

Denis Koloskov

Betonikivituotteiden kehitys 3D-mallista valmis- tuotteeksi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

19.4.2016

Tekijä(t) Otsikko	Denis Koloskov Betonikivituotteiden kehitys 3D-mallista valmistuotteeksi
Sivumäärä Aika	39 sivua + 1 liite 19.4.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennesuunnittelu
Ohjaaja(t)	Lehtori Mervi Toivonen
<p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin betonikivituotteiden valmistusmahdollisuuksia. 3D-tulostamalla valmistetulla betonimuotilla pyritään ratkaisemaan erikoismittaisten betonikivimuottien korkeita kustannuksia.</p> <p>Betonituotteiden valmistus mallintamalla on mahdollista. Tässä opinnäytetyössä mallintamiseen käytettiin Autodesk Inventor 2016 Professional -ohjelmaa. Opinnäytetyöhön sisällytettiin myös mallintamisohje, jota on mahdollista käyttää työntekijöiden perehdyttämistarkoituksessa tai muuten tukemaan oppimisprosessia.</p> <p>Opinnäytetyössä tutkittiin sekä betonikivituotteiden valmistukseen käytettävää betonia että muotin valmistamiseen sopivaa muovia. Sopivan muovimateriaalin valinta on keskeinen asia teknologian toimivuuden kannalta. Tutkimukseen sisältyi muotinteon olennaisten muovin ominaisuuksien kuvaus.</p> <p>Tutkimuksen kohteena oli myös 3D-tulostusteknologia ja sen sopivuus betonituotteiden muottien valmistukseen.</p> <p>Mallintaen, skannaten ja tulostaen on mahdollista toteuttaa aivan erikoisia betonituotteita. 3D-tulostusta hyödynnetään nyky maailmassa monessa osaamisalueessa ja sille löytyy käyttöä myös rakennusosalta.</p>	
Avainsanat	3D-mallinnus, 3D-tulostus, betonikivet, suunnittelu, tuotteistus

Author(s) Title Number of Pages Date	Denis Koloskov Development of concrete made stones from 3D-model to real product 39 pages + 1 appendice 19 April 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Degree programme in Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Mervi Toivonen, Senior Lecturer
<p>This thesis explores concrete products manufacturing possibilities. With 3D printing technology it is possible to cut down the manufacturing costs of special-scale concrete stone molds.</p> <p>Manufactured concrete products by modeling them is possible. In this thesis Autodesk Inventor Professional 2016 software is used for modeling concrete products. The thesis also includes modeling instructions to use during instructing employees or to support the learning process.</p> <p>The thesis studied materials used in the manufacturing of concrete products and also the most suitable plastic to use in manufacture of a mold. Selecting most a suitable plastic material is crucial to the functioning of the technology. The study includes a description of the mold making and the essential characteristics of plastics used.</p> <p>The study also includes search of 3D printing technology and its suitability for the production of concrete product molds.</p> <p>With modeling, 3D scanning and 3D printing technologies it is possible to come up with the very special concrete products. 3D printing is actively used in today's world in many areas of expertise and there is some practical use for it also in the construction industry.</p>	
Keywords	3D-modelling, concrete, 3D-printing, production, design

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Materiaalitutkimukset	3
2.1	Muovi	3
2.2	Betoni	4
2.2.1	Testi 1. Mustat koekappaleet 6 kpl	7
2.2.2	Testi 2. Harmaat koekappaleet 6 kpl	9
2.2.3	Yhteenveto betonin ominaisuuksista	10
3	Betonikiven mallinnusprosessi	11
3.1	Tuotteen malli AutodeskInventor-ohjelmalla	11
3.1.1	Erikoismittainen pihakivi	11
3.1.2	Pintakuvioitu pihakivi	15
3.1.3	Laatat	18
3.1.4	Erikoismuotoiset betonikivituotteet	19
3.2	Tuotteen mallista muotin malli	25
3.2.1	Pinnoitetun pihakiven valumuotin mallinnus	26
3.3	Valmismallin vienti ja tuonti eli "Export" ja "Import"	27
3.3.1	Mallin vienti Autodesk Inventor 2016 ohjelmasta	27
3.3.2	Tuonti ArchiCAD ohjelmaan ja jälkikäsittely	28
3.4	3D-skanneri betonituotteiden mallinnuskäytössä	32
4	3D-tulostus	33
4.1	3D-tulostimen hankinta yrityskäyttöön	34
4.2	Muotin tulostus	34
4.2.1	Kovamuovimuotti HIPS-muovista	34
4.2.2	Silikonimuotti FLEX-muovista	35
5	Kustannusvertailu	36
6	Tulokset ja yhteenveto	38
	Lähteet	39

Liitteet

Liite 1. Betonin tutkimustulosten tulosteet

Lyhenteet

DWG	Kansainvälisen ohjelmistotuottaja Autodeskin mallinnusohjelmien oma 3D-mallin tai piirustuksen tiedostoformaatti.
IFC	IFC (<i>Industry Foundation Classes</i>) on kansainvälinen ja jatkuvasti kehitettävä rakennusalan ISO/PAS 16739 -standardi oliopohjaisen tiedon siirtoon tietokonejärjestelmästä toiseen.
MPa	Megapascal eli suure, joka määrää aineen kestävyuden siihen kohdistunutta voimaa vastaan.

1 Johdanto

Betonipinta. Tästä sanasta mieleen nousee kuvia harmaasta, kivimäisestä, halkeilevasta, paikoittain poreisesta, ehkä rapistuneesta materiaalista. Se on kylmä, se on karhea, pölyinen, kova. Mieleemme assosioi betonin tähän kuvaukseen ja tähän on syy. Nykyään kokonaiset korttelit, jopa lähiöt, on rakennettu betonista ja betonin pinta on jäänyt monissa kohdissa näkyviin. Tämän harmaan kiven ihmiset ovat tottuneet näkemään kaikkialla.

Tässä opinnäytetyössä halutaan näyttää lukijalle, ettei betoni aina ole harmaa, karhea kivi. Betonista voi tehdä upeita esineitä. Sillä voi olla lasimaisen tasainen tai kauniin kuviollinen pinta, upea ja monimutkainen muoto ja kaunis värimaailma. Ihmiset eivät ole tottuneet näkemään betonia tällaisena. Tämä on vasta ensimmäinen askel, mutta sillä voi olla iso tulevaisuus.

Betoni on plastinen ja helposti työstettävä materiaali. Tähän opinnäytetyöhön on sisällytetty myös sellaisen erikoisbetonin materiaalitutkimus, jolla pyritään osoittamaan, että tämä tuote ei pelkästään ole erikoisen kaunis, mutta myös erikoisen luja.

Betoni ei ole myöskään aina ikävän harmaan värinen. Väripigmentillä värjätty betonimassa voi muodostaa mitä kauneimman kuvion. Betonista on mahdollista valaa jopa marmorikuvio. Väri vaihtoehdoissa vain mielikuvitus on rajana. Kyseisellä tavalla tuotettu betoni ottaa helposti itseensä myös pintakuvion. Jos muotissa on erikoiskuvio, vaikka se ei olisi silmällä havaittava, tulee se betonin pinnallakin toistumaan.

Betoni, joka on nyt kyseessä, ei ole utopiaa. Sitä on mahdollista valmistaa eikä teknologia ole uusi tai tuntematon. Päällistykseenä käytettävän betonikiven valmistus on kuitenkin kannattamattoman kallista kun kyse on erikoismittaisista tuotteista. Vaikea muoto tai kuvio on hankalaa ja kallista toteuttaa, sillä erikoismittaisen betonimuotin hankinta on kannattamatonta ja näin jatketaan perusmuoteissa ja perustuotteissa, joille ei nyky-markkinoilla aina ole kysyntää.

Tähän on kuitenkin mahdollista tehdä muutos. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan, onko mahdollista valmistaa erikoismittaisia valumuotteja nopeasti ja halvalla, käyttäen 3D-mallinnusta ja 3D-tulostusteknologiaa.

Jotta betonikiven muovimuotin mallinnus ja tulostus olisi mahdollista, tutkitaan tässä myös mallinnukseen tarvittavia ohjelmistoja. Autodesk Inventor 2016 Professional -ohjelmalla luodaan opinnäytetyöhön liittyvät mallit. Tämä prosessi kuvataan askel askeleelta, jotta tekstiä olisi mahdollista hyödyntää myös tuotemallintamisen ohjausmateriaalina tulevaisuudessa.

Muotin valmistus 3D-tulostusteknologialla voi vähentää erikoismuotin kustannuksia huomattavasti. Tämä avaa ovet myös mitä erikoisempien tuotteiden suunnittelulle. Esimerkkinä voi olla pintakuviollinen ulkoseinän pinnoituskivi, pihakivet ja laatat, sisäverhoiluun käytettävät kivet ja laatat, erikoiset sisustusosat. Tutkittavan teknologian avulla voitaisiin luoda jotain ainutlaatuista, mutta kilpailukykyistä myös hinnoittelussa. [6.]



Kuva 1. Betonikivestä tehty "puinen" tarhapolku [6.]

2 Materiaalitutkimukset

2.1 Muovi

Tuotemuotin valmistus muovista kolmiulotteisella tulostamistekniikalla vaatii muottiin käytettävän materiaalin tutkimista. Muovimuottiin valettava betoni asettaa muoville erilaisia kelpoisuusehtoja. Muoviin ei saa tulla epämuodostumisia kemiallisista reaktioista kun muotti öljytään, pestään erilaisilla seoksilla, tai kovettuvasta betonista erottuvasta lämmöstä. Muovimuotin ihanne kestävyys on 50–100 valukertaa.

Betonikiven valmistukseen käytettävä betoni kovettuu muovimuotin pintaa vastaavaksi. Näin ollen on muotin oltava naarmuton, sileäpintainen sivuilta ja pohjapinta vaatimusten ja käyttötarkoituksen mukainen. Pohjapinta antaa betonikiven päällyspinnalle käyttötarkoituksen mukaan sileyden, karkeuden, liukuestepinnan tai tarvittavan pintakuvion. [6.]

Betonikiven tehdasvalmistuksessa kiven pintaa ei jälkikäsitellä eli pinta tulee jäämään muottia vastaavaksi. Pienetkin, silmälle huomaamattomat, pintavirheet jäävät näin betonikiven pintaan. Tämä asettaa todella korkean vaatimuksen myös muovimuotin tulostuslaadulle. 3D-tulostimen tulostuslaatu vaihtelee ja vaikuttaa tulostusnopeuteen. 3D-tulostimen tulostuslaadun voi saada tietoon tulostimen valmistajalta, tämä parametri on yleensä ilmoitettu kunkin laitteen ohjekirjassa.

Tulostuslaadun tasosta huolimatta, on tulostetun tuotteen pinnassa yleensä pientä viivaista kuviota, joka aiheutuu siitä, että malli tulostetaan ohuin kerroksin aina edellisen kerroksen päälle. Tämä voi aiheuttaa tietyin määrin ongelmia, sillä muottipinnan tulisi olla tasainen. Muotin pinta tulisi tästä syystä jälkikäsitellä tulostamisen jälkeen, ennen muotin käyttöönottoa.

Jälkikäsitteily on mahdollista suorittaa hioen ja kiillottaen muotin pinta. Tämä olisi kuitenkin liian aikaa vievää ja muotin teko hidastuisi huomattavasti. Tämän lisäksi, jos muotissa on tarkoituksella ulkopintakuviot, tämän hiominen voi muodostua lähes mahdottomaksi. Pintamaalaus taas ei tässä tapauksessa ole mahdollinen, sillä maali voi helposti irrota muovipinnasta muotin käytön aikana. Tämän sijaan on mahdollista käyttää kevyttä kemiallista liuosta, jolla muotin sisäpinta käsitellään. Liuoksen resepti tullaan kehittämään

käyttötarkoituksen mukaiseksi ensimmäisten tulostuskertojen yhteydessä. Liuoksen leivitystavoista on useampia vaihtoehtoja ja näiden sopivuutta tullaan koetulostusten yhteydessä kokeilemaan. Jos sopivia tapoja löytyy useampia, panostetaan tässä nopeimman käsittelytavan löytämiseen.

Muotin muovimateriaalina voidaan käyttää joko kovaa muovia tai pehmeämpää silikonimuovia. Silikonimuotin etu on siinä, että valettu tuote on tällaisesta muotista helpompi irrottaa. Tehdasvalmistetut silikonimuotit ovat todetusti myös kestävämpiä ja niiden käyttökertojen määrä voi olla jopa kaksinkertainen tavalliseen muovimuottiin verrattuna. Silikonimuottia on käytännössä mahdollista valmistaa myös 3D-tulostusteknologialla, mutta tällaisen muotin toimivuus on varmistettava koetulostuksen avulla. Tämän opinnäytetyön tuloksena tullaan kokeilemaan sekä kovamuovi- että silikonimuottien tulostusta ja käyttöä.

Kovamuovin ja silikonimuovin valmistukseen käytetään erilaista 3D-tulostimen muovinauhaa, joka toimii tulosteen rakennemateriaalina. Näiden hintaero voi tulla käytännössä määrävääksi tekijäksi muotin materiaalia valittaessa, jos muotin elinkaarissa on huomattavaa eroa eri materiaalia käytettäessä.

On päätetty kokeilla kahden sopivimman materiaalin soveltuvuutta muotin materiaaliksi, HIPS ja FLEX, jotka ovat ominaisuuksiltaan erilaisia, mutta voisivat soveltua muotin materiaaliksi. Nämä molemmat esitellään tarkemmin luvussa 4. [5.] [7.]

2.2 Betoni

Osana tätä opinnäytetyötä tutkittu betoni valmistetaan patentoidulla teknologialla ja se on todistetusti erikoiskovaa betonia. Betonin ilmoitettu puristuslujuus 28 vuorokauden ikäisenä on 1000 kg neliösenttimetrille mikä vastaa 98,1 MPa:n lujuutta.

Betonikivituotteiden valmistus ei vaadi erillistä CE-merkintää. Tämän sijaan käytetään tuoteselostetta. CE-merkintä on mahdollista saada, mutta sillä tämä ei ole pakollinen ehto, ja toisi kuitenkin kustannuksia, on CE-merkinnän hankkimisesta päätetty luopua.

Ajan myötä patentoidun betonin reseptiä on koetettu parantaa lisäämällä betonimassaan 6 mm raekokoa olevaa graniittia runkoaineeksi. Alun perin tämä betoni valmistettiin käyttämällä runkoaineena vain hiekkaa. Suomessa on kuitenkin graniittisevelin hinta sen verran alhainen, että graniittisevelin käyttö ei tuota ylimääräisiä kustannuksia.

