



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ILKKA PIESKÄ
FOTOGRAMMETRIAN JA KUVANTUNNISTUSOHJELMISTON
HYÖDYNTÄMINEN RAKENTEIDEN VAURIOKARTOITUKSESSA

Diplomityö

Tarkastajat: professori Jukka
Pekkanen ja projektipäällikkö Juha-
Matti Junnonen
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
varadekaanin päätöksellä
30. tammikuuta 2017

TIIVISTELMÄ

PIESKÄ, ILKKA: Fotogrammetrian ja kuvantunnistusohjelmiston hyödyntäminen rakenteiden vauriokartoituksessa
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 64 sivua
Toukokuu 2017
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Rakennustuotanto
Tarkastajat: Professori Jukka Pekkanen TkL Juha-Matti Junnonen

Avainsanat: Korjausrakentaminen, fotogrammetria, kuvantunnistus, 3D-malli

Korjausrakentamisessa käytettävät menetelmät ja työkalut eivät ole kehittyneet yhtä nopeasti kuin muilla aloilla rakennustekniikassa. Tästä syystä tämän tutkimuksen tarkoituksena on kartoittaa fotogrammetrian ja kuvantunnistustekniikoiden nykytilaa ja potentiaalia tuoda uusia työkaluja korjausrakentamiseen.

Fotogrammetriaan perustuva 3D-mallintaminen otettiin päätutkimuslinjaksi ja sen toimivuutta kokeiltiin käytännössä pilottihankkeessa. Fotogrammetriaohjelmia on runsaasti markkinoilla ja niiden saatavuus ja käyttöönotto ovat helposti toteutettavissa. Fotogrammetrian avulla pystytään luomaan valokuvista näyttäviä 3D-malleja. Mallinnuksen tekeminen on helppoa ja todella nopeaa verrattuna perinteiseen 3D-mallintamiseen. Tästä syystä se onkin levinnyt monelle alalle ja sitä tullaan tulevaisuudessa hyödyntämään yhä enemmän. Tämän tutkimuksen perusteella fotogrammetriaa voidaan hyödyntää korjausrakentamisessa.

Kvanttunnistustekniikoiden hyödyntäminen osoittautui fotogrammetriaa haastavammaksi tehtäväksi. Kvanttunnistusta on tutkittu ja kehitetty paljon viime vuosikymmenten aikana, mutta yleispätevää kuvantunnistusohjelmistoa ei ole kyetty toteuttamaan. Tästä johtuen se on hyvin sovelluskohtaista eikä siitä ole tarjolla valmiita kaupallisia ohjelmistoja. Kvanttunnistuksen hyödyntäminen vaatisi oman vaurioiden tunnistamiseen tarkoitetun algoritmin laatimista. Tämän tutkimuksen yhteydessä löydettiin siltojen kansissa esiintyvien halkeamien löytämiseen kehitetty kuvantunnistusta hyödyntävä menetelmä.

Pilottikohteen kolmiulotteinen mallintaminen onnistui. 3D-mallista saatiin näyttävän näköinen ja mittatarkka. Mallista saatava mittatiedon mittausepävarmuus on 0,27 % luokkaa. Tämä tarkoittaa, että noin 40 metriä pitkä seinä voidaan mitata noin 10 senttimetrin tarkkuudella ja kolme metriä leveä parveke noin sentin tarkkuudella.

ABSTRACT

PIESKÄ, ILKKA: The Usage of Photogrammetry and Pattern Recognition in Defect Detection of Buildings

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 64 pages

May 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Construction Production

Examiners: Professor Jukka Pekkanen and Lic. Tech. Juha-Matti Junnonen

Keywords: Repair construction, photogrammetry, pattern recognition, 3D-model

Repair construction as a field has not adopted new technological tools and methods as fast as other fields in civil engineering. The main goal of this thesis was to explore the current usage of photogrammetry and pattern recognition and the possibility of those technologies to provide new tools for repair construction.

Photogrammetry was prioritized over pattern recognition and photogrammetry based 3D modeling was to be tested in a pilot project. There are many commercial photogrammetry software programs available and they are easy to utilize. Photogrammetry software uses photographs to create a 3D-model of the depicted object. Photogrammetry based modeling is very easy and fast compared to traditional 3D modeling. This is one of the reasons it has spread to many different fields and it will become even more commonplace in the future. According to this study, photogrammetry is a viable tool for repair construction.

The current state and usage of pattern recognition was also studied. Pattern recognition has been studied and developed intensively for few decades but it has proven to be very difficult to create a general pattern recognition algorithm. This is the main reason why pattern recognition software is always limited to very narrow and specific application. This in turn leads to the current situation of no commercially available pattern recognition software. If pattern recognition were to be used in defect detection it would need a specifically developed algorithm that is designed to do just that. Pattern recognition was found to be utilized in some bridge deck defect detection robot.

3D modeling of the pilot project was successful. The 3D model turned out to be decent looking and it was able to produce accurate measurements from the modelled building. The relative uncertainty of the measurements was 0.27 %. This means that a 40-meter long wall can be measured within 10 centimeters and a 3-meter wide balcony within 1-centimeter accuracy.

ALKUSANAT

Paine kirjoittaa tämä kirja syntyi syksyllä 2016 kun Raksa2 muuntokoulutuksen kurssit kävivät vähiin. Vaikein vaihe koko prosessissa oli diplomityön aiheen ja tilaajan löytäminen. Niiden tarjoamisesta haluan kiittää WSP:n liiketoimintajohtaja Mika Matikkaa.

Ohjaukseen WSP:n puolelta osallistui Simo Kettunen ja Tampereen teknillisen yliopiston puolelta minua ohjasi Juha-Matti Junnonen. Kiitos teille tarjoamastanne mahdollisuudesta ja tuesta kirjoittaa tämä diplomityö.

Taustajoukkoina kirjan takana toimivat myös ”toimiston pojat”. He tarjosivat kirjaan useita huonoja ja pari hyvääkin ehdotusta. Kiitos teille hauskastä työilmapiiristä.

Lopuksi haluan esittää kiitokseni minun perheelle kannustuksesta sekä siitä, että jaksotte kuunnella päivittäistä raportointia työn vaiheista.

Oulussa, 27.04.2017

Ilkka Pieskä

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus	2
1.3	Tutkimusmenetelmät ja suoritustapa.....	3
2.	KORJAUSRAKENTAMINEN	5
2.1	Korjausrakentamisen määrä	5
2.2	Korjausrakentamisen erityispiirteet.....	9
2.3	Kuntoarvio ja kuntotutkimus.....	10
3.	BETONIN VAURIOMEKANISMIT	12
3.1	Betonin rapautuminen	12
3.1.1	Pintahalkeilu.....	12
3.1.2	Pakkasrapautuminen	14
3.1.3	Ettringiitti	17
3.1.4	Alkalikiviainesreaktio	18
3.2	Betoniterästen korroosio	19
3.2.1	Karbonatisoituminen.....	19
3.2.2	Kloridit.....	23
3.3	Yhteenveto vaurioista.....	25
4.	FOTOGRAMMETRIA	27
4.1	Tietomallintaminen korjausrakentamisessa	27
4.2	Fotogrammetrian hyödyntäminen korjausrakentamisessa	28
4.3	Fotogrammetrinen menetelmä.....	29
4.3.1	Fotogrammetrian määrittely.....	29
4.3.2	Kamerakalibraatio	31
4.3.3	Fotogrammetrinen orientaatio.....	33
4.4	Valokuvausdatan hankkiminen	35
4.5	3D-mallin luominen valokuvista.....	38
5.	KUVANTUNNISTUSTEKNIIKAT	41
5.1	Kuvantunnistuksen perusteet.....	41
5.2	Kuvantunnistussovellusten hyödyntäminen korjausrakentamisessa.....	45
6.	PILOTTIHANKKEEN MALLINTAMINEN	50
6.1	Käytetty laitteisto ja ohjelmisto.....	50
6.2	Pilottikohde ja sen valokuvaaminen.....	51
6.3	3D-mallin luominen pilottikohteesta.....	53
6.4	3D-mallin tarkkuus ja siitä saatavat mitat	56
7.	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	59
	LÄHTEET.....	61

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ACDT	Automatic Crack Detection Tool
AKR	Alkalikiviainesreaktio
BIM	Building Information Model
CAD	Computer Aided Design
CRP	Close-Range Photogrammetry
Drone	Kauko-ohjattava lennokka jota käytetään valokuvaukseen
EOP	Exterior Orientation Parameters
EXIF	Exchangeable Image file Format
FHWA	Federal Highway Administration
IA	Image Analysis
IOP	Interior Orientation Parameters
LEM	Laseretäisyysmittari
PAH	Polysykliset Aromaattiset Hiilivedyt
PCP	PentaChloroPhenol eli pentakloorifenoli, klooriyhdiste jota on käytetty mm puunkäsittelyssä sinistymisen estoon
PP	Principal Point, Pääpiste
PR	Pattern Recognition
RABIT	Robotic Assessment Bridge Inspection Tool
STRUM	Spatially Tuned Robust Multifeature
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, Miehittämätön ilma-alus
<i>k</i>	Karbonatisoitumiskerroin
<i>t</i>	Aika vuosina
<i>x</i>	Karbonatisoitumissyvyys
<i>c</i>	Kameran kuvatason pääpisteen ja projektiokeskuksen välinen kohtisuora etäisyys

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Korjausrakentaminen on Suomessa ollut jatkuvassa tasaisessa kasvussa vuosikautia. Jatkuvasta kasvusta huolimatta korjausrakentamisessa hyödynnettävät menetelmät eivät ole pysyneet teknologisen kehityksen matkassa. Tässä diplomityössä on tarkoitus tutkia ja kartoittaa fotogrammetrian ja kuvantunnistustekniikoiden hyödyntämisen teknisiä edellytyksiä rakenteiden vaurioiden tunnistamisessa ja 3D-mallintamisessa. Diplomityön aikana on tarkoitus luoda edellytykset ottaa käyttöön fotogrammetriaan perustuva pintamallinnus WSP:n korjausrakennusyksikössä.

Rakennusalalla uutena teknologisenä kehityksenä on 2000-luvun alkuvuosina kehitetty BIM (Building Information Model) eli kolmiulotteinen rakennusten tietomallintaminen ja tietopankin käyttäminen. BIM ei kuitenkaan yleensä sellaisenaan sovellu korjausrakentamiseen, koska se on liian raskas ja työläs menetelmä. Jo olemassa olevan rakennuksen mallintaminen vaatii valtavasti mittausdataa, jotta se voitaisiin mallintaa tarkasti. Korjausrakentamishankkeen tietomallintamisen onnistumisessa juuri lähtötilanteen tarkka mallintaminen on ensiarvoisen tärkeää mutta myös teknisesti hankalaa ja ennen kaikkea kallista. (Stolt, 2015).

Tietomallinnus on tarkoitettu kaikkien suunnittelijoiden yhteiseksi apuvälineeksi, mutta rakenteiden korjaussuunnittelussa (esimerkiksi parvekkeiden korjaus) sitä käyttäisi vain rakennesuunnittelija. Tällöin BIM:n edut jäisivät hyvin vähäisiksi ja sen käyttäminen tuottaisi vain turhia lisäkustannuksia korjaussuunnitteluun. Tässä työssä on tarkoitus kokeilla BIM:ä kevyempää ja huomattavasti nopeampaa fotogrammetriaan perustuvaa pintamallin luomista. Pintamallia voidaan hyödyntää korjaussuunnittelussa esimerkiksi mittatietojen saamisessa ja pinta-alojen laskennassa.

Fotogrammetrian tarkoitus on tuottaa valokuvista mitta- tai paikkatietoa. Kun valokuvia on riittävästi ja ne limittyvät sopivasti keskenään, voidaan niiden pohjalta luoda ohjelmiston avulla kolmiulotteinen malli kuvatusta kohteesta.

Kvantantunnistustekniikkaa tutkivan osion tarkoituksena on kartoittaa minkälaisia sovelluksia kuvantunnistus voisi tarjota korjausrakentamiseen. Alkuperäinen ajatus oli, että kuvantunnistusta voitaisiin hyödyntää tutkittavasta kohteesta otettujen valokuvien läpikäynnissä. Mikäli soveltuva kuvantunnistusohjelmisto saadaan opetettua tunnistamaan julkisivupinnoilla esiintyvät yleisimmät vauriot, voidaan konenäön avulla tunnistaa rakennuksessa esiintyvät vauriot nopeasti ja automaattisesti.

Kuvantunnistusteknologia ei korvaa asiantuntijan tekemää silmämääräistä katselmusta, mutta voi toimia uutena työkaluna kenttätutkimuksia suoritettaessa.

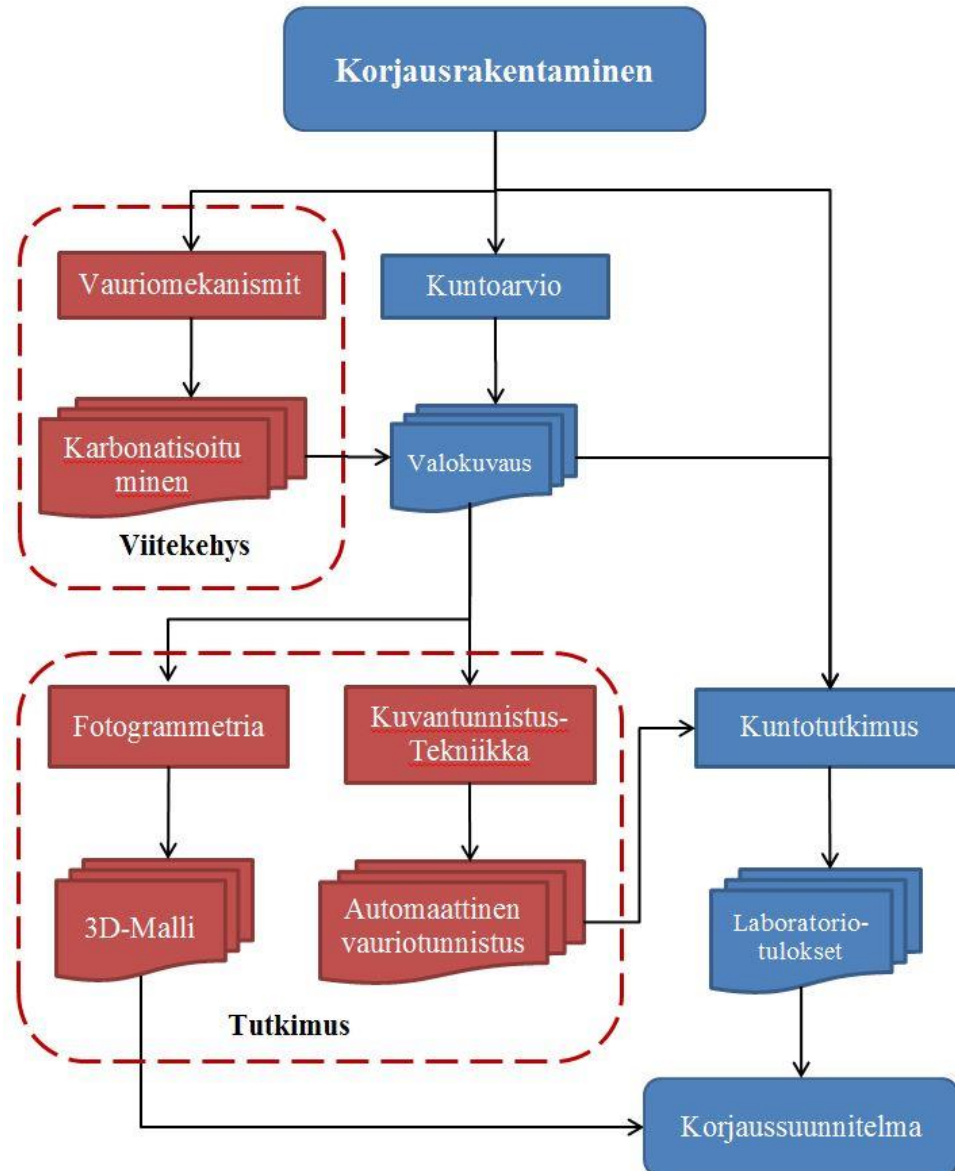
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus

Tutkimuksen päätavoitteena on luoda edellytykset WSP:n korjausrakentamisyksikölle ottaa käyttöön uusi fotogrammetriaan perustuva työkalu, joka pystyy valokuvista luomaan kolmeulotteisen pintamallin kuvatusta rakenteesta.

Fotogrammetrian lisäksi työssä on tarkoitus tutustua kuvantunnistusohjelmistojen hyödyntämiseen vaurioiden kartoituksessa. Tästä voisi olla hyötyä suuren valokuvamateriaalin läpikäynnissä ja automaattisessa vaurioiden tunnistuksessa sekä vauriokarttojen luomisessa. Kuvantunnistuksen tutkiminen ja mahdollisten ohjelmistojen hyödyntäminen ovat kuitenkin sekundäärinen tavoite, eikä niihin käytetä niin paljon aikaa kuin fotogrammetrian tutkimiseen.

Tutkimuksen viitekehys on rakennettu korjausrakentamisen ympärille. Ensin käsitellään korjausrakentamisen nykytilaa Suomessa ja sitten tutustutaan betonijulkisivuissa esiintyviin vauriomekanismeihin. Erilaisia vauriomekanismeja ja niiden korjaustapoja on todella paljon, siksi tarkastelu on rajattu vain betonijulkisivun vaurioihin.

Kuvassa 1 on hahmoteltu viitekehysten ja tutkimusosion suhdetta ja liittymistä korjausrakentamiseen. Viitekehystenä toimii betonijulkisivujen vauriomekanismit, joista yleisimpiä ovat erilaiset pintahalkeilut, terästen karbonatisoituminen sekä pakkasrapautuminen. Kuntoarvion ja kuntotutkimuksen yhteydessä suoritetaan aina kohteen dokumentointiin liittyvää valokuvaamista, joka toimii myös pohjana fotogrammetriselle 3D-mallinnukselle sekä kuvantunnistukselle.



Kuva 1 Viitekehysten ja tutkimuksen sijoittuminen korjausrakentamiseen.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja suoritustapa

Työssä tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuustutkimusta sekä kokeellista tutkimusta. Kirjallisuustutkimus keskittyy korjausrakentamisessa kohdattaviin betonin vauriomekanismeihin. Viitekehys on siis rakennettu korjausrakentamisen ja vauriomekanismien ympärille. Kokeellinen tutkimusosio kartoittaa fotogrammetrian hyödyntämistä korjausrakentamisessa. Tämä tarkoittaa kuntotutkimuksen kohteena olevan rakennuksen valokuvaamista ja näiden kuvien avulla tapahtuvaa kolmiulotteista mallintamista. Toisena tutkimuksen kohteena on kartoittaa kuvantunnistustekniikkaan pohjautuvia sovellutuksia ja niiden hyödyntämismahdollisuuksia korjausrakentamisessa.

Suoritustapa tässä työssä on käytännön läheinen. Alustava teoreettinen tutkimus tehdään kirjallisuuskatsauksena fotogrammetriaan ja kuvantunnistustekniikkaan. Tämän tarkoituksena on selvittää miten kyseiset teknologiat toimivat ja miten niitä tällä hetkellä käytetään hyödyksi. Tässä vaiheessa luodaan ymmärrys fotogrammetriasta ja kuvantunnistuksesta, jotta kyetään arvioimaan, kuinka ne voisivat soveltua korjausrakentamisen työkaluiksi.

Diplomityön aikana on myös tarkoitus pilottihankkeen yhteydessä kokeilla kolmiulotteisen pintamallin luomista kohteesta otettujen valokuvien avulla. Tällaista menetelmää ei ole WSP:n korjausrakentamisyksikössä kokeiltu eikä tähän diplomityön alkaessa ollut laitteistoa tai ohjelmistoa saatavilla. Työn aikana on siis tarkoitus tutkia, kuinka fotogrammetria toimii teoriassa ja minkälaista kalustoa ja ohjelmistoja se vaatii käytännössä.

2. KORJAUSRAKENTAMINEN

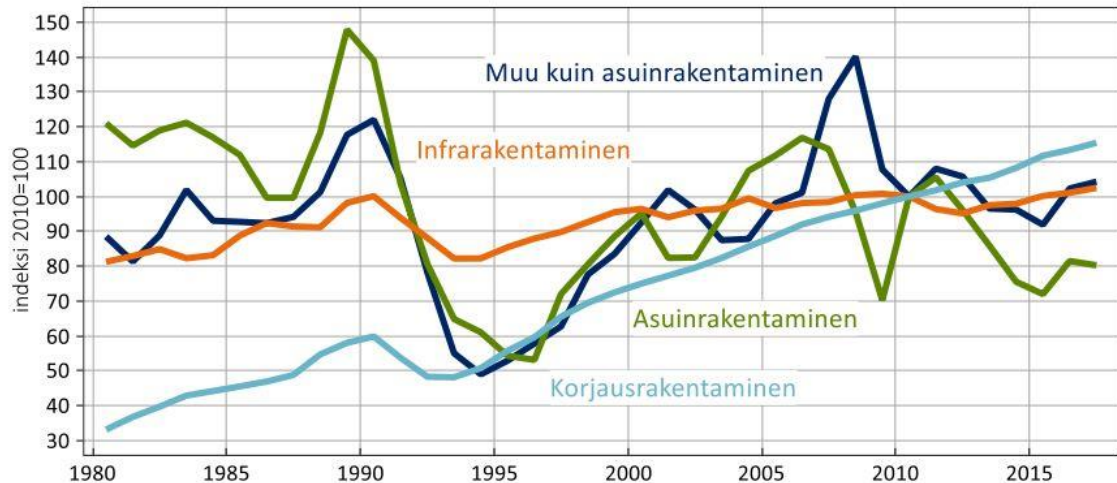
Tässä luvussa kerrotaan korjausrakentamisen nykytilasta, erityispiirteistä ja kasvun määrästä Suomessa. Nykytilakatsaus perustuu Rakennusteollisuus RT ry:n suhdannekatsaukseen ja Tilastokeskuksen lukuihin. Luvun lopussa tarkastellaan kuntoarvion ja kuntotutkimuksen käsitteitä ja sisältöä.

Rakli ry määrittelee rakennuskohteelle tehtävät konkreettiset toimenpiteet viiteen kategoriaan; korjaaminen, uusiminen, entistäminen, kunnostus ja purku. Asuinrakennusten korjaustarve raportissa korjausrakentaminen kuitenkin jaetaan kolmeen eri tyyppiin; kunnossapitoon, perusparannuksiin ja uusimiseen. Kunnossapidon tavoitteena on nimensä mukaisesti tarkoitus ylläpitää rakennuksen nykyistä kuntoa. Siihen sisältyy vuosikorjausten toimenpiteet sekä pienet peruskorjaukset. Kun korjaustoimenpiteet parantavat tai muuttavat rakennuksen ominaisuuksia on kyse perusparannuksesta, esimerkiksi lisälämmöneristäminen tai talotekniikan nykyaikaistaminen. Uusiminen käsittää rakennuksen osan tai rakenteen purkamisen ja uudelleen rakentamisen. (Hietala et al., 2015, Rakli, 2012).

Perusteltu korjaustarve syntyy, kun rakennuksen vanhetessa sen rakenneosien ja teknisten järjestelmien tekninen käyttöikä päättyy. Rakennuksen korjaustarvetta voi vaurioiden lisäksi lisätä myös sen jääminen jälkeen nykyisestä uudisrakentamisen tasosta. Tällöin rakennus ei enää vastaa sen käyttäjien odottamaa palvelutasoa. (Hietala et al., 2015).

