



Yksityiskohtien 3D-mallintaminen rakennusrestauroinnissa

Antti-Jussi Tulimaa

OPINNÄYTETYÖ
Elokuu 2024

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Talonrakennustekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Talonrakennustekniikka

TULIMAA, ANTTI-JUSSI:

Yksityiskohtien 3D-mallintaminen rakennusrestauroinnissa

Opinnäytetyö 49 sivua
Elokuu 2024

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin 3D-mallintamisen mahdollisuuksia rakennusrestaurointialan yritysten näkökulmasta. Opinnäytetyössä perehdyttiin mahdollisimman laajasti rakennusrestauroinnin tarpeisiin ja näihin tarpeisiin vastaaviin mallinnusmenetelmiin. Eri mallinnusmenetelmiä myös kokeiltiin käytännössä, sillä tietoa niiden käyttökelpoisuudesta rakennusrestauroinnissa ei ole ollut.

Rakennusrestauroinnin tyypillisiä mallinnustarpeita ovat dokumentointi, osavalmistus ja piirustusten laatiminen sekä 3D-mallien mahdollistamat visualisoinnit ja virtuaalitutkimukset. Mallinnusmenetelmistä vertailtiin 3D-skannausta ja piirremallinnusta.

Toiminnallisen opinnäytetyön tulos on kattava yleiskuva vanhojen rakennusten yksityiskohtien mallinnustarpeista, 3D-mallinnusmenetelmistä ja niiden sopivuudesta eri tilanteisiin. Kun perinteiselle käsityöalalle tuodaan uusia teknologioita, saattaa niiden valinta ja käyttöönotto olla vaikeaa. Näihin haasteisiin tämä opinnäytetyö tuo apua.

3D-mallinnusala kehittyy nopeasti, minkä ansiosta mallinnusmenetelmät ovat edullisempia ja helppokäyttöisempiä kuin koskaan aiemmin. 3D-mallinnus on jo nykyisellään käyttökelpoinen menetelmä rakennusrestaurointikohteissa, mutta se vaatii kiinnostusta uusista teknologioista kohtaan. Jatkotutkimuksena eri mallinnusmenetelmiä olisi syytä kokeilla aidoissa rakennusrestaurointikohteissa.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Building Construction

TULIMAA, ANTTI-JUSSI:
3D Modelling of Details in Building Restoration

Bachelor's thesis 49 pages
August 2024

The purpose of this thesis was to explore the possibilities of 3D modelling from the perspective of building restoration companies. The goal was to extensively explore the needs of building restoration and the modelling methods that address these needs.

First relevant literature was studied to understand the needs of building restoration. Then professionals were interviewed to find the use cases where 3D modelling could be used. Finally different modelling methods were practically tested, as there has been no prior information on their usability in building restoration.

Typical modelling needs in building restoration include documentation, part manufacturing and technical drawings, as well as visualisations. The modelling methods included 3D scanning and parametric modelling.

The result of the work was a comprehensive overview of the modelling needs for the details of old buildings, 3D modelling methods, and their suitability for different situations.

3D modelling is rapidly evolving, and its applications are constantly increasing as devices and software become more affordable and user-friendly. 3D modelling is already a useful method for building restoration projects, but it requires an interest in adopting new technologies. Introducing new technologies to a traditional field often makes the selection and adoption difficult.

Key words: building restoration, CAD, 3D modelling, 3D scanning

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	YKSITYISKOHDAT RAKENNUSRESTAUROINNISSA	8
	2.1 Yleistä yksityiskohdista	8
	2.2 Rakennusrestauroinnin tarpeet	9
	2.3 Käsityön merkitys	10
	2.4 Yksityiskohdat	12
	2.4.1 Listat	13
	2.4.2 Ikkunat ja ovet	13
	2.4.3 Helat	14
	2.4.4 Koristeet	14
	2.5 Materiaalit	15
	2.5.1 Puu	16
	2.5.2 Kipsi	19
	2.5.3 Metallit	20
	2.5.4 Muovit	21
	2.5.5 Liitokset	21
	2.6 Nykytilanne ja markkinat	22
	2.7 Tulevaisuuden näkymät	23
3	3D-MALLINNUS RAKENNUSRESTAUROINNISSA	25
	3.1 Yleistä 3D-mallinnuksesta rakennusrestauroinnissa	25
	3.2 3D-mallintamisen historiaa	25
	3.3 Yksityiskohtien dokumentointi	26
	3.4 3D-mallien perustyyppit	28
	3.5 Mallinnusmenetelmät	30
	3.5.1 3D-skannaus	30
	3.5.2 Piirremallinnus	32
	3.5.3 Profiilien mallinnus	35
	3.6 Laitteistovaatimukset	40
	3.7 Ohjelmistot	41
	3.8 Tiedostomuodot	41
	3.9 Eri menetelmien vaikeus ja kustannukset	43
	3.10 Mallinnusmenetelmien vertailu	44
4	POHDINTA	46
	LÄHTEET	47

ERITYISSANASTO

3D

Kolmiulotteisuus. Kolmiulotteiset kappaleet projisoidaan usein kaksiulotteisiksi kuviksi kuvaruudulle tai paperille (TechTarget 2022).

3D-malli

Virtuaalinen geometrinen malli olemassa olevasta tai kuvitteellisesta kohteesta (Laakko 1998, 296). 3D-mallia voidaan katsella eri suunnista, mitata tai käyttää piirustusten tai valmistuksen lähtökohtana.

3D-mallintaminen

3D-mallin luominen tietokoneavusteisesti esimerkiksi 3D-skannaamalla tai piirremallinnuksella (Puhakka 2008, 429).

3D-skannaus

3D-mallin muodostaminen olemassa olevasta kappaleesta 3D-skannerilla eli 3D-lukijalla (Aniwaa 2021).

CAD "Computer Aided Design"

Tietokoneohjelmiston hyödyntäminen suunnitteluprosessin eri vaiheissa (Laakko 1998, 293).

Parametrinen malli

Piirremallinnuksessa käytetty malli, jonka ehtoja ja mittoja voi muuttaa siten, että myös geometria muuttuu (Laakko 1998, 33).

Piirremallinnus

Mittatarkka mallinnusmenetelmä, jossa mallinnettava kappale rakentuu mitoilla ja ehdoilla paikoitetuista geometrisista muodoista sekä niille suoritetuista toimenpiteistä (Laakko 1998, 57).

Pintamalli (surface model)

Pintamalli koostuu joukosta pintoja, jotka liittyvät toisiinsa viivojen ja pisteiden välityksellä (Laakko 1998, 304).

Polygonimalli (polygon mesh model)

Tietokonegrafiikassa käytettävä monikulmioista, yleensä kolmioista, muodostuva pintamalli (Puhakka 2008, 49).

Rakennuskonservointi

Rakennusten käsittelyä niin, että ne säilyvät entisellään (Vuolle-Apiala 2010, 55).

Rakennusrestaurointi

Rakennuksen korjaamista niillä menetelmillä, joita sen syntyaikoina käytettiin (Kaila, Vihavainen & Ekbohm 1987, 7).

Tilavuusmalli (solid model)

3D-malli, joka on täysin yksiselitteinen ja pyrkii olemaan täydellinen kappaleen kuvaus (Laakko 1998, 297).

1 JOHDANTO

Tämä työ käsittelee rakennusyksityiskohtien kolmiulotteista mallintamista rakennusrestauroinnin tarpeisiin. Tällaisilla yksityiskohdilla tarkoitetaan muita kuin runko-, seinä-, pohja- ja kattorakenteita. Esimerkkejä vanhojen rakennusten tyyppillisistä yksityiskohdista ovat profiililistat, ikkunat ja ovet heloineen, kaiteet, tikkaat, vesikourut, syöksytorvet, tulisijat sekä puu-, kivi- ja kipsikoristeet. Tässä työssä ei käsitellä rakennuksen ja rakennekerrosten mallinnusta kokonaisuutena. Siihen paremmin sopivia työkaluja ovat pistepilvet ja BIM-tietomallinnus. Rakennuksen yksityiskohdista saatua tarkkaa mallinnustietoa voidaan käyttää osana laajempaa rakennuksen tietomallia, mutta pääasiallinen tarve on historian tallettamisessa ja uusien osien kustannustehokkaassa valmistuksessa rakennusrestauroinnin yhteydessä.

Rakennusrestaurointi on edelleen hyvin käsityövaltaista työtä, sillä sitä on vaikea siirtää tuotantolaitoksiin tai automatisoida. Irrotettavia osia, kuten ikkunoita ja koristeita, kunnostetaan sarjatyönä restaurointialan yrityksissä. Aikansa yleisimpiä osia valmistetaan myös uustuotantona ja myydään erikoistuneissa rautakaupoissa. Nämä pienet yritykset ovat tämän opinnäytetyön kohderyhmä, sillä kohtuullisilla investoinneilla on nykyään mahdollista hankkia laitteita, jotka mahdollistavat kopioiden valmistamisen vanhoista osista. Näin eniten aikaa vievät vaiheet korvataan koneilla ja työn tuottavuutta voidaan parantaa. Koska laitteistot ja ohjelmistot kehittyvät jatkuvasti, niitä ei käsitellä kuin pintapuolisesti.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kartoittaa eri mallinnusmenetelmiä rakennusrestauroinnin näkökulmasta ja luoda yhteenveto eri tekniikoiden sopivuudesta eri tarpeisiin. Koska digitaalinen malli on yleensä vain välivaihe uutta osaa valmistettaessa, sivutaan opinnäytetyössä myös yleisimpiä materiaaleja ja valmistusmenetelmiä. Yhtenä tavoitteena on helpottaa rakennusrestaurointialan yritysten investointipäätöksiä, sillä pienillä yrityksillä ei yleensä ole resursseja selvittää kaikkia mallintamiseen liittyviä teknisiä asioita.

2 YKSITYISKOHDAT RAKENNUSRESTAUROINNISSA

2.1 Yleistä yksityiskohdista

Tässä opinnäytetyössä yksityiskohdilla tarkoitetaan pieniä rakennusosia, joilla on toisinaan vain visuaalinen tarkoitus, mutta usein myös toiminnallinen funktio. Yksityiskohdilla oli aiemmin suurempi merkitys rakentamisessa. Ne saattoivat olla tiettyyn rakennukseen arkkitehdin suunnittelemaa ja käsityöläisen valmistamia. Teollinen rakentaminen ja modernistisen arkkitehtuurin suosio 1930-luvulta alkaen on karsinut monet klassiset koristeaiheet ja monimuotoiset profiilit, mutta joka aikakaudella on omat tyypilliset – nykyään yleensä teolliset – rakennusosat, joilla on merkittävä vaikutus myös uudempien rakennusten tyyllisessä eheydessä.

”Jumala asuu yksityiskohdissa” oli modernistisen arkkitehtuurin pioneerin Ludwig Mies van der Rohen motto, joka korostaa yksityiskohtien merkitystä myös modernissa arkkitehtuurissa (Whitman 1969). Kun kaikki ylimääräinen koristelu on karsittu, jäljellejäävän merkitys vain kasvaa. Nykyään yhä useammin aidot vanhat rakennusosat ja materiaalit nähdään osana arkkitehtuuria. Ne kertovat menneiden polvien arvomaailmasta, työstä ja rakentamistavasta. (Putkonen & Mäkiö 2011, 78.)

Vain aito osa on tieteellisesti arvokas, mutta nykyään aidolla osalla ei aina tarkoiteta vain ensimmäiseen rakennusvaiheeseen kuuluvaa osaa, vaan myös rakennuksen pitkään historiaan kuuluvia muutoksia ja lisäyksiä (Kaila ym. 1987, 4). Aidot osat säilytetään mahdollisuuksien mukaan täysin alkuperäisinä ja ainoastaan säilyttävät eli konservoivat toimenpiteet ovat näille sallittuja (Lauttalammi, Lehtonen & Laine 2005, 14).

Rikkoutuneita rakennusosia, joihin on valmistettu uusia korjausosia, kutsutaan eheytyiksi osiksi. Tyypillisiä eheyttäviä osia ovat ikkunat ja ovet, joihin tehdään uusia korjausosia kuluneiden tilalle. (Vuolle-Apiala 2010, 55.) Mikäli joku osa on niin huonossa kunnossa, ettei sitä pystytä korjaamaan, se voidaan val-

mistaa kokonaan uudestaan. Tällaisia täysin uudelleenrakennettuja vanhojen rakennusosien kopioita kutsutaan lavasteiksi, kuvituksiksi tai illustraatioiksi. Usein rakennukseen tehdään puuttuvia osia eheän kokonaisvaikutelman vuoksi, jos alkuperäiset osat ovat tuhoutuneet tai korjauskelvottomia. Lavaste ei lisää rakennuksen tutkimuskohdearvoa, vaan niiden vuoksi joudutaan useimmiten poistamaan jotain aitoa. (Kaila ym. 1987, 4–7.)

2.2 Rakennusrestauroinnin tarpeet

Dokumentointi- ja inventointivaiheen merkitys rakennusrestauroinnissa on suuri ja uusi 3D-teknologia tarjoaa siihen uusia mahdollisuuksia. Tietomalliin voidaan liittää yksityiskohtaisia detaljeja, kuten tietoa alkuperäisistä osista, materiaaleista, mitoista ja pintakäsittelyistä tai kokonaisia rakennushistoriaselvityksiä. Laser- ja tietotekniikkaa käyttävä dokumentointi ja suunnittelu ovat yleistyneet 2000-luvulla myös korjausrakennuskohteissa (Lauttalammi ym. 2005, 12). Kattavalla tietomallilla on lukuisia käyttökohteita, sillä sitä voi käyttää korjaussuunnittelun lisäksi esimerkiksi virtuaalisiin tutkimuksiin ja virtuaalitodellisuudessa tehtäviin eri aikakausia esitteleviin visualisointeihin.

Jos ajatellaan yksityiskohtia tiukasti rakennuskonservoinnin kannalta, on tietoteknisesti luotu virtuaalinen 3D-malli saman arvoinen kuin fyysinen kopio alkuperäisestä osasta, sillä ainoastaan alkuperäisellä osalla on historiallista arvoa (Kaila ym. 1987, 4). Digitaalisessa muodossa oleva tarkka malli säilyttää jopa enemmän tietoa kuin fyysinen kopio.