Graniitin lisäksi on päätetty testata, markkinoille tullutta, muovikuidun lisäämistä betonimassaan. Muovikuidun lisääminen ei oletusarvoisesti heikennä betonin lujuutta, mutta mahdollistaa kevyemmän betonituotteen valmistusta joka on joissain tapauksissa todella keskeinen asia. Betonikivi-päällysteen ollessa kevyempi on sitä mahdollista käyttää entistä useimmissa kohteissa ja tuotteissa.

Koestimme yhteensä kahdentoista koekappaleen puristuslujuuden koneellisesti. Koekappaleista kuusi kappaletta oli valettu käyttäen runkoaineena maksimissaan 6 mm raekooltaan olevaa graniittiseveliä. Nämä koekappaleet oli myös merkattu mustalla väripigmentillä, joka lisättiin betonimassaan valmistuksessa. Toiset kuusi koekappaleet valettiin lisäten betonimassaan muovikuitua ja niissä myös käytettiin 6 mm:n graniittiseveliä. Nämä koekappaleet jäivät betoniharmaiksi. Taulukko 1 esittää betonikappaleiden painon ja kuidun käytön vaikutuksen koekappaleiden painoon.

Taulukko 1. Betonikappaleiden painot ennen koestusta

Koekappale Nro.	Mustat koekappaleet (Paino kg)	Harmaat koekappaleet (Paino kg)
1	8,18	7,91
2	8,21	7,86
3	8,14	7,89
4	8,16	7,93
5	8,20	7,93
6	8,20	7,94
Keskipaino	8,18	7,91

Kuitua sisältävät harmaat koekappaleet ovat noin 3 % kevyempiä kuin samaa tilavuutta olevat mustat koekappaleet, jotka eivät sisältäneet kuitua.

Kaikki muut koekappaleisiin käytetyn betonimassan ominaisuudet kuten sementti, vesi-sementtisuhde, valu- ja säilytysolosuhteet sekä muotinpurkuikä olivat samanlaiset. Koekappaleet säilytettiin sisätiloissa normaaleissa kosteusolosuhteissa eivätkä ne ole saaneet minkäänlaista jälkihoitoa.

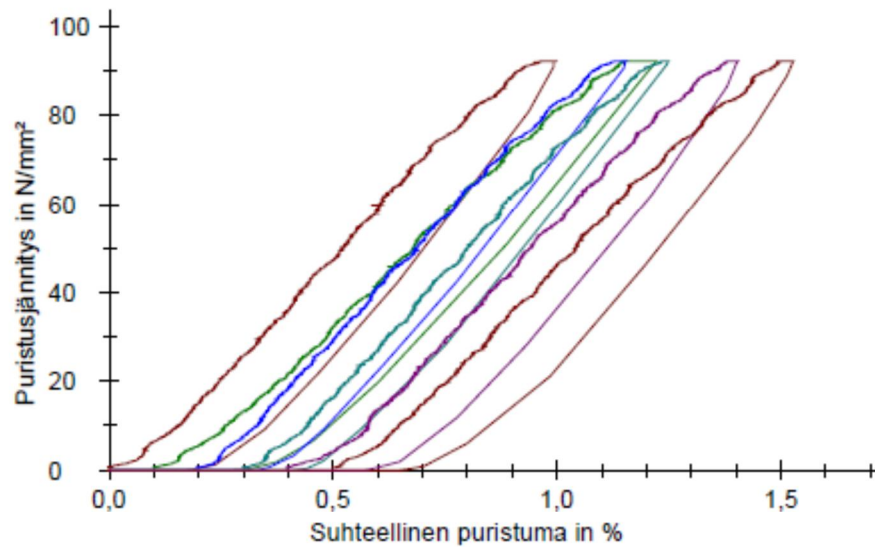
Betonin valmistukseen käytettiin CEM I 42,5N N-luokan Portland M500 harmaata sementtiä, jossa on tunnetusti erittäin pieni lisäainepitoisuus verrattuna muihin sementteihin. N-luokan eli normaali-luokan sementti on normaalisti kuivuvaa ja kovettuvaa sementtiä eli se ei kovetu niin nopeasti kuin esimerkiksi R eli rapid-luokan sementti.

Puristuskokeet pidettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Agricolankadun toimipisteen laboratoriossa jo viiden vuorokauden päästä valusta. 150 mm betonikuutiot puristettiin 2000 kN:n voimalla, jolloin saatiin tuloksena kuutiolujuus eli $f_{ck,cube}$ megapascalina eli MPa:na.

Mustat koekappaleet, ilman kuitua, koestettiin aina niin kauan kunnes testilaitteen 2074,5 kN:n maksimikapasiteetti oli saavutettu. Mikään koekappaleista ei puristunut yli 1% ja halkeamista ei tapahtunut, joten näiden koekappaleiden koestus päättyi 92,2 MPa:n kooneen mahdolliseen maksimiarvoon. Mustien koekappaleiden testitulokset on esitetty liitteessä 1 ensimmäisellä sivulla.

Kuitua sisältävien, harmaiden, koekappaleiden puristuslujuus saavutti keskiarvon 83,6 MPa. Kuidun vaikutus betonin kuivumiseen ja lujuudenkehitykseen on toisaalta vaikeaa määrittellä, mutta tämä oli selkeästi hyvä, vaikkei niin korkea tulos kuin kuiduttomalla betonilla. Harmaiden koekappaleiden testitulokset on esitetty liitteen 1 toisella sivulla. [3.] [6.]

2.2.1 Testi 1. Mustat koekappaleet 6 kpl

Series graphics:**Statistics:**

Series	ρ	F_m	σ_m
n = 6	kg/m ³	N	N/mm ²
x	2426,67	2074567,38	92,20
s	12,29	31,33	0,00
v	0,51	0,00	0,00

Kuvio 1. Ensimmäisen kuuden kappaleen lujuustestin tulos

Testilaitteen maksimi puristuskapasiteetti 2000 kN ylittyi jokaisen koekappaleen kohdalla. Testin tuloksena kuutiolujuus 5 vrk:n iässä <92.2 MPa.

Sillä viiden vuorokauden ikäinen betoni on saavuttanut vasta noin kaksi kolmasosaa mahdollisesta lujuudestaan, joka olisi saavutettu 28 vuorokauden ikäisen betonin koestuksessa, on seuraavaksi esitetty laskelmat todellisen lujuuden selvittämiseksi lujuusluokituksen mukaan.

Betonin ikä: 5vrk → T=5

Sementti: Portland M500

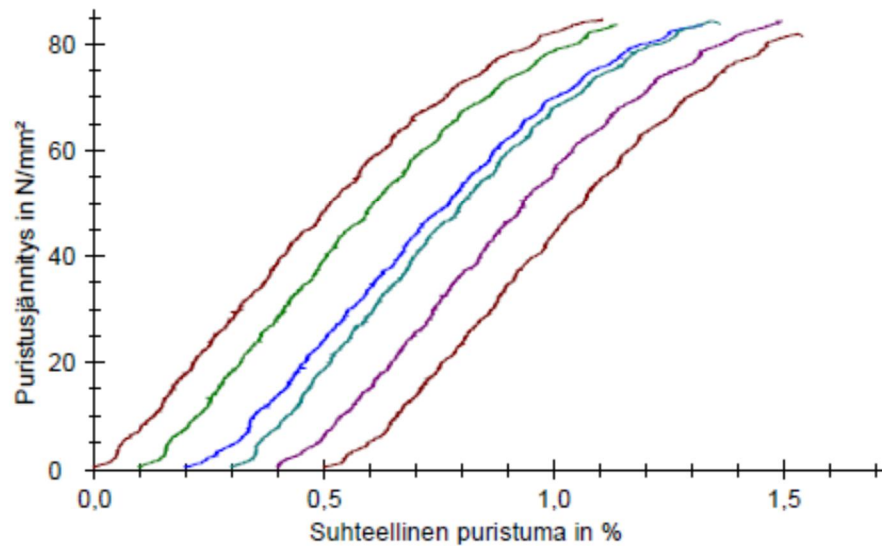
CEM I 42,5N (luokka N) → s=0,25

Taulukko 2. Betonin lujuuden muunnos ikävaikutuskertoimella

LUJUUSLUOKKA:	MATERIAALIARVO / KAAVA / TULOS
Kuutiolujuus 5vrk:	$f_{ck.cube5} := 92.2 \text{ MPa}$
Ominaispuristuslujuus 5vrk:	$f_{ck5} := f_{ck.cube5} \cdot 0.8 = 74 \text{ MPa}$
Keskimääräinen puristuslujuus 5vrk:	$f_{cm5} := f_{ck5} + 8 \text{ MPa} = 82 \text{ MPa}$
Ikävaikutuskerroin:	$\beta_{cc} := e^{\left(s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{T} \right)^{\left(\frac{1}{2} \right)} \right] \right)} = 0.711$
Keskimääräinen puristuslujuus:	$f_{cm} := \frac{f_{cm5}}{\beta_{cc}} = 115 \text{ MPa}$
Ominaispuristuslujuus:	$f_{ck} := f_{cm} - 8 \text{ MPa} = 107 \text{ MPa}$
Kuutiolujuus:	$f_{ck.cube} := \frac{f_{ck}}{0.80} = 134 \text{ MPa}$
Ominaisvetolujuus:	$f_{ctm} := 0.3 \cdot 107^{\left(\frac{2}{3} \right)} \text{ MPa} = 7 \text{ MPa}$
Keskimääräinen kimmo-kerroin:	$E_{cm} := 22 \cdot \left(\frac{(115)}{10} \right)^{0.3} \text{ MPa} \cdot 10^3 = 45775 \text{ MPa}$

Yhteenvedona todetaan, että lujuusluokka koestetulle betonille on yli C115/134. Puristustestin kuvaajan perusteella voi olettaa että kyseiset koekappaleet olisi kestänyt noin 20 % suuremman puristuksen kuin testilaitteen mahdollinen maksimikapasiteetti oli. [3.]

2.2.2 Testi 2. Harmaat koekappaleet 6 kpl

Series graphics:**Statistics:**

Series n = 6	ρ kg/m ³	F_m N	σ_m N/mm ²
x	2344,20	1882258,56	83,66
s	8,67	21808,79	0,97
v	0,37	1,16	1,16

Kuvio 2. Toisen, kuuden kuitua sisältävän kappaleen, lujuustestin tulos

Testin tuloksena kuutiolujuus 5 vrk:n iässä 83.66 MPa.

Sillä viiden vuorokauden ikäinen betoni on saavuttanut vasta noin kaksi kolmasosaa mahdollisesta lujuudestaan, joka olisi saavutettu 28 vuorokauden ikäisen betonin koestuksessa, on seuraavaksi esitetty laskelmat todellisen lujuuden selvittämiseksi lujuusluokituksen mukaan.

Betonin ikä: 5vrk \rightarrow T=5

Sementti: Portland M500

CEM I 42,5N (luokka N) \rightarrow s=0,25

Taulukko 3. Kuitubetonin lujuuden muunnos ikävaikutuskertoimella

LUJUUSLUOKKA:	MATERIAALIARVO / KAAVA / TULOS
Kuutiolujuus 5vrk:	$f_{ck.cube5} := 83.66 \text{ MPa}$
Ominaispuristuslujuus 5vrk:	$f_{ck5} := f_{ck.cube5} \cdot 0.8 = 67 \text{ MPa}$
Keskimääräinen puristuslujuus 5vrk:	$f_{cm5} := f_{ck5} + 8 \text{ MPa} = 75 \text{ MPa}$
Ikävaikutuskertoimen:	$\beta_{cc} := e^{\left(\left(1 - \left(\frac{28}{T} \right)^{\frac{(1)}{(2)}} \right) \right)} = 0.711$
Keskimääräinen puristuslujuus:	$f_{cm} := \frac{f_{cm5}}{\beta_{cc}} = 105 \text{ MPa}$
Ominaispuristuslujuus:	$f_{ck} := f_{cm} - 8 \text{ MPa} = 97 \text{ MPa}$
Kuutiolujuus:	$f_{ck.cube} := \frac{f_{ck}}{0.80} = 122 \text{ MPa}$
Ominaisvetolujuus:	$f_{ctm} := 0.3 \cdot 97^{\frac{(2)}{(3)}} \text{ MPa} = 6 \text{ MPa}$
Keskimääräinen kimmoerotin:	$E_{cm} := 22 \cdot \left(\frac{(105)}{10} \right)^{0.3} \text{ MPa} \cdot 10^3 = 44543 \text{ MPa}$

Yhteenvedon todetaan että lujuusluokka koestetuille betonille on C105/122. [3.]

2.2.3 Yhteenvedon betonin ominaisuuksista

Lujuusmenetys verrattuna koekappaleisiin, jotka eivät sisältäneet kuitua on yli 9 %. Painon suhteelliseen menetykseen verrattuna lujuudenmenetys on suuri. Tämä voi johtua kuidun vaikutuksesta betonin lujuuden kehitykseen. Jotta tulos olisi verrattavissa, on syyvennyttävä kuidun vaikutukseen ja sen prosenttisuhteeseen, mikä ei ole tämän opinnäytetyön kannalta tarpeellista.

Tutkimuksen tulokset löytyvät opinnäytetyön liitteestä.


Valmistetun betonin lujuus on 24 % -36 % alun perin valmistajan ilmoittamaa arvoa suurempi. Tämä antaa hyvän pohjan tuotteiden minimipaksuuden vähentämiselle. Tuotteiden paksuuden minimointi on etu sekä materiaalimenekin että tuotteiden keveyden suhteen. Näin pinnoitteena käytettävät tuotteet eivät kuormita rakenteita yhtä paljon kuin ennen. Lattiapintojen päällystämiseen käytettävät laatat ovat ohuempia, eivätkä kasvata lattianpaksuutta liikaa, vaikka ovat edelleen yhtä kestäviä.

3 Betonikiven mallinnusprosessi


3.1 Tuotteen malli Autodesk Inventor-ohjelmalla

Seuraavaksi selostetaan muutaman erilaisen tuotteen mallinnusprosessi Autodesk Inventor 2016 Professional -ohjelmistolla. Tuotteen mallit pyritään mitoittamaan niin, että mallin mitat ovat nopeasti muokattavissa riippuvuuksien avulla, jotta mallinnusprosessi saadaan mahdollisimman tehokkaaksi tulevaisuudessa. Erikoismittaisille tuotteille tulee pätemään monet vaatimukset, jotka pyritään sisäistämään malliin.

