



TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOO

Kristjan Palm

KUPPELHOONE LOOMISE BIM PROTSESS JA ENERGIATÕHUSUSE ANALÜÜS

LÕPUTÖÖ



Kristjan Palm

KUPPELHOONE LOOMISE BIM PROTSESS JA ENERGIATÕHUSUSE ANALÜÜS

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut
Hoonete ehitus
Juhendaja: Anti Hamburg

Tallinn 2024

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, **Kristjan Palm**

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Kuppelhoone loomise BIM protsess ja energiatõhususe analüüs

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

Autorideklaratsioon

Mina, **Kristjan Palm**

tõendan/tõendame, et lõputöö on minu/meie kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

Juhendaja **Anti Hamburg**

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

(allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäevad digiallkirjades)

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1 KUPPELHOONED	7
1.1 Geodeetilise kuppelhoone kujunemine	7
1.1.1 Kuldne suhe	8
1.1.2 Tippude koordinaadid	10
1.1.3 Tahkude külje pikkused	10
1.2 Ajalugu	11
1.3 Kuppelhoone eelised ja probleemid	14
2 HOONE LOOMISE BIM PROTSESS	15
2.1 Revit 2023 – Conceptual Mass	15
2.1.1 Ikosaeeder - 3V geodeetuline kuppel	16
2.1.2 Space – Room elemendi lisamine	18
2.1.3 Lihtsustatud geomeetria	20
2.1.4 Space – Room elemendi lisamine lihtsustatud geomeetriaga mudelile	21
2.1.5 Tulemus	22
2.2 SketchUp Pro 2024	23
2.2.1 Ikosaeeder - 3V geodeetuline kuppel	23
2.2.2 Building body ja Zone Geometry	26
2.2.3 Tulemus	27
2.3 IDA-ICE 5.0	27
2.4 3V mudeli loomine	28
2.4.1 Koordinaatide muutmise	32
3 ENERGIATÕHUSUSE ANALÜÜS	36
3.1 Järeldus	36
KOKKUVÕTE	38
SUMMARY	40
VIIDATUD ALLIKAD	42

SISSEJUHATUS

Kuppelhooned disainiti 20 saj. algul, kuid on leidnud vähe praktilist kasutust. Oma erilise geomeetria tõttu on keerulisem lahendada kuppelhoone ruumilahendust, sest kaldus välisseinad ei anna suuri võimalusi neid tavapäraselt kasutada. Kuid tänu oma konstruktiivsetele omadustele, on hooned leidnud kasutust ekstreemsemates keskkondades, nagu näiteks polaar uurimisjaamad, mis on tugevate loodusjõudude mõju all. Geodeetilise kuppelhoone konstruktsioon koosneb diagonaalidest, milles surve ja tõmbejõud ühtlustuvad, see annab konstruktsioonile parema vastupidavuse äärmuslike koormuste suhtes nagu näiteks tugevad tuuled või lumekoormus. Samuti on seda tüüpi hooned hinnatud taimekasvatajate poolt kasvuhoonetena nende ruumikuse, valguse- ja kogu sfääri ulatuses temperatuuri ühtlaselt jaotumise tõttu. Ei saa mööda vaadata sellist tüüpi hoonete pilkupüüdvast välimusest, mis annab võimaluse kasutada neid mistahes abi- ja dekoratiivsete rajatistena.

Kuppelhoone loomise protsess erineb klassikalise hoone loomise protsessist suures pildis vaid geomeetriliselt. Hoone loomise BIM protsess ja energiatõhususe analüüsi analüüs on samad nagu iga teise klassikalise hoone puhul. Oluline on leida kõige sobivamad ning tõhusamad tarkvarad ja meetodid vajalike protsesside lahendamiseks. Üldiselt ei ole erinevad BIM tarkvarad mõeldud looma hoonete mudeleid, milles esinevad ruumid on valdavalt kaldus. Seetõttu tuleb leida lahendused, mis sobituvad üksteise võimalustega ja üldiste BIM protsessi nõuetega, et saavutada sobiv arhitektuurne keha, millega minna edasi kogu hoone loomise ja projekteerimise protsessiga.