Esimerkiksi vanhat koristeelliset ikkunat vaihdetaan toisinaan uusiin, kun tavoitellaan energiansäästöä ja kustannussyistä tyydytään vakioikkunoihin, jotka muuttavat rakennuksen ilmettä merkittävästi. Kun alkuperäiset ikkunat mallinnetaan, ne voidaan tallentaa digitaalisesti. Tämä mahdollistaa sen, että periaatteessa alkuperäisen kaltaiset ikkunat on mahdollista valmistaa myöhemmin uudestaan. Rakennusrestauroinnissa konkreettinen hyöty on mallien käyttö korjausosien tai puuttuvien osien täydentämisessä valmistamalla uusia osia yksittäiskappaleina tai pienimuotoisena sarjatuotantona.

2.3 Käsityön merkitys

Tietokoneavusteinen suunnittelu ja valmistaminen on otettu käyttöön kaikilla teollisuuden aloilla viimeistään 2000-luvulla (Puhakka 2008, 26). Nykyään 3D-mallintaminen ja -valmistaminen alkavat olla jo niin pitkälle kehittyneitä, että jopa yksittäisten osien valmistus on kustannustehokasta. Kuten arkkitehti Panu Kaila (1987) on kirjoittanut, koneella tehty ei korvaa käsityönä valmistettua kappaletta, mutta se on kompromissi kaupallisessa maailmassa. Vaikka käsityötä ihailaan, on raha rakentamista ja muuta kehitystä ohjaava realiteetti ja yhä useampi asia on vain pinnoitettu kulissi siitä mitä kuvittelemme sen olevan. (Kaila ym. 1987, 3.) Osaavan työvoiman vähyden ja taloudellisten syiden vuoksi on usein välttämättömyyttä lisätä koneiden käyttöä. Osaavien käsityöläisten väheneminen pantiin merkille jo 1970-luvun lopulla, kun Suomen museoliitto selvitti perinteisten ammattitaidon omaavien työntekijöiden saatavuutta rakennusosalalla (Kaila ym. 1987, 3). Pitää myös ottaa huomioon, että monet koristeelliset rakennusosat ovat olleet jo aikanaan teollisia massatuotanto-osia.

Koneella tehdyt, alkuperäisiä yksityiskohtia jäljittelevät kopiot, eivät sovi rakennuskonservointiin, mutta rakennusrestauroinnissa niille on paikkansa. Kailan (1987) mukaan ne ovat nähtävyyssikäytön, opetuksen ja kokonaisuuden eheyden kannalta tarpeellisia, sillä ilman lavastuksia historian kokeminen jäisi pelkäksi kuvaksi kirjatedoksi. Kaila on myös todennut, että aiemmin lavasteen tuli olla aina erotettavissa aidoista osista, mutta myöhemmin tästä ajatuksesta on luovuttu. Se johti käytännössä rakennusten häiritseviin ja kömpelöihin entistyyksiin, jotka eivät auenneet suurelle yleisölle. Uudet osat on kuitenkin aina syytä merkitä näkymättömään paikkaan vuosiluvulla, jotta niitä ei sekoiteta alkuperäisiin osiin. (Kaila ym. 1987, 4, 7.)

Käsityön osuus rakentamisessa on vähentynyt jo 1960-luvulta lähtien, kun rakennustekniikassa tapahtui suuri murros rakentamisen määrän ennätysmäisesti kasvavassa (Mikkola & Böök 2016, 27). Suurimmat vaikeudet ovat vanhojen työtapojen tietämisessä ja osaamisessa (Kaila ym. 1987, 7).

Vaikka koneella valmistettu alkuperäisen näköinen osa ei ole sama asia kuin käsityönä valmistettu osa eikä se voi sisältää samaa tunnetta, niin on se usein parempi kuin teollinen vakio-osa. Teollinen vakio-osa saattaa erottua muuten alkuperäisestä kokonaisuudesta ja vie huomion itse rakennuksesta. Esimerkiksi alkuperäisestä osasta 3D-mallinnettu ja tietokoneohjatulla jyrskoneella puusta työstetty koriste ei ole sama asia kuin käsityöläisen taltalla veistämä, mutta toisaalta käsityönä tehty korvaava osa ei sekään ole alkuperäinen. Ensisijaisesti tulisi kunnostaa alkuperäinen. Korjaukset ja patina saavat myös näkyä rakennuksissa. Ne ovat osa vanhaa rakennuskulttuuria, jossa rakennuksia siirrettiin, käyttötarkoituksia muutettiin ja rakennusosia muokattiin (Vuolle-Apiala 2010, 43).

Vanhoja kohteita kunnostetaan säilyttäen mahdollisimman paljon vanhaa sekä käyttäen alkuperäisiä materiaaleja ja menetelmiä mahdollisuuksien mukaan. Selkeitä rakennusta uhkaavia rakennusvirheitä korjataan, mutta lähtökohtaisesti alkuperäisiä ratkaisuja ei lähdetä muuttamaan (Kaila ym. 1987, 4, 7.) Rakennusrestauroinnissa käytetään nykyaikaisia työkaluja työturvallisuuden ja tehokkuuden vuoksi. Myös tietokoneohjatun työstön voi ajatella tehokkaana työkaluna, jolla korvataan kuluneita osia. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että koneella syntynyt jälki poikkeaa käsityönä tehdystä jäljestä yleensä jo leikkausnopeuden eron aiheuttaman erilaisen lastuamisen vuoksi (Mikkola & Böök 2016, 116). Koneella tehdyssä ei myöskään näy taitavan käsityöläisen yksilöllinen kädenjälki.

Arkkitehti Juha Ilonen kirjoittaa: ”Teknistyvässä puukulttuurissa käsityötaidosta tulee vähitellen kuriositeetti: korkeasti palkattujen huippuammattilaisten tekemää luksusta, katoavaa kansanperinnettä ja omatoimisten sisumiesten kotitarvelaji” (Kasvio & Mänttari 2005, 20). Käsityö on nykyään kallista, koska käsityöalat on ajettu ahtaalle ja toisaalta teollinen tuotanto on palkkakuluihin verrattuna tehostunut. Arvokkaimmissa kohteissa ei tule koskaan tyytyä vain kustannussyistä parasta huonompaan vaihtoehtoon. Tämä on tärkeää myös käsityöläistaitojen säilymisen vuoksi. Samaan aikaan kun käsityötä korvataan koneilla, on erittäin tärkeää säilyttää vanhat käsityötaidot hengissä, sillä käsityö on kulttuuriperintöä, joka ei säily pelkän arkistotiedon ja vanhojen työkalujen avulla (Kaila ym. 1987, 11).

2.4 Yksityiskohdat

Yksityiskohdilla tarkoitetaan pieniä rakennusosia, jotka on toisinaan myös mahdollista irrottaa rakennuksesta tutkimusta tai kunnostamista varten. Yksityiskohdat voivat olla puhtaasti koristeiksi suunniteltuja (kuva 1), mutta usein ne ovat rakennuksen toiminnan kannalta oleellisia toiminnallisia osia. Yksityiskohdan käsitteen ulkopuolelle jäävät kantavat rakenteet, pintamateriaalit ja rakennus kokonaisuutena, joita ei tyypillisesti mallinneta tässä kuvatuilla keinoilla, vaan valokuvaamalla, piirtämällä, pistepilvillä ja tietomalleilla. Vanhoissa rakennuksissa monet arkiset yksityiskohdat, kuten tikapuut, rännit ja syöksytorvet, saattavat olla käsintehtyjä ja siten dokumentoimisen ja säilyttämisen arvoisia. Yksityiskohtien kulta-aikaa oli jugend 1900-luvun vaihteessa, jolloin rakennukset tehtiin kokonaistaideteoksiksi ja taiteilijat loivat niihin runsaasti puuveistoksia ja muita koristeellisia yksityiskohtia (Vuolle-Apiala 2010, 17).



KUVA 1. Kipsistä valettuja pylväiden kapiteeleja (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

Oleellinen osa vanhaa rakennuskantaa ovat kiintokalusteet, jotka on valmistettu käsityönä kyseiseen kohteeseen (Vuolle-Apiala 2010, 128). Tyypillisiä kiintokalusteita ovat portaat kaiteineen, seinäpaneelaukset, komerot ja keittiön kalusteet

(Kaila ym. 1987, 78). Vanhoissa rakennuksissa on paljon erilaisia koristeellisia uuneja ja tulisijoja. Muita yksityiskohtia ovat esimerkiksi vellikellot, tuuliviirit ja painipuut sekä 1900-luvun alusta lähtien myös talotekniikkaan liittyvät sähköosat, ritilät ja muut metalliosat. (Vuolle-Apiala 2010, 34, 116, 160.)

2.4.1 Listat

Listaprofiileja mitataan sekä tutkimustarkoitukseen että restauroinnissa tarvittavien vanhan tyyppisten listojen valmistamiseksi. Listoja on käytetty perinteisesti peittämään rakenteiden saumoja. Funktionalistisen arkkitehtuurin myötä 1900-luvun alusta lähtien listat ovat vähitellen yksinkertaistuneet eleettömiksi vakioistoinniksi tai jätetty kokonaan pois, mutta aiemmin listat olivat puusepän yksilöllisesti käsihöylällä valmistamia. (Kaila ym. 1987, 78.)

Aikanaan arvokkaimmissa ikkunoiden karmeissa ja puitteissa oli pykälistä, kaarista ja keilauksista koostuva profilointi. Karmeissa ja puitteissa on joskus myös puusepäntehtaiden mallien mukaan valmistettuja veistettyjä koristemuotoja (Mikkola & Böök 2016, 39, 70.)

2.4.2 Ikkunat ja ovet

Ikkunoilla ja vuorilaudoilla on suuri merkitys talon ulkonäköön (Vuolle-Apiala 2010, 48). Ikkuna käsittää karmit, puitteet, vuorilaudoitukset ja ikkunapenkit sekä helat (Mikkola & Böök 2016, 18). Vanhojen ikkunoiden korjaamisessa alkuperäisten rakennusosien säilyttämistä ja korjaamista pidetään ensisijaisena vaihtoehtona, sillä ikkunaosien uusiminen aiheuttaa väistämättä yksityiskohtien vähene- mistä, joilla on merkittävä vaikutus sekä ulko- että sisätilojen ilmeeseen ja koko rakennuksen luonteeseen. Ikkunoiden kunnostukseen löytyy valmiita alapuitteita ja mallinnetun profiilin avulla on mahdollista myös teettää juuri alkuperäisen kal- taista profiilia esimerkiksi sadevedelle alttiin ulkopuitteen tippalistan korvaa- miseksi uudella korjausosalla. Vanhat ikkunat on yleensä valmistettu valikoidusta puutavarasta ja tehty korjattaviksi. (Vuolle-Apiala 2010, 105–106.)

Ulko-ovet ovat aina olleet rakennusten käyntikortteja ja niiden muotoiluun on panostettu. Usein ne ovat kuin taideteoksia ja ne ovat säilyneet hyvin, koska niitä on hoidettu huolellisesti. Puutapeilla kasatut ovet on mahdollista purkaa, korjata ja kasata uudestaan. Ovia mallinnettaessa on huomioitava paksut maalikerrokset, jotka pehmentävät muotoja ja vääristävät mittoja. (Vuolle-Apiala 2010, 102–104.)

2.4.3 Helat

Ovihelat ovat yleensä valettuja tai taottuja ja vanhimmat helat ovat usein uniikkikappaleita. Mikäli metallinen hela on paksujen maalipintojen peitossa, on maalikerrokset syytä puhdistaa mekaanisesti tai kemiallisilla maalinpoistoaineilla ennen mallinnusta ja kunnostusta. Vanhat lukot on suositeltavaa säilyttää omalla paikallaan, vaikka rinnalle asennettaisiin modernit lukot. Erilaisia saranamalleja on ollut paljon ja niiden korvaamista uusilla tulee välttää tyylillisen ristiriidan vuoksi. Uusien vastaavien saranoiden saatavuus on heikkoa. (Vuolle-Apiala 2010, 102.)

Ikkunahelat ovat usein vakio-osia ja useita tyyppejä on edelleen saatavissa rakennusrestaurointiin erikoistuneista yrityksistä. Vanhaa helaa, kuten ikkunan kulmarautaa, ei pitäisi irrottaa turhaan (Kaila ym. 1987, 79). Helat mallinnetaan puitteessa paikallaan tai niistä otetaan valokuvat ja tarkat mitat, joilla ne voidaan mallintaa jälkikäteen.

2.4.4 Koristeet

Koristeilla ei ole yleensä rakenteellista tehtävää ja koristeosien uusimista tulee välttää. Kuluneisuus on osa rakennuksen historiaa ja tavallisesti kuntoa voi kohentaa maalamalla (Kaila ym. 1987, 108). Koristeaiheita on usein kaiverrettu tai sorvattu puusta. Koristeita on tehty myös kipsistä, laastista ja kivistä.

Suomessa jugendin synty 1800-luvun lopussa lisäsi kiinnostusta taidekäsitteitä kohtaan myös arkkitehtuurissa. Yksilölliset, usein luontoaiheiset koristeaiheet

yleistyivät jugendin myötä. Rikas ornamentiikka ja aaltoilevat epäsymmetriset linjat ovat tyyllille ominaisia. Koristeita valmistettiin käsityöläismäisesti, mutta myös uutta teknologiaa alettiin kokeilla valmistuksessa. (Vallius 2011.)

1960-luvulla luovuttiin lähes kaikista yksilöllisistä ratkaisuista rakentamisessa, kun siirryttiin käsityöstä teolliseen rakentamiseen, moduulijärjestelmiin ja rakennusosien standardisointiin. Tässä yhteydessä jäivät pois vielä 1950-luvun rakentamisesta tutut persoonalliset yksityiskohdat. Rakennusosista tuli tuotteistettuja ja sertifioituja, keskenään kilpailevia merkkিতavaroita. (Kasvio & Mänttari 2005, 17.)