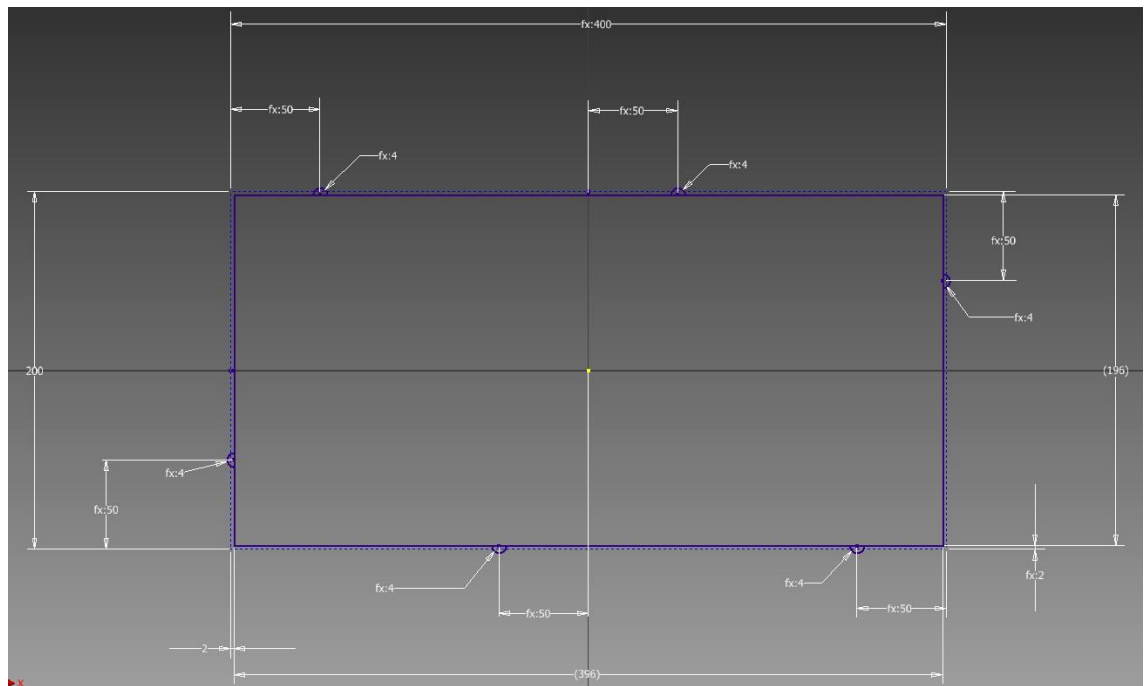
3.1.1 Erikoismittainen pihakivi

Aloitamme mallinnuksen Inventorin päävalikosta valitsemalla "New"  . Ponnahdusikkunan oikeassa ylälaudassa "Part" -valikon alta valitsemme meille sopivan "Standard(mm).ipt" -tiedostopohjan. Tämä tiedostopohja on osan mallinnukseen tarkoitettu, metriseen järjestelmään pohjautuva aloituspohja. Painamme oikeasta alakulmasta "Create" ja olemme nyt mallinnusnäkyssä. Voimme aloittaa mallinnuksen.

Meillä on kolme vaihtoehtoista tasoa kolmiulotteisessa piirustusnäkyssä. Koska haluamme aloittaa mallinnuksen tuotteen pohjasta, valitsemme XZ tason eli "XZ Plane" ja

painamme "Create sketch" 3D näkymästä tai "Start 2D sketch"  ylävalikon "3D model" tai "Sketch" välilehdeltä.

XZ-tasolle luomme pihakiven sketsin. Kivi on mitoitettu niin, että sen lyhempi sivu on puolet pitkästä sivusta. Jotta voisimme vaihtaa kiven kokoa nopeasti, tämän suhteen on säilyttävä kiven mittoja muutettaessa. Asetetaan pitkän sivun mitta valiten sketsiltä lyhyeen sivun mitta ja kertomalla tämä kahdella. Näin saadaan pitkän sivun mitan funktio. Käytetään näin lyhemmän sivun mittaa pidemmän sivun mitan määrittämiseksi. Käyttäen vastaavia funktioita mitoitetaan kivi kokonaan (Kuva 2).



Kuva 2. Kiven pohjan sketsi



Finish
Sketch

Painetaan sketsin lopettamiseksi "Finish sketch" näppäintä.

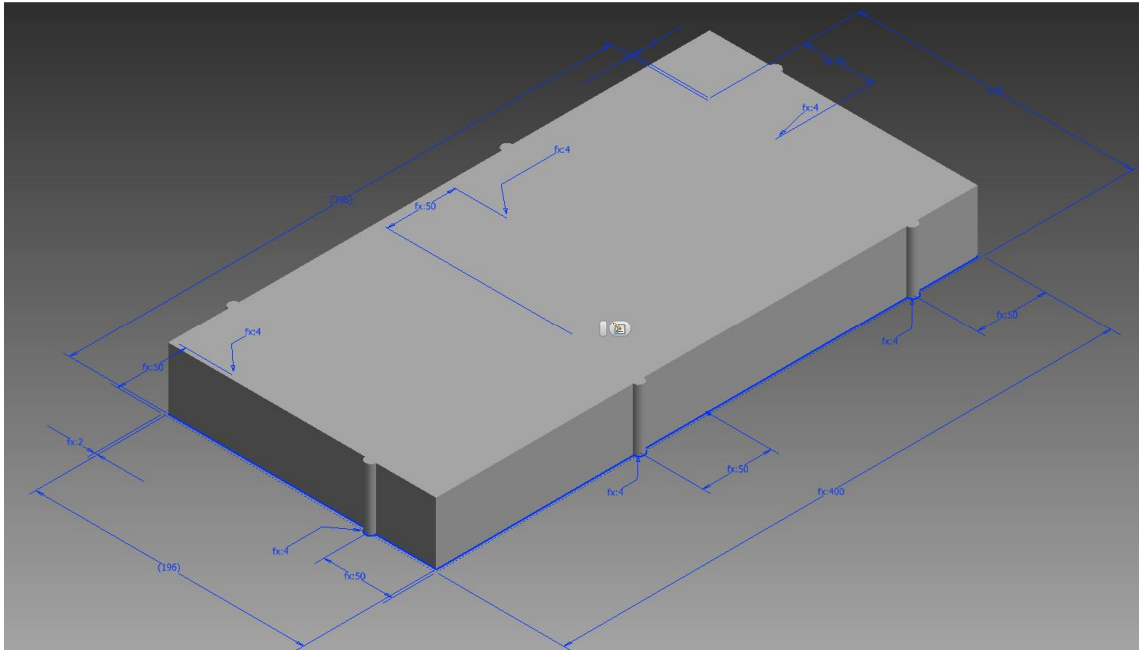
Seuraavaksi luodaan kivelle kolmiulotteisuus. Nostetaan muoto sketsistä "Extrude"




eli pursotus toiminnon avulla. Määritellään kappaleelle korkeuden millimetreissä.

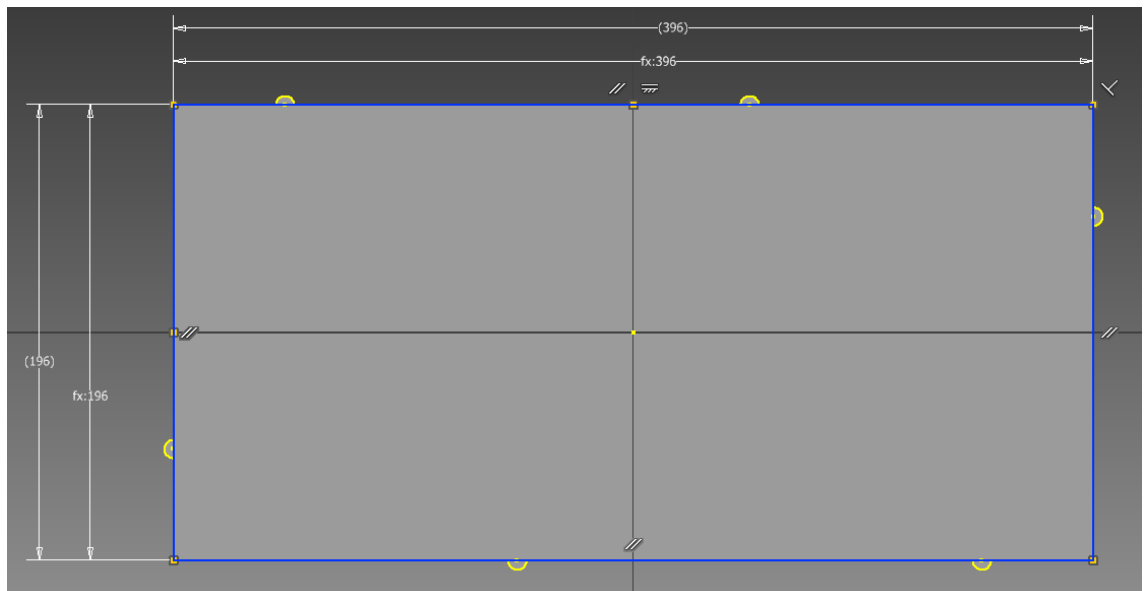
Tätä mittaa ei sidota funktioon sillä näin voidaan vaihtaa kappaleen korkeutta

tarvittaessa. Kappale on muodostunut, mutta sitä on vielä viimeisteltävä.




Kuva 3. Sketsin pursotus

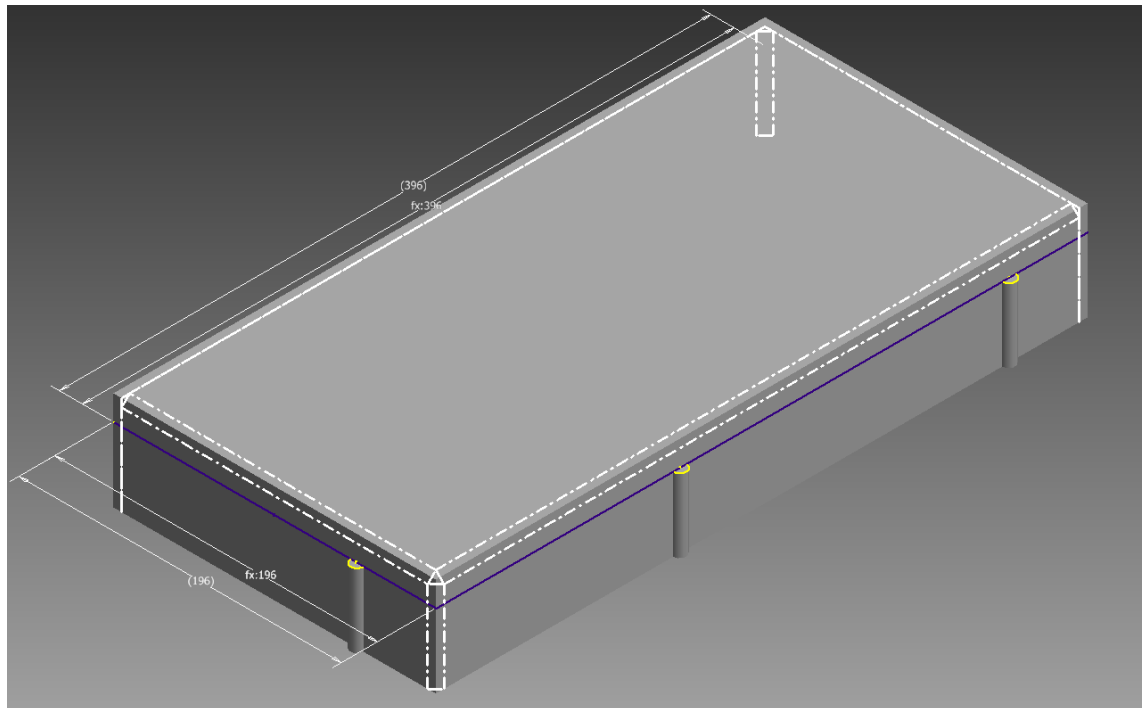
Valitaan seuraavaksi kiven yläpinta ja muodostetaan uuden sketsiinsamanmuotoinen neliö. Neliön jokainen kulma sidotaan "constrain"  toiminnoilla jo olemassa olevaan pintaan niin, että neliön sivu mukailee valmiin pinnan kuviota (Kuva 4).



Kuva 4. Pintaan muodostuva sketsi

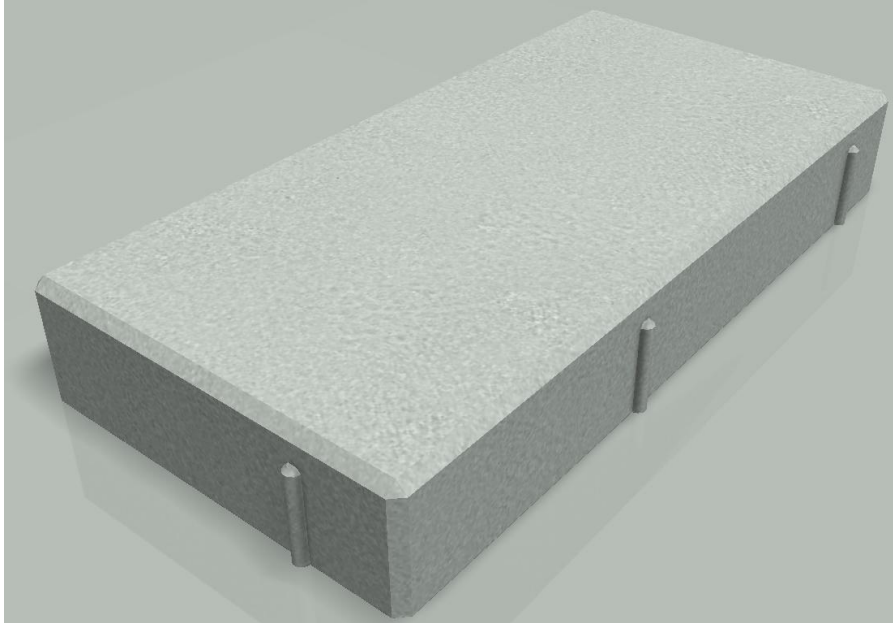
Viimeistellään tämäkin sketsi "Finish sketch" painikkeella ja käytetään taas pursotustyökalua, jotta pintakuvio tulee kolmiulotteiseksi.

Näin muodostunut kuutio on lähes valmis, mutta viimeistellään vielä pihakivi pyöristämällä terävät särmät "Chamfer"  toiminnolla. Jos reunan pyöristys halutaan tehdä samanmittaiseksi jokaiselta puolelta, voidaan tällöin valita kaikki pyöristettävät särmät samaan aikaan (Kuva 5).