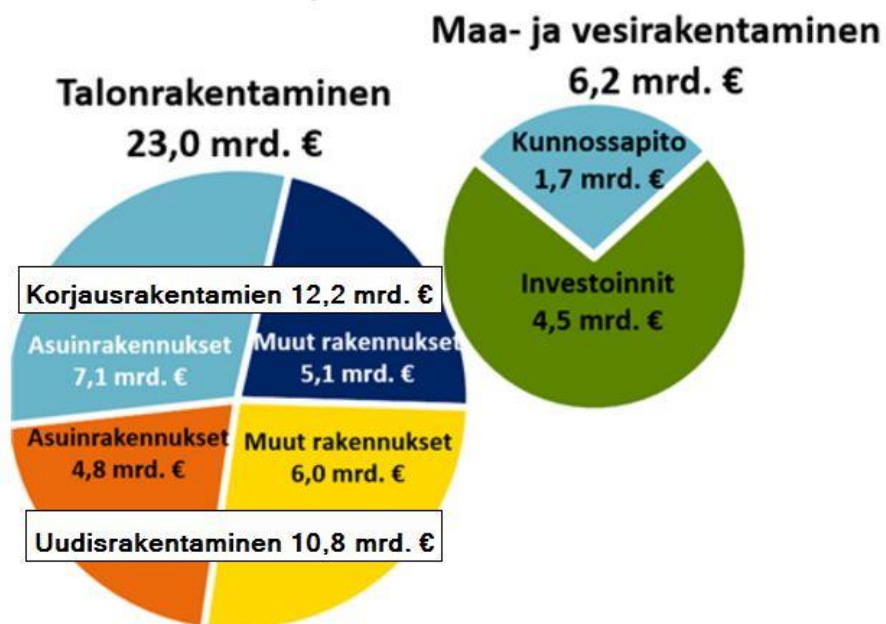
2.1 Korjausrakentamisen määrä

Korjausrakentamisen määrä on Suomessa ollut jatkuvassa tasaisessa kasvussa jo yli kaksikymmentä vuotta. Tämä kasvu on selvästi nähtävissä alla olevassa kuvassa 2 (vaalean sininen käyrä). Korjausrakentamisen kasvun määrä vuosina 2016 ja 2017 ennustetaan olevan 1,5 prosenttia. Uudisrakentamisen voimakkaasta kasvusta huolimatta korjausrakentaminen on viime vuosina pysynyt uudisrakentamista suurempana. Ensimmäisen kerran korjausrakentaminen ohitti euromääräisesti mitattuna uudisrakentamisen vuonna 2013. (Rakennusteollisuus RT, 2016).



Kuva 2 Rakentamisen määrä Suomessa (Rakennusteollisuus RT, syyskuu 2016).

Korjausrakentamisen arvo vuonna 2014 oli 11,7 miljardia euroa ja kasvoi vuonna 2015 12,2 miljardiin euroon. Korjausrakentamisen arvo siis kasvoi yli 4,2 prosenttia vuoden 2015 aikana. Tästä 12,2 miljardin summasta 7,1 miljardia euroa kohdistui asuinrakennusten korjaamiseen. Kuvassa 3 on eritelty korjausrakentamisen ja uudisrakentamisen arvot asuinrakennusten ja muiden rakennusten välillä. (Rakennusteollisuus RT, 2016, Valtionvarainministeriö, 2016).

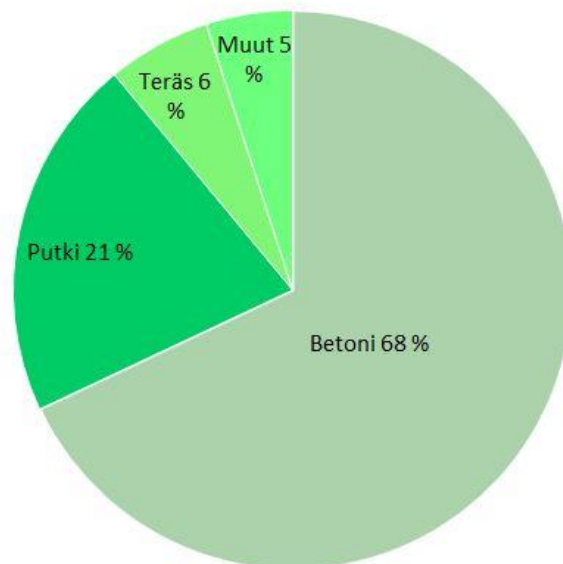


Kuva 3 Rakennustuotannon arvo vuonna 2015, muokattu lähteestä (Rakennusteollisuus RT, kuviopankki, 2016).

Maa- ja vesirakentamiseen käytettyyn kunnossapidon 1,7 miljardiin sisältyy mm. Liikenneviraston sillat. Liikenneviraston hallinnassa on kaiken kaikkiaan 17557 siltaa, joista 15140 on maantiesilloja ja loput 2417 rautatiesilloja. Liikenneviraston siltojen

lisäksi myös kunnat ja kaupungit omistavat siltoja, kaiken kaikkiaan kokonaissiltamäärä Suomessa on noin 30 000 kappaletta. Siltojen rakentaminen on ollut Suomessa vilkasta 1960-luvulta 1990-luvun loppuun saakka. Siltojen tyypillinen suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta ja peruskorjausta ne vaativat 30 - 40 vuoden välein. Eli silta täytyy peruskorjata kahdesta kolmeen kertaa elinikänsä aikana. Suomen sillaston ikärakenteen takia siltojen korjaustarve on kasvanut voimakkaasti 1990-luvulta lähtien ja se tulee pysymään vastaavalla tasolla vielä pitkään. Siltojen kuntoa seurataan viiden vuoden välein tehtävillä yleistarkastuksilla. (Lahdensivu 2015, Liikennevirasto 2016).

Suurin osa Suomen silloista on betonirakenteisia. Kuvassa 4 on esitetty siltojen lukumäärän jakauma siltatyypeittäin. Betonisiltojen osuus on 68 %, teräsiltojen 6 % ja kategoriaan ”Muut” kuuluvat puu- ja kivisillat 5 % osuudella. Putkisillat käsittävät vesistöissä ja väylän alituksessa käytettävät putkirakenteet, jotka ovat tyypillisesti valmistettu aallotetusta teräslevystä tai betonista. (Liikennevirasto, 2016).



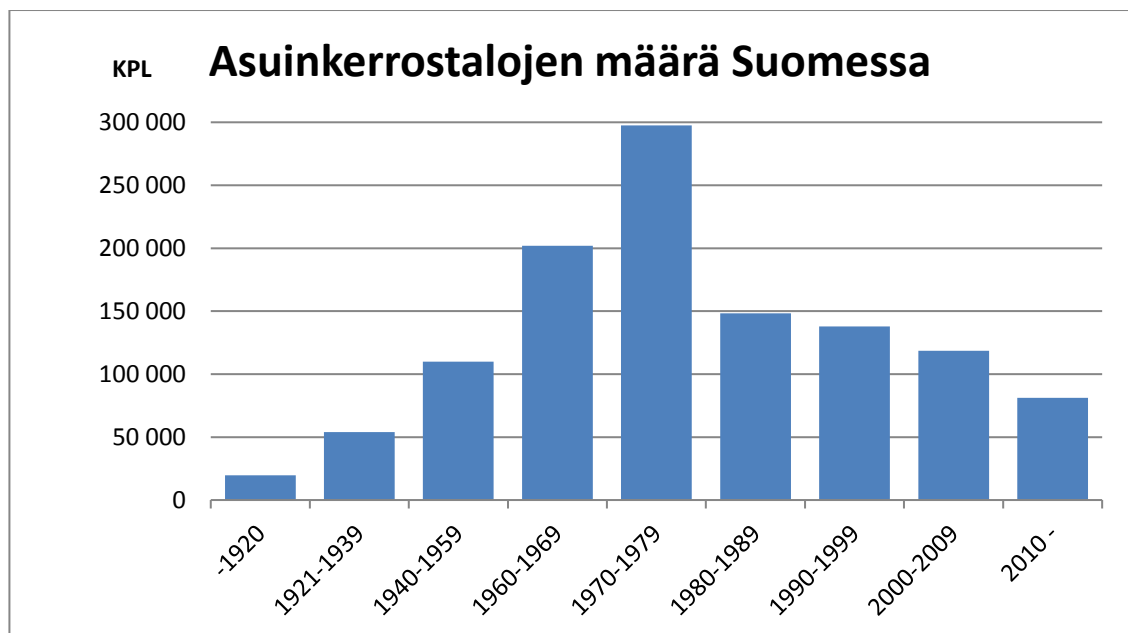
Kuva 4 Siltojen lukumäärien jakauma siltatyypeittäin. (Liikennevirasto, 2016).

Taulukossa 1 on esitetty Suomen maantiesiltojen kunto. Vähintään hyvään kuntuiluokkaan sijoittuu 67,2 % silloista. Huonon tai erittäin huonon kuntuiluokituksen siltoja on 4,1 % eli yhteensä 623 kappaletta. (Liikennevirasto, 2016).

Taulukko 1 Maantiesiltojen kunto Suomessa, Muokattu lähteestä (Liikennevirasto 2016).

Yleiskunto	kpl	%
Erittäin hyvä	1799	11,9
Hyvä	8374	55,3
Tyydyttävä	4231	27,9
Huono	578	3,8
Erittäin huono	45	0,3
Ei tiedossa	113	0,7
	15140	100,0

Korjausrakentamisen kasvua siivittää jatkuva korjausvelan kasvu, jota tällä hetkellä ruokkii (siltojen ohella) 1960- ja 1970-lukujen aktiivinen asuinkerrostalojen rakentaminen. Alla olevasta kuvasta 5 erottuu 1970-luku suurimpana rakennuspiikkinä. Nämä rakennukset ovat tulleet rakenteellista ja järjestelmäkorjausta vaativaan ikään. Niiden katot, julkisivut, parvekkeet, ikkunat sekä LVIS-laitteistot ovat tulleet elinkaarensa päähän. (Valtionvarainministeriö, 2016).



Kuva 5 Asuinkerrostalojen määrä Suomessa rakennusvuosittain. (Muokattu lähteestä Tilastokeskus, PX-Web-tietokannat, 2015)

Korjausten yhteydessä yleensä nostetaan myös rakennusten varustelutasoa paremmin vastaamaan nykyvaatimuksia. Tämä sisältää mm. energiatehokkuuden, veden säästön, esteettömyys kysymykset sekä parvekkeiden lasituksen. Korjausaktiivisimmat rakennuskohteet ovat asuinkerrostalot ja julkiset rakennukset (Rakennusteollisuus RT, 2016).

Korjaaminen ei aina kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa. Tämä koskee varsinkin elinkaarensa päässä olevia, maaseudulla tai muuttotappiokunnissa sijaitsevia asuinkerrostaloja. Kun asunnolle ei ole enää kysyntää, ei täysimääräinen korjaaminen ole järkevää. Tästä syystä tekninen korjaustarve on suurempi kuin taloudellisesti perusteltu korjaustarve. (Hietala et al., 2015).

Teknisestä korjaustarpeesta noin 92 prosenttia on myös taloudellisesti perusteltua. Vuosille 2016–2025 teknisen korjaustarpeen määräksi on arvioitu 3,5 miljardia euroa vuodessa, mikä jättää taloudellisesti perustelluksi korjaustarpeeksi 3,2 miljardia euroa vuodessa. Suurin osa tästä korjaustarpeesta sijaitsee eniten kasvavissa kaupungeissa; pääkaupunkiseutu, Tampere, Oulu. (Hietala et al., 2015, Tilastokeskus 2013 väestöennuste kunnittain).

Suomen korjaustarve voidaan jakaa myös alueellisesti. Yli puolet Suomen väestöstä kuuluu kahdeksaan suurimpaan työssäkäyntialueeseen, mutta Suomen reilusta 1,2 miljoonasta kerrostaloasunnosta yli miljoona sijoittuu näihin työssäkäyntialueisiin. (Hietala et al., 2015). Tämä tarkoittaa sitä, että korjausrakentaminen tulee suurelta osin keskittymään suuriin kaupunkeihin.

Rakennusala työllisti vuonna 2015 keskimäärin 172 000 henkilöä. Kasvua vuoteen 2014 oli tullut noin 6000 henkeä. Tehtyjen miestyötuntien määrä kasvoi vajaan 4 prosenttia edellisvuoteen verrattuna. Tehtyjen työtuntien määrä kasvoi eniten erikoistuneessa rakennustoiminnassa, mihin korjausrakentaminen kuuluu. Rakennusalan työllisyysodotus on lähivuosina myönteinen. (Valtionvarainministeriö, 2016).

Työttömyysaste rakennusalalla vuonna 2015 oli 10,2 %. Työttömyyden arvellaan edelleen supistuvan vuosina 2016 – 2017 (Rakennusteollisuus RT, 2016).

Luvussa 2.1 esitettyjen lukujen ja tilastojen nojalla Suomessa on perusteltua panostaa korjausrakentamiseen ja korjausrakentamisen kehittämiseen. Korjausta vaativien rakennusten määrä on suuri eikä niiden vaurioituminen ole riippuvainen suhdanteista vaan rakenteiden elinkaaren päättymisestä.

2.2 Korjausrakentamisen erityispiirteet

Teknisten korjausten lisäksi korjausrakentaminen pyrkii myös kehittämään kiinteistöjen ja alueiden nykytilaa vastaamaan paremmin asukkaiden tämänhetkistä tarvetta. Korjausrakentamisen yhteydessä voidaan myös rakentaa lisää asuinkerroksia ja uudistaa kiinteistöjä. (Eriksson et al., 2014).

Korjausrakentaminen poikkeaa uudisrakentamisesta monella tavalla. Se on siinä mielessä haastavampaa kuin uudisrakentaminen, että siinä täytyy ymmärtää rakentamisen lisäksi rakennuksen vauriomekanismit ja niiden oikeanlainen torjuminen. Tämän lisäksi

korjausrakentamisessa menestyminen vaatii erikoistuntemusta vanhoista rakenteista, rakennusfysiikasta, turmeltumisilmiöistä, kuntotutkimuksista ja korjaustuotteista.

Jokainen korjattava kohde on yksilöllinen. Rakennuksessa käytetyt rakenteet, talotekniset järjestelmät, siihen aikaisemmin tehdyt korjaukset sekä siihen vaikuttaneet ympäristön olosuhteet ovat aina tapauskohtaisia. Tästä syystä korjauskohteiden toistettavuus ja säännöllisyys ovat vähäistä, jolloin vakioitujen ratkaisujen kehittäminen on hankalaa. Yhtenä ongelmana on myös se, että tilaajina on paljon taloyhtiöitä, jotka kokevat hankkeen kertaluontoiseksi, eivätkä näin ollen näe tarvetta kehitystyölle. (Honkanen, 2016).

Lähtökohtaisesti korjausrakentamisessa puretaan vanhaa ja rakennetaan uutta nykyaikaisia vaatimuksia vastaavaa rakennetta tilalle. Korjausrakentamista hankaloittaa monesti puuttuvat tai virheelliset piirustukset, olemassa olevien rakenteiden suojaaminen, ahtaat työolosuhteet sekä mahdollisesti kohteessa rakentamisen aikana paikalla olevat asukkaat/käyttäjät. Tämän vuoksi korjausrakentamisessa tulee varautua mahdollisiin työn aikana selviäviin muutostarpeisiin ja yllätyksiin sekä kiinnittää huomiota asiakaspalveluun. Korjausrakentamista hankaloittaa lisäksi uudisrakentamista suuremmat terveys-, turvallisuus- ja paloriskit sekä vanhoissa rakenteissa olevat haitta-aineet kuten PAH (Polysykliset Aromaattiset Hiilivedyt), PCP (Pentakloorifenoli), asbesti ja mikrobit. (Rakennusteollisuus RT, Korjausrakentaminen).

2.3 Kuntoarvio ja kuntotutkimus

Kuntoarvio on silmämääräinen ja aistinvarainen suuntaa antava arvio rakenteen kunnosta ja korjaustarpeista. Sillä voidaan saada tietoa eri vauriotapojen tilanteesta vain siltä osin, kun näkyviä vaurioita on jo olemassa. Monet vauriot etenevät piilossa alkaen rakenteen sisältä ja tulevat näkyviin vasta usean vuoden kehittymisen jälkeen.

Kuntoarvio suoritetaan siis kohteessa paikan päällä, aistinvaraisesti ja rakenteita rikkomatta. Siinä pyritään löytämään kohteessa esiintyvät näkyvät vauriot sekä mahdolliset riskirakenteet. Kuntoarvion pohjalta ei voida tehdä kunnollista korjaussuunnitelmaa, vaan se toimii paremminkin lähtötietona mahdollisesti suoritettavaa kuntotutkimusta varten. (BY42, 2013)

Kuntotutkimuksella tarkoitetaan rakenteen tai rakenneosan kunnan, siinä esiintyvien vaurioiden ja korjaustarpeen systemaattista selvittämistä. Kuntotutkimus suoritetaan käyttäen erilaisia tutkimusmenetelmiä; piirustusten ja kohteen silmämääräinen tarkastaminen, erilaiset kentällä tehtävät tutkimukset ja mittaukset sekä näytteenotto ja laboratoriotutkimukset. Laboratoriotutkimusten tulosten analysoinnin pohjalta voidaan esittää erilaiset korjausvaihtoehdot löytyneiden vaurioiden ja niiden aiheuttajien poistamiseksi.

Kuntotutkimuksella saadaan selville kohteessa esiintyvät vauriot, niiden laajuus ja vaikutukset sekä voidaan arvioida tulevaisuudessa esiintyviä vaurioita, jotka eivät vielä ole näkyvissä. Tämä tulevien vaurioiden ennakointi, tai nykyisten vaurioiden etenemisen havaitseminen ajoissa mahdollistaa korjaustoimenpiteiden suorittamisen oikea-aikaisesti. (BY42, 2013)

Betonirakenteita lähdetään tutkimaan yleensä vasta kun näkyviä vaurioita alkaa esiintyä. Paljon tehokkaampaa olisi suorittaa tutkimukset tätä ennen, jolloin korjaavilla toimenpiteillä voitaisiin hidastaa tai jopa pysäyttää betonin vaurioituminen. Suomen Betoniyhdistyksen mukaan ensimmäinen kuntotutkimus tulisi tehdä betonirakenteen saavuttaessa 15 vuoden iän, tai viimeistään silloin kun siinä alkaa esiintyä näkyviä vaurioita. (BY41, 2007)

Kuntotutkimukselle ei voida määrittää mitään vakiosisältöä, koska kaikki kohteet ovat yksilöllisiä, vaan se tulee räätälöidä aina kohteen ja tilanteen mukaan. Paljon näkyviä vaurioita sisältävän kohteen tutkiminen on yleensä helpompaa ja nopeampaa, koska vaurioiden laajuus ja korjaustarve on helppo määrittää. Piileviä ja ei-silmin havaittavia vaurioita sisältävä kohde joudutaan tutkimaan tarkemmin vikojen paikantamiseksi.

Tärkeintä kuntotutkimuksessa on paikantaa vaurioiden takana piilevät syyt. On turhaa korjata parvekkeen yläpinnan vedeneristystä, jos vesi pääsee laattaan vuotavasta vedenpoistoputkesta. Eli ei riitä, että korjataan rakenteessa esiintyvät oireet vaan niiden aiheuttaja on myös löydettävä ja korjattava. Kuntotutkimuksessa tulee siis tunnistaa vaurioiden syntyperä, jotta voidaan määrittää kohteeseen sopiva korjaustapa. (Harju, 2015).

3. BETONIN VAURIOMEKANISMIT

Tässä luvussa käydään läpi betonisten julkisivujen yleisimmät vauriomekanismit ja käsitellään niiden syntymisen syyt. Jokainen vauriomekanismi on jollain tavalla kytköksissä betonin kostumiseen. Toisin sanoen betonin kuivana pysymisen edellytyksiä parantamalla saadaan rakenteille huomattavasti parempi käyttöikä. Julkisivut vääjäämättä altistuvat sateelle ja ilmankosteudelle, mutta hyvin toteutettu sadevesien poisto katolta ja syöksyputkien puhtaanapito auttavat pitämään julkisivun kunnossa.

Merkittävimmät betonin turmeltumisilmöt voidaan jakaa kahteen eri päälajiin, jotka ovat betonin rapautuminen ja betoniterästen korroosio. Betonin rapautumista aiheuttaa pääasiassa pakkasrapautuminen, joka aiheutuu betonin sisällä olevan veden laajentumisesta jäätyminen seurauksena. Teräskorroosio aiheuttaa betonin halkeilua sekä lohkeilua, mikä heikentää sen kestävyyttä. Teräskorroosio syntyy betonin karbonatisoitumisen tai kloridirasituksen seurauksena.

Rakennusten julkisivut altistuvat Suomen ilmastossa monenlaisten rapautumisilmiöiden rasituksille. Rapautumisen nopeus riippuu monesta tekijästä; betonin ominaisuudet, säärasitus, käytetyt materiaalit ja liittorakenteet. Betonin rapautuminen on itseään ruokkivaa, pienet halkeamat ja vauriot nopeuttavat niiden pahentumista ja uusien syntymistä. Vaurioituminen voi siis hoitamattomana lyhentää rakenteen suunniteltua käyttöikää huomattavasti. (Lahdensivu 2012).

3.1 Betonin rapautuminen

3.1.1 Pintahalkeilu

Sementtipohjaisten laastien ja betonien kovettuminen tapahtuu hydrataation vaikutuksesta. Hydrataation aikana betoni lämpenee ja siitä haihtuu vettä. Liian nopea veden haihtuminen tai liiallinen betonin pinnan kuivuminen aiheuttaa pintahalkeilua. Uusi betoni vaatii valun jälkeen jälkihoitoa, jossa pyritään estämään veden liian aikainen poistuminen. Puutteellisen jälkihoidon seurauksena ilmenee heikentynyttä laastin tartuntaa sekä sementin säilyvyyden kannalta haitallista halkeilua. (RT 82-10604 1996).

Betonirakenteiden halkeilu voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin:

- Rakenteellinen halkeilu
- Vaurioitumisesta johtuva halkeilu
- Pinnan verkkohalkeilu

Rakenteellista halkeilua voi aiheuttaa mm. puutteellinen kantavuus, ylikuormitus, pakkovoimat tai rakenteen normaali staattinen toiminta. Vaurioitumisesta johtuvat halkeilut aiheutuvat yleensä raudotteiden korroosiosta tai betonin pakkasrapautumisesta. Pinnan verkkohalkeilua aiheuttaa yleisimmin betonin plastisen vaiheen kutistuminen tai kuivumiskutistuminen (BY41, 2007).

Betonissa tapahtuu useita erivaiheisia kutistumisprosesseja. Plastinen kutistuma tapahtuu ensimmäisten tuntien aikana heti valun jälkeen ja hydrataatiokutistuma ensimmäisten tuntien ja vuorokausien aikana. Betonin kuivumiskutistuma alkaa vuorostaan vasta noin viikon kuluttua valusta ja jatkuu ympäristön olosuhteista riippuen useita vuosia. (Komonen 2012).

Plastinen kutistuma syntyy, kun betonin eri ainesosat erottuvat painovoiman vaikutuksesta. Tällöin kivet ja muut kiinteät partikkelit painuvat vielä kovettumattomassa betonissa alaspäin ja vesi nousee ylös. Saavuttaessaan betonin pinnan ylös nouseva vesi pyrkii haihtumaan, jolloin betonin pinta kuivuu ja kutistuu, mikä aiheuttaa vetojännitystä ja muodostaa plastisen vaiheen kutistumahalkeilua.

Betonin pyrkii painumaan alaspäin ollessa vielä plastisessa vaiheessa. Mikäli tämä painuminen jossain kohtaa estyy, esimerkiksi pinnan läheisyydessä olevan raudoitusteräksen vaikutuksesta, voi betoniin aiheutua halkeamia teräksen kohdalle. Tätä ilmiötä kutstutaan plastiseksi painuman aiheuttamaksi halkeiluksi.

Plastisen vaiheen jälkeen, kun betoniin on muodostunut jo lujuutta, alkaa siinä tapahtua hydrataatiokutistumaa. Tämä johtuu siitä, että sementin ja veden reaktiotuotteiden tilavuus on pienempi kuin niiden alkuperäinen yhteenlaskettu tilavuus. (Komonen 2012).

Alla olevassa kuvassa 6 on esitetty vasta valetun betonilattian pinnalla tapahtunutta plastista- ja hydrataatiokutistumaa.



Kuva 6 Pintahalkeilua valunjälkeisenä aamuna puuttellisen jälkihoidon seuraksena. (Komonen 2012).

Halkeilleen pinnan yleisimmät korjausmenetelmät ovat:

- Injektointi
- Imeyttäminen
- Pinnoittaminen
- Laastipaikkaaminen
- Halkeaman muuttaminen liikuntasaumaksi

Halkeamien korjaamisella tavoitellaan aina jotain seuraavista; halkeaman sulkeminen, korjaaminen voimia välittäväksi tai esteettiset syyt. Halkeaman sulkeminen estää veden, kloridien ja lian kulkeutumista ja parantaa estetiikka. Halkeaman korjaaminen voimia välittäväksi tulee kyseeseen kantavilla rakenteilla (BY41, 2007).

3.1.2 Pakkasrapautuminen

Betoni on hauras materiaali. Kovan puristuslujuuden kestävyuden vastapainoksi, sen kyky kestää vetolujuutta on heikko. Veden jääytymisestä johtuva laajentuminen betonissa aiheuttaa betonin sisäistä vetorasitusta, joka ylittäessä betonin vetolujuuden kestävyyn aiheuttaa halkeilua. (Lahdensivu, 2012).