2.5 Materiaalit

Rakennusrestauroinnissa on tärkeää saada eri aikakausien rakenteet ja materiaalit toimimaan ja ikääntymään arvokkaasti (Lauttalammi ym. 2005, 5). Tästä syystä alkuperäisestä materiaalista ei tule korjausten yhteydessä poiketa ilman perusteltua syytä. Rohkeat materiaalikokeilut olivat tyypillisiä modernille arkkitehtuurille eivätkä ne aina osoittautuneet käytössä kestäviksi (Putkonen & Mäkiö 2011, 100). Tällöin materiaali voidaan korvata paremmin käyttötarkoitukseen sopivalla valmistusaineella. Joidenkin 1900-luvun alun varhaisten teollisten materiaalien kanssa törmätään vaikeuksiin, sillä alkuperäisiä materiaaleja ei ole enää saatavilla (Kaila ym. 1987, 11).

Mallintamisen kannalta materiaalilla ei ole juurikaan merkitystä, mutta kopioiden valmistuksessa käytettävä materiaali määrää yleensä valmistusmenetelmän. Mallinnettujen rakennusosien valmistaminen on usein mahdollista käyttäen alkuperäistä tai alkuperäisen kaltaista materiaalia. 3D-tulostaminen mahdollistaa muovin lisäksi metallin käytön ja CNC-koneistamalla voidaan valmistaa sekä metallisia että puisia osia.

2.5.1 Puu

Puu on kotimaisuutensa, hyvän saatavuutensa ja edullisuutensa ansiosta ollut Suomessa vanhin ja yleisin materiaali rakentamisessa (Kasvio & Mänttari 2005, 6). Siksi se sopii erittäin hyvin rakennusrestauroinnin materiaaliksi ja sen työstö onnistuu myös tietokoneohjatusti (kuva 2). Puu vanhenee harmaantumalla ja halkeilemalla, ja sen käyttöikä riippuu paljon olosuhteista. Puun tunnusomaisen vanhenemisen vuoksi tulisi suosia alkuperäistä materiaalia (Kaila ym. 1987, 7). Puu kuluu suojaamattomana pinnasta n. 5–7 millimetriä sadassa vuodessa (Kasvio & Mänttari 2005, 30). Säälle alttiit puuosat kuluvat väistämättä ennen rakennuksen rungon käyttökelpoisuuden päättymistä ja näille usein koristeosille nykyaikaiset valmistusmenetelmät tarjoavat mahdollisuuksia alkuperäisen mallin säilyttämiseen.



KUVA 2. 3D-mallista tietokoneohjatusti jyrstetty puukoriste (Kuva: Antti-Jussi Tuli-maa).

Liimatut, viilutetut ja sormijatketut puumateriaalit tulee erottaa yksiaineisesta puu-materiaalista. Vaikka uusissa käyttökohteissa tällaiset insinööripuutuotteet ovat järkeviä ja materiaalihukka pystytään minimoimaan, niitä tulee käyttää vain erityi-

sestä syystä vanhoissa rakennuksissa, koska niissä menetetään puun ominaisluonne eivätkä materiaalit vastaa alkuperäisiä. Liima ja koneohjattu työstö kertovat nykyajan teollisesta tuotannosta, kun taas massiivipuu ja käsityö toimivat linkkinä ihmisen ja luonnon välillä. (Kasvio & Mänttari 2005, 18.)

Vaikka puu on luonnollinen materiaali, se on myös erittäin tekninen materiaali (Kasvio & Mänttari 2005, 16). Puu muuttaa muotoaan, painuu, halkeilee, harmaantuu ja kuluu koko elinkaarensa ajan. Lisäksi eri puulajit ja kasvuolosuhteet vaikuttavat puun kestävyteen ja ominaisuuksiin. Puuta työstäessä on merkitystä myös sillä, mistä kohdasta tukkia ja mihin suuntaan kappale on sahattu. Kun puun kasvatusta on teollistunut ja käsittely teknistynyt, on kadonnut myös paljon perinnettä, jossa eri tarkoitukseen käytettiin tarkasti puun eri osia. Suomalaisista puulajeista kuusi ja männyn sydänpuu kestävät ilmastorasitusta parhaiten. (Kasvio & Mänttari 2005, 32.) Erityisesti säälle alttiita ja pieniä yksityiskohtia valmistettaessa tulee valikoida puumateriaali kohteen mukaan.

Puulaji tulee valita alkuperäisen materiaalin mukaan. Suomessa yleisimpiä puulajeja rakentamisessa ovat olleet mänty, kuusi ja koivu, mutta jonkin verran on käytetty myös haapaa, leppää ja pihlajaa. Ulkomailta on tuotu kovia puulajeja, kuten pyökkiä, tammea, saarnia, lehtikuusta, vaahteraa ja pähkinäpuuta. (Erho 2022.) Kovat tuontilajit tulevat kyseeseen erityiselle kulutukselle alttiissa yksityiskohdissa, kuten kaiteissa, kynnyksissä ja kahvoissa. Tammea on käytetty Suomessa yleisesti vanhoissa arvorakennuksissa sisätilojen yksityiskohdissa.

Puun heikoin kohta on sen oksa. Puu on epähomogeeninen materiaali, joten jokainen puupala käyttäytyy työstettäessä ja käytössä eri tavalla. Valitsemalla mahdollisimman hyvälaatuista puuta voidaan minimoida vaurioiden syntyminen työstettäessä tai myöhemmin käytössä. Epähomogeenisuuden vuoksi puuta työstettäessä täytyy varautua siihen, että jokainen työstettävä kappale ei onnistu.

Mänty (*Pinus sylvestris*) on vähäoksaisuutensa ansiosta yleensä kuusta parempi materiaali työstettäväksi. Kotimaisista havupuista paras materiaali yksityiskohtiin on hitaasti kasvanut tiheä, vähäoksainen ja vähäpihkainen sekä kuiva, puhdas ja ehjä mänty. Laatuluokan tulisi olla vähintään A4 ja kosteuspiitoisuuden korkeintaan 15–18 prosenttia. (Kasvio & Mänttari 2005, 32.) Nykyään tällaista puuta on

vaikea löytää, koska teollinen puutuotanto pyrkii nopeaan kasvuun. Puuinfo suosittelee puusepäntuotteisiin, koriste-esineisiin ja listoihin vain parhaita männyn tyvitukista sahattuja US I ja US II laatuluokkia (Puuinfo 2020).

Kuusta (*Picea abies*) käytetään rakennuspuutavarana rinnan männyn kanssa, mutta kuusi on haastavampi materiaali yksityiskohtien kannalta, sillä kuusessa on paljon pieniä oksia ja se on mäntyä sitkeämpää. Kuusi imee kosteutta huommin kuin mänty, joten sen kosteuskestävyys on mäntyä parempi. (Erho 2022.)

Rauduskoivu (*Betula pendula*) on havupuita tiheämpää, ja tasa-aineisena sitä on helppo työstää ja pintakäsitellä. Se on käsittelemättömänä väriltään vaalea ja oksaton. Koivu on kestävä ja sitkeä puulaji, joka soveltuu hyvin työstöön ja yksityiskohtiin. Koivu on perinteinen materiaali huonekaluteollisuudessa ja pintaverhoiluissa. (Erho 2022.)

Haapa (*Populus tremula*) on ainoa poppeliin suvun luonnonvarainen laji Suomessa ja sen käyttö yksityiskohdissa on hankalaa, sillä se on kevyt ja pehmeä puulaji, jonka hiominen ja kiillottaminen on vaikeaa. Sen kosteuseläminen on pientä, mutta se sinistyy helposti. (Erho 2022.)

Suomessa kasvavat leppälajit, tervaleppä (*Alnus glutinosa*) ja harmaaleppä (*Alnus incana*), ovat kevyitä ja pehmeähköjä, mutta suhteellisen lujia puulajeja. Lujana ja tasasyisenä puulajina leppä on helppoa työstää ja sen kosteuseläminen on vähäistä. Leppää käytetään enimmäkseen sorvaus- ja koristeveistoon, mutta se sopii hyvin myös koneellisesti jyrättäväksi. (Erho 2022.)

Ulkomailta tuotavat kovat puulajit, kuten pyökki ja tammi, sopivat hyvin työstettäväksi ja kestävät erittäin hyvin käyttöä. Kovilla puulajeilla on taipumuksena kuivessaan kieroutua ja halkeilla, eikä niiden säänkesto ole kotimaisten puulajien tasolla (Erho 2022).

2.5.2 Kipsi

Muottiin valettu kipsi on ollut erityisesti ennen 1900-lukua suosittu koristemateriaali sekä ulko- että sisätilojen koristeissa. Kipsi on ulkotiloissa alttiina säärasitukselle, minkä vuoksi vanhat koristeet on yleensä uusittu jossain vaiheessa. Koristeita uusittaessa on usein menetetty koristeen pienet yksityiskohdat. (Kokkonen 2023.)

Kipsikoristeet valetaan yleensä fyysisen muottimallin päälle valmistetun silikonimuotin avulla. Hyväkuntoista alkuperäisosaa voi käyttää muotin mallina, mutta alkuperäinen osa saattaa olla niin huonossa kunnossa (kuva 3), että ensin on valmistettava alkuperäistä kappaletta apuna käyttäen täysin uusi muottimalli. Muottimallit ovat perinteisesti olleet käsin muotoiltuja, mutta ne voivat olla myös koneellisesti valmistettuja. Materiaalilla ei ole merkitystä, kunhan sen päälle voidaan tehdä silikoninen valumuotti. (Kokkonen 2023.)



KUVA 3. Ulkoseinästä irrotettu kulunut kipsikoriste (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

3D-tulostuksen hyödyntäminen mahdollistaa myös monimutkaisten muottien edullisen ja nopean valmistamisen. Silikonista 3D-tulosteen päälle tehty muotti

on helppo valmistaa ja antaa hyvän toiston kipsivaluihin. 3D-tulostamisen käyttäminen muottivalmistuksessa mahdollistaa muottien helpon räätälöinnin ja jopa 0,2 millimetrin tarkkuuden. (Alonen & Mäkelä 2018.) 3D-tulostus nopeuttaa muottivalmistusta erityisesti suurempia sarjoja tehtäessä. Kipsiä on käytetty myös säännöllisinä toistuvissa muodoissa, kuten koristelijoissa (kuva 4), jotka ovat yksinkertaisempia mallintaa (Kokkonen 2023).



KUVA 4. Kipsistä valmistettuja koristelijoita (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

2.5.3 Metallit

Näkyvät metalliosat ovat olleet pieniä, mutta tärkeitä ja arvokkaita yksityiskohtia rakennuksissa (Kaila ym. 1987, 74). Materiaaleina on käytetty takorautaa ja vaaluosia on valettu raudan lisäksi kevyt- ja arvometalleista. Ruostumaton teräs on aina ollut kallis materiaali, jonka käyttö on ollut rajallista rakentamisessa. Vanhat rautaosat kestävät yleensä ruosteisinakin satoja vuosia eikä niitä pidä turhaan irrottaa (Kaila ym. 1987, 79).

Metalliosien valmistusmenetelmät voidaan jakaa nykyään kolmeen ryhmään. Perinteisiä muovaavia valmistusmenetelmiä ovat valaminen ja takominen. Ainetta poistavia menetelmiä ovat sorvaus, jyrsintä ja leikkaus. Uusimmat 3D-mallintamisen myötä tulleet valmistusmenetelmät ovat ainetta lisäävät menetelmät, kuten 3D-tulostus jauhepetimenetelmällä. (Alonen, Alonen & Hietikko 2016.)

2.5.4 Muovit

Rakennusala on nykyään yksi suurimmista muovin kuluttajista ja rakentamisessa käytetään 20 prosenttia kaikesta muovista (Pro Rakentamisen muovit, 2021). Synteettinen polymeeri eli muovi on kehitetty jo 1800-luvun alkupuolella, mutta sitä ei ole käytetty rakennuksissa merkittävässä määrin ennen 1930-luvua, jolloin bakeliitti, melamiini ja polystyreeni tulivat markkinoille. 1950-luvulla muovin käyttö lisääntyi merkittävästi, kun muovimateriaalit tulivat rakentamisen perusosiksi. (Erho 2022.)

Muovi on edullisesti ja helposti tulostettavissa 3D-tulostimella ja sopii hyvin muottimateriaaliksi. 3D-tulostettuja muoviosia voidaan hyödyntää toiminnallisissa osissa kuten kahvoissa ja salvoissa. Muovitulosteita voidaan käyttää myös apurakenteina. Apurakenteena muoviosa saa olla luontevasti uusi eikä sitä erehdytä pitämään aitona, mutta sen ansiosta voidaan mahdollisesti säilyttää jotain alkuperäistä (Kaila ym. 1987, 7). Valitun muovifilamentin mukaan kappaleelle saadaan haluttuja ominaisuuksia, kuten joustavuutta, säänkestoa tai kovuutta (3D Cadsolutions n.d.).

2.5.5 Liitokset

Erilaisten puuliitosten ohella vanhimpia liitostapoja ovat jo muinaisten egyptiläisten käyttämät puutapit eli -vaarnat ja roomalaisten keksimät takorautanaulat. Taotut rautanaulat ovat yleensä poikkileikkaukseltaan nelikulmaisia. (Rybczynski 2000, 18, 23, 61.) Liima on rakentamisessa melko tuore tuote ja sen käyttö pitää olla perusteltua. Liimatut liitokset vaikeuttavat tulevaisuudessa osien erottamista toisistaan ja estävät rakenteen elämistä lämpötilan ja kosteuden vaikutuksesta.

Perinteisesti esimerkiksi ovet ja ikkunat on kasattu ilman liimaa (Kaila ym. 1987, 76).

Rakentamisessa ruuveja on käytetty kalliimman hinnan vuoksi yleensä vain esteettisistä syistä tai siellä missä naulaa ei ole voitu käyttää. Pultti- ja urakantaisten ruuvien jälkeen rakentamisessa yleistyi konevääntämiseen sopivat ristipäiset Phillips-ruuvit patentin rauettua 1960-luvulla. (Rybczynski 2000, 60.) Erilaiset naula- ja ruuvityypit on syytä huomioida rakennusrestaurointikohteissa, sillä ne antavat yksityiskohdille kullekin aikakaudelle tunnusomaisen tyylin.