Kuva 5. Kulmien pyöristys

Kun kaikki pinnat on viimeistely, voidaan päätteeksi tehdä renderöinti "View" välilehdellä. Tuotokuva ja tuotteen kolmiulotteinen malli ovat nyt valmiina ja renderöity tuotokuva (Kuva 6 s.15) lisätään tuotelistaukseen.



Kuva 6. Pihakivi 3D-ikkunassa renderöinnin jälkeen

Koska tuotteen mallinnukseen ja mitoitukseen käytettiin yksinkertaisia funktioita, on tuotteen mitat mahdollista muokata asiakkaan halun tai tarpeen mukaan vaihtaen vain yhden sivun mittaa. Tällöin tuotteen muodot säilyvät ennallaan ja muokkaus sujuu minuuteissa eikä tuotetta tarvitse mallintaa uudestaan eri mitoilla. [4.]

3.1.2 Pintakuvioidu pihakivi

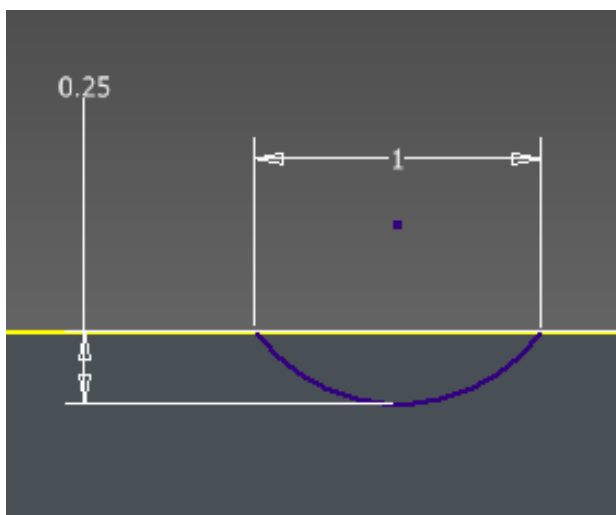
Pintakuvioidun pihakiven pohjana käytetään edellisessä esimerkissä mallinnettua pihakiveä. Muokataan pihakiven pintaa muodostaen siihen liukuestepintaisen kuvion, jota voi jatkossa hyödyntää myös esimerkiksi sisä- tai ulkokäyttöisissä laatoissa.

Kuten edellisessä esimerkissä valitsemme nyt kiven yläpinnan ja teemme siihen yksinkertaisen sketsin. Piirretään kiven pinnalle viiva 45 asteen kulmassa ja molemmat viivan päät "sidotaan" kiven ulkosärmään käyttäen "constrain" toimintoa. Tällä varmistetaan viivan pidentyminen ja lyheneminen kiven mittojen muuttuessa (Kuva 7, s.16).






Kuva 7. Ensimmäinen pintasketsi

Tämä sketsi on valmis ja sen voi lopettaa. Seuraavaksi on muodostettava kuvion syvyys ja muoto. Tämä tehdään valitsemalla kiven sivu ja aloittaen siihen uuden sketsin. Piirretään sivun yläkulmaan pienen puoliympyrän josta kuvion syvyys muodostuu. Jotta kuvioista ei tulisi liian syvä, puoliympyrän mitoiksi valitaan 0.25 mm syvyys suunnassa ja 1 mm leveys suunnassa. (Kuva 8) Sketsi on nyt valmis.

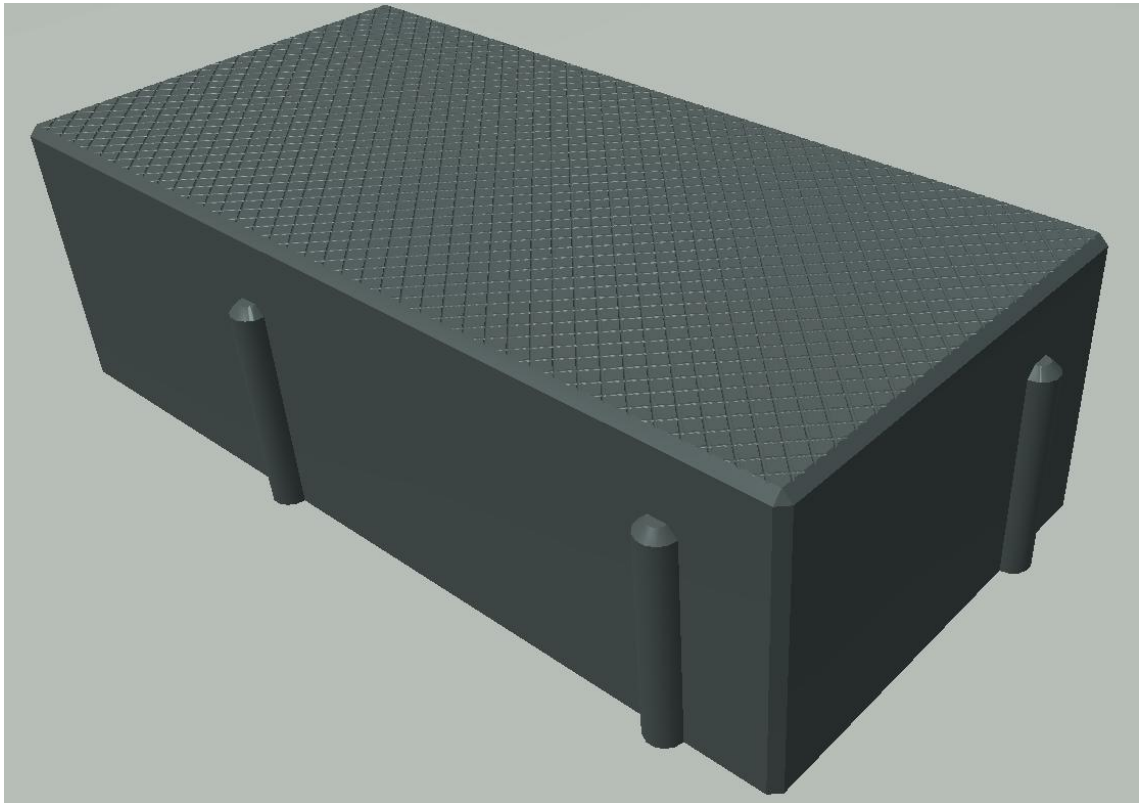


Kuva 8. Uran profiili sketsissä

Seuraavaksi käytetään "Sweep"  työkalua ja valikossa valitaan suunnaksi kuviolle ensimmäinen sketsi ja muodoksi toinen, vasta luotu, sketsi. Jotta saataisiin kiveen pintakuvio, poistetaan näin saatu muoto kiven pinnasta valitsemalla samassa valikossa "Cut"  eli pintaleikkaustyökalu. Ensimmäinen ura on nyt muodostunut. Tämän yhden uran avulla tullaan tekemään kiven pintaan kuvio.

Ensin ura peilataan "Mirror"  toiminnolla. Jotta urien väliseksi kulmaksi tulisi 90 astetta, valitaan tässä peilaavaksi pinnaksi YZ-taso ja lopputuloksena saadaan V-kirjaimen muotoinen uritus kiven pintaan. Nyt syntyneistä kahdesta vastakkaisesta urasta on mahdollista tehdä urituskuvio.

Valitsemalla "Rectangular pattern" -toiminto, avautuu toistotyökalun valikko. Toistettaviksi objekteiksi valitaan tällöin molemmat urat, asetetaan jakoväli, toisto molempiin suuntiin ja tarvittava toistojen määrä. Toistojen määrä voi olla suuntaa antava, kunhan muodostuva kuvio peittää koko pinnan. Ylimääräiset urat eivät tule näkymään lopputuloksessa. Toistoille on määriteltävä myös suunta. Tässä tapauksessa on mahdollista käyttää kiven pidemmän sivun särmää toistokuvion suunnan määrittämiseksi. Kuvion muodostuminen on onnistunut. Pintakuvioitu pihakivi on nyt valmis (Kuva 9, s.18).

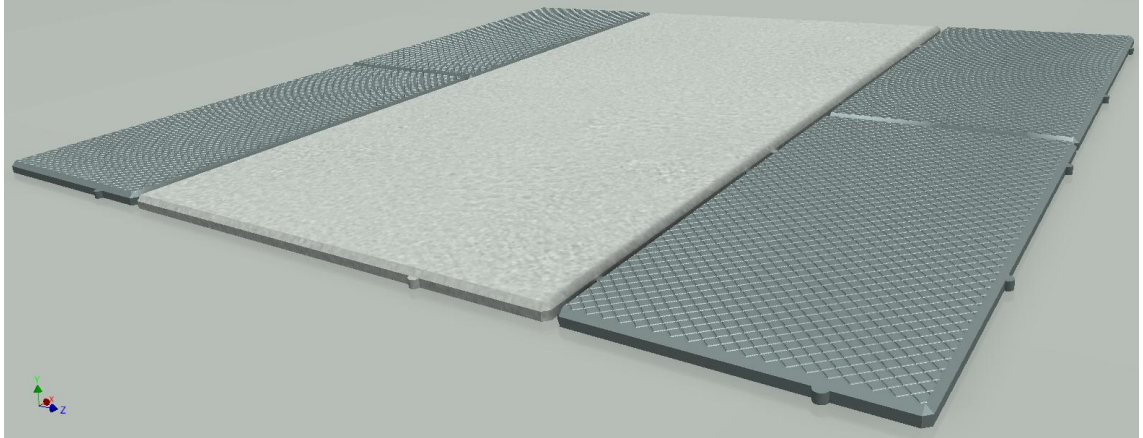


Kuva 9. Valmis pintakuviollinen pihakivi

Sillä urien suuntaviiva on kiinnitettyä "Constrain" työkalulla kiven sivuun on tämänkin tuotteen mitat muokattavissa lyhemmän sivun mitan vaihdolla. Pintakuvio tulee venymään tai kutistumaan itsestään mutta sen askelväli ja muut mitat säilyvät. Tällä tai vastaavalla tavalla voidaan luoda myös paljon vaikeampiakin kuvioita kiven pintaan kuten puun syitä muistuttava kuvio tai vastaava. Erillisestä tarpeesta ja asiakkaan toiveesta on mahdollista lisätä kiven pintaan jopa tekstiä tai kuvia. Näiden ollessa tilauskohtaisia mallinustehtäviä ei vastaavaa tähän opinnäytetyöhön sisällytetä. [4.]

3.1.3 Laatat

Nopealla paksuuden muokkauksella voi molemmista pihakivistä saada myös seinä- tai lattialaatan. Yhdistämällä kivet tai laatat kokoonpano- eli "Assembly"-mallissa saa niistä nopeasti mallinnettua pintakuvion. (Kuva 10, s.19) Näin voi myös sovittaa erilaisia väri- vaihtoehtoja yhteen.



Kuva 10. Laattojen kokoonpanon esimerkki 3D-ikkunassa

Laattojen paksuus on tässä 5 mm. Valmistusvaikeuteen ja tuotteen ulkonäköön liittyvistä syistä ohuempia laattoja ei todetusti ole kannattavaa tehdä. Käytettävän betonin ominaisuudet huomioiden tämä olisi käytännössä kuitenkin mahdollista, mikäli betonin runkoaineena ei tällöin käytetä 6 mm graniittisoraa. Betonikiven lujuus on tästä huolimatta sen verran korkea, että näinkin ohuet tuotteet olisivat erittäin kestäviä.

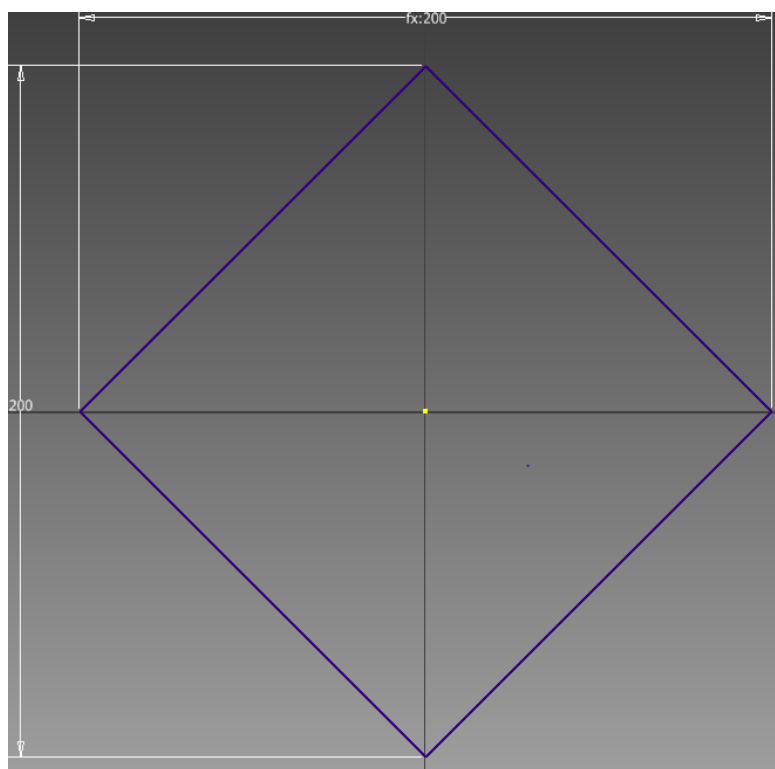
3.1.4 Erikoismuotoiset betonikivituotteet

Käyttäen 3D-tulostusteknologiaa betonin valumuottien valmistukseen on mahdollista tehdä mitä erikoisemman muotoisia betonituotteita. Pää-asiallisin este pinnaltaan monimuotoisten tuotteiden valamiselle on betonikivituotteen irrotus muotista. Kaikki muotit öljytään ennen valua ja betonikappaleet irtoavat öljytyistä muoteista hyvin helposti, niin kauan kun pöytää vasten olevan muotin pinnan ja muotin sivun välinen kulma on vähintään 90 astetta ainakin yhdessä suunnassa eli kahden vastakkaisen seinämän kohdalla. Toisin sanoen, pyramidinkin valaminen muotissa onnistuu niin kauan kun se valetaan ylösalaisin.

Tämä ehto vaatii erityistä tarkkuutta tuotetta suunnitellessa. Tosin monimuotoiset tuotteet on mahdollista valaa kahdessa tai useammassa kappaleessa, jotka liitetään toisiinsa jälkeenpäin. Tässä esimerkissä mallinnetaan joonialainen pylväs kahdessa osassa.