Suomen olosuhteissa betonijulkisivujen ja parvekkeiden osalta merkittävin rapautumisilmiö on pakkasrapautuminen. Eri rapautumisilmiöiden aiheuttamat näkyvät vauriot näyttävät ulospäin hyvin samanlaisilta ja siksi niiden erottaminen toisistaan silmämääräisesti voi olla hyvin hankalaa. (BY42, 2013).

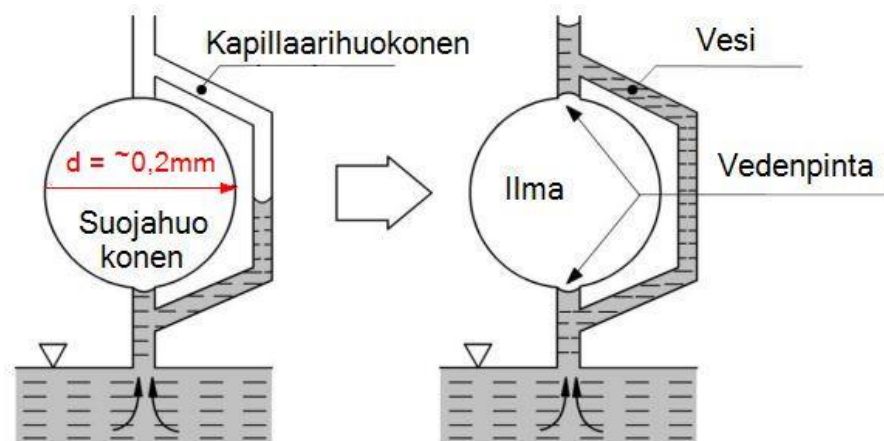
Julkisivujen suurin käytönaikainen kosteuslähde on viistosade. Suurin vaikutus sillä on seinien yläosiin, räystäättömissä ja korkeissa rakennuksissa. Betoniin imeytyvän veden määrä riippuu paljon betonin laadusta, kunnosta sekä sen mahdollisesta pinnoitteesta. Sateella julkisivun pintaan muodostuu vesikalvo, jota pitkin vesi valuu painovoimaisesti alapäin ja tunkeutuu eristetilaan halkeamista, rei'istä, vuotavista saumoista sekä viallisista liitosdetaljeista. Eristetilassa vesi painuu alaspäin ja kertyy ikkunan päällisiin sekä sokkeliin. (BY41, 2007).

Pakkasrapautuminen aiheutuu betonin huokosissa toistuvasti tapahtuvan veden jääytymisen vaikutuksesta. Kapillaarihuokosissa sijaitsevan veden jäätyessä tapahtuva laajentuminen työntää jäätyvätöntä vettä edeltään pois aiheuttaen hydraulista painetta. Tätä painetta kasvattaa entisestään vielä jääkiteen tilavuuden kasvu lämpötilan jälleen noustessa. Betoniin aiheutuu paikallista säröilyä, kun paine nousee betonin vetolujuutta suuremmaksi. (Leivo, 2000).

Pakkasrapautumaa voidaan hillitä tai jopa estää kokonaan huokostamalla betoni oikein. Jotta jääytymislaajentuman aiheuttama paine ei rikkoisi betonia, on betonissa oltava ilmahuokosia, jotka eivät täyty vedellä kapillaarivoimien vaikutuksesta. Näin laajenevalla

vedellä on tila, johon se voi tunkeutua aiheuttamatta painetta itse betoniin. Toimiakseen kunnolla, ilmahuokosten on oltava riittävän lähellä toisiaan ja niitä on oltava tasaisesti jakautuneena sementtikivessä. (BY42, 2013).

Alla olevassa kuvassa 7 on esitetty betonin suojahuokosen ja kapillaarihuokosen vuorovaikutuksen aiheuttama betonia suojaava toimintaperiaate.



Kuva 7 Betonin suojahuokosten toimintaperiaate. Muokattu lähteestä (Lahdensivu, 2012).

Pakkasenkestävyyden tuottamiseksi riittävän kattava ja tasainen huokoistus saadaan aikaiseksi vain käyttämällä lisähuokostusainetta betonin valmistuksessa. Suojahuokokset säilyvät ilmatäytteisinä, vaikka betoni altistuisi pitkiäkin aikoja vedelle. Suojahuokosten keskimääräinen halkaisija on suuruusluokkaa 150 – 300 μm .

Pelkkä suojahuokosten olemassaolo ei vielä takaa betonin pakkasenkestävyyttä. Suojahuokosten keskimääräisen välimatkan puolikasta kutsutaan huokosjaksoksi tai etäisyystekijäksi. Pakkasenkestävyyden turvaamiseksi etäisyystekijän tulee olla 0,20 – 0,25 mm. (BY42, 2013).

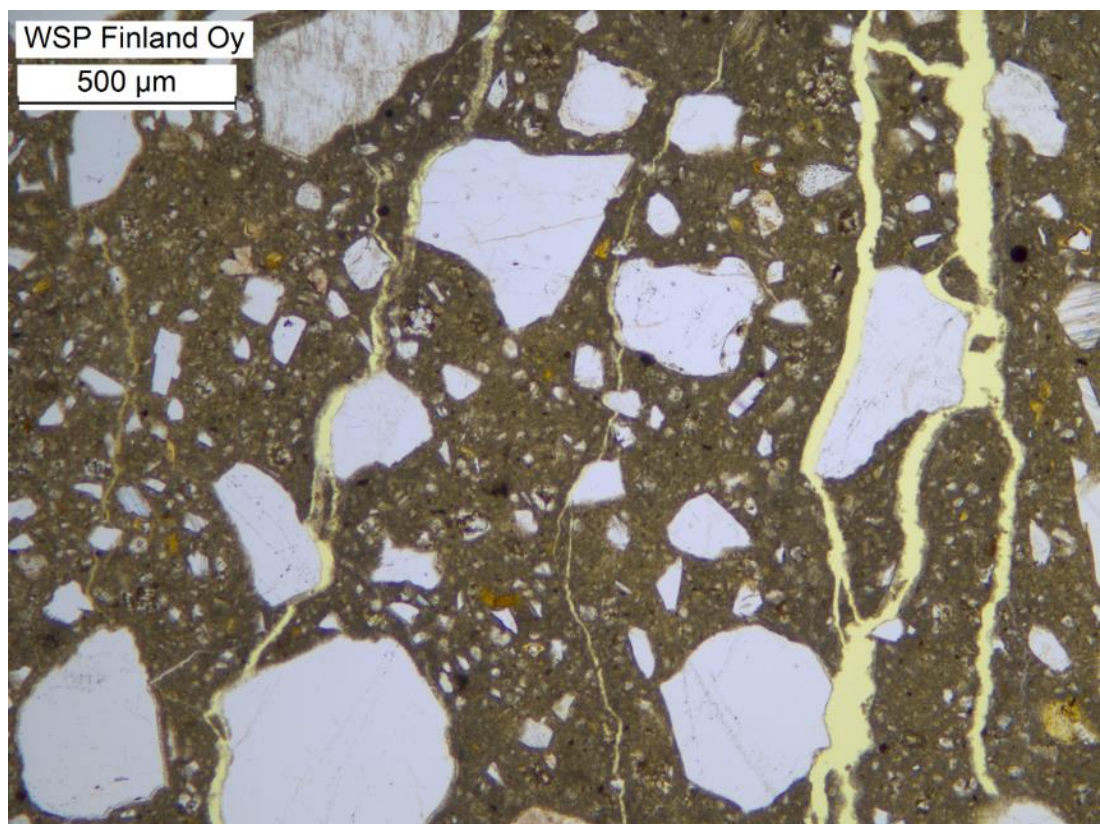
Pakkasenkestävyyteen ilmahuokostuksen lisäksi vaikuttaa erityisesti myös betonin tiiveys. Alhainen vesisementtisuhde lisää betonin lujuutta ja pienentää sen vedenimukykyä ja näin ollen vähentää betonissa olevan jäätyvän veden määrää. Suuremman lujuusluokan betonit myös kestävät veden jäätymisestä aiheutuvia pakkovoimia paremmin. (BY42, 2013).

Pakkasvaurioituminen ilmenee betonin säröilynä. Syntynyt säröily heikentää betonin kestävyttä ja nopeuttaa huomattavasti veden imeytymistä, mikä vuorostaan nopeuttaa betonin rapautumista entisestään. Pitkälle edetessään pakkasrapautuminen heikentää betonin lujuutta ja ilmenee rakenteen pinnan halkeiluna, elementtien kaareutumisenä ja lopulta betonin lohkeiluna. Betonin pakkasrapautuminen ja siitä aiheutuva halkeilu myös kiihdyttää betonin karbonatisoitumista ja teräskorroosiota. (Lahdensivu, 2012).

Pakkasrapautuminen alkaa yleensä rakenteen sisällä tapahtuvana säröilynä, eikä sitä sen vuoksi voi havaita pinnalta silmämääräisesti tai edes vasaroimalla. Alkava pakkasrapautuminen on tunnistettavissa rakenteesta otettavan näytteen ohuthieestä. (BY42, 2013).

Betonin kunnan mikroskooppiseen tutkimiseen käytetään tyypillisesti 25 µm paksuista ohuthietä, joka valmistetaan tutkittavan betonin poikkileikkauksesta. (Poole et al., 1998).

Kuvassa 8 on pakkasrapautuneesta julkisivubetonista tehty ohuthie. Näytteen yläpinta on kuvassa oikealla, joten siinä esiintyvät kiviainesta mukailevat halkeamat ovat pinnan suuntaisia.



Kuva 8 Julkisivubetonin pakkasrapautumaa (WSP Finland Oy, 2017).

Kuvassa 9 näkyy rautatiesillan sivupalkissa esiintyvää pakkasrapautuman aiheuttamaa verkkomaista halkeilua. Kuvassa 10 on kirkon tornin julkisivussa esiintyvää pakkasrapautumaa. Kuvat on poimittu WSP Finland Oy:n projektiarkistosta.



Kuva 9 Pakkasrapautuman aiheuttamaa verkkomaista halkeilua rautatiesillan sivupalkissa (WSP Finland Oy).



Kuva 10 Pakkasrapautuman aiheuttamaa halkeilua kirkontornin julkisivussa (WSP Finland Oy).

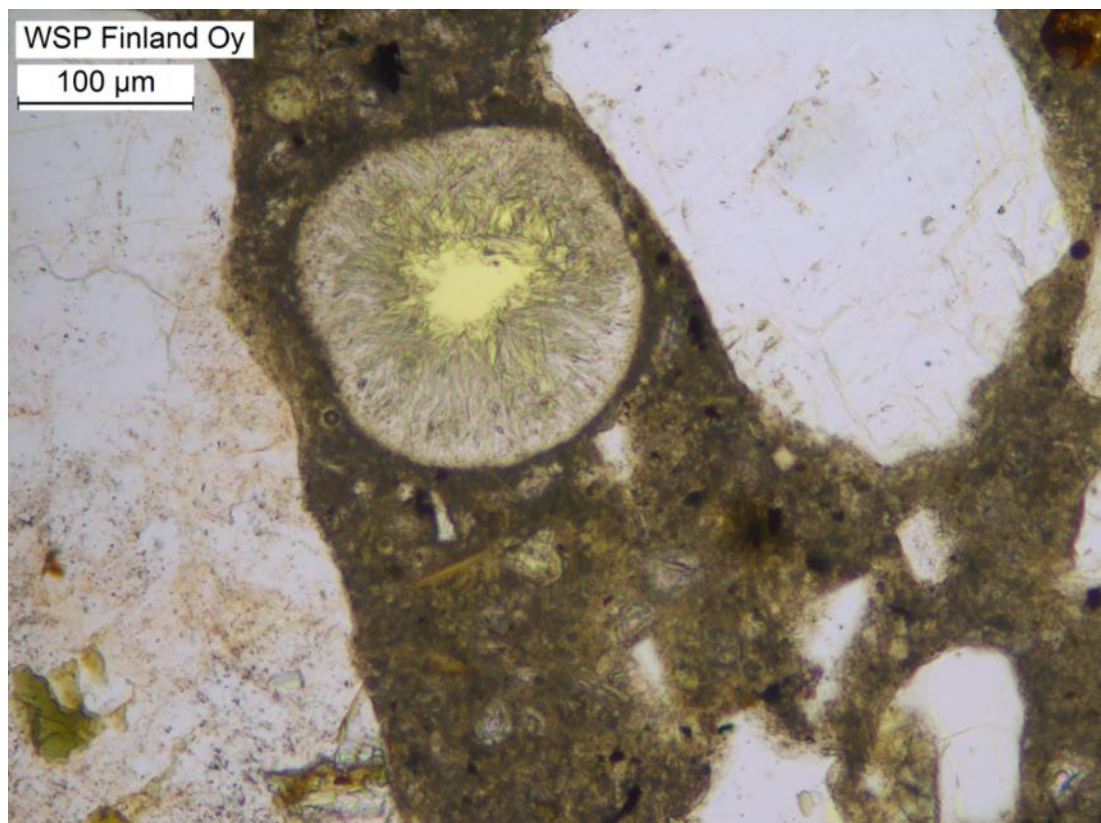
3.1.3 Ettringiitti

Ettringiittimineraalia esiintyy betonissa luonnostaan, koska se on Portlandsementin hydrataatiotuote. Ettringiittireaktio on kovettuneessa sementtikivessä tapahtuva sulfaattimineraalien kemiallinen reaktio, johon liittyy reaktiotuotteiden voimakas tilavuuden kasvu. Kiteytyneen kiinteän ettringiitin tilavuus voi kasvaa jopa 140 % lähtötilavuuteen verrattuna. (BY42, 2013).

Ettringiittireaktiota esiintyy yleensä lämpökäsitellyssä ja voimakkaan kosteusrasituksen vaikuttamassa betonissa. Ettringiittimineraali kiteytyy ilmatäytteisten suojahuokosten tai betonissa olevien halkeamien seinämiin.

Ettringiittireaktio ei vielä alkuvaiheessa aiheuta vaurioita betonille, mutta suojahuokosten täytyessä ettringiittikiteistä, niiden tilavuus pienene ja näin ollen myös betonin pakkasen kestävyys heikkenee. Ettringiittireaktio voi siis vaurioittaa betonia heikentyneen pakkaskestävyyden kautta tai täyttämällä suojahuokosen kokonaan ja näin synnyttämällä halkeilua betoniin aiheutuneen sisäisen paineen nousun kautta. Ettringiittireaktion aiheuttama rapautuminen näyttää ulkoisesti aivan samalle kuin pakkasrapautuminen, mutta on tunnistettavissa koepalasta tehdystä ohuthieestä mikroskoopilla. (BY42, 2013, Lahdensivu 2012).

Kuvassa 11 on ettringiittikiteytymän lähes kokonaan täyttämä huokonen.



Kuva 11 Ettringiittikiteytymää huokosessa (WSP Finland Oy, 2017).

3.1.4 Alkalikiviainesreaktio

Alkalikiviainesreaktiolla tarkoitetaan betonin kiviaineksessa tapahtuvaa sementtikiven alkalisuudesta aiheutuvaa paisumisreaktiota. Betoni on luonnostaan alkalista eli emäksistä. Alkalikiviainesreaktion on mahdollista tapahtua, kun kaikki seuraavat edellytykset täyttyvät:

- Sementti sisältää runsaasti alkaleja metalleja kuten natriumia tai kaliumia
- Kiviaineksessa on heikosti alkalisuutta kestäviä mineraaleja
- Betonin kosteuspitoisuus on riittävän suuri

Alkalikiviainesreaktiosta kärsivän betonin tyypillisiä piirteitä ovat sen pinnan kosteudesta johtuva laikukkuus, epäsäännöllinen verkkohalkeilu, paisuminen ja halkeamista ulos tunkeva geelimäinen reaktiotuote. Alkalikiviainesreaktiossa muodostuva geelin tilavuus kasvaa, kun se imee ympäröivistä betonin huokosista vettä aiheuttaen näin betonin sisällä lisääntyvää painetta. Kun paine kasvaa betonin vetolujuutta suuremmaksi, alkaa betoniin muodostua halkeamia, joihin geeli voi tunkeutua. (Lahdensivu, 2012).

Betoniyhdistyksen mukaan alkalikiviainesreaktio (AKR) on Suomessa harvinainen ilmiö suomalaisten kivilajien hyvän alkalikestävyuden ansiosta, mutta murskatun tai ulkomaisen kiviaineksen käyttö voivat lisätä sen riskiä. Suomessa raportoitujen AKR tapausten harvinaisuus kuitenkin todennäköisesti johtuu siitä, että AKR on huonosti tunnettu rapautumisilmiö. Alkalikiviainesreaktion voi tunnistaa vain ohuthienäytteestä tehtävällä tutkimuksella. AKR:n aiheuttama rapautuminen ja korjaamismetodit ovat samanlaisia kuin pakkasrapautuneen betonin kohdalla. (BY42 2013, Lahdensivu 2012, Lahdensivu 2015).

3.2 Betoniterästen korroosio

3.2.1 Karbonatisoituminen

Karbonatisoitumisella tarkoitetaan betonin emäksisyyden laskemista ilmassa olevan hiilidioksidin (CO_2) vaikutuksesta. Hiilidioksidi reagoi betonissa olevan emäksisen kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kanssa ja muodostaa neutraalia kalsiumkarbonaattia (CaCO_3), jolloin betoni karbonisoituu.

Betonin vahvikeräudoitus on yhteydessä betonin huokosiin imeytyneeseen kosteuteen ja happeen. Kiinteän betonin PH-arvo on yleensä yli 13. Tämä vahva emäksisyys muodostaa teräksen pintaan ohuen mutta tiheän oksidikerroksen, joka suojaa tehokkaasti terästä korroosiolta. Teräs pysyy suojattuna niin kauan kuin sitä ympäröivän huokosveden PH-arvo pysyy 11 – 11,5 välillä. Karbonatisoitumisen seurauksesta huokosveden PH-arvo laskee 8-8,5 välille. Näin neutraalissa ympäristössä terästä suojaava kalvo tuhoutuu ja sen puute mahdollistaa teräksen ruostumisen veden ja hapen vaikutuksesta. Karbonatisoituminen alkaa aina betonin ulkopinnasta edeten vähitellen syvemmälle. Jos betoni ei altistu kosteudelle, karbonatisoituminen käytännössä pysähtyy, koska hiilidioksidi kulkeutuu betonin huokosiin veden mukana.

Betonin jälkihoidolla on suuri vaikutus mikrohalkeamien muodostumiseen. Kaikki halkeamat ja reiät betonin pinnassa vähentävät betonin kykyä vastustaa veden diffuusiota, mikä puolestaan nopeuttaa karbonatisoitumisen etenemistä. Betonin terästen suojavahvuutta paksuntamalla saadaan hidastettua terästen korroosiota, koska karbonatisoitumisella kestää kauemmin saavuttaa teräs. (Lahdensivu, 2012).

Karbonatisoitumisrintaman eteneminen betonissa noudattaa niin sanottua neliöjuurimallia, eli karbonatisoitumisen eteneminen hidastuu ajan funktiona. Neliöjuurimallin yhtälössä karbonatisoitumissyvyys

$$x = k\sqrt{t}$$

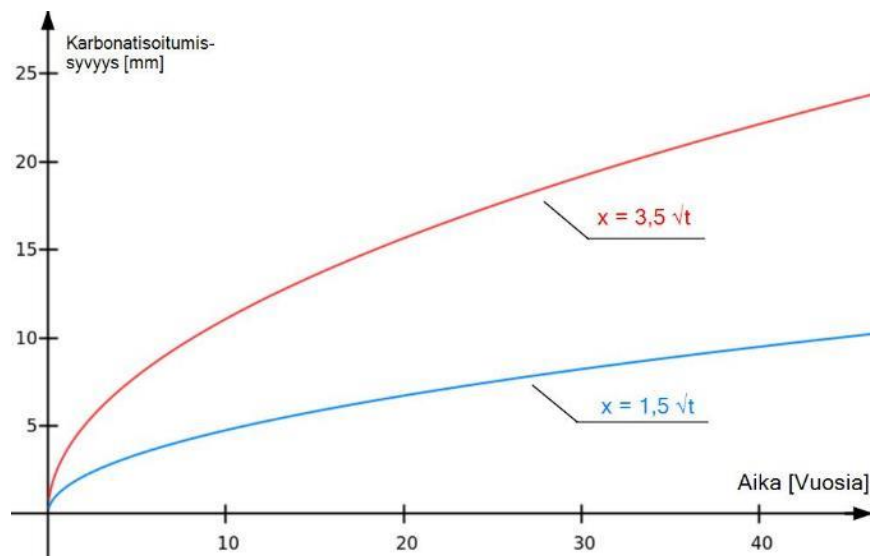
missä

x on karbonatisoitumissyvyys [mm],

k on karbonatisoitumiskerroin [mm / \sqrt{a}],

t on aika vuosina [a].

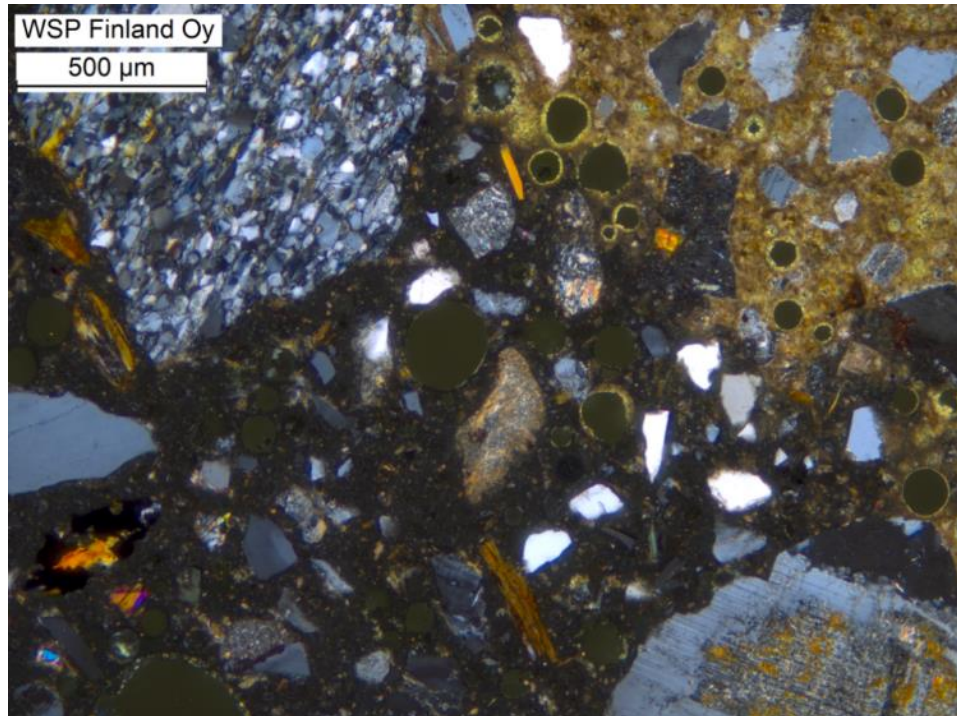
karbonatisoitumiskertoimen k arvo vaihtelee tyypillisesti välillä 1,5 – 3,5. Kuvassa 12 on esitetty karbonatisoitumisrintaman eteneminen neliöjuurimallin mukaan. (BY42, 2013).



Kuva 12 Karbonatisoitumisrintaman eteneminen neliöjuurimallin mukaan, tyypillinen k :n vaihteluväli 1,5 - 3,5.

Betonin huokoisuus vaikuttaa suuresti karbonatisoitumisnopeuteen. Mitä huokoisempaa betoni on, sitä nopeammin vesi ja hiilidioksidi tunkeutuvat betoniin ja karbonatisoituminen pääsee etenemään. Betonin huokoisuus puolestaan riippuu mm. betonin vesi-sementtisuhteesta, hydrataatioasteesta sekä mahdollisesti käytetyistä lisähuokostimista. Korkea vesi-sementtisuhte johtaa korkeampaan huokoisuuteen betonissa ja siten nopeuttaa sen karbonatisoitumista. (Köliö, 2016).

Alla olevassa kuvassa 13 on kuvattu karbonatisoitumisrintama julkisivubetonin ohuthieessä. Oikeassa yläkulmassa oleva rusehtava alue on karbonatisoitunutta betonia.