2.6 Nykytilanne ja markkinat

Korjausrakentamisen osuus talonrakentamisesta oli vuonna 2022 jo hieman uudisrakentamista suurempi (Vihmo 2023, 3). Vaikka rakennusrestaurointi ja -konservointi on vain pieni osa korjausrakentamista, on rakennusala merkittävä käsityöalojen osajien, kuten puuseppien, restauroijien ja historioitsijoiden, työllistäjä. (Lauttalammi ym. 2005, 9.) Osaavia puuseppiä on vaikea löytää Suomesta ja osaavia käsityöläisiä etsitään myös ulkomailta (Mikkonen 2022).

Tietokoneavusteinen koneellinen valmistus on usein käsityötä edullisempaa, mutta tehokas tuotanto vaatii alkuinvestointeja ja koulutusta, johon pienillä yrityksillä ei välttämättä ole resursseja. Yksittäisen työntekijän kiinnostuneisuudella ja osaamisella on suuri vaikutus siihen, miten yritys pystyy hyödyntämään nykyaikaisia työstökoneita, sillä koneiden käyttö ei ole perinteistä puusepäntaitoa (Virtanen 2023). Jo tällä hetkellä on mahdollista ulkoistaa kappaleiden skannausta, mallinnusta, jälkikäsittelyä ja valmistusta alan yrityksille, mikä tarjoaa mahdollisuuden kokeilla tekniikoiden käyttökelpoisuutta ennen hankintapäätöstä (3D Cadsolutions n.d.).

2.7 Tulevaisuuden näkymät

Korjausrakentaminen on tarvelähtöistä ja sen suhdannevaihtelu on uudisrakentamista pienempää. Rakennuskannan ikä ja kestävä kehityksen tavoitteet tukevat korjausrakentamisen kasvua edelleen. (Vihmo 2023, 4.) Korjausrakentaminen ja erityisesti rakennusrestaurointi on hyvin työvoimavaltaista. Rakennusrestaurointi vaatii kädentaitoja, joita ei enää uudisrakentamisessa tarvita samassa mittakaavassa rakentamisen teollistumisen ja vakioitujen rakennusosien vuoksi. (Lauttalammi ym. 2005, 5.) Koska käsityötaidot vähenevät ja käsityön hinta nousee, on perusteltua hyödyntää tietotekniikkaa, jotta tulevaisuudessa saadaan korjausosia ja yksityiskohtia vanhoihin rakennuksiin.

Kaikki vanhat rakennusosat eivät suinkaan ole suunnittelijan juuri kyseiseen kohteeseen suunnittelemaa käsityöläisen uniikkeja taidonnäytteitä, vaan teollista osavalmistusta on ollut jo yli sadan vuoden ajan. Esimerkiksi ikkunoiden helat olivat jo 1800-luvun lopulla tavallisesti tehdastuotteita (Mikkola & Böök 2016, 79). Kokonaisia ikkunoita valmistettiin tehtaissa tai puusepän verstaissa yleisesti jo 1900-luvun alussa (Mikkola & Böök 2016, 81). Vanhan näköisiä korvausosia myydään nykyään erikoistuneissa myymälöissä ja yleisimpiä tuotteita jopa tavallisissa rautakaupoissa hieman trendien ja kysynnän mukaan. Tietokoneavusteinen valmistus mahdollistaa jo nyt pienten sarjojen tuotannon erikoistuneille rautakaupoille ja rakennusrestauroijille.

Tekoälytyökalut kehittyvät vauhdilla ja ovat jo kaikkien kokeiltavissa verkkoselaimen kautta. Tekoälyä hyödyntävät 3D-objektigeneraattorit ovat synnyttäneet uuden tavan luoda ja visualisoida 3D-malleja pelialalla. Generatiivinen tekoäly on yleisesti käytössä luotaessa 3D-malleja tekstisyötteestä, kuvasta tai videosta. (McFarland, 2024.) Pelialalta uudet 3D-innovaatiot leviävät yleensä muille tietotekniikkaa hyödyntäville aloille (Puhakka 2008, 27). Tekoälyä on mahdollista soveltaa myös skannattujen 3D-mallien korjaamiseen, yhdistämiseen ja tuotantokuntoon saattamiseen, mikä tehostaa 3D-skannausprosessia. (Thor3D 2023.)

Yksi tulevaisuudessa jalansijaa saava menetelmä saattaa olla älypuhelimien kameran avulla tehtävä fotogrammetria eli valokuviiin perustuva mallintaminen. Tekniikka on jo olemassa joissain kehittyneissä puhelinmalleissa ja sitä voi käyttää esimerkiksi interiöörien tallentamiseen, sillä etäisyystiedon lisäksi se tallentaa tiedon väreistä. Tekniikka ja ohjelmistot eivät kuitenkaan vielä ole sillä tasolla, että menetelmä soveltuisi ammattikäyttöön eikä siitä toistaiseksi ole 3D-skannereiden korvaajaksi. (Peltola 2021, 25.) Tulevaisuudessa älypuhelimella tehtävä fotogrammetria saattaa olla tehokas ja edullinen työkalu.

3D-malleja vanhoista rakennuksista ja rakennusosista voidaan käyttää osavalmistuksen lisäksi myös monenlaiseen visualisointiin, virtuaaliseen tutkimukseen ja historian tallentamiseen. Epäsuoria taloudellisia hyötyjä, kuten kerran luodun tiedon parempaa hyödyntämistä, parantunutta tiedon jakamista tai visualisointimahdollisuuksia on vaikea arvioida (Laakko 1998, 32).

3 3D-MALLINNUS RAKENNUSRESTAUROINNISSA

3.1 Yleistä 3D-mallinnuksesta rakennusrestauroinnissa

Rakennusrestauroinnissa mallintaminen on edelleen harvinaista, mutta suurissa korjausrakennuskohteissa käytetään jo yleisesti tietomalleja. Tietomalleista on hyötyä sekä suunnittelu- että rakennusvaiheessa (A-insinöörit n.d.). Visualisoinnin keinoin on mahdollista tutustua rakennuksen sisä- ja ulkotiloihin sekä tarkastella suunnitelman toimivuutta ja visuaalisuutta jo ennen varsinaisen työn aloittamista (Puhakka 2008, 24).

Yksi vanhoille rakennuksille ja rakennusrestauroinnille ominainen tarve on historiallisen tiedon tallentaminen. 3D-mallissa voidaan säilyttää rakennusosien tarkka geometriatieto, värit ja materiaalit. 3D-malleja voidaan käyttää myös virtuaalisen tutkimuksen apuna näkemättä itse kohdetta. Museoviraston rakennushistorian selvitysoapas vuodelta 2010 ei vielä tunne mallintamista tapana tallentaa vanhoja rakennuksia tai niiden yksityiskohtia, mutta uusi rakentamislaki ohjaa kohti tietomallintamista (Heikkonen 2023).

3D-mallintamista käytetään nykyään yleisesti eri alojen suunnittelu- ja visualisointitehtävissä. 3D-ohjelmistoilla tehtävillä visualisoinnilla voidaan korvata kallista ja aikaa vievää pienoismallien ja piirrosten tekemistä. Toiminnallisissa kohteissa, kuten konesuunnittelussa, monimutkaisiakin kokoonpanoja voidaan rakentaa valmiiksi ja toimintaa testata virtuaalisena mallina. (Puhakka 2008, 24.) Yksityiskohtien mallintamista voi verrata ennemmin konesuunnitteluun kuin koko rakennuksen kattavaan tietomallintamiseen.

3.2 3D-mallintamisen historiaa

3D-mallintamisen historia alkoi toisen maailmansodan jälkeen, kun Yhdysvalloissa kehitettiin ensimmäisiä lentosimulaattoreita. 1960-luvulle asti tietokonegraafikka perustui hyvin yksinkertaisiin rautalankamalleihin eli kuvaputkelle koordinaattien mukaan piirrettyihin viivoihin. (Puhakka 2008, 25.) 1970-luvulla 3D-mallit

koostuivat yksinkertaisista geometrisista perusmuodoista. 1980-luvulla kehittyivät 3D-pintojen tekstuurit ja visuaalisuus, mutta 3D-suunnittelu oli vielä harvinaista ja kallista. (Puhakka 2008, 26.)

1990-luvulta lähtien 3D-grafiikka ja -mallintaminen ovat kehittyneet nopeasti erityisesti elokuva- ja peliteollisuuden ansiosta. Vuonna 1993 ilmestyi Jurassic Park-elokuva, jossa on pitkiä jaksoja 3D-mallinnetuista liikkuvista dinosauruksista. Samana vuonna julkaistiin tietokonepeli Doom, joka aloitti 3D-grafiikan laajan käytön tietokonepeleissä. (Puhakka 2008, 27.) Tietotekniikan kehitys on keskittynyt viime vuosikymmeninä vahvasti 3D-grafiikan ympärille, sillä se vaatii tietokoneelta paljon laskentatehoa.

Ennen 1990-lukua PC-tietokoneiden 3D-grafiikkakyvyt olivat hyvin vaatimattomia, mutta erillisillä grafiikkakiihdyttimillä varustetut näytönohjainkortit käynnistivät kehityksen, jonka seurauksena mallintamiseen ja grafiikan luomiseen ei enää ole tarvinnut kalliita Unix-koneita. Tehokas PC-tietokone Windows-käyttöjärjestelmällä riittää vaativiinkin suunnittelu- ja visualisointitehtäviin. (Puhakka 2008, 25–27.) 2000-luvun alussa alkoi 3D-mallinnuksen hyödyntäminen rakennusalaalla suuremmissa mittakaavassa, kun tietomalleja alettiin käyttää uudisrakennusten suunnittelussa.

3.3 Yksityiskohtien dokumentointi

Dokumentointi on kulttuuriperinnön tallentamista eri tavoin, kuten mittaamalla, valokuvaamalla ja näytteitä ottamalla (Sahlberg 2010, 13). Rakennusrestauraointikohteissa tarvitaan yleensä silmämääräistä arviointia ja asiakirjoihin tutustumista syvällisempää rakenteiden ja materiaalien selvittämistä. Tarveselvitys- ja hankesuunnitteluvaiheessa määritetään lähtötaso, mutta tutkimuksia ja dokumentointia jatketaan tarpeen mukaan koko työn ajan. Tyypillisiä tutkimusmenetelmiä ovat katselmukset, muistiinpanot, valokuvat, mittaukset, näytteet, laskelmat, haastattelut ja vanhojen asiakirjojen analyysit. (Lauttalammi ym. 2005, 11.)

Suunnittelun lähtökohdaksi tarvitaan mittatietoja rakennuksen ulko- ja sisäpuolelta (Sahlberg 2010, 14). Myös syntyvät mallit ja niistä luotavat piirustukset ovat

osa rakennuksen mittausdokumentaatiota. Digitaalinen tallennusmuoto helpottaa rakennusten korjaussuunnittelua ja mittauspiirustukset on syytä tehdä CAD-muotoon (Vuolle-Apiala 2010, 40). Dokumentoinnin avulla saadaan hyödyllistä tietoa rakennuksen ylläpitoa ja tulevia korjausrakennustöitä varten (Sahlberg 2010, 15).

Vanhaa rakennusta restauroitaessa laaditaan rakennuksen historiallinen tutkimus säilyttämisen- ja suunnittelupäätöksen tueksi. Näitä dokumentteja käytetään päätöksenteossa museoviraston tai viranomaisien kanssa, kun kohteena on historiallisesti merkittävä rakennus. Vähemmän arvokkaissa kohteissa arkkitehti ja rakennuttaja voivat tehdä päätökset. (Lauttalammi ym. 2005, 14.) Dokumentointivaiheessa vauriot ja niiden laajuus selvitetään ja tallennetaan dokumentteihin (Laine & Orrenmaa 2012, 15). Dokumentoinnin kannalta tärkeintä pohja-ainesta ovat tarkat mittapiirrokset (Sahlberg 2010, 39). Vanhoihin piirustuksiin on syytä suhtautua varauksella, sillä vanhoissa kohteissa alkuperäisistä suunnitelmista on usein poikettu tekemättä muutospäätöksiä tai -suunnitelmia (Lauttalammi ym. 2005, 12).

Rakennusosien rakenteet, materiaalit, värit ja pintakäsittelyt tutkitaan ja tallennetaan dokumentointivaiheessa (Laine & Orrenmaa 2012, 15). Yksityiskohdat on syytä aina valokuvata ennen työn aloittamista ja myös työn edetessä. Piirustuksiin merkitään mittoja, huonenumeroita ja viittaukset uuneihin ja muihin yksityiskohtiin. Jokaisesta seinäpinnasta tehdään ainakin käsivarainen luonnos, johon merkitään ovet, ikkunat ja muut yksityiskohdat. Dokumentointia jatketaan purku- tai restaurointityön edetessä. (Kaila ym. 1987, 15.) Nimeäminen ja numerointi on oltava johdonmukaista ja selkeää (Sahlberg 2010, 39).

Mikäli rakennuksen yksityiskohtia joudutaan purkamaan, purku tapahtuu rinnan merkitsemisen ja tutkimisen kanssa. Purkamista valmisteltaessa tutkitaan, voidaanko joitakin osia siirtää kokonaisina. Kaikki rakennusosat merkitään kestäväällä mutta helposti poistettavalla tavalla purkutyön edistyessä. Näin tehdään myös huonokuntoisille osille: ne säilytetään mallina ja vasta myöhemmin voidaan ratkaista paikkaus tai uusiminen. Isot rakennusosat voidaan merkitä numeroilla vanerilapuilla, jotka naulataan osiin. Listat ja vuorauslaudat numeroidaan

takapuolelle irrottamisen yhteydessä. Numeroinnille ei ole vakiintunutta käytäntöä, mutta tärkeintä on, että jokainen osa saa numeron ja ne merkitään piirustuksiin. (Kaila ym. 1987, 15.)

