaissa mahdollisesti esiintyviä rakenteiden rasitukselle altistavia tekijöitä. On huomiotava, että ilmastusaltaassa jäteveden koostumus voi olla paikoin hyvinkin epähomogeenistä. Hapettomien ja hapellisten lohkojen lisäksi esimerkiksi nitraattikierto voi vaikuttaa ammoniumpitoisuuksiin konsentroivasti tai laimentavasti. Diplomityön puitteissa ei toteutettu herkkyystarkastelua konsentraatioiden muutoksista pistemäisissä kohdissa prosessia, mutta

tällainen tarkastelu voisi tukea ilmastusaltaisiin kohdistuvien korroosioris-
kien arviointia.



Kuva 12. Mahdollisia betonirakenteisiin kohdistuvia rasituksia ilmastusaltaassa, jossa käytössä perinteinen DN-prosessi.

Ilmastusaltaaseen voidaan lisätä myös fosforin saostuskemikaaleja (taulukko 4). Apuaineina voidaan käyttää polymeerejä tai tärkkelystä. Kuten aikaisemmin talousvettä tuottavien laitosten prosesseja esiteltäessä todettiin, happamien saostuskemikaalien lisäys voi laskea veden alkaliteettiä ja pH:ta. Tarvittaessa prosessin pH:n ja alkaliteetin nostoon voidaan käyttää myös jätevedenpuhdistuksessa alkalointikemikaaleja (taulukko 4). Myös metanolia voidaan johtaa prosessiin mikrobien ravinnoksi denitrifikaatiota tehostamaan. Metanolin käyttö lisää orgaanista kuormaa.

Fosforia voidaan poistaa myös biologisesti hyödyntäen fosforia varastoitavia mikrobeja. Biologinen fosforinpoisto on käytössä joillakin suomalaisilla puhdistamoilla. Prosessiin vaaditaan ilmastusaltaassa anaerobinen lohko, joka tavallisesti sijoitetaan ennen anoksisia lohkoja (vrt. kuva 12). Aineksen viipymä anaerobisessa lohossa on tavallisesti tarpeeksi lyhyt, jotta mahdollisesti lietteessä muodostuvan rikkivedyn aiheuttamaa rasitusta ei katsota merkitykselliseksi. Usein biologisen fosforinpoiston rinnalla joudutaan kuitenkin käyttämään saostuskemikaaleja. (Laitinen ym., 2014).

Vaihtoehtona tai lisänä aktiivilieteprosessille voidaan käyttää kantoaineprosesseja. Ne perustuvat kantoaineen pinnalla, esimerkiksi biosuotimissa, suodattimissa ja bioroottorissa tapahtuviin biofilmireaktioihin. Prosessien teknisiä ominaisuuksia ei tässä diplomityössä käsitellä täsmällisesti, mutta biofilmien mikrobiologisia prosesseja esitellään luvussa 3.5.3.

3.5.3 Mikrobiologiset prosessit biofilmeissä

Prosessialtaiden pinnoilla ja kantoaineprosesseissa esiintyy runsaasti biofilmiä. Mikrobitoiminta voi aiheuttaa vaurioita monella eri tavalla. Vauriomekanismit ovat materiaalikohtaisia; seuraavassa esitellään tärkeimpiä

mikrobien aiheuttamia rasituksia. Huomioitavaa on, että korroosio ei yleensä johdu yhdestä tietystä bakteerista tai mikrobista vaan kokonaisesta mikrobiryhmästä ja niiden yhteistoiminnasta. Biofilmillä voi olla myös kulumista ehkäiseviä vaikutuksia. Esimerkiksi vesirajan alapuolella biofilmi voi suojata rakenteita veden aiheuttamalta kulutukselta. (Kekki, 2008).

Jätevedenpuhdistamoilla esiintyvät nitrifikaatiobakteerit voivat hapettaa nitraattiyhdisteitä typpihapoksi, joka voi olla aggressiivista betonille Bischof ym., 2010). Huoltokatkot ja vedettömät jaksot vaikuttavat etenkin nitrifikaatiobakteereihin. Näissä poikkeusolosuhteissa voi prosessiveteen muodostua runsaasti orgaanisia typpiyhdisteitä ja ammoniumia. Lisäksi pH voi pudota jopa arvoon 4 (Rocher, 2009). Betonipinnoilla on lisäksi todettu esiintyvän etenkin *Thiobacillus*-suvun bakteereita, jotka tuottavat aiemmin esitetyn (luku 2.3.3) mekanismin mukaisesti yhdessä SBR-bakteerien kanssa rikkihappoa. Bakteerien lisäksi biofilmit sisältävät myös muita mikrobeita. Esimerkiksi sienien osallisuus erityisesti *Thiobacillus*-suvun bakteerien aiheuttamaan rikkivetykorroosioon on havaittu. (Cho ja Mori, 1995).

3.5.4 Jälkiselkeytyks- ja jälkikäsittelymenetelmät

Jälkiselkeytyksessä jäljelle jäänyt erityisesti fosforia sisältävä kiinteä aines laskeutetaan altaan pohjalle painovoiman avulla. Muodostunut liete kerätään laahalla ja joko palautetaan ilmastusaltaaseen tai poistetaan prosessista lietteen jatkokäsittelyyn. Jälkiselkeytyksaltaissa tunnistettuja korroosion riskitekijöitä ovat esimerkiksi veden happamuuteen liittyvät tekijät, allaspohjan mekaaninen kuluminen laahauksessa ja roiskevyöhykkeen eroosio (Bennet ja Nixon, 2016).

Jätevedenpuhdistamoilla jälkikäsittelymenetelmien käyttö eli veden tertiäärikäsittely ei ole välttämättä tarpeellista ympäristölupien vaatimusten täyttämiseksi. Tertiäärikäsittelyä käytetään kuitenkin usealla puhdistamolla typen- ja fosforinpoiston tehostamiseksi sekä veden hygienisoimiseksi. (Laitinen ym., 2014). Mahdolliset jälkikäsittelymenetelmät ovat usein perusperiaatteiltaan vastaavia kuin talousveden käsittelyn yhteydessä esitetyt prosessit (luku 3.3.5). Jätevedenpuhdistamoilla käsiteltävät konsentraatioerot ovat kuitenkin tavallisesti suurempia kuin talousveden puhdistamoilla.

Prosessissa muodostunut liete käsitellään erillisessä lietteenkäsittelylaitoksessa. Lietteellä on potentiaalisesti korrodoivia ominaisuuksia sen usein matalan pH:n ja mädätyksen aikana mahdollisesti muodostuvan rikkivedyn vuoksi. (Bennet ja Nixon, 2016). Lietteenkäsittely on kuitenkin rajattu tämän työn ulkopuolelle, sillä diplomityön keskiössä ovat erityisesti betoniset allasrakenteet.

4 Betonirakentaminen vesihuollossa

Tässä luvussa esitellään tapausesimerkkejä jätevedenpuhdistamoilta, ajan-kohtaisia prosessialtaiden suunnitteluohjeita sekä toteutettujen asiantuntijahaastatteluiden tulokset. Tuloksia verrataan aiemmissa luvuissa esitettyyn teoriaan. Analyysin pohjalta esitetään luvun viimeisessä alaluvussa suosituksia ja jatkotutkimuksen aiheita.

4.1 Esimerkkitapauksia jätevedenpuhdistamoilta

Teoreettisen tiedon tueksi haluttiin selvittää, millaisia merkkejä korroosiosta allasrakenteissa on todellisuudessa esiintynyt. Katsauksessa keskityttiin jätevedenpuhdistamoihin, sillä niitä pidettiin mielenkiintoisempina veden aggressiivisemmän laadun ja prosessien moninaisuuden vuoksi. Tapausesimerkkejä talousvettä tuottavilla vesilaitoksilla esiintyvistä korroosiosta ei myöskään juuri löytynyt. Tarkasteltavat tapausesimerkit rajattiin koskemaan uudehkoja tutkimuksia, joissa havaittu korroosion eteneminen oli huomattavan nopeaa, tai tutkimuksessa esitettiin sen olevan merkittävä ongelma. Esimerkeissä pyrittiin painottamaan erityisesti Suomessa esiintyneitä tapauksia, mutta tapausesimerkkejä valittiin myös muista maista. Tällaista ainesta valikoitiin tarkasteltavaksi, jos mekanismi arvioitiin mahdolliseksi myös suomalaisissa olosuhteissa.

Kerätty aineisto koostuu artikkeleissa julkaistuista tapausesimerkeistä, raporteista ja lausunnoista. Jokaisen tapauksen kohdalla on esitelty lähteen mukainen tieto korroosion esiintymiskohdasta, pääasiallisesta rasitusmekanismista, aggressiivisuuden lähteestä, vaurioiden ilmenemisajasta ja rakenteiden soveltuvuudesta allasrakenteisiin. Tiedot on koottu taulukkoon 6.

Aineistoa tarkastellessa havaitaan, että korroosiota on esiintynyt kaikissa pääasiallisissa prosessivaiheissa. Altaiden merkittävää kulumista on havaittu sekä mekaanisessa käsittelyssä prosessin alkupäässä että biologisissa käsittelyvaiheissa, eli ilmastus- ja jälkiselkeytysaltaissa. Jokaisessa tutkimuksessa betonin laatu oli todettu rakenteeseen sopivaksi. Altaiden kulumiseen johtaneet syyt olivat lähtökohtaisesti yhdistetty prosessiolosuhteisiin liittyviksi. Kirjoittajat korostivat, että syyt ilmenneen korroosion taustalla voivat olla moninaisia, mutta kuitenkin tutkimuksissa pyrittiin toteamaan vähintään yksi todennäköisimmin vaikuttava tekijä.

Taulukko 6. Esimerkkitapauksia jätevedenpuhdistamoilla esiintyneestä korroosiosta.

	Woyciechowski ym., 2021	Valtari, 2020	Mannonen, 2019	Wouters, 2018	Bischof ym, 2010
Maa	Puola	Suomi	Suomi	Yhdysvallat	Sveitsi
Vauriokohta	Tuloallas, hiekanerotus, roiskevyöhyke	Ilmastus, jälkiselkeytin, vesirajan alapuoli	Tuloallas ja hiekanerotus, roiskevyöhyke	Ilmastus, vesirajan alapuoli	Ilmastus, vesirajan alapuoli
Pääasiallinen rasisitusmekanismi	Biologinen korroosio	Happojen aiheuttama rasisitus	Biologinen korroosio	Alkali-kiviainesreaktio	Happojen aiheuttama rasisitus
Aggressiivisuuden lähde	Ilmatilan H ₂ S	Aggressiivinen CO ₂	Ilmatilan H ₂ S	Korkea kosteuspitoisuus ja lämpötila	Biofilmi-prosessit
Vaurioiden ilmenemisaika	2 vuotta	muutamia vuosia	2.5 vuotta	Yli 10 vuotta	ei tiedossa
Rakenne soveltuva altaaseen	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä

Käsittelyprosessin alkuvaiheissa, tuloaltaissa ja hiekanerotusaltaassa, oli havaittu biologisperäistä rikkivedyn aiheuttamaa korroosiota sekä Suomessa että Puolassa (Mannonen, 2019 ja Woyciechowski ym., 2021). Tieto tukee aikaisemmin esitettyä teoriaa, jonka mukaan erityisesti verkostossa tapahtunut jäteveden mätäneminen ja siten rikkivedyn muodostuminen voi olla rakenteita rasittava tekijä etenkin prosessin alkupäässä. Molemmissa tutkimuksissa ilmatilassa oli havaittu rikkivetyä, jonka todettiin rasittaneen etenkin roiskevyöhykettä rikkivetyä rikkihapoksi hapettavien biofilmissä esiintyvien bakteeriryhmien vaikutuksesta.

