



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Riku Uusimaa

# Betonirakenteiden tyypilliset vauriot sellu- ja paperitehtaissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennetekniikka

Insinöörityö

27.4.2020

Tekijä Otsikko	Riku Uusimaa Betonirakenteiden tyypilliset vauriot sellu- ja paperitehtaissa
Sivumäärä Aika	56 sivua 27.4.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Manager, Sales and Development Lotta Råberg Lehtori Juha Virtanen
<p>Tämän insinööriyön toimeksiantajana toimi AFRY Finland Oy. ÅF ja Pöyry yhdistyivät vuoden 2019 helmikuussa, jolloin syntyi globaali suunnittelu- ja konsulttiyhtiö AFRY. Projektin aiheeksi muodostui betonirakenteiden tyypilliset vauriot sellu- ja paperitehtaissa.</p> <p>Projektin tarkoituksena oli koota yhteen sellu- ja paperiteollisuuden tyypillisiä vaurioita, joita voidaan ehkäistä jo suunnitteluvaiheessa. Tavoitteena oli myös kehittää konseptitasoisia ratkaisuja sellutehtaasta havaituille vaurioille.</p> <p>Tutkimusmateriaalina käytettiin standardeja, tieteellisiä julkaisuja sekä tutkimuksia betonin ominaisuuksista ja kestävydestä. Tutkimuksen aikana suoritettiin työmaakäynti eräällä sellutehtaalla Suomessa, josta dokumentoitiin betonirakenteiden vaurioita valokuvien muodossa.</p> <p>Insinööriyön tuloksena syntyi kattava kirjallinen materiaali betonin koostumuksesta ja ominaisuuksista sekä sellu- ja paperiteollisuuden betonirakenteisiin kohdistuvista rasituksista sekä vauriomekanismeista. Lisäksi tuloksena saatiin konseptitasoiset parannusehdotukset sellutehtaalta havaittuihin betonirakenteiden vaurioihin.</p>	
Avainsanat	sellu, teollisuus, betonirakenteet, vauriot,

Author Title Number of Pages Date	Riku Uusimaa Typical Damages of Concrete Structures in Pulp and Paper Mills 56 pages 27 April 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Lotta Råberg, Manager, Sales and Development Juha Virtanen, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis was commissioned by AFRY Finland Ltd. ÅF and Pöyry merged in February 2019 to form the global design and consulting company AFRY. The subject of the project was the typical damages of concrete structures in pulp and paper mills.</p> <p>The purpose of the project was to compile a list of typical damages found in the pulp and paper industry that could be prevented at the design stage. The aim was also to develop concept level solutions for the damages observed at the pulp mill.</p> <p>Standards, scientific publications and studies on the properties and durability of concrete were used as research material. During the study, a site visit was made to a pulp mill in Finland, where damages to concrete structures was documented in the form of photographs.</p> <p>As a result of the thesis, comprehensive written material was created on the composition and properties of concrete, as well as on the stresses on concrete structures in the pulp and paper industry and the damage mechanisms. In addition, the result was concept level suggestions for improvements to the damages in concrete structures observed at the pulp mill.</p>	
Keywords	pulp, concrete design, industry, concrete damages

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Betonin koostumus ja ominaisuudet	2
2.1	Sementti	2
2.1.1	Portlandsementin hydrataatio	3
2.1.2	Sementtityypit	5
2.2	Kiviaines	6
2.3	Vesi	7
2.4	Seosaineet	8
2.4.1	Lentotuhka	8
2.4.2	Masuunikuona	9
2.4.3	Silika	10
2.5	Lisäaineet	11
2.6	Huokosrakenne	12
2.7	Lujuus	13
3	Betonin rasitusluokat	14
4	Betonin tyypilliset rasitukset teollisuudessa	18
4.1	Fysikaaliset ja mekaaniset rasitukset	18
4.1.1	Pakkasrasitus	18
4.1.2	Lämpötilarasitus	19
4.1.3	Dynaamiset rasitukset	20
4.2	Kemialliset rasitukset	20
4.2.1	Alkalikiviainesreaktio	20
4.2.2	Myöhästynyt ettringiitin muodostuminen	22
4.2.3	Aggressiiviset aineet	22
5	Rasitusten aiheuttamat vauriomekanismit	25
5.1	Raudoitteiden korroosio	25
5.2	Halkeamat	27

5.3	Betonipinnan kuluminen	29
5.4	Betonin liukeneminen	30
5.5	Betonin tilavuudenmuutokset	30
5.5.1	Kutistuminen	30
5.5.2	Viruma	32
5.5.3	Paisuminen	32
5.6	Biologinen korrosio	32
6	Sellutehtaan havaitut vauriot	34
6.1	Säiliöperustukset	34
6.2	Pumppuperustukset	36
6.3	Kuorimon sulatuskuljettimen päätykannet	39
6.4	Betonirakenteiden pinnoitukset	41
6.5	Kaustistamon viherlipeäsakkalavojen perustukset	44
7	Tulokset	46
7.1	Säiliöperustukset	46
7.2	Pumppuperustukset	47
7.3	Kuorimon sulatuskuljettimen päätykannet	48
7.4	Betonirakenteiden pinnoitukset	49
7.5	Kaustistamon viherlipeäsakkalavojen perustus	51
8	Yhteenveto	53
	Lähteet	54

## Lyhenteet

ACR	Alkalikarbonaattireaktio (engl. alkali-carbonate reaction)
AKR	Alkalikiviainesreaktio
ASR	Alkalisilikaattireaktio (engl. alkali-silica reaction)
C <sub>2</sub> S	Dikalsiumsilikaatti eli beliitti
C <sub>3</sub> A	Trikalsiumaluminaatti eli aluminaatti
C <sub>3</sub> S	Trikalsiumsilikaatti eli aliitti
C <sub>4</sub> AF	Tetrakalsiumaluminaattiferriitti eli ferriitti
CH	Kalsiumhydroksidi
C-S-H	Kalsiumsilikaattihydraatti
DEF	Myöhästynyt ettringiitin muodostuminen (engl. delayed-ettringite formation)
kg	kilogramma
mg	milligramma
mm	millimetri
MPa	megapascal

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön toimeksiantaja on AFRY Finland Oy. ÅF ja Pöyry yhdistyivät vuoden 2019 helmikuussa, jolloin syntyi globaali suunnittelu- ja konsulttiyhtiö AFRY. AFRY tukee asiakkaitaan digitalisaation ja kestäväen kehityksen ratkaisujen edistämässä energia-, infra- ja teollisuussektoreilla ympäri maailman. AFRYlla työskentelee tällä hetkellä noin 17 000 työntekijää 50 eri maassa. [1]

Sellu- ja paperiteollisuuden rakennukset ovat pääosin betonirakenteisia. Olosuhteet betonirakenteille ovat osassa rakennuksia vaikeita ja betonirakenteiset vauriot tehtaissa ovat tavallisia. Tavallisesti betonirakenteiden vauriot johtuvat erilaisista kemikaalirasituksesta, jotka aiheutuvat prosessista. Kemikaalirasitusten lisäksi vaurioita aiheuttavat mekaaniset, fyysiset ja dynaamiset rasitukset. Kuormitus sekä vauriot ovat usein paikallisia. Vaurioiden syntymisen ehkäisyyn voidaan vaikuttaa usealla tavalla, kuten esimerkiksi betonin paremmilla ominaisuuksilla, pintakäsittelyllä tai vähentämällä rasitusta. Vaurioiden korjaaminen aiheuttaa ylimääräisiä kuluja, jotka voitaisiin osin välttää huomioimalla rasitus jo suunnitteluvaiheessa. Betonin parempien ominaisuuksien tai pinnoitteiden tehokas ja taloudellinen kohdentaminen on hankalaa, sillä kattavaa tietoa toteutuneista vaurioista ei ole helposti saatavilla.

Tässä insinööriyössä kootaan yhteen sellu- ja paperitehtaissa tyypillisesti esiintyviä betonirakenteisia vaurioita ja rakenteita, jotka ovat vaatineet korjauksia. Vaurioista selviää, missä osassa prosessia vaurio on, vaurion mahdollinen aiheuttaja, vaurion tyyppi ja rakenne, jossa vaurio on. Vaurioille esitetään konseptitasoinen vaihtoehtoinen toteutus-tapa, jolla vaurion synty pyritään estämään jo suunnitteluvaiheessa.

Insinööriyö toteutetaan kirjallisuustutkimuksena, jossa hyödynnetään oppikirjoja, tieteellisiä julkaisuja sekä SFS-standardeja. Tässä insinööriyössä tarkastellaan ainoastaan sellu- ja paperiteollisuuden betonirakenteiden vaurioita. Käsiteltävät rakenteet rajataan siten, että niistä saadaan riittävän yksityiskohtaista tietoa. Ei esitetä yksityiskohtaista korjaustapaa tai tarkkaa vaurion lähdettä.

## 2 Betonin koostumus ja ominaisuudet

Betoni koostuu sementistä, karkeasta ja hienosta kiviaineksesta, vedestä sekä mahdollisista lisäaineista, seosaineista tai kuiduista. Betonin ominaisuudet kehittyvät, kun sementti kovettuu veden avulla, eli hydratoituu. [3.] Betonin suhteutuksella eli betonin osaineiden suhteita muokkaamalla betonin ominaisuuksia voidaan muokata. [19.] Kovettuneena betonin pH-arvo on noin 12-13,5 eli se on emäksistä. Emäksisyys johtuu betonin sisältämästä kalsiumhydroksidista (CH). Betonin emäksisyys on tärkeää huomioida betonin kemiallista kestävyyttä määriteltäessä, sillä betonin emäksisyys suojaa esimerkiksi betoniteräksiä. [4] Betonin ominaisuuksista ja vaatimuksista on kerrottu standardissa SFS-EN 206.

Tässä luvussa ei käsitellä perusteellisesti betonin koostumusta tai kaikkia ominaisuuksia. Luvussa nostetaan esille ne betonin koostumukseen ja ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät, joilla on yhteys betonirakenteiden kestävyyteen sellu- ja paperiteollisuudessa.

### 2.1 Sementti

Sementti on hienoksi jauhettua epäorgaanista materiaalia, joka on hydraulinen sideaine. Veteen sekoitettaessa sementti muodostaa sementtipastan, joka sitoutuu ja kovettuu. Tätä kemiallista reaktiota kutsutaan hydrataatioksi. Hydrataation jälkeen sementti säilyttää lujuutensa ja pysyvyytensä myös veden alla. [2.]

Yleisimmin käytetty sementti on portlandsementti. Portlandsementti koostuu portlandsementtiklinkkeristä ja lisätystä kipsistä (kalsiumsulfaatti), jota lisätään sitoutumisajan säätämiseksi. Portlandsementtiklinkkeriä valmistetaan Suomessa ja sen pääraaka-aineena on kalkkikivi, joka koostuu suurimmaksi osaksi kalsiumkarbonaatista ( $\text{CaCO}_3$ ). Muita tarvittavia komponentteja sementin valmistukseen saadaan kalkkikivilouhoksen sivukivistä ja teollisuuden sivutuotteista. Komponentteja ovat piidioksidi ( $\text{SiO}_2$ ), alumiinioksidi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ja rautaoksidi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Raaka-aineet poltetaan kiertouunissa murskauksen ja jauhatuksen jälkeen. Uunissa kalsium-, pii-, alumiini-, ja rautayhdisteet reagoivat kalsiumyhdisteiksi ja näin ollen sintraantuvat sementtiklinkkeriksi lämpötilan noustessa noin 1400 °C. Sementin poltossa syntyy neljää klinkkerimineraalia, jotka ovat aliitti (trikalsiumsilikaatti,  $\text{C}_3\text{S}$ ), beliitti (dikalsiumsilikaatti,  $\text{C}_2\text{S}$ ), aluminaatti (trikalsiumaluminaatti,  $\text{C}_3\text{A}$ ) sekä



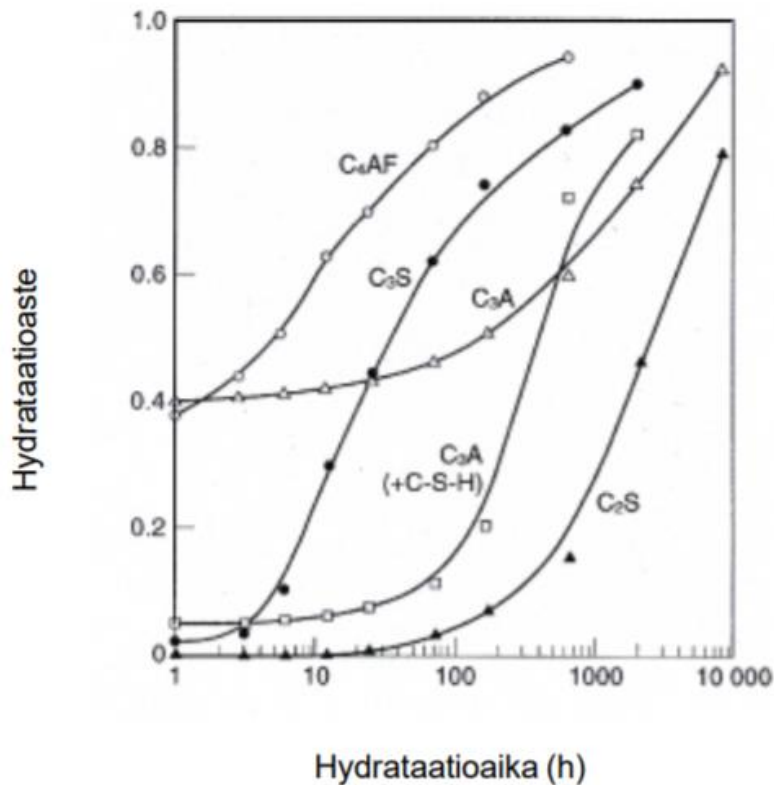
ferriitti (tetrakalsiumaluminaattiferriitti,  $C_4AF$ ). Mineraalikoostumusten suhteita säätelemällä voidaan vaikuttaa sementin ominaisuuksiin. Valmis jäähdytetty sementtiklinkkeri muistuttaa soraa. [2.] Portlandsementtiklinkkerin osa-aineille on esitetty vaatimuksia ja suurimpia sallittuja määriä standardissa SFS EN 197-1. [4.]

### 2.1.1 Portlandsementin hydrataatio

Portlandsementin hydrataatioprosessissa tapahtuu samanaikaisesti ja eriaikaisesti useita kemiallisia reaktioita, jotka ovat riippuvaisia toisistaan. Useimmat reaktioista tapahtuvat ensimmäisten päivien aikana, mutta prosessin on mahdollista jatkua vuosien ajan, mikäli siihen tarvittavaa vettä riittää betonissa. Hydrataatioprosessissa lämpöä kehittyy ja vapautuu runsaasti. Hydrataatioon vaikuttavia tärkeimpiä tekijöitä ovat mm. sementtiklinkkerin koostumus, vesi-sementtisuhte, jälkihoidon lämpötila, seos- ja lisäaineet, kalsiumsulfaatin määrä sekä hydrataatiolämpö. Lämpötilan noustessa 10 celsius astetta reaktionopeus kaksinkertaistuu. Lujuudenkehitys betonissa jatkuu koko hydrataatioreaktion ajan ja voi kestää useamman vuoden. [2.]

Vesi-sementtisuhteeksi kutsutaan veden ja sementin painon suhdetta. Sementti tarvitsee vettä noin 40% sementin painosta kovettuakseen. [4.] Vesi-sementtisuhteen vaikutus seoksessa vaikuttaa muodostuneen sementtipastan reologiaan, hydrataation etenemiseen ja hydratoituneen materiaalin ominaisuuksiin. [2.] Silikaatit ja aluminaatit muodostavat hydrataatiotuotteita, kun vesi ja sementti sekoittuu. Teoreettisesti koko sementin hydrataation vesi-sementtisuhteeksi riittäisi 0,2 – 0,25, mutta veden sitoutuessa fyysikaalisesti geelihuokosiin ideaalisen hydrataation edellyttämä vesi-sementtisuhte on 0,4 – 0,45. Käytännössä vesi-sementtisuhte betoneilla on suurempi, sillä massasta tehdään notkeampaa sen työstettävyyden vuoksi. [2.]

Portlandsementin hydrataatiolla on viisi vaihetta, jotka ovat alkuvaihe, lepovaihe, kiihtyvä vaihe, hidastuva vaihe ja loppuvaihe. Kahta ensimmäistä vaihetta kutsutaan myös induktiovaiheeksi. Portlandsementin klinkkerimineraalit reaktionopeudet vaihtelevat, joka vaikuttaa hydrataation vaiheiden etenemiseen ja vaiheiden nopeuteen. Klinkkerimineraalien hydrataation edistymistä ajan funktiona on esitetty kuvassa 1. [4.]



Kuva 1. Klinkkerimineraalien hydrataationopeuksia. [2.]