3D-tulostimella isojen tuotteiden tulostus on haaste. Pienten tulostusalueiden takia on mahdollista käyttää valumuotille maksimissaan 850 mm korkean ja noin 400 mm poikki- mitaltaan olevan lieriön muotoa tai tätä pienempiä valumuotteja. Nämä mitat huomioi- daan myös seuraavan tuotteen suunnittelussa.


Aloitetaan tämänkin mallin luonti XZ-tasossa. Ensimmäisenä sketsiin piirretään tasasi- vuinen neliö, jonka sivut ovat 45 asteen kulmassa. (Kuva 11) Neliö mitoitetaan niin, että sen mitta pysty- ja vaaka-akselilla tässä tasossa on maksimissaan 400 mm.







Kuva 11. Pilarin pohjan sketsi

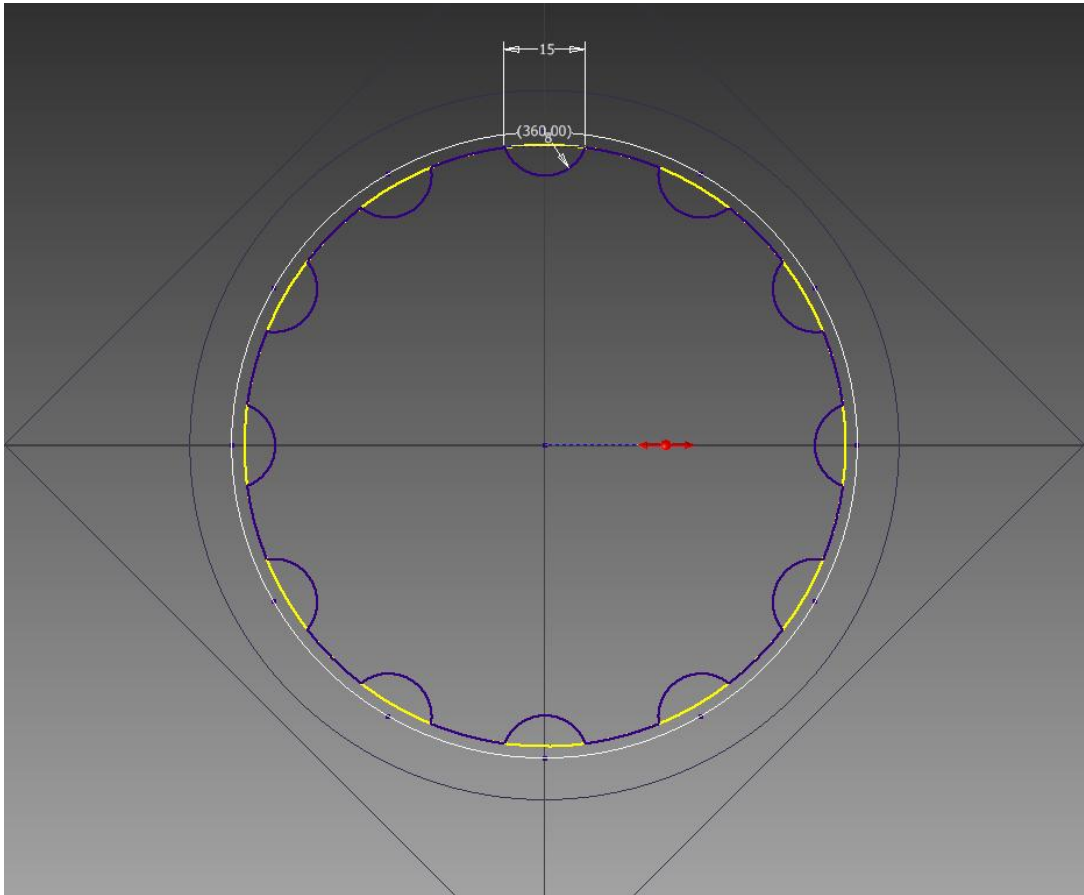
Juuri tällä kuvan muodolla tulee olemaan vielä etua mallinnuksen myöhemmässä vai- heessa. Tämä sketsi on valmis ja pursotamme sen käyttäen pursotuspaksuudelle funk- tiota joka antaa paksuuden, sivumitasta, tietyssä suhteessa. Pursotettuun pintaan teh- dään uusi sketsi, johon piirretään ympyrä. Tämäkin pyöristetään ja mitoitetaan suh- teessa neliön mittoihin ja pursotetaan edellisen pursotuksen funktiolla. Pursotetun lieriön

reunat pyöristetään "Fillet"  työkalulla. Pursotetaan pyöristyksen reunoilta vielä yksi lieriö, jonka pintaan nyt muodostetaan varsinainen pilarin pitkän osan kuvio. Kuten edel- lissä, kiinnitetään edellisen lieriön pintaan uusi ympyrä. Seuraavaksi piirretään sketsin

yläkulmaan puoliympyrä joka mitoituksen jälkeen toistetaan "Circular pattern"  toiminnolla.

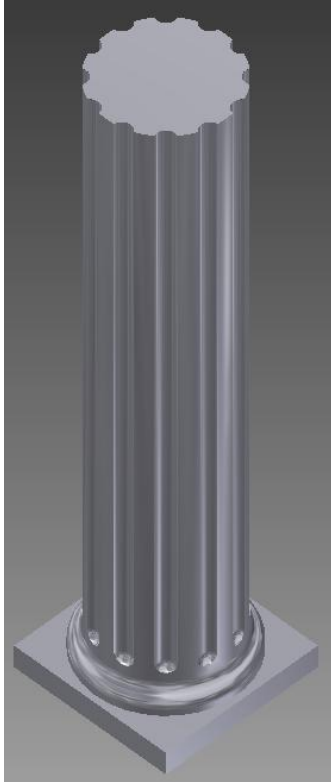
Käyttäen "Construction line"  toimintoa, Sketch välilehden ylävalikon viimeisestä sarakkeesta, piirretään ympyrän yläosaan suuntaviiva puoliympyrälle. Viiva mitoitetaan 15 mm:n mittaiseksi ja kiinnitetään ympyrän sivuihin ja annetaan sille suuntasuhde X-akselin suuntaan käyttäen "Constrain" valikon "Parallel"  toimintoa. Nyt, kun viiva on täysin kiinnitetty, piirretään siihen puoliympyrä käyttäen "Arc"  työkalua, jonka säteeksi asetetaan, tässä esimerkissä, 8 mm:ä. Nyt toistetaan viiva edessä kuvatulla työkalulla ja määritetään tarvittava toistojen määrä. Akseliksi, jonka ympäri kuvio toistuu, valitaan sivuvalikosta Y-akseli eli "Y axis".

Kun puoliympyrät ovat paikallaan, poistetaan ylimääräiset ympyrän osat puoliympyrän kohdalta käyttäen "Trim"  työkalua ja valiten poistettavat osat, jotka ovat kuvassa 12 keltaisella värillä. Sketsi on valmis ja sen voi päättää.



Kuva 12. Joonialaisen pilarin ylimmän osan sketsi


Pursotetaan tämä kuvio nyt tarvittavan pituiseksi, huomioiden 3D-tulostusalueen äärimittat. Tämän jälkeen mallin voi vielä viimeistellä kulmanpyöristys aikaisemmin jo käytetyllä, "Fillet" toiminnolla. Mallin alaosa on valmis (Kuva 13).



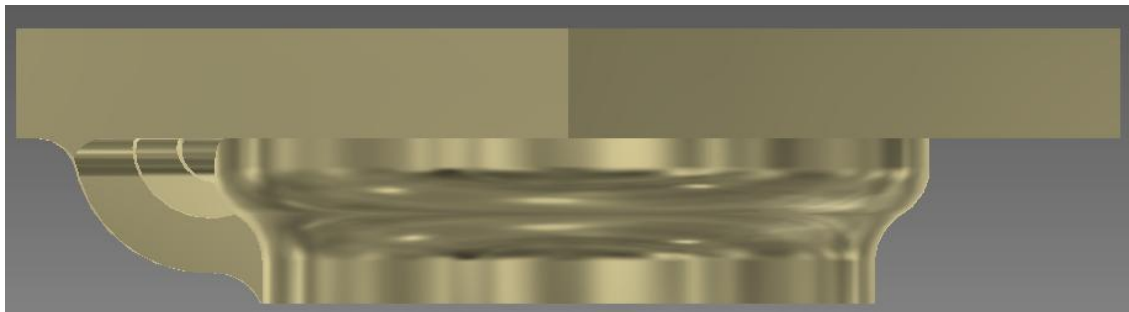
Kuva 13. Joonialaisen pilarin alaosa

Kopioidaan tämä malli pohjaksi ja muokataan siitä seuraavaksi pilarin yläosa eli hattu. Hattu jää pilarin varsinaista osaa lyhemmäksi, mutta kaikki muut muodot ja mitat säilyvät. Valitaan nyt sivuvalikosta XY-taso ja aloitetaan siihen uusi sketsi. Tässä vaiheessa olisi haastavaa tehdä kuviota 45 asteen kulmassa. Juuri tämän takia pilarin pohjassa ja nyt myös päässä olevan neliö asetettiin heti 45 asteen kulmaan.

Jotta pilarin olemassa oleva muoto näkyisi paremmin, painetaan F7 näppäintä, mikä saa mallin leikkautumaan käytössä olevan tasoon. Tämä vaikuttaa niin kauan, kunnes poistumme sketsistä, eli se ei aiheuta varsinaiseen malliin mitään muutosta. Muodostetaan pilarin kylkeen, yhdelle puolelle, suljettu kuvio, joka antaa muodon pilarille lisättävälle voluuttamaiselle lisäkkeelle. Koska tavallinen voluutta aiheuttaisi sen, että muotista poisto olisi mahdotonta, tehdään tämä osa vain voluutan näköiseksi.

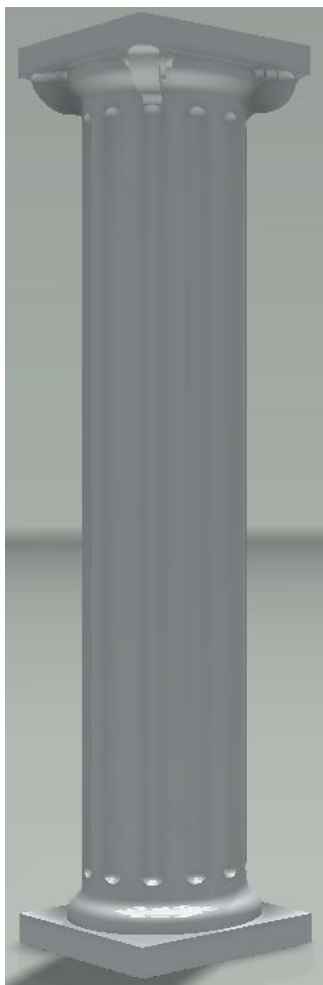
Voluuttakuvion ensimmäisen osan ollessa valmis annetaan sille muoto "Revolve"  eli pyöräytys toiminnolla. Valitaan profiiliksi äsken tehty sketsi, pyörimisakseliksi valitaan Y akseli, säteeksi valitaan aste, joka ei ylitä pilarin pään mittoja ja muodostussunnaksi "Symmetric" eli pinta muodostuu kuvion molemmille puolille.

Seuraavaksi toistetaan samat asiat vielä kaksi kertaa, mutta sketsin kuvio tehdään pienemmäksi ja muodostumissädettä kasvatetaan. Kun tämä on tehty, tarvittavat reunat pyöristetään taas "Fillet" toiminnolla. Nyt yksi neljästä voluutasta on valmis (Kuva 14).



Kuva 14. Keskenäinen joonialaisen pilarin pää, yhdellä voluutalla

Tämä muoto on vielä toistettava pilarin pään jokaiseen kulmaan. Käytetään tähänkin apuna "Circular pattern" toimintoa. Tässä valitaan, Ctrl-nappi pohjassa, kaikki edellä tehdyt muodot ja pyöristykset joko mallista, mutta helpommin tämä onnistuu sivuvalikosta valiten sieltä kaikki tarvittavat muodot. Pyörimisakseliksi valitaan tässäkin Y-akseli ja muodostettavien objektien määräksi 4. Tähän lasketaan myös jo olemassa oleva kapale. Pilarin pää on valmis ja yhdistäen nämä edellä tehdyt osat kokoonpanomallissa saamme tuotteen esimerkkikuvan. (Kuva 15, s. 24) Nämä kaksi osaa tullaan valmistamaan kuitenkin erikseen.



Kuva 15. Joonialaisen pilarin kokoonpano 3D-näkymässä


3.2 Tuotteen mallista muotin malli

Tuotteiden 3D-mallit luovat pohjan useammalle eri toiminnolle. 3D-mallista voidaan tehdä esimerkkikuvia asiakkaiden nähtäväksi. Pystytään myös luomaan mallitietokanta suunnittelijoiden käytettäväksi mallintaessa eri ohjelmistoissa. Tärkeämpänä näistä yrityksen kannalta on kuitenkin mahdollisuus tehdä mallien pohjalta valumuotteja jotka pystyttäisiin tulostamaan 3D-tulostimella. Tämä on ehdottomasti edullisin tapa saada tarvittavat erikoismittaiset muotit yrityksen käyttöön. Tulostamiseen käytettävän muovilangan hinta on 15 €:sta ylöspäin, viiden kilon kelasta. Tällaisesta kelasta pystytään valmistamaan useita pienmuotteja joiden hinta tulisi edullisemmaksi mitä miltään muotinvalmistajalta on mahdollista saada. Toisin muotin valmistuspohjan valmistamisen hinta alkaa 2500 €:sta, joten jokaisesta erikoismittaisesta muotista tulisi maksaa tämä kiinteä taksa ja sen lisäksi vielä muottien kappalemäärään sidottu hinta. [4.]