Mielenkiintoisimpia tapauksia olivat ilmastusaltaissa esiintyneet korroosion muodot, sillä kirjallisuus ei tunne niitä tarkasti. Sveitsiläisessä tutkimuksessa (Bischof ym., 2010) todettiin ilmastusaltaiden korroosion olevan yleistynyt ongelma maan puhdistamoilla. Ilmiötä perusteltiin monimutkaisuutuneilla typenkäsittelyprosesseilla ja siihen liittyvillä biologisilla mekanismeilla. Myös suomalaisella puhdistamolla esiintynyt etenkin aggressiiviseen hiilidioksidiin yhdistetty korroosio voi olla ainakin välillisesti seurausta tehostuneesta typenpoistosta. Sveitsiläisessä tutkimuksessa korostettiin veden kovuuden vaikutusta korroosion etenemiseen sitä hidastavasti betonipintaa suojelevan kalsiittikerroksen muodostumisen vuoksi. Tämä seikka tulisi ottaa huomioon tuloksia Suomen olosuhteisiin soveltaessa, sillä vesi on Sveitsissä lähtökohtaisesti melko kovaa (Leemann ym., 2010a).

Alkali-kiviainesreaktion esiintymistä eurooppalaisilla jätevedenpuhdistamoilla ei ole juurikaan raportoitu. Yhdysvalloissa ongelmaa luonnehditaan kohtuullisen yleiseksi (Wouters, 2018). On mahdollista, että olosuhteet esimerkiksi Suomessa ehkäisevät alkali-kiviainesreaktion aggressiivista esiintymistä. Reaktion etenemisnopeus on riippuvainen korkeasta lämpötilasta. Woutersin mukaan huomattava korroosio rakenteissa esiintyi aikaisintaan

10 vuoden kuluessa rakentamisesta. Suomen kylmissä olosuhteissa reaktio voi edetä huomattavasti tätä hitaammin.

Taulukossa 6 on esitetty vain merkittävimmäksi arvioitu rakenteisiin kohdistuva rasiinukseen lähde. Esitellyissä tapauksissa kirjoittajat toivat esille myös muita rasiinusta mahdollisesti vahvistavia tekijöitä, joita olivat esimerkiksi veden pH-arvo ja veden virtauksen aiheuttama fysikaalinen eroosio. Tuloksia tarkastellessa on siis huomioitava, että usein vaurioiden syntymisen ja etenemisnopeuden taustalla ei ole vain yhtä selittävää tekijää, vaan se on seurausta monen tekijän yhteisvaikutuksesta.

4.2 Prosessialtaiden suunnittelukirjallisuus

Tässä luvussa tutustutaan puhdistuslaitteiden suunnittelun apuna käytettäviin materiaaleihin ja tarjolla oleviin oppaisiin. Pääsyä esimerkiksi konsulttitoimistojen sisäiseen suunnittelumateriaaliin ei diplomityön puitteissa ollut, joten tutkittu materiaali päädyttiin rajaamaan julkisesti saatavilla oleviin ohjeisiin ja oppaisiin. Tavoitteena oli löytää ajankohtaista, mieluiten suomenkielistä kirjallisuutta laitteiden suunnittelusta ja materiaalivalinnoista. Suomessa betonin valmistusta ja käyttöä sääteleviin eurooppalaisiin EN-standardeihin on olemassa kansallisia soveltamisstandardeja, jotka käytännössä toimivat usein päästandardeina rakentamisessa. Koska diplomityössä keskiössä ovat etenkin suomalaiset puhdistamot ja niiden rakentamiseen vaikuttavat seikat, toivottiin suunnitteluoppaiden ottavan huomioon juuri Suomessa tapahtuvan rakentamisen standardit. Sen takia tämän tarkastelun ulkopuolelle onkin jätetty ulkomaista kirjallisuutta.

Sopivan aineiston löytämiseksi tutustuttiin muun muassa Aalto-yliopiston kirjaston valikoimasta löytyvään rakentamisen ammattikirjallisuuteen ja kysyttiin suosituksia alan asiantuntijoita. Myös Ekholm (2013) on tutustunut tarjolla oleviin suunnitteluoppaisiin erityisesti puhdistamoiden käytettävyyden näkökulmasta. Tässä työssä käsiteltävä näkökulma on kuitenkin aikaisemmasta tutkimuksesta poikkeava, sillä Ekholmin katsauksesta on rajattu pois tarkemmat rakentamiseen ja urakointiin liittyvät seikat. Seuraavaksi esitellään lyhyesti relevantimmiksi valitut kolme kirjallisuuslähde. Käsiteltäväksi teoksiksi valittiin seuraavat:

- Suomen rakennusinsinöörien liiton (RIL) julkaisema käsikirjasarja, johon kuuluvat teokset RIL 124-1 Vesihuolto I ja RIL 124-2 Vesihuolto II
- Water Environment Federation WEF:n, American Society of Civil Engineers ASCE:n ja Environmental & Water Resources Institute EWRI:n julkaisema "Design of Municipal Wastewater Treatment Plans"
- Suomen Betoniyhdistys ry:n julkaisema by 68 Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu- opas suunnittelijoille.

Jokaisen teoksen kohdalla pyrittiin arviomaan teoksen ajantasaisuutta, kykyä esitellä allasrakenteiden betonikorroosiota sekä sen suomalaisiin oloihin soveltumista.

4.2.1 Suunnittelukirjallisuuden arviointi

RIL 124-1 Vesihuolto I ja RIL 124-2 Vesihuolto II muodostavat yhdessä kaksiosaisen erityisesti vesihuoltolaitoksille, rakennuttajille ja suunnittelijoille suunnatun käsikirjan. Kirjan ensimmäisen osan viimeisin painos on julkaistu vuonna 2003, jälkimmäinen osa vuotta myöhemmin. Kokonaisuudessa on täten ikää jo lähes 20 vuotta, joten osa tiedosta ei välttämättä ole enää ajantasaista.

RIL 124-1 Vesihuolto I kirjasta löytyy oma lukunsa korroosiolle, ja myös betonikorroosiolle. Kirjassa ei ole kuitenkaan tuotu selvästi esille korroosiomekanismien liittymistä tiettyihin prosessin osiin, yksikköoperaatioihin tai olosuhteisiin. Kirjan toisesta osassa löytyvät selkeät kuvaukset prosesseista sekä tietoa sekä talousveden että jäteveden laatuominaisuuksista. Yleisesti ottaen RIL:n käsikirjat ovat laadukkaita ja tunnettuja perusteoksia, jotka ottavat huomioon suomalaiset erityisolosuhteet. Kirja kuitenkin kaipaasi päivitystä vastaamaan paremmin nykyisin yleisesti käytössä olevia puhdistusprosesseja.

Erityisesti jätevedenpuhdistamoiden suunnitteluun keskittyvän käsikirjan, *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, taustalla on laaja kansainvälinen asiantuntijajoukko. Kolmiosainen kirjasarja onkin hyvin kattava jätevedenpuhdistamoiden suunnittelemisen perusteos. Kirjan ensimmäisessä osassa korroosion esiintyminen jätevedenpuhdistamoilla on nostettu esille omana lukunaan, ja sitä on esitelty kattavasti samanaikaisesti prosessikuvauksen kanssa. Korroosion mekanismeja on myös yhdistetty sopiviin yksikköoperaatioihin. Oppaassa ei kuitenkaan esitellä betonirakentamista kovinkaan yksityiskohtaisesti, ja tieto erityisesti betonisten allasrakenteiden korroosiosta uhkaa jäädä myös käsiteltävien metallikorroosion ja verkostokorroosion varjoon.

Opas on laadukkaan ja selkeän oloinen perusteos suunnitteluun. Prosessikuvaukset ovat kohtuullisen tuoreita, sillä kirja on julkaistu vuonna 2010. Oppaan heikkouksina voidaan pitää sen englanninkielisyyttä ja soveltuvuutta suomen olosuhteisiin. Yhdysvaltalaisena kirjana lähes kaikki teoksessa annetut esimerkit ovat yhdysvaltalaisista oloista, eikä kirja tunne suomalaista tai oikeastaan edes eurooppalaista betonirakentamista.

Suomen Betoniyhdistys ry:n julkaisema by 68 Betonin valinta ja käytöikäsuunnittelu- opas suunnittelijoille on teoksista ainut selkeästi betonirakentamiseen keskittyvä suunnittelijoille suunnattu opas. Teos perustuu betonirakentamisen standardeihin ja suomalaisiin betoninormeihin. Käsikirjassa nostetaan jätevedenpuhdistamot selkeästi esille omana erityisrakentamiskohteenaan ja annetaan suosituksia esimerkiksi rakenteiden

rasitusluokkayhdistelmistä. Teos on suomenkielinen, helppolukuinen ja auttaa lukijaa ymmärtämään, miten betonistandardeja ja normeja sovelletaan käytännössä, ja mitä rakenteiden käyttöään suunnittelussa tulisi ottaa huomioon. Jätevedenpuhdistuksen osalta teos voisi kuitenkin kaivata päivitystä esimerkiksi veden laatuarvojen ja rasitusluokkayhdistelmien suhteen.

Kaikilla tarkastelluilla teoksilla oli omat vahvuutensa ja käyttötarkoituksensa. Vesihuolto I ja II kirjat ovat selkeä ja saavutettava tietolähde. Ne ovat laadukkaita suomenkielisiä perusteoksia ja tunnettuja myös vesilaitoksilla, mutta teoksen uudistamista tulisi vähintään harkita. Design of Municipal Wastewater Treatment Plants -kirjasarja antaa hyvin kattavan kuvauksen juuri jäteveden puhdistusprosesseista. Teoksessa korroosio nostetaan esille merkittävänä huomioitavana asiana suunnittelutyössä. Kaikki oppaassa esitetty tieto ei kuitenkaan ole välttämättä sovellettavissa suomalaisille puhdistamoille. Oppaista konkreettisimpia ohjeita juuri betonirakenteiden rasituksesta sisälsi Suomen Betoniyhdistyksen julkaisema opas by68. Oppaassa vedenkäsittelyn prosesseja ei käsitelty kuitenkaan juuri ollenkaan. Koska teos oli kuitenkin tarkastelluista käsikirjoista ainoa, joka antoi yksityiskohtaisia suosituksia jätevesialtaisiin käytettävän betonin laadusta, tarkastellaan sitä yksityiskohtaisemmin seuraavassa alaluvussa.