Alkuvaiheessa hydrataatiossa muodostuu geelimäistä C-S-H-geeliä eli kalsiumsilikaatti-hydraattia. C-S-H-geelin tilavuus alkuperäisiin lähtöaineisiin verrattuna on jopa yli kaksinkertainen ja se muodostuu nopeasti. Alkuvaihe loppuu nopeasti, jolloin hydrataatioaste on 2 – 4 %. Sementin kalsiumpitoisuus kasvaa, kun C-S-H-geeli saostuu sementtipartikkelien pintaan. Alkuvaiheesta siirrytään lepovaiheeseen, joka kestää noin muutamman tunnin ajan. Lepovaiheessa kalsiumhydroksidin (CH) pitoisuus kasvaa saavuttaen maksimiarvonsa. Lepovaihe loppuu toisen vaiheen C-S-H:n muodostumiseen. [4.]

Lepovaiheen päättyessä hydrataatioreaktio jatkuu kiihtyvässä vaiheessa, joka on noin 3-12 tuntia sekoittamisesta. Kiihtyvässä vaiheessa C<sub>3</sub>S:n hydrataatio kiihtyy ja portlandiittiä eli kalsiumhydroksidia sekä C-S-H-geeliä saostuu nopeasti sementtipastaan. [2.]

Lopulta hydrataatio hidastuu ja reagoimaton materiaali vähenee sementissä. Hidastuvassa vaiheessa diffuusio alkaa hallitsemaan hydrataationopeutta. C-S-H-geeliä

muodostuu edelleen, kun silikaattien hydrataatioreaktiot jatkuvat. Kalsiumhydroksidin muodostuminen pienenee tässä vaiheessa. Hydratio jatkuu niin kauan, kunnes betonista loppuu vesi, tai sementti on hydratoitunut. [2.] Hydrataatioaste on 28 päivän jälkeen portlandsementillä tyypillisesti noin 80% ja lujuudenkehitys on noin 75% suunnittelulujuudesta. [4.]

Sementtikemiassa tutkitaan yleensä klinkkerimineraalien hydrataatioita erikseen, sillä portlandinsementin hydrataatio on kokonaisuudessaan todella monimutkainen prosessi. Klinkkerimineraaleilla on erilaisia ominaisuuksia hydrataatiossa. Aliitti omaa hyvän sulfaatinkestävyyden, suuren loppulujuuden, nopean lujuudenkehityksen ja korkean hydrataatiolämmön. Beliitti omaa suuren loppulujuuden, matalan hydrataatiolämmön, hyvän sulfaatinkestävyyden ja hitaan lujuudenkehityksen. Aluminaatti omaa suuren reagoitinopeuden, pienen loppulujuuden, korkean hydrataatiolämmön ja heikon sulfaatinkestämättömyyden. Ferriitti omaa pienen loppulujuuden, korkean hydrataatiolämmön, hyvän sulfaatinkestävyyden ja hitaan lujuudenkehityksen. [4.]

Hydratoitunut portlandsementtipasta on betonin kovettuessa sen haavoittuvin osa kemiallisille rasituksille. Sementtipastan aluminaatti on herkin osa-aines kemiallisille hyökkäyksille, sillä aluminaatin hydrataatiossa muodostuva ettringiitti voi aiheuttaa paisumista kovettuneeseen betoniin, josta kerrotaan luvussa 4.2.2. [4.]

### 2.1.2 Sementtityypit

Sementtistandardissa SFS EN 197-1 määritellään ja annetaan laatuvaatimukset 27 erilaiselle sementtituotteelle, seitsemälle sulfaatinkestävälle tavalliselle sementille ja kolmelle alhaisen varhaislujuuden masuunakuonaseментille. Kaikki sementtistandardissa esitetyt sementit eivät sovellu Suomen olosuhteisiin. Betonin valmistamiseen käytettyjen sementtien pitää olla CE-merkittyjä. [4.] Sementtistandardissa sementit lajitellaan niiden koostumuksen mukaan viiteen päälajeihin, jotka ovat:

- CEM I (portlandsementti)
- CEM II (portlandseossementti)
- CEM III (masuunakuonaseментti)
- CEM IV (pozzolaaniseментti)

- CEM V (seossementti). [16.]

Päälajit jaetaan sementtilajeihin niissä käytettävien sideaineiden ja sideainemäärien mukaisesti. Sementtistandardin mukaiset pääosa-aineet ovat portlandklinkkeri (K), granuloitu masuunakuona (S), pozzolaaniset materiaalit (P, Q), lentotuhkat (V, W), poltettu liuske (T), kalkkikivi (L, LL) ja silika (D). [16.]

Sementtistandardissa on esitetty sementeille kolme standardilujuusluokkaa. Standardilujuusluokat eivät ole yhtä kuin kovettuneen betonin lujuusluokat, koska betonin lujuusluokkaan vaikuttaa lisäksi esimerkiksi vesi-sementtisuhte. Standardilujuusluokat ovat luokka 32,5, luokka 42,5 ja luokka 52,5, joilla tarkoitetaan puristuslujuutta (MPa) 28 vuorokauden jälkeen. [4.]

Sulfaatinkestävä (SR) sementtityyppi eroaa pääasiallisesti muista sementtityypeistä. Sulfaatinkestävissä sementeissä aluminaatin osuus tulee olla alhainen, sillä aluminaatti on haavoittuvainen sulfaattien hyökkäyksille. Sulfaattien aiheuttamien jatkoreaktioiden muodostama ettringiitti voi vaurioittaa kovettunutta betonia rapauttamalla sitä. Masuunikuonasementin sulfaatinkestävyys on portlandsementtiä parempi, mutta sen lujuudenkehitys on hitaampaa. Tämä pitää ottaa huomioon, jos rakennetta kuormitetaan valun jälkeen suurella kuormalla. [4.]

## 2.2 Kiviaines

Kiviaineksella tarkoitetaan betonin valmistamisessa käytettävää rakeista materiaalia. Kiviaines voi olla luonnon kiviainesta, keinokiviainesta tai uusiokiviainesta. Kiviaines voi olla esimerkiksi hiekkaa, soraa ja kalliomurskettä. Betonin tilavuudesta yleensä noin 60-80 % on kiviainesta. [8.]

Kiviaineksella ja sen ominaisuuksilla ei yleensä ole merkittävää vaikutusta betonin kemialliseen kestävyysasteeseen. Kuitenkin jossain tapauksissa betonin pinnan tiiviyyttä saattaa heikentää huokoiset kiviaineslajit, kuten hiekkakivi, jonka seurauksena aggressiiviset aineet voivat tunkeutua helpommin betonin sisään. Huokoisten kiviaineslajien veden imukyky on myös suurempi ja ne kutistuvat kuivumiskutistumisen vaikutuksesta. Toiset

kiviainekset saattavat sisältää runsaasti sulfaatteja, kuten kipsi, joka voi aiheuttaa sisäisen ettringiitin johdosta betonin paisumista. [4.]

Teollisuusrakentamisessa korkealujuusbetonilta tai kovan rasituksen alaisena käytettävältä kiviainekselta voidaan vaatia normaalia korkeampaa kulutuksen- ja iskunkestävyyttä. Mikäli esimerkiksi betonilattiaan kohdistuu raskasta trukkiliikennettä tai muuta ajoneuvoliikennettä, voidaan vaatia korkeampaa kiviaineksen kestävyyttä. [4.]

Suomen luonnon kiviaines on yleisesti ottaen lujaa, kulutusta ja pakkasta kestäväää sekä kemiallisilta ominaisuuksiltaan kestäväää. Kemiallisen kestävyuden kanssa voi aiheutua ongelmia, jos käytetään murskattua kiviainesta. [4.] Tästä puhutaan luvussa 4.2.1 Alkali-kiviainesreaktio.

### 2.3 Vesi

Sementin ja kiviaineksen lisäksi vesi on kolmas vaadittava osa-aines betonin valmistamiseen. Vesi on osana betonin kovettumisreaktioita ja se vaikuttaa betonin työstettävyyteen. Suomessa betonin valmistuksessa voi käyttää vettä ilman tutkimuksia, mutta humuspitoiset suo- ja järvivedet, merivedet tai teollisuuden jätevedet eivät sovellu käytettäväksi. [4.][14.] Usein veden yleisenä laatukriteerinä voidaan pitää sen juomakelpoisuutta. [9.] Betonin käyttökohde määrittelee vedessä sallitut kloridipitoisuudet, jotka on esitetty taulukossa 1. [14.]

Taulukko 1. Veden suurimmat sallitut kloridipitoisuudet. [14.]

Betonin käyttökohde	Suurin kloridipitoisuus (mg/l)
Jännitetty betonirakenne tai injektioalaasti	500
Raudoitettu betonirakenne	1000
Raudoittamaton betonirakenne	4500

Betonissa vettä on sitoutuneena sekä vapaana vetenä. Sitoutunut vesi on mukana hydrataatiossa sementin osa-aineiden kanssa, eikä pääse haihtumaan betonista. Vapaa vesi pääsee sen sijaan haihtumaan pois betonista. Sementin kovettuessa vesi on eri tavoin mukana sidoksissa. [4.]

## 2.4 Seosaineet

Betonissa käytetään usein erilaisia seosaineita, joilla pystytään parantamaan betonin ominaisuuksia, kuten tiivyyttä, lujuutta, kemiallista kestävyyttä ja työstettävyyttä. [14.] Seosaineet ovat hienojakoisia epäorgaanisia aineita. Seosainetyyppejä on kaksi. Tyypin I seosaineet eivät reagoi betonissa muiden betonin osa-aineiden kanssa. Tyypin II seosaineet ovat reaktiivisia hydraulisesti tai pozzolaanisesti, eli aine reagoi veteen sekoittaessa sementin hydrataatiossa syntyvän kalsiumhydroksidin kanssa. Seosaineiden tulee olla suomessa CE-merkittyjä. [4.] Tässä työssä käsitellään ainoastaan tyypin II seosaineita niiden reaktiivisuuden vuoksi.

### 2.4.1 Lentotuhka

Lentotuhkaa syntyy, kun jauhettua kivihiiltä poltetaan voimalaitoksissa. Lentotuhka erottellaan savukaasuista sähkösuodattimilla ja sen laatu on riippuvainen polttoprosessin täydellisyydestä. Laatuluokkia lentotuhkalle on kolme A, B ja C. Suomessa betonirakenteissa käytettävän lentotuhkan laatuluokka on lähes poikkeuksetta A. [15.] Betonissa lentotuhkaa käytetään seosaineena, sillä se omaa pozzolaanisia ominaisuuksia. [4.] Tässä luvussa käsitellään lentotuhkasta kuitenkin vain sen betonin kestävyyttä parantavia ominaisuuksia.

Raekoko lentotuhkalla on 1 – 150 µm. Betonissa hienon kiviaineksen määrää voidaan pienentää lentotuhkan raekoon vuoksi. Lentotuhkan reaktionopeus on hitaampi kuin sementin, jonka seurauksena lentotuhkan käyttö betonissa pienentää alkulujuuksia, mutta nostaa lopullista puristuslujuutta. [15.]

Lentotuhkan koostumus on pääasiallisesti piioksidia. Piioksidi reagoi sementin hydrataatiossa muodostuvan kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen C-S-H-geeliä. Lentotuhkan hydrataatiolämpö on pienempi verrattuna portlandsementin hydrataatiolämpöön, jonka seurauksena hydrataatioreaktio on hitaampi lentotuhkaa käytettäessä. Pienemmän reaktionopeuden vuoksi betonin lujuudenkehitys on myös hitaampaa, jonka vuoksi lentotuhkaa ei tulisi käyttää talvibetonoinneissa. [4.] Taulukossa 2 esitetään portlandsementistä valmistetun betonin ominaisuuksien muutoksia, kun siihen on lisätty lentotuhkaa.

Taulukko 2. Lentotuhkan aiheuttamia muutoksia portlandsementistä valmistetun betonin ominaisuuksiin. [4.]

Betonin ominaisuus	Lentotuhkan aiheuttama muutos
Hydratoitumislämpö	vähenee
Jälkihoidon tarve	kasvaa
Kutistuma	ei muutu
Massan työstettävyys	paranee
Massan koossa pysyvyys	paranee
Myöhäislujuus yli 91 päivän ikäisenä	kasvaa lievästi
Pakkasenkestävyys	ei muutu, kun suojahuokostus ok
Sulfaatinkestävyys	ei muutu
Varhaislujuus alle 7 päivän ikäisenä	pienenee lievästi
Vesitiiviyys	paranee lievästi

#### 2.4.2 Masuunikuona

Rautamalmia sulattaessa masuunissa muodostuu emäksistä silikaattisulatetta, jota jäähdyttämällä saadaan masuunikuonaa. Masuunikuonajauhe jauhetaan hienoksi ja se voi olla granuloitua, pelleteitua tai ilmajäähdytettyä. Suomessa betonin valmistamiseen käytetään granuloitua masuunikuonaa. [9.] Masuunikuona on lasimaista materiaalia. [4.]

Portlandsementin hydrataation reaktioissa vapautuvan kalsiumhydroksidin avulla masuunikuona muuttuu hydrauliseksi, jonka seurauksena sen lujuudenkehitys käynnistyy. Muihin seosaineisiin verrattuna masuunikuonajauhe ei kuluta merkittävästi kalsiumhydroksidia. [4.]

Masuunikuonanjauheen vedentarve on vähäisempää kuin portlandsementillä ja se myös notkistaa sementtiä. Betonin pakkas-suolakestävyys heikkenee masuunikuonajauhetta käyttäessä. Masuunikuonajauhe sopii mainiosti massiivisten betonirakenteiden valuihin, sillä se vähentää hydrataatiolämpöä betonissa. Masuunikuonajauhe on reaktiivinen lämpötilan vaihtelulle, joko hidastaen tai nopeuttaen hydrataatiota. Varhaislujuus on pienempi kuin portlandsementistä valmistetulla betonilla, mutta lujuudenkehitys jatkuu pidempään kasvattaen myöhäisempää lujuutta suuremmaksi. [4.]

Kun masuunikuonajauheen osuus on yli 70 % betonin sideaineesta, niin betoni luokitellaan sulfaatinkestäväksi. Masuunikuonajauheen katsotaan yleisesti parantavan betonin

kemiallista kestävyyttä. Portlandsementteihin verrattuna masuunikuonajauhe edistää karbonatisoitumista, sekä kloridit pääsevät vaurioittamaan betoniteräksiä pienemmän kloridipitoisuuden takia. [4.] Taulukossa 3 esitetään portlandsementistä valmistetun betonin ominaisuuksien muutoksia, kun siihen on lisätty masuunikuonaa.

Taulukko 3. Masuunikuonan aiheuttamia muutoksia portlandsementistä valmistetun betonin ominaisuuksiin. [4.]

Betonin ominaisuus	Masuunikuonan aiheuttama muutos
Hydratoitumislämpö	vähenee
Jälkihoidon tarve	kasvaa
Karbonatisoitumisnopeus	kasvaa lievästi
Kutistuma	kasvaa
Massan työstettävyys	paranee
Massan koossapysyvyys	ei muutu
Myöhäislujuus yli 91 päivän ikäisenä	kasvaa
Pakkasenkestävyys	ei muutu, kun suojahuokostus ok
Sulfaatinkestävyys	paranee
Varhaislujuus alle 7 päivän ikäisenä	pienenee lievästi
Vesitiiviyys	paranee lievästi

### 2.4.3 Silika

Silika erotetaan piiraudan ja piin valmistuksen savukaasuista ja se on erittäin hienojakoinen pozzolaaninen aine. Standardin SFS-EN 13263-1 vaatimusten mukaan luokan 1 silikassa piioksidin ( $\text{SiO}_2$ ) määrä on vähintään 85 m-% (massaprosenttia) ja luokan 2 silikassa sitä on vähintään 80 m-%. Silikan raekoko on noin 0,1  $\mu\text{m}$ . [4.]

Silikan käyttö betonissa lisää sen vedentarvetta ja sen myötä tarvitaan myös notkistavia lisäaineita. Silikan käyttö kasvattaa betonin lujuutta, kemiallista kestävyyttä, koossa pysyvyyttä, tiivyyttä ja vedenpitävyyttä. Suomessa silikaa käytetään korkealujuusbetoneissa. Korkealujuusbetoneiden suuren sementtimäärän vuoksi silika vaikeuttaa betonin työstettävyttä. Silikan avulla pienemmällä vesi-sementtisuhteella voidaan saavuttaa korkeampi lujuus betoniin. [4.]

Silika sideaineena voi lisätä betonin plastista kutistumaa, sekä vapaasti kuivuessaan aiheuttaa betonipinnan halkeilua. Sementtikiven ja kiviaineksen välinen tartunta kasvaa silikan johdosta, joka parantaa betonin tiivyyttä. Tiiviyden parantuessa sulfaatinkestävyys paranee, sillä betonin läpäisevyys vähenee. Kloridikestävyys paranee myös



huomattavasti, sillä kloridi-ionien diffuusio heikkenee tiiviin rakenteen vuoksi. [4.] Taulukossa 4 esitetään portlandsementistä valmistetun betonin ominaisuuksien muutoksia, kun siihen on lisätty silikaa.