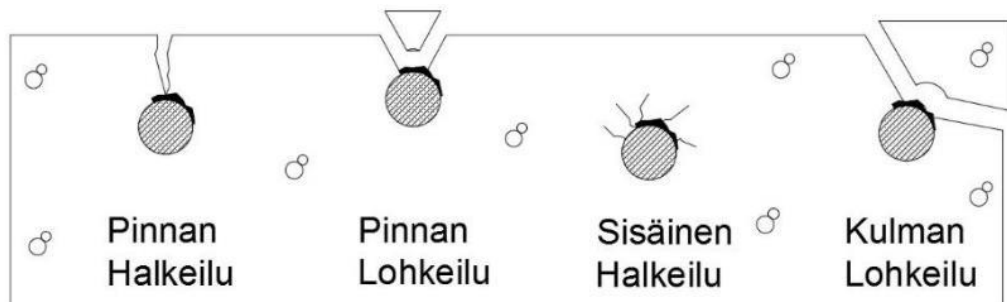


Kuva 13 Julkisivubetonin karbonatisoitumisrintama (WSP Finland Oy, 2017).

Karbonisoituneessa betonissa olevien raudotteiden korroosionopeutta voidaan tehokkaasti hidastaa vettähylykivällä pintakäsittelyllä. Kosteusteknisillä suojaavilla pintakäsittelyillä voidaan merkittävästi lisätä rakenteiden käyttöikää. Bonuksena betonin kosteuspitoisuuden alentaminen johtaa myös pakkasrapautumisen pysähtymiseen.

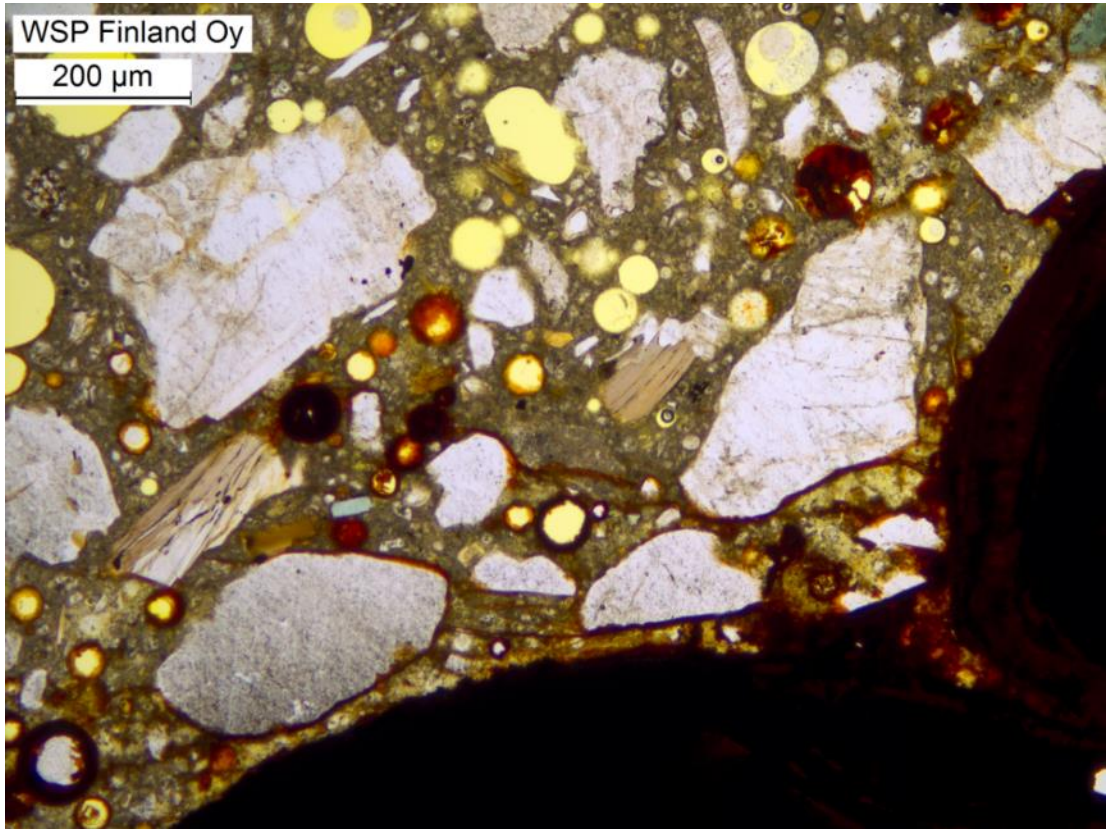
Jos vain näkyvät korroosiovauriot korjataan, rakenteeseen herkästi jää korroosiotilassa olevia raudotteita. Tämä johtaa korjauksen lyhytikäisyyteen uusien lohkeilujen johdosta. Tästä syystä on tärkeää paikantaa ja korjata myös ei-näkyvät korroosiotilassa olevat raudotteet (BY41, 2007).

Kuvassa 14 on kuvattu tyypilliset teräskorroosiosta aiheutuvat betonin halkeilu- ja lohkeamistavat. Kuvassa mustana kuvattu teräskorroosiosta syntyvä ruoste aiheuttaa betoniin sisäistä painetta, joka teräksen sijainnista riippuen aiheuttaa halkeilua ja lohkeilua.



Kuva 14 Teräskorroosion aiheuttamia vauriotyyppejä betonissa. Muokattu lähteestä (BY 42).

Kuvassa 15 on nähtävissä korroosioituneesta teräksestä leviävä ruoste. Ruoste näkyy kuvassa ruskeana ja se on tunkeutunut halkeamiin ja suojuhuokosiin.



Kuva 15 Julkisivubetonin teräskorroosio (WSP Finland Oy, 2017).

Kuvassa 16 näkyy I-teräspalkin virkaa toimittavan rataakselin pää parvekelaatan kulmassa. Parvekelaatan kulma on lohjennut teräskorroosion ja pakkasrapautuman yhteisvaikutuksesta. Kuvassa 17 on samasta kohteesta kuvattu parvekelaatan alapinnalla näkyvä, kertaalleen laastipaikattu, karbonatisoitumisen aiheuttama teräskorroosio.



Kuva 16 Teräskorroosion ja pakkasrapautuman aiheuttama parvekelaatan kulman lohkeama, (WSP Finland Oy, 2016).



Kuva 17 Karbonatisoitumisen aiheuttamaa teräskorroosiota parvekelaatan alapinnalla, (WSP Finland Oy 2016).

3.2.2 Kloridit

Kalsiumklorideja (CaCl_2) on lisätty 1970-luvulla parveke- ja julkisivuelementteihin kiihdyttämään lujuuden kehitystä. Tämä nähtiin tarpeelliseksi elementtitehtaissa muottikierron nopeuttamiseksi jatkuvasti kiihtyvän asuinkerrostalorakentamisen johdosta.

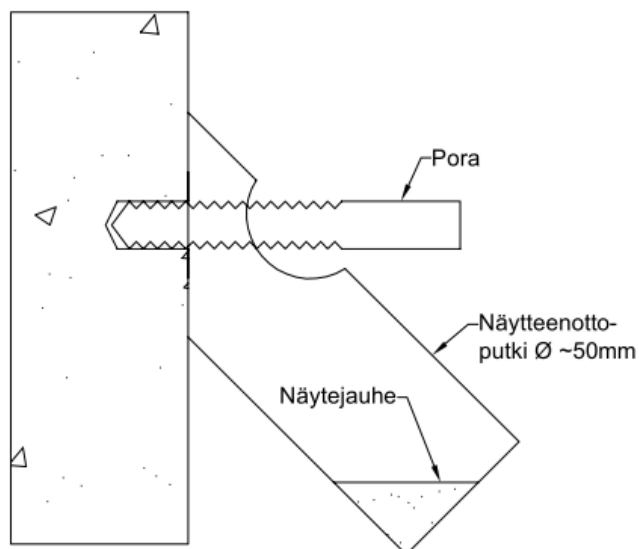
Klorideja voi kulkeutua betoniin myös jäänsulatussuolauksen yhteydessä (lähinnä sillat, parkkihallit ja laiturirakenteet) ja rannikkoalueilla merivedestä nousevan vesihöyryn ja tuulen vaikutuksesta. Betonin karbonatisoituminen kiihdyttää kloridikorroosiota vapauttamalla sementtikiveen sitoutunutta kloridia huokosveteen. (BY42, 2013).

Terästä ympäröivän betonin riittävän korkea kloridipitoisuus voi käynnistää teräskorroosion myös karbonatisoitumattomassa betonissa. Kynnysarvona kloridien käynnistämälle korroosiolle pidetään 0,03 – 0,07 % kloridipitoisuutta betonin painosta. (BY42, 2013).

Kloridit pystyvät tunkeutumaan veden matkassa kovettuneeseen betoniin päästessään sen pinnalle. Kloridipitoinen vesi päätyy betonissa olevaan huokosveteen joko diffuusion tai kapillaarisen imeytymisen vaikutuksesta. Koska kloridit kulkeutuvat betoniin veden välityksellä, betonin pinnassa olevat halkeamat nopeuttavat huomattavasti kloridien tunkeutumista. (Lahdensivu, 2012).

Kloridikorroosio on yleensä pistemäistä ja voimakasta, varsinkin jos kloridit ovat kulkeutuneet kovettuneeseen betoniin. Kloridien aiheuttama korroosio käynnistyy normaalia matalammassa ilmankosteudessa suojojen hygroskooppisuuden vuoksi. Kloridit myös laskevat veden jäätympistettä, mikä lisää lämpötilaskaalaa missä korroosio voi edetä. (Lahdensivu, 2012).

Kuvassa 18 on periaatekuva betonista otettavan kloridinäytteen keräämisestä. Näytteenottoputken virkaa voi toimittaa esimerkiksi muotoon leikattu muovipullo, mitä pitkin jauhe valutetaan muovipussiin.



Kuva 18 Kloridinäytteen kerääminen poraamalla. Muokattu lähteestä (BY42, 2013).

3.3 Yhteenveto vaurioista

Kaikki betonissa esiintyvät vauriot ovat jollain tavalla riippuvaisia kosteuden läsnäolosta. Pintahalkeilu johtuu betonin kutistumisesta ja liian nopeasta veden haihtumisesta betonin pinnalta. Pakkasrapautumista ei voi tapahtua, jos betonin sisällä ei ole tarpeeksi vettä, joka laajenee jäätyessään. Ettringiittiä muodostuu Portlandin sementissä itsestään, mutta vaurioita aiheuttaakseen betonin täytyy olla voimakkaassa kosteusrasituksessa. Alkalikiviainesreaktio vaatii alkalisten mineraalien lisäksi riittävän suuren kosteuspitoisuuden. Karbonatisaatio etenee hiilidioksidin vaikutuksesta, mutta hiilidioksidi tunkeutuu betonin sisään veden matkassa. Betonin pinnalle päätyneet kloridit tunkeutuvat betonin sisään vain veden avustuksella.

Kaikki vauriot ovat itseään ruokkivia ja ne nopeuttavat myös muiden rapautumisprosessien etenemistä. Mitä enemmän vaurio pääsee etenemään, sitä enemmän se aiheuttaa säröilyä ja halkeilua betonissa. Halkeamat mahdollistavat yhä laajamittaisemman ja nopeammin tapahtuvan veden imeytymisen betoniin, mikä vuorostaan aiheuttaa lisää uusia vaurioita. Tämän vuoksi on todella tärkeää seurata betonirakenteiden kuntoa ja korjata siinä esiintyvät vauriot mahdollisimman varhaisessa vaiheessa.

Taulukossa 2 on tehty yhteenveto eri vauriomekanismien aiheuttajista ja niiden aiheuttamista vaurioista betonissa.

Taulukko 2 Vauriomekanismien yhteenveto.

Vauriotyyppi	Aiheuttaja	Vaurioitumien		Erotuu betonin pinnasta
		alkaa rakenteen	Aiheuttaa betoniin	
Betonin rapautuminen	1 - 4	Sisällä	Halkeilua ja lohkeilua	Pitkälle edetessä
1. Pintahalkeilu	Haihtuva vesi	Pinnasta	Halkeilua	Heti
2. Pakkasrapautuminen	Jäätyvä vesi	Sisällä	Rapautumista	Ei
3. Ettringiitti	Vesi	Sisällä	Rapautumista	Ei
4. Alkalikiviainesreaktio	Vesi ja alkaaliset mineraalit	Sisällä	Rapautumista	Ei
Teräskorroosio	5 - 6	Sisällä	Halkeilua ja lohkeilua	Pitkälle edetessä
5. Karbonatisoituminen	Vesi ja hiilidioksidi	Pinnasta	Teräskorroosiota	Ei
6. Kloridit	Vesi ja kloridit	Sisällä	Teräskorroosiota	Ei

Kuten taulukossa 2 todetaan; ettringiitti, alkalikiviainesreaktio, karbonatisoituminen eivätkä kloridit ole silmämääräisesti havaittavissa betonin pinnalta. Ettringiitti ja alkalikiviainesreaktio voivat aikaa myöten toimia rapautumista aiheuttavina tekijöinä, mitkä tulevat havaittaviksi betonin halkeiluna. Sama koskee myös betonin karbonatisoitumista sekä kloridirasitusta, nekään eivät ole itsessään betonista päällisin puolin havaittavissa ennen kuin ne aiheuttavat betonissa olevien terästen korroosiota, joka tulee näkyviin betonin pinnalla tapahtuvana halkeiluna ja lohkeiluna.

Tämän diplomityön tavoitteena on hyödyntää fotogrammetriaa rakennuksen pintamallin luomiseen, eli muodostaa rakennuksesta 3D-esitys kohteesta otettujen valokuvien avulla. Siksi on tärkeää ymmärtää minkälaisia vaurioita valokuvista voi tunnistaa. Valokuvien pohjalta voi päätellä onko kuvattu julkisivu kärsinyt kosteusrasituksesta (toimimattomat räystäsdetaljit tai vioittuneet syöksytorvet), mikä lisää pakkasrapautumisen riskiä, tai jos teräskorroosion aiheuttama halkeilu on paljastanut pinnassa olevat teräkset. Pääasiassa valokuvista voidaan havaita betonissa näkyvät halkeamat, lohkeamat, hilseily sekä paljastuneet teräkset. Mutta niin kauan, kun rakenteen pinta on ehjä, ei kohdetta valokuvaamalla voi määrittää sen sisällä mahdollisesti kyteviä vaurioita.

4. FOTOGRAMMETRIA

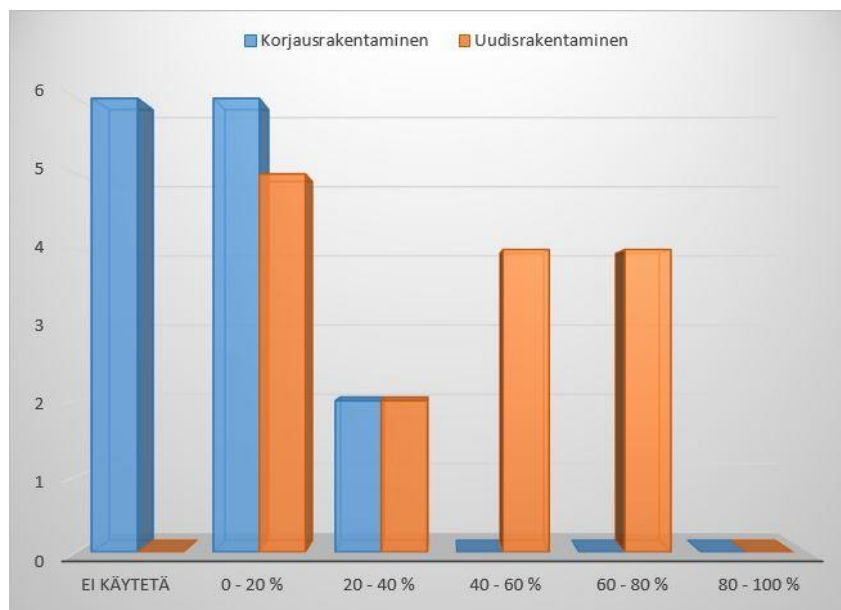
Tässä luvussa käydään läpi fotogrammetrian toimintaperiaate ja sen hyödyntämisen mahdollisuudet korjausrakentamisessa. Ensin luodaan kuitenkin katsaus tietomallintamiseen korjausrakentamisessa ja perustellaan miksi fotogrammetria on varteenotettava vaihtoehto perinteiselle tietomallinnukselle. Luvussa 4.3 määritellään fotogrammetriaan liittyviä käsitteitä ja käsitellään kuvatason koordinaatioita sekä kamerakalibraatiota. Näiden jälkeen voidaan käsitellä fotogrammista orientaatiota, missä pyritään muodostamaan kaksiulotteisesta kuvatvasosta kolmiulotteinen malli. Luvussa 4.4 esitellään ohjeet onnistuneeseen valokuvaukseen vaikuttaviin seikkoihin ja luku 4.5 käsittelee mallinnuksen kulkua ja kuvaa kuinka valokuvista saadaan tuotettua fotorealinen 3D-malli.

4.1 Tietomallintaminen korjausrakentamisessa

Tietomallintaminen tai BIM (Building Information Modeling) tarkoittaa kohteen digitaalista oliopohjaista virtuaalimallia. Siihen sisältyy mallinnettavan kohteen, yleensä rakennuksen, rakenteiden ja osien geometria ja sijainti sekä tietoa niiden yksityiskohdista. Näitä ovat muun muassa rakenneosien tyyppitiedot, materiaalit, valmistaja sekä tuotetunnisteet. (Stolt, 2015).

Korjausrakentamisessa tietomallinnus alkaa inventointimallin luomisesta. Inventointimallilla tarkoitetaan olemassa olevasta rakennuksesta tehtyä tietomallia. Yleiset tietomallivaatimukset määrittelevät inventointimallinnuksessa käytettävät tarkkuudet, mittaustekniikat ja tietosisältövaatimukset. Korjausrakentamisessa korostuu lähtötilanteen mallinnuksen merkitys, koska inventointimalli toimii tietomallin lähtötietona ja runkona. Inventointimallinnus perustuu pääsääntöisesti kohteesta tehtyihin mittauksiin ja tutkimuksiin sekä vanhoihin piirustuksiin. Mittausdata tuotetaan joko laserkeilauksella tai takymetriamittauksin. Mittauksille on asetettu tarkkuusvaatimukset yleisissä tietomallivaatimuksissa. (Rajala 2012, Haavisto 2013).

Kuvassa 19 on esitetty Haaviston teettämän kyselytutkimukseen vastanneiden suunnittelutoimistojen arvio, kuinka monessa prosentissa heidän projekteistaan käytetään tietomallinnusta. Jokainen vastannut kertoo käyttävänsä tietomallinnusta uudisrakennuskohteissa ainakin joskus ja yli puolet kertoo käyttävänsä sitä 40 – 80 prosentissa projekteistaan. Sinisellä kuvassa on erotettu korjausrakentamisen osuus tietomallinnuksessa. Nyt huomiota herättävää on, että neljästätoista vastanneesta kuusi, eli 43% kertoo, että korjausrakentamisessa tietomallinnusta ei käytetä lainkaan. Niistä vastaajista, jotka olivat käyttäneet tietomallinnusta korjausrakentamisessa, 75 % arvioi sitä käytettävän vähemmän kuin joka viidennessä kohteessa. (Haavisto, 2013).



Kuva 19 Tietomallintamista hyödyntävien projektien osuus suhteessa kaikkiin projekteihin. (Muokattu lähteestä Haavisto, 2013).

Kuvasta 19 voidaan siis päätellä, että tietomallintaminen korjausrakentamisessa on paljon vähäisempää kuin uudisrakentamisessa. Tämä johtuu siitä syystä, että tarkan inventointimallin luominen on hankalaa ja työlästä ja näin ollen aiheuttaa vääjäämättä lisää kustannuksia suunnitteluvaiheeseen. Lähtötilanteen mallinnusta hankaloittaa myös se, että rakennus on yleensä käytössä hanke- ja rakennussuunnittelun aikana. [Stolt, 2015]. Tyypillisen tietomallintamiseen käytettävän inventointimallin luomiseen kuluu arviolta aikaa kahdesta kuuteen kuukauteen. (Haavisto, 2013).

Nyt haetaan keinoa tuottaa 3D-malli korjauskohteesta halvalla ja nopealla metodilla. Fotogrammetria mahdollistaa kohteen valokuvaamisen ja niiden avulla tuotetun pintamallin luomisen yhden päivän aikana.

4.2 Fotogrammetrian hyödyntäminen korjausrakentamisessa

Fotogrammetriaa hyödynnetään niin monella eri tavalla ja eri tieteen alalla, että tässä diplomityössä käsitellään vain korjausrakentamiseen liittyviä menetelmiä. Muutamia yleisimpiä CRP:n (Close-Range Photogrammetry) sovelluksia ovat; julkisivujen mittaaminen, kulttuurihistoriallisten rakennusten dokumentointi, vaurioiden aiheuttamien deformaatioiden mittaaminen, vauriokorjaaminen, kaivantojen ja tunneleiden kartoitus, monumenttien ja veistosten mallinnus, kaupunkien, putkistojen, tuulivoimaloiden ja tunneleiden mallinnus sekä kaivosten, teiden ja junaratojen mittaaminen. Listaa voisi vielä jatkaa siirtymällä eri tieteen aloille, sillä fotogrammetriaa sovelletaan laajasti myös lääketieteessä, luonnontieteessä, rikostekniikassa sekä varsinkin elokuva-, peli- ja animaatioalalla. (Luhmann et al., 2014).

Fotogrammetrisen 3D-mallintamisen etuja perinteiseen mittaamiseen tai 2D-piirustuksiin nähden voi olla useita. Fotogrammetria soveltuu käytettäväksi varsinkin silloin, kun mitattava kohde on vaikeasti saavutettava tai kun ei tiedetä mitä mittoja kohteesta tarvitsee ottaa. Mallinnuksen jälkeen ilmenevät mittaustarpeet ovat helposti tyydytettävissä, kun kaikki mittatiedot ovat tallessa 3D-mallissa. Fotogrammetrian kätevyys tulee myös esiin hyvin pienten kohteiden kohdalla, joita on vaikea mitata perinteisin menetelmin. Kulttuurihistoriallisten kohteiden 3D-mallintaminen palvelee sekä alkuperäistä tarkoitustaan, historiallisen tiedon säilyttämistä, mutta samalla myös mahdollista tulevaisuudessa suoritettavaa kohteen korjausrakentamisessa hyödynnettävää mittaamista ja tarkastelua. (Luhmann et al., 2014).

Fotogrammetrisen mallintamisen etuna tavalliseen tietomallintamiseen nähden on myös se, että paikan päällä ei tarvitse tehdä mittauksia, vaan ne voidaan tehdä jälkikäteen mallista. Toisaalta tämän menetelmän heikkona puolena on se, että tuotettu 3D-malli on vain pintamalli, eikä näin ollen sisällä mitään tietoa kohteen sisäisistä rakenteista tai rakennusmateriaalien tuotetiedoista.

Korjauskohteesta luotua kolmiulotteista pintamallia voidaan kuitenkin hyödyntää korjaussuunnittelussa sekä eri korjausvaihtoehtojen vaikutusten visuaalisessa esittelyssä asiakkaille. 3D-malli voidaan siirtää yleisesti käytössä olevassa obj-tiedostomuodossa muihin CAD (Computer Aided Design) mallinnusohjelmiin, missä sitä voidaan muokata ja käyttää pohjana jatkomallinnuksessa tai erillisenä kerroksena (layer), mistä erottuu rakennuksen tekstuuri. Fotogrammetrisen mallinnuksen tarkkuudesta ja kuvanlaadusta riippuen 3D-mallista voidaan tunnistaa rakennuksen julkisivujen, parvekkeiden, sokkelin ja katon yleiskunto ja materiaalit.

4.3 Fotogrammetrinen menetelmä

4.3.1 Fotogrammetrian määrittely

Fotogrammetria tarkoittaa kohteen muodon ja paikan määrittämistä mittaamalla ja tulkitsamalla kohteesta otettuja valokuvia. Fotogrammetria pyrkii siis tuottamaan lisäinformaatiota kaksidimensioisista kuvista ja muodostamaan digitaalisen mallin kuvatusta kohteesta analysoimalla valokuvia. (Luhmann et al., 2014).

Stereofotogrammetria on yksi fotogrammetrian muoto, missä matemaattisten algoritmien avulla arvioidaan objektin 3D-koordinaatit vertaamalla kahta eri kuvakulmista otettua valokuvaa. Kolmiulotteiseen mallinnukseen vaaditaan aina vähintään kaksi valokuvaa, jotka on otettu eri positioista, mutta yleensä kuvien lukumäärä on paljon suurempi. Monesti fotogrammetriaan perustuvat mallinnusohjelmat ovat asettaneet annettavien valokuvien minimimäärän ja suositeltavan määrän. Valokuvien minimimäärä on yleensä noin 6 kappaleen paikkeilla ja suositeltava määrä noin 20-60 luokkaa ja maksimi sallittu määrä noin 150-250 kappaletta, riippuen kyseessä olevasta mallinnusohjelmasta.