4.2.2 Teoksen ”by68 Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu- opas suunnittelijoille” analyysi

Teoksessa annettuja suosituksia tarkasteltiin aikaisemmin luvuissa 2 ja 3 esitettyyn teoriaan pohjautuen. Oppaan suosittelemat lujuusluokat, betonipeitteen nimellisärvot, vesi-sementtisuhde ja raudoitustyyppi kahdelle eri suunnittelukäyttöäälle on esitelty alla olevassa taulukossa 7.

Ohjeet ovat linjassa aikaisemmin esitettyjen (kuva 5) soveltamisstandardien kanssa. Suositellut lujuusluokat ovat XA2-rasitusluokan rakenteilla hieman soveltamisstandardin minimiarvoja suuremmat. Tällä halutaan ehkä varmistaa rakenteiden kemiallinen kestävyys. Suositukset eivät myöskään ota kantaa sopiviin seosainelisyksiin jätevesialtaiden rakennuksessa. Kuten aikaisemmin esitettiin (kuva 6), rasitusluokassa XA2 suunnittelija valitsee soveltuvan sideaineen rasituksen mukaan. Koska opas on kuitenkin tarkoitettu juuri suunnittelijoille, voisi teokseen lisätä tietoa soveltuvista seosainelisyksistä. Kuten myös teoksessa todetaan, XA-luokissa altaan rasitusvaikutus määritetään erikseen veden laadun perusteella. Ehkä myös tämän takia tarkkojen arvojen esittämistä on vältetty.

Taulukko 7. Suositeltavat rasitusluokkayhdistelmät, betonin ominaisuudet ja betonipeitteen nimellisarvot yhdyskuntajätevesialtaalle suunnitteluoppaan (Suomen betoniyhdistys ry., 2016, 74–75) mukaan.

Rakenne	Rasitusluokkayhdistelmä	Suunnittelukäyttöikä (vuotta)	Raudoitustyyppi	Paikallavalurakenne			Elementtirakenne		
				Lujuusluokka	Betonipinnoitteen nimellisarvo	Vesi-sementtisuhte	Lujuusluokka	Betonipinnoitteen nimellisarvo	Vesi-sementtisuhte
1	XC3,4; XF3	50	br jr	C35/45 -	30 -	-	C35/45 C50/60	30 30	-
		100	br jr	C35/45 -	35 -		C35/45 C50/60	35 30	
2	XC2	50	br	C25/30	35	-	C30/37	30	-
		100	br		45		C35/45	35	
3	XC3,4; XF3; XA2	50	br jr	C35/45 -	30 -	0.45 -	C50/60 C50/60	30 30	0.45 0.45
		100	br jr	C35/45 -	35 -	0.45 -	C50/60 C50/60	30 30	0.45 0.45
4	XC2; XA2	50	br jr	C45/55 -	25 -	0.45 -	C50/60 C50/60	30 30	0.45 0.45
		100	br jr	C45/55 -	30 -	0.45 -	C50/60 C50/60	30 30	0.45 0.45

1. Altaan seinämän ulkopuoli, maanpinnan yläpuolella
2. Altaan seinämän ulkopuoli, maanpinnan alapuolella
3. Altaan sisäseinämät, vedenpinnan yläpuolella
4. Altaan sisäseinämät ja pohja, vedenpinnan alapuolella

Opas esittelee myös jäteveden tavallisimpia laatuominaisuuksia (taulukko 8). Kun taulukossa esitetyjä arvoja verrataan aiemmin koottuihin tietoihin jäteveden laatuominaisuuksiin (taulukko 5), huomataan, että osa annetuista arvoista voi olla hieman vanhentunutta. Esimerkiksi kokonaistypen ja ammoniumin määrät yhdyskuntajätevedessä ovat ajan myötä kasvaneet muun muassa ravinnoksi nautitun ruoan korkean proteiinipitoisuuden ja vuotovesien paremman hallinnan vuoksi. Oppaassa esitetyt arvot on luultavasti lainattu vesihuoltoalan perusteoksesta, sillä samat arvot esitetään myös teoksessa Vesihuolto II (RIL 124-2, 2004, 494). Esitetyjä laatuarvoja voidaan siis pitää vain viitteellisenä tietona, sillä ne eivät myöskään erittele prosessin osaa, missä tällaiset arvot voisivat esiintyä. Kuten aikaisemmin esitetystä

prosessikuvasta (kuva 10) havaitaan, nykyisissä vedenkäsittelyprosesseissa erilaiset sisäiset kierrot ja esimerkiksi saostus- ja alkalointikemikaalien käyttö voivat kasvattaa laatuarvojen vaihteluväliä merkittävästi. Oppaassa esitetyssä taulukossa ei oteta kantaa muun muassa aggressiivisen hiilidioksidin määrään ja sen aiheuttamiin riskeihin jätevedessä, vaikka sitä on epäilty mahdolliseksi korroosion aiheuttajaksi (Valtari, 2020). Esimerkiksi tehostunut ravinteiden poisto voi kasvattaa riskejä olosuhteille, joissa aggressiivisen hiilidioksidin määrä voi kasvaa.

Taulukko 8. Jätevedelle tyypillisiä ominaisuuksia (Suomen betoniyhdistys, 2016, 27).

Ominaisuus	Pitoisuus (mg/l, paitsi pH)
pH	6...8
Cl	25...75
Ammoniumtyppi NH ₄ ⁺	15...25
Kokonaistyyppi N	25...40
P	6...8
COD	300...450
BOD ₇	125...175
SS	150...200
VS	120...150
TS	350...600

Oppaan sisältämä luku jätevedestä ohjeistaa myös hyödyntämään jäteveden kemiallisen rasituksen aiheuttaman rasitusluokan (XA1–XA3) määrittämiseen standardin SFS-EN 206 mukaista taulukkoa, joka on tarkoitettu maaperän ja pohjaveden aiheuttaman rasitusluokan määrittämiseen. Esimerkiksi Woychiechowshki ym., (2021) nostaa tutkimuksensa johtopäätöksissä esille, että standardin mukainen taulukko olettaa veden virtausnopeuden matalaksi, lähes staattiseksi, eikä täten sovellu virtaavan jäteveden aiheuttaman rasituksen arviointiin. Standardi ei myöskään huomioi kaikkia jäteveissä esiintyviä muita aineita ja esimerkiksi mahdollisen biologisen rasituksen vaikutusta. Lisäksi kirjoittaja toteaa, että tällaista ajantasaisista tietoa ei toistaiseksi ole saatavilla.

Standardien soveltamisopas by68:ssa esitetty tieto vaikuttaa katsauksen perusteella hyvin mielenkiintoiselta, sillä vastaavia vapaasti saatavilla olevia betonitekniisiä oppaita vaikuttaa olevan saatavilla rajoitetusti. Oppaassa olevaa jäteveden laatua koskevaa tietoa voisi täsmentää opasta uudistettaessa, tai harkita tiedon laajentamista omaksi käsikirjaksi. Teoksessa voitaisiin ottaa kantaa myös esimerkiksi pinnoitteiden käyttöön.

4.3 Asiantuntijoiden näkemyksiä allaskorroosion esiintymisestä Suomessa

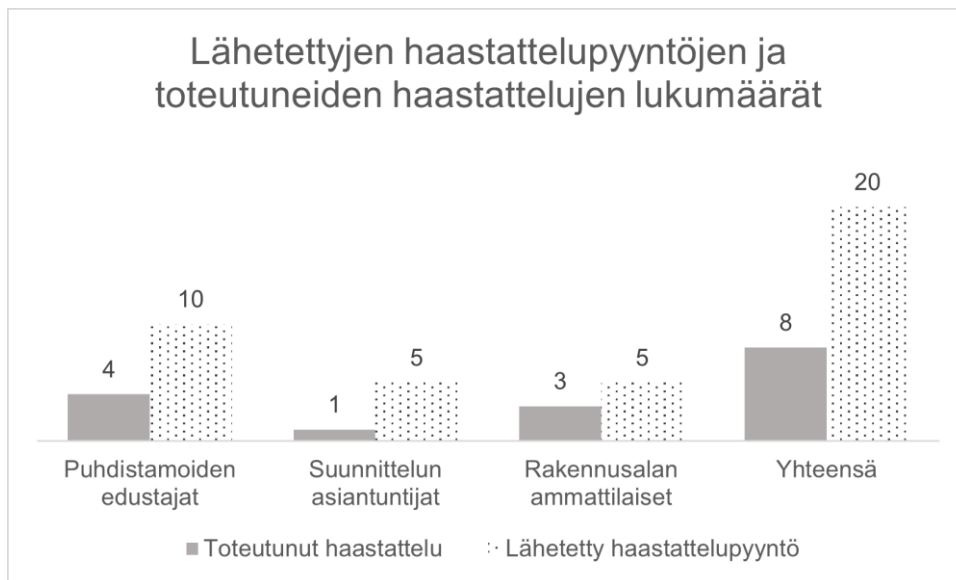
Allaskorroosion esiintymistä suomalaisilla puhdistamoilla selvitettiin ajan-kohtaisen tilannekuvan muodostamiseksi. Selvitys päätettiin toteuttaa yksityiskohtaisilla haastatteluilla. Haastatteluihin valittiin ammattilaisia vesihuolto-, suunnittelu- ja rakennusosalta. Tavoitteena oli kuulla alalla aktiivisesti työskenteleviä ammattilaisia allaskorroosion esiintymisestä puhdistamoilla sekä sen potentiaalisista ehkäisykeinoista. Lisäksi selvitettiin mielipiteitä yhteistyön sujuvuudesta sekä työn- ja vastuunjaosta esimerkiksi saneeraus- ja korjaushankkeiden aikana.

Aluksi taustoitetaan asiantuntijahaastatteluiden toteuttamistapaa sekä pohjustetaan laadullisen tutkimukseen aineiston käsittelyyn liittyviä teknisiä seikkoja. Tiivistelmä haastattelutuloksista on koottu lukuun 4.4.2. Tulosten pohdinta ja yhteenvedo on koottu lukuun 4.4.3.

4.3.1 Asiantuntijahaastattelujen tausta ja toteutus

Haastatteluissa kuullut asiantuntijat vesihuoltolaitoksilta, konsulttiyrityksistä ja urakoitsijoista valittiin diplomityön valvojien, ohjaajien ja hankkeen ohjausryhmän verkostoista. Näin pyrittiin varmistamaan haastattelujen kohdentuminen henkilöihin, jotka taustansa ja kokemuksensa perusteella osaisivat vastata kysymyksiin mahdollisimman monipuolisesti. Resurssien ja aikataulukonfliktien vuoksi kaikkia alun perin suunniteltuja haastatteluja ei kuitenkaan voitu pitää.