Taulukko 4. Silikan aiheuttamia muutoksia portlandsementistä valmistetun betonin ominaisuuksiin. [4.]

Betonin ominaisuus	Silikan aiheuttama muutos
Hydratoitumislämpö	alenee lievästi
Jälkihoidon tarve	kasvaa
Kutistuma	ei muutu
Massan koossapysyvyys	paranee
Myöhäislujuus yli 91 päivän ikäisenä	kasvaa lievästi
Pakkasenkestävyys	paranee
Varhaislujuus alle 7 päivän ikäisenä	pienenee lievästi
Vesitiiviys	paranee

## 2.5 Lisäaineet

Betonin lisäaineilla vaikutetaan tuoreen betonimassan tai kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Lisäaineiden määrä suhteessa sementtiin on pieni. Lisäaineiden vaikutustapa voi olla fysikaalinen tai kemiallinen. Lisäaineiden käytön tulee olla tavoitteellista ja sen pitää olla perusteltavissa taloudellisesti tai teknisesti. Lisäaineiden käytöllä on myös sivuvaikutuksia, jotka voivat olla edullisia tai haitallisia. Nämä sivuvaikutukset tulee ottaa huomioon betonin koostumusta valittaessa. [9.] Tässä luvussa käsitellään ainoastaan lisäaineita, jotka voivat vaikuttaa betonin kestävyteen.

Käytettävänä on esimerkiksi seuraavan tyyppisiä lisäaineita: kutistumista vähentävä, notkistin, nesteytin, huokostin, kiihdytin, hidastin, tiivistysaine ja injektioaine. Lisäaineita varten on oma standardi SFS-EN 934. [4.]

Notkistavat lisäaineet parantavat betonin työstettävyyttä, jolloin siitä saadaan notkeampaa ilman lisättyä ylimääräistä vettä. Notkistavat lisäaineet erottavat sementtipartikkelit toisistaan parantaen betonin juoksevuuutta. [18.] Parempien työstettävyysominaisuuksien vuoksi betonista saadaan tiiviimpää, jonka seurauksena saavutetaan suunniteltu puristuslujuus todennäköisemmin. [19.] Matalien vesi-sementtisuhteiden betoneissa käytetään yleensä notkistavia lisäaineita. [4.]

Huokostavia lisäaineita käytetään betonin valmistuksessa, mikäli betonilta vaaditaan pakkasen- ja säänkestävyyttä. Huokostavat lisäaineet pienentävät betoniveden pintajännitystä ja tuottavat betoniin ilmatäytteisiä suojahuokosia. [18.] Huokostavien lisäaineiden käyttö pienentää kovettuneen betonin lujuutta, sillä se kasvattaa betonin ilmamäärää. [19.]

Hidastavia lisäaineita käytetään, kun betonin sitoutumisen alkua halutaan pidentää. Pitkien kuljetusmatkojen vuoksi betoneihin voidaan lisätä hidastavia lisäaineita. Pitkissä valuuissa työstettävyyssajan pidentämiseksi voidaan myös käyttää hidastavia lisäaineita. Hidastavien lisäaineiden ansiosta pitkissäkin valuuissa tiivistys keretään suorittamaan oikein ennen betonin sitoutumisen alkamista. [19.]

Kiihdyttäviä lisäaineita käytetään betonin sitoutumisen ja kovettumisen nopeuttamiseksi. Nopeamman muotipurku- tai jäätymslujuuden saavuttaminen voi edellyttää kiihdyttävien lisäaineiden käyttöä. Kiihdyttävien lisäaineiden käyttöä voidaan korvata alhaisen vesi-sementtisuhteen betoneilla, kuumabetonoinneilla tai pikasementteillä. Kiihdyttävien lisäaineiden käyttö saattaa alentaa betonin lujuutta. [19.]

Kutistumisen vähentävät lisäaineet eivät estä kokonaan kutistumaa, mutta niillä voidaan vähentää kuivumiskutistumaa jopa 25 – 50 %. Lisäaine alentaa veden pintajännitystä kapillaarihuokosissa, jonka seurauksena kuivumiskutistumasta aiheutuvat voimat vähentyvät. Tutkimuksissa on havaittu, että lisäaine vähentää myös autogeenistä kutistumaa ja varhaisvaiheen plastista kutistumaa. [23.]

## 2.6 Huokosrakenne

Betoniin muodostuu hydrataation aikana erilaisia huokosia. Huokokset täyttyvät joko ilmalla tai vedellä. Huokokset muodostavat betonin mikrorakenteessa verkoston, jota kutsutaan huokosrakenteeksi. Huokosjakaumalla on merkittävä osuus betonin lujuuden kannalta, sillä huokoisemman betonin lujuus on heikompaa. Betonin huokostyypejä ovat geelihuokokset, kapillaarihuokokset, supistumishuokokset, suojahuokokset ja tiivistymishuokokset. Betonin huokoisuutta pystytään säätämään vesi-sementtisuhteella, betonin tiivistämisellä, jälkihoidolla ja betonimassan koostumuksella. [4.]

## 2.7 Lujuus

Betonin yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on sen puristuslujuus. Betonin vetolujuus on puristuslujuuteen verrattuna matala. Vetolujuuden suuruus on noin 5 – 8 % puristuslujuudesta. Betoniterästen tehtävänä on vastaanottaa betonirakenteeseen kohdistuvat vetojännitykset. [20.] Tässä luvussa lujuudella tarkoitetaan betonin puristuslujuutta. Betonit lajitellaan lujuutensa perusteella. Betonin lujuuden tarkasteluikä on 28 vuorokautta, jolloin lujuus määritetään betonin koekappaleesta lieriö- tai kuutiokokeella. Tämän vuoksi lujuudet ilmoitetaan usein lieriö- ja kuutiolujuutena, kuten esimerkiksi C35/45 (MPa), jossa C kirjaintunnus osoittaa lieriölujuutta ja jälkimmäinen luku kuutiolujuutta. Betonin lujuudenkehitys jatkuu kuitenkin niin kauan, kunnes käyttökelpoinen vesi tai sementti loppuu. Eurokoodin mukaisessa betonirakenteiden mitoituksessa käytetään betonin lieriölujuuksia. [19.]

Betonin lujuuteen ja lujuuden kehitykseen vaikuttavat useat eri tekijät, joita ovat esimerkiksi käytettävän sementin laatu, tiivistysaste, vesi-sementtisuhde ja runkoaineen ominaisuudet. Sementin valmistuksessa päämineraaleja säätelämällä voidaan vaikuttaa lujuudenkehitykseen ja loppulujuuteen. Hienommalla sementin jauhatuksella voidaan edesauttaa sementin nopeampaa lujuudenkehitystä. Runkoaineen lujuutta ei yleensä oteta erikseen huomioon, sillä sen lujuus on yleensä betonia korkeampi. Poikkeuksen kuitenkin aiheuttaa korkean lujuuden betonit, jossa runkoaineen lujuus tulee ottaa huomioon. Betonin lujuuteen vaikuttavat myös betonimassaan jäävien vesi- ja ilmatäytteisten huokosten määrä. Betonin lujuus heikkenee, mikäli vesi-sementtisuhde on korkea ja tiivistysaste on matala. [20.]

Betonin lujuudenkehitykseen ja loppulujuuteen vaikuttavat myös lujittumisen aikaiset olosuhteet. Lämpötilan lisäksi jälkihoidolla on suuri merkitys lujuudenkehitykseen ja loppulujuuteen. Jälkihoito tarkoittaa toimenpiteitä, joilla betonin suunnitellut ominaisuudet ja lujuus varmistetaan. Jälkihoidon puutteet voivat aiheuttaa merkittäviä vaurioita betoniin, joka vaikuttaa alentavasti betonin lujuuteen. Puutteellinen jälkihoito voi aiheuttaa betonirakenteeseen halkeilua, kutistumishalkeilua tai lujuuskatoa. [19.]

### 3 Betonin rasitusluokat

Rasitusluokilla pyritään kuvaamaan se ympäristö, johon betonirakenne rakennetaan. Rasitusluokka tulee valita siten, että se vastaa mahdollisimman hyvin ympäristössä vallitsevia rasituksia ja olosuhteita. [3.] Rasitusluokan valinnassa ei tule yliarvioida ympäristörasituksia, sillä valittu rasitusluokka vaikuttaa esimerkiksi vesi-sementtisuhteeseen, valittuun lujuusluokkaan ja betonipeitteen paksuuteen. Yliarvioinnin seurauksena rakentamisen kustannukset voivat nousta, sekä betonirakenteen laatu saattaa kärsiä. Rasitusluokkia on yhteensä 18. Rasitusluokat on jaoteltuna rasitustekijöiden mukaan, joita ovat karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio, kloridien aiheuttama korroosio, merivedessä olevien kloridien aiheuttama korroosio, jäätymis-sulamisrasitus sekä kemiallinen korroosio. Käytännössä rasitusluokkia tarvitaan usein useampi kuin yksi vastaamaan rakennukseen kohdistuneita rasituksia, jolloin puhutaan rasitusluokkayhdistelmistä. [11.]

Taulukossa 5 on kuvattuna standardin SFS-EN 206 mukaiset X0-rasitusluokka sekä XC-rasitusluokat. X0-rasitusluokassa betonirakenteeseen ei kohdistu syöpymisrasitusta tai korroosiot. X0-rasitusluokka on harvemmin käytetty, sillä siihen kuuluvat raudoittamattomat betonirakenteet tai hyvin kuivassa ympäristössä olevat raudoitetut betonirakenteet. XC-rasitusluokkiin kuuluvat betonirakenteet altistuvat karbonatisoitumisen aiheuttamalle korroosiolle, jota käsitellään tarkemmin luvussa 5.1.

Taulukko 5. X0-rakennusluokan ja XC-rasitusluokkien kuvaukset sekä esimerkkirakenteita. [3.]

Rasitusluokka	Määritelmä	Esimerkkirakenteet
<b>Ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä</b>		
<b>X0</b>	Raudoittamaton rakenne, kaikkiin ympäristöihin lukuun ottamatta pakkasrasitusta tai kulutusrasitusta tai kemiallista rasitusta. Raudoitettu rakenne, hyvin kuivaan ympäristöön	Sisätiloissa oleva rakenne, joissa ilman kosteus on hyvin alhainen. Välipohjat ja -seinät kuivissa tiloissa.
<b>Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio</b>		
<b>XC1</b>	Kuiva tai jatkuvasti märkä	Sisätiloissa oleva rakenne, jossa ilman kosteus on alhainen. Pysyvästi veden alla oleva rakenne.
<b>XC2</b>	Kostea, harvoin kuiva	Pitkään veden kanssa kosketuksissa oleva rakenne. Monesti perustukset.

<b>XC3</b>	Kohtalaisen kostea	Sisätiloissa oleva rakenne, joka on kohtalaisessa tai korkeassa ilman kosteudessa. Sateen suojassa ja ulkona olevat rakenteet.
<b>XC4</b>	Jaksollinen kastuminen ja kuivuminen	Veden kanssa kosketuksissa oleva rakenne, joka ei kuitenkaan kuulu rasisitusluokkaan XC2. Parvekelaatat, sokkelit ja sateelta suojaamaton julkisivu.

Taulukossa 6 on kuvattuna standardin SFS-EN 206 mukaiset XD- ja XS-rasisitusluokat. Taulukon 6 rasisitusluokkien betonirakenteet altistuvat kloridirasituksille, jotka ovat peräisin merivedestä tai jostain muusta lähteestä. Kloridien aiheuttamasta rasisituksesta kerrotaan luvussa 4.2.3.

Taulukko 6. XD- ja XS-rasisitusluokkien kuvaukset sekä esimerkkirakenteita. [3.]

Rasisitusluokka	Määritelmä	Esimerkkirakenteet
<b>Kloridien aiheuttama korroosio, jotka peräisin muualta kuin merivedestä</b>		
<b>XD1</b>	Kohtalaisen kostea	Rakenteet, jotka ovat ilman sisältämille klorideille alttiita.
<b>XD2</b>	Kostea, harvoin kuiva	Uima-altaat
<b>XD3</b>	Jaksollinen kastuminen ja kuivuminen	Suoloja sisältäville roiskeille tai suolaukselle alttiit pinnat. Lämmitetyt autotallit ja pysäköintitasot.
<b>Kloridien aiheuttama korroosio, jotka peräisin merivedestä</b>		
<b>XS1</b>	Ilmassa siirtyvä suola, ei suoraa kosketusta meriveteen	Rakenteet, jotka ovat avomeren rannalla.
<b>XS2</b>	Pysyvästi meriveden alla	Rakenteiden osat, jotka ovat meressä.
<b>XS3</b>	Vuorovesi ja roiskeet	Rakenteiden osat, jotka ovat meressä.

Taulukossa 7 on kuvattuna standardin SFS-EN 206 mukaiset XF-rasisitusluokat. XF-rasisitusluokkien betonirakenteet altistuvat jäätymis-sulamisrasitukselle. Betonirakenteeseen kohdistuva pakkasrasitus kasvaa, kun mukana on esimerkiksi jäänsulatusaineita, jotka sisältävät suoloja. Suolojen aiheuttamista rasisituksista kerrotaan tarkemmin luvussa 4.2.3. Pakkasrasituksesta kerrotaan tarkemmin luvussa 4.1.1.

Taulukko 7. XF-rasitusluokkien kuvaukset sekä esimerkkirakenteita. [3.]

Rasitusluokka	Määritelmä	Esimerkkirakenteet
XF1	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Pystysuorat betonipinnat, jotka ovat jäätymiselle ja saateelle alttiita. Julkisivut ja sokkelit.
XF2	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet	Pystysuorat betonipinnat, jotka ovat vedelle ja ilman kuljettamille jäänsulatusaineille alttiita.
XF3	Suuri vedellä kyllästyminenaste ilman jäänsulatusaineita	Vaakasuorat betonipinnat, jotka ovat jäätymiselle ja saateelle alttiita. Parvekkeet.
XF4	Suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet tai merivesi	Vaakasuorat betonirakenteet, jotka ovat jäänsulatusaineille tai merivedelle ja vedelle alttiita. Jäänsulatusaineille alttiit tiet ja siltojen kannet.

Taulukossa 8 on kuvattuna standardin SFS-EN 206 mukaiset XA-rasitusluokat. XA-rasitusluokkien betonirakenteet altistuvat ympäristöstä peräisin oleville kemiallisille rasituksille. Kemiallisista rasituksista kerrotaan tarkemmin luvussa 4.2

Taulukko 8. XA-rasitusluokkien kuvaukset ja esimerkkirakenteita. [3.]

Rasitusluokka	Määritelmä	Esimerkkirakenteet
XA1	Kemiallisesti heikosti aggressiivinen ympäristö	Luonnon maaperästä ja pohjavedestä johtuva kemiallinen rasitus taulukon 9 mukaisesti
XA2	Kemiallisesti kohtalaisesti aggressiivinen ympäristö	Luonnon maaperästä ja pohjavedestä johtuva kemiallinen rasitus taulukon 9 mukaisesti
XA3	Kemiallisesti voimakkaasti aggressiivinen ympäristö	Luonnon maaperästä ja pohjavedestä johtuva kemiallinen rasitus taulukon 9 mukaisesti

XA-rasitusluokka valitaan taulukon 9 mukaisten raja-arvojen perusteella. Raja-arvot ovat määritetty vain luonnon maaperästä ja pohjavedestä aiheutuville kemiallisille rasituksille. Aggressiivisten kemiallisten ympäristöjen luokittelu perustuu luonnon maaperään ja pohjavedeen, joiden lämpötila on 5 – 25 °C ja veden virtausnopeus on niin hidas, että se on lähes staattinen.

Taulukko 9. Luonnon maaperästä ja pohjavedestä johtuvan kemiallisen rasiituksen rasiitusluokien raja-arvot. [3.]

Kemiallinen ominaisuus	XA1	XA2	XA3
<b>Pohjavesi</b>			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	≥ 200 ja ≤ 600	≥ 600 ja ≤ 3000	≥ 3000 ja ≤ 6000
pH	≤ 6,5 ja ≥ 5,5	< 5,5 ja ≥ 4,5	< 4,5 ja ≥ 4,0
CO <sub>2</sub> mg/l (aggressiivinen)	≥ 15 ja ≤ 40	> 40 ja ≤ 100	> 100 kyllästymiseen asti
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	≥ 15 ja ≤ 30	> 30 ja ≤ 60	> 60 ja ≤ 100
Mg <sup>2+</sup> mg/l	≥ 300 ja ≤ 1000	> 1000 ja ≤ 3000	> 3000 kyllästymiseen asti
<b>Maaperä</b>			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/kg <sup>1)</sup> kokonaismäärä	≥ 2000 ja ≤ 3000 <sup>2)</sup>	> 3000 <sup>2)</sup> ja ≤ 12000	> 12000 ja ≤ 24000
Happamuus Braumann Gullyn mukaisesti ml/kg	> 200	Ei esiinny käytännössä	

1) Savimaat, joiden läpäisevyys on pienempi kuin 10<sup>-5</sup> m/s voidaan luokitella alemman luokkaan.