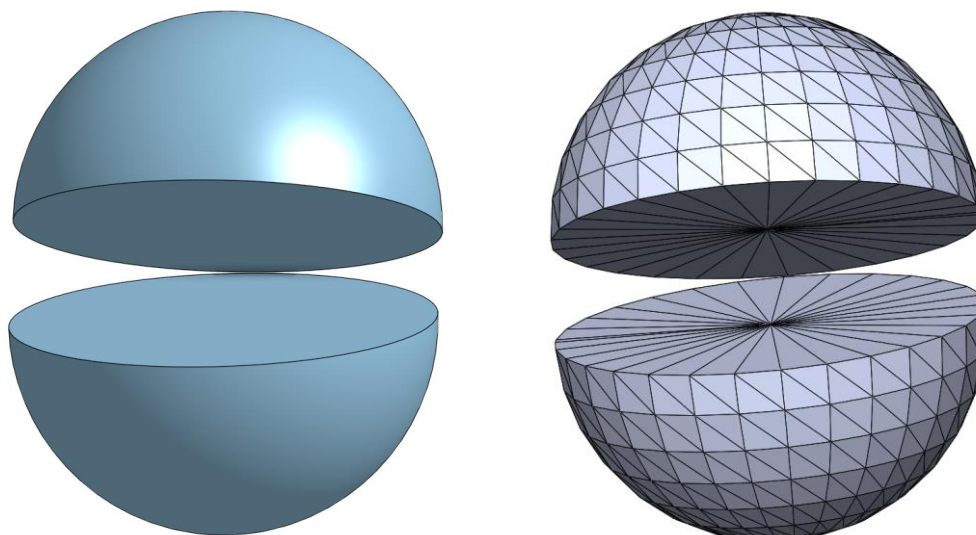
Valokuvaus on yksinkertainen tapa dokumentoida rakennusten yksityiskohtia, mutta dokumentointia voidaan tehdä myös muilla tavoin. Detaljit ja rakennusmateriaalit tulee kuvailla mahdollisimman tarkasti. Toistuvat rakennusosat kannattaa tutkia tyypeittäin ja paikantaa tyypit piirustuksiin. 3D-mallien kanssa voidaan osin soveltaa samoja käytäntöjä kuin valokuvauksessakin, jossa kuvauspaikat merkitään pohjapiirustukseen. (Sahlberg 2010, 43, 48.)

Tärkein dokumentti on edelleen 2D-piirustus, sillä ne ovat yleismaailmallinen tapa esittää ja siirtää teknistä tietoa (Sahlberg 2010, 39). 2D-piirustuksen tulostaminen on tarvittaessa helppoa ja siihen on helppo tehdä selventäviä merkintöjä. 2D-piirustusten generoiminen 3D-mallista on kaikkien mallinnusohjelmien perusominaisuus. (Laakko 1998, 140–143.) Digitaalisten 2D-piirustusten ja kuvien arkistointi on yksinkertaista, koska tiedostoille on jo vakiintuneet arkistointitavat ja katseluohjelmat.

Mallinnettujen rakennusosien ja kokonaisten rakennusten tietomallien osalta on vielä muodostumatta yhtenäinen käytäntö, miten tieto säilytetään tuleville sukupolville. Kansallisarkiston sähköisen arkistoinnin palvelu ei vastaanota digitaalisia 3D-malleja, vaan sähköinen materiaali on oltava teksti-, kuva ja videomuodossa. (Kansallisarkisto 2023).

3.4 3D-mallien perustyytit

Pelkistä särmäviivoista muodostuva rautalankamalli on 3D-malleista yksinkertaisin ja vanhin, eikä sitä puutteellisuutensa vuoksi enää käytetä CAD-suunnittelussa (Halima, Silén & Kuokkanen 1999, 6). Nykyaikainen 3D-mallinnus käyttää sekä tilavuus- että pintamalleja, joiden eroa voi havainnollistaa halkaistun pallon avulla (kuva 5).



KUVA 5. Vasemmalla tilavuusmalli ja oikealla pintamalli (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

Tilavuusmalli on tarkin malli osavalmistusta ajatellen ja se kuvaa tarkasti todellista kappaletta. Tilavuusmallilla voidaan esittää myös kappaleen poikkileikkaukset ja yksityiskohdat kuten todellisessa kappaleessa, jolloin siitä saadaan tarkat 2D-piirustukset. (Halima ym. 1999, 7.) Piirremallinnuksen keinoin luotu tilavuusmalli sopii parhaiten teollisesti valmistettujen kappaleiden mallintamiseen. Kun piirremallinnukseen yhdistetään parametrinen mallinnus, saadaan erittäin käyttökelpoisia ja yksiselitteisiä 3D-malleja, joiden muokkaaminen ja monipuolinen käyttö on nopeaa (Laakko 1998, 57).

Pintamalli sopii yleensä tilavuusmallia paremmin monimutkaisille pinnanmuodoille ja siksi sen käyttö on yleistä teollisessa muotoilussa. Pintamalli muodostuu kolmiulotteisessa avaruudessa olevista pisteistä ja niitä yhdistävistä suorista tai kaarevista viivoista. Pintamallin muokkaaminen perustuu pisteiden siirtämiseen avaruudessa, mikä tekee muokkaamisesta työlästä. (Halima ym. 1999, 6–7.)

Tietokonegrafiikassa pintamalleista puhutaan polygonimalleina. Renderöintiä varten malli yksinkertaistetaan suorasärmäisistä monikulmioista muodostuvaksi monikulmioverkoksi, vaikka alkuperäiset pinnat olisivatkin kaarevapintaisia. Monikulmioiden piirtäminen on helpompaa ja nopeampaa, mikä on tärkeää erityi-

sesti reaaliaikaisessa mallin liikuttelussa ja animaatioissa. Monikulmiot yksinkertaistetaan edelleen pelkiksi kolmioiksi, jolloin yksittäisten kulmapisteiden siirtäminen on mahdollista mallin kolmioverkon säilyessä yhtenäisenä. (Puhakka 2008, 49–50.)

Jos pintamallin pinnat muodostavat suljetun kappaleen, muodostuu tilavuusmalli. Vastaavasti jos tilavuusmallista poistetaan yksikin pinta, se muuttuu pintamalliksi. (Halima ym. 1999, 6.) Tietokoneohjattua työstöä varten pintamalli on muutettava tilavuusmalliksi, mutta tällaisen pintamallista muunnetun tilavuusmallin käyttökelppoisuus ei ole sama kuin piirremallinnetulla tilavuusmallilla, sillä se ei sisällä samaa muokattavuutta ja mittatietoa kuin piirremallinnettu tilavuusmalli.

3.5 Mallinnusmenetelmät

Mallinnusmenetelmän valinta riippuu mallinnettavasta kohteesta, vaadittavasta tarkkuudesta, käytössä olevista laitteista ja henkilöstön osaamisesta. Eri menetelmät sopivat vaihtelevasti eri käyttötapauksiin. Rakennusrestauroinnin tarpeisiin sopivia mallinnusmenetelmiä ovat 3D-skannaus ja piirremallinnus.

3.5.1 3D-skannaus

3D-skannaus kehitettiin 1960-luvulla, mutta tekniikka oli pitkään hidasta ja rajoitunutta. 1990-luvulla tulivat markkinoille ensimmäiset kaupalliset 3D-skannerit eli 3D-lukijat. (Peltola 2021, 9.) Laitteiden kehitys on jatkunut edelleen ja hinnat ovat laskeneet. Tehokkaaseen ja tuottavaan käyttöön 3D-skannerit ovat tulleet 2000-luvulla. 3D-skannaus on laaja käsite, jonka sisään mahtuu useita erilaisia tekniikoita kuten valokuvien yhdistämiseen perustuva fotogrammetria sekä laservaloon ja strukturoituun valoon perustuvat menetelmät (Alonen 2019). Myös kosketukseen perustuvia laitteita on kehitetty (Puhakka 2008, 429).

3D-skannaus on takaisinmallinnusmenetelmä ja se sopii tilanteeseen, jossa on olemassa oleva fyysinen kappale, jonka mallintaminen piirremallinnuksen keinoin

olisi kohtuuttoman työlästä (kuva 6). Skannaus sopii erityisen hyvin käsin valmistetuille kappaleille ja orgaanisille muodoille, kuten taotuille, valetuille tai kaiverretuille rakennusosille (Laakko 1998, 41). 3D-skannaus on nopea keino tallettaa suuri määrä yksityiskohtia myöhempää tutkimista tai tarkempaa mallintamista varten. Menetelmä sopii nopeaan 3D-mallin luomiseen ja mittatiedon keräämiseen (Alonen 2019). 3D-skannauksen tarkkuus on millimetrin osia (Alonen 2018).



KUVA 6. 3D-skannattu kapiteelin pintamalli (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

Yleisin 3D-skannerin toimintaperiaate on heijastaa skannattavaan kohteeseen kuvio, joka kuvataan yhdellä tai useammalla kameralla. 3D-malli tuotetaan analysoimalla suuria määriä heijastetun kuvion peräkkäisiä muodonmuutoksia, jotka yhdistetään toisiinsa ohjelmallisesti esimerkiksi kohdistustarrojen avulla. Näin saatuja mittapisteitä voi olla miljoonia. (Alonen 2019.)

3D-skannerilla mitatuista pisteistä luodaan pistepilvi tai pintamalli, joka kuvaa kappaleen pinnanmuotoja ja laitteesta riippuen myös värejä. 3D-skannaamalla

kopioidaan ainoastaan kappaleen pinnanmuodot, mutta kappaleen toimintaa ja sisäisiä rakenteita ei saada kopioitua, joten skannaamalla ei yleensä saada täydellistä kopiota kappaleesta (Alonen 2019).

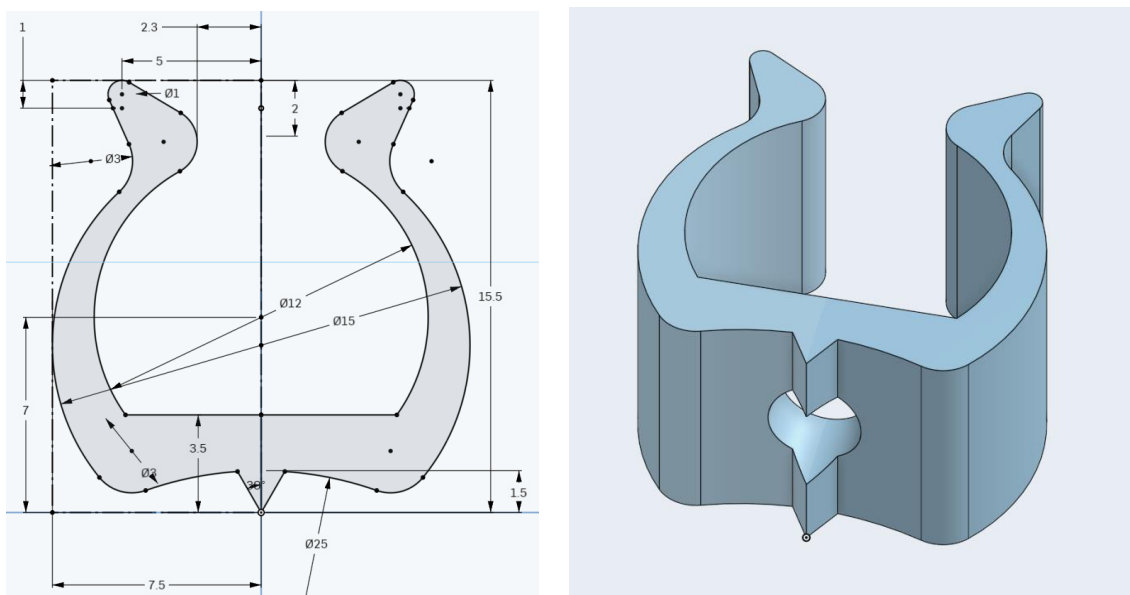
Ennen skannausta on suunniteltava, miten kappale saadaan skannattua tehokkaasti. Usein kappaleeseen liimataan paikoitustarroja niin, että kamerat näkevät joka kuvakulmasta riittävästi tarroja. Tarvittaessa kiiltäviä tai mustia pintoja voidaan käsitellä erityisellä suihkeella, joka parantaa skannaustulosta. Itse skannaus on nykylaitteilla nopea ja helppo prosessi. (Alonen 2018.)

Skannattuihin malleihin jääviä puuttuvia pintoja, reikiä ja muita virheitä voidaan korjata jälkikäteen ohjelmallisesti. Vähintään pinnat, joita ei päästä skannaamaan, täytyy korjata ohjelmallisesti. (Alonen 2019.) Mallin korjaaminen saattaa olla hyvinkin hidas työvaihe.

3.5.2 Piirremallinnus

Piirremallinnuksen avulla syntyvä 3D-malli perustuu 2D-luonnoksiin ja muokkaviin toimenpiteisiin, jotka yhdessä muodostavat piirteitä (Vertex BD 3D-mallinnus n.d.). Kun luonnokset ja toimenpiteet ovat täysin määriteltyjä, on geometria yksiselitteistä ja tarkkaa. Tästä syystä piirremallinnusta käytetään konesuunnittelussa. Syntynyttä mallia on vaivaton hienosäätää luonnoksia ja toimenpiteitä muokkaamalla. Yksinkertaiset geometriset muodot on helppo mallintaa tarkasti piirremallintamalla, mutta monimuotoiset pinnat ovat työläitä tai mahdottomia mallinnettavia. (Laakko 1998, 33.)