Useista toistensa kanssa limittyvistä valokuvista kyetään laskemalla muodostamaan jokaisesta kuvauspisteestä säde jokaiselle kuvatun kohteen 3D-koordinaatille. Tärkein tehtävä mallinnusohjelmalla on tunnistaa eri kuvissa esiintyvät objektin identtiset pisteet, jotta kuvien keskinäinen orientaatio ja kuvauspaikka voidaan määrittää. (Foster et al., 2014, Luhmann et al., 2014).

Fotogrammetria voidaan kategorisoida monella eri tavalla, yleensä kameran sijainnin tai otettujen kuvien lukumäärän mukaan. Taulukossa 3 on esitetty Luhmann et al. tapa kategorisoida fotogrammetria.

Taulukko 3 Fotogrammetrian luokittelu, muokattu lähteestä (Luhmann et al., 2013).

Kategoria	Kuvaus
Kameran sijainnin ja kuvattavan kohteen etäisyyden mukaan	
Satellite Photogrammetry	Processing of remote sensing and satellite images, $h > \text{ca. } 300\text{m}$
Aerial Photogrammetry	Processing of aerial photographs, $h > \text{ca. } 300\text{ m}$
Terrestrial Photogrammetry	Measurements from a fixed terrestrial location
Close-Range Photogrammetry	Imaging distance $d < \text{ca. } 300\text{ m}$
Macro Photogrammetry	Image scale > 1 (microscope imaging)
Mobile Photogrammetry	Data acquisition from moving vehicles, $d < \text{ca. } 100\text{m}$
Otettujen kuvien lukumäärän mukaan	
Single Image Photogrammetry	Single-image processing, mono-plotting, rectification, orthophotos
Stereo Photogrammetry	Dual image processing, stereoscopic measurement
Multi-image Photogrammetry	Number of images is n , where $n > 2$, bundle triangulation
Tulosten saamisen mukaan	
Offline Photogrammetry	Sequential, digital image recording, separated in time or location from measurement
Online Photogrammetry	Simultaneous, multiple, digital image recording, immediate measurement
Real-time Photogrammetry	Recording and measurement completed within a specified time period particular to the application

Fotogrammetria perustuu matematiikkaan, optiikkaan ja geometriaan. Fotogrammetrialla on pitkä historia, joka juontuu jopa 1400-luvulle renessanssin Italiaan ja Leonardo da Vinciin asti. Alun perin suuressa mittakaavassa fotogrammetriaa sovellettiin kartografiassa, eli karttojen tekemisessä. Varsinaisesti CRP:n hyödyntäminen alkoi 1850-luvun aikoihin Ranskassa, kun Pariisin kaupungista luotiin kartta talojen katolta otettujen valokuvien pohjalta. Tietokoneiden ja ohjelmistojen myötä sen käyttömahdollisuudet

ovat levinneet monelle eri tieteen alalle. (Foster et al., 2014). Tässä diplomityössä fotogrammetriaa sovelletaan 3D-mallin luomiseen rakennuksen julkisivuista otettujen valokuvien avulla.

Tietokoneavusteisen 3D-mallinnuksen ja laskentatehon kehittymisen myötä ohjelmistot kykenevät nopeasti luomaan fotogrammetrian keinoin todella näyttäviä ja tarkkoja 3D-malleja tosimaailman kohteista. Viimeisen 20 vuoden aikana tapahtuneesta huikasta teknologisesta kehityksestä huolimatta, mittatarkan 3D-mallin luominen valokuvista ei edelleenkaan ole ongelmatonta. Kuvien analysointi 3D-malleja tuottavilla algoritmeilla menee helposti pieleen ja tuottaa rikkinäisiä, vääristyneitä tai puutteellisia malleja. Mikäli kuvaamista ei ole suoritettu oikealla tavalla tai kuvattu kohde sisältää algoritmille vaikeita läpinäkyviä tai kiiltäviä pintoja tai peittoon jääviä kohtia voi lopputulos olla keho tai jopa käyttökeltoton. (Foster et al., 2014).

4.3.2 Kamerakalibraatio

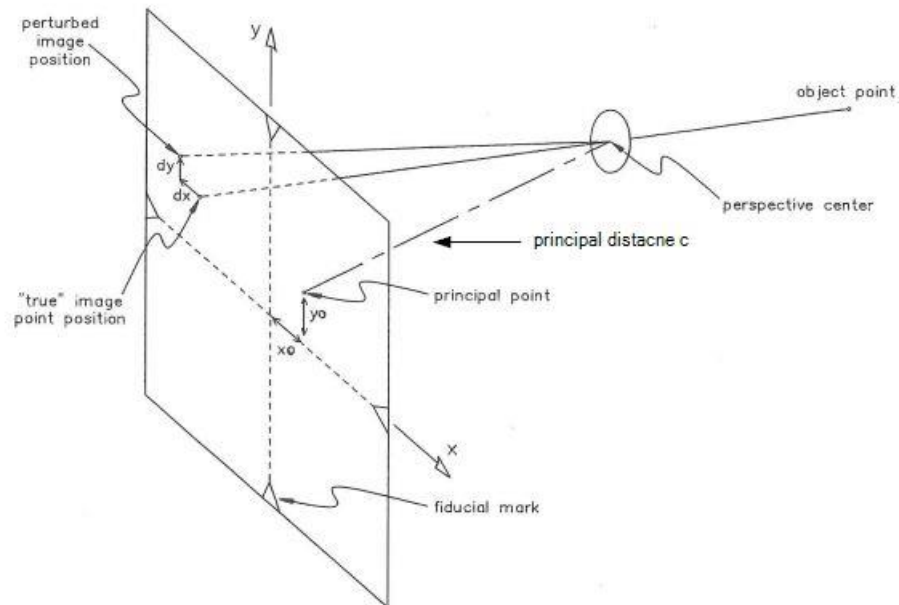
Kamerakalibraatiolla tarkoitetaan kameran sisäisten ja ulkoisten parametrien määrittämistä. Tämä on ensiarvoisen tärkeää, kun kameran tuottamista kuvista halutaan tehdä tarkkoja mittauksia tai kuvan analysointia IA (Image Analysis). IA:n pyrkimyksenä on informaation tunnistaminen kaksiulotteisesta kuvatasosta ja sen siirtäminen ja esittäminen kohdekoordinaatistossa (object space).

Kamerakalibraatioon liittyy kameran ulkoiset orientaatioparametrit, EOP (Exterior Orientation Parameters), sekä sisäiset orientaatioparametrit IOP (Interior Orientation Parameters). Kirjallisuudessa esiintyy myös vastaavat termit ”extrinsic parameters” ja ”intrinsic parameters”. EOP parametreja on kuusi kappaletta; projektiokeskuksen sijaintia esittävät koordinaatit X_0 , Y_0 , Z_0 sekä kuvan referenssikoordinaatiston rotaatiokulmat ω , ϕ , κ (oomega, phi ja kappa). Nämä ovat määritettävissä, kun kahdesta eri valokuvasta löytyy vähintään kolme keskenään ei-kollinearista pistettä. IOP parametreja on kolme; pääpisteen PP (Principal Point) koordinaatit (x_0, y_0) sekä pääpisteen etäisyys (principal distance) projektiokeskuksesta c (katso kuva 20). Pääpisteen ja projektikeskuksen välinen etäisyys c on ideaalitapauksessa sama kuin kameran polttoväli (focal length). (Gruen et al., 2001).

Kalibroinnilla pyritään lieventämään linssin vääristymästä ja ilmakehän vaikutuksesta tapahtuvan valon taittumisen aiheuttamaa häiriötä (perturbation). Tämä häiriö aiheuttaa lievää vääristymä kohdepisteen, projektiokeskuksen ja kuvapisteen kollineaarisuuteen.

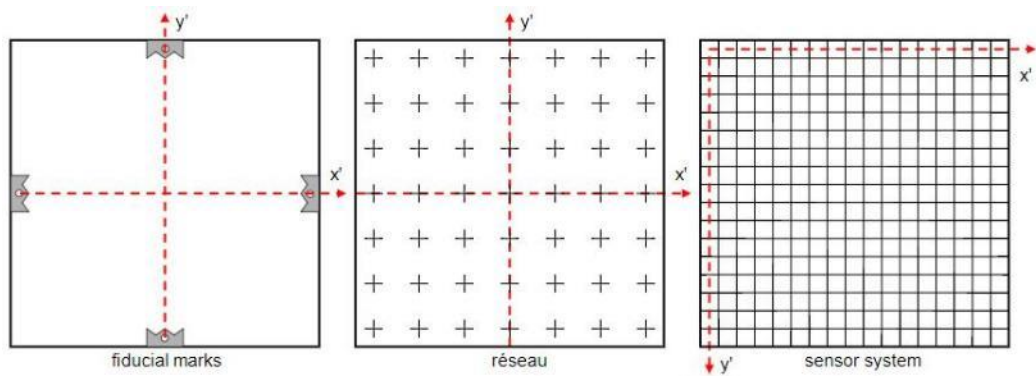
Kuvassa 20 on esitetty ”todellisen” kuvapisteen ja perturbaation johdosta siirtyneen pisteen välinen siirros Δx ja Δy . Kuvassa on esitetty myös kuvakoordinaatiston luomiseen käytetyt referenssipisteet (fiducial marks). Kuvakoordinaatiston origo muodostuu referenssipisteiden leikkauskohtaan. Oikein valituilla IOP parametreilla voidaan siis korjata perturboitunut piste takaisin ”todelliseen” kuvapisteeseen siirtämällä sitä Δx , Δy

verran ja näin palauttamaan kollineaarisuus kuvapisteen, projektiokeskuksen ja kohdepisteen kesken. (Gruen et al., 2001).



Kuva 20 IOP ja perturbaation aiheuttama vääristymä kollineaarisuuteen, muokattu lähteestä (Gruen et al., 2001).

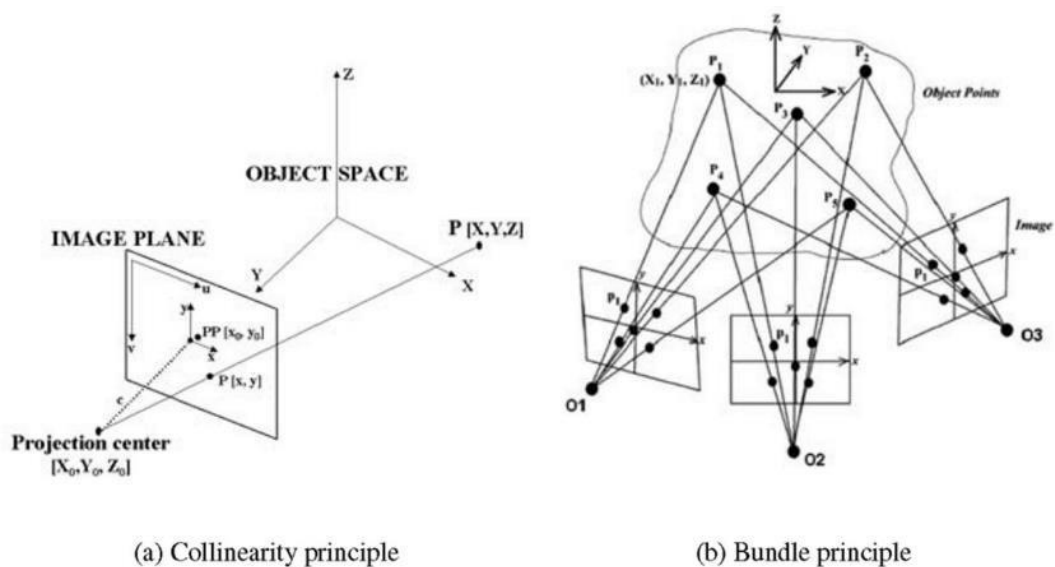
Valokuvan kuvatason koordinaatisto täytyy määritellä ja sen täytyy olla tulkittavissa valokuvasta. Kuvassa 21 on esitetty kolme yleisintä fotogrammetriassa käytettyä menetelmää kuvakoordinaatiston luomiseksi. ”Fiducial marks” menetelmässä kuvaan sijoitetaan vähintään 4 referenssipistettä, joiden leikkauskohta muodostaa kuvakoordinaatiston origon. Réseau-menetelmässä istutetaan referenssipisteet tasaisesti koko kuvatason alueelle kalibroidun lasilevyllä sijaitsevan ristikon avulla. Tämä menetelmä on havaittavissa myös Nasan kuulennon valokuvista. Nykyisin eniten käytetty menetelmä on kuitenkin ”sensor system”, missä kuvatason koordinaatiston luomiseen ei tarvita keinotekoisia referenssipisteitä, vaan kuvakoordinaatisto saadaan suoraan pikselikoordinaatiston mukaan. Toisaalta juuri tästä syystä digitaalista valokuvaa ei saa käsitellä, zoomata tai rajata (crop), ennen mallinnusta, koska silloin kameran tuottaman EXIF-tiedoston (Exchangeable Image file Format) metadata ei enää pidä paikkaansa ja kameran ja kuvan välinen referenssi vääristyy. (Luhmann et al., 2014, Gruen et al., 2001).



Kuva 21 Kuvakoordinaatiston määrittäminen, (Luhmann et al., 2014).

4.3.3 Fotogrammetrinen orientaatio

Kuvassa 22 on esitetty fotogrammetriassa käytetty menetelmä kohteen kolmiulotteisten (X, Y, Z) koordinaattien määrittämiseksi leikkaavien säteiden avulla. Vasemmalla on kuvattu pisteen P kolmiulotteisen paikkatiedon kuvantuminen valokuvassa kaksiulotteiselle kuvatasolle (image plane). Vasemmalla esitetty kollinearisuusehto (collinearity principle) edellyttää että, kohdepiste $P [X, Y, Z]$, kuvatasoon mallintuva 2D-piste $P [x, y]$ sekä projektiokeskus O (projection center, perspective center) ovat samalla suoralla. Oikeanpuoleisessa kuvassa esitetään kuinka kahden tai useamman kaksiulotteisen paikkatiedon avulla voidaan määrittää kohdepisteen kolmiulotteinen sijainti sädekimppuperiaatteen (bundle principle) avulla. Pisteet $P_1 - P_5$ esittävät kolmessa eri valokuvassa yhtä aikaa esiintyviä tunnistettuja sidepisteitä (tie points, homologue points) ja pisteet $O_1 - O_3$ esittävät eri kuvakulmissa olevia kameroiden projektiokeskuksia. Pisteen P_1 koordinaattien (X_1, Y_1, Z_1) määrittäminen tapahtuu niin kutsutun fotogrammetrisen orientaation avulla. (Fraser, 2015).



Kuva 22 Fotogrammetrinen orientaatio, (a) kollinearisuuseriaate ja (b) sädekimppuperiaate. (Fraser, 2015).

Pyörähdys Y-akselin ympäri rotaatiokulman φ verran, voidaan esittää matriisimuodossa seuraavalla tavalla:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

, mistä saadaan pisteen P (kuva 24) uudet koordinaatit

$$X = x \cdot \cos(\varphi) + z \cdot \sin(\varphi),$$

$$Y = y,$$

$$Z = -x \cdot \sin(\varphi) + z \cdot \cos(\varphi)$$

, missä x , y ja z ovat pisteen P alkuperäiset koordinaatit, X , Y ja Z ovat pisteen P kierron jälkeiset koordinaatit ja φ on pyörähdyskulma Y-akselin ympäri. Jokaiselle akselille on omat rotaatiomatriisit. (Luhmann et al., 2014)

Fotogrammetriassa käytettävästä matematiikasta, koordinaatistomuunnoksista, rotaatiomatriiseista ja linssien fysiikasta on olemassa kirjallisuutta, mutta niihin tämän syvällisempi paneutuminen on rajattava tämän diplomityön ulkopuolelle. Aiheesta enemmän kiinnostuneet voivat tutustua lyhyeen matemaattiseen esittelyyn kirjassa *Close Range Photogrammetry and Machine Vision* (Atkinson, 2001), tai vielä kattavammin asia on esitetty teoksessa *Close-Range Photogrammetry and 3D-Imaging* (Luhmann et al., 2014).

4.4 Valokuvausdatan hankkiminen

Valokuvaaminen fotogrammetriaa varten vaatii harjoittelua. Mikä tahansa kamera käy, mutta parhaaseen tulokseen pääsee laadukkaalla järjestelmäkameralla. Tärkeintä fotogrammetriaohjelmistojen algoritmeille on, että valokuvissa on tarpeeksi päällekkäisyyttä, vähintään 50 %, ja että kuvat ovat tarkkoja. Kaikki kohina ja suttuisuus sekä varjot ja ylivalottuminen aiheuttavat lopulliseen 3D-malliin epäjatkavuuskohtia tai reikiä.

Atkinson määrittelee fotogrammetrian perustuvan sekä tieteeseen että taiteeseen ja perustelee tämän 3D-mallinnukseen soveltuvan valokuvauksen vaativan taiteellista silmää ja taitoa. Matematiikan ja fysiikan lait sekä ymmärrys kuinka niitä voidaan soveltaa luovat fotogrammetrian perustan, mutta taiteen merkitystä ei pidä vähätellä. Mallinnettuun kohteeseen ei muodostu sellaisia pintoja tai muotoja, mitä ei esiinny valokuvissa, eikä pelkkä valokuva sinällään yksin riitä, vaan sen on oltava oikein fokusoitunut ja terävä. (Atkinson, 2001).

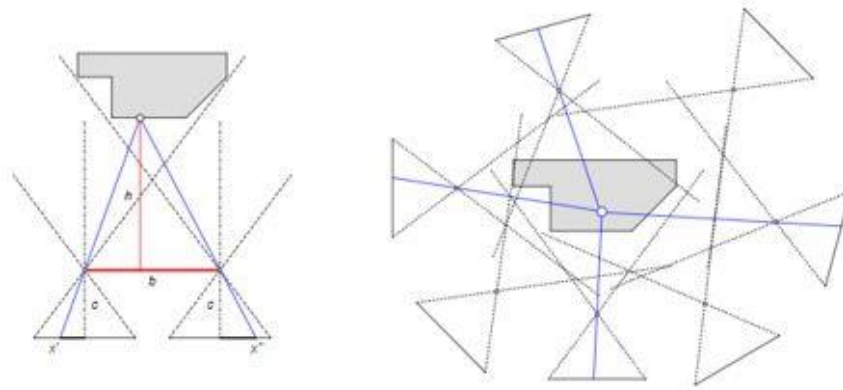
Atkinsonin väitteisiin valokuvauksen haastavuuteen ja tärkeyteen liittyen on helppo yhtyä lukuisten epäonnistuneiden mallinnusyritysten jälkeen. Alla olevassa kuvassa 25 on esimerkkejä epäonnistuneista 3D-malleista; vasemmalla kolme- ja nelikerroksiset kerrostalot, oikealla ylhäällä omakotitalo ja oikealla alhaalla ukulele edestä ja takaviistosta katsottuna.



Kuva 25 Epäonnistuneita 3D-mallinnuksia. Kuvakaappaukset otettu Autodeskin ReMake ohjelmasta.

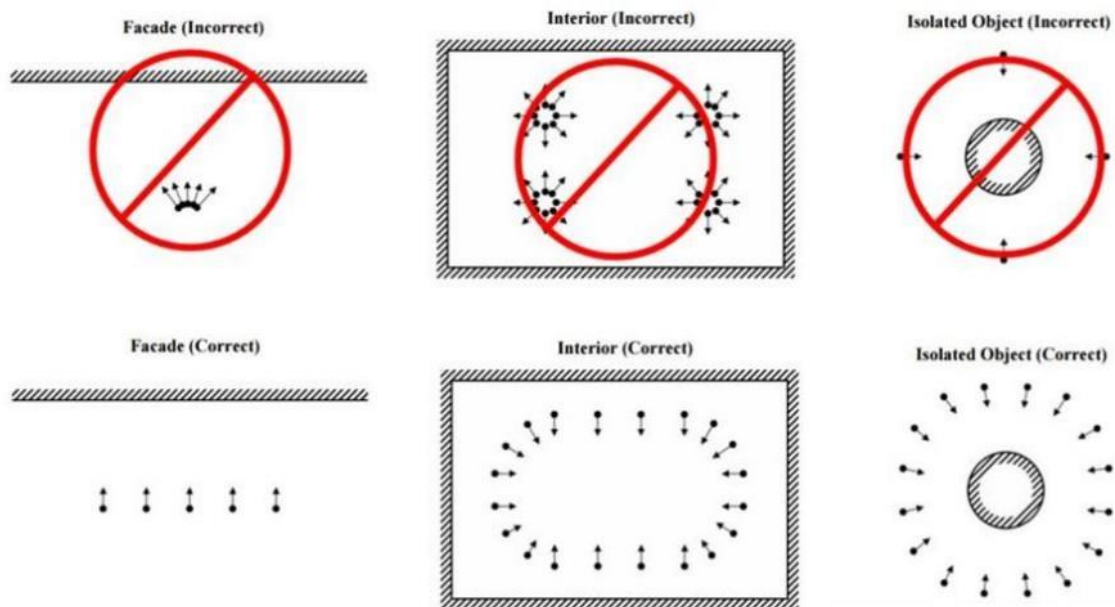
3D-mallinnusta varten käytetään lähes poikkeuksetta monikuvafotogrammetriaa (Multi-image photogrammetry). Stereofotogrammetria soveltuu lähinnä kuvissa esiintyvien kohteiden etäisyyksien määrittämiseen. Monikuvafotogrammetria on ainoa vaihtoehto, kun halutaan 3D-mallintaa kuvattu rakennus, koska mallinnukseen tarvitaan luonnollisesti useita kuvia joka puolelta rakennusta.

Kuvassa 26 on esitetty stereofotogrammetrian ja monikuvafotogrammetrian periaate. Määritelmän mukaan, stereofotogrammetria nimensä mukaisesti pohjautuu kahteen eri kohdasta otettuun valokuvaan. Monikuvafotogrammetriassa valokuvien lukumäärää ei ole rajattu ollenkaan, mutta 3D-mallinnusohjelmat pystyvät käsittelemään vain rajallisen määrän kuvia (suuruusluokkaa 250 kpl / 3D-malli). (Luhmann et al., 2014).



Kuva 26 Stereofotogrammetria ja monikuvafotogrammetria, Muokattu lähteestä (Luhmann et al., 2014).

Selkeimmät ohjeet CRP-valokuvaamiseen löytyi Agisoftin PhotoScan ohjelman käyttöoppaasta. (Agisoft 2016). Kuvassa 27 on esitetty julkisivun, sisätilan sekä erillisen kappaleen kuvaamiseen parhaiten soveltuva lähestymistapa. Kuvassa olevat nuolet esittävät kameran sijoituspaikkaa ja valokuvaussuuntaa.



Kuva 27 Valokuvausohjeet fotogrammetriaa varten. (Agisoft 2016).

Yleispäteviä ohjeita 3D-mallinusta varten suoritettavaan valokuvaamiseen ei ole, mutta hyvänä nyrkkisääntönä on ottaa enemmän kuvia kuin kuvittelee tarvitsevänsä. Näin menettelemällä voi kuvauksen jälkeen valita mallinnukseen parhaiten soveltuvat valokuvat. Kohde tulee kuvata joka suunnasta ja yksityiskohtiin kannattaa kiinnittää erityistä huomiota. Rakennuksen julkisivuja kuvattaessa, nurkan yli siirtyminen vaatii suunnittelua ja harjoitusta, jotta kuvien riittävä limittyminen säilyy ja sidepisteitä löytyy riittävästi. Kameran zoomausta tulee myös välttää, jotta polttoväli ja kuvan skaala pysyvät vakioina. Yleensä 3D-mallinnusohjelmat pystyvät lukemaan kameran sisäiset parametrit kamerakalibraatiota varten suoraan valokuvien EXIF-tiedostosta, mikäli

kamera tuottaa metadataa valokuviiin. Tällöin 3D-mallinnusohjelman tarvitsee laskea vain kameran ulkoiset EOP parametrit fotogrammetrista orientointia varten.

Vaikeita tai jopa mahdottomia fotogrammetrisesti mallinnettavia kohteita ovat kaikki heijastavat pinnat kuten ikkunat ja peilit sekä toistuvat kuviot kuten tiilimuuri. Tasaiset ja yksityiskohdattomat pinnat kuten sileä yksivärinen seinä on myös hyvin haastava kohde, koska mallinnusalgoritmin on vaikea löytää valokuvista sidepisteitä. Vaikeiden kohteiden mallinnusta voidaan helpottaa lisäämällä kuvattavaan kohteeseen tai sen ympärille tunnistamista helpottavia markkereita (markers). Tällaista kohteen merkitsemistä kutsutaan näkyvöittämisiksi tai signaloimiseksi (signaling, targeting). (Salmenperä, 2004, Luhmann et al., 2014).