2) Raja-arvo 3000 mg/kg lasketaan arvoon 2000 mg / kg, jos betonin toistuva kuivuminen ja kastuminen tai kapillaarinen kastuminen saattavat aiheuttaa betonin sulfaatti-ionien kasaantumisriskin.

Teollisuusympäristössä esiintyviä kemikaaleja XA-rasiitusluokat eivät suoranaisesti ota huomioon. Teollisuuden kemikaaleille rasiitusluokat pitää tutkia kemikaali kohtaisesti. Taulukon 9 arvoja voidaan soveltaa harkitusti teollisuudessa esiintyville kemikaaleille, kuten esimerkiksi pH:n raja-arvot.

## 4 Betonin tyypilliset rasitukset teollisuudessa

Betonirakenteet joutuvat useiden erilaisten rasitusten alaiseksi sellu- ja paperiteollisuudessa. Ympäristö aiheuttaa oman rasituksensa, jonka lisäksi rasituksia syntyy myös laitteista, koneista ja teollisuuden kemikaaleista. Tässä luvussa käsitellään keskeisesti erilaisia rasituksia, jotka voivat aiheuttaa ongelmia yleisesti sellu- ja paperiteollisuuden betonirakenteille.

### 4.1 Fysikaaliset ja mekaaniset rasitukset

Mekaanista rasitusta betonirakenteille aiheuttaa esimerkiksi ylikuormat, törmäykset, ajoneuvot ja koneet tai rakenteiden painuminen ja liikkuminen. Sellu- ja paperiteollisuudessa käytetyt ajoneuvot ja koneet ovat usein raskaita. Erilaisia iskuja ja törmäyksiä voi aiheutua myös esimerkiksi purettavista raaka-aineista, kuten tukeista. Mekaanisia rasituksia ovat myös prosessilaitteista aiheutuvat dynaamiset rasitukset.

Fysikaaliset ilmiöt rasittavat betonia. Fysikaalisiin ilmiöihin kuuluvat esimerkiksi säätymiöt, kuten pakkasen. Lämpötilojen muutokset aiheuttavat fysikaalisia rasituksia betoniin. Lisäksi virtaava vesi, eli kavitaatio aiheuttaa betoniin fysikaalista rasitusta, kuten betonipinnan kulumista tai rapautumista.

#### 4.1.1 Pakkasrasitus

Suomen olosuhteissa ulkona oleviin betonirakenteisiin kohdistuu vaihtelevaa pakkasrasitusta. Betonin huokosrakenteen sisältämän veden jäätyminen aiheuttaa pakkasrasituksen. [12.] Pakkasrasituksen voimakkuuteen vaikuttavat tekijät ovat betonin kosteuspitoisuus jäätyessään sekä jäätymissykliä määrää. Rakennuksen sijainti ja suojaavat rakenteet vaikuttavat kosteuspitoisuuteen. Pakkasrasitus aiheutuu lievemmin, mikäli rakenne pysyy kuivana. Jäätymissykleihin vaikuttava tekijä on rakenteen suunta, sillä etelän puolen sivulla lämmittävän auringon vuoksi jäätymissyklejä on enemmän, kuin esimerkiksi pohjoisella sivulla. [13.]

Toistuvasti jäätyvä vesi laajentuu betonissa aiheuttaen painetta betonin huokosverkostoon, jonka seurauksena betoni säröilee. [12.] Säröily heikentää betonin



lujuusominaisuuksia. Lopulta säröily voi aiheuttaa betonin lohkeamista ja rapautumista. Pienissä betonin huokosissa veden jäätyislämpötila on matalampi, kuin isommissa huokosissa. Geelihuokosissa vesi ei pääse jäätymään käytännössä lainkaan. Merkittävimpiä huokosia pakkasrasituksen osalta ovat haitalliset kapillaarihuokokset. [13.]

Huokostamaton betoni ei kestä pakkasrasitusta. Pakkaskestävyyttä parannetaan betonin lisäaineilla, jolla aikaan saadaan riittävästi suojahuukoisia. Suojahuukokset pysyvät ilmatäytteisinä, vaikka betoni olisikin kostea. Suojahuukokset tasaavat hydraulista painetta, joka on peräisin kapillaarihuokosista veden jäätyessä. [13.]

Betonin vesi-sementtisuhteen ollessa matala ja lujuuden noustessa kapillaarihuokosten osuus vähenee, josta seuraa myös vähäisempi määrä jäätyvää vettä. Vesi-sementtisuhteen ollessa 0,30 – 0,35 ja sideaineen ollessa suotuisa, betonissa oleva vesimäärä on niin pieni, että sen luonnollinen ilmapitoisuus tekisi siitä pakkaskestävää normaaliolosuhteissa. Nämä betonit ovat korkealujuusbetoneja. Normaaleilla lujuustason betoneilla jäätyvä vedenmäärä on suurempi, jolloin riittävää pakkaskestävyyttä ei saavuteta. [13.]

#### 4.1.2 Lämpötilarasitus

Korkeat lämpötilat ovat osana teollisia tuotantolaitoksia. Lämpötilarasitukset on otettava huomioon betonirakenteiden suunnittelussa etenkin, jos lämpötilojen muutoksen ovat nopeita tai lämpötilaerot kohdistuvat eripuolille samaa betonirakennetta. [4.]

Betonirakenteet kestävät hyvin korkeitakin lämpötiloja hetkellisesti, mutta mikäli korkealle lämpötilalle altistuminen on jatkuvaa, niin sallittu lämpötilan raja-arvo tavalliselle betonirakenteelle on noin 200 °C. Betonin sulamispiste on noin 1300 – 1500 °C riippuen runkoaineesta. Erikoisbetoneja voidaan valmistaa kestämään jopa yli 1200 °C lämpötiloja. Lämpötilaeroille altistuminen betonin kovettumisvaiheessa on erittäin haitallista, sillä betoniin aiheutuu lämpötilaeroista jännityksiä, joka voi synnyttää herkästi halkeamia kovettuvaan betoniin. [4.]

### 4.1.3 Dynaamiset rasitukset

Sellu- ja paperitehtailla käytetään useita erilaisia prosessilaitteita, kuten esimerkiksi pumppuja ja sähkömoottoreita. Näiden laitteiden pyörivistä osista syntyy dynaamista kuormitusta, josta aiheutuu värähtelyä laitteeseen ja sen ympäristöön. Dynaamisten ilmiöiden vuoksi kone- ja laiteperustuksien suunnittelu on vaativampi tehtävä verrattuna tavalliseen perustukseen. Kone- ja laiteperustuksen tulee olla riittävä, jotta dynaamisten kuormitusten aiheuttamat värähtelyamplitudit voidaan rajoittaa sellaiselle tasolle, ettei niistä ole haittaa läheisille rakenteille eikä laitteen toiminnalle. [5.]

Perustuksen kokoa ja kiinnitystä laskettaessa on huomioitava koneen tai laitteen aiheuttamat voimat. Suurimmat voimat syntyvät koneiden vikaantuessa, jossa oikosulku rikkoo sähkömoottorin. Oikosulkumomentti on eurokoodissa esitetyn yksinkertaistuksen mukaan 12-kertainen verrattuna moottorin nimellismomenttiin. [26.]

## 4.2 Kemialliset rasitukset

Sellu- ja paperiteollisuudessa käytetään lukuisia erilaisia kemikaaleja. Kemikaalit voivat päästä betonipinnalle roiskumalla tai virtaamalla. Teollisuuslaitosten betonialtaat, betonilattiat, kanaalit, koneperustukset, varoaltaat ja viemärit ovat tyypillisesti hyvin alttiita kemiallisille rasituksille. Betonissa esiintyy myös luonnollisesti kemiallisia reaktioita, jotka aiheuttava kemiallisen rasituksen ilmiöitä. [4.]

Kemialliset rasitukset aiheuttavat betonille sisäistä tai ulkoista korroosiota. Sisäisistä vauriotekijöistä keskeisimmät ovat luonnolliset alkalikiviainesreaktiot, sekä ettringiitin muodostuminen kovettuneessa betonissa. Ulkoisessa kemiallisessa rasituksessa haitalliset aineet pääsevät kosketukseen betonin osa-aineiden kanssa, jonka seurauksena betoni vaurioituu. Ulkoisia vauriotekijöitä ovat erilaiset kemikaaliryhmät, kuten esimerkiksi hapot, emäkset, sulfaatit, kloridit ja kaasut. [4.]

### 4.2.1 Alkalikiviainesreaktio

Alkalikiviainesreaktio (AKR) on keskeinen sisäinen vauriotekijä, joka johtaa betonin rapautumiseen ja altistaa rakenteen myös muille rapautumisilmiöille. Tällä hetkellä

tunnetaan kaksi erilaista alkalikiviainesreaktiota, jotka ovat alkalipiiyhdistereaktio (ASR engl. alkali-silica reaction) ja alkalikarbonaattireaktio (ACR engl. alkali-carbonate reaction). Aiemmin on puhuttu lisäksi alkalisilikaattireaktiosta, joka nykyisin tunnetaan hitaana alkalipiiyhdistereaktiona. Yleisin näistä kaikista on alkalipiiyhdistereaktio. [7.]

Alkalipiiyhdistereaktiossa kiviaineksen piidioksidit reagoivat betonissa olevan huokosveden alkalihydroksidien kesken. Reaktiomekanismi sisältää neljä eri vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa piidioksidi liukenee. Seuraavassa vaiheessa syntyy hyytelömäinen pii-liuos, joka kolmannessa vaiheessa muuttuu ASR-geeliksi. Viimeisessä vaiheessa ASR-geeli paisuu. ASR-geeli on hygroskooppista, eli se imee voimakkaasti vettä. Veden imeytyminen aiheuttaa geelin paisumisen. Paisumisen seurauksena betoni rapautuu, jota käsitellään tarkemmin luvussa 5.5.3. [6.]

Alkalikiviainesreaktio vaatii toteutuakseen reaktiivista kiviainesta, suhteellisen korkeaa alkalisuutta sekä betonin suhteellisen kosteuden tulee olla tarpeeksi suuri. Mikäli jokin edellä mainituista ei toteudu, niin reaktio ei käynnisty. Korkea lämpötila kasvattaa reaktioherkkyyttä. Kosteat ja lämpimät tilat, kuten uimahallit ja sellu- ja paperitehtaat, ovat otollisia alkalikiviainesreaktiolle. [7.]

Kiviaineksessa reagoivat piioksidimineraalit, eli kvartsit ( $\text{SiO}_2$ ), kuten esimerkiksi vulkaaninen lasi, opaali, kalsedoni ja kristobaliitti. Hienojakoisempi kiviaines on reaktiivisempaa. Reaktio pysähtyy, kun reaktiivinen aines on kokonaan reagoanut. [7.]

Reaktioon vaadittavat alkalit tulevat betonin sisältämästä sementistä. Portlandsementissä alkalisuus on peräisin natriumista (N) ja kaliumista (K). Betonin huokosvedessä natrium esiintyy natriumhydroksidina ( $\text{NaOH}$ ) ja kalium kaliumhydroksidina ( $\text{KOH}$ ). Valmiin sementin reaktiivisia ominaisuuksia voidaan muokata lentotuhkalla, masuunikuonalla ja silikalla. Lentotuhka vähentää huokosveden alkalisuutta ja kasvattaa myös betonin vetolujuutta. Masuunikuona vähentää myös huokosveden alkalisuutta. Silika muodostaa läpäisemättömän kennoston, jonka vuoksi vesi ja alkalit eivät pääse kulkeutumaan. Kennosto vähentää reaktioon vaadittavien alkalien määrää ja ASR-geelin kulkeutumista. [6.]

Betonin suhteellisen kosteuden tulee olla noin 80%, jotta reaktio on mahdollinen. Rakennetta ympäröivän huoneen tai alueen suhteellisen kosteuden ollessa 80% ei

alkalikivireaktiota pääse tapahtumaan. Valmiin betonirakenteen alkalikivireaktio voidaan estää betonirakenteen kosteudenhallinnalla. [7.]

#### 4.2.2 Myöhästynyt ettringiitin muodostuminen

Myöhästynyt ettringiitin muodostumisesta (DEF engl. delayed-ettringite formation) aiheutuvan mikrohalkeilun seurauksena betoni altistuu kemikaalihyökkäyksille. DEF tarkoittaa ettringiitin muodostumista kovettuneeseen betoniin. [4.] Ettringiitin muodostuminen plastisessa betonissa ei ole haitallista. [9.]

Myöhästynyt ettringiitin muodostuminen vaatii sisäistä tai ulkoista sulfaatin lähdettä sekä korkeaa ja pitkäaikaista kosteusrasitusta betonissa. Betoni voi sisältää runsaasti sulfaattimineraaleja, jolloin ulkoista sulfaatin lähdettä ei tarvita. Betonin lämpötilan tulee olla yli 70 °C, jotta myöhäinen ettringiitin muodostuminen on mahdollista. Korkean lämpötilan myötä sulfaattimineraalit reagoivat C-S-H-geelin ja huokosveden kanssa muodostaen ettringiittiä. [4.]

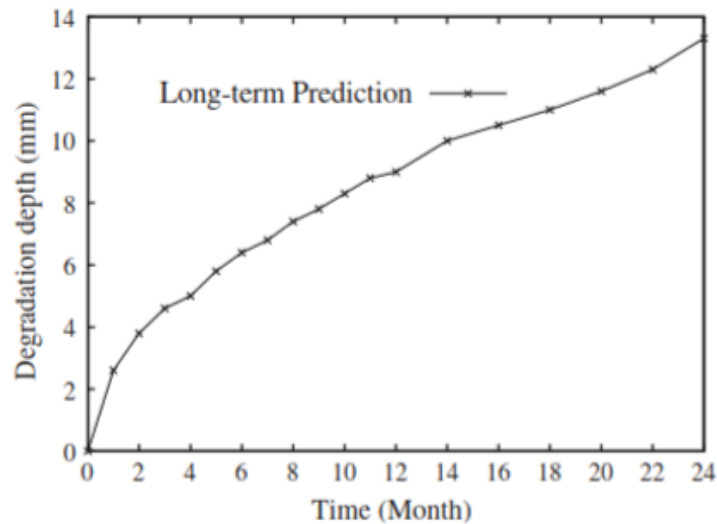
Ettringiittin kiteytyessä se täyttää betonin huokosia ja halkeamia aiheuttaen sisäistä painetta. Myöhästynyt ettringiitti heikentää betonin pakkaskestävyyttä, koska se täyttää betonin suojahuokoset. [4.]

#### 4.2.3 Aggressiiviset aineet

Aggressiivisilla aineilla tarkoitetaan tässä yhteydessä sellu- ja paperiteollisuudessa käytettyjä kemikaaleja. Kemikaalien määrä on suuri, joten tässä luvussa niitä käsitellään ryhmittäin.

Hapot liuottavat sementtiä. Betoni menettää asteittain lujuusominaisuutensa sementin liuetessa. Esimerkiksi rikkihappo reagoi portlandiitin ja C-S-H-geelin kanssa, jonka seurauksena ne liukenevat pois betonista ja tilalle saostuu kipsiä. Aiheutuneet vauriot ja vaurionopeus riippuvat hapon aggressiivisuudesta, happohyökkäyksen kestosta, hapon määrästä, betonin läpäisevyydestä sekä sementin koostumuksesta. Happoliuoksen virratessa vaurionopeus kasvaa, mutta liuoksen ollessa staattisessa tilassa vaurionopeus on pienempi. Kuitenkin betonirakenteeseen kohdistuvan jatkuvan happohyökkäyksen

tuloksena on betonin tuhoutuminen. [4.] Sellu- ja paperiteollisuudessa hapot voivat joutua betonipinnan kanssa kosketukseen roiskeina, vuotoina tai tarkoituksellisesti. Yleisimmin käytetyt hapot ovat rikki-, suola ja typpihapot. [4.] Kuvassa 2 on esitetty rikkihapon tunkeutumista betonirakenteeseen pitkällä aikavälillä.



Kuva 2. Rikkihapon tunkeutumissyvyys betoniin pitkällä aikavälillä. [4.]

Betoni itsessään on emäksinen aine, jonka vuoksi vain erittäin vahvat emäkset syövyttävät sitä. Yleisellä tasolla vahvoja emäksiä ei pidetä erityisen vaarallisena betonirakenteille. Vahvojen emästen ja betonin kemiallisista reaktioista muodostuu usein samankaltaisia tuotteita, jotka eivät vaikuta betonirakenteeseen merkittävästi. Natriumhydroksidi eli lipeä (NaOH) on vahva emäs, jota käytetään tunnetusti selluteollisuudessa. Mikäli betoni ei altistu pitkäaikaisesti vahvalle lipeäliuokselle, niin lipeää pidetään vain vähän aggressiivisena betonille. [4.]