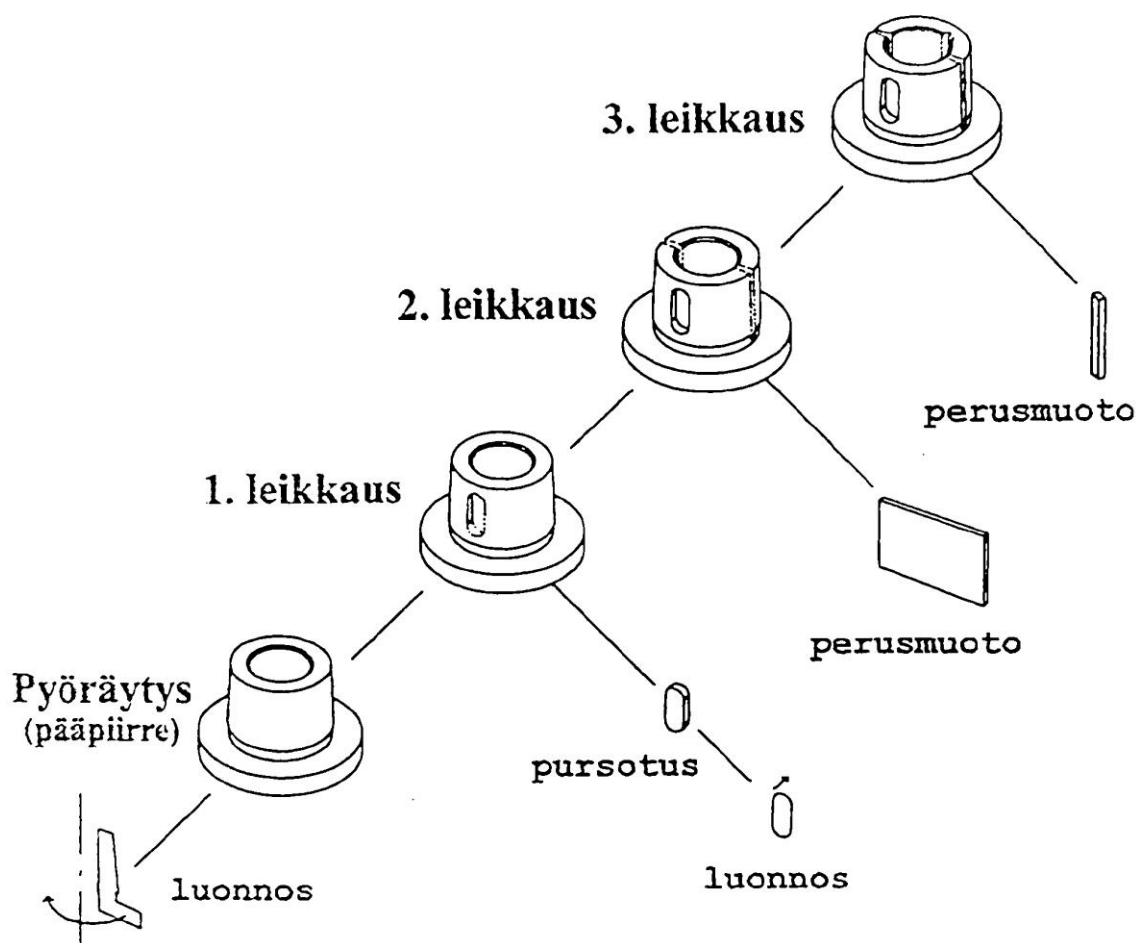
Kuvassa 7 on pilvipohjaisella OnShape-mallinnusohjelmalla luotu täysin määritelty luonnos ja siitä pursotettu 3D-kappale, johon on porattu reikä. Tällainen kappale on valmis 3D-tulostettavaksi tai teolliseen tuotantoon. Alkuperäinen kappale on mitattu työntömitalla 0,1 millimetrin tarkkuudella.



KUVA 7. Piirremallinnuksen avulla luotu malli (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

Parametrinen piirremallinnus alkaa luonnostelemalla 2D-luonnoksia, jotka sisältävät tarkat mitat ja ehdot. Luonnokset muutetaan 3D-geometriaksi erilaisia toimenpiteitä suorittamalla. Kaikki suoritettavat mallinnusvaiheet tallentuvat piirteiksi historiapuuhun ja parametreja on mahdollista muuttaa jälkikäteen, jos muotoa tai mitta halutaan muuttaa. 3D-mallintaminen ei ole lähtökohtaisesti perinteistä 2D-suunnittelua nopeampaa, mutta muutosten tai eri variaatioiden teko on nopeaa (Laakko 1998, 32, 57).

Tyypillisimpiä toimenpiteitä ovat aineen lisääminen ja poistaminen pursottamalla, pyöräyttämällä, pyyhkäisemällä tai pinnoittamalla. Apupiirteiksi voidaan kutsua varsinaisiin piirteisiin kohdistuvia toimenpiteitä, kuten reikiä, pyörityksiä ja viisteitä. (Halima ym. 1999, 2–5.) Kuviossa 1 on esitetty tyypillinen yksinkertaisen piirremallin muodostuminen luonnoksiin ja toimenpiteisiin perustuvilla piirteillä.



KUVIO 1. Esimerkki piirremallin muodostumisesta (Halima ym. 1999, 16).

Piirremallinnuksen keinoin on yksinkertaista luoda säännöllisiä geometrisia muotoja, mutta orgaanisten pintojen luominen on työlästä, koska luonnosten ja toimenpiteiden tulee olla täysin määriteltyjä. Esimerkiksi pallopinta voidaan määrittellä kahden parametrin – keskipisteen ja säteen – avulla. (Puhakka 2008, 55.) Koska piirremallin geometria on täysin määritelty, riippuu valmistettavan kappaleen tarkkuus ainoastaan työstömenetelmän tarkkuudesta.

Toisin kuin 3D-skannauksessa, piirremallinnuksessa ei tarvita alkuperäistä kappaletta, vaan mallinnus voidaan tehdä esimerkiksi vanhojen piirustusten, valokuvien ja mittojen avulla. Piirremallinnuksessa erilliset osat mallinnetaan omiksi osamalleiksi, jotka yhdistetään alikokoonpanoiksi ja edelleen kokoonpanoiksi (Laakko 1998, 69).

Piirremallinnukseen ei tarvita kalliita laitteita, vaan tavallisella tietokoneella on mahdollista mallintaa monimutkaisiakin kappaleita. Olemassa olevia yksityiskoh-
tia on mahdollista mallintaa mittaamalla perinteisin työkaluin kuten työntömitalla
ja muotokammalla. Piirremallinnus sopii hyvin säännöllisesti toistuvien muotojen
mallintamiseen, sillä yhden mallinnetun piirteen kopioiminen ja peilaaminen ovat
nopeita toimenpiteitä.

Piirremallinnuksella luodut mallit ovat valmiita 3D-tulostettaviksi (kuva 8), sillä pi-
kavalmistustekniikoissa käytetään tilavuusmalleja. Piirremallinnuksella luodusta
tilavuusmallista saadaan osavalmistuksen lisäksi laadukasta kuvamateriaalia
markkinointiin ja mittatarkkoja piirustuksia dokumentointiin. Tilavuusmalleja on
mahdollista katsella ja pyöritellä myös Internet-selaimessa tai erillisillä katseluoh-
jelmilla. (Laakko 1998, 33, 145.)



KUVA 8. Työntömitalla mitattu ja piirremallinnuksella mallinnettu kaapin salpa, joka on tulostettu tavanomaisella 3D-tulostimella (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

3.5.3 Profiilien mallinnus

Erilaiset profiilit ovat yleinen dokumentointikohde vanhoissa rakennuksissa. Lis-
toja ja ikkunan puitteita ei välttämättä tarvitse irrottaa tai purkaa, vaan profiilin voi
kopioida muoto- eli profiilikammalla (Vuolle-Apiala 2010, 29). Muotokammasta

(kuva 9) profiilin voi siirtää edelleen millimetripaperille ja mitata perinteisin menetelmin viivaimella ja ympyrämallineella. Päämitat on aina syytä varmistaa suoraan profiilista työntömitalla. Listan voi mahdollisesti irrottaa pienillä puukiiloilla, jolloin listan päätä voidaan käyttää profiilin muodon kopioimiseksi paperille. (Kaila ym. 1987, 15, 78.) Paperilta muoto voidaan siirtää mallinnusohjelmaan mittoja ja muotoja apuna käyttäen.



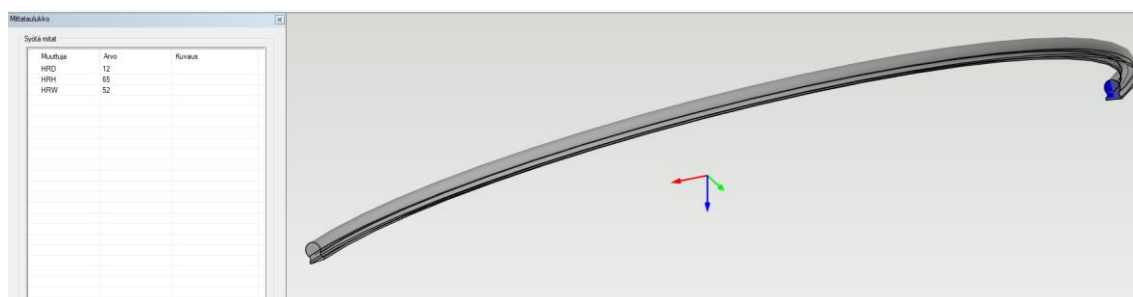
KUVA 9. Profiilikampa sopii 2D-profiilien muotojen, kuten konehöylättyjen listojen profiilien kopiointiin (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

Listasta voi joutua poistamaan maalia, jotta saadaan alkuperäinen profiili eikä maalikerrosten pyöristämää muotoa (Kaila ym. 1987, 78). Höylättyjen listojen profiilit ovat olleet kulmistaan teräviä, mikä tulee huomioida profiileja mallinnettaessa. Mittapiirustukseen on hyvä merkitä päämittojen ja detaljimutojen lisäksi tiedot puulajista, liitoksista, materiaaleista, pintakäsittelyistä ja muista kyseiseen profiiliin liittyvistä yksityiskohdista.

Listat, ikkunaprofiilit, kehykset, kaiteet ja sadevesikourut ovat rakentamisessa yleisiä profiileita. Profiilit ovat yleensä kaksiulotteisia, jolloin ne on järkevintä mallintaa konesuunnittelusta tutuilla menetelmillä syöttämällä muodot ja mitat piirustus- tai mallinnusohjelmaan. Yksinkertaisten profiilien kanssa työskennellessä ei

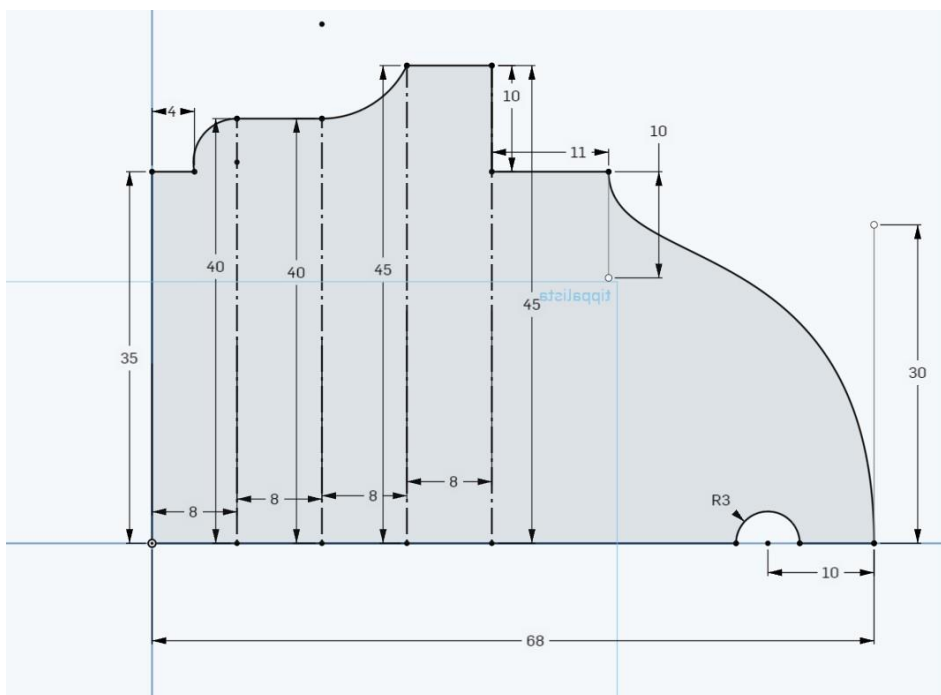
tarvita 3D-ominaisuuksia ja piirtäminen on nopeaa. Syntyvästä profiilin 2D-piirustuksesta on helppo teettää oikeanlaista profiilia. Puusepäntöitä, kuten listoja, tilatessa tulisi aina käyttää piirustuksia eikä mallikappaletta (Kaila ym. 1987, 78).

Profiili tehdään konesuunnitteluohjelmissa luonnoksena luonnostasolle tai se voidaan tallentaa kirjastoon profiilina, mikäli käytettävä ohjelma tukee profiilien käyttöä (kuva 10). Erityisen tehokasta mallinnus on, mikäli profiili on mittavarioituva ja käytetään päiden trimmausta. Tällöin ohjelmasta saadaan myös piirustukset ja katkaisulistat (Vertex G4 profiilirakenneturssi n.d.).

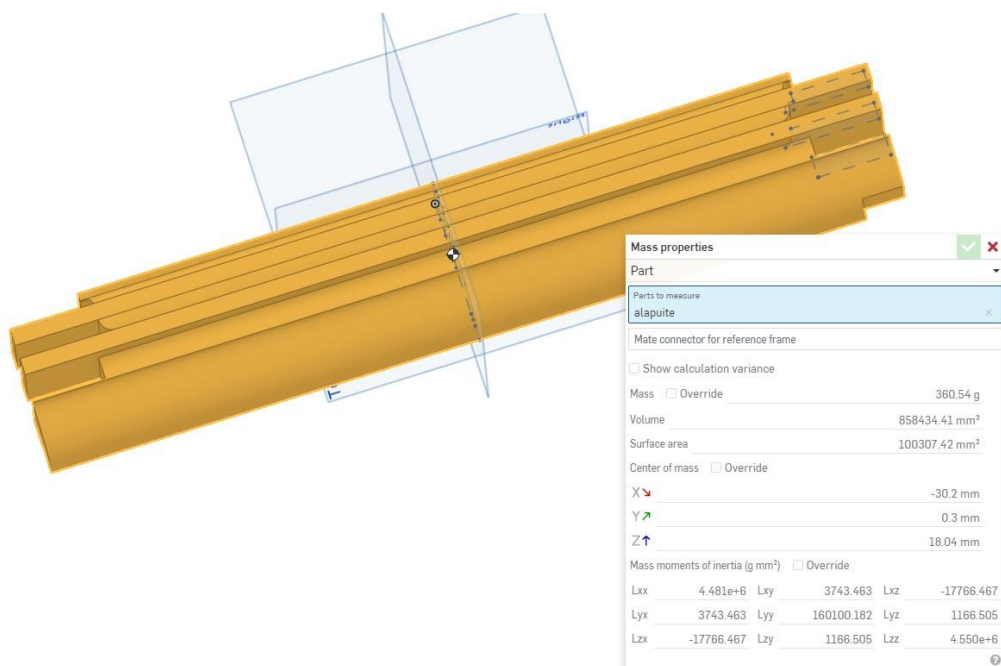


KUVA 10. Vertex BD -mallinnusohjelman vakiokirjaston mittavarioituva käsijohdeprofiili pursotettuna kaarevaa ohjaukseyrää pitkin (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

Kun kaksikulotteista profiilia (kuva 11) pursotetaan tai kuljetetaan pitkin ohjaukseyrää, muodostuu kolmiulotteinen malli. Mikäli kappaleelle määritellään materiaali, saadaan mallista fyysisen kappaleen ominaisuudet kuten massa, tilavuus, pinta-ala ja painopiste. Mittatarkkojen piirustusten laatiminen kuuluu konesuunnitteluohjelmien perusominaisuuksiin ja lisäksi joissain mallinnusohjelmissa on mahdollista tehdä elementtimenetelmään perustuvia lujuusanalyysyjä, visualisointeja ja törmäystarkasteluja (Vertex FEA käyttöohjeet n.d.). Perinteisen ikkunan sormiliitokset on mahdollista tehdä toisella profiililla ainetta poistaen (kuva 12).