Uurimustöö eesmärgiks on läbi BIM protsessi jõuda geodeetilise kuppelhoone energiatõhususe analüüsini IDA-ICE tarkvaraga. Energiatõhususe analüüsini jõudmiseks on vaja läbi BIM protsessi loomise saavutada 3D mudel, millest on võimalik välja eksportida *Room* või *Space* element. Vajalikuks mudeldamiseks kasutatakse Revit 2023, Sketchup Pro 2024 ja AutoCAD 2024 tarkvarasid. Jõudmata mudeliga *Space* või *Room* elemendini, ei ole võimalik energiatõhususe analüüsi teostamine IDA-ICE tarkvaraga. Eelnevate programmidega ebaõnnestumisel on teoreetiliselt võimalik mudeldada otse IDE-ICE tarkvaras. Kuid kuna IDA-ICE ei ole mõeldud väga keeruka hoone geomeetria modelleerimiseks, ei pruugi selle kasutatavad tööriistad luua kõikvõimalikke kujusid või jääb programm hätta kaldpinnalise keerukama geomeetriaga. Seetõttu on eesmärk luua sobilik keha väljaspool IDA-ICE tarkvara ja alles viimase variandina katsetada geodeetilise kupli mudeldamist IDA-ICE's.

Uurimuse eesmärgini jõudmisega saavutame võimaluse arendada kuppelhoonete loomise BIM protsessi ja projekteerimist tervikult: leida sobivad viisid vajaliku mudeli loomiseks; välistada lahendused millega ei ole võimalik protsessi lõpuni viia; saada informatsioon vajalike analüüside tarbeks ja luua alused kuppelhoonete energiatõhususe analüüsimiseks. See omakorda aitab tutvustada inimestele seda tüüpi konstruktsiooni ja selle positiivseid omadusi nii koormustaluvuse, kui ka energiatõhususe osas.

Uurimustööd koostades ei ole tuvastatud teisi sarnaseid uurimusi, mis keskendusid geodeetilise kupli energiatõhususe analüüsi teostamisele läbi BIM protsessi, kasutades selleks 3D mudeleid, ruumi elemente või otse simulatsiooni tarkvaras mudeldamist. Võimalik on leida palju erinevaid analüüse konstruktiivsele osale, selle eelistele ja selle osa lahendamisele ehituses kuid leitav ei ole energiatõhususe analüüse geodeetiliste kuplite kohta.

1 KUPPELHOONED

Kuppel, tuleb ladinakeelsest sõnast "domus", mis tähendab kera ülemise osa õõnsat elementi. Kuppelkonstruktsioonid on arenenud kaarkonstruktsioonidest ja neid on rajatud läbi inimajaloo üle maailma. Kuplid, nagu ka püramiidid, on rajatiseid mida leiab üle maailma aegadest millal kõik kultuurid üksteist ei tundnud, juba vanast ajast on säilinud massiivsed kuplid religioosete hoonete katustel. Peamiselt rajati selliseid konstruktsioone looduslikest- ja tehiskividest, kuid ka jääst ja mudast. Samuti leiab sarase konstruktsioon kasutust ka inimeste igapäevastes tegemistes, nagu näiteks ahjudena.

1.1 Geodeetilise kuppelhoone kujunemine

Tänapäevased geodeetilised kuppelhood on arendatud geomeetristest kujunditest nagu ikosaeeder, oktaeeder ja tetraeeder. Kõige levinumaks elemendiks on ikosaeeder (Foto 1). Ikosaeeder on korrapärane hulktahukas, mis koosneb 20st võrdkülgsest kolmnurgast, 30nest servast ja 12st tippust. Tippude kaugus elemendi tsentrist on kõigil tippudel võrdne.

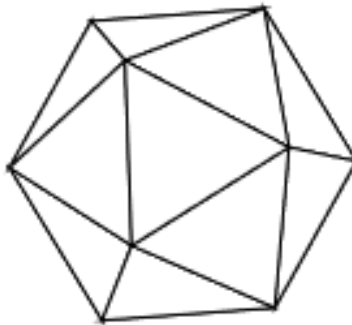


Foto 1. Ikosaeeder

Elemendi geomeetria arendamiseks hoone konstruktsiooniks, suurendatakse elemendi võrdkülgse tahu kolmnurkade sagedust. Sellega saavutatakse voolujoonelisem kuju ja konstruktsiooni kandevõime suurenemine suurema diameetriliste kuppelhoonete ehitamiseks. Sagedust tähistatakse tähega "v". Füüsikas kasutatakse väikest tähte v ruumilise sageduse sümbolina, ehk kui sageli korduvad komponendid kindla vahemaa tagant. Number tähise taga tähistab korduste arvu (Foto 2)[1].