Sulfaatit eli sulfaatti-ionit ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ovat aineiden suoloja. Sulfaattihyökkäys johtaa useisiin peräkkäisiin kemiallisiin reaktioihin, joiden seurauksena reaktioissa muodostuneet yhdisteet ovat tilavuudeltaan lähtötuotteita suurempia. Seurauksena tilavuuden muutoksesta betoni paisuu ja lujuus heikkenee. Sulfaatit itsessään eivät liuota betonia. Sulfaattihyökkäyksessä sulfaatti-ionit reagoivat portlandsementin tai portlandsementtiklinkkerin alumiinaatin eli trikalsiumalumiinaatin ( $\text{C}_3\text{A}$ ) tai sen reaktiotuotteiden kanssa. Sulfaatit muodostavat reagoidessaan portlandiitin kanssa kipsiä, joka edelleen reagoi esimerkiksi

hydratoitumattoman  $C_3A$ :n kanssa muodostaen ettringiittiä. Ettringiitin vaikutuksesta kovettuneessa betonissa kerrotaan luvussa 4.2.2. Sulfaatit voivat olla peräisin luonnon maaperästä ja vesistä tai teollisuuden kemikaaleista. Sulfaatinkestävä sementti tai maasuunikuonasementti suojaa betonia sulfaattihyökkäyksiltä. XA-rasitusluokissa on raja-arvoja sulfaattirasituksille betonin käyttöikäsuunnitteluun, joita esitetään luvussa 3. [4.]

Kloridit ( $Cl^-$ -ionit) ovat eri aineiden suoloja, jotka ovat kiteisessä muodossa esimerkiksi ruokasuola eli natriumkloridi ( $NaCl$ ). Klorideilla ei ole kykyä tuhota betonia, mutta ne tunkeutuvat betonin sisään rikkoen betoniteräksiä suojaavan passiivikalvon. Kloridikonsentraation tulee olla terästen pinnalla riittävän suuri eli 0,03 - 0,07 % betonin painosta, jotta passiivikalvo rikkoutuu. Klorideja betoniin voi päätyä ympäristöstä, kuten merivedestä, jäänpoistoaineista tai teollisuuden eri prosesseista. Kloridit siirtyvät betonin vesitäytteisiin huokosiin diffuusion avulla. [4.]

Kaasuja on tavallisessa ilmassa neljä kappaletta, jotka ovat typpi, happi, argon ja hiilidioksidi. Ilmakehään pääsee lisäksi muita kaasuja teollisuuden päästöistä ja muusta ihmisen toiminnasta. Teollisuudessa ilmenee kaasuja, joista tärkeimmät betonirakenteiden näkökulmasta ovat rikki- ja hiilidioksidi. Kaasut liukenevat helposti etenkin savupiipuissa ja kondensoituvat betonirakenteiden pinnalle piipun yläosissa. Rikki- ja hiilidioksidi reagoivat betonissa olevan kalsiumhydroksidin ( $CH$ ) kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia ( $CaCO_3$ ). Kalsiumkarbonaatin muodostuminen aiheuttaa betonin karbonatisoitumista, jota käsitellään tarkemmin luvussa 5.1. Rikkidioksidi on voimakkaampaa kuin hiilidioksidi, sillä se on vedessä liukoisempaa ja muodostaa vahvempia liuoksia. Rikkidioksidin liukeneminen betonirakenteen pintaan aiheuttaa betonin vaurioitumista. [4.]

## 5 Rasitusten aiheuttamat vauriomekanismit

Eri rasitukset aiheuttavat betonirakenteisiin erilaisia vaurioita. Tässä luvussa tutustutaan rasitusten aiheuttamiin vauriomekanismeihin ja kerrotaan, kuinka vauriomekanismien aiheuttamia ongelmia voidaan ehkäistä. Taulukossa 10 on koottu yhteenvetona eri rasitusten aiheuttamat tyypilliset vauriomekanismit.

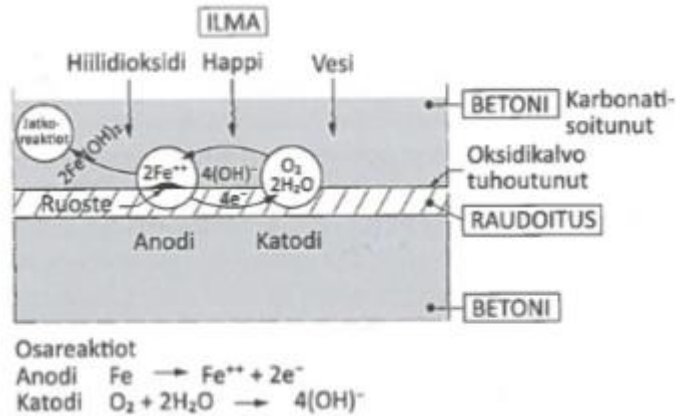
Taulukko 10. Rasitusten aiheuttamia tyypillisiä vauriomekanismeja.

Rasitus	Vauriomekanismi
Alkali-kiviainesreaktio	paisuttaa
Ettringiitti	paisuttaa
Hapot	liukeneminen, biologinen korroosio
Hiilidioksidi	karbonatisoituminen
Kloridit	raudoitteiden korroosio
Lämpötilarasitus	halkeilu
Mekaaninen	kulutus, halkeilu
Pakkasrasitus	paisuttaa
Sulfaatit	paisuttaa

### 5.1 Raudoitteiden korroosio

Raudoitteet, eli betoniteräkset ovat alttiita korroosiolle, eli ruostumiselle, joka johtuu metallien luontaisesta kyvystä muodostaa ioneja. Korroosio on sähkökemiallinen prosessi. [17.] Raudoitteiden korroosio voi alkaa, mikäli raudoitteiden ympärillä betonissa tapahtuu muutoksia, jonka seurauksena betonin fysikaalinen tai kemiallinen suoja häviää. Fysikaalisia muutoksia ovat halkeilu tai betonin rapautuminen. Kemiallista suojaa heikentävät karbonatisoituminen tai kloridien tunkeutuminen betoniin. [4.] Kuvassa 3 esitetään karbonatisoituneen betonin raudoitteen korroosion kulkua.

Normaali olosuhteissa raudoitteet ovat suojassa emäksisessä betonissa, sillä ne pystyvät muodostamaan oksidikalvon pintaansa emäksisessä ympäristössä. Oksidikalvo suojaa teräksiä korroosiolta, jolloin teräs passivoituu. Raudoitteiden poikkipinta-ala pienee korroosion vaikutuksesta. [17.]



Kuva 3. Betoniterästen ruostumisen edistyminen karbonatsoituneessa betonissa. [4.]

Karbonatsoitumiseksi kutsutaan raudoitteiden syöymistä lisääviä kemiallisia reaktioita. Reaktioiden seurauksena betonin pH-arvo laskee, eli sen emäksisyys heikkenee. Karbonatsoituminen etenee diffuusion vaikutuksesta. Karbonatsoitumista aiheuttaa pääasiassa ilman hiilidioksidi, joka reagoi betonin kalsiumhydroksidin tai C-S-H-geelin kanssa. Reaktiosta syntyy kalsiumkarbonaattia, joka pienentää betonin emäksisyyttä. [4.]

Karbonatsoituminen kulkeutuu tasaisena rintamana betonin pinnalta syvemmälle betoniin. Syvemmälle betoniin edetessä karbonatsoitumisen nopeus hidastuu, sillä hiilidioksidin pääsy syvemmälle betoniin vaikeutuu. Raudoitteen korrosio alkaa, jos karbonatsoitumisrintama kohtaa raudoitteen pinnan ja betonissa on happea sekä vettä. Karbonatsoituminen tulee huomioida betonin käyttöikäsuunnittelussa XC-rasitusluokilla. [4.] Taulukkoon 11 on koottuna betonin koostumuksen ja ympäristöolosuhteiden vaikutus karbonatsoitumisen kannalta.

Taulukko 11. Betonin koostumuksen ja ympäristöolosuhteiden vaikutus karbonatsoitumisen kannalta. [4.]

Erittäin vaikuttavat	Vaikuttavat	Vähän vaikuttavat
Betonin huokoisuus	Betonin kosteuspitoisuus	Kiviaines
Betonini tiiviys	Betonin laatu	Lämpötila
Ilmasto-olosuhteet	Hiilidioksidipitoisuus	Rakenteen muoto
Sementin laatu ja määrä	Lujuus	Rikkidioksidipitoisuus
Vesi-sementtisuhte	Sementin hienous	



Karbonatisoituminen aiheuttaa raudoitteiden korroosion lisäksi sementtikiven koostumuksen muutosta, huokoisuuden pienenemistä, läpäisevyyden pienenemistä sekä kutistuman ja viruman kasvua. Karbonasoituminen voidaan määrittää koekappaleilla tai arvioida laskentakaavoja hyväksikäyttäen. Karbonatisoitumisen etenemistä ei pystytä näkemään visuaalisesti betonin pinnalta. [4.]

Kloridien vaikutusta betoniin käsiteltiin luvussa 4.2.3. Kloridirasituksessa raudoitteiden korroosio on nopeampaa kuin karbonatisoituneessa betonissa. Kloridirasituksen aikana raudoitteiden passiivikalvo häviää paikallisesti, eikä suurelta rintamalta, niin kuin karbonatisoitumisen yhteydessä. Klorideilla on kyky liuottaa rautaa kulumatta itse reaktiossa. [4.]

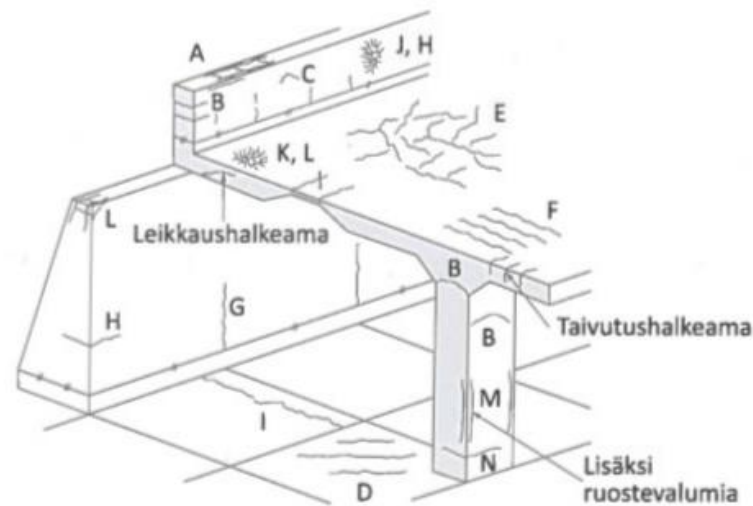
Kloridit tunkeutuvat betoniin diffuusion avulla. Kloridit liikkuvat betonin huokosissa veden välityksellä. Betonin tiiviys alentaa kloridien tunkeutumisenopeutta. Kloridien aiheuttama rasitus tulee huomioida betonirakenteiden rasitusluokkia valittaessa. XD-rasitusluokissa kloridien lähteenä on muu kuin merivesi, kuten esimerkiksi jäänsulatusaineet. XS-rasitusluokissa kloridien lähteenä on merivesi. Kloridien yhteydessä raudoitteiden korroosiolle haitallisinta on toistuva kastuminen ja kuivuminen. Kastumisen yhteydessä vesi imeytyy betoniin ja kuivuessaan vesi haihtuu pois jättäen kloridit betoniin. [4.]

Yleisesti raudoitteiden korroosiota voidaan ehkäistä vähähuokoisella ja tiiviillä betonilla. Betonin huolellisella tiivistämisellä ja jälkihoidolla pienennetään betonin ylimääräistä huokoisuutta. Lisäksi betonirakenteelle tulee valita riittävä standardin SFS-EN 1992-1-1 mukainen raudoitteiden betonipeitteen paksuus. Raudoitteena on mahdollista käyttää myös ruostumatonta terästä, joka hidastaa raudoitteiden korroosiota. Teollisuudessa erilaisten rasitusten yhteydessä betonin tiiviysominaisuudet voivat heikentyä, minkä seurauksena raudoitteet voivat altistua korroosiolle. [4.]

## 5.2 Halkeamat

Betoniin syntyy halkeama, kun sen vetolujuus ylittyy siihen kohdistuvan vetojännityksen vuoksi. Halkeaman syntyyn voi vaikuttaa useampi rasittava mekanismi, joka tekee halkeaman alkuperän toteamisesta vaikeampaa. Kovettuneessa betonissa halkeamia voi syntyä kemiallisten reaktioiden, tulipalon, kuivumiskutistumisen, raudoituksen

korroosion, lämpötilaerojen, liian suurien kuormitusten tai puutteellisen työsuorituksen seurauksena. [4.] Kuvassa 4 on esitetty erilaisia halkeilutyppejä.



Halkeilutyyppi	
Plastinen painuma	A, B, C
Plastinen kutistuminen	D, E, F
Lämpöliike	G, H
Kuivumiskutistuma	I
Pintahalkeilu	J, K
Pakkasrapautuminen	L
Raudotteiden korroosio	M
Alkali-kiviainesreaktio	N

Kuva 4. Halkeilutyppejä ja niiden sijainnit betonirakenteessa. [4.]

Betonirakenteen halkeilu lisää betonin läpäisevyyttä, jonka vuoksi betoniin pääsee tunkeutumaan haitallisia aineita. Haitalliset aineet pienentävät betonin emäksisyyttä, joka johtaa raudotteiden korroosioon. Betonirakenteissa haitallisimpina halkeamina pidetään 0,2 – 0,4 mm kokoisina, sillä niiden kautta haitalliset aineet pääsevät betoniin nopeasti. [24.]

Osa halkeilutypeistä aiheutuu betonin pakkomuodonmuutoksista, joita aiheuttavat lämpötilaerot tai betonin kutistuma. Pakkomuodonmuutoksesta aiheutuvat halkeamat syntyvät, kun betonirakenteen muodonmuutos on estetty. Rakenteen lämpötilaeroista aiheutuvat halkeamat syntyvät usein kovettuneeseen betoniin ensimmäisten päivien aikana betonin valusta. Pakkomuodonmuutoksia aiheuttaa myös betonin kutistuminen.

Kutistumisesta aiheutuvia halkeamia voi ilmetä pitkänkin ajan kuluessa, sillä kuivumis-kutistuma tapahtuu betonissa hitaasti. [24.]

Betonirakenteen halkeilulle on omat raja-arvot standardissa SFS-EN 1992-1-1. Betonirakenteen halkeilu ei saa heikentää betonirakenteen toimintaa, eikä vaikuttaa sen ulkonäköön ei-hyväksyttävällä tavalla. Betonirakenteiden halkeilun raja-arvot määräytyvät valittujen rasitusluokkien mukaan. [24.] Käyttörajatilassa kantavien rakenteiden halkeamanleveyden raja-arvona voidaan käyttää  $\leq 0,3$  mm. [4.]

Betonirakenteiden halkeilun minimoimiseksi on tärkeää suorittaa riittävän pitkä ja oikeaoppinen jälkihoito. Halkeilun rajoittamista voidaan ennakoida jo hyvällä suunnittelulla ja materiaaliominaisuuksien valinnalla. Raudoitteilla voidaan vähentää betonin halkeilun määrää ja halkeamien leveyttä. [4.]

### 5.3 Betonipinnan kuluminen

Betonirakenteiden pinnoille kulumaa aiheutuu liikenteestä sekä virtaavan veden rasituksesta. Kulumisen ilmiöt jaetaan abraasioon, kavitaatioon ja eroosioon. Abraasiolla tarkoitetaan betonilattian mekaanista kulumista, esimerkiksi raskaiden ajoneuvojen vaikutuksesta. [4.]

Kavitaatio murentaa betonipintaa nesteen välityksellä. Kavitaatioissa, usein vesi, alipaineistuu ja muodostaa kaasukuplia. Kavitaatiokuplat muodostuvat betonin pintaan veden virtaussuunnan vaihtuessa. Kavitaatiokuplan romahdus aiheuttaa räjähdystä muistuttavan reaktion, joka aiheuttaa suuren paineiskun betonin pintaan. [4.]

Eroosiolla tarkoitetaan tässä yhteydessä virtaavasta vedestä tai liuoksesta aiheutuvaa fysikaalista ja kemiallista rasitusta. Kiinteitä aineksia kulkeutuu virtaavan veden mukana, joka aiheuttaa betonipinnoille vaurioita. Virtausnopeus, betonipinnan muoto ja veden sisältämien rasittavien yhdisteiden määrä ja muoto vaikuttavat eroosion voimakkuuteen. [4.]