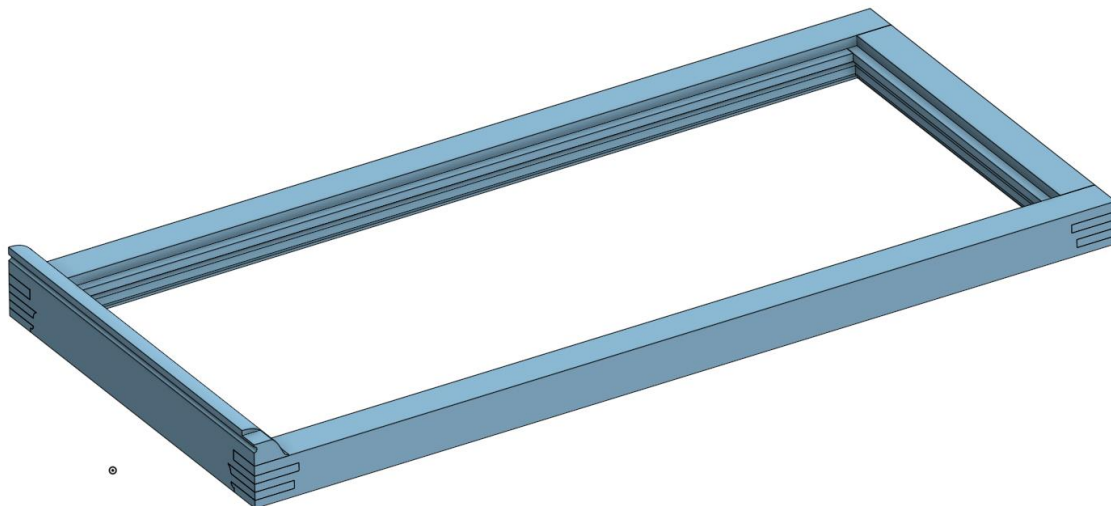


KUVA 11. Mitoilla ja geometrisilla ehdoilla täysin määritelty profiili luonnostasolla (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).



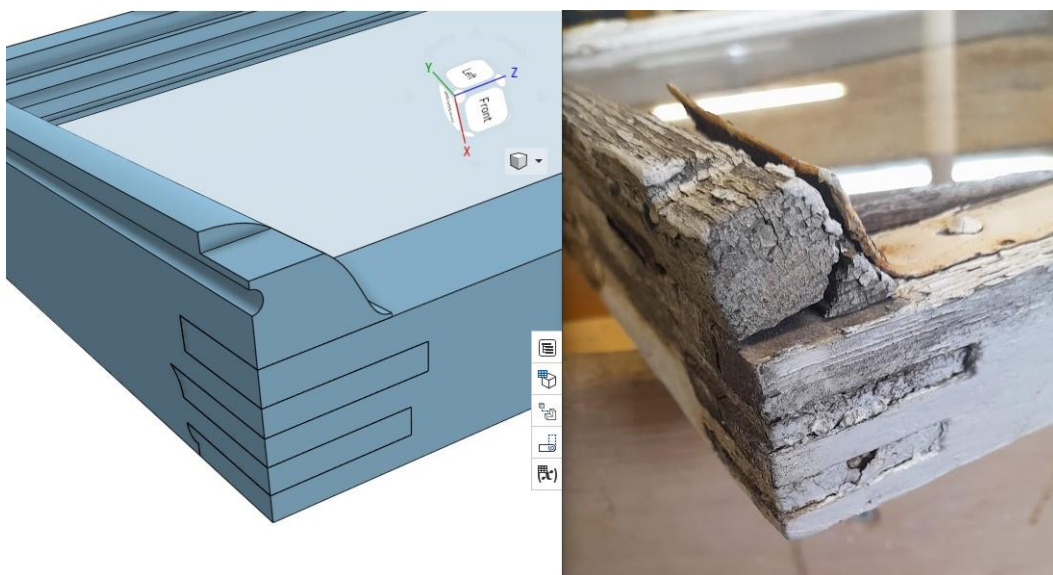
KUVA 12. Profilista pursotettu osa OnShape -mallinnuspilvipalvelussa (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

Kun useampia osia on mallinnettu liitoksineen, niistä voidaan muodostaa kokoonpanomalli, jossa voidaan tutkia osien yhteensopivuutta (kuva 13). Myös kokoonpanosta saadaan vaivattomasti visualisoinnit, piirustukset ja mittatiedot.



KUVA 13. Useista osista rakennettu kokoonpano (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

Mitä tarkemmin osa mallinnetaan, sitä monipuolisemmin sitä voidaan käyttää tulevaisuudessa. Mallintamalla voidaan rekonstruoida kuluneita ja tuhoutuneita osia (kuva 14), jolloin niiden valmistaminen tai visualisointi on mahdollista.



KUVA 14. Vaurioituneesta ikkunasta luodusta mallista saa tarkat mitat uusia osia ja liitoksia varten (Kuva: Antti-Jussi Tulimaa).

Monimutkaisemmat kipsiprofiilit tai käsin veistetyt puulistat on mahdollista 3D-mallintaa skannaamalla tai joissain tapauksissa piirremallintaa valokuvien ja mitausten perusteella. Sorvatut kappaleet voidaan ajatella kaksiulotteisina pyörähdyskappaleina ja ne on usein mahdollista mallintaa yksinkertaisesti profiilina. Tällaisen pyörähdyskappaleen mallintaminen on helppoa piirremallinnuksen avulla, mikäli tarvitaan kolmiulotteinen malli.

Profiilin voi jyrsiä käyttäen jyrshintä, jossa käytetään vakioteriä. Menetelmä sopii pieniin määriin ja melko yksinkertaisiin listoihin. Suuret määrät konehöylätään profiiliin mukaan muotoilluilla teräsarjoilla. (Virtanen 2023.) Asiaan erikoistunut höyläämö pystyy käyttämään myös varastostaan löytyviä teriä, joita yhdistelemällä voidaan tehdä iso osa tyypillisistä profiileista. (Kaila ym. 1987, 78.) Jos profiilista halutaan myös työstöjäljeltään alkuperäisen mukainen, on teetettävä profiilipiirustuksen mukaan tarvittavat terät käsihöylään (Kaila ym. 1987, 78).

3.6 Laitteistovaatimukset

Suuret tiedostot ja kokoonpanot vaativat tietokoneelta laskentatehoa. Työskentely alitehoisella laitteistolla on turhauttavaa ja se jää käyttökelvottomaksi teho vaatimusten jatkuvasti kasvaessa. Myös kaikki muut tarvittavat laitteistot, kuten tietoverkko, skannerit ja palvelimet, tulee olla kunnossa tehokkaan työskentelyn takaamiseksi. (Laakko 1998, 30–31.)

Pienten kappaleiden 3D-mallintaminen piirremallintamalla onnistuu jopa Internet-selaimessa millä tahansa nykytietokoneella, mutta erityisesti suuret pistepilvimallit ja visualisoinnit vaativat paljon laskentatehoa, tallennustilaa ja keskusmuistia. Tehokas pelitietokone tai tehoyöasema Windows-käyttöjärjestelmällä on yleensä riittävä, sillä niissä on edellä mainittujen vaatimusten lisäksi tehokas näytönohjain.

3.7 Ohjelmistot

CAD-ohjelmien hankinnassa tulee arvioida investoinnin kannattavuus. On mietittävä mitä ominaisuuksia järjestelmältä vaaditaan ja kuinka nopeasti ohjelmaa opitaan käyttämään. (Laakko 1998, 28–30.) Piirremallinnusohjelmien ominaisuudet ovat jatkuvasti laajentuneet pelkästä 3D-suunnittelusta muille mekaniikkasuunnittelun osa-alueille, kuten lujuuslaskentaan (Halima ym. 1999, 4). Näille lisäominaisuuksille ei yleensä ole tarvetta rakennusrestauroinnissa, joten monipuolisesta ja kalliimmasta ohjelmistosta ei välttämättä ole käytännön hyötyä. Harrastajatasoisen 3D-tulostuksen yleistyttyä myös ilmaiset ja edulliset 3D-mallinnusohjelmat ovat lisääntyneet ja riittävät kaupalliseen peruskäyttöön.

CAD-ohjelmien käyttöönottokustannukset riippuvat lähtökohdasta, käyttäjän ja koulutuksen tasosta ja tavoitteista. CAD-järjestelmiin liittyy ylläpitorutiineja ja käyttöönottovaiheessa saattaa aikaa kulua myös räätälöintien tekoon. Varsinkin aluksi suunnittelu on hidasta. (Laakko 1998, 31–32.)

3D-skannattujen pintamallien käsittelyyn tarvitaan korjausohjelmia, joilla skannattua mallia korjataan skannausvaiheessa tai sen jälkeen (Alonen 2019). Ammattikäyttöön suunnatut ohjelmistolisenssit maksavat yleisesti yli tuhat euroa vuodessa, mutta satunnainen käyttö onnistuu edullisemmilla ja ominaisuuksiltaan rajoittuneemmilla ohjelmistoilla.

3.8 Tiedostomuodot

Mikään tekninen laatuohje ei varmista, että digitaaliset tiedostot säilyisivät pitkään ja arkistointi vaatii omat säilytysstrategiansa (Sahlberg 2010, 49). Suomessa Kansallisarkisto varmistaa kansalliseen kulttuuriperintöön kuuluvien asiakirjojen säilymisen ja saatavuuden sekä edistää niiden tutkimuskäyttöä. (Kansallisarkisto n.d.) Toistaiseksi Kansallisarkisto ei tunne arkistoitavaa säilytysmuotoa 3D-malleille tai tietomalleille eikä niitä ole kirjattu 2035 strategiaan.

Digitaalisen tiedon arkistoinnissa on huomioitava sen riippuvuus laitteista, ohjelmistoista ja formaateista. Tiedon tulee säilyä pidempään kuin tietojärjestelmät,

joilla ne on luotu. Paperidokumentit säilyvät satoja vuosia, mutta tällä hetkellä mikään ei takaa digitaalisen tiedon säilymistä. (Kansallisarkisto n.d.)

Piirremallinnetut 3D-mallit tallennetaan yleensä mallinnusohjelman omaan natiiviformaattiin, jota ei pysty välttämättä avaamaan millään muulla ohjelmalla. Mallinnusohjelmat pystyvät yleensä avaamaan vanhemmilla versioilla tallennettuja tiedostoja, mutta yhteensopivuus ei ole aina täydellistä edes saman ohjelmiston eri versioiden välillä.

Digitaalisen tiedon säilymistä edesauttaa niiden muuntaminen yleisesti käytettyihin tiedostomuotoihin. Vietäessä monimutkaisia 3D-malleja toisiin tiedostomuotoihin yleensä kuitenkin menetetään tietoa ja tarkkuutta. Erityisesti piirremallinnettuja kappaleita vietäessä mallin muokattavuus menetetään. 3D-malleille on syntynyt de-facto-standardeja tiedonsiirtoon ja arkistointiin. Monet sinänsä paremmat formaatit eivät ole yleistyneet käyttöön, joten usein on varmempaa pitäytyä yleisten formaattien käytössä. Yleisesti käytettyjä formaatteja ovat STL, OBJ ja DXF. Malleista voi tehdä lisäksi arkistointikelpoisia 2D-piirustuksia PDF-muotoon sekä visualisointeja kuva- ja videotiedostoina (Kansallisarkisto n.d.).

STL-tiedosto on 3D-Systemsin 1980-luvulla kehittämä yksinkertainen 3D-formaatti, josta on muodostunut yleinen tiedostomuoto pikavalmistukseen, kuten 3D-tulostamiseen ja CNC-jyrsintään. STL-tiedostosta on mahdollista tulostaa suoraan 3D-tulostimella ja jyrsintäkin on mahdollista, kun suunnitellaan kappaleen kiinnitys, työkalut ja työstöradat. STL-formaatti on yleisyytensä, yksiselitteisyytensä ja yksinkertaisuutensa vuoksi luotettava formaatti, jonka heikkous on epätarkkuus. STL-tiedosto ei ole häviötön, vaan se muodostuu ”2D-viipaleista”, joita on pinottu päällekkäin. (Laakko 1998, 171-173, 259.) 3D-skannattu malli voidaan tallentaa suoraan STL-muotoon (Alonen 2019).

OBJ-tiedosto on 3D-grafiikkaan kehitetty tiedostomuoto, jota käytetään myös 3D-valmistuksessa. OBJ-mallit ovat pintamalleja, jotka hyödyntävät myös muita kuin kolmioita muodon luomisessa (FileInfo.com n.d.).

DXF-tiedosto on Autodeskin kehittämä tiedostoformaatti tiedonsiirtoon eri CAD-ohjelmien välillä. Se tukee kolmiulotteisia rautalanka, pinta- ja tilavuusmalleja, mutta on suosittu erityisesti 2D-piirustusten siirrossa. (Laakko 1998, 262.)