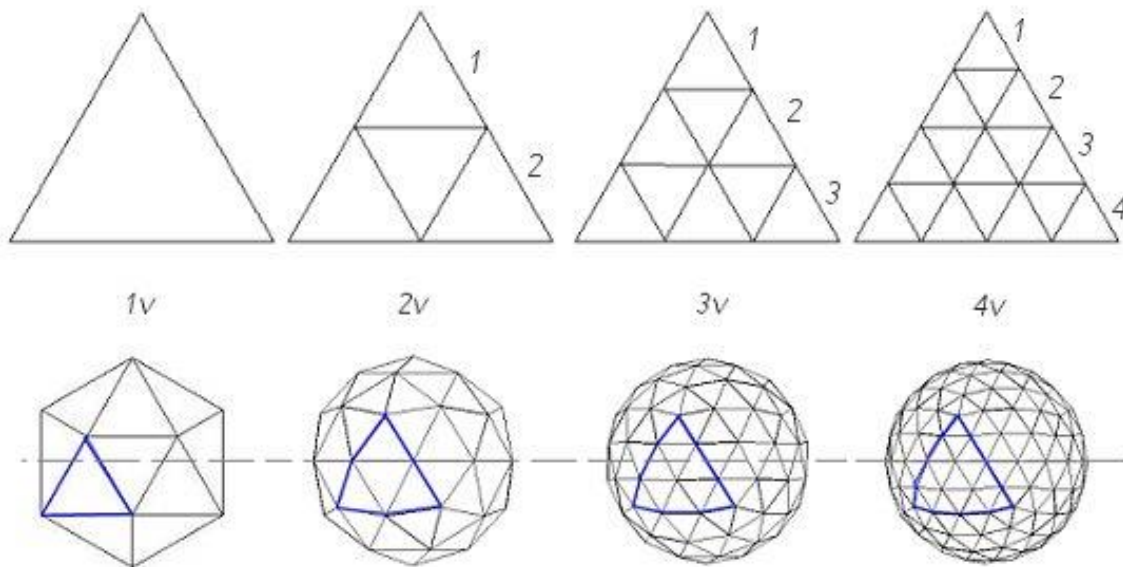


Foto 2. Kuppelhoone tahkude sageduste kujunemine [1]

Sageduse suurenemisel tekivad uued kolnurgad mille külgede pikkused ja nurgad on üksteise suhtes erinevad.

1.1.1 Kuldne suhe

Selgitamaks välja elemendi tippude asukohad ja omavahelised kaugused, on vajalik mõista kuldse suhte olemuset. Kuldne suhe ehk "Golden ratio", tähistatakse kreeka tähega "phi" φ . Kuldne suhe on kasutusel nii geomeetrias, arhitektuuris ja kunstis. Phi saame leida valemiga (1)[2]

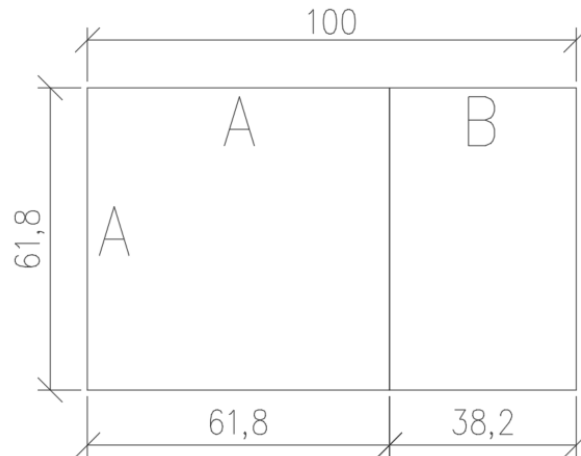
$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1,618. \quad (1)$$

Matemaatiliselt tähistab kuldne suhe seda, kui kahe pikkuse suhe on sama mis nende summade suhe (2). Fotol 3 olev riskülik koostatud vastavalt kuldse suhte põhimõttele[2]

$$\varphi = \frac{A + B}{A} = \frac{A}{B} = 1,618. \quad (2)$$

Joonisel (Joonis 1) on kujutatud kuldse suhte põhimõttel loodud ristkülikut, mille külgede pikkuse suhe on sama mis nende summade suhe. Vastavalt valemile (2) saame antud risküliku küljepikkusi kasutades kätte phi.

$$\frac{61,8 + 38,2}{61,8} = \frac{61,8}{38,2} = 1,618.$$



Joonis 1. Kuldne suhe. Ristkülik

Kuldne suhe on seotud kuldse spiraaliga. Kuldse spiraali suhe tähendab seda, et element muutub laiemaks "phi" ja raadiuse korrutise võrra. Selliseid spiraale võib leida nii looduslikes elementides, kunstis kui ka arhitektuuris [3].