Aineiston kerääminen ja haastatteluiden toteutus tapahtui talven 2022 ja kevään 2023 aikana. Haastattelukutsu lähetettiin yhteensä 20 asiantuntijalle, joista 10 oli puhdistamoiden edustajia, 5 puhdistamoiden suunnitteluun perehtyneitä konsultteja ja 5 rakennusalan ammattilaisia. Vastauksia saatiin jätevedenpuhdistamoiden edustajilta 4, suunnittelijoilta 1 ja rakennusosalta 3. Yhteensä haastatteluja pidettiin siis 8. Haastatteluiden ja kyselyiden yhteenlaskettu vastausprosentti oli 40 %. Kuvassa 13 on esitetty lähetettyjen haastattelupyyntöjen ja toteutuneiden haastatteluiden lukumäärät. Haastatteluotoksessa aliedustettuina olivat suunnittelijat, joilta saatiin vain yksi vastaus.



Kuva 13. Lähetettyjen haastattelukutsujen (20) ja toteutuneiden haastattelujen lukumäärät (n=8) asiantuntijakohtaisesti.

Haastatteluihin käytettiin erilaisia, tilanteeseen sopivia haastattelutapoja. Haastattelut toteutuivat yksilöhaastatteluina joko kasvokkain haastateltavan työympäristössä tai etäyhteyksin videopuheluna. Haastattelukysymyksiin tarjottiin mahdollisuus vastata myös kirjallisesti. Puolet haastattelukutsuun myönteisesti vastanneista henkilöistä haastateltiin heidän normaalissa työympäristössään, kolmea henkilöä haastateltiin videopuhelun välityksellä ja yksi vastanneista valitsi vastata kysymyksiin kirjallisesti kyselylomakkeen välityksellä.

Kirjallista vastausta lukuun ottamatta, haastattelut toteutettiin puolistrukturoituina haastatteluina eli teemahaastatteluina. Teemahaastattelulle on ominaista, että haastattelukysymykset ovat avoimia, ja etukäteen mietityt kysymykset toimivat lähinnä ohjenuorana. Haastattelujen pohjalla käytetyt kysymykset löytyvät liitteistä (Liitteet A, B ja C). Kirjallisessa vastausvaihtoehdossa kaikki kysymykset jaettiin vastaajille, mutta jokaiseen kysymykseen vastaamista ei edellytetty aihepiirin ja kysymysten laajuuden vuoksi. Teemahaastattelu on luonteeltaan keskusteleva, ja haastattelijan pääasiallinen tarkoitus on huolehtia, että ennalta päätetyt teemat tulevat käsiteltyä. Haastatteluryhmille valittiin kolme käsiteltävää pääteemaa, jotka on esitetty alla olevassa taulukossa 9. Teemahaastattelun etuina voidaan pitää haastateltavan äänen korostumista. (Hyvärinen, Suoninen & Vuori, 2021). Tilannekuvan luomiseen, kuten tämän haastattelun tavoitteena oli, asiantuntijoihin rajattu teemahaastattelu on siis perusteltu.

Taulukko 9. Haastatteluissa esille nostetut teemat puhdistamoiden edustajille, suunnittelijoille ja urakoitsijoille.

Puhdistamoiden edustajat	Suunnittelijat	Rakennusalan ammattilaiset
- Puhdistamon rakenne - Esiintynyt korroosio - Yhteistyö rakennus- ja saneeraushankkeiden aikana	- Kokemukset allaskorroosiosta - Suunnitteluohjeet -Yhteistyö rakennus- ja saneeraushankkeiden aikana	- Kokemukset allaskorroosiosta -Betonituotteiden valinta ja saatavuus - Yhteistyö rakennus- ja saneeraushankkeiden aikana

Haastatteluvastaukset litteroitiin ja muodostunut aineisto käytiin läpi huolellisesti. Aineiston käsittelyssä hyödynnettiin koodausta (mm. Juhila, 2021) eli haastatteluista pyrittiin etsimään järjestelmällisesti toistuvia seikkoja. Analyysissa pyrittiin laadulliseen sisällönanalyysiin (mm. Vuori, 2021), jonka tavoitteena on luoda selkeä sanallinen kuvaus tutkittavasta asiasta (Tuomi & Sarajärvi, 2018).

4.3.2 Haastattelutulosten tiivistelmä

Seuraavassa kootaan haastatteluissa toistuneita aihepiirejä, jotka nousivat esiin merkityksellisinä. Havainnot ja tulokset esitetään aihepiireittäin, jotka muodostettiin koodauksen tuloksena. Tässä luvussa on pyritty nostamaan esille erityisesti haastateltavien ääni ja kokemukset. Esille nousseet aihepiirit on listattu alla:

1. Suomalaisten puhdistamoiden nykytila
2. Kokemukset betonirakentamisesta
3. Onnistuneen rakennus- tai saneerausprojektin tunnusmerkit
4. Allaskorroosion tutkimuksen merkityksellisyys.

Suomalaisten puhdistamoiden nykytila allaskorroosion näkökulmasta oli haastateltujen asiantuntijoiden mukaan kohtuullinen. Mukana haastatteluissa oli eri ikäisten puhdistamoiden edustajia. Vanhemmissa puhdistamoissa osa altaista oli jo käyttöikänsä lopulla ja käynnissä oli saneerauksia. Näiden puhdistamoiden allasrakenteissa oli oletettavasti jo ikänsäkin puolesta merkkejä niihin kohdistuneesta rasituksesta; altaissa saatettiin olla havaittu voimakasta kulumista tai muita korroosion merkkejä, jotka kuitenkin koettiin hyväksyttäväksi altaiden iän vuoksi. Muita ongelmia vanhempien altaiden suhteen ei haastatteluissa juuri raportoitu, vaan niiden pitkää käyttöikää lähinnä kiiteltiin. Uudemmissa, eli noin 15 viime vuoden aikana rakennetuissa allasrakenteissa ei raportoitu merkkejä korroosiosta, jos altaan ikä oli vain muutama vuosi. Näissä uusimmissa altaissa mahdollisesti

ilmenneet vauriot, kuten betonin halkeilu, yhdistettiin rakentamisen aikaisiin haasteisiin. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi rakennusmateriaalien ja sementtityypin valinta sekä työn laatu. Haastatteluissa tuli kuitenkin ilmi myös tapaus, jossa uudemmassa, noin 15 vuotta vanhassa rakenteessa esiintyi aggressiivisesti etenevää, prosessiolosuhteisiin liittyvää korroosiota.

Haastatteluissa kartoitettiin myös käytäntöjä liittyen korroosion monitorointiin ja seurantaan puhdistamoilla. Kaikki haastatteluun osallistuneet puhdistamot ilmoittivat seuraavansa alaidensa kuntoa säännöllisesti huoltotoimenpiteiden yhteydessä ja tarpeen mukaan myös kuntotutkimuksia teettämällä. Korroosion raportoinnista nousi esille kommentti, jossa haastateltavan kokemuksensa mukaan puhdistamoilla näkyvät vauriot saatetaan usein vain paikata ja korjata, eikä systemaattista raportointia välttämättä suoriteta.

Haastateltavien kokemukset betonirakentamisesta puhdistamoissa olivat moninaisia. Asiantuntijoiden mukaan suomalaisten puhdistamoiden betonirakenteet ovat suhteellisen homogeenisia, ja niiden suunnittelussa hyödynnetään usein aikaisemmissa projekteissa toimiviksi todettuja suunnitteluohjeita, ratkaisuja ja malleja. Tutkimustietoa, käyttökokemuksia ja oppaita esimerkiksi seosaineiden käytöstä ja sopivuudesta vesilaitosympäristössä kaivattaisiin enemmän. Osa vastaajista kyseenalaisti rakentajien ammattitaidon haastavien betonilaatujen käsittelyssä. Haastateltavat nostivat esiin myös rakennusalan yleisen osaajapulan, betonilaatujen saatavuusongelmat ja hinnan merkityksen. Pinnoitusmateriaalien käyttö altaissa oli noussut esiin useilla puhdistamoilla, sillä sitä oli mainostettu kohtuuhintaisena ja lisäarvoa tuovana. Osa haastatelluista toi kuitenkin esiin epätietoisuuden pinnoittamisen tarpeellisuudesta.

Onnistuneen rakennus- tai saneerausprojektin tärkeimmiksi tunnusmerkeiksi nostettiin haastatteluissa tuttujen ja pitkäaikaisten yhteistyökumppanien käyttö sekä suunnittelijoiden kyky huomioida rakennuskohteen erityispiirteet. Puhdistamoiden edustajat toivoivat laadukkaita suunnitelmia ja paikalliset olosuhteet huomioivaa kohteeseen räätälöityä toteutustapaa. Rakentajien työn laatu herätti yleistä keskustelua. Lähes kaikki vastaajat pohtivat vastuunjakoja tilaajan, suunnittelijan ja rakennusurakoitsijan välillä, mikäli ongelmia ilmenisi uusia rakennustuotteita käytettäessä. Osa haastatelluista koki vastuunjaon epäselväksi.

Allaskorroosion tutkimus koettiin haastatteluissa tärkeäksi, vaikka oma-kohtaisia kokemuksia allaskorroosiosta ei olisi ollutkaan. Aihetta ei haastateltujen mukaan ole aikaisemmin juurikaan nostettu esille, mutta sen huomioiminen sekä kokemusten ja ratkaisujen jakaminen puhdistamoiden välillä koettiin tärkeäksi. Suunnittelupuolella hyödynnettiin usein toimistojen aiempia suunnitelmia kohteiden erityispiirteisiin perehtymisen lisäksi. Vapaasti saatavilla olevat oppaat eivät olleet kovinkaan tunnettuja tässä otoksessa. Parhaiten tunnettu korroosiomekanismi oli etenkin verkostoissa esiintyvä rikkivetykorrosio.

4.3.3 Johtopäätöksiä haastattelutuloksista

Seuraavassa on koottu pohdintaa ja johtopäätöksiä haastattelujen tuloksista, vastausten taustalla vaikuttavista tekijöistä ja kerätyn tiedon luotettavuudesta.

Korroosion esiintymisen kannalta allasrakenteet voitiin jakaa karkeasti kahteen tyyppiin, uusiin ja vanhoihin. Vanhoissa altaissa kyllä raportoitiin korroosiosta, mutta ne liitettiin luonnolliseen suunnittelukäyttöön saavuttamiseen. Tietoa vanhojen altaiden korroosio-tilanteesta silloin, kun ne ovat olleet uusia ei välttämättä ole enää saatavissa. Uusien altaiden kohdalla haastatteluiden tulos oli kohtuullisen odotettu. Merkkejä prosessiperäisestä korroosiosta ei juurikaan ollut näkynyt yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. Korroosion vaikutuksien näkymiseen kuluu lähtökohtaisesti useita vuosia, eikä uusimmissa altaissa pitäisi korroosiota siten vielä näkyäkään. Tämän perusteella selvitys puhdistamoiden korroosio-tilanteesta olisi hyvä toistaa uudelleen muutaman vuoden kuluttua ja mahdollisesti jatkaa tutkimusten tekoa säännöllisesti erikokoisilla puhdistamoilla. Näin voitaisiin kerryttää lisää systemaattista tutkimusaineistoa korroosion esiintymisestä puhdistamoilla. Koska rakenteilla on useita uusia puhdistamoita ja vanhoja altaita saneerataan paljon, uusien allasrakenteiden määrä kasvaa nopeasti. Tutkimus kannattaisikin kohdistaa juuri uusiin rakenteisiin.