Betonipinnan mekaanista kulutuskestävyyttä voidaan parantaa kuitubetonilla, pinnoitteilla tai siroteilla. Virtauksesta johtuvaa kulumista voidaan ehkäistä betonipinnan riittäväällä lujuudella, betonirakenteiden muotoilulla sekä virtausnopeutta rajoittamalla. [4.]

#### 5.4 Betonin liukeneminen

Betonin liukeneminen on diffuusioreaktio, joka aiheutuu betonin altistuessa lievästi mineraalipitoiselle tai happamalle vedelle. Vaurion aiheuttaa kalsium- ja hydroksidi-ionit, jotka liukenevat pois betonin sementtikiven rakenteesta. Liukeneminen johtaa betonin huokoisuuden kasvuun. Happamat sekä neutraalit liuokset johtavat betonin nopeampaan liukenemiseen. Betonin liukeneminen helpottaa esimerkiksi sulfaatti-ionien tunkeutumista betoniin, joka voi johtaa betonin paisumiseen. [4.][25.]

Betonin liukenemistä edistävät hapot ja muut happamat yhdisteet. Betonien pinnoitteilla saadaan ainoastaan toimiva suoja aggressiivisia happoja vastaan. Seosaineilla, pienellä vesi-sementtisuhteella ja pidemmällä jälkihoidolla voidaan minimoida betonin liukenemisen vaikutuksia. [25.]

#### 5.5 Betonin tilavuudenmuutokset

Betonin tilavuudenmuutoksia ovat kutistuminen, viruma ja paisuminen. Pääasiallisina aiheuttajia betonin tilavuudenmuutoksille ovat betonissa tapahtuvat kemialliset reaktiot, rakenteen lämpötilan muutokset ja betonista poistuva vesi. Betonin tilavuudenmuutoksille tyypillistä on betonirakenteen halkeilu. [7.] Erilaisia halkeamatyyppejä on esitetty luvun 5.2 kuvassa 4.

##### 5.5.1 Kutistuminen

Betonille kutistuminen on luonnollinen mekanismi. Kutistumisen eri tyyppejä ovat plastinen kutistuminen, plastinen paisuminen, autogeeninen kutistuminen, ja kuivumiskutistuminen. Kutistumiseen liittyy aina vesi ja sen määrä betonissa. Yleisin kutistumisen muoto on kuivumiskutistuminen. [7.]

Plastisella kutistumisella tarkoitetaan betonin pinnan liiallista kuivumista ennen kuin betoni kerkeää sitoutua. Painovoiman seurauksena runkoaines painuu betonimassan pohjalle ja kevyempänä vesi nousee pintaan. Vesi haihtuu betonin pinnalta otollisissa olosuhteissa. Haihtuvan veden määrän ollessa suurempi kuin pintaan nousevan veden määrä, aiheutuu betonissa kutistumista. Kutistumisen seurauksena betoniin syntyy vetojännityksiä, joka voi aiheuttaa kutistumishalkeamia. [21.]

Plastisella painumisella tarkoitetaan, kun betonimassa painuu alaspäin painovoiman vaikutuksesta. Plastisen painumisen halkeama pääsee syntymään, jos painuminen estyy esimerkiksi raudoitustangon vuoksi. Raudoitustanko estää betonin painumisen tangon yläpuolelta. Betonin pintaan raudoitustangon kohdalle syntyy tällöin halkeama. Betonimassa pääsee kuitenkin painumaan vapaasti raudoitustangon alapuolella, jolloin raudoitustangon alapuolelle voi jäädä tyhjä tila, mikä heikentää betoninterästen toimintaa rakenteessa. [21.]

Autogeenisellä kutistumisella, joka tunnetaan myös nimellä kemiallinen kutistuminen tai hydrataatiokutistuma, tarkoitetaan sementin hydrataatiosta aiheutuvaa kutistumista. Veden ja sementin hydrataatiossa syntyvän sementtikiven tilavuus on pienempi kuin sen lähtöaineiden yhteenlaskettu tilavuus. Tämä tilavuudenmuutos aiheuttaa betonin kutistumista. [22.]

Kuivumiskutistumista aiheuttaa betonissa oleva vesi ja sen haihtuminen tai siirtyminen pienemmistä huokosista suurempiin. Kuivumiskutistumisesta osa on palautuvaa, eli jos kutistunut betoni pääsee kastumaan uudelleen, niin sen tilavuus suurenee. [21.] Ympäristöolosuhteet ja betonin koostumus vaikuttavat betonin kuivumiskutistumiseen. [23.]

Kutistumista voidaan ehkäistä kutistumaa vähentävillä lisäaineilla. Lisäksi teräs- ja muovikuitujen käytöllä voidaan estää esimerkiksi plastisen ja kuivumiskutistuman syntyä. Jälkihoidon merkitys on myös suuri kutistumisen hallinnassa varsinkin betonin kehittymisen varhaisvaiheessa. [23.]

### 5.5.2 Viruma

Virumalla tarkoitetaan tietyn ajan kuluessa tapahtuvaa muodonmuutosta, jonka aiheuttajana on jokin kuormitus. Kuormitus aiheuttaa rakenteeseen painetta, jolloin betonin geelihuokosista poistuu vesi ja sementtigeeli pääsee tiivistymään. Viruman aiheuttama muodonmuutos ei palaudu kokonaan. Virumaan vaikuttavia tekijöitä ovat rakenteen paksuus, betonin koostumus, betonin ikä kuormituksen alussa, kuormituksen kesto ja ympäristön olosuhteet. [23.]

### 5.5.3 Paisuminen

Betonin paisumista aiheuttaa betonissa jäänyt vesi tai betonin sisäiset kemialliset reaktiot, joiden reaktiotuotteiden tilavuus on suurempi kuin lähtöaineiden tilavuus. Näitä reaktioita ovat esimerkiksi sulfaattihyökkäyksessä muodostuva ettringiitti ja alkalikivainesreaktio. Tilavuudenmuutos aiheuttaa betoniin sisäisiä vetojännityksiä. Betoni alkaa halkeilemaan ja rapautumaan, kun vetojännitykset ylittävät betonin vetolujuuden. Halkeilu ja rapautuminen altistaa betonirakenteen suuremmille rasituksille, koska haitalliset aineet pääsevät tunkeutumaan betoniin helpommin. [4.]

### 5.6 Biologinen korroosio

Biologista korroosiota voi esiintyä tuulettamattomissa jätevesisäiliöissä, -altaissa tai viemäreissä. Biologisessa korroosiossa elävät bakteerit aiheuttavat korroosiota kostean ilmatilan pinoilla. Säiliöihin pääsee syntymään lietekerros, jos happi loppuu viemäreistä. Lietekerroksen seurauksena ilmassa olevat bakteerit passivoituvat muodostaen anaerobisen bakteeritoiminnan seurauksena rikkivetyä ( $H_2S$ ). Rikkivedyn määrään vaikuttaa virtaavan veden pH-arvo. Eniten rikkivetyä muodostuu, kun virtaavan veden pH-arvo on emäksinen. [4.]

Rikkivety ei vahingoita betonia, mutta sen liuetessa märän betonin pinnalle, pinnalla olevat bakteerit hapettavat rikkivedyn rikkihapoksi ( $H_2SO_4$ ). Mikäli rikkivety ei pääse liukenemaan virtaavan vedenpinnan yläpuolelle märkiin betonirakenteisiin, niin rikkihappoa ei muodostu. Rikkihappo tuhoaa betonia aggressiivisesti liuottaen sitä. [4.]

Biologisen korroosion torjuntaa on vaikea hoitaa betoniteknisillä ominaisuuksilla. Viemäriin tulisi järjestää riittävä tuuletus, jotta rikkivety saataisiin pois viemäristä. Jäteveden virtausnopeus tulisi myös pitää riittävänä, jolloin lietettä ei pääsisi syntymään. Betonin suojaaminen biologiselta korroosiolta voidaan toteuttaa erilaisilla pinnoitteilla. Epoksi- tai uudemmat nanopinnoitteet tarjoavat suojan biologiselle korroosiolle. [4.]

## 6 Sellutehtaan havaitut vauriot

Tämän tutkimuksen aikana käytiin erään sellutehtaan tiloissa tutkimassa betonirakenteiden vaurioita. Vaurioita oli syntynyt niin kemiallisesta rasituksesta, kuin mekaanisesta rasituksestaakin. Vaurioista kerrotaan missä osassa prosessia ne ovat, vaurioiden mahdollinen aiheuttaja, mikäli se on selvä, vaurion tyyppi ja rakenne, jossa vaurio on. Tässä työssä ei käsitellä kaikkia havaittuja vaurioita, vaan vaurioista on valittu työn aihepiiriin sopivimmat.

### 6.1 Säiliöperustukset

Tutkittavan kohteen säiliöperustuksissa havaittiin toistuvia betonivaurioita. Vauriot ilmenevät säiliöperustusten yläreunoissa betonin murtumina. Murtumat esiintyivät pääasiassa kiinnityslevyjen välillä. Säiliöperustusten vaurioita löytyi sisä- sekä ulkotiloista. Joissain tapauksissa säiliöperustuksesta oli murtunut betonia useammasta kohdasta. Kuvassa 5 ja 6 on esitettyä massatehtaalla sijaitsevan EOP-suodossäiliön säiliöperustuksen perusmuurissa oleva betonivaurio.



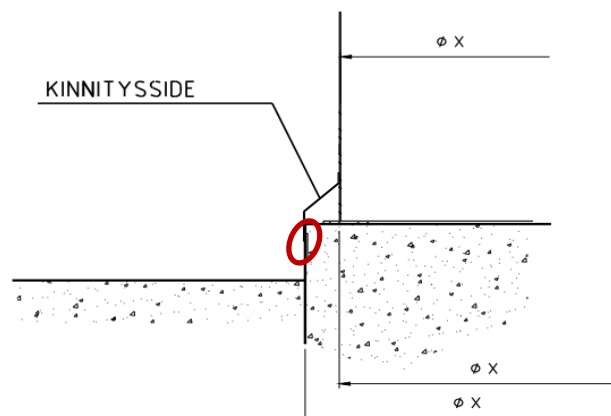
Kuva 5. Massatehtaan EOP-suodossäiliön perusmuurin yläreunasta on murtunut betonia.





Kuva 6. Säiliöperustus on vaurioitunut niin, että betonirakenteen raudotteet ovat esillä.

Kuvassa 7 on esitetty yleiskuva tasapohjaisen terässäiliön kiinnityksestä säiliöperustuksen perusmuuriin kiinnityssiteen avulla. Terässäiliön kiinnitysside on hitsattu kiinni perusmuurin ulkokehällä oleviin kiinnityslevyihin. Kuvassa 7 on esitetty punaisella merkillä vaurion pääasiallinen sijainti.



Kuva 7. Tasapohjaisen säiliön kiinnitys perustukseen kiinnityssiteellä.

Säiliöperustuksien vaurioita on korjattu betonipaikkauksella. Kuvassa 8 on esitetty paikkaamalla korjattu säiliöperustuksen perusmuuri, jonka pintaan on muodostunut uudeen mikrohalkeamia.



Kuva 8. Korjattu säiliöperustus, jonka pinnalle on muodostunut uudelleen mikrohalkeamia.

Säiliöperustuksista havaittujen ongelmien tarkkaa alkuperää ei saatu tämän tutkimustyön aikana selville. Terässäiliöiden korkeiden käyttölämpötilojen vuoksi lämpölaajeneminen aiheuttaa betonin lohkeamista säiliöperustusten ulkokehältä raudoituksen ulkopuolelta. Lisäksi terässäiliön pohjasta ja kauluksesta aiheutuu kitkavoimia betonirakenteen yläpintaan lämpöliikkeen vuoksi.

## 6.2 Pumppuperustukset

Tutkittavan kohteen pumppuperustuksissa havaittiin ongelmia. Ongelmia ovat aiheuttaneet pumppuperustuksiin valetut pumppujen teräsrungot, jotka ovat irronneet pumppuperustuksesta. Irtoamisella tarkoitetaan tässä yhteydessä pumppuihin ja moottoreihin aiheutuvaa mitattavissa olevaa ylimääräistä värinää. Teräsrunkojen irtoaminen on havaittu pumppujen värähtelymittareista tai pumppujen vikaantumisen yhteydessä. Myös osassa tapauksissa pumppujen linjauksen yhteydessä teräskehä on noussut irti pumppuperustuksesta.

Havaittuja ongelmia on esiintynyt matalissa sekä korkeissa pumppuperustuksissa. Kuvassa 9 on esitettyä korkea pumppuperustus, johon irti oleva pumppu on väliaikaisesti sidottu erillisellä teräsrakenteella. Kuvassa 9 olevan pumppuperustuksen valu on ollut kaksiosainen, eli se koostuu valusta sekä jälkivalusta. Matalammat pumppuperustukset

ovat valettu yhdessä vaiheessa. Matalampana perustuksena tässä tapauksessa pidetään alle 1000 mm korkeata pumppuperustusta.



Kuva 9. Pumpun väliaikainen kiinnitys betoniperustukseen.

Matalimmissa pumppuperustuksissa pumppujen teräsrungot ovat kiinnitetty pohjalaattaan kemiallisilla ankkureilla. Korkeammissa pumppuperustuksissa pumppujen kiinnikejalat valetaan jälkivalun yhteydessä kiinni perustukseen. Pumppuperustuksia varten pohjalaattaan on kiinnitetty kemiallisella ankkurimassalla tartuntaraudat. Pumppuperustuksissa käytetyn betonin tiedot:

- Nimellislujuus C40/50
- Rasitusluokka XC4
- SR-sementti
- Vesi-sementtisuhde 0,41
- Lisäaineet: kutistumisen estoaine, notkistin, muovikuitu sekä stabilisaattori

Pumppuperustusten standardikuvassa mainitaan, että teräsrunossa on huomioitava betonin kutistuminen riittävällä jäykkyydellä tai tartunnoilla betoniin. Pumppuperustuksissa käytetty betoni on ollut vähän kutistuvaa.

Pumppujen teräsrunkoja on kiinnitetty takaisin pumppuperustuksiin injektoimalla. Ennen teräsrungon injektoimista sen ympäriltä on poistettu betonia kulmahiomakoneella, millä on pyritty varmistamaan teräsrungon tartunta pumppuperustukseen. Useissa tapauksissa injektoinnin jälkeen teräsrunko on pysynyt kiinni pumppuperustuksessa. Kuvassa 10 ja 11 on esitetty pumppuperustukseen injektoimalla kiinnitetty pumppu.



Kuva 10. Injektoimalla pumppuperustukseen takaisin kiinnitetty teräsrunko.





Kuva 11. Laitteen teräsrunko on kauttaaltaan injektoitu takaisin kiinni pumppuperustukseen.

Teräsrunгон irtoamiselle pumppuperustuksesta ei tutkimuksen aikana löytynyt yksiselitteistä syytä. Useissa tapauksissa teräsrunгон irtoaminen perustuksista on havaittu laiterikon tai putkilinjojen värähtelyn yhteydessä. Laiterikko tai putkilinjojen värähtely aiheuttaa suuria dynaamisia rasituksia perustukseen, mikä mahdollistaa teräsrunгон irtoamisen perustuksesta. Yhdessä tapauksessa pumpun teräsrunko on irronnut perustuksista ilman mahdollista ulkoista aiheuttajaa.

### 6.3 Kuorimon sulatuskuljettimen päätykannet

Sellutehtaaseen tulevat puut sulatetaan ja kuoritaan ennen hakettamista. Puut lastataan sulatuskuljettimenhihnalle, josta ne jatkavat matkaansa kuorimarumpuun. Puut annostellaan sulatuskuljettimelle usein niin, että osa puusta jää sulatuskuljettimen vinojen betonikansien päälle. Sulatuskuljettimien päädyissä olevat vinot betonikannet ovat vaurioituneet pahoin. Sulatuskuljettimien betonikansien alla toimii sähkökeskuksia. Kuvassa 12 on esitetty sulatuskuljettimen pahoin vaurioitunut betonikansi.



Kuva 12. Sulatinkuljettimen päätykannen vauriot betonirakenteen alapuolelta kuvattuna.

Betonikansi on 250 mm paksu betonilaatta. Sulatinkuljettimen leveys on 5200 mm ja laatan pituus on 1800 mm. Suunnitelmissa betonin lujuudeksi on valittu C30/37. Rasi- tusluokiksi on valittu XC4 ja XF1. Sellutehtaalla kahden sulatinkuljettimen päätyjen be- tonikannet ovat vaurioituneet pahoin.

Betonirakennetta on korjattu ja yritetty vahvistaa lisäraudoituksella ja paksummalla be- tonilaatalla. Vahvistettu betonikansi on vaurioitunut uudelleen myöhemmässä vai- heessa. Kuvassa 13 on esitetty korjausta varten valmisteltu sulatinkuljettimen betoni- kansi päältä päin, mistä on piikattu irrallinen betoni pois.