Kuvassa 28 vasemmalla on signaloitu portaikon tasanne, portaat sekä kaide ja oikealla tasainen betoniseinä sidepisteiden määrittämisen helpottamiseksi. Signaloimista varten on olemassa erilaisia heijastavia mittatarkkoja markkereita (retro-reflective marker), mutta tehtävään soveltuu mitkä tahansa taustasta erottuvat esineet kuten viivoittimet, paperiarkit tai teippaukset.



Kuva 28 Vaikeasti tunnistettavien pintojen signaloimista. (Luhmann et al., 2014).

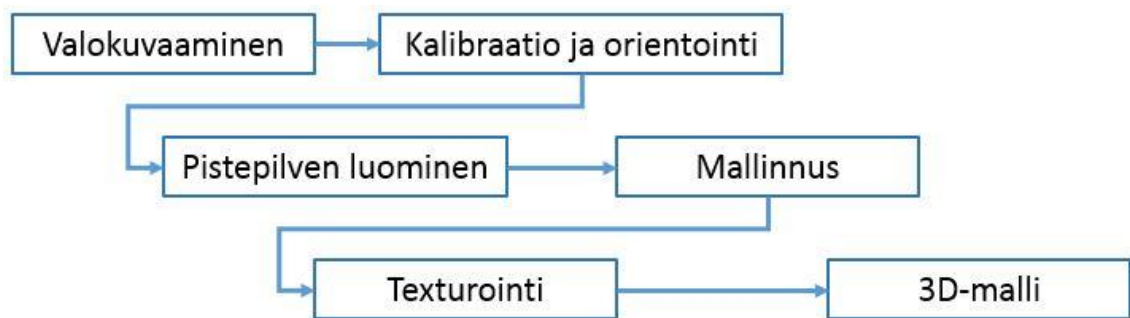
4.5 3D-mallin luominen valokuvista

Eri 3D-mallinnusohjelmia on olemassa runsaasti. Wikipedian ”Comparison of photogrammetry software” sivusto listaa 88 kappaletta eri fotogrammetriaohjelmistoja. Tätä diplomityötä varten testattiin muutaman ilmaisversion lisäksi neljää kaupallista mallinnusohjelmaa. Jokaisesta valitusta ohjelmasta oli saatavana ilmainen kokeilulicenssi. Ohjelmien keskinäinen vertailu oli haastavaa, koska mikään ohjelma ei suoriutunut toistuvasti paremmin kuin muut. Vertailun aikana jokaiseen ohjelmaan syötettiin samat valokuvat ja yleensä aina joku ohjelmista epäonnistui mallin luomisessa. Paras kuvanlaatu (tai fotorealismi) oli Autodeskin Remake ja Agisoftin PhotoScan ohjelmien välillä. Näiden kahden ohjelman välillä suurimmat erot olivat Remake:n mahdollisuus korjata ja muokata mallia ja PhotoScan:n mahdollisuus itse vaikuttaa mallinnukseen käytettäviin sidepisteisiin. PhotoScan ohjelma luo ensin harvapistemallin (Sparse Point Cloud), mistä voi rajata mallinnettavan objektin ja näin poistaa mallista

turhat ympäristössä esiintyvät häiriötekijät kuten puut, parkkipaikan autot jne. Tämä karsinta nopeuttaa mallinnusta huomattavasti ja parantaa mallin laatua. Lopulliseksi mallinnusohjelmaksi kuitenkin valikoitui Autodeskin Remake, koska se suoriutui mallinnoista useimmin parhaiten ja siinä oli ylivoimaisesti parhaat ominaisuudet mallin muokkaamiseen.

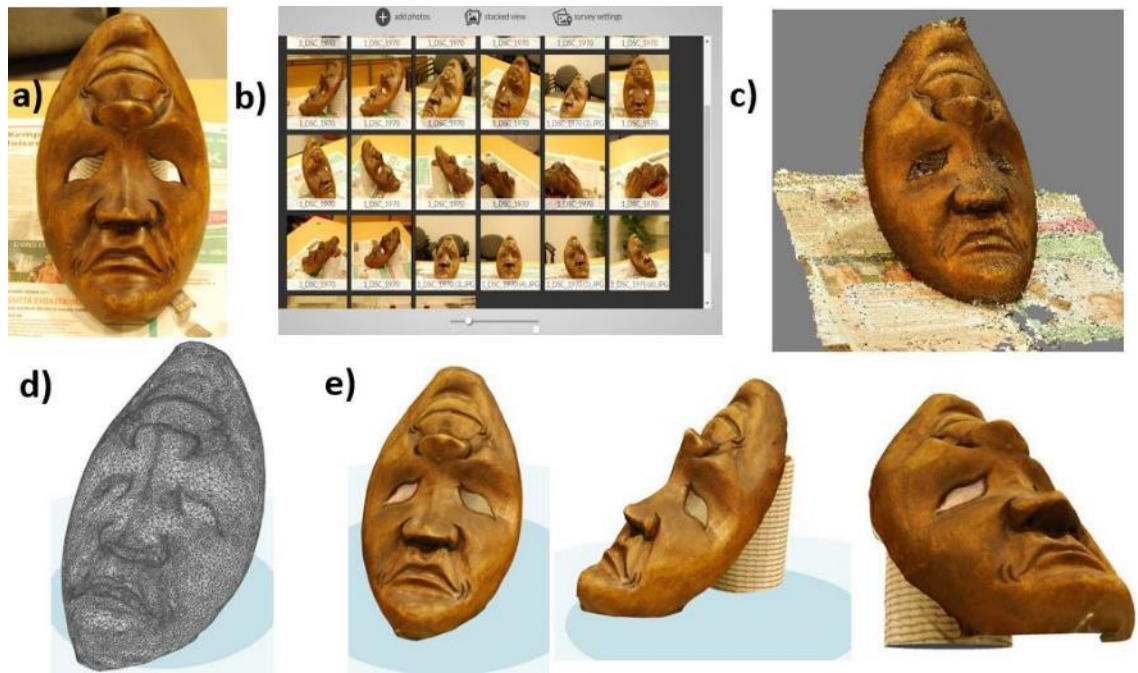
Itse 3D-mallin luominen valokuvista ohjelmistojen avulla on täysin automatisoitua. Ohjelmien käyttörajapintojen eroavaisuudet sivuuttaen, jokainen ohjelma toimii samalla tavalla. Valokuvat syötetään ohjelmaan ja algoritmi etsii kuvista tunnistettavat sidepisteet ja suorittaa fotogrammetrisen orientoinnin. Mikäli sidepisteitä löytyy tarpeeksi ja orientointi menee oikein, on lopputuloksena 3D-malli.

Kuva 29 esittää valokuviiin pohjautuvan 3D-mallinnuksen periaatteellisen kulun prosessikaaviomuodossa.



Kuva 29 Valokuvista 3D-malliksi prosessikaavio. Muokattu lähteestä (What-when-how).

Kuvassa 30 on esitetty fotogrammetrisen mallinnuksen kulku valokuvista 3D-malliksi. Kohdassa (a) on valokuva mallinnettavasta kohteesta, (b) kohdassa kaikki mallinnukseen soveltuvat eli onnistuneet ja tarkat kuvat on syötetty Autodeskin ReCap ohjelmaan. Kohdassa (c) on Agisoftin PhotoScan ohjelman kuvista muodostama tihennetty pistepilvi (dense point cloud) ja d-kohdassa on Autodeskin Remake ohjelman luoma kolmioverkko (mesh). Loput kolme kuvaa kohdassa (e) on Autodeskin Remake ohjelman lopullinen versio fotorealisticesta 3D-mallista, jota voi pyörittää ympäriinsä ja katsella joka suunnasta. Tämän kyseisen puunaamion mallinnuksen kohdalla voidaan todella puhua fotorealismista, sillä mallista otettuja kuvakaappauksia on helppo erehtyä uskomaan valokuvaksi.



Kuva 30 Fotogrammetrinen prosessi; a) valokuva mallinnettavasta kohteesta, b) valokuvat syötetty Autodeskin ReCap ohjelmaan, c) Agisoftin PhotoScan ohjelman muodostama tihennetty pistepilvi, d) Autodeskin Remake ohjelman luoma kolmioverkko (mesh), e) Autodeskin Remake ohjelman lopullinen fotorealistinen 3D-malli.

5. KUVANTUNNISTUSTEKNIIKAT

Kuvantunnistuksen hyödyntämisestä korjausrakentamisessa tai rakennusten julkisivujen vauriokartoituksessa löytyy vain kourallinen tutkimuksia julkisista tietokannoista. Tienpinnan ja siltojen kansien automaattisesta vauriotunnistamisesta sen sijaan on kirjoitettu hieman enemmän artikkeleita ja tutkimuksia. Tämän diplomityön alkaessa oli tarkoitus selvittää voiko kuvantunnistusta mahdollisesti hyödyntää valokuvissa ilmenevien vaurioiden tunnistamisessa. Alkuperäinen ajatus oli, että samasta kohteesta eri aikoina otettuja valokuvia voisi verrata toisiinsa ja tunnistaa niissä näkyvät vauriot sekä vaurioissa tapahtuneet muutokset vuosien varrella. Tällä tavoin voitaisiin tunnistaa eteneviä vaurioita rakennusten julkisivuissa tai silloissa. Kirjallisuuskatsauksen yhteydessä ei tullut vastaan yhtään tutkimusta, missä olisi hyödynnetty kuvantunnistustekniikoita valokuvissa esiintyvien vaurioiden vertailuun. Kirjallisuuden vähyyttäkin suurempi haaste on se, että yleispäteviä hahmontunnistusohjelmistoja ei ole saatavilla. Fotogrammetriaan perustuvia kaupallisia mallinnusohjelmia oli tarjolla kymmenittäin, mutta hahmontunnistusohjelmistot ovat kaikki yksilöllisiä, eli ne on suunniteltu ja ohjelmoitu sekä opetettu toimimaan aina tapauskohtaisesti.

5.1 Kuvantunnistuksen perusteet

Kuvantunnistus voidaan jakaa moneen eri alakategoriaan; hahmontunnistus (Pattern Recognition PR), konenäkö (Machine Vision), kasvontunnistus (Face Recognition) sekä merkintunnistukseen (Character Recognition). Hahmontunnistuksen tarkoituksena on erottaa kuvassa näkyvä objekti ja asettaa se johonkin ennalta määriteltyyn kategoriaan tai luokkaan. Sovelluksesta riippuen tunnistettavat tai luokiteltavat objektit voivat olla kuvia, spektrejä, signaaleja tai mitattua dataa. (Theodoridis et al., 2009).

Konenäkö tarkoittaa systeemiä, missä sensori, tyypillisesti kamera, tallentaa kohteen ja pyrkii analysoimaan kuvan sekä tuottamaan määritelmän kyseessä olevasta objektista. Tyypillinen konenäköä hyödyntävä ala on teollisen tuotannon tuotelinjasto, missä konenäköä voidaan käyttää automaattisessa laadun varmistuksessa. Esimerkiksi liukuhihnalla kulkevat tuotteet voidaan kuvata ja konenäkö luokittelee tuotteet joko ”vialliset” tai ”ei-vialliset” luokkaan. Konenäköä voidaan hyödyntää myös automatisoidulla kokoamislinjastolla missä se ohjeistaa robottia siirtämään esineet oikealle liukuhihnalle. (Theodoridis et al., 2009).

Tietokoneperusteista kasvontunnistusta on kehitetty 1970-luvulta lähtien. Kasvontunnistus voidaan jakaa kahteen eri lajiin, sen mukaan tapahtuuko kasvojen kuvaaminen rajatussa tai ei-rajatussa (Constrained, Unconstrained) tilanteessa. Rajatussa tilanteessa kuvauksen valaistusta, kasvojen asentoa kameraan nähden sekä ilmettä

voidaan hallita, kun taas ei-rajatussa tapauksessa kasvot kuvataan muuttuvissa olosuhteissa, eri etäisyyksiltä, eikä kasvojen ilmeisiin tai mahdollisiin silmä- tai aurinkolasien läsnäoloon voida vaikuttaa. Ei-rajatussa tapauksessa luotettava kasvojentunnistus on vielä hyvin puutteellista. (Jain et al., 2011).

Hahmontunnistusta hyödynnetään myös lääketieteessä tietokoneavusteisen diagnosoinnin (computer-aided diagnosis) yhteydessä. Esimerkiksi röntgenkuvien tai mammografiakuvien tulkinnassa on päästy hyviin tuloksiin. Automaattinen puheentunnistus voidaan myös katsoa kuuluvan hahmontunnistuksen piiriin, koska siinä pyritään tunnistamaan ja tulkitsemaan äänisignaalien muodostamia kuvioita. (Theodoridis et al., 2009).

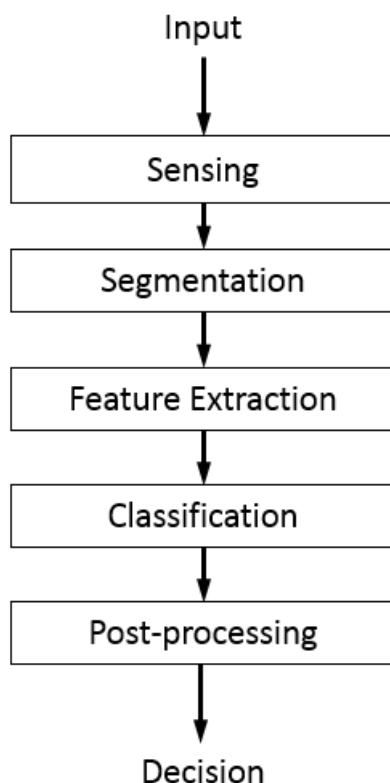
Automaattinen kuvantunnistus, alakategoriasta riippumatta, perustuu kuvassa 31 esitettyyn rakenteeseen. Hahmotus (Sensing) tarkoittaa datan keräyksessä käytetyn laitteiston, yleensä kameran, tarkastelun kohteena olevasta objektista suorittamaa kuvan muodostamista.

Segmentointi (Segmentation) tarkoittaa esikäsittelevävaiheessa tapahtuvaa datan jäsentelyä. Esimerkiksi pyritään erottamaan kuvassa näkyvät ihminen, talon julkisivu ja katu toisistaan, jotta voidaan keskittyä juuri haluttuun hahmoon. Segmentoinnin tarkoituksena on siis helpottaa hahmontunnistuksen seuraavia vaiheita rajaamalla kuvasta mielenkiinnon kohteena olevat objektit, kuitenkin hävittämättä kuvasta relevanttia dataa. Käytännön ongelmia segmentoinnissa ovat; kohteen näkyminen vain osittain kuvassa tai koostuminen useasta kuvasta, kohteiden päällekkäisyydet ja valaistus sekä varjostuminen.

Ominaisuuksien erittely (Feature Extraction) on hahmontunnistusalgoritmin keskeisin vaihe. Siinä algoritmi pyrkii tunnistamaan tai mittaamaan objektissa esiintyvät ennalta määritellyt ominaisuudet. Mitattavat ominaisuudet tulisi määrittää niin, että samaan luokkaan kuuluvien ominaisuuksien vaihteluväli on mahdollisimman pieni, mutta eri luokkien välillä suuri. Mitattavien ominaisuuksien valinnalla sekä niiden lukumäärällä on suuri merkitys onnistuneen tunnistuksen kannalta.

Mitattujen ominaisuuksien perusteella suoritetaan luokittelu (Classification), missä kuvattu hahmo tunnistetaan ja asetetaan ennalta määritelyihin luokkiin. Mittauksessa esiintyvän kohinan sekä ominaisuuksissa ilmenevien päällekkäisyyksien sekä limittymisen johdosta ei yleensä päästä täysin virheettömään tilanteeseen. Tällöin luokiteltava kohde pyritään sijoittamaan todennäköisimpään luokkaan.

Viimeisenä vaiheena on jälkikäsitteily (Post-processing) missä arvioidaan luokittelussa käytettyjen ominaisuuksien sekä juuri suoritettujen luokittelun luotettavuutta. (Duda et al., 2001).

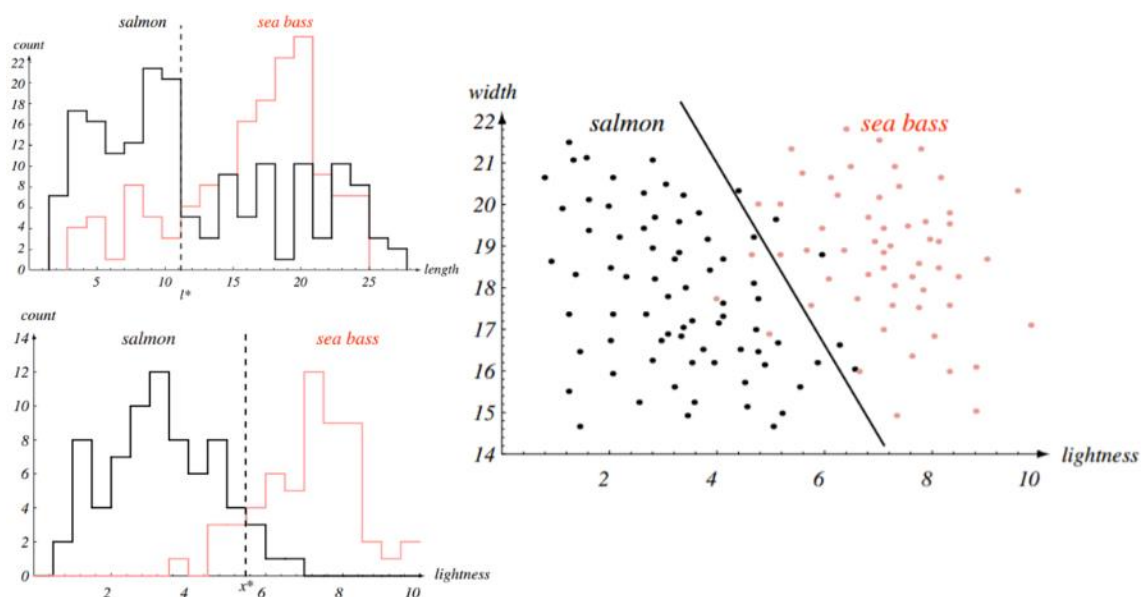


Kuva 31 *Hahmontunnistus prosessi. Muokattu lähteestä (Duda et al., 2001).*

Mitattavien ominaisuuksien määrittelyn tärkeyttä kuvatessaan Duda et al. käyttää esimerkkinä liukuhihnalla kulkevien lohien ja meriahventen tunnistamista. Ensimmäisenä loogisena mitattavan ominaisuutena on esitetty kalojen pituus, mutta kalalajien välillä tapahtuva pituuksien limittyminen on suurta, kuten kuvassa 32 vasemmalla ylhäällä olevasta kalojen pituuskäyrästä näkyy. Kuvaan on merkitty katkoviivalla optimaalinen päätöksentekoraja meriahvenen ja lohien välillä, mutta luokkien välillä ilmenevän suuren pituusvaihtelun vuoksi virheellisten tunnistusten määrä pituuteen perustuvalla luokittelulla on liian suuri.

Seuraavaksi erottelevaksi ominaisuudeksi kalalajien välillä kokeiltiin suomujen vaaleutta, joka on esitetty kuvassa 32 vasemmalla alhaalla. Katkoviiva esittää taas optimaalisinta päätöksentekorajaa. Nyt lajien erottaminen on jo selkeämpää, lohella suomujen vaaleusindeksi on selvästi keskimäärin pienempi kuin meriahvenella, vaikka limittymistä ja näin ollen myös virheellisiä luokitteluja edelleen tapahtuu. Mikään yksittäinen mitattava parametri ei tässä tapauksessa anna yksiselitteistä vastausta lajien erottamiseen, joten tunnistuksen varmuuden parantamiseksi on käytettävä useampaa ominaisuutta yhtä aikaa. Kuvassa 32 oikealla on tunnistamiseen käytetty kalojen leveyttä ja suomujen vaaleusindeksiä yhdessä. Mustalla viivalla on osoitettu päätöksentekoraja. Kun kaksidimensioinen ominaisuusvektori osoittaa viivan yläpuoleiselle alueelle, tulkitaan kala meriahveneksi ja aina muulloin loheksi. Edelleenkin virheellisiä

luokituksia sattuu, mutta selkeästi vähemmän kuin yhtä ominaisuutta mittaamalla. (Duda et al., 2001).



Kuva 32 Ominaisuuksien vertailu ja luokitusrajan määrittäminen. Muokattu lähteestä (Duda et al., 2001).

Mitattavien ominaisuuksien lisääminen kasvattaa tunnistussysteemin hintaa ja lisää päätöksentekorajan määrittämisen sekä koko systeemin kompleksisuutta. Tästä syystä käytettävien ominaisuuksien valinta ja lukumäärä ovat aina kompromissi hinnan ja tavoiteltavan laadun välillä.

Luokittelussa tapahtuvilla virheillä voi olla myös lopputuloksen kannalta erilaisia vaikutuksia. Esimerkiksi jos kyseessä on sienilajien erottaminen toisistaan, on paljon suurempi virhe luokitella myrkkysieni myrkyttömien sienien joukkoon kuin päinvastoin. Tällöin voidaan päätöksentekorajaa pyrkiä siirtämään siten, että virheellinen luokitus sattuu aina pienemmän tai halvemman vahingon suuntaan. (Duda et al., 2001).

Hahmontunnistuksessa pyritään kehittämään algoritmeja, jotka kykenevät oppimaan suoriutuakseen tehtävästään paremmin. Algoritmien opetusmetodeja on erilaisia, mutta ne kaikki käyttävät hyväkseen opetusnäytteitä (Training Samples) luokittelijan (Classifier) oppimismateriaalina. Opetuksen tarkoituksena on siis mallikuvien avulla auttaa luokittelijaa tekemään vähemmän virheitä luokittelussa muokkaamalla luokittelijan päätöksentekorajoja ja mitattavia parametreja. Yleisimmät opetusmenetelmät ovat valvottu opetus (Supervised Learning), valvomaton opetus (Unsupervised Learning) sekä vahvistava opetus (Reinforcement Learning).

Valvotussa opetuksessa hahmontunnistusohjelmaan syötetään opetusnäytteitä, joiden oikea luokka on tiedossa ja algoritmi pyrkii muodostamaan päätöksentekorajat niiden perusteella. Suurimpana ongelmana tässä metodissa on se, kuinka ohjelma kykenee

toimimaan mallihahmoista poikkeavien parametrien kanssa. Toinen ongelma on yliopettaminen, mikä tarkoittaa, että algoritmi oppii ”liian tarkasti” tunnistamaan tietyn hahmon. Tämä johtaa yleistyskyvyn heikkenemiseen ja väärään luokitteluun, kun opetusnäytteistä poikkeavia hahmoja pyritään tunnistamaan.

Valvomattomassa opetuksessa ei käytetä ihmistä algoritmin opettajana lainkaan. Tässä metodissa algoritmi pyrkii muodostamaan opetusnäytteissä esiintyvistä parametreista luonnollisia ryhmiä (Natural Grouping) tai ryppäitä (Clustering). Esimerkkinä luonnollisesta ryhmästä toimii kolmiot ja neliöt, kolmiot on helppo ryhmitellä eri luokkaan neliöistä niissä esiintyvien sivujen lukumäärän mukaan. Koordinaatistoon asettuvat pisteet taas voidaan luokitella eri ryppäiksi niiden sijainnin perusteella. Valvomattoman opetuksen hyviin puoliin kuuluu se, että ihmisen ei tarvitse luokitella mallidataa etukäteen, mikä nopeuttaa prosessia ja laskee sen hintaa.

Vahvistavassa opetuksessa ihminen kertoo algoritmille jälkikäteen, päätyikö se mallikuvien kanssa oikeaan luokitteluun. Ainoa algoritmin saama palaute on, päätyikö se oikeaan luokkaan, eli se ei saa tietoa, mikä olisi ollut oikea luokka. Mikäli kyseessä on vain kaksiluokkainen systeemi ja näin ollen oikea luokka selviää opettajan binäärisellä ”oikein/väärin” palautteella redusoituu vahvistava metodi normaaliksi valvotuksi opetuksiksi. (Duda et al., 2001).