3.2.1 Pinnoitetun pihakiven valumuotin mallinnus

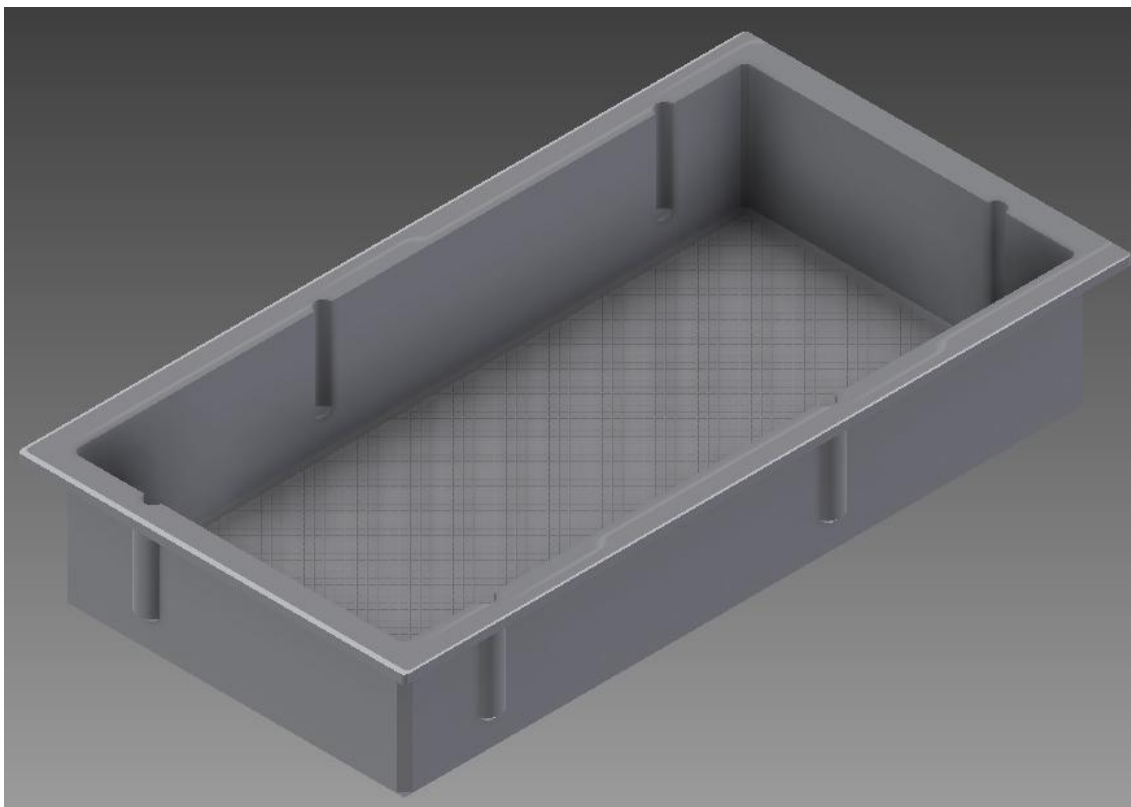
Tämä on vasta koevaluihin tarkoitettu muotti josta pystytään toteamaan teknologian toimivuus, tarkastellaan materiaalin käyttäytymistä, kirjataan muotin maksimi käyttökerrat ja voidaan todeta muotin heikot kohdat.

Muotin mallin luominen valmiin tuotemallin pohjalta on todella nopeaa kun kyseessä on suhteellisen helppo tuote kuten esimerkiksi kyseessä oleva pihakivi. Muotin mallin teko-pohjaksi avataan jo valmis tuotemalli ja tehdään muotti sen pohjalta.

"Shell"  eli kuorityökalua käyttäen voi tässä tapauksessa luoda muotin suoraan tuotteesta. Avautuvassa valikossa valitaan kuoren muodostumissuunnaksi mallista pois päin näytävä suuntanuoli. Tällöin työkalu tekee kuoren huomioiden kaiken pinnan kaarevuuden. Muotin seinämän perusmitoiksi valitaan jo käytössä olevien muottien seinämäpaksuus. Viimeiseksi valitaan vielä mihin pintaan kuori tulee avautumaan. Tämän jälkeen työkalu muodostaa kuoren edellisen mallin ympäri ja poistaa sisältä tarpeettoman osan automaattisesti.

Viimeistellään muotin malli tekemällä muotin yläreunaan vielä reunavahvistuskaista. Valiten muotin ohueen reunan tehdään siihen nyt uusi sketsi. Suorakulmion piirtotyökalulla piirretään muotin ympäri suorakulmio ja määritellään sen etäisyydeksi muotin reunaan 10 mm:ä jokaiselta puolelta. Kun yksi mitta on annettu, voimme kopioida seuraavan mitan arvon ensimmäisestä mitasta. Näin ensimmäisen mitan vaihtuessa kaikki reunavahvistuskaistan etäisyydet muotin pintaan vaihtuu. Pyöristetään suorakulmion kulmat vielä "Fillet" työkalulla.

Seuraavaksi on valittava geometrian projisointi eli "Project geometry"  työkalulla ole-massa olevan muotin seinän ulompi pinta. Näin sketsiä pursottaessa pursotus muotoilee seinämien geometriaa eikä sulje valuaukkoa. Sketsi on valmis. Pursotetaan sketsi "Extrude" työkalulla alaspäin. Muotin malli on valmis tulostettavaksi.



Kuva 16. Valmis pihakiven muotin malli

Kuten kuvasta 16 näkyy, on muotin pohjalla myös tarvittava urituksen peilipinta, jotta kiven pinnan karheus tulisi esille.

Vastaavalla tavalla voidaan tehdä muotteja myös laatoille tai muille erikoiskivituotteille. Erikoismuotoiset tuotteet tulevat kuitenkin vaatimaan erillistä muotin suunnittelua ja mallinnusta sillä niiden kohdalla ei kuoritoimintoa ole mahdollista suorittaa pinnan monimuotoisuuden vuoksi. [4.]

3.3 Valmismallin vienti ja tuonti eli "Export" ja "Import"

3.3.1 Mallin vienti Autodesk Inventor 2016 ohjelmasta

"Export" eli mallin vienti mallinnusohjelmasta yleiseen, eli muilla ohjelmilla avattavaan, tiedostomuotoon. Tällainen tiedostomuoto olisi IFC eli Industry Foundation Classes.

IFC (*Industry Foundation Classes*) on kansainvälinen ja jatkuvasti kehitettävä rakennusalan ISO/PAS 16739 standardi oliopohjaisen tiedon siirtoon tietokonejärjestelmästä toiseen. Lähde: Wikipedia

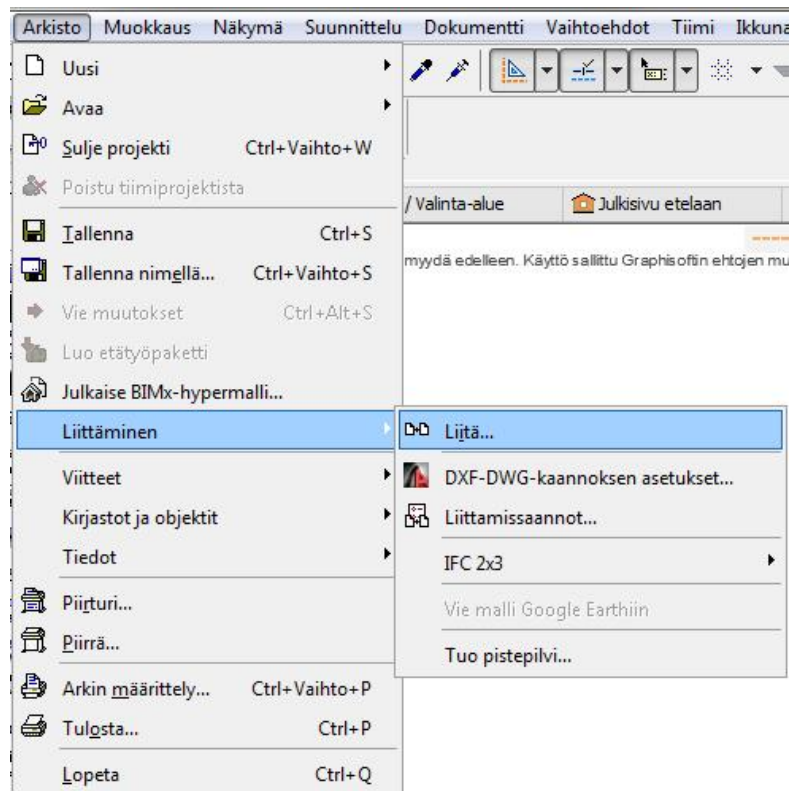
Valitettavasti Autodesk Inventor 2016 Professional ei tässä vaiheessa tue vientiä IFC tiedostomuotoon.

Toinen mahdollinen tiedostomuoto on Autodeskin oma, yleisessä käytössä oleva formaatti, DWG. DWG-formaatissa voi 3D-mallin tuoda muihinkin ohjelmiin liitto-työkaluilla. DWG-tiedostomuodon ollessa todella yleinen, ovat monet ohjelmistokehittäjät lisänneet mahdollisuuden tuoda malleihinsa tässä tiedostomuodossa olevat 3D-mallit. Näissä on kuitenkin yleensä paljon pieniä asioita, jotka täytyy tietää ja käydä läpi. Kaikki mallit eivät ole oletustuontiasetuksilla tuotavissa tai ne voivat toimia väärin. Pitkän asiaan perehtymisen jälkeen on todettu, että tässä tapauksessa on sopivinta käyttää DWG-formaattia tiedostojen vientiin, sillä tämä tiedostomuoto on todella yleinen. Tämän lisäksi mallin vienti DWG-tiedostoon ei vaadi mallin muuttamista tai formatointia. Se tapahtuu suoraan Autodesk Inventor -ohjelman päävalikosta löytyvältä "Export"-välilehdeltä. Tältä välilehdeltä valitaan "Export to DWG" toiminto ja malli tallentuu haluttuun muotoon säilyttäen kaikki ominaisuutensa. [4.]

3.3.2 Tuonti ArchiCAD ohjelmaan ja jälkikäsitteily

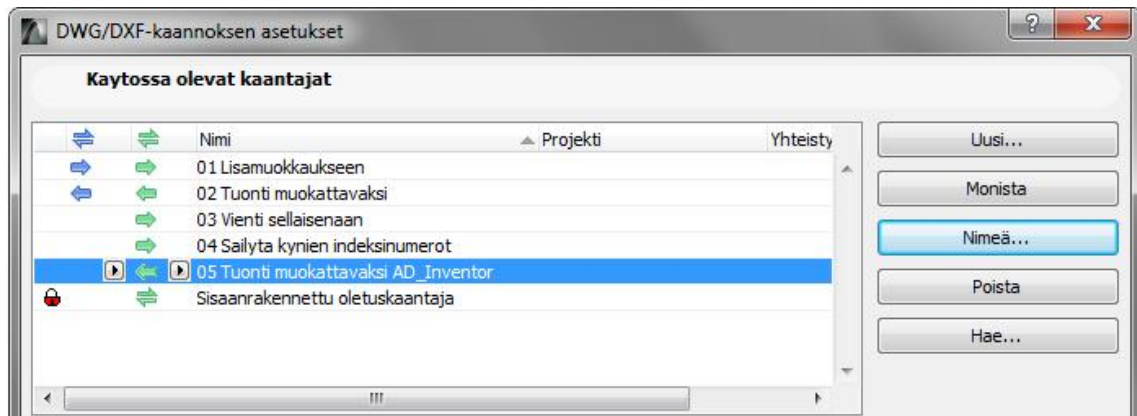
ArchiCAD on yksi tunnetuimmista arkkitehtisuunnitteluohjelmista. Tästä syystä on erittäin tärkeää, että tuotemallit saadaan tässä ohjelmissa toimiviksi. Tuotteiden käyttömahdollisuus suunnittelussa auttaa määrittämään tarvittavien tuotteiden määrän, niiden ulkonäön ja sopivuuden tulevaan rakennukseen. Tämä helpottaa määrälaskentaa, hankkeen tarjousvaiheen ohessa tapahtuvaa suunnittelua ja tarjousten tekoa. Valmistaja saa mallista tarvittavien tuotteiden kappalemäärät suoraan, välttäen käsinlaskemista.

Malli tuodaan muokattavaksi joko olemassa olevaan tai tyhjään projektiin. Vienti on mahdollista tehdä vain silloin kun ArchiCADissa on auki kerrosnäkyvä. Valitaan oikeanpuoleisesta näkymävalikosta tarvittava kerros johon malli tullaan tuomaan. Avataan "Arkisto" valikko ja sieltä "Liittäminen". Aluksi on tarkastettava tuontiasetukset, joten avataan tästä "DXF-DWG käännöksen asetukset" (Kuva17 s.29) ja valitaan sopivin tuontikäyttäjä.



Kuva 17. "Arkisto" valikon "Liittäminen" välilehti

Tässä käyttökelpoisin on, jo olemassa oleva, toinen viidestä vakiokääntäjästä, nimeltä "02 Tuonti muokattavaksi". Kääntäjä toimii yleisellä tasolla helpoille elementeille ja objekteille, mutta monimutkaisemman muotoiset kappaleet saattavat joskus vaatia asetusten säätöä. Tällöin kannattaa kopioida kyseinen kääntäjä valiten ensin se aktiiviseksi ja painamalla sitten "Monista" painiketta valikon oikeassa reunassa. Tällöin kääntäjästä syntyy kopio, jota voidaan rauhassa muokata, välttämällä mahdolliset riskit, että muutosten jälkeen kääntäjä ei toimisi enää lainkaan. Uuden kääntäjän voi nimetä haluamallaan tavalla painamalla "Nimeä..." painiketta. Sillä esimerkkituontia varten on valittu aikaisemmin mallinnettu ionialainen pylväs, oli tässä tarpeen tehdä muutoksia kääntäjän asetuksiin, jolloin luotiin uusi kääntäjä edellä kuvatulla tavalla. Uuden kääntäjän nimeksi asetettiin "05 Tuonti muokattavaksi AD_Inventor" (Kuva 18 s.30).

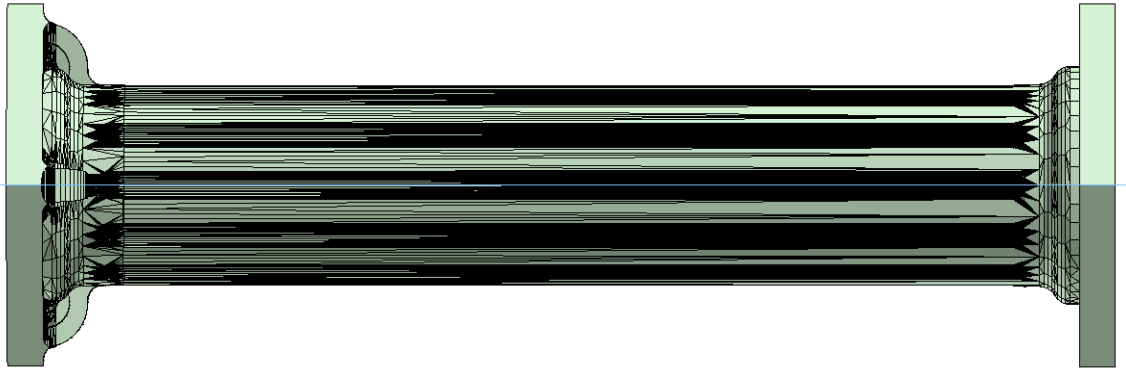


Kuva 18. "DWG/DXF-käännöksen asetukset" valikko

Sillä muokattavat kääntäjän asetukset eivät ole yleispäteviä kaikille mahdollisille malleille ja niiden määrä on huomattava, ei niiden toimintoja tässä käydä tarkemmin läpi. Kääntäjät ja niiden asetukset tallentuvat tiedostoihin ja niitä on mahdollista kopioida muiden käyttöön. Kun kääntäjän asetukset on tarkastettu, voidaan Valikko sulkea painamalla "Tallenna asetukset ja sulje". Jos valikon sulkee painamalla X-nappia, muutokset eivät tallennu.