Kuva 13. Sulatinkuljettimen betonikansi, joka on piikattu puhtaaksi korjausta varten.

Betonirakenteen vaurio on syntynyt puiden aiheuttamasta kovasta mekaanisesta rasituksesta. Puut aiheuttavat pudotessaan betonikannelle kovia iskuja. Lisäksi puut raahtautuvat betonikantta pitkin sulatinkuljettimen hihnalle aiheuttaen mekaanista rasitusta betonikanteen.

#### 6.4 Betonirakenteiden pinnoitukset

Tutkittavassa kohteessa on havaittu betonin syöpmistä lattioissa, pumppuperustuksissa, kaivoissa ja kanaaleissa. Tässä luvussa esitetään pinnoittamista vaativien betonirakenteiden vaurioita. Kuvassa 14 on esitetty pahoin vaurioitunut jätevedenpuhdistamon kemikaalipurkualueen kaivo.





Kuva 14. Jätevedenpuhdistamon kemikaalipurkualueen kaivon pahasti vaurioitunut betonirakenne.

Kaivoissa ja kanaaleissa on käytetty sulfaatinkestävää sementtiä. Kuvassa 14 esitetyn kaivon betonin kemiallinen kestävyys ei ole ollut riittävä sen kemialliselle rasitukselle. Rakenteiden kemiallisten rasitusten kartoitus on todella tärkeää, sillä liiallinen betonin syöpyminen saattaa aiheuttaa lopulta kemikaalien pääsyn maaperään.

Kohteessa pinnoituksia on suoritettu jälkikäteen tarpeen mukaan. Muutamissa tapauksissa pinnoitetyyppejä on jouduttu kokonaan vaihtamaan. Kuvassa 15 on esitetty yksi jätevedenpuhdistamon altaista, jossa pinnoitetyyppejä on vaihdettu. Uusi pinnoite on vaurioitunut ja irronnut betonirakenteen pinnasta.





Kuva 15. Pinnoitteen vaurio.

Tyypillisimpiä pinnoitettavia kohteita sellutehtaalla ovat betonilattiat. Sellu- ja paperiteollisuudessa betonilattioita pinnoitetaan mekaanisen sekä kemiallisen rasituksen takia. Kuvassa 16 on esitetty pinnoitusta vaativa syöpynyt betonilattia.

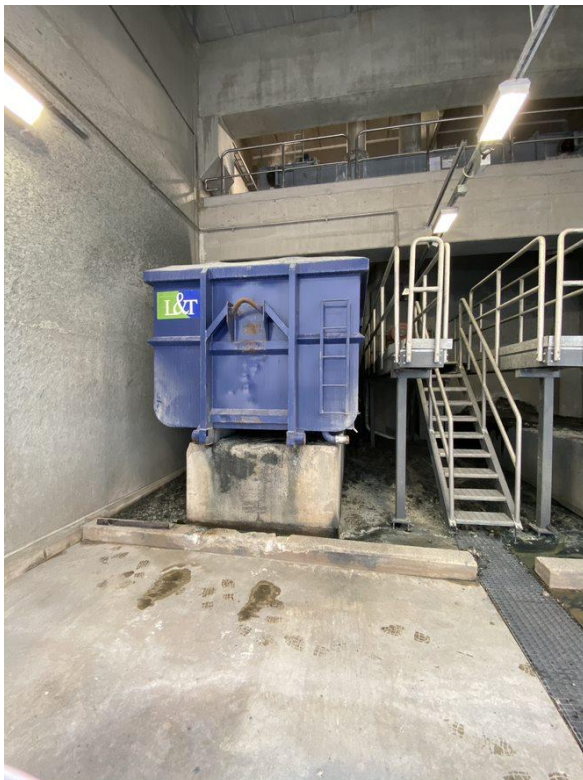


Kuva 16. Kemikaalirasituksesta syöpynyt betonilattia.

Betonin syöpyminen on aiheutunut kemiallisen rasituksen seurauksena. Kanaaleissa ja kaivoissa voi lisäksi tapahtua eroosiosta tai kavitaatiosta aiheutuvaa vaurioitumista, jonka seurauksena kemialliset rasitukset vaurioittavat betonia vielä rankemmin.

### 6.5 Kaustistamon viherlipesäkalavojen perustukset

Kaustistamolla viherlipesäkalavat ovat vaihtolavoja, joita vaihdetaan päivittäin useamman kerran. Kuvassa 17 on esitetty vaihtolava betoniperustuksen päällä.



Kuva 17. Viherlipesäkalava betoniperustuksen päällä.

Vaihtolavojen betoniperustukset ovat vaurioituneet selvästi sen etuosasta. Lisäksi betonirakenteen päälle ja ympärille kertyy lunta sekä muita epäpuhtauksia. Lumen sulaessa betonirakenteen päälle syntyy lammikoitumista, joka altistaa betonirakenteen kosteusrasitukselle.

Betoniperustuksen suunniteltu betonin lujuusluokka on C30/37 ja rasisuusluokka on XC3. Betoniperustuksen päällä on pitkät kiinnityslevyt, joka suojaa betonipintaa kulutukselta. Myöhemmin betoniperustuksen päälle on asennettu L-muotoiset teräkset ohjaamaan vaihtolavaa. Kuvassa 18 on esitetty vaurioitunut vaihtolavojen betoniperustus, jossa näkyy myös perustuksen päällä olevaa lammikoitumista ja muita epäpuhtauksia.



Kuva 18. Viherlipeänsakkalavan vaurioitunut betonirakenne.

Etuosan vauriot syntyvät vaihtolavan vaihdon yhteydessä aiheutuvista iskuista. Umpinaisen betoniperustuksen päälle kertyy runsaasti epäpuhtauksia, jotka vaihtolavan vaihdon yhteydessä vaurioittavat betonin pintaa kauttaaltaan. Perustuksen takaosan ympärille kinostuva lumi ja muut epäpuhtaudet altistavat betonirakenteen kyljet suuremmalle rasisuudelle.

## 7 Tulokset

Tässä luvussa pyritään esittämään havaittujen vaurioiden pohjalta parannusehdotuksia betonirakenteille, joissa havaittiin ongelmia. Kaikkia havaittuja ongelmakohtia ei pystytä perustellusti parantamaan ainoastaan betonin ominaisuuksia muokkaamalla. Osa havaituista vaurioista vaatisi tarkempaa tutkimusta, jotta vaurion alkuperä voitaisiin varmuudella todeta.

### 7.1 Säiliöperustukset

Säiliöperustuksien vaurioiden alkuperää ei varmuudella saatu todettua tämän työn aikana. Vaurioiden aiheuttajaksi kuitenkin epäillään korkeista käyttölämpötiloista aiheutuvaa lämpöliikettä. Lämpöliikkeestä seuraa pakkovoimia teräksen ja betonin liitoskohtiin.

Säiliöperustuksissa kiinnityslevyt ovat valettuna säiliöperustuksen ulkokehälle. Vaurioita ilmeni kiinnityslevyjen välillä, mutta ei suoraan kiinnityslevyjen kohdalla.

Säiliöperustuksen ja säiliön pohjan tai kauluksen välisten liitoskohtien tulisi kestää mahdollisesta säiliön lämpöliikkeestä aiheutuvat kitkavoimat. Säiliön pohja tai kaulus pystyy laajentuessaan aiheuttamaan vetojännityksiä säiliöperustuksen yläreunaan, minkä seurauksena betoni murtuu. Liitoskohdat on mahdollista toteuttaa esimerkiksi liukulaakerien avulla. Liukulaakerin tehtävänä on eliminoida vaakaliikkeistä, kuten kutistumisesta ja lämpöjännityksistä aiheutuvat voimat. Huoltovapaita liukulaakereita markkinoidaan tällä hetkellä usean valmistajan toimesta. Liukulaakereita on saatavilla eri vakioleveyksillä laajoillekin pinnoille. Liukulaakereilla saavutetaan 0,05 – 0,10 suuruinen kitkakerroin.

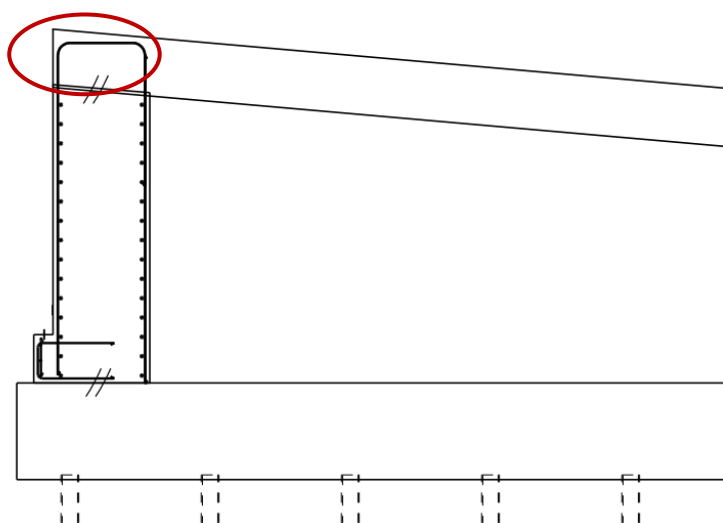
Vaihtoehtoisesti perusmuurin ulkokuoren yläreunan eristäminen muusta rakenteesta, esimerkiksi sokkelihalkaisulla, estää lämpölaajentumisen aiheuttamia rasituksia säiliöperustuksen ulkokuoreen. Säiliöperustuksen perusmuurin eristäminen vähentää myös betoniin kohdistuvaa lämpötilaeroa.

Lisäksi säiliöperustusta suunniteltaessa on huomioitava, että säiliöperustukselle tuleva säiliökuorma ei saa kohdistua liian lähelle perustuksen ulkoreunaan. Säiliöperustuksen



tulee olla tarpeeksi leveä, jotta säiliökuorma kohdistuu perustukseen oikealla tavalla. Liian lähelle ulkoreunaa sijoitettu säiliökuorma aiheuttaa vetojännitystä raudoittamattomalle alueelle, mikä johtaa betonin murtumiseen.

Säiliöperustuksen yläpään raudoituksessa tulee olla huolellinen, jotta rauditus pystyy vastaanottamaan perustuksen yläreunaan kohdistuvat vetojännitykset. Kuvassa 19 on esitetty mallikuva vinopohjaisten säiliöiden perusmuurin ja pintalaatan välisestä raudoituksesta. Raudoituksen hyötyä voidaan kuvan 19 tapauksessa tehostaa, mikäli perusmuurin yläpään raudoite olisi pintalaatan yläpinnan muotoinen.



Kuva 19. Vinopohjaisen säiliönperustuksen perusmuurin ja pintalaatan välinen rauditus.

## 7.2 Pumppuperustukset

Teräsrunkojen irtoamisen syytä pumppuperustuksista ei saatu yksiselitteisesti tässä työssä selville. Pumppujen hajoamisen yhteydessä havaitut teräsrunkojen irtoamiset ovat mahdollisesti aiheutuneet viallisten pumppujen epäkeskeisistä dynaamisista rasituksista. Laitteiden epäkeskisyyttä voi kasvattaa laitteen ikääntyessä väsymisilmiöt, epäpuhtaudet sekä kuluminen.

Pumppuperustuksiin kohdistuvat dynaamiset kuormat tulee ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa. Perustuksen mitoittamiseen vaikuttaa perustuksen päällä toimiva laite. Perustussysteemin ominaistajuuden tulee olla pienempi tai suurempi kuin perustuksen päällä

toimivan laitteen herätetaajuus. Tätä laitteen herätetaajuudesta poikkeavaa ominaistajuuden valintaa kutsutaan laiteperustuksen viritykseksi. Mikäli laitteen herätetaajuus on sama kuin perustussysteemin ominaistajuus, niin silloin laite toimii resonanssialueella, joka synnyttää värinää. Rakennesuunnittelussa tarvittavien laitteiden kuormitus- ja lähtötiedot määrittävät laitteiden valmistajat. Tiedonvaihto prosessi-, laite- ja rakennesuunnittelijan välillä tulee olla saumatonta, jotta suunnitellut laiteperustukset toimivat häiriöttä suunnitelluille laitteille.

Tapaus, jossa pumpun teräsrungon irtoaminen on havaittu ainoastaan pumpun värähtelymittareista, on haastava. Potentiaalinen teräsrungon irtoamisen aiheuttaja on betonin kutistuminen. Kuivumiskutistuma aiheuttaa betoniin mikrohalkeamia, jotka heikentävät teräsrungon ja pumppuperustuksen tartuntaa. Pumppuperustuksissa on käytetty vähän kutistuvaa betonia, minkä vuoksi betonin kutistuminen on kuitenkin epätodennäköistä. Betonin jälkihoito ja tiivistäminen tulee suorittaa ohjeiden mukaisesti, jotta betonin kutistumisesta aiheutuvat halkeamat voidaan minimoida.

Teräsrungon ja pumppuperustuksen välistä tartuntaa on mahdollista parantaa lisätartuntaraudoilla. Tartuntaraudat hitsataan pistehitseillä kiinni laitteen teräsrunkoon. Näin teräsrungon tartunta pinta-alaa saadaan kasvatettua betoniperustuksessa.

Putkien asennuksessa tulee varmistaa, ettei putkisto kuormita pumppupesää. Putket on tuettava asianmukaisesti mahdollisimman läheltä pumppua. Putkistoasennus tulee yleisesti suorittaa laitetoimittajan ohjeiden mukaan, jotta putkisto ei vaurioita pumppua. Putkiston liiallinen värinä aiheuttaa ylimääräistä dynaamista rasitusta myös pumppuperustukseen.

### 7.3 Kuorimon sulatuskuljettimen päätykannet

Kuorimon sulatinkuljettimen betonikannen iskun- ja kulutuskestävyyttä tulisi kasvattaa, jotta se kestäisi puiden aiheuttaman mekaanisen rasituksen. Betonin koostumusta muokkaamalla betonin iskunkestävyyttä pystytään parantamaan, mutta alueella oleva mekaaninen rasitus on niin kovaa, että betonikannen vaurioitumista ei voi estää. Betonikannen paksuutta runsaasti kasvattamalla vaurioitumista voidaan hidastaa, mutta betonikannen vauriolta ei voida välttyä.

Betonirakenteen iskun- ja kulutuskestävyyttä on mahdollista vahvistaa esimerkiksi 15 – 20 mm paksuisella teräslevyllä. Teräslevy ankkuroidaan kiinni betonikanteen esimerkiksi lyöntiankkureilla. Teräslevyn tehtävänä on vastaanottaa puiden iskuista aiheutuvat voimat ja välittää ne tasaisesti betonirakenteen pintaan.

#### 7.4 Betonirakenteiden pinnoitukset

Tässä luvussa ei paneuduta yksityiskohtaisesti havaittujen vaurioiden tai jonkin vaurion korjaamiseen pinnoittamalla. Tarkoituksena on kertoa yleisesti betonirakenteiden pinnoittamisesta ja siitä, mitä suunnittelijan tulisi ottaa huomioon pinnoittamisessa.

Kohteessa on käytetty useissa rakenteissa sulfaatinkestävää sementtiä, millä on pyritty parantamaan betonin kemiallista kestävyyttä. Sulfaatinkestävällä sementillä ei voida kuitenkaan estää kokonaan aggressiivisten kemikaalien aiheuttamia reaktioita, sillä reagoivan  $C_3A$ :n pitoisuus on rajoitettu sementtistandardissa. Työssä mainituilla luvun 2.4 seosaineilla voidaan korvata portlandsementin osuutta sideaineena, jonka seurauksena betonille saadaan parempi kemiallinen kestävyys.

Betonin koostumusta ja rakennetta muokkaamalla ei välttämättä voida taata betonin kemiallista tai mekaanista kestävyyttä sellutehtaan rasituksissa, minkä vuoksi usein betoni on pinnoitettava. Pinnoittamisella tarkoitetaan betonin pintakerroksen päälle levitettävää pintakerrosta, jonka tekniset ominaisuudet tulevat esiin sen levityksen aikana tai vasta sen jälkeen. Seisokkien aikana korjatuista betonivaurioista aiheutuu aina ylimääräisiä kustannuksia, joten betonirakenteen suunnittelu toteutuville kemikaaliselle tai mekaaniselle rasitukselle on hyvin tärkeää. Rakenteen kemikaalin kestävyys tulisi ensisijaisesti pohtia kemiallisesti kestävästä betonista, sillä pinnoittaminen on yleensä huomattavasti kalliimpaa, kuin kemiallisesti kestävä betonin käyttö.