Ottaen huomioon hahmon ominaisuuksien ja päätöksentekorajojen määrittelyn, hahmojen välisten eroavaisuuksien sekä eri hahmojen loputtoman lukumäärän, on helppo todeta, että yhden yleispätevän, erilaiset hahmot tarkasti tunnistavan PR-laitteen luominen on likimain mahdotonta. Tästä esimerkkinä toimii tuolin tunnistamisen vaikeus. Erilaisia tuoleja on paljon; toimistotuoli, keittiötuoli, jakkara, nojatuoli, hernepusi jne. Toiset ovat yksi-, kolmi- tai nelijalkaisia, toisissa ei näy jalkoja ollenkaan ja jotkut hyödyntävät jouselle taivutettuja putkia tai seisovat rullien päällä. Materiaali vaihtelee puusta metalliin ja muovista kankaaseen. Tuolien kokoerot ovat suuria ja myös muoto vaihtelee särmikkäästä muodottomaan säkkiin ja korkeasta matalaan. Osassa tuoleja on selkänoja tai koristeelliset käsituet ja niiden kaikkien piirteet vaihtelevat. Tunnistettavien ja mitattavien ominaisuuksien määrittäminen tuoliksi luokittelun onnistumiseksi on siis vähintäänkin haastavaa, ja tämän onnistuessa voidaan tehdä kuvassa näkyvälle objektille rajausta vasta luokkien ”tuoli” ja ”ei-tuoli” välillä. (Duda et al., 2001).

5.2 Kuvantunnistussovellusten hyödyntäminen korjausrakentamisessa

Kuvantunnistustekniikkaa ja vaurioita käsitteleviä artikkeleita haettaessa tulee yllättävän paljon vastaan juuri siltojen kansissa esiintyvien halkeamien paikantamiseen liittyviä artikkeleita. Toinen mielenkiintoinen huomio on, että myös fotogrammetria nousee esiin monessa tutkimuksessa. Fotogrammetria ja kuvantunnistus ovat siis kytköksissä toisiinsa

segmentoinnin, kuvankäsittelyn ja -tulkinnan muodossa (Image Processing, Image Analysis).

Toisin kuin fotogrammetriassa, kuvantunnistusohjelmistojen kaupallinen siirtyminen tutkimuskäytöstä markkinoille on ollut hyvin hidasta. Tähän suurimpana syynä lienee hahmontunnistuksessa käytetty ominaisuuksien erittelyn (Feature Extraction) taipumus olla hyvin sovelluskohtaista. Esimerkiksi algoritmi, joka pyrkii tunnistamaan tiet ilmavalokuvista, ei osaa tunnistaa kuvissa näkyviä rakennuksia. Tämän lisäksi tarvitaan vielä erilainen algoritmi, mikäli tie halutaankin valokuvien sijasta tunnistaa satelliittikuvista. (Dare et al., 2002).

Minnesotan yliopistossa kehitetty automaattinen halkeaman tunnistusohjelma ACDT (Automated Crack Detection Tool) on ilmainen ja vapaasti internetistä ladattavissa. Ohjelma ajaa annetuille valokuville useita algoritmeja, jotka suorittavat segmentoinnin ja luokittelun sekä pyrkii erottamaan halkeamat ”Cunny Edge Detector”-menetelmällä. (Boldischar 2012).

Kuvassa 33 on ACDT ohjelmaan syötetyt valokuvat kahdesta eri julkisivuvauriosta sekä niistä muodostetut vauriokartat. Ylärivillä oleva tiiliverhoilu on tulkittu olevan täynnä pystyhalkeamia ja sokkelissa näkyvä suuri halkeama erottuu vain vaivoin. Alarivillä olevasta julkisivurappauksesta ACDT suoriutui paljon paremmin; seinässä olevat läpiviennit ja pitkät halkeamat erottuvat selkeästi.



Kuva 33 ACDT ohjelmaan syötetyt vauriokuvat ja niistä muodostuneet vauriokartat.

ACDT on nimenomaan halkeamien tunnistukseen kehitetty ohjelmisto, mutta siitä huolimatta sillä on vaikeuksia erottaa ihmiselle selkeitä vaurioita eri materiaaleista, varsinkin tiilipintaisten kohteiden yhteydessä. Paljaasta betonipinnasta ja suhteellisen tasaiseksi rapatuista pinnoista ACDT suoriutuu paremmin. Toisaalta tämä tulkinta on hieman huteralla pohjalla kokeilussa käytetyn näytemäärän pienuuden johdosta.

Kaupallisesta versiosta ei vielä voida puhua, koska käyttörajapinta ACDT:ssä on kaikkea muuta kuin käyttäjäystävällinen. Ohjelmaan syötettävät kuvat on nimettävä juuri oikeaan formaattiin, ohjelma on komentokehtopohjainen ja sen algoritmien ajoaika on pitkä. Hyvänä puolena tästä on kuitenkin mainittava, että ohjelma on täysin automaattinen, eikä siten tarvitse lainkaan ihmisen ohjeistusta tai apua halkeamien tunnistuksessa.

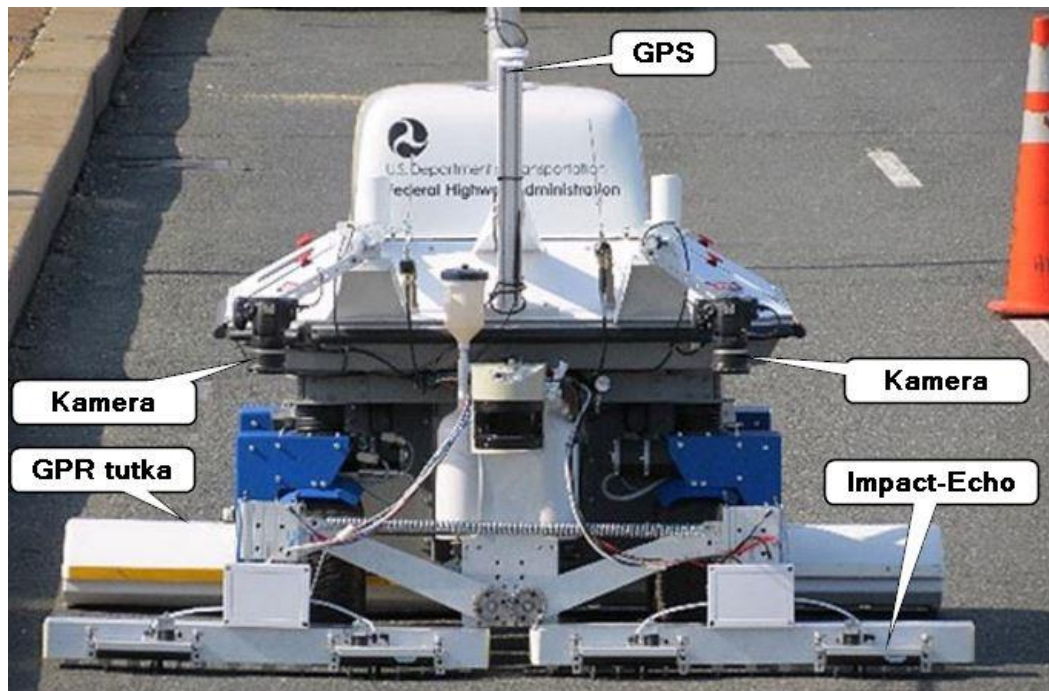
Korjausrakentamisessa ACDT:n kaltaista ohjelmaa voitaisiin mahdollisesti hyödyntää, mikäli sitä saataisiin jatkokehitettyä tarpeeksi. Esimerkiksi julkisivurappausten vauriokartoituksessa valokuvista voisi ohjelman avulla tulostaa suoraan koko julkisivun kattavan halkeamakartan. Tätä varten ACDT tulisi integroida johonkin fotogrammetriaohjelmaan, joka suorittaa valokuvien yhdistämisen ja orientoinnin, jotta yksittäisten vauriokuvien sijasta saataisiin ulostulona koko julkisivun käsittävä halkeamakartta.

Siltojen automaattiseen kuvantunnistukseen perustuvaa kuntotutkimusta on kehitetty useasta syystä. Perinteinen suurten siltojen kuntotutkimus on yleensä vaatinut liikenteen sulkemista tai rajoittamista ja ollut hidasta, työlästä ja kallista. Tämän lisäksi on todettu, että vauriokartoituksen laatu ja tutkimuksen toistettavuus ovat hyvin vahvasti riippuvaisia tutkijan subjektiivisesta näkemyksestä vaurioiden laadusta sekä tutkijan ammattitaidosta. Näiden ongelmien vähentämiseksi siltojen kuntotutkimusta on pyritty automatisoimaan. (Basily et al., 2016, Lattanzi et al., 2014).

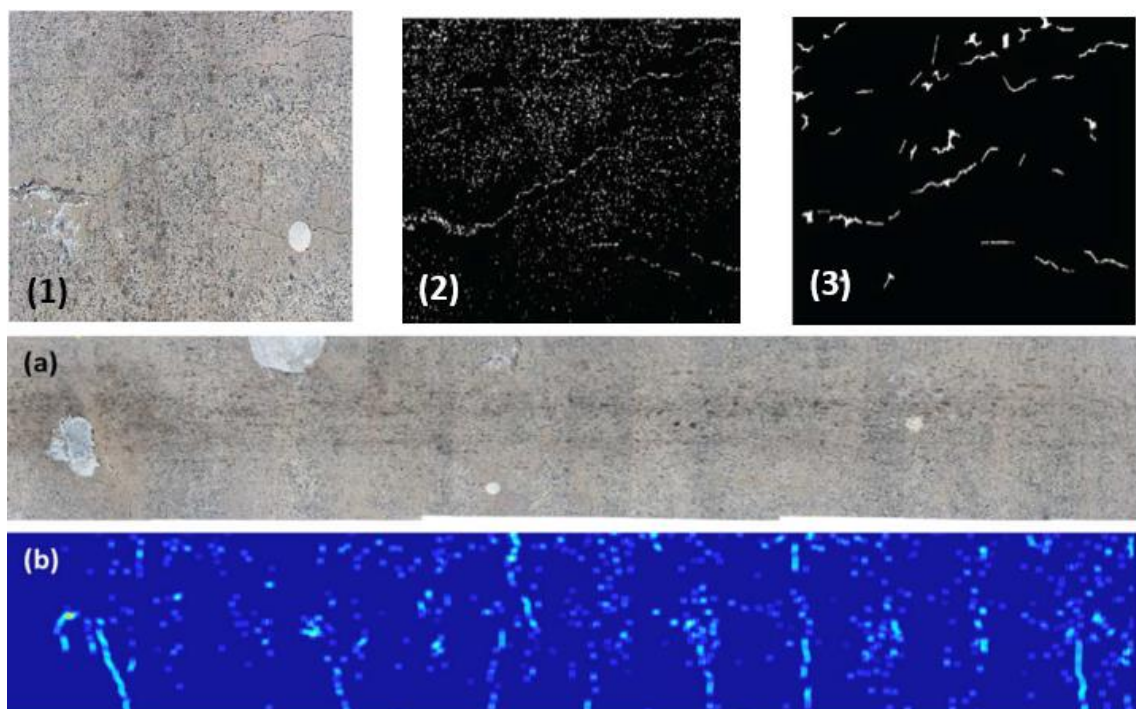
Sillankansien tutkimiseen on kehitetty erilaisia robotteja, jotka valokuvaavat kannen asfaltti- tai betonipinnan ja lähettävät kerätyn datan tietokoneelle kuvankäsittelyä ja vauriotunnistusta varten. Kuvassa 34 on Yhdysvaltojen FHWA:n (Federal Highway Administration) kehittämä RABIT (Robotic Assessment Bridge Inspection Tool) robotti, joka hyödyntää maapinnan läpäisevää tutkausta GPR (Ground Penetrating Radar), iskuääntä (Impact-Echo) ja valokuvausta sillan kannen kuvantamiseen. (Basily et al., 2016).

Kuvassa 35 ylärivillä Basily et al. vertaa tavallista halkeamantunnistusalgoritmia heidän kehittämäänsä STRUM (Spatially Tuned Robust Multifeature) halkeamaluokittelijaan. Vasemmalla on alkuperäinen kuva betonipinnasta, keskellä ”tavallisen” halkeamantunnistusalgoritmin ja oikealla STRUM algoritmin tulkitsemat halkeamat. Kuvista on selvästi nähtävissä, kuinka parannettu algoritmi pystyy suodattamaan alkuperäisestä kuvasta kohinan ja tuottaa paljon selkeämmän käsityksen halkeamista. Samassa kuvassa alhaalla on RABIT robotin skannaama kymmenmetrinen kaistale sillan

kannesta (a) ja kohdassa (b) on STRUM algoritmin avulla luotu vauriotiheyskartta samasta kaistaleesta.



Kuva 34 Sillankannen skannausrobotti RABIT.



Kuva 35 Halkeamantunnistusalgoritmin lopputulos ja sillan kannen halkeama-taajuuskartta 10,5m x 1,5m kaistaleelta (Basily et al., 2016).

Akinci et al. tekemä selvitys tämän hetken konenäköön perustuvasta automaattisesta infrarakenteiden vauriokartoituksen tilanteesta antaa kattavan selvityksen käytössä olevista tekniikoista. Selvityksen lopputulemana kuitenkin todetaan, että datan keruun ja kuvankäsittelyn prosessia ei ole vielä kyetty kunnolla automatisoimaan. Toisena puutteena pidetään alalla ilmenevä standardoinnin sekä opetuksessa käytettyjen julkisten tietokantojen puute.

Halkeamien hahmottamisessa ja arvioinnissa nykyiset menetelmät kaipaavat vielä jatkokehitystä, jotta ne pystyisivät toimimaan paremmin häiriöllisten kuvien (valaistus, varjot, betonipinnan rosoisuus ja likaisuus ym.) yhteydessä. Monet hahmontunnistusmenetelmät myös vaativat käyttäjän avustusta datan käsittelyssä ja kuvien segmentoinnissa tai halkeaman alku- ja loppupisteen määrittelyssä.

Konenäköön pohjautuvien vauriontunnistusmenetelmien käyttö myös rajoittuu pelkästään pintavaurioiden tunnistamiseen. Tämä on tietysti luonnollista, koska tutkittavan pinnan alla olevat vauriot (karbonatisaatio, sisäiset halkeilut) eivät näy pinnasta otetuissa valokuvissa ennen kuin vaurio on laajentunut pintaan saakka. Toisena ongelmana nähdään tutkimusten toistettavuuden heikkous, koska hahmontunnistuksen onnistuminen riippuu suuresti kuvanlaadusta, joka taas on riippuvainen käytetystä laitteistosta ja ympäristön olosuhteista (pimeys, sade, liian kirkas auringonpaiste). Ympäristön olosuhteisiin voisi Suomessa lisätä myös siltoja peittävän lumen ja jään, jotka estävät konenäköön pohjautuvien menetelmien käytön talven ja osittain kevään aikana kokonaan.

Kuvantunnistustekniikkaan pohjautuvasta infrastruktuurin vauriotunnistuksesta todetaan yhteenvedossa, että hahmontunnistuksen, algoritmien ja menetelmien jatkokehitys on välttämätöntä. Tämän hetken menetelmillä ei vielä kyetä tunnistamaan, mittaamaan ja arvioimaan kaikkia eri pinnasta havaittavia vaurioita, mutta nykyiset menetelmät voivat toimia vauriokartoituksessa hyvänä työkaluna ja lisäävät automatisoidun työn osuutta. (Akinci et al., 2015).

6. PILOTTIHANKKEEN MALLINTAMINEN

Tässä luvussa raportoidaan pilottihankkeen mallintamisen kulku. Käydään läpi mallinnettava kohde ja siinä esiintyvät fotogrammetrisen mallinnuksen kannalta haasteelliset piirteet, kuten ikkunat ja parvekkeet. Luvussa 6.1 esitellään mallinnukseen käytetty laitteisto ja mallintamiseen valittu ohjelmisto. Luvussa 6.2 käsitellään valokuvukseen liittyneitä haasteita ja luvussa 6.3 käydään läpi mallinnuksessa todetut virheet ja puutteet sekä onnistumiset. Luvussa 6.4 verrataan mallista saatuja mittoja kohteesta manuaalisesti otettuihin mittoihin, eli arvioidaan mallinnuksen tarkkuutta.

6.1 Käytetty laitteisto ja ohjelmisto

Valokuvaukseen käytettiin Nikon D40x järjestelmäkameraa ja Olympus Stylus TG-4 kompaktikameraa. Molempien kameroiden tukena käytettiin säädettävää kolmijalkaa tärähdysten ja kuvissa esiintyvän häiriön vähentämiseksi. Kameroiden tärkeimmät tekniset ominaisuudet on listattu alla olevassa taulukossa 4. Olympus TG-4 on helppokäyttöisempi ja huomattavasti käyttäjäystävällisempi näin amatöörin näkökulmasta. Kuvassa 36 on kameroiden ulkoiset mitat, Olympus TG-4 vasemmalla ja Nikon D40x oikealla.

Taulukko 4 Kameroiden vertailu.

Ominaisuus	Olympus TG-4	Nikon D40x
Valmistusvuosi	2015	2009
Resoluutio ja kenno	16 MP BSI-CMOS	10MP CCD
ISO herkkyys	100-6400	200-3200
Linssi	25-100mm	17-70mm
Aukkosuhde	F2.0-F4.9	F2.8-F4.5
Kuvanvakaus	Kyllä	Ei
GPS	Kyllä	Ei



Kuva 36 Valokuvauksessa käytetyt kamerat.

Kuten jo luvussa 4.5 mainittiin, suoritettujen testien perusteella pilottikohteen mallinnusohjelmaksi valikoitui Autodeskin Remake. Tähän päällimmäisenä syynä oli Remake:n ominaisuudet ja mahdollisuus muokata sekä korjata 3D-mallia.

6.2 Pilottikohde ja sen valokuvaaminen

Mallinnettavaksi kohteeksi valittiin Oulun Laanilassa sijaitseva Alvar Aallon suunnittelema ja 1952 valmistunut Typpi Oy:n kerrostalo. Valintaperusteena oli kolme seikkaa; kohteeseen tehtiin julkisivujen ja parvekkeiden kuntotutkimus, se on suojeltu kohde ja siitä ei ole kunnollisia piirustuksia saatavilla. Kohde on nelikerroksinen ja siinä on rappukohtaiset tuuletusparvekkeet talon etupuolella ja jokaisessa asunnossa on sisäänvedetty ranskalaistyyppinen huoneistoparveke. Koska rakennuksesta ei ole pohjakuvaa eikä lukukelpoisia piirustuksia saatavilla, mittatietojen kerääminen niiden avulla ei ole mahdollista.

Kohteen valokuvaaminen suoritettiin 27 maaliskuuta 2017. Sääolosuhteet olivat aamulla kohtalaiset, puolipilvistä ja poutaa, mutta aamupäivällä sää muuttui pilviseksi ja ajoittaiseksi räntäsateeksi. Kuvaamiseen kului noin kolme tuntia aikaa. Rakennus kierrettiin kolmeen kertaan ja kuvaaminen suoritettiin kahdella eri kameralla. Suurimpana haasteena kuvaamiselle oli rakennuksen vierustalla sijainneet suuret männyt, jotka peittivät osan rakennusta tietyistä suunnista kuvattaessa, sekä takapihan pajukko. Näiden lisäksi etupihan katokselliset pyörätelineet sekä kesken kuvauksen etuovelle pysäköity auto aiheuttivat katveja ja viivästystä. Varsinkin rakennuksen takaa suoritettu kuvaaminen oli haastavaa, koska kasvillisuus ja lumihanki hankaloittivat kameran kanssa liikkumista ja käytännössä estivät sopivan kuvasetäisyyden saavuttamisen. Tämä johti siihen, että rakennuksen takaa otetut kuvat jouduttiin kuvaamaan lähietäisyydeltä ja ylempien kerrosten sekä räystäään näkymiseksi jouduttiin takaseinä kuvaamaan kahden kerroksen viipaleina. Tästä johtuen kuvauskulma ylimpiin kerroksiin on melko jyrkkä ja aiheuttaa lievää perspektiivivääristymää ja parallaksivirhettä kuviin.

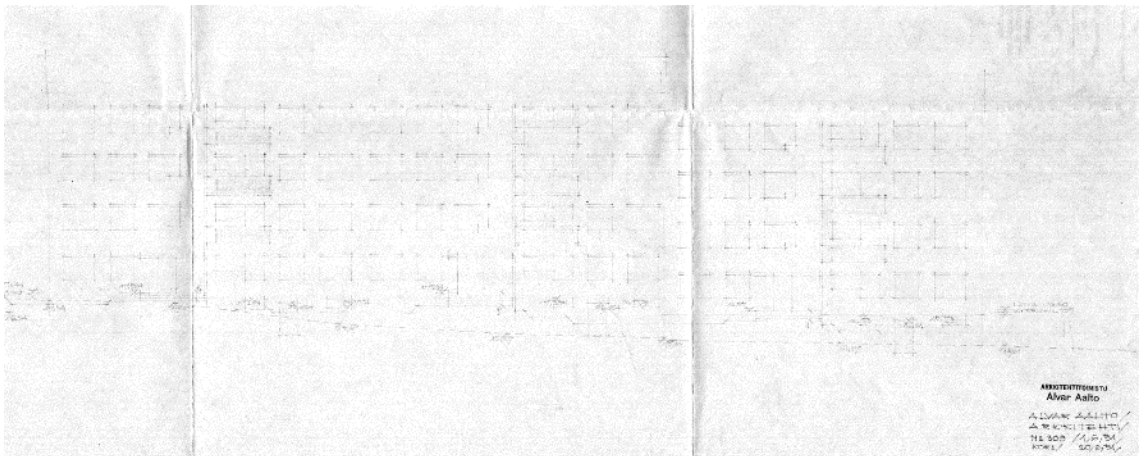
Kohteesta otettiin kaiken kaikkiaan 609 valokuvaa, joiden yhteenlaskettu koko on 3,75 gigatavua. Ensimmäisellä kuvauskierroksella Olympus TG-4 kameran apertuuri säädettiin mahdollisimman pieneksi ja ISO-arvo asetettiin arvoon 400, kuvan syvyysalueen maksimoimiseksi ja kohinan minimoimiseksi. Kuvauksen jälkeen todettiin, että kuvista tuli liian tummia. Toisella kuvauskierroksella käytettiin kameran automoodia, missä kamera pyrkii itse säätämään kuvausparametrit valaistuksen ja etäisyyden suhteen optimaaliseksi. Lopuksi kuvaus suoritettiin vielä Nikon järjestelmäkameralla.

Kuvassa 37 on esitetty valokuvat pilottikohteen joka nurkalta. Ylärivillä vasemmalla on rakennuksen itäkulma ja oikealla pohjoiskulma. Länsikulma on vasemmalla alhaalla ja eteläkulma oikealla alhaalla.



Kuva 37 Kuvattu pilottikohde.

Kuvassa 38 on Oulun kaupunginarkistosta saatu alkuperäinen Alvar Aallon tekemä julkisivupiirustus pilottikohteesta. 66 vuotta vanha piirustus on pahoin haalistunut. Sekä rakennuksen ääriiviivat, että mittatiedot ovat muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta täysin lukukelvottomia. Ainoa selkeästi luettavissa oleva kohta on oikeassa alanurkassa oleva arkkitehtitoimiston leima sekä tekijän nimi.



Kuva 38 Alvar Aallon julkisivupiirustus kesäkuulta 1951

Valokuvauksen aikana paikalla oli henkilönostin, koska kohteeseen suoritettiin julkisivujen ja parvekkeiden kuntotutkimus. Aluksi oli ajatus, että henkilönostimen avulla saadaan valokuvattua myös kohteen katto ja räystäät, mutta tämä osoittautui epäkäytännölliseksi. Tutkimuksia varten henkilönostimen korin on oltava aivan

rakennuksen seinässä kiinni, eikä valokuvien kunnollinen rajaaminen silloin ole mahdollista. Jotta katon ja räystäiden kuvaaminen onnistuisi, pitäisi nostinta kuljettaa noin kymmenen metrin etäisyydellä rakennuksesta ja suorittaa toistuvia sivuttaissiirtymiä. Käytännön syistä henkilöstönostin ei ole soveltuva apuvälineen fotogrammetriseen valokuvaamiseen.

Yksi mahdollinen ja mielenkiintoinen apuväline olisi ollut valokuvaukseen tarkoitettu drone. Nykyisillä kuvan- ja lennonvakautusjärjestelmillä varustetulla dronella voi kuvata HD-tasoisia videoita sekä valokuvia. Drone olisi todennäköisesti tarjonnut ratkaisun moneen rakennuksen tasalta suoritettujen valokuvauksen yhteydessä eteen tulleeseen ongelmaan. Dronen avulla olisi voitu kuvata kohde samalta etäisyydeltä koko rakennuksen ympäri ja kuvien limittäminen olisi ollut helpompaa. Kohde oltaisiin voitu kuvata ylhäältä päin, mikä olisi mahdollistanut myös kohteen katon mallintamisen.