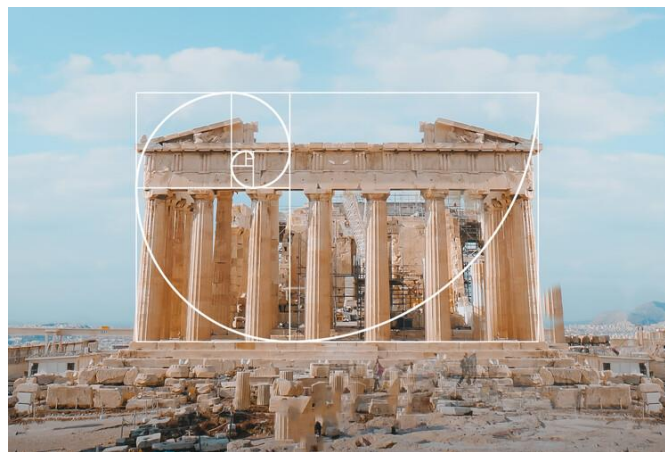


Foto 3. Kuldne spiraal arhitektuuris [3]

1.1.2 Tippude koordinaadid

Kolmemõõtmelise elemendi loomisel tuleb kasutada x,y ja z telge, nii saab anda igale elemendi tipule täpse asukoha kolmemõõtmelises ruumis. Ikosaeedril saame jagada 12 olemasolevat tippu tähistega A – L mille iga tipu kaugus tsentrist on võrdsed(Tabel 1) [2].

Tabel 1. Ikosaeedri tippude koordinaadid

A= (0,1,φ)	B= (0,-1, φ)	C= (0,-1,-φ)	D= (0,1, -φ)
E= (φ0,01)	F= (-φ,0,1)	G= (-φ,0,-1)	H= (φ,0,-1)
I= (1,φ,0)	J= (-1,φ,0)	K= (-1,-φ,0)	L= (1,-φ,0)

Antud kordinaatidest tulenevalt saame välja arvutada tippude kaugused üksteisest. Valemis (3) on toodud A ja B kaugus üksteisest[2]

$$|AB|\sqrt{(0-0)^2 + (1-(-1))^2 + (\varphi-\varphi)^2} = \sqrt{4} = 2. \quad (3)$$

Selliste kordinaatide ja tipu kauguste üksteise suhtes saame elemendi tipu ja tsentri vahemaaks 1.902(4). Mis ühtlasi on kogu elemendi radius [2]

$$Tsenter = \sqrt{(1 + \varphi^2)} = 1,902. \quad (4)$$

1.1.3 Tahkude külje pikkused

Elemendi tipud moodustavad omavahel võrdkülgse kolmnurga. Tuues näitena kolmnurga tippudega AIJ, mille koordinaadid on vastavalt (0,1,φ), (1,φ,0) ja (-1,φ,0). Jagades kõik koordinaadid läbi tsentri kaugusega (4) saame uuteks koordinaatideks (0,5257;0,8507), (0,5257;0,8507;0) ja (-0,5257;0,8507;0). Külje pikkused leiame valemiga (5), millest ühtlasi saab tegur, mis tahes raadiusega elemendi koostamisel. Kui on teada elemendi läbimõõt, tuleb korrutada raadius teguriga ja saame tahu külje pikkuse [2]

$$Tegur = \sqrt{0,5257^2 + (0,8507 - 0,5257)^2 + .0,)} \approx 1,0515. \quad (5)$$

Sarnastel arvutustel leiame ka suurema sagedusega geodeetiliste kuplite tahkude koordinaadid ja külje pikkused. Fotol kujutatud 3V sagedusega geodeetilise kupli 1V tahu

jagunemise plaanis ja tabelis (Tabel 2) toodud tekkinud diagonaalide pikkuse arvutamiseks vajalikud tegurid(Foto 4)[2].

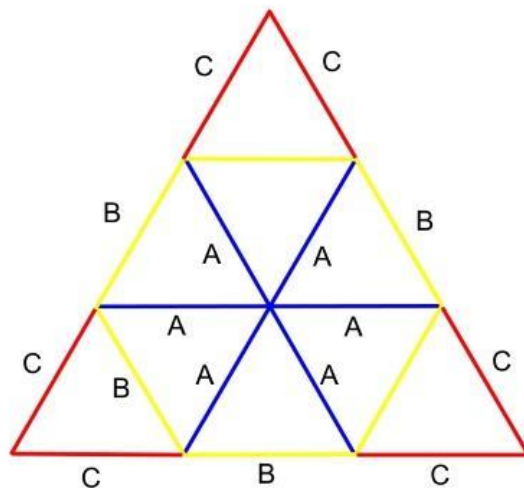


Foto 4. 3V jagunemine[4]