Nyt on mahdollista tuoda malli muokattavaksi. "DXF-DWG-käännöksen asetukset" valikon yläpuolelta löytyy "Liitä" painike (Kuva17 s.29). Painamalla siitä pääsee valitsemaan mallista luodun DWG-tiedoston. Seuraavassa ikkunassa ohjelma kysyy, mitä tiedostoa ollaan liittämässä. Oletusasetus on "Liitä mallitilan sisältö avoimeen näkymään" joten sitä ei tarvitse muuttaa. Voidaan jatkaa seuraavaan ikkunaan painamalla "OK". Viimeiseen ikkunaan on tapauskohtaisesti määriteltävissä tuotavan objektin mittakaava, kulma, origo eli kiintopiste, sijaintikerros ja tarvittava kääntäjä. Näiden ollessa asetettu voidaan malli tuoda piirustusnäkyyn.

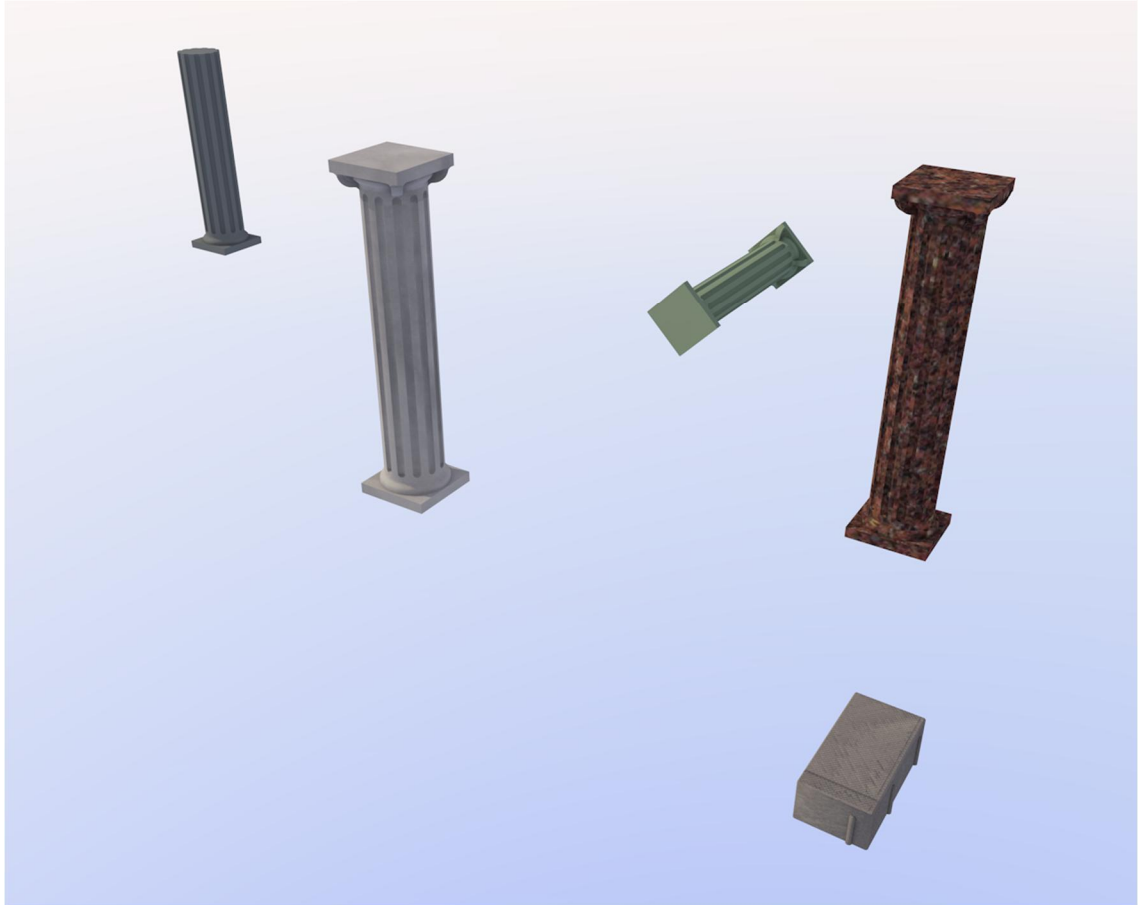
Koska Inventorissa on erilainen geometria, tuodussa objektissa on paljon ylimääräisiä pintaviivoja. (Kuva 19 s.31) Objekti voi olla myös väärässä kulmassa, sillä objekteja ei ArchiCADissa pysty kääntämään on objekti muokattava.



Kuva 19. Objekti ennen muokkausta

Klikkaamalla hiiren oikealla painikkeella objektia, avautuu objektin valikko, josta löytyy "Muunna muunteiksi" toiminto. Valitsemalla tämä toiminto, malli pilkkoutuu muunneltaviin osiin. Avaamalla nyt "Muunteen asetukset" voidaan määrittää objektin asetukset jotka tallentuvat viimeisteltyyn objektiin. Näistä oleellisin on reunojen muokkaus "3D" välilehdellä. Valitsemalla asetus "pehmeä", poistetaan objektin pinnalta ylimääräiset pinta- viivat. Asetuksia voidaan muokata tarpeen mukaan, esimerkiksi osan materiaali. Kun kaikki asetukset ovat oikein, voidaan muuttaa muunteet takaisin objektiksi.

"Arkisto" valikosta avataan "Kirjastot ja objektit" välilehti, ja valitaan "Tallenna valinta nimellä". Nyt voi syöttää objektille nimen ja joko tuoda se mallin sisäiseen kirjastoon tai tallennetaan tiedostona jos tämä halutaan jakaa. Nyt malli on muunnettu ArchiCAD kirjaston objektiksi. [1.] [2.]



Kuva 20. Tuotteet ArchiCADin 3D ikkunassa muokkauksen jälkeen

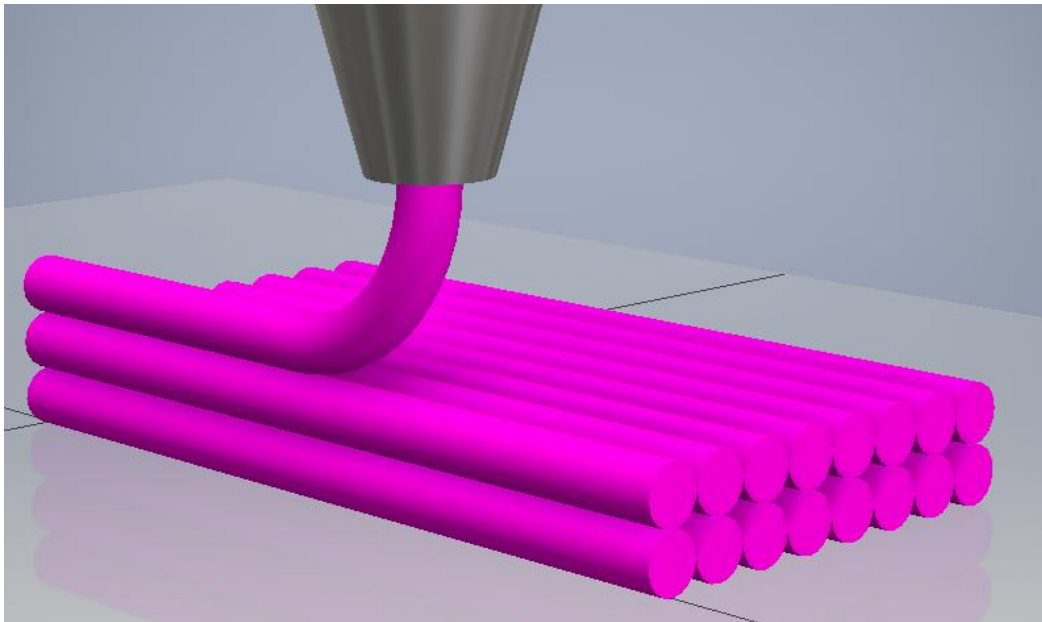
3.4 3D-skanneri betonituotteiden mallinnuskäytössä

Mahdollisuus skannata olemassa olevat esineet ja saada niistä 3D-malli tuo teknologialle lisää mahdollisuuksia. Skannaamalla luonnonpintoja kuten todellisia kivipintoja, puun kaarnaa tai syitä, voidaan skannatut pinnat liittää betonikiven pinnoitteeksi suoraan mallissa. Tämä antaa mahdollisuuden luoda mitä ainutlaatuisimpia tuotteita. Käyttäen 3D-skanneria ja jälkikäsitteilyohjelmistoja on mahdollista skannata mitkä vaan objektit.

Tätä on mahdollista hyödyntää varsinkin korjausrakentamisen yhteydessä. Vanhat, kuluneet, rikkoutuneet, pinnat voidaan skannata 3D-malliksi, korjata suoraan mallissa ja valaa vastaava muotissa tilalle. Sillä betonin pigmentointi antaa laaja värikartan, voi monia erilaisia kalliita kivipintoja rakennusten lattioissa, julkisivuissa tai kalusteissa korvata nopeasti ja kustannustehokkaasti. Betonin injektointi, jo olemassa olevan rakenteeseen kiinnitettävään, muotiin voisi korjata rikkoutuneen pinnan, jota ei pysty vaihtamaan tai poistaa laittaen tilalle uutta. [5.]

4 3D-tulostus

3D tulostus ei sinänsä ole uusi asia markkinoilla ja ehkäpä tämän takia nykyisin on myös monta tulostusteknologiaa. Ylivoimaisesti käytetyin ja suosituin tällä hetkellä on FDM eli Fused Deposition Modelling. Todella monet nykymarkkinoilla olevat kotikäyttöön tarkoitetut 3D-tulostimet toimivat tällä teknologialla. Käytännössä kuumasta tulostuspäästä pursotetaan läpi sulatettua muovia joka kerros kerrokselta muodostaa tulostettavan kappaleen muodon (Kuva 21). Yhden kerroksen paksuus voi vaihdella, asetuksista riippuen, 0.05 mm:stä ylöspäin rajoittuen tulostuspään maksimikapasiteettiin.



Kuva 21. FDM-tulostuksen periaate

Tällä teknologialla toteutetut tulostimet ovat halvempia ja toimintakyvyltään soveltuvat hyvin kotikäyttöön. Muotintulostukseen tarvittava tulostimen sen sijaan tulee kestää jatkuvaa ja pitkäaikaista käyttöä eli sen tulee olla kotitulostinta kehittyneempi. Vaihtoehtoja löytyy monia mutta jokaisella valmistajalla on omat etunsa. Toisia tulostimia väitetään huoltovapaiksi, toiset ovat paremmin ohjelmoituja, kolmannet eivät kuluta niin paljon sähköä. Oleellisin valintaperuste on kuitenkin tulostus laatu ja tulostusalueen koko. Isona tulostusalueena pidetään nykytulostimissa noin 20-25 cm joka suuntaan. Kuten aikaisemmin oli jo todettu, löytyy myös isompia tulostimia puoliammatilliseen käyttöön, mutta näiden hinta voi olla turhauttavan suuri. [5.]

4.1 3D-tulostimen hankinta yrityskäyttöön

Pitkän etsinnän tuloksena, muottien tulostukseen löytyi hyvin tarkoitukseen sopiva 3D-tulostin. Kyseisen tulostimen tulostusalue, josta on maininta myös mallinnus-osiossa, on huikeat 400 mm poikkipinnaltaan oleva ja 850 mm korkea lieriön alue. Verrattavaksi otetut, harvemmat, tuotantokäyttöön valmistetut, 3D-tulostimet yltävät tulostusalueeltaan 400 mm pitkiin kappaleisiin. Tällöin tulostusalueen korkeus on kuitenkin alle 300 mm. Tämän lisäksi, tuotantoon tarkoitettut tulostimet ovat hinnaltaan yli 10000 euron arvoisia ja niiden käyttökustannukset ovat huomattavasti korkeammat, sillä ne käyttävät tulostamiseen erikoisempaa teknologiaa ja kalliimpia materiaaleja. Tämän tulostimen hinta on kuitenkin alle 4000 euroa, mikä vastaa erikoismittaisen muotin tilausta tavalliselta muotinvalmistajalta. Tämän lisäksi, kyseinen tulostin kykenee tulostamaan muotteja sekä HIPS- että FLEX-muoveista, jotka on valittu testattaviksi tulostusmateriaaleiksi. [5.] [7.]

4.2 Muotin tulostus

Muotin tulostus näillä materiaaleilla ei oleellisesti eroa. Molemmat soveltuvat käytettäväksi FDM-tekniikalla tulostavassa, käyttöön valitussa, tulostimessa. Seuraavaksi käsitellään näiden hyvät ja huonot puolet sekä soveltuvuus betonikiven muotin materiaaliksi.

4.2.1 Kovamuovimuotti HIPS-muovista

HIPS on lyhenne englannin kielen sanoista *high impact polystyreen* eli iskunkestävä polystyreeni. HIPS-muovilla on ominaisuuksia, jotka erottavat sen muiden materiaalien joukosta, tämän takia se valittiin jatkokehitykseen. HIPS-muovista valmistetaan muoviosia myös tyhjiömuovaustekniikalla ja tällaisten osien käyttötarkoitukset vastaavat hyvin betonimuotin tarpeita.

Kuten nimi kertoo, on HIPS erittäin kestävä, kuten myös kevyt ja täysin kierrätettävä. Sillä on hyvä lämmönsietokyky, ja pieni vedenimukyky, mikä on erittäin tärkeää betonimuotteille sillä HIPS ei vaikuta betonin kuivumiseen imemällä siitä vettä.

ABS ja PLA -muoviin verrattuna HIPSin vedenimukyky on 0.05-0,08% kun taas ABS muovilla se on 0.2-0.4% ja PLA-muovilla jopa 0.5-50% eli PLA on biohajoavaa. PLA:n

biohajoavuutta voi hyödyntää tosin niin, että tuotetta ei irrotettaisi muotista ollenkaan vaan annettaisiin muotin syöpyä tuotteen pinnalta pois itsestään.