Kuvassa 39 vasemmalla on Yuneec H520 ja oikealla DJI Phantom 4 Pro drone. Molempien hinta on hieman alle 2000 euroa. H520 erikoisuutena on sivulle nousevat laskutelineet, mikä mahdollistaa 360° kuvaamisen. Molempien ominaisuuksiin kuuluu törmäyksen välttö, GPS, automaattinen kotiin paluu ja kuvan vakautus sekä puolen tunnin lentoaika. (Yuneec Typhoon 2017, Phantom 4 Pro 2017).



Kuva 39 Yuneec H520 ja DJI Phantom 4 Pro dronet.

6.3 3D-mallin luominen pilottikohteesta

Alkuperäistä kuvamateriaalia käyttämällä kohteen 3D-mallintaminen epäonnistui. Remake ei pystynyt luomaan kuvista onnistunutta mallia; etu- ja takaseinät näkyvät mallissa haamukuvina päällekkäin ja toinen päätyseinä puuttuu kokonaan. Seuraavaksi kokeiltiin syöttää samat valokuvat PhotoScan ohjelman demo versioon (kokeilulisenssi on jo umpeutunut).

PhotoScan ohjelman hyviin puoliin kuuluu se, että siinä voi karsia mallinnettavia kuvapisteitä vähemmäksi, jolloin esimerkiksi kuvissa näkyvät puut voidaan poistaa pistepilvestä ennen mallinnusta. Tämän karsinnan jälkeen PhotoScan pystyi luomaan tyydyttävän 3D-mallin.

PhotoScan ohjelman huonona puolena on vielä mainittava se, että mallinnus suoritetaan lokaalisti omalla koneella, eikä pilvipalveluna. Tämän johdosta suositeltava RAM muistin määrä on 64 GB. Mallinnukseen käytetyssä kannettavassa tietokoneessa muistia on 16 GB, minkä vuoksi tiheennetyn pistepilven luominen kesti noin 7 h ja teksturoidun mallin luominen vielä 3 h lisää. Koska kyseessä on demo versio, ei mallia voinut tallentaa ja näin ollen se tuhoutui heti kun ohjelma suljettiin. Kuvassa 40 on kuvakaappauksia tästä PhotoScan ohjelman 3D-mallista.



Kuva 40 PhotoScan ohjelman 3D-malli.

Mallissa on vielä selkeitä puutteita. Esimerkiksi parvekekaiteet ovat vääristyneet ja katto puuttuu kokonaan. Mallissa hyvin onnistuneita kohtia on mm. päätyseinät ja ikkunat, ottaen huomioon kuinka haastavaa läpinäkyvien pintojen mallintaminen on. Mallin mahdollisuudesta tuottaa mittatarkkoja tietoja on käsitelty seuraavassa kappaleessa.

Epäonnistuneen mallinnuksen johdosta, valokuvaus päätettiin suorittaa uudelleen. Toisella valokuvauskerralla takaseinä signaloitiin numeroiduilla A4 paperiarkeilla ja kuvaaminen pyrittiin suorittamaan kauempaa. Tämän johdosta kuviin tuli enemmän puustoa ja pajukkoa mukaan, mutta takaseinä saatiin paremmin näkyviin ja sivuttaissiirtymät limitettyä osuvammin. Signalointi auttaa myös kuvaajaa valokuvien

rajaamisessa sivuttaissiirtymiä tehdessä. Katvealueet saatiin kuvattua toisella lähempää suoritettulla valokuvauskierroksella. Tällä kertaa valokuvien lukumääräksi tuli 340, joista valittiin 250 (maksimi määrä valokuvia yhteen projektiin Remake ohjelmassa) parhaiten onnistunutta kuvaa. Nämä uudet valokuvat syötettiin sekä PhotoScan, että Remake ohjelmiin.

Uusien valokuvien mallintaminen Remake ohjelmalla ei onnistunut paljon ensimmäistä yritystä paremmin. Molemmat päätyseinät jäivät puolikkaiksi ja takapihalla oleva mänty mallintui haamukuvana takaseinään. 3D-malli jäi edelleenkin niin puutteelliseksi, ettei sitä voinut käsin korjata ohjelman työkaluilla. Niillä alueilla missä mallinnus onnistui, kuvan laatu on hyvä. Valitettavasti Remake ei anna minkäänlaista palautetta epäonnistuneeseen mallinnukseen johtaneista syistä, mutta todennäköisesti valokuvissa näkyvät puut ja pajukko sotkevat kyseisen algoritmin toimintaa. Mahdollisesti myös tilan ahtaudesta johtuva viistosti suoritettu valokuvaus aiheuttaa ongelmia. Kuvassa 41 ylhäällä on näytteitä epäonnistuneista päädyistä sekä puun tuottamasta haamukuvasta. Alaosassa näkyy signalointiin käytettyjä numeroituja A4-papereita ja haamupajukkoa oikeassa reunassa.



Kuva 41 Pilottikohteen 3D-malli Remake ohjelmalla.

PhotoScan onnistui mallinnuksessa tällä kertaa paljon paremmin. Toisella kuvauskerralla paistanut aurinko sai aikaan näyttävät varjot talon pätyyn. PhotoScan olisi pystynyt tuottamaan valokuvista vielä tarkemman mallin, mutta laskennan raskaudesta ja hitaudesta johtuen mallinnuksessa käytettiin vain keskitason laatua. Siitä huolimatta tihennettyyn pistepilveen tuli yli 11 miljoonaa pistettä ja texturoituun malliin yli 730 000 kolmiota. Kaukaa katsottuna malli näyttää hyvälle, mutta lähelle zoomattaessa kuva rakeutuu pahasti. Kuvassa 42 on kuvakaappaukset PhotoScan ohjelman tuottamasta 3D-mallista.



Kuva 42 Pilottihankkeen 3D-malli PhotoScan ohjelmalla.

6.4 3D-mallin tarkkuus ja siitä saatavat mitat

Alun perin mallintaminen oli tarkoitus suorittaa Remake ohjelmalla, mutta koska se ei useasta yrityksestä huolimatta onnistunut, jouduttiin siirtymään PhotoScan ohjelmaan. Remake tarjoaa mahdollisuuden skaalata malli tiedettyjen mittojen avulla. Valitettavasti tämä ei ole mahdollista PhotoScan ohjelman demo versiossa. Manuaalisen skaalauksen puuttuessa joudutaan tyytymään ohjelman alkuperäiseen arviointiin kohteen mittasuhteista. Kohteesta otettiin muutamia mittoja laseretäisyysmittarilla, joita vasten voidaan tarkastaa mallista saatavan mittadatan luotettavuus.

Taulukossa 5 on esitetty laseretäisyysmittarilla (LEM) otetut mitat, mallista saadut mitat sekä niiden suhde ja mittavirhe. Malli antaa toistuvasti tosielämää pienempiä arvoja, mutta ne ovat todella tarkasti samassa suhteessa LEM arvojen kanssa. Koska LEM arvojen ja mallista tuotettujen arvojen suhde on toistuvasti sama (keskiarvo 0,887), voidaan mallista otetut mitat kertoa suhteesta johdetulla korjauskertoimella, jolloin päädytään hyvin lähelle todellisia mittoja. Korjauskerron ϵ voidaan ratkaista ylläolevasta suhteesta, jolloin sen arvoksi tulee $\epsilon = 1,13$. Näin ollen mallista voidaan mitata esimerkiksi etupihalle antavien ikkuna-aukkojen koko $1,13(161 \times 142) = 182 \times 160,5$ cm tai tuuletusparvekkeiden pinta-ala $1,13(3,22 \times 1,04) = 3,64 \times 1,18$ m = 4,28 m².

Taulukko 5 Skaalaamattoman 3D-mallin mittatarkkuus.

Mitattu kohde	LEM [cm]	Malli [cm]	Malli/ LEM	Mittavirhe [%]
Etuoven korkeus	213	189	0,887	11,3
Nurkasta pieliseinään	938	831	0,886	11,4
Päätyseinän pituus	1088	965	0,887	11,3
Kellarin ikkunan leveys	136	121	0,890	11,0
Kellarin oven leveys	106	94	0,887	11,3

Korjauskertoimen määrittämisen jälkeen 3D-mallista voidaan mitata kaikki lineaariset ominaisuudet, kuten ikkunoiden keskinäinen etäisyys tai parvekkeiden korkeusasemat. Pienellä trigonometrisellä vaivannäöllä voidaan mallista myös määrittää esimerkiksi harjan kaltevuus.

Todella tarkkojen mittojen ottaminen mallista ei onnistu luotettavasti, koska mittapisteiden tarkan paikan määrittäminen vaikeutuu mitä lähemmäksi mallia zoomaa. Esimerkiksi ikkuna-aukon reunat ovat mallissa hieman vääristyneet ja sumeat, jolloin mittapisteen asettamiseen tulee pientä epätarkkuutta. Toisaalta tilanteesta riippuen, millimetritarkkuuteen ei ole tarpeellista päästäkään.

Korjauskertoimella korjatut mitat ovat 0,27 % tarkkuusluokassa. Tähän lukuun päädyttiin, kun vertailtiin korjauskertoimella kerrottuja mallin mittoja useisiin LEM:llä mitattuihin arvoihin. Esimerkiksi kerrostalon pitkää seinää mitattaessa, mallista saadaan mittapisteiden sijaintia vaihtamalla lopputulokseksi $37,60 \text{ m} \pm 3 \text{ cm}$. Kun tähän vielä lisätään 0,27 % epävarmuus on lopullinen mittaustulos $37,60 \text{ m} \pm 13 \text{ cm}$. Tämän mittaluokan tarkkuus on täysin riittävä, kun lasketaan esimerkiksi kohteeseen kuluvia työ- ja materiaalimenekkejä.

Lyhyempiä etäisyyksiä tai mittoja tarkasteltaessa mittauspisteiden sijainnin valinnalla on suurempi merkitys, kuin 0,27 % mittaasepävarmuudella. Esimerkiksi takaseinien signalointiin käytettyjen A4 paperiarkkien mitat ovat tiedossa millin tarkkuudella, mutta zoomatun kuvan rakeisuus aiheuttaa mittaan epävarmuutta. Mallista mitatut luvut vaihtelevat 189 mm ja 203 mm välillä. Näiden lukujen keskiarvo 196 mm poikkeaa A4 paperin leveydestä ($210 \text{ mm} - 196 \text{ mm}$) = 14 mm.

Näiden tulosten perusteella mallia voi kuvata mittatarkaksi. Mallista saatavien mittojen tarkkuus riittää loistavasti materiaali- ja työmenekkien sekä purkumäärien laskemiseen. Valitettavasti mallin rakeisuudesta johtuva noin 3 senttimetrin epätarkkuus aiheuttaa rajoittavan tekijän lyhyiden mittojen osalle. Pitkien mittojen, esimerkiksi seinien kohdalla, 0,27 % mittaasepävarmuus aiheuttaa lisää epätarkkuutta, mutta edelleen pysytään noin kymmenen senttimetrin tarkkuudessa. Kaiken kaikkiaan mallista saatavat mitat ovat johdonmukaisia, skaala pysyy samana ja näin ollen mitat ovat luotettavia.

PhotoScan pystyisi tuottamaan vielä tarkemman mallin, mutta kuten aikaisemmin todettiin, mallin tarkkuudesta jouduttiin tinkimään laskentatehon ja ajan säästämiseksi.

7. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutkia fotogrammetriaa ja kuvantunnistustekniikkaa sekä selvittää voisiko niiden pohjalta tuottaa korjausrakentamiseen uusia työkaluja. Päätaavoitteena oli pilottihankkeen yhteydessä osoittaa, että fotogrammetriaan perustuva 3D-mallintaminen pystytään ottamaan käyttöön WSP:n korjausrakennusyksikössä. Kaikki yllämainitut tavoitteet saatiin suoritettua.

Diplomityön aikana tutkittiin fotogrammetriaa teknologiana ja todettiin, että sillä on hyvät edellytykset tuottaa mittatarkkoja 3D-malleja. Kaupallisia fotogrammetria ohjelmistoja testattiin neljä kappaletta. Niistä PhotoScan ja Remake nousivat esiin ominaisuuksiensa ja 3D-mallinnusten onnistumisten myötä. Lopulliseksi pilottihankkeen 3D-mallinnusohjelmaksi valittiin Remake, joka useista yrityksistä huolimatta epäonnistui luomaan toimivaa 3D-mallia pilottikohteesta otetuista valokuvista.

Kuvantunnistustekniikoita tutkittaessa todettiin tietokoneavusteisen hahmontunnistuksen olevan todella haasteellista. Vuosikymmenien kehitystyöstä huolimatta hahmontunnistusta ei ole onnistuttu tekemään yleispäteväksi. Kuvantunnistusohjelmistot ovat aina tapauskohtaisia ja kyseiseen tehtävään kehitettyjä. Näin ollen siitä ei myöskään ole testaukseen soveltuvia kaupallisia ohjelmistoja saatavilla.

Minnesotan yliopistossa kehitettyä automaattista halkeamien tunnistusohjelmaa ACDT:ä kokeiltiin muutamien valokuvissa esiintyvien halkeamien tunnistukseen, mutta tulokset eivät olleet kovin rohkaisevia. Tämän lisäksi ACDT on hidas ja hankalakäyttöinen, eikä sellaisenaan sovellu WSP:n korjausrakentamisyksikköön käytettäväksi. Jatkokehittynä sitä voitaisiin mahdollisesti soveltaa esimerkiksi julkisivurappauksen kopokartoituksen yhteydessä tehtävän vauriokartan luomisessa. Julkisivu valokuvataan joka tapauksessa kuntotutkimuksen yhteydessä ja halkeamat merkataan julkisivupiirustukseen. Valokuvien syöttäminen ACDT:n kaltaiseen halkeamien tunnistusohjelmaan voisi nopeuttaa ja helpottaa vauriokartan luomista, mikäli ohjelman käyttörajapinta saataisiin tehtyä helppokäyttöiseksi ja ohjelman ulostulo käsittäisi koko julkisivun eikä vain yksittäistä valokuvaa.

Diplomityön päätaavoitteena oli tuottaa WSP:n korjausrakentamisyksikölle edellytykset ottaa käyttöön fotogrammetriaan perustuva 3D-mallinnustyökalu. Tämä tavoite saavutettiin useiden epäonnistumisten jälkeen. Pilottikohteen 3D-mallintaminen epäonnistui siihen tarkoitettulla Remake ohjelmalla, mutta se saatiin onnistuneesti mallinnettua PhotoScan ohjelmalla. Pilottikohteen valokuvauksen yhteydessä törmättiin moneen käytännön ongelmaan.

Suomen kevään vaihteleva ilmasto aiheutti valokuvaukselle hyvin haastavat olosuhteet. Valokuvaus suoritettiin kahteen kertaan, joiden aikana satoi lunta ja räntää, paistoi aurinko ja oli pilvistä. Sääolosuhteista aiheutuvat ongelmat ovat hetkellisiä, mutta viereisistä rakennuksista ja puustosta aiheutuva ahtaus ovat pysyvä ongelma. Tilanpuute aiheuttaa valokuvaukseen rajoitteita, joita on toisinaan mahdoton kiertää. Lumihanki, viereiset rakennukset sekä kasvillisuus pakottivat kameran liian lähelle julkisivua, mikä aiheuttaa jyrkkiä kuvauskulmia sekä vinoon suoritettua valokuvaamista. Tämä taas aiheuttaa ongelmia fotogrammetriaohjelman algoritmeille ja virheitä lopulliseen 3D-malliin. Tämä ongelma voitaisiin mahdollisesti välttää käyttämällä valokuvauksessa drone-lennokkeja. Dronen vaikutusta valokuvauksen suorittamiseen sekä 3D-mallinnuksen laatuun olisi hyvä tutkia.

Pilottikohte saatiin haasteista huolimatta lopulta onnistuneesti mallinnettua. 3D-mallista tuli vähintäänkin tyydyttävän näköinen ja ennen kaikkea mittatarkka. Siitä voidaan mitata mm. julkisivujen pituudet, ikkunoiden sijainnit ja suuruus sekä parvekkeiden asema ja koko. Mittatarkkuuden suhteen malli on tarkka ja mittaustulokset ovat johdonmukaiset. Mallista saatavien mittojen mittatarkkuus rajoittuu lyhyillä etäisyyksillä kuvan rakeisuudesta johtuen noin kolmeen senttimetriin. Pidempiä mittoja otettaessa mittapisteiden valinnasta johtuvaan epätarkkuuteen tulee lisätä vielä noin 0,27 % mittaepävarmuus. Näiden tulosten nojalla mallista saatavien mittojen avulla voidaan riittävällä tarkkuudella laskea esimerkiksi kohteen materiaali- ja työmenekkejä.

Fotogrammetriaan perustuvaa 3D-mallintamista voidaan tämän tutkimuksen nojalla hyödyntää kohteen visuaaliseen esittelyyn sekä mittaamiseen. 3D-mallin luomiseen kuluu aikaa noin 1-2 työpäivää. Tämä sisältää sekä kohteen valokuvaamisen, että mallintamisen. Mallintamiseen liittyy kuitenkin pieni epävarmuus 3D-mallin onnistumisesta. Mallinnuksen onnistumiseen vaikuttaa valokuvien laatu sekä kohteessa mahdollisesti esiintyvät vaikeasti mallinnettavat ominaisuudet. Edellä mainituista haasteista huolimatta pilottikohteesta tehty 3D-malli osoittaa, että diplomityölle asetettu päätavoite on saavutettu.

LÄHTEET

Atkinson K. 2001. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Department of Geomatic Engineering. University College of London. 371 sivua.

Agisoft 2016. Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.2. 103 sivua. Viitattu 07.02.2017. Saatavilla: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf

Akinci B, Fieguth P, Georgieva K, Kasireddy V, Koch C. 2015. A review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure. Advanced Engineering Informatics. 15 sivua.

Basily B, Dana K, Gucunski N, La H, Lim R, Parvardeh H, Prasanna P. 2016. Automated Crack Detection on Concrete Bridges. IEEE Transaction on automation science and engineering Vol. 13, No 2. 9 sivua.

Boldischar M. 2012. Automated Crack Detection Tool. University of Minnesota, USA. (Viitattu 20.03.2017) Saatavissa: <https://nees.org/resources/acdt>

BY42 Betonijulkisivujen kuntotutkimus 2013. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki. 163 sivua.

BY41 Betonirakenteiden korjausohjeet 2007. Suomen Betoniyhdistys r.y. Helsinki. 110 sivua.

Dare P, Hanley H, Fraser C, Riedel B, Niemeier W. 2002. An Operational Application of Automatic Feature Extraction: The Measurement of Cracks in Concrete Structures. 12 sivua.

Duda R, Stork D, Hart P. 2001. Pattern Classification 2nd edition. New York USA. 654 sivua.

Foster S, Halbstein D. 2014. Integrating 3D Modeling, Photogrammetry and Design, Rochester Institute of Technology, NY, USA. 104 sivua.

Fraser Clive. 2015. What is Photogrammetry. (Viitattu 16.02.2017) Saatavissa: <http://www.qualitydigest.com/inside/metrology-article/070115-what-photogrammetry.html>

Gruen A., Huang. T.S. (2001). Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision. 235 sivua.

Eriksson, R., Gussander, J-E., Junnonen, J-M., Lukin, E., Nenonen, S., Nissinen, S., Saarinen, J. (2014). Korjausrakentaminen – palveluja ja teollista toimintaa. Tekesin ohjelmaraportti 4/2014, Helsinki. 68 sivua.

Haavisto, I. 2013. Tietomallintamien korjausrakentamisen rakennesuunnittelussa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos, Rakennesuunnittelu. 85 sivua.

Harju M, 2015. Betonijulkisivun kuntotutkimus. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. 43 sivua.

Hietala M, Huovari J, Kaleva H, Lahtinen M, Niemi J, Ronikonmäki N-M, Vainio T. (2015). Asuinrakennusten korjaustarve. PTT raportteja 251, Helsinki. 86 sivua.

Honkanen M. 2016. Työkalu rakennusliikkeelle korjaushankkeiden vaativuuden arvioimiseen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustuotanto. Tampere. 102 sivua.

Jain A, Li S. 2011. Handbook of Face Recognition, second edition. Michigan State University USA. 699 sivua.

Komonen J. 2012. Betonilattioiden kutistuminen. BLY Betonilattiapäivä. Rakennusfysikaaliset asiantuntijapalvelut. 12 sivua.

Köliö A. 2016. Propagation of Carbon Induced Reinforcement Corrosion in Existing Concrete Facades Exposed to the Finnish Climate. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto. 147 sivua.

Lahdensivu, J. 2012. Durability Properties and Actual Detoriation of Finnish Concrete Facades and Balconies. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan osasto. Tampere. 117 sivua.

Lahdensivu, J. 2015. Alkalikiviainesreaktio Etelä-Suomen silloissa. Betoni-lehti artikkeli 3/2015. 5 sivua.

Lattanzi D, Miller G. 2014. Robust Automated Concrete Damage Detection Algorithms for Field Applications. American Society of Civil Engineers. 11 sivua.

Leivo M. 2000. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 2. Laadunvalvonta ja –varmistus. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, VTT Rakennustekniikka. 40 sivua.

Liikennevirasto. 2016. Liikenneviraston sillat 1.1.2016. Liikenneviraston sillaston rakenne, palvelutaso ja kunto. Helsinki. 176 sivua.

Luhmann, S. Robson, S. Kyle and J. Boehm. 2014. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging (Second Edition). De Gruyter, Berlin, Germany. 684 sivua.

Phantom 4 Pro 2017. (Viitattu 10.04.2017) Saatavissa: <http://www.dji.com/phantom-4-pro>.

Poole A., Sims I, St John D. 1998. Concrete petrography, a handbook of Investigative techniques. New York. 474 sivua.

Rajala, M. 2012. Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa 2. Lähtötilanteen mallinnus. 17 sivua.

Rakennusteollisuus RT, kuviopankki, Rakennustuotannon arvo 2015. (Viitattu 10.01.2017) Saatavissa: <http://www.rakennusteollisuus.fi/kuviopankki/>

Rakennusteollisuus RT:n suhdannekatsaus, syksy 2016

Rakennusteollisuus RT. 2017. Korjausrakentaminen. (Viitattu 10.01.2017) Saatavissa: <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Korjausrakentaminen1/>

Rakli ry. 2012. Kiinteistöliiketoiminnan sanasto, 2. laitos. Sanastokeskus TSK ry. Helsinki. 61 sivua.

RT 82-10604, Betonijulkisivut Korjausrakentaminen. (1996). Rakennustietosäätiö RTS. 16 sivua.

Salmenperä H. 2004. Fotogrammetria. Luentomoniste. Rakennustekniikan osasto, Tampereen teknillinen yliopisto. 136 sivua.

Stolt T. 2015. Korjausrakentamisen tietomallintaminen ja Tekla Structures -komponentit. Insinööriyö. Metropolia ammattikorkeakoulu, rakennustekniikan koulutusohjelma. 44 sivua.

Theodoridis S, Koutroumbas K. 2009. Pattern Recognition. Burlington MA USA. 961 sivua.

Tilastokeskus. Asuinkerrostalot lukumäärä 2015. PX Web Statfin tietokannat. (Viitattu 29.12.2016) Saatavissa: http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_asu_asas/050_asas_tau_105.px/?rxid=2182dbd3-3193-460c-9c93-81c8ee8505da

Tilastokeskus. 2013. Väestöennuste kunnittain 2012-2040. (Viitattu 03.01.2017) Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/julkaisut/tiedostot/julkaisuluettelo/yvrm_vaenn_2012-2040_2013_9843_net_p2.pdf

Valtiovarainministeriö. 2016. Rakentaminen 2016, Rakennusalan suhdanneryhmä. Valtiovarainministeriön julkaisu 7/2016. 24 sivua.

What-when-how. In Depth Tutorials and Information. Accurate and Detailed Image-Based 3D Documentation of Large Sites and Complex Objects (Digital Imaging) Part 1. (Viitattu 23.02.2017) Saatavissa: <http://what-when-how.com/digital-imaging-for-cultural-heritage-preservation/accurate-and-detailed-image-based-3d-documentation-of-large-sites-and-complex-objects-digital-imaging-part-1/>

WSP Finland Oy. Valokuvia projektiarkistosta.

WSP Finland Oy. 2016. Korjaustutkimuskohteesta kuvattua aineistoa, kuvannut RI Jarkko Huotari.

WSP Finland Oy. 2017. Elektronimikroskoopilla tuotettuja ohuthie kuvia, kuvannut geologi Pirkko Kekäläinen.

Yuneecc Typhoon 2017. (Viitattu 10.04.2017) Saatavissa: <http://yuneecc.uk/index.php/products/typhoon-h>