Tabel 2. 3V diagonaalide pikkuste tegurid [2]

Diagonaali tähis	Tegur
A	0,348615488820
B	0,403548212335
C	0,412411489310

1.2 Ajalugu

Kuppelhoone, ehk geodeetiline kuppel kavandati ja ehitati esmakordselt Saksamaal. Saksa insener Walther Bauersfeld disainis väikese kupli, mille ta patenteeris. Bauersfeld töötas peainsenerina optikafirmas Carl Zeiss ja 1926. aastal viis ta lõpuni projekti, milleks oli 23 m diameetrine kuppel, mis kattis planetaariumit Saksamaal Jena linnas. Kuppel sai nime "The Wonder of Jena" ehk "Jena ime" (Foto 5). Tegemist on ühtlasi vanima geodeetilise kuppelhoonega mis püsib ja tegutseb tänaseni [5].

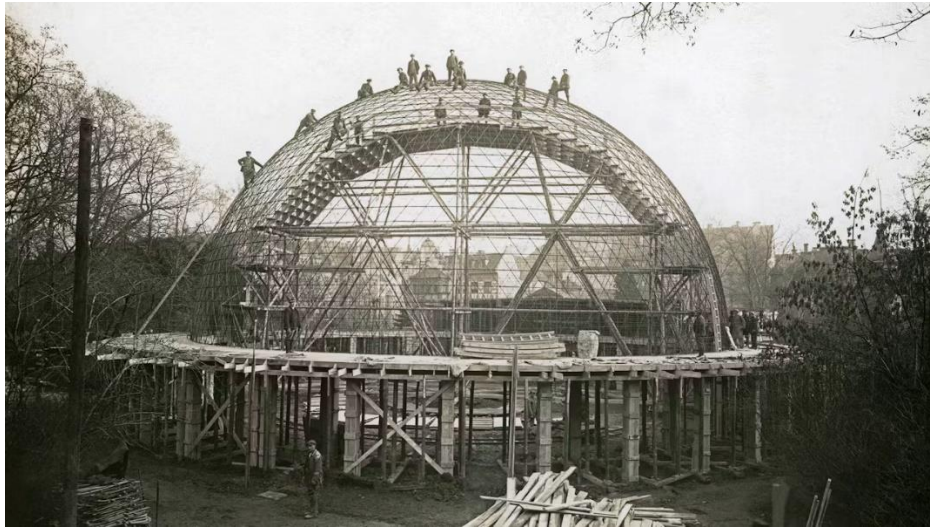


Foto 5. Vanima kuppelhoone ehitus Jenas [6]

Bauersfeld disain põhineb ikosaeedril, mille võrdkülgset kolmnurksed tahud jagas ta omakorda väiksemateks kolmnurkadeks. Konstruktsioon koostati kasutades 3500 terasvarrast, mis kaeti betooniga. Betooni kihi paksus oli võrdne kupliga sama läbimõõduga kanamuna koorega [5].

Esmakordselt kasutati väljendit "geodeetiline" Ameerika ühendriikide arhitekti Richard Buckminster Fuller' (Foto 6) poolt aastal 1948. Fulleri idee oli arendada kergeid, kulutõhusaid ja lihtsalt paigaldatavaid geodeetilisi kupleid, mille konstruktsiooni hulka ei kuuluks tugisambaid ja mis loolsid suurema ruumi. Selle uurimuse ja arenduse tulemusel saavutati sünergeetiline geomeetria mis tasakaalustasid konstruktsioonis olevad surve- ja tõmbejõud [7].