3.9 Eri menetelmien vaikeus ja kustannukset

Ammattimainen mallinnus on vaativaa työtä. Pelkkä laitteiden hankkiminen ei riitä, vaan tarvitaan osaamista sekä laitteiden että ohjelmistojen käyttöön. 3D-skannaukseen liittyvää koulutusta on ammattikoulu- ja ammattikorkeakoulutasoista, mutta skannausosaaminen voi olla myös kokemuksen kautta hankittua.

3D-skannerien hinnat ovat laskeneet ja ne ovat aiempaa helppokäyttöisempiä. Niiden tehokas käyttö kuitenkin vaatii osaamista, kokemusta ja kokeilua. Kuluttajakäyttöön suunnattuja skannereita saa muutamilla sadoilla euroilla, mutta edullisimmat ammattikäyttöön sopivat laitteet maksavat muutamia tuhansia euroja. Tällaisilla laitteilla onnistuu jo useamman metrin mitaisten kohteiden skannaaminen värillisenä. Kalleimmat mallit maksavat kymmeniä tuhansia euroja ja ne soveltuvat erityisesti laadunvalvontaan, tarkastuksiin ja teolliseen suunnitteluun. (3D Cadsolutions n.d.) Edullisemmatkin skannerit alkavat olla tarkkuudeltaan riittäviä yksityiskohtien mallintamiseen ja niiden ominaisuudet ja käytettävyys ovat parantuneet viime vuosina. Edullisella 3D-skannerilla on helppo kokeilla menetelmän toimivuutta omiin tarkoituksiin.

Piirremallinnuksen opiskelu on työläämpää kuin 3D-skannauksen aloittaminen. Piirremallinnusosaaminen hankitaan konesuunnittelukursseilla, jotka kuuluvat esimerkiksi koneinsinöörien koulutukseen. Piirremallinnusta on mahdollista opiskella myös täysin itsenäisesti verkkokurssien avulla. Konesuunnitteluohjelmistot poikkeavat hieman käyttölogiikaltaan toisistaan, mutta perustoiminnallisuus on yleensä sama. Profiilien mallintaminen on yksinkertaista ja suoraviivaista 2D-CAD-ohjelmilla, joita on myös ilmaisversioina.

3.10 Mallinnusmenetelmien vertailu

3D-skannaus

Käyttökohteet:

- käsityönä valmistetut koristeet ja taideteokset
- valetut, veistetyt, kaiverretut ja taotut osat
- orgaaniset muodot
- maalatut osat
- dokumentoitavat yksityiskohdat
- valumuottien valmistus olemassa olevasta kappaleesta.

Edut:

- nopea tapa tallentaa paljon tietoa digitaaliseen muotoon
- muodon lisäksi mahdollista tallentaa tieto mitoista ja väreistä
- tarkkuus millimetrin osia
- melko nopeasti opittavissa
- syntyvää pintamallia voi käyttää visualisointitarkoituksiin, mittauksiin tai 3D-tulostukseen.

Rajoitukset:

- tehtävä paikan päällä tai kappale on kuljetettava skannattavaksi
- epätarkkaa, jos kappale on hyvin kulunut tai maalikerrosten peitossa
- liitosten ja profiilien tarkka skannaaminen vaikeaa
- terävät reunat ja syvät taskut vaikeita skannata
- kiiltäviä pintoja vaikea skannata
- saattaa vaatia kohdistustarroja, joista voi jäädä liimajäämiä
- vaatii laiteinvestointeja.

Piirremallinnus

Käyttökohteet:

- teollisesti valmistetut yksityiskohdat ja toiminnalliset osat
- geometriset, yksinkertaiset, kulmikkaat, säännölliset ja toistuvat muodot,
- sorvatut osat, saranat, profiilit, ohutlevyosat
- kuluneet tai kadonneet yksityiskohdat on mahdollista mallintaa ilman alkuperäistä kappaletta
- sarjatuotanto ja uudet vanhan tyylin mukaan tehtävät yksityiskohdat.

Edut:

- yksinkertaisten muotojen tarkka mallintaminen nopeaa ja tarkkaa
- muutosten ja variaatioiden teko on nopeaa
- mahdollista valokuvien, piirustusten tai mittojen mukaan ilman alkuperäistä kappaletta
- piirremallinnuksella syntyvä tilavuusmalli on yksiselitteinen ja valmis pika-valmistukseen, sarjatuotantoon tai alihankintaan
- mahdollista valmistaa kaikilla teollisilla valmistusmenetelmillä
- mittapiirustusten ja visualisointien laatiminen on yksinkertaista
- mallinnetuille kappaleille on mahdollista tehdä toiminnallisia kokoonpanoja, lujuuslaskentaa ja törmäystarkastelua.

Rajoitukset:

- hidas oppia ilman aiempaa kokemusta konesuunnittelusta
- hidas menetelmä yksittäisille osille
- monimutkaiset muodot työläitä mallintaa.

4 POHDINTA

Opinnäytetyö osoittaa, että 3D-mallintamisella on lukuisia käyttökohteita rakennusrestauroinnissa. Opinnäytetyön tuloksena syntynyt vertailu antaa realistisen kuvan 3D-mallintamisen mahdollisuuksista tällä hetkellä ja helpottaa pienten yritysten investointipäätöksiä. Opinnäytetyöhön tutustumalla on mahdollista valita kohteeseen sopiva mallinnusmenetelmä.

3D-skannauksen avulla dokumentointia voidaan tarkentaa ja nopeuttaa, sillä skannaamalla saadaan suuria määriä mittadataa nopeasti. Koneellinen valmistus ei tule korvaamaan käsityötä, sillä vanhojen työmenetelmien säilyminen on tärkeä osa rakennusrestaurointia. Koneellisella työstöllä on kuitenkin käyttökohteita myös rakennusrestauroinnissa, ja 3D-mallit sopivat erinomaisesti uusien osien valmistamiseen useilla eri menetelmillä.

3D-mallintaminen vaatii käyttäjältä kiinnostusta ja kokeilunhalua uutta tekniikkaa kohtaan, sillä teknologia on vielä uutta ja vakiintuneita käytäntöjä ei ole. Tietotekniikan nopean kehityksen ansiosta laitteistot kuitenkin halpenevat jatkuvasti ja käyttö muuttuu helpommaksi.

Aihe oli laaja ja tämä opinnäytetyö on vain yleiskatsaus 3D-mallintamisen mahdollisuuksiin rakennusrestauroinnissa. Jatkotutkimuksena eri mallinnusmenetelmiä olisi syytä kokeilla aidoissa rakennusrestaurointikohteissa, jolloin niiden todellinen käyttökelpoisuus ja kustannukset tulisivat esiin. Erityisesti 3D-skannaus on kehittynyt merkittävästi viime vuosina ja tämän opinnäytetyön perusteella se on jo toimiva ja tehokas menetelmä suuremmissa kohteissa, joissa voidaan hyödyntää digitaalisen mallin soveltuvuutta sarjatuotantoon ja dokumentointiin.

LÄHTEET

3D Cadsolutions. n.d. Verkkosivu. Viitattu 5.6.2024.
<https://www.an-cadsolutions.fi/>

A-Insinöörit. n.d. Tietomallinnus. Verkkosivu. Viitattu 10.6.2024.
<https://www.ains.fi/palvelumme/muut-asiantuntijapalvelut/tietomallinnus>

Alonen, A., Alonen, L & Hietikko, E. 2016. Lisäävän valmistuksen perusteet. Kuopio: Savonia.

Alonen, A. 2018. 3D-skannaus valmistavan teollisuuden työkaluna. Verkkosivu. Viitattu 12.6.2024. <https://blogi.savonia.fi/3dtulostus/2018/08/28/3d-skannaus-osa-1-2-3d-skannaus-valmistavan-teollisuuden-tyokaluna/>

Alonen, A. 2019. 3D-skannaus ja 3D-tulostus. Verkkosivu. Viitattu 11.6.2024. <https://blogi.savonia.fi/3dtulostus/2019/01/29/3d-skannauksesta-3d-skannaus-ja-3d-tulostus/>

Alonen, A. & Mäkelä, P. 2018. Muotit ja 3D-tulostus. Verkkosivu. Viitattu 5.6.2024. <https://blogi.savonia.fi/3dtulostus/2018/07/05/muotit-ja-3d-tulostus/>

Aniwaa. 5.8.2021. 3D scanning technologies and the 3D scanning process. Verkkosivu. Viitattu 27.12.2023. <https://www.aniwaa.com/guide/3d-scanners/3d-scanning-technologies-and-the-3d-scanning-process/>

Erho, J. 2022. Rakennusmateriaalit-kurssi. luentomateriaali. pdf. pääsy rajattu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. OAMK.

FileInfo.com. n.d. File Format Database. Verkkosivu. Viitattu 12.11.2023.
<https://fileinfo.com/>

Halima, T., Silén, J. & Kuokkanen, S. 1999. 3D-mallinnus: raportti 16/99. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Heikkonen, H. 2023. Laki rakennetun ympäristön tietojärjestelmästä astuu voimaan jo 1.1.2024 – kunnille velvoite tietomallien käyttöön otosta. Rakennuslehti 10.3.2023. Viitattu 10.6.2024. <https://www.rakennuslehti.fi/2023/03/laki-rakennetun-ympariston-tietojarjestelmasta-astuu-voimaan-jo-1-1-2024-kunnille-velvoite-tietomallien-kayttoonotosta/>

Kaila, P., Vihavainen, T. & Ekbom, P. 1987. Rakennuskonservointi: museokohdeena säilytettävien rakennusten korjausopas. 2. painos. Helsinki: Suomen museoliitto.

Kansallisarkisto. n.d. Digitaaliset aineistot. Verkkosivu. Viitattu 10.6.2024.
<https://kansallisarkisto.fi/digitaaliset-aineistot>

Kasvio, M. & Mänttari, R. 2005. Arkkitehtuuria puusta: From wood to architecture. Helsinki: Suomen rakennustaiteen museo.

Kokkonen, S. Rakennusentisöintiliike Ukri Oy:n toimitusjohtaja. 2023. Haastattelu 22.12.2023. Leppäkoski.

Laakko, T. 1998. Tuotteen 3D-CAD-suunnittelu. Porvoo: WSOY.

Laine, M. & Orrenmaa, A. 2012. Rakkaat vanhat puutalot: säilyttäjän opaskirja. Helsinki: Otava.

Lauttalammi, A., Lehtonen, J. & Laine, K. 2005. Talojen korjausrakentaminen: johdatus perusteisiin. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.

McFarland, A. 2024. 4 parasta tekoälyn 3D-objektigeneraattoria. Verkkosivu. Viitattu 6.6.2024. <https://www.unite.ai/fi/parhaat-ai-3d--objektigeneraattorit/>

Mikkola, J & Böök, N. 2016. Ikkunakirja. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Mooreeni.

Mikkonen, M. 2022. Autiotalon pelastaja. Helsingin Sanomat 2.10.2022. Viitattu 12.11.2023. <https://www.hs.fi/koti/art-2000009050755.html>

Peltola, J. 2021. Älypuhelin kameran käyttäminen 3D-skannaamisessa ja prosessin liittäminen 3D-tulostukseen. Tietotekniikan koulutusohjelma. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö. Viitattu 30.6.2024. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163203/loppuraportti.pdf>

Pro Rakentamisen muovit. 2021. Muovit rakentamisessa. Verkkosivu. Viitattu 5.6.2024. <https://www.muovitrakentamisessa.fi/muovit-rakentamisessa/>

Puhakka, A. 2008. 3D-grafiikka. Helsinki: Talentum.

Putkonen, L. & Mäkiö, E. 2011. Asiasta toiseen: kirjoituksia restauroinnista ja rakennussuojelusta. Helsinki: Museovirasto.

Puuinfo. 2020. Puutieto. Viitattu 5.12.2023. <https://puuinfo.fi/puutieto/sahatavara-ja-sen-jalosteet/sahatavaran-laatu/>

Rybczynski, W. 2000. Vähän kireämmälle: Ruuvien ja ruuvitaltan historia. Helsinki: Terra Cognita.

Sahlberg, M. 2010. Talon tarinat – Rakennushistorian selvitysoapas. Helsinki: Museovirasto.

TechTarget. 2022. What is 3D? Verkkosivu. Viitattu 27.12.2023. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/3-D-three-dimensions-or-three-dimensional>

Thor3D. 2023. How AI Can Enhance 3D Scanning? Verkkosivu. Viitattu 17.6.2024 <https://thor3dscanner.com/en/news/how-ai-can-enhance-3d-scanning/>

Vallius, A. 2011. Taidehistorian aikajana: Art nouveau ja jugend. Jyväskylän yliopisto. Verkkosivu. Viitattu 4.12.2023. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/taiku/taidehistorian-aikajana/modernismi/1800-luvun-modernismi/art%20nouveau%20ja%20jugend>

Vertex BD 3D-mallinnus. n.d. Verkkosivu. Viitattu 8.7.2024. <https://docs.vertex.fi/bd2021fi/html/bd/3d/modeling/new3dpartmodel.html>

Vertex FEA käyttöohjeet. n.d. Verkkosivu. Viitattu 30.6.2024. <https://kbfi.vertex.fi/g4/vertex-fea-kayttoohjeet>

Vertex G4 profiilirakennekurssi. n.d. Verkkosivu. Viitattu 30.6.2024. <https://kbfi.vertex.fi/g4/profiilirakennekurssi>

Vihmo, J. 2023. RT: Suhdanekatsaus syksy 2023. Verkkosivu. Viitattu 24.11.2023. https://www.rt.fi/globalassets/suhdanteet-ja-tilastot/suhdanekatsaukset/2023/syksy23/rt_suhdanekatsaus_syksy-2023.pdf

Virtanen, H. Hausjärven kalusteen toimitusjohtaja. 2023. Haastattelu profiilien jyrinnästä 26.10.2023. Hausjärvi.

Vuolle-Apiala, R. 2010. Hirsitalon kunnostaminen. 4. painos. Vantaa: Moreeni.

Whitman, A. 1969. Mies van der Rohe Dies at 83: Leader of Modern Architecture. The New York Times 19.8.1969. Viitattu 4.12.2023. <https://www.nytimes.com/1969/08/19/archives/mies-van-der-rohe.html>