Haastatteluiden perusteella tietoisuutta korroosioon johtavista syistä puhdistamoilla tulisi lisätä. Vaikka tutkimus korroosiosta mainittiin haastatteluissa hyvin tärkeäksi, muodostui kuitenkin käsitys, että allaskorroosion hillintää ei kuitenkaan nostettu tärkeimmäksi asiaksi puhdistamoiden suunnittelussa ja operoinnissa. Tästä viestivät muun muassa melko suppea tietämys korroosion vaikutuksista nimenomaan allasrakenteissa. Tietämys verkostossa tyypillisistä korroosiomekanismeista oli selkeästi tunnetumpaa, ja haastateltavat nimesivätkin usein rikkivetykorroosion ainakin vaikutuksiltaan tutuksi mekanismiksi. Tärkeää olisi varmaankin nostaa esille juuri puhdistamoilla esiintyvä korroosio.

Esille nousi myös tarve suunnitteluohjeille ja soveltamisoppaille. Haastatteluiden perusteella välittyi, että koottua tietoa esimerkiksi seosaineiden käytössä vesilaitosrakentamisessa ja altaiden pinnoittamisesta ei oikeastaan ollut tarjolla, ja usein päätökset seosaineiden käytöstä tehtiin yksittäisien asiantuntijoiden lausuntojen tai markkinoinnin perusteella. Esimerkiksi altaan pinnoittamispäätöstä tehdessä olisi hyvä olla saatavilla tietoa sen tarpeellisuudesta tietyssä prosessin osassa sekä myös sen negatiivisista puolista, esimerkiksi pinnoitteen hajoamisesta aiheutuvista kustannuksista.

Tärkeää olisi myös tehdä selväksi ero prosessiperäisen korroosion ja rakennusvirheistä johtuvien ongelmien välillä. Altaiden rakennusvaiheista ja sen aikaisista työskentelytavoista oli saatavilla tietoa vain rajoitetusti. Työn laadukkuus voi olla myös koko rakennusalan ja tehostamisen ongelma.

Haastatteluissa esitettyjen taustakysymyksiä perusteella kaikki asiantuntijat olivat työskennelleet alalla pitkään, mitä voidaan pitää vastausten luotettavuutta lisäävänä tekijänä vastaajien pitkäaikaisen kokemuksen vuoksi. Kerätty aineisto jäi kuitenkin loppujen lopuksi melko suppeaksi ja aliedustetuksi varsinkin suunnittelijoiden osalta. Tässä työssä kerätyn haastatteluaineiston tuloksia liekin parasta käsitellä varoivaisuudella. Tulokset toimivat kuitenkin hyvänä pohjana ideoille tarvittavista jatkotutkimuksista. Mahdolliset kirjallisuuskatsauksen ja haastattelujen pohjalta muodostetut suositukset sekä jatkotutkimusten tarpeet on esitetty luvussa 4.4.

4.4 Tarvittavat jatkotutkimukset ja kehitysajat

Tässä luvussa esitetään työssä kerätyn teoreettisen tiedon, käsiteltyjen esimerkkien ja haastattelututkimuksen perusteella muodostettuja suosituksia ja jatkotutkimuksen aiheita. Suositukset esitetään suunnatusti vesihuoltolaitoksien henkilökunnalle, suunnittelijoille ja urakoitsijoille. Tämä diplomityö toimii lähinnä alkukatsauksena allaskorroosion perusmekanismeihin ja tutkimustarpeisiin. Luvun lopussa todetaan tarpeet jatkotutkimukselle.

Vesihuoltolaitoksien henkilökunnalle ilmeisin suositeltu korroosion ehkäisykeino on käsittelyprosessin normaalista toiminnasta huolehtiminen ja prosessihäiriöiden välttäminen. Näin voidaan välttää konsentraatioiden ääriarvoja ja pitää veden laatu mahdollisimman tasaisena ja esimerkiksi ylimääräisen ammoniumpitoisuuden kasvu voidaan välttää. Alkalointi- ja seosaineiden valinnassa tulee huomioida eri kemikaalien vaikutukset alkaliteettiin ja veden happamuuteen. Lisäksi niiden sopivaan annostelumäärään tulee kiinnittää huomiota. Veden laadun jatkuva tutkiminen voi olla hyödyksi ääriarvojen huomaamiseksi. Myös korroosion monitorointi on tärkeää, ja olisikin tärkeä tutkia altaissa esiintyviä räsituksen merkkejä vähintään säännöllisten huoltotoimenpiteiden aikana. Mahdollisesti voisi olla hyödyllistä teetä myös ennakoivia kuntotutkimuksia altaiden betonin rakenteesta ja laadusta. Korroosion hallinnassa on tärkeää huomata sen merkit ajoissa. On myös hyvä olla tietoinen mahdollisista riskirakenteista puhdistamoilla, jotta näihin rakenteisiin osattaisiin kohdistaa tarkempaa huomiota. Puhdistamoilta toivottaisiin myös aktiivisuutta allasrakenteissa esiintyneiden ongelmien esiin tuomisessa sekä niiden järjestelmällistä kirjaamista, jotta muodostuisi esimerkiksi tutkimuskäyttöön soveltuvaa aineistoa. On myös hyvä tunnistaa erilaiset betonin räsitusmekanismit, jotta voidaan paremmin arvioida, onko räsituksen syynä prosessiolot vai esimerkiksi rakennusvirhe.

Tulosten perusteella voidaan arvioida, että allaskorroosion tunnettavuuden lisääminen voisi lisätä kiinnostusta sitä kohtaan. Diplomityön aineistoa kerätessä havaittiin, että tietoa betonirakenteiden allaskorroosiosta käsitellään hyvin erilaisista näkökulmissa vesihuoltoalan ja betonitekniikan materiaaleissa. Täten tarjolla olevat oppaat eivät välttämättä tarjoa kattavaa kokonaiskuvaa betonisissa allasrakenteissa esiintyvistä korroosiosta.

Seikkaperäisen oppaan kokoaminen voisikin olla hyödyllistä. Myös jo julkaistujen oppaiden tietoa voitaisiin päivittää vastaamaan nykyisin ja tulevaisuudessa käytössä olevia vedenkäsittelyprosesseja. Uudistettujen painosten julkaisu voisi myös tuoda aihepiirille tärkeää näkyvyyttä. Olisi lisäksi tärkeää, että tarjolla olisi yksityiskohtaisempaa tietoa ammattilaisille, kuin myös selkeää perustietoa alan opiskelijoille.

Myös suunnittelijoille tulisi olla tarjolla laadukasta, ajantasaista tietoa allaskorroosiosta ja siitä, miten sen vaikutus tulee ottaa huomioon suunnittelussa. Haastattelujen perusteella huomattiin, että juuri puhdistamoilla esiintyvät korroosiotyypit ja prosessivesien vaikutus betoniin kohdistuvaan rasitukseen eivät välttämättä ole suunnittelijoille täysin selviä. Aiheen tiimoilta voitaisiin järjestää esimerkiksi koulutuksia ja julkaista tietoa aiheesta esimerkiksi alan lehdissä. Suunnittelijoille olisi tärkeä tarjota myös ajankohtaista tietoa allasrakentamiseen sopivista betonituotteista. Haastattelujen perusteella huomattiin, että esimerkiksi betonin lisäaineiden käytössä nojataan vahvasti markkinoijan antamiin tietoihin, sillä yleisesti saatavilla olevaa kirjallisuutta aiheesta on tarjolla rajallisesti. Olisi tärkeää, että tarjolla olisi tutkittua tietoa esimerkiksi juuri lisäaineiden käytöstä allasrakentamisessa. Kuten seosaineiden käsittelyn yhteydessä todettiin, seosaineiden tarkkoja koostumuksia ei tarvitse ilmoittaa. Ominaisuudet olisi kuitenkin hyvä tuntea, jotta osattaisiin arvioida niiden sopivuutta allasrakentamiseen. Rakennusalan väitevalvonta ei ole vielä niin säädeltyä kuin esimerkiksi lääke-markkinointi. Tuotteiden turvallisuudesta ja toimivuudesta ei siis välttämättä markkinoijan toimesta esitetä kaikkea tietoa. Markkinoitu tuote voi osoittautua kalliiksi sen laatuun nähden tai tuote voi olla tehottomampi kuin markkinointi väittää.

Rakennusalan ammattilaisille tulisi tarjota tietoa vedenkäsittelyn prosesseista, jotta valittu betoniresepti olisi mahdollisimman toimiva huomioon ottaen allasrakenteisiin kohdistuvan rasituksen. Huomiota voitaisiin kiinnittää myös rakennusvalvontaan ja työn laadukkuuteen, jotta välttyttäisiin rakennusvirheiltä. Etenkin jätevedenpuhdistamoilla käytössä olevat tiiviit ja mahdollisesti sulfaatinkestävät betonilaadut vaativat taitoa rakentajalta.

Jatkotutkimus kannattaisi keskittää etenkin uusiin rakenteisiin. Kuten teoriaosuudessa todettiin, vesilaitosympäristö on betonirakenteille aina aggressiivinen, joten on hyväksyttävää, että rakenteissa tulee olemaan kulumaa. Mielenkiintoisimpia ovatkin tapaukset, joissa betonin korroosio on edennyt hyvin nopeasti. Koska useat suomalaiset puhdistamot ovat saneeraus- ja rakenteilla, olisi hyvä aloittaa seuranta allaskorroosiosta ja siihen vaikuttavista mekanismeista. Olisi myös tärkeä tutkia eri betonireseptien käyttöä etenkin suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Tällainen tutkimus voitaisiin toteuttaa esimerkiksi koekappaleita ja jatkuvaa vedenlaadunseurantaa hyödyntämällä.