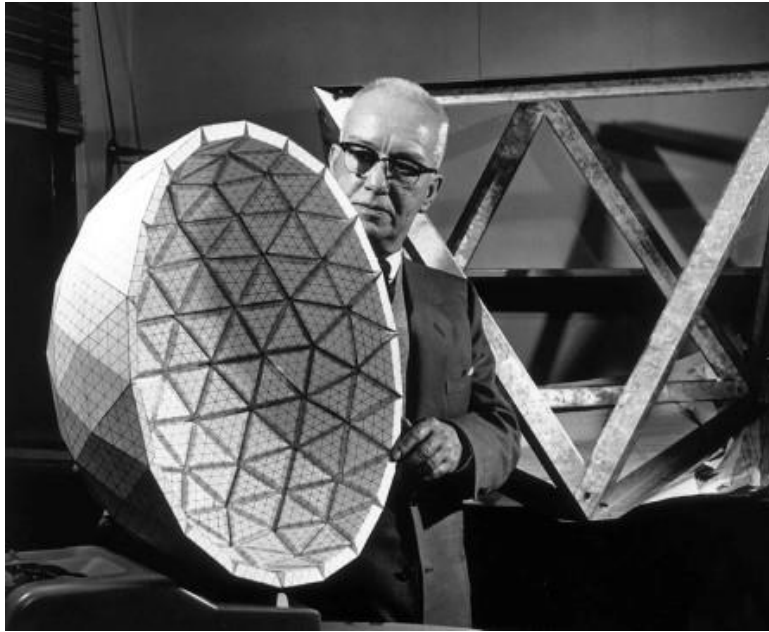


Foto 6. Richard Buckminster Fuller [7]

Peale geodeetiliste kuplite patendi saamist 1953 aastal USAs, sai Fulleri'i suurimaks kliendiks USA relvajõud, kes tundsid vajadust kergekaaluliste ja vastupidavate hoonete järele, kasutades neid radarijaamade katteks arktilistes tingimustes (Foto 7)[7].

Fulleri ennustusel on 1980-ndate aastateks maailmas miljon geodeetilist kuplit, 90ndatel oli selleks reaalseks arvuks kuni 300 000. Tänapäeval on geodeetiliste kuplite kasutus valdavalt kõrvalhoonetena, näiteks kasvuhooned ja suvila, kuid endiselt ehitatakse ka aastaringseks elamiseks sellise geomeetriaga hooneid erinevates piirkondades üle maailma [8].



Foto 7. Radarid arktilistes tingimustes [9]

1.3 Kuppelhoone eelised ja probleemid

Tänu konstruktsiooni madalale raskuskeskmele ja kolmnurksele nõ luustikule, on kuppelkonstruktsioon loodud taluma suuri koormusi ilma sisemiste tugevdat. Erinevalt tavapärasest karphoonest, kus koormused kanduvad otse läbi konstruktsiooni vundamendini, kanduvad kuppelhoonel koormused ühtlaselt üle välispinna. See annab võimaluse kasutada kergemaid materjale. Seetõttu on sedasorti konstruktsioonid kasutusel just raskemate oludega piirkonnas, seda nii ilmastikuoludest tulenevalt, kui ka halva ligipääsetavuse tõttu.[8].

Keerukama geomeetriaga konstruktsiooni tõttu aga vajab hoone keerukamaid konstruktiivseid analüüse. Samuti ei võimalda sellise geomeetriaga hoone kogu ruumala otstarbekalt kogu kupli osas kasutada [8].

2 HOONE LOOMISE BIM PROTSESS

Mudelprojekteerimise eesmärgiks on hoone projekteerimise ja ehituse dokumentatsiooni viimine ühele tasandile tagamaks tööde tõhusama ja kvaliteetsema toimise. BIM ehk infomudel, sisaldab dokumentatsiooni hoone kohta alates projekteerimisest, kuni elukaare lõpuni [10].

Hoone loomise mudelprojekteerimise eelisteks on ühtne platvorm kõigi projektis osalevate osapoolte jaoks, sealhulgas mahtude arvutamised ja tööjooniste lisamine. Samuti visualiseerimine projekteerimise käigus, millega on võimalik välistada erinevate konstruktsioonide ja süsteemide ristumine sobimatus kohas, näiteks ventilatsiooni toru läbi ukse ava [10].

Mudelprojekteerimise eelduseks on tarkvara, mis omab IFC formaati. Tarkvaraversioonide kasutamine on projekti osapoolte kokkuleppel. Samuti võib tarkvara osas projekti tellija esitada omad nõudmised [10].

BIM protsessi läbimise eelduseks on luua planeeritav ja analüüsitav keha. Selleks, et saaksime analüüsida hoone energiatõhusust ja importida vajaliku informatsiooni IDA-ICE tarkvarasse suvise ülekuumenemis analüüsi teostamiseks, vajame 3D mudelit mille sisse on võimalik lisada *Space* või *Room* element. Vastasel korral, ei ole võimalik analüüsi läbi IDA-ICE tarkvara teostada.