Betonirakenteiden kemiallisesti kestävä pinnoitetta valittaessa tulee huomioida rasitusta aiheuttava kemikaali, kemikaalin lämpötila, vaikutusaika, pitoisuus, happamuus ja betonipinnan kaltevuus. Betonirakenteille rasitusta aiheuttavien kemikaalien arviointi voi olla haastavaa. Prosessisuunnittelijan tulisi yhdessä rakennesuunnittelijan kanssa arvioida mahdolliset kemikaalirasitukset, jotta pinnoitukset pystytään kohdistamaan oikeisiin paikkoihin. Toisinaan prosessista saattaa aiheutua kemikaalirasituksia

erikoistoimenpiteiden aikana, kuten huoltotyöt, vaikka prosessissa niitä ei muuten aiheutuisi. Betonin pinnoitetyyppejä ovat esimerkiksi polyurea, polyuretaani, akryyli, sementti-polymeeriseos, vinyyliesteri ja epoksi. [4.] Taulukkoon 12 on koottuna betonilattiapinnoitteiden ominaisuuksia.

Taulukko 12. Pinnoitteiden ominaisuuksia. [4.]

<b>A</b> <b>Pölynsidonta-</b> <b>aineet</b>	Fluatiointi	Läpäisee vesihöyryä. Soveltuu alhaisiin lämpötiloihin
	Imeytyvät tuotteet	Sitovat pölyn
<b>B</b> <b>Ohennettavat</b> <b>maalit ja lakat</b>	Vesiohenteiset epoksit	Läpäisevät vesihöyryä
	Liutoinohenteiset epoksit	Kohtuullinen mekaanisen rasituksen kestävyys. Parantavat betonialustan pinalujuutta
	Kosteuskovettuvat polyuretaanit	Kohtuullinen mekaanisen rasituksen kestävyys. Parantavat betonialustan pinalujuutta
<b>C</b> <b>Liutteet-</b> <b>mat lakat,</b> <b>maalit ja pin-</b> <b>noitteet</b>	Epoksit	Kohtuullinen mekaanisen ja kemiallisen rasituksen kestävyys.
	Polyuretaanit	Kohtuullinen mekaanisen ja kemiallisen rasituksen kestävyys. Helposti puhdistettava.
	Vinyyliesterit ja yhdistelmäpolyuretaanit	Todella hyvä mekaaninen kestävyys ja erinomainen lämmön sekä kemikaalien kestävyys.
<b>D</b> <b>Itsetiivistävät</b> <b>massapin-</b> <b>noitteet</b>	Epoksimassat	Hyvä mekaanisen ja kohtuullinen kemiallisen rasituksen kestävyys. Helposti puhdistettavissa.
	Polyuretaanit	Hyvä mekaanisen ja kemiallisen rasituksen kestävyys. Kestävät iskuja. Voivat toimia myös vedeneristeenä. Helposti puhdistettavissa.
	Akryylit	Hyvä mekaanisen rasituksen kestävyys. Nopeasti reagoivia. Vesitiiviitä.
	Sementtipolymeerimassat	Hyvä mekaanisen rasituksen ja erinomainen lämmön kestävyys. Nopeasti kovettuvia. Vesitiiviitä.
<b>E</b> <b>Hierrettävät</b> <b>massapin-</b> <b>noitteet</b>	Epoksit	Erittäin hyvä mekaanisen rasituksen kestävyys. Kestävät lämpöshokkeja.
	Akryylit	Erittäin hyvä mekaanisen rasituksen kestävyys. Toimivat vedeneristeenä. Nopeasti reagoivia. Voidaan työstää myös alhaisissa lämpötiloissa.
	Polyuretaanit	Erittäin hyvä mekaanisen ja hyvä kemiallisen rasituksen kestävyys. Hyvä iskunkestävyys. Toimivat vedeneristeenä.
	Vinyyliesterit ja yhdistelmäpolyuretaanit	Erittäin hyvä mekaaninen kestävyys ja erinomainen lämmön sekä kemikaalien kestävyys.
<b>F</b> <b>Erikoispin-</b> <b>noitteet</b>	Sähköä johtavat pinnoitteet	Pinnoitemassa maadoitettavissa.
	Elastiset pinnoitteet	Erittäin hyvä halkeamien silloituskyky myös alhaisissa lämpötiloissa.
	Polyurea	Ruiskutettavia, nopeasti kovettuvia. Erittäin hyvä mekaaninen kestävyys ja erinomainen lämmön sekä kemikaalien kestävyys.



Ennen pinnoittamista pinnoitettavasta alustasta tulee arvioida sen puhtaus, kosteus, lujuus ja sileyys. Arviointi tulee tehdä, jotta voidaan varmistua, että pinnoitettava alusta sopii pinnoitettavaksi. [4.]

Pinnoitteet tarvitsevat huolellisen esikäsitteilyn pinnoitettavalle alustalle. Esikäsitteily poistaa pinnan epäpuhtauksia kuten esimerkiksi sementtiliimaa tai aikaisemman pinnoitteen. Oikea esikäsitteily on tärkeä osa pinnoittamisen prosessia, jotta pinnoite saa riittävän tartunnan ja toimii sille suunnitelluilla ominaisuuksilla. [4.] Taulukossa 13 on esitettyä pinnoitettavan alustan epäpuhtauksiin soveltuvat puhdistusmenetelmät.

Betonin pinnoittaminen jälkikäteen teollisuuden ympäristössä on todella haastavaa. Korjattavat kohteet vaativat usein prosessin keskeytystä, joten ne voidaan suorittaa ainoastaan seisokkien aikana. Prosessista tai korjaustoimenpiteistä johtuvat epäpuhtaudet tulee puhdistaa alustasta huolellisesti, jotta pinnoitus onnistuu.

Taulukko 13. Pinnoitettavan alustan epäpuhtauksien puhdistusmenetelmät. [4.]

<b>Epäpuhtaus</b>	<b>Puhdistusmenetelmä</b>
Sementtiliima	Sinkopuhdistus, jysintä, hionta, vesisuihkupuhdistus, happopeittäus
Öljyt, rasvat	Emulsiopesu, liekkipuhdistus
Aikaisemmat pinnoitteet, jälkikäsitteilyaineet, tiivistysaineet	Sinkopuhdistus, jysintä, hionta, piikkaus, liuotepuhdistus
Hapot ja emäkset	Neutralointi, vesihuuhdeltu
Suolat	Vesipesu

Kemikaaleille ei löydy yksiselitteistä listaa, josta nähtäisiin pitääkö betoni pinnoittaa vai riittääkö betonin koostumuksella muokattu kemiallinen kestävyys. Tietyille kemikaalityypeille löytyy erilaisia taulukoita, mutta niitä tulee tulkita aina tapauskohtaisesti.

## 7.5 Kaustistamon viherlipeäsakkalavojen perustus

Kaustistamon vaihtolavojen betoniperustusten etureunojen iskunkestävyyttä tulee parantaa. Betonin iskunkestävyyttä voidaan parantaa betonin koostumusta muokkaamalla, mutta vaihtolavojen törmäyksistä aiheutuvien jatkuvien iskurastusten vuoksi betonirakenteen vaurioitumista vaikeaa estää. Tässä tapauksessa vaihtolavojen perustusten etureunojen suojaaminen vaihtolavan iskuilta on mahdollista toteuttaa suojaavalla

teräslevyllä. Teräslevy vastaanottaa törmäyksistä aiheutuvat iskut ja jakaa ne tasaisesti betonin pintaan. Perustuksissa on käytetty suojaavia pitkiä kiinnityslevyjä kulutuskiikoina perustuksen päällä, minkä tarkoituksena on ehkäistä teräksisen vaihtolavan kiskojen aiheuttamat iskut ja kulutus.

Umpinaisen perustuksen ympärille ja päälle kasautuva lumi ja muut epäpuhtaudet aiheuttavat perustukselle ylimääräistä ympäristöstä johtuvaa rasiutusta. Vaihtolavat voidaan sijoittaa vaihtoehtoisesti avonaisen teräskehän päälle, mikä ankkuroidaan kiinni pohjalaattaan. Vaihtolavojen mukana kulkeutuvat epäpuhtaudet putoavat avonaisen rakenteen vuoksi pohjalaatalle, josta ne voidaan johtaa perustusten välissä olevaan kanaaliin. Avonaisen rakenteen vuoksi alueen ympärille kinostuva lumi ja muut epäpuhtaudet ovat myös helppo johtaa kanaaliin. Kuvassa 20 on esitettyä vaihtoehtoinen teräs-rakenne betoniperustuksen tilalle.



Kuva 20. Vaihtoehtoinen ratkaisu vaihtolavan perustukseksi.

Nykyisen perustuksen tilalle vaihtoehtoinen ratkaisu on työlästä toteuttaa. Tämänhetkiset betoniperustuksen vauriot tulisi kunnostaa, jonka jälkeen perustuksen etureunan suojaava teräslevy voidaan asentaa. Perustusten ympäristö tulisi pitää puhtaana, jotta ylimääräiset ympäristön rasiutukset eivät vaurioita perustusta.

## 8 Yhteenveto

Tämän insinöörityön tarkoituksena oli koota yhteen tyypillisiä sellu- ja paperitehtaiden betonirakenteiden vaurioita. Työssä käsiteltiin myös betonin koostumista ja ominaisuuksia teollisuusrakentamisen näkökulmasta. Lisäksi nostettiin esille betonin rasituksia ja rasituksista aiheutuvia vauriomekanismeja, joita yleisesti sellu- ja paperiteollisuudessa voidaan kohdata.

Työn aikana toteutettiin työmaakäynti sellutehtaalla, josta kerättiin betonirakenteisiin kohdistuneita vaurioita. Pääsääntöisesti vauriot olivat aiheutuneet erilaisista kemiallisista tai mekaanisista rasituksista. Työn tarkoituksena oli selvittää, missä osassa prosessia vaurio on, vaurion mahdollinen aiheuttaja, vaurion tyyppi ja rakenne, jossa vaurio on. Havaituille vaurioille pyrittiin kehittämään konseptitasoinen ratkaisu, jolla betonirakenteiden vaurioita voitaisiin ehkäistä jo suunnitteluvaiheessa, jolloin niistä ei aiheutuisi ylimääräisiä korjauskustannuksia tulevaisuudessa.

Sellutehtaalta havaittujen säiliö- ja pumppuperustusten betonirakenteiden vaurioiden alkuperää ei saatu varmuudella selville, vaan se vaatisi laajempaa tutkimustyötä ja asiantuntemusta myös kone- ja prosessitekniikasta. Vaurioiden syntymään on mahdollisesti vaikuttanut useamman erilaisen rasituksen summa, jonka vuoksi sen jäljittäminen on todella haastavaa.

Keväällä 2020 Suomessa ja muualla maailmassa vallitsi erityinen poikkeustila COVID-19 -pandemian vuoksi, minkä seurauksena tutkimustyö ja raportointi toteutettiin epätavallisissa olosuhteissa. Poikkeustilanne rajoitti huomattavasti esimerkiksi kirjallisten lähteiden saatavuutta, sillä kirjastot ja oppilaitokset olivat kiinni. Tutkimustyössä käytettiin lähteenä useita insinööritöitä ja diplomitöitä, sillä kirjallisuutta ei ollut saatavilla.

Aihe oli todella mielenkiintoinen ja monipuolinen. Aiheen laajuuden vuoksi tämän työn teoriaosuudessa ei käsitelty perusteellisesti kaikkia betonin koostumukseen vaikuttavia tekijöitä eikä rasituksista aiheutuvia kemiallisia tai fysikaalisia ilmiöitä tai reaktioita. Työssä pyrittiin käsittelemään ilmiöt yleisellä ja ymmärrettävällä tasolla työn selkeyttämiseksi.

## Lähteet

- 1 ÅF Pöyry changes brand name to AFRY. 25.11.2019. AFRY. Lehdistötiedote. <<https://afry.com/en/newsroom/press-releases/af-poyry-changes-brand-name-afry>>
- 2 Virola, Heli. Raivio, Paula. 2000. Portlandsementin hydrataatio. VTT Tiedote. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. <<https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2041.pdf>>
- 3 Standardi. 2017. SFS-EN 206:2014 + A1:2016. Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimuksen mukaisuus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 4 Kettunen, Teemu. 2018. Betonin kemikaalikestävyys ja suojaaminen kemikaaleilta teollisuusrakentamisessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. <<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/26095/Kettunen.pdf?sequence=4&isAllowed=y>>
- 5 Juuti, Janne. 2015. Vaakasuuntaisesti värähtelevien paaluperustusten dynaamiset analyysimenetelmät. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. <<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/23778/Juuti.pdf?sequence=3&isAllowed=y>>
- 6 Räsänen, Aapo. 2019. Alkalikiviainesreaktio. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto. <<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/117011/R%C3%A4s%C3%A4nenAapo.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>
- 7 Pyy, Hannu. 2019. Betonirakenteiden kemialliset vauriot. Kurssimateriaali. Betoniyhdistys. <<http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/bkr-2019/hannu-pyy-betonin-korjauskurssi-2019.pdf>>
- 8 Standardi. 2009. SFS-EN 12620 + A1. Betonikiviainekset. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 9 SILKO-projekti. 2007. Betoni sillankorjausmateriaalina. Yleisohje. Tiehallinto. <[https://julkaisut.vayla.fi/sillat/silko/kansio1/s1201\\_2007.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/sillat/silko/kansio1/s1201_2007.pdf)>
- 10 Heinilä, Pauliina. 2019. Ohje betonirakenteiden rasitusluokkien valintaan sellutehtaassa. Opinnäytetyö. Vaasan ammattikorkeakoulu. <[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/169002/Heinila\\_Pauliina.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/169002/Heinila_Pauliina.pdf?sequence=2&isAllowed=y)>
- 11 Punkki, Jouni. 2017. Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu. Julkaisu. Betoniteollisuus ry. <[https://betoni.com/wp-content/uploads/2017/05/BET1702\\_66-71.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2017/05/BET1702_66-71.pdf)>

- 12 Paavonen, Eveliina. 2018. Pitkän käyttöiän vaikutus teräsbetonirakenteen suunnitteluun. Kandidaatintyö. Tampereen teknillinen yliopisto. <<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/26417/paavonen.pdf?sequence=4&isAllowed=y>>
- 13 Leivo, Markku. 2000. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. VTT Tiedote. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. <<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2000/T2047.pdf>>
- 14 Pahkasalo, Jussi. 2018. Betonin laadunvalvonta. Opinnäytetyö. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. <[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/144053/Pahkasalo\\_Jussi.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/144053/Pahkasalo_Jussi.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>
- 15 Paavola, Tuomo. 2013. Lajitellun lentotuhkan käyttö betonissa. Opinnäytetyö. Savonia-ammattikorkeakoulu. <[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/54918/Tuomo\\_Paavola.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/54918/Tuomo_Paavola.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>
- 16 Standardi. 2012. SFS-EN 197-1. Sementti. Osa1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimusten mukaisuus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 17 Kastarinen, Henri. 2019. Betonin vaurioituminen. Opinnäytetyö. Kajaanin ammattikorkeakoulu. <[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/166528/Kastarinen\\_Henri.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/166528/Kastarinen_Henri.pdf?sequence=2&isAllowed=y)>
- 18 Ulvinen, Jussi. 2017. Betonin varhaislujuuden ja lämpötilan kehitys elementtituotannossa. Opinnäytetyö. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. <[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/126781/Jussi\\_Ulvinen.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/126781/Jussi_Ulvinen.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>
- 19 Husso, Ari. 2019. Betonin puristuslujuus rakennekoekappaleissa. Diplomityö. Tampereen yliopisto. <<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/118482/HussoAri.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>
- 20 Haavisto, Jukka. Laaksonen, Anssi. 2018. Betonin puristuslujuus. Tutkimus. Liikennevirasto. <[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2018-32\\_betonin\\_puristuslujuus\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-32_betonin_puristuslujuus_web.pdf)>
- 21 Komonen, Juha. 2010. Betonirakenteiden kutistuminen ja halkeamien ehkäisy. Julkaisu. Rakentajankalenteri 2010. <<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK100402.pdf>>
- 22 Reinikka, Toni. 2014. Betonirakenteiden halkeilu ja halkeamakorjaus injektoidulla. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. <[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/77377/Reinikka\\_Toni.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/77377/Reinikka_Toni.pdf?sequence=1)>

- 23 Nykyri, Tuomas. 2014. Kutistumaa vähentävien lisäaineiden vaikutus betonin kutistumaan. Opinnäytetyö. Metropolia ammattikorkeakoulu.  
<[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/76188/Nykyri\\_Tuomas\\_Insinoori-tyo.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/76188/Nykyri_Tuomas_Insinoori-tyo.pdf?sequence=1)>
- 24 Ojamaa, Iiro. 2015. Betonin halkeilun hallinta tasomaisissa ja vesitiiviissä rakenteissa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.  
<<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/24645/ojamaa.pdf?sequence=4&isAllowed=y>>
- 25 Tikkanen, Erkka. 2019. Kemiallisten rasitusten vaikutus betonin vaurioitumiseen. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto. <<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/116961/TikkanenErkka.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>
- 26 Pennanen, Konsta. 2019. Pienten koneperustuksien mitoitus ja värähtelyn hallinta. Opinnäytetyö. Saimaan ammattikorkeakoulu.  
<<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/168052/julkaistava.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>