Mielenkiintoisimpiin tutkimuskohteisiin lukeutuu myös mikrobiologinen biofilmien avustuksella tapahtuva korroosio, joka ei ole peräisin

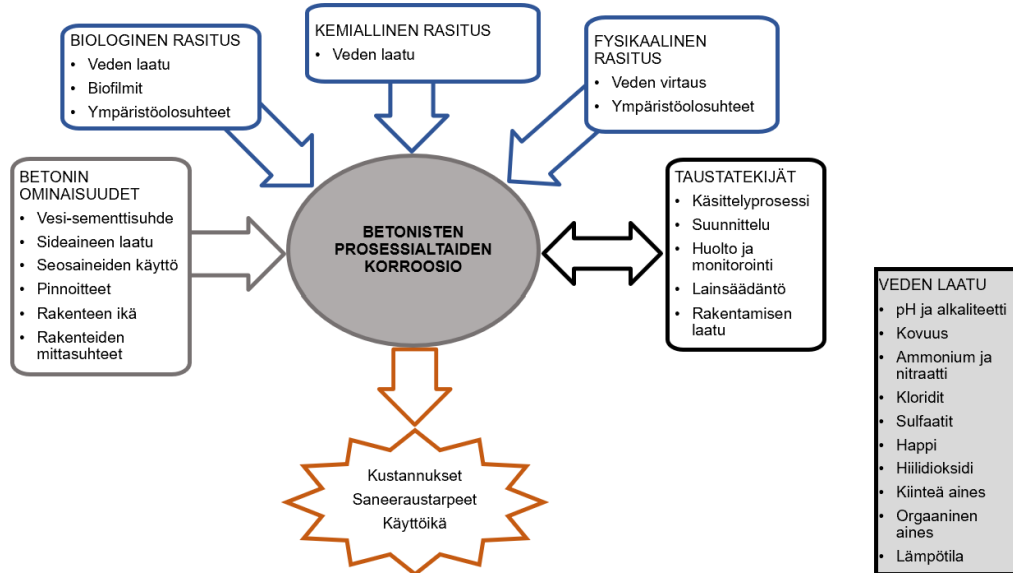
viemäverkostosta. Kirjallisuus tuntee ilmiön toistaiseksi heikosti. Mikrobiologisen korroosion tutkimustarvetta ovat ilmaisseet muutamat tutkimusryhmät (Lewi ym, 2020; Leeman ym 2010b.). Biologisen korroosion vaikutuksista betoniin on myös kehitetty matemaattisia malleja (Fedosov, 2020). Matemaattisia malleja on kehitetty saman tutkimusryhmän toimesta myös fyysikaaliselle ja kemialliselle korroosiolle (Fedosov, 2017). Erilaisia malleja tulisi kuitenkin vielä kehittää, jotta niitä voitaisiin alkaa hyödyntää esimerkiksi jätevedenpuhdistamoiden mallintamisessa. Kehitystyö voisi kuitenkin olla kannattavaa, sillä koekappaleisiin perustuva tutkimus voi olla työlästä ja hidasta.

Tarkastelua voisi laajentaa koskemaan myös talousvedettä tuottavia laitteita. Diplomityön aineistoa koottaessa yritettiin löytää esimerkkejä korroosiosta myös talousvettä tuottavilta laitoksilta, mutta tietoa oli tarjolla hyvin rajoitetusti. Aiheesta löytyvä tutkimus painottui etenkin metallisten verkostomateriaalien korroosioon.

5 Yhteenveto

Tämän diplomityön ensisijaisena tavoitteena oli selvittää vedenkäsittelyprosessien, veden laadun ja betonin ominaisuuksien yhteyksiä allasrakenteisiin kohdistuvaan rasitukseen ja korroosioon. Työn toisena tavoitteena oli karsoittaa jätevedenpuhdistamoiden prosessialtaiden kuntoa ja selvittää, esiintyykö prosessialtaissa merkittäviä korroosion merkkejä. Näistä tavoitteista muodostettiin kaksi pääasiallista tutkimuskysymystä, joihin haettiin vastauksia kattavan kirjallisuuskatsauksen sekä asiantuntijahaastatteluiden avulla. Työssä keskityttiin suomalaisiin puhdistamoihin.

Työssä analysoitiin prosessialtaisiin kohdistuvaan rasitukseen vaikuttavia tekijöitä useasta näkökulmasta. Kuvassa 14 on nostettu esille työssä keskeisiksi todettuja veden laatuun ja betonin ominaisuuksiin liittyviä seikkoja. Lisäksi kuvassa on osoitettu laajempi taustakonteksti. Taustatekijät ovat merkittäviä korroosioon välillisesti vaikuttavia seikkoja. Näihin lukeutuvat esimerkiksi puhdistamolla käytössä oleva puhdistusprosessi, ajankohtainen lainsäädäntö ja suunnittelun laatu. Allaskorroosio on esitetty potentiaalisena ongelmana, joka voi aiheuttaa merkittäviä lisäkustannuksia puhdistamoille.



Kuva 14. Yhteenveto diplomityössä tunnistetuista betonisten prosessialtaiden korroosioon vaikuttavista tekijöistä.

Työn teoriaosaan koottiin suomenkielistä tietoa prosessialtaiden korroosion taustalla olevista mekanismeista ja muodostettiin yhteys prosessialtaissa esiintyvän korroosion ja betonin rasitusmekanismien välille. Teoria esitettiin tiivistetysti mutta kattavasti taustoittamalla ja esittämällä perusteet kustakin kuvassa 14 esitetystä aihekokonaisuudesta. Yleiskuvan muodostamisen ohella teoriataustan esittely oli tärkeää rasitusmekanismien tunnistamiseksi ja soveltamiseksi jätevedenpuhdistamon kaltaisessa kompleksisessä ympäristössä. Työstä tehtiin silti helppolukuinen ja helposti ymmärrettävä sitä eri aloilta lähestyville.

Julkisesti saatavilla olevien prosessialtaiden suunnitteluoppaiden todettiin katsauksen perusteella olevan päivityksen tarpeessa. Arvioidut teokset todettiin joko asiasisällöltään vanhentuneiksi tai laajuudeltaan riittämättömiksi. Suunnittelukirjallisuudesta ei löydetty yhtä kattavaa opasta, joka esittelisi nykyaikaisia prosesseja ja betonilta vaadittavia ominaisuuksia. Päivitettyjen soveltamisoppaiden tekemistä suositellaan; laadukas opas sisältäisi tietoa prosessialtaisiin kohdistuvasta rasituksesta, veden laatuominaisuuksien vaikutuksista betonin kestävyyteen, sekä suosituksia sopivan betonin valinnasta. Ohjeita kaivattaisiin myös betonin seosaineiden valintaan sekä pinnoitteiden käyttöön vesilaitosympäristössä. Etenkin pinnoitteiden soveltuvuudesta ja käytöstä prosessialtaissa tarvittaisiin lisätietoa, sillä nykyiset suositukset perustuvat lähinnä alustavaan tutkimukseen ja myyntitietoihin. Myös vähähiilinen rakentaminen voitaisiin huomioida ohjeissa, jotta ohjeet säilyisivät käytössä pitkään. Oppaiden kattavuuden ja tiedon oikeellisuuden varmistamiseksi ne tulisi päivittää moniammatillisen tiimin ja osaamisen voimin.

Kirjallisuuskatsauksen ja haastattelutulosten pohjalta muodostettiin suosituksia puhdistamoilla esiintyvän allaskorroosion ehkäisemiseksi. Puhdistamohenkilökunnalle suositeltiin prosessiolejojen tarkkailua ja korroosion merkkien monitorointia. Suunnittelijoille kohdistetuissa suosituksissa korostettiin huolellista perehtymistä kulloiseenkin rakennuskohteeseen, jotta toimivia räätälöityjä ratkaisuja saataisiin aikaan. Rakennusalan ammattilaisille suositeltiin erityisesti hyvien rakentamisperiaatteiden noudattamista. Allaskorroosion tunnettavuuden lisäämistä pidettiin yhtenä tärkeimmistä yksittäisistä keinoista korroosion ehkäisyssä. Lisäkoulutukset ja esitelmät aiheesta voisivat hyödyttää kaikkia mainittuja ammattiryhmiä.

Haastattelututkimusten perusteella useilla suomalaisilla puhdistamoilla esiintyy allaskorroosiota. Allasrakenteet jaettiin karkeasti uusiin ja vanhoihin rakenteisiin. Osassa vanhimmista altaista esiintyi pitkälle edennyttä korroosiota, jota pidettiin altaan käyttöiän täyttymisen luonnollisena seurauksena. Uusimmissa noin muutaman vuoden ikäisissä altaissa ei korroosiota esiintynyt. Uudehkoissa noin 15 vuoden ikäisissä altaissa esille nousi tapauksia, joissa korroosio oli edennyt aggressiivisesti jo muutamassa vuodessa. Tulosten perusteella tutkimusta kannattaisi keskittää uusiin puhdistamoihin ja rakenteisiin. Optimitapauksessa esimerkiksi betonin laadun seuranta,

koekappaleiden käyttö ja veden laadun jatkuva mittaus voitaisiin aloittaa hyvin pian rakenteen valmistuttua, jolloin tiedot suunnittelun ja rakentamisen laadusta ovat vielä saatavilla.

Asiantuntijahaastattelut täydensivät työn teoriaosuutta, minkä lisäksi niistä saatiin aiheita tulevalle tutkimukselle. Haastatteluotos jäi suhteellisen pieneksi, joten tässä työssä saatuja tuloksia kannattaa arvioida varauksella ja kattavampi kuva suomalaisten ja mahdollisesti myös pohjoismaalaisten jätevedenpuhdistuslaitosten tilasta on edelleen tarpeen muodostaa. Asiantuntijahaastattelua voidaan kuitenkin pitää hyvänä tapana tutkia ja kartoittaa korroosiotilannetta puhdistamoilla. Haastatteluissa esille nostetut kokemukset hyvästä rakentamisesta, suunnittelijoiden kyvykkyydestä ja vastuiden jaosta ovat seikkoja, joita ei niiden subjektiivisuuden takia voida tarkastella perusteellisesti pelkän teorian pohjalta.

Diplomityönä toteutettua katsausta vesihuollon betonisten allasrakenteiden korroosioon liittyviin syihin, seurauksiin ja ratkaisuihin voidaan pitää alkuselvityksenä syvällisemmälle tutkimukselle allaskorroosion mekanismeista. Tutkimuskysymyksiin pystyttiin työn laajuuden rajoissa vastaamaan. Työtä tehdessä aiheen poikkitieteellisyys tuli toistuvasti esille; objektiivisen näkemyksen muodostamiseksi tulee osallistaa niin vesihuoltoalan kuin rakennusalankin kentällä työskenteleviä ammattilaisia sekä kyseisten alojen tutkijoita. Laaja-alainen ja poikkitieteellinen tutkimus on tarpeen monimutkaisen aiheen eri puolien ymmärtämiseksi.

Lähdeluettelo

A 1352/2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. Annettu 17.11.2015. Viitattu 12.1.2023.
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20151352>

A 2/2023. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista annetun sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen muuttamisesta. Viitattu 12.1.2023.
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230002#Pidm45053758447472>

AFRY Finland Oy. (2022). Suunnitteluohjeet kemiallisen saostuksen toimintavarmuuden parantamiseksi vesihuollossa. *Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 74*. Helsinki: Suomen Vesilaitosyhdistys ry. ISBN 978-952-6697-72-7.

Ahonen M., Kaunisto T., Mäkinen R., Hatakka T., Vesterbacka P., Zacheus O., Keinänen-Toivola M. (2008). Suomalaisen talousveden laatu raakavedestä kuluttajan hanaan vuosina 1999–2007. *Vesi-Instituutin julkaisuja 4*. Turku: Vesi-Instituutti. ISBN 978-952-99840-7-7 (elektroninen julkaisu).