2.1 Revit 2023 – Conceptual Mass

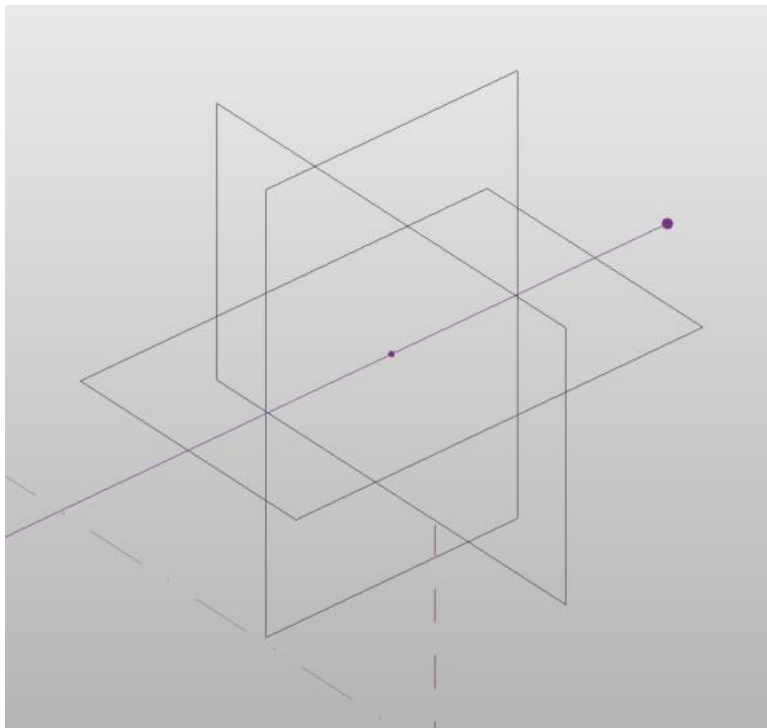
Esimene lähenemine sobiva mudeli koostamiseks energiatõhususe analüüsi tarbeks teostatakse Revit 2023'ga. Laialt kasutatud Autodesk tarkvara, mis ühildub oma formaatide poolt BIM- ja simulatsiooni tarkvaradega.

Massi perekonna kasutamine sellise mudeli tarbeks on esmane valik, kuna Revit ei võimalda mudeldada kaldpinnalisi elemente konstruktiivselt. Tavaline *Mass* perekond võimaldab luua massi "by face". Näiteks tasapinnalised põrandad, seinad, katused jne. Conceptual mass on mõeldud loomaks ebatavalisi ja keerukamaid geomeetriaid. Saavutamaks arhitektuurne vorm, mida hakata seadistama sobivaks IDA-ICE tarkvarale, tuleb kasutada *Conceptual Mass* perekonda, mis on mõeldud ebakorrapärase kujuga vormide mudeldamiseks.

2.1.1 Ikosaeeder - 3V geodeetuline kuppel

Klassikaline geodeetiline kuppelhoone on planeeritud 3V sagedusega ikosaeedri põhjal. Sellest lähtuvalt on eesmärk mudeldada 12 m diameetriga 3V sagedusega geodeetiline kuppel, kuhu hiljem lisada *Space* või *Room* element.

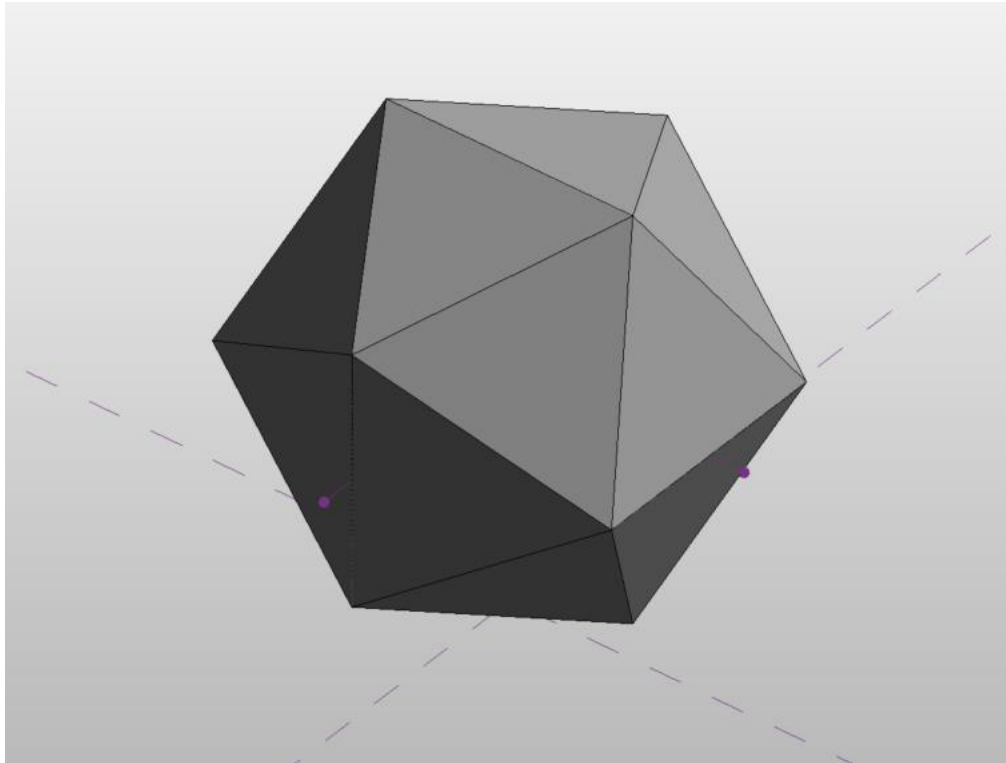
Järgnev mudel on koostatud Conceptual Mass perekonnast. 3V elemendi loomise eelduseks on 1V geodeetiline kuppel ehk ikosaeeder, mille abil saame tahkude kolmnurkade sagedusi läbi uute massi perekondade seadistada. Samuti saame vajadusel kasutada tahu perekonda hilisemate mudeldamiste puhul. Järgneval viisil mudeli koostamise aluseks on kuldse suhte valemist (1) lähtuvalt loodud ristkülikud (Joonis 2). Mis omakorda moodustavad õigete tipu koordinaatidega ikosaeedri. Ikosaeedri tippude kaugused tsentrist on alati võrdsed elemendi raadiusega, seda mis tahes sagedusega geodeetilise kupli puhul.