Toinen HIPS-muovin tärkeä ominaisuus on sen lämmönsieto. ABS ja PLA -muovit kutistuvat tulostuksen aikana, HIPSille tätä ei tapahdu lähes ollenkaan. Tämä on erittäin tärkeää, sillä jos muotti on korkea, voi materiaalin kutistuminen muuttaa muotin muotoa oleellisesti.

HIPS on taipuisa mutta kuitenkin kova, betonikappaleen irrotus muotista esimerkiksi paineilmalla tai koputtamalla onnistuu ilman muotin vahingoittumista. HIPS-muovin pintaa voi helposti työstää koneellisesti ja se on vaaraton ympäristölle eli sen sulatuksesta ei aiheudu haitallisten kemikaalien haihtumista joten tulostus voi tapahtua myös yleisessä tilassa. HIPS muovi hajoaa vain limoneenissä, joten se kestää melko hyvin muiden kemikaalien vaikutuksen ja öljyämisen.

HIPS-muovin voidaan ominaisuuksien perusteella todeta soveltuvan muottikäyttöön erinomaisesti. Muotin käyttökertojen määrä tulee varmistumaan muotin koekäytön yhteydessä. Muovin kaikki ominaisuudet ovat kuitenkin todella lupaavia ja tämän muovin käyttö muotin valmistukseen olisi kustannustehokasta. [5.] [7.]

4.2.2 Silikonimuotti FLEX-muovista



Kuva 22. FLEX-muovista valmistettu putki [7.]

FLEX-muovi on nimensä mukaisesti taipuisa. Tämän muovin käyttö muotissa toisi etuja joihin HIPS-muovia käyttämällä ei päästä. Muotin mahdollinen käyttökertojen määrä voi jopa tuplaantua HIPS-muovista valmistettuun muotiin verrattuna. Tämä on mahdollista koska muotista poisto on helpompaa eikä aiheuta muotille kovin suurta mekaanista rasitusta. Erittäin isona erona, kovamuovista tehtyyn muottiin verrattuna, on myös se että tuote voi olla monimutkaisempi ja muodot voivat tässä olla myös tietyssä määrin sisään-päin kääntyviä mikä on mahdotonta toteuttaa kovasta muovista valmistetulla muotilla.

FLEX-muovista tehty muotti tulee olemaan taipuisa, tästä on sekä etua että myös haittaa. Haittana tässä tapauksessa on se, että mikä tahansa FLEX-muovista tehty muotti tulee tarvitsemaan tuentaa sillä betonimassan paineen alla tulee menettämään muotonsa erittäin herkästi. Jos on mahdollista, tulee muotille tehdä paksummat seinämät tai lisätuenta kovamuovista. Tällaisen muovin lämpökutistuminen on korkea ja ison muotin tulostus siitä on hyvin vaikeaa. Tämän muovin soveltuvuutta muotinvalmistukseen voidaan kyseenalaistaa, mutta kokeilu on mahdollinen, sillä mikäli muotin valmistus onnistuu, tämä lisäisi tuotteiden muotomahdollisuuksia. [5.] [7.]

5 Kustannusvertailu

3D-tulostus on edullinen tapa teettää muotit vain siinä tapauksessa, jos tulostus on tehty itsenäisesti. 3D-tulostusyritykset veloittavat korkean hinnan tuotteiden tulostuksesta.

Hinta kuutiosenttimetristä muovitulostetta vaihtelee 2 euron molemmin puolin riippuen mallin koosta. Tähän lisätään yleensä kiinteä maksu joka voi vaihdella 15 ja 70 euron välillä riippuen myöskin mallin koosta. Tulostusyritysten 3D-tulostimet ovat tämän lisäksi tulostusalueiltaan pieniä mikä voi rajoittaa muottien tulostusmahdollisuuksia. Tähän perustuen, 3D-tulostuksen ulkoistaminen ei ole kannattavaa.

3D-tulostimen hankinta tulee koostumaan useista kuluista. Itse tulostimen hinta valmistajalta on noin 3500 euroa. Maksutavasta riippuen tämä voi kuitenkin vaihdella. Tämän lisäksi, jollei tulostimen valmistajalla ei ole Suomessa maahantuojaa, on tulostin kuljetettava Suomen alueelle, jolloin on syytä selvittää, minkälaisia tullimaksuja tästä voi aiheutua. Myös tulostimen kuljetuskustannukset itsessään voi olla todella suuria. Lähes kaikki ammattikäyttöön tarkoitetut tulostimet ovat kooltaan yli metrin korkeita ja painoltaan

useita satoja kilogrammoja. Tällaisen tulostimen kuljetus Suomeen voi maksaa 200 - 1000 euron väliltä riippuen valmistajan sijainnista.

Oma 3D-tulostin on kuitenkin käyttökustannuksiltaan suhteellisen edullinen. Hinta 800 kuutiosenttimetrille muovia, mikä vastaa yhden kilon painoista muovinauharullaa, on noin 15 - 20 euroa. Tällaisesta rullasta on mahdollista valmistaa noin 3 täysmittaista pi-hakivimuottia. Muotin hinta on tällöin noin 5 - 7 euroa. Muovin lisäksi voidaan ajoittain tarvita tulostuspään eli pursotuspään vaihtoa. Tämä on kuitenkin tarpeen noin kolmen kuukauden välein ja kustannus on noin 30 euroa. Näiden vaihto on ohjeita seuraten helppoa eikä vaadi ammattilaisen apua.

Tuotteiden oikeaoppinen mallinnus edesauttaa tuotteen muokattavuutta ja mallintamiseen käytettävä aika lyhenee huomattavasti jos kyseessä on tyyppituote. Erikoistuotteen mallinnuksen voi tarvittaessa ulkoistaa. Mallinnustyö on noin 20 - 25 euroa tunnilta ilman arvonlisäveroa. Erikoisempi malli on noin 5 tunnin työ mikä ei sinänsä ole kallis ja erikoistuotteen ollessa kyseessä tämä kustannus veloitetaan tuotteen tilaajalta.

Seuraavaksi esitetään lyhyt laskelma muotintekokustannuksista erikoistuotteelle. Laskelma pohjautuu aikaisemmin esitettyihin kustannuksiin.

Taulukko 4. Esimerkinomainen kustannuslaskelma erikoismittaisen tuotteen muotin valmistukselle

Kustannus	Erikoismittainen tuote jonka muotti valmistetaan tehtaalla	3D-tulostus ulkoistettu	Oma 3D-tulostin
Mallinnus 5h	500,00 €	124,00 €	124,00 €
Materiaalimäärä 240 cm³	0,00 €	480,00 €	7,00 €
Valmistuskulut	3 500,00 €	20,00 €	15,00 €
Kappalemäärästä riippuen (10kpl)	20,00 €	4 320,00 €	63,00 €
Toimituskulut	100,00 €	40,00 €	0,00 €
Yhteensä	4 130,00 €	4 984,00 €	209,00 €

Taulukon laskelma huomioiden, yhden erikoismittaisen tuotteen valmistamisen kulut, ulkoistettuna muottitehtaalle tai 3D-tulostusyrietykseen, kattaisi jo tulostimen hankinnan kulut lähes täysin. [5.]

6 Tulokset ja yhteenveto

Kehitetty muotinvalmistusmenetelmä on sekä kustannuksiltaan että toimivuudeltaan nykyisin käytössä olevia menetelmiä tehokkaampi.

Tämän teknologian käytön seurauksena voi yritys vähentää kulujaan huomattavasti ja toiminta voi myös laajentua. Markkinoille on mahdollista tuoda erikoismittaisia ja jopa mittatilaustyönä tehtyjä, erikoisia betonituotteita. Toiminta-alueeseen voisi tulla myös korjausrakentamiseen liittyviä töitä.

Markkinoilla ei ole tällä hetkellä samanlaista teknologiaa. Tämän tekniikan käytön laajentuessa voisi sille löytyä myös muita käyttömahdollisuuksia.

Betonikivituotteistus ja tällaisten tuotteiden käytön laajentuminen voi tuoda rakennusmarkkinoille aivan uuden näkökulman.

Lähteet

- 1 Graphisoft SE, "ArchiCAD for AutoCAD Users" Graphisoft ArchiCAD -ohjekirja Julkaistu 11.6.2011
- 2 David Nicholson-Cole "Object Making with ARCHICAD: GDL for Beginners" Julkaistu 1.6.2000 ISBN-10: 9630037262
- 3 Timo Leppänen, Betonirakenteet lyhennetty kaavakokoelma (SFS-EN 1992-1-1)" Julkaistu 18.12.2015
- 4 Autodesk koulutussivusto <https://knowledge.autodesk.com/> Päivitetty 2016
- 5 3D tuotetieto <http://3dtoday.ru/wiki> Luettu 21.12.2015
- 6 Art Beton Oy betonikivituotteiden valmistaja. internetsivu <http://art-beton.fi/> Päivitetty 30.3.2015
- 7 3D tulostusmuovin valmistaja 3D Systems Inc. internetsivu <http://www.3dsystems.com/> Päivitetty 2015

Betonin tutkimustulosten tulosteet

Kahden betonikappalesarjan tutkimustulokset. 6kpl/sarja. (Sarja1/2)

17.03.2016



Metropolia ammattikorkeakoulu
Betonilaboratorio
(Agricolankatu 1-3, 00500 Helsinki)
PL4023, 00079 Metropolia

Toni
Technik

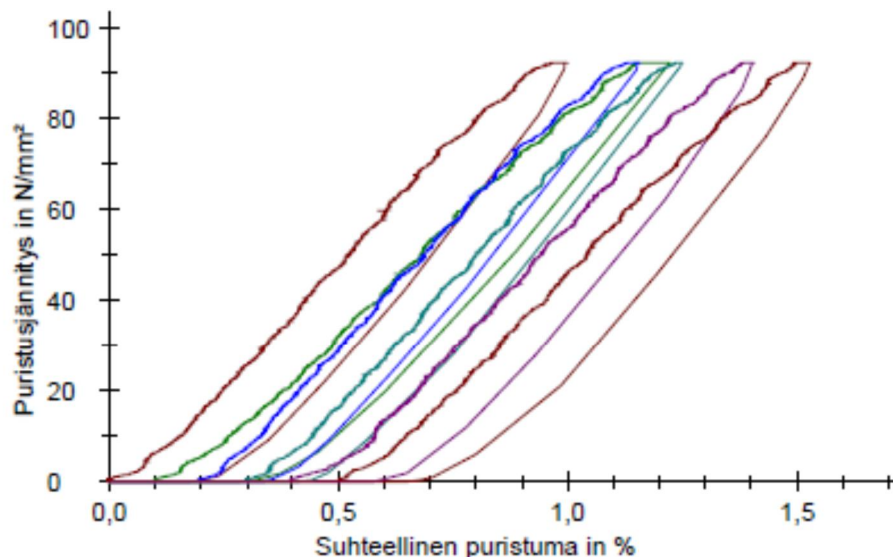
Parameter table:

Tester	: Denis Koloskov	Machine data:	Controller TT0224
Customer	: Art-Beton Oy		PistonStroke
Test standard:	EN 12390-3		LoadCell 2 MN
Creation date:	13.03.2016 16.00 +2GMT		
Age	: 5 T		
Other	: Black max. 6mm raekoko ilman kuitua		

Results:

Legends	Nr	ρ kg/m ³	F_m N	σ_m N/mm ²
	1	2423,70	2074525,63	92,20
	2	2447,41	2074535,13	92,20
	3	2411,85	2074567,38	92,20
	4	2417,78	2074589,50	92,20
	5	2429,63	2074581,25	92,20
	6	2429,63	2074605,38	92,20

Series graphics:



Statistics:

Series n = 6	ρ kg/m ³	F_m N	σ_m N/mm ²
x	2426,67	2074567,38	92,20
s	12,29	31,33	0,00
v	0,51	0,00	0,00

(Sarja2/2)



Metropolia ammattikorkeakoulu
Betonilaboratorio
(Agricolankatu 1-3, 00500 Helsinki)
PL4023, 00079 Metropolia

17.03.2016

Toni
Technik

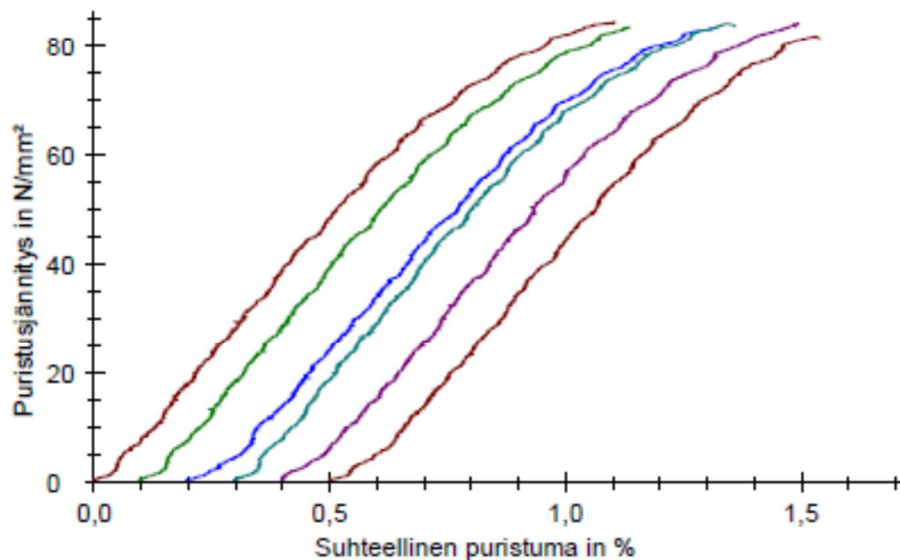
Parameter table:

Tester	: Denis Koloskov	Machine data:	Controller TT0224
Customer	: Art-Beton Oy		PistonStroke
Test standard:	EN 12390-3		LoadCell 2 MN
Creation date:	13.03.2016 16.00 +2GMT		
Age	: 5 T		
Other	: White max. 6mm grv. with plastic fiber		

Results:

Legends	Nr	ρ kg/m ³	F_m N	σ_m N/mm ²
	1	2343,70	1901394,00	84,51
	2	2328,89	1880179,00	83,56
	3	2340,74	1878540,50	83,49
	4	2349,63	1894990,00	84,22
	5	2349,63	1896536,13	84,29
	6	2352,59	1841911,75	81,86

Series graphics:



Statistics:

Series	ρ kg/m ³	F_m N	σ_m N/mm ²
n = 6			
x	2344,20	1882258,56	83,66
s	8,67	21808,79	0,97
v	0,37	1,16	1,16