Ahkola, H. (2020). Passiivinäytteenotto pilaantuneiden pohjavesialueiden tutkimisessa ja seurannassa. PASSIIVI-hankkeen-loppuraportti. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja 24*. Suomen ympäristökeskus. ISBN 978-952-11-5178-1.

Andersen J., Madsen J. (2022). Anlægsarbejder vanskeliggør CO2 neutralitet i vandsektoren. Envidan A/S. Viitattu 2.1.2023
<https://www.danva.dk/nyheder/2022/anlaegsarbejder-vanskeliggoer-co2-neutralitet-i-vandsektoren/>

Anwar A., Liu X., Zhang L. (2022). Biogenic corrosion of cementitious composite in wastewater sewerage system—A review. *Process Safety and Environmental Protection*. 165, 545–585.
doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.030

Autiola M., Suonperä E., Suvanto S., Napari M., Nylund M., Kupiainen V., Vienonen S., Forsman J., Suikkanen T., Auri J., Boman A., Mattbäck S. (2022). Happamien sulfaattimaiden kansallinen opas rakennushankkeisiin Opas happamien sulfaattimaiden huomioimiseen ja vaikutusten hallintaan. *Ympäristöministeriön julkaisuja 3*. Helsinki: Ympäristöministeriö. ISBN 978-952-361-222-8 (elektroninen julkaisu).

Bischof S., Bühlmann B., Hangartner W., Huggenberger U., Lunk P., Lee-
mann A., Mühlethaler U., Strahm K., Von Schulthess R., Widmer H. (2010).
Concrete erosion in biological ponds treatment plants. *Cahier technique*,
01, Suisse: Cemsuisse.

Bennett D., Nixon R. (2016). *Corrosion and Materials Fundamentals for
Engineers in Wastewater Treatment Plants & Collection Systems* (3.
painos). Houston, Texas: NACE International.
ISBN 978-1-57590-327-9.

Cho K. S., Mori T. (1995). A newly isolated fungus participates in the corro-
sion of concrete sewer pipes. *Water Science and Technology*, 31 (7), 263–
271.
[doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00343-L](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00343-L)

COM/2022/541. Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi yh-
dyskuntajätevesien käsittelystä. Viitattu 12.1.2023.
[https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cel-
lar:fc078ec8-55f7-11ed-92ed-
01aa75ed71a1.0023.02/DOC_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc078ec8-55f7-11ed-92ed-01aa75ed71a1.0023.02/DOC_1&format=PDF)

Direktiivi 2020/2184/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi ih-
misten käyttöön tarkoitetun veden laadusta. Euroopan unionin virallinen
lehti 23.12.2020. Viitattu 2.1.2023.

Duer A. (2021). Kvaliteten af det danske drikkevand Rapporten oplyser om
kvaliteten af drikkevand leveret af de store vandforsyninger i årene 2017-
2019. *Grundvand og drikkevand* 3. Miljøstyrelsen.
ISBN 978-87-7038-251-9.

Ekholm H. (2013). Jätevedenpuhdistamot – suunnittelu, toteutus, toiminta.
Diplomityö. Espoo: Aalto-yliopisto.

Englinton M. (2003). Resistance of Concrete to Destructive Agencies. *Lea's
Chemistry of Cement and Concrete*, 299–342.
doi.org/10.1016/B978-0-7506-6256-7.X5007-3

Fedosov S., Loginova S. (2020). Mathematical model of concrete biological
corrosion. *Magazine of Civil Engineering*, 99(7), 9906.
doi.org/10.18720/MCE.99.6

Fedosov S., Roumyantseva V., Krasilnikov I., Narmania B. (2017). Formulation of mathematical problem describing physical and chemical processes at concrete corrosion. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 13(2), 45–49.

Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489-1498.
doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021

Grengg C., Mittermayr F., Ukrainczyk N., Koraimann G., Kienesberger S., Dietzel M. (2018). Advances in concrete materials for sewer systems affected by microbial induced concrete corrosion: A review. *Water Research* 134, 341–352.
doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.043

Hauduc H., Wadhawan T., Takács I., Johnson B., Bott C., Ward M. (2019). Incorporating sulfur reactions and interactions with iron and phosphorus into a general plant-wide model. *Water Science and Technology*, 79 (1), 26–34.
doi.org/10.2166/wst.2018.482

Helsingin seudun ympäristöpalvelut – kuntayhtymä HSY. (2022). Jätevedenpuhdistus pääkaupunkiseudulla 2021 – Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamot. *HSY:n julkaisuja 1/2022*. ISBN: 978-952-7146-62-0 (elektroninen julkaisu).

Hyvärinen M., Suoninen E., Vuori J. (2021). Haastattelut. *Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja*. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoaarkisto. Viitattu 10.02.2023
<https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/laadullisen-tutkimuksen-aineistot/haastattelut/>

Jacobsson M. (2016). Betongskador i vattenverk. *Rapport 2016-18*. Bromma: Svenskt Vatten AB.

Jedidi, M., Benjeddou, O. (2018). Chemical causes of concrete degradation. *MOJ Civil Eng*, 4(1), 40–46.
doi.org/10.15406/mojce.2018.04.00095

Jokela, P., Eskola T., Heinonen T., Tantt U., Tyrväinen J., Artimo A. (2017). Raw Water Quality and Pretreatment in Managed Aquifer Recharge for Drinking Water Production in Finland. *Water* 9 (2), 138.
doi.org/10.3390/w9020138

Juenger M.C.G., Winnefeld F., Provis J.L., Ideker J.H. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41 (12), 1232–1243.

doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012

Juhila K. (2021). Koodaaminen. *Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja*. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Viitattu 10.02.2023

<https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/analyysitavan-valinta-ja-yleiset-analyysitavat/koodaaminen/>

Kaunisto T., Latva M., Engelsen C., Kloppenborg S., Rod O., Gulbrandsen-Dahl S. (2017). MaiD Nordic drinking water quality, A Nordic Innovation project. Report 1. Oslo: Nordic Innovation.

Karttunen, E. (2004). *Vesihuolto II*. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto ry.

Katko, T. (2013). *Hanaa! Suomen vesihuolto: kehitys ja yhteiskunnallinen merkitys*. Helsinki: Suomen Vesilaitosyhdistys ry.

Kekki T., Kaunisto T., Keinänen-Toivola M., Luntamo M. (2008). Vesijohtomateriaalien vauriot ja käyttöikä Suomessa. *Vesi-Instituutin julkaisuja 3*. Turku: Vesi-Instituutti. ISBN 978-952-99840-5-3 (elektroninen julkaisu).

Kerkhoff B. (2007). Effects of Substances on Concrete and Guide to Protective Treatments. Concrete technology. Washington, DC, USA: Portland Cement Association. ISBN 0-89312-193-2.

Lahti H., Vieno N., Kaunisto T. (2011). Talousveden käsittelykemikaalit ja standardisointi. *Vesi-Instituutin raportteja 3*. Rauma: Vesi-Instituutti Wander. ISBN 978-952-67166-6-4.

Laitinen J. Nieminen J. Saarinen R. Toivikko S. (2014). Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT) - Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot. *Suomen ympäristö, 3*. Ympäristöministeriö. ISBN 978-952-11-4286-4.

Leemann A., Lothenbach B., Siegrist H., Hoffmann, C. (2010a). Influence of water hardness on concrete surface deterioration caused by nitrifying biofilms in wastewater treatment plants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64, 489–498.

doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.03.009

Leemann A., Lothenbach B., Hoffmann C. (2010b). Biologically induced concrete deterioration in a wastewater treatment plant assessed by combining microstructural analysis with thermodynamic modelling. *Cem. Concr. Res.* 40, 1157–1164.

Lewi J., Gueguen-Minerbe M., Mailler R., Peyre Lavigne M., Nour I., Meche P., Azimi S., Rocher V., Chaussadent T. (2020). Deterioration of cementitious materials in the nitrification structures of wastewater treatment plants. *Matériaux & Techniques*, 108, 306.

Lounais-Suomen vesi ja ympäristötutkimus Oy. (2022). Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon tarkkailututkimus. Vuosiraportti.

Mannonen R. (2023). Henkilökohtainen tiedonanto. Videohaastattelu 24.3.2023.

Mannonen R. (2022). Perustietoa betonista. Betoniluento 13.9.2022. Espoo, Aalto-yliopisto.

Mannonen R. (2019). Jätevedenpuhdistamon betonin rapautuminen. Lausunto, 9.10.2019.

Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). (2011). Benefits of Investing in Water and Sanitation: An OECD Perspective. OECD Studies on Water. Paris: OECD Publishing.
doi.org/10.1787/9789264100817-en

Ortiz J., Aguado A., Agulló L., & García T. (2005). Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: Simulation of hot and cold weather conditions. *Cement and Concrete Research*, 35 (10), 1970–1979.
doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.01.004

Polski Komitet Normalizacyjny. (2005). PN-EN 13529:2005. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of resistance to severe chemical attack.

Pulkkinen K. (2013). Betonin pimeä puoli. *Kemia-lehti*, 7, 12–17.

Punkki J., Ojala T. (2018). Vesi-sementtisuhde 100 vuotta. *Betoni*, 1/2018, 78–83.

Punkki J. (2017). Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu. *Betoni*, 2/2017, 66–71.

Rahman M., Bassuoni M. (2014). Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation, *Construction and Building Materials*, 73, 652–662.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.034

Rocher V., Paffoni C., Goncalves A., Azimi S., Legaigneur V. (2009). Exploitation des unités de biofiltration des eaux résiduaires urbaines. Gestion des périodes d'arrêt. *L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances*, 325, 59–67.

Samorka. (2022). Vatnsveitur. Viitattu 12.1.2023

<https://samorka.is/vatnsveitur/#1470847121815-d53739de-1b4b>

Scanlon J. M. (1997). Controlling concrete during hot and cold weather. *Concrete International*, 19(6), 52–58.

Sherief M., Hassan A. A., Hamouda M., Maraqa M. (2022). Analysis of flowrate, sulfate, and total sulfur pattern in wastewater inlet tanks for H₂S management. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 9 (1), AAW-03-1-AAW-03-6.

[doi.org/10.14455/ISEC.2022.9\(1\).AAW-03](https://doi.org/10.14455/ISEC.2022.9(1).AAW-03)

Skjelkvåle B.L., Henriksen A., Jónsson G.S., Mannio J., Wilander A., Jensen J.P., Fjeld E., Lien L. (2001). Chemistry of lakes in the Nordic region - Denmark, Finland with Åland, Iceland, Norway with Svalbard and Bear Island, and Sweden. *NIVA-report*, 4391. Oslo, Norway: Norwegian Institute for Water Research.

Sogaard E., Madsen H. (2013). Groundwater Chemistry and Treatment: Application to Danish Waterworks. *Water Treatment* (1. painos). 223–246.

doi.org/10.5772/54166.

Sosiaali- ja terveystieteen lupa- ja valvontavirasto (Valvira). (2020). Talousvesiasetuksen soveltamisohje. Osa III, Enimmäisarvojen perusteet.

Dnro V/33102/2020.

Steinberg M., Lyngstad T.M., Nordheim C.F. (2021). Rapportering av data for vannforsyningssystemer i Norge for 2020. Oslo, Norway: Folkehelseinstituttet. ISBN 978-82-8406-270-9 (elektroninen julkaisu).

Stuetz R., Stephenson T. (2019). *Principles of Water and Wastewater Treatment Processes*. London, UK: IWA Publishing. ISBN 1843390264.

Suomen Betoniyhdistys ry. (2016). *by 68 Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu- opas suunnittelijoille 2016*. Helsinki: BY-koulutus Oy. ISBN 978-952-68619-1-3.

Suomen Betoniyhdistys ry. (2017). *by 65 Betoninormit 2016* (3. painos). Helsinki: BY-koulutus Oy. ISBN 978-952-68068-4-6.

Suomen Betoniyhdistys ry. (2018a). *by 201 Betonitekniikan oppikirja 2018*. Helsinki: BY-koulutus Oy. ISBN 978-952-68619-4-4.

Suomen Betoniyhdistys ry. (2018b). *by 66 Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje 2018*. Helsinki: BY-koulutus Oy. ISBN 978-952-68068-9-1.

Suomen rakennusinsinöörien liitto. (2003). RIL 124-1. *Vesihuolto. I*. Helsinki. ISBN 951-758-431-8.

Suomen rakennusinsinöörien liitto. (2004). RIL 124-2. *Vesihuolto II*. Helsinki. ISBN 951-758-438-5.

Suomen standardisoimisliitto. (2019). SFS 7022:2019. *Betoni*. Standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

Suomen standardisoimisliitto. (2013). SFS-EN 450-1 *Betoniin käytettävä lentotuhka. Osa 1: Määritelmät, laatuvaatimukset ja vaatimuksenmukaisuus*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

Suomen standardisoimisliitto. (2012). SFS-EN 197-1. *Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

Suomen standardisoimisliitto (2009). SFS-EN 13263-1+A1 *Betoniin käytettävä silika. Osa 1: määritelmät, vaatimukset ja vaatimustenmukaisuus*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

Suomen standardisoimisliitto. (2006). SFS-EN 15167-1 *Betoniin, laastiin ja juotuslaastin käytettävä jauhettu granuloitu masuunikuona. Osa 1: Määritelmät, määrittelyt ja vaatimuksenmukaisuus*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

Svensktvatten. (2022). Produktion av dricksvatten. Viitattu 12.1.2023
<https://www.svensktvatten.se/fakta-om-vatten/dricksvat-tenfakta/produktion-av-dricksvatten/>

Tuomi J., Sarajärvi A. (2018). *Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi* (uud. laitos). Helsinki: Tammi.

Valtari, M. (2020). Concrete corrosion in Kakolanmäki WWTP. Study Report. Espoo: Aalto University.

Vesi- ja viemärlaitosyhdisty VVY. (2002). Kalkkikivialkalointi – opas veden syövyttävyyden vähentämiseksi. Helsinki. ISBN 952-5000-35-4.

Viirola, H., Raivio, P., (2000). Portlandsementin hydrataatio. *VTT tiedotteita, 2041*. Espoo: VTT Rakennustekniikka.

Vuori J. (2021). Laadullinen sisällönanalyysi. *Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja*. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Viitattu 10.02.2023.
<https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/analyysitavan-valinta-ja-yleiset-analyysitavat/laadullinen-sisallönanalyysi/>

Vuorikoski, S. (2022). Henkilökohtainen tiedonanto. Haastattelu sähköpostitse, 20.9.2022.

Water Environment Federation. (2010). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. Volume 1: Planning and Configuration of Wastewater Treatment Plants (5. painos). Alexandria, VA, USA: WEF Press. ISBN 978-0-07-166359-5.

Wouters P. (2018). Evaluation and Repair of Alkali-Silica Reaction Damage to Existing Concrete Wastewater Infrastructure. *Forensic Engineering, Forging Forensic Frontiers*, 726-735. American Society of Civil Engineers. doi.org/10.1061/9780784482018.070

Woyciechowski P., Łukowski P., Szmigiera E., Adamczewski G., Chilmon K., Spodzieja S. (2021). Concrete corrosion in a wastewater treatment plant – A comprehensive case study, *Construction and Building Materials*, 303, 124388. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124388

Yhdistyneet kansakunnat. (2022). The Sustainable Development Goals Report 2022 - July 2022. New York, USA: United Nations Department of Economic and Social Affairs.

doi.org/10.18356/9789210018098

Zacheus O. (2022). *Yhteenveto suurten vedenjakelualueiden talousveden valvonnasta ja laadusta vuosina 2017–2019*. Helsinki, Suomi: Terveyden ja hyvinvoinnin laitos.

Liite A. Puhdistamoiden edustajille kohdennetut haastattelukysymykset

Puhdistamoiden edustajille suunnattuja teemahaastattelujen tukena käytettäviä kysymyksiä.

1. Taustakysymykset

1.1 Mikä on nykyinen työtehtäväsi ja kauanko olet työskennellyt nykyisissä tehtävissäsi?

1.2 Mikä on koulutustaustasi?

2. Kuvaile puhdistamon prosessia ja historiaa lyhyesti.

3. Onko puhdistamolla saneerattu tai rakennettu uusia prosessialtaita noin 15 vuoden sisällä?

4. Oletko työtehtäviesi puitteissa havainnut ongelmia betonisissa vedenkäsittelyn allasrakenteissa (esimerkiksi betonipinnan halkeilu, ongelmat betonin lujuuden kehityksessä, merkit altaiden kemiallisesta korroosiosta)?

4.1 Missä kohdassa prosessia ongelmat ovat ilmenneet (esimerkiksi esikäsittely, aktiivilieteprosessi, tertiäärikäsittely, lietteenkäsittely)?

4.2 Nimeä altistunut rakenne/rakenteet ja vaurion sijaintikohta mahdollisimman tarkasti (esimerkiksi ilmastusaltaan roiskevyöhyke)

4.3 Kuvaile ongelmien laatua omin sanoin

4.4 Miten ongelmia on ratkottu?

5. Kuinka aktiivisesti suunnittelija on osallistunut rakentamisen aikana ja sen jälkeen esiintyneiden ongelmien ratkaisuun?

6. Miten sujuvaksi koet yhteistyön puhdistamoiden, suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden välillä?

Liite B. Prosessialtaiden suunnittelijoille kohdenne- tut haastattelukysymykset

Prosessialtaiden suunnittelijoille suunnattuja teemahaastattelujen
tukena käytettäviä kysymyksiä.

1. Taustakysymykset
 - 1.1 Mikä on nykyinen työtehtäväsi ja kauanko olet työskennellyt nykyisissä tehtävissäsi?
 - 1.2 Mikä on koulutustaustasi?
2. Oletko työtehtäviesi puitteissa havainnut ongelmia betonisissa vedenkäsittelyn allasrakenteissa (esimerkiksi betonipinnan halkeilu, ongelmat betonin lujuuden kehityksessä, merkit altaiden kemiallisesta korroosiosta)?
 - 2.1 Missä kohdassa prosessia ongelmat ovat ilmenneet (esimerkiksi esikäsitteily, aktiivilieteprosessi, tertiäärikäsittely, lietteenkäsittely)?
 - 2.2 Nimeä altistunut rakenne/rakenteet ja vaurion sijainti-kohta mahdollisimman tarkasti (esimerkiksi ilmastusaltaan roiskevyöhyke)
 - 2.3 Kuvaile ongelmien laatua omin sanoin
 - 2.4 Miten ongelmia on ratkottu?
3. Kuinka hyvin koet tuntevasi nykyiset talous- ja jätevedenkäsittelyprosessit ja miten otat ne huomioon rakenteiden suunnittelutyössä?
4. Mitä kirjallisuusmateriaalia hyödynnät vesihuoltoaltaiden suunnittelussa?
5. Mikä on suunnitteluohjeiden rooli ja missä määrin niistä voidaan poiketa? Missä tilanteissa ohjeista poiketaan?
6. Luotatko allasrakenteiden suunnitteluohjeiden ajantasaisuuteen?
7. Miten sujuvaksi koet yhteistyön puhdistamoiden, suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden välillä?
8. Kuinka hyvin tunnet tarjolla olevat betoniin lisättävien sidos- ja lisäainesten sekä pinnoitusainesten ominaisuudet?
9. Oletko perehtynyt uudenlaisiin vaihtoehtoihin betonituotteita valitessa?
10. Onko mielestäsi vedenkäsittelylaitosten betonirakentamisesta tarjolla tarpeeksi tietoa? Halutessasi voit mainita puutteita ja tarpeita.

Liite C. Urakoitsijoille kohdennetut haastattelukysymykset

Urakoitsijoille suunnattuja teemahaastattelujen
tukena käytettäviä kysymyksiä.

1. Taustakysymykset
 - 1.1 Mikä on nykyinen työtehtäväsi ja kauanko olet työskennellyt nykyisissä tehtävissäsi?
 - 1.2 Mikä on koulutustaustasi?
2. Oletko työtehtäviesi puitteissa havainnut ongelmia betonisissa vedenkäsittelyn allasrakenteissa (esimerkiksi betonipinnan halkeilu, ongelmat betonin lujuuden kehityksessä, merkit altaiden kemiallisesta korroosiosta)?
 - 2.1 Missä kohdassa prosessia ongelmat ovat ilmenneet (esimerkiksi esikäsittely, aktiivilieteprosessi, tertiäärikäsittely, lietteenkäsittely)?
 - 2.2 Nimeä altistunut rakenne/rakenteet ja vaurion sijaintikohta mahdollisimman tarkasti (esimerkiksi ilmastusaltaan roiskevyöhyke)
 - 2.3 Kuvaile ongelmien laatua omin sanoin
 - 2.4 Miten ongelmia on ratkottu?
3. Kuinka hyvin koet tuntevasi nykyiset talous- ja jätevedenkäsittelyprosessit?
4. Luotatko allasrakenteiden suunnitteluohjeiden ajantasaisuuteen?
5. Miten sujuvaksi koet yhteistyön puhdistamoiden, suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden välillä?
6. Kuinka hyvin tunnet tarjolla olevat betoniin lisättävien sidos- ja lisäaineiden sekä pinnoitusaineiden ominaisuudet?
7. Oletko perehtynyt uudenlaisiin vaihtoehtoihin betonituotteita valitessa? (esimerkiksi vähähiilinen sementti tai mikrobitoimintaa hidastavat lisäaineet)
8. Onko mielestäsi vedenkäsittelylaitosten betonirakentamisesta tarjolla tarpeeksi tietoa? Halutessasi voit mainita puutteita ja tarpeita.