Joonis 2. Kuldne ristkülik

Tippude ühendamiseks ja elemendi loomiseks koostatakse uus "*Metric Mass*". Kuna tegemist on kolmnurksete tahkudega, siis mass luuakse nelja punkti põhimõttel, millest esimesed kolm tähistavad tahu nurkasid ja viimane elemendi tsentrit. Uue perekonna laadimisel projekti ja selle lisamise ristkülikutele, saame tulemuseks terviku 1V ikosaeedri (Joonis 3). Tegemist on massiga mille iga tahk on eraldi kontrollitav ja muudetav, kuid elemendi mõõtmed on seotud

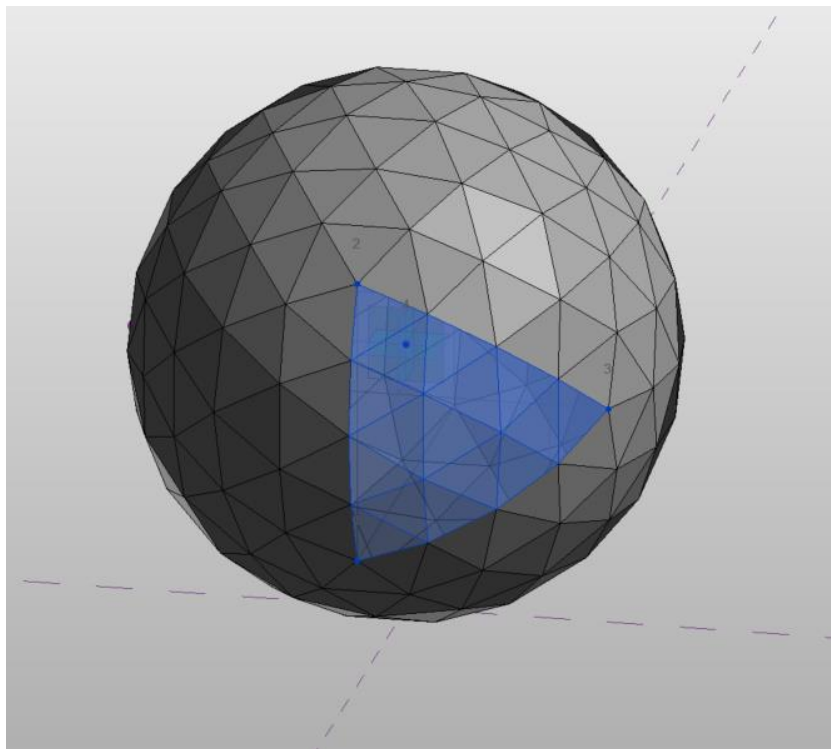
algsest sisestatud valemitega. Kogu elemendi mõõtmeid saame muuta muutes sfääri raadiust omaduste tööribal. Teisi detaile nagu elemendi kaldenurk ja elemendi nullpunkti saab muuta kas otse perekonda modifitseerides või omaduste tööribalt.



Joonis 3. 1V Ikosaeeder

Enne, kui hakata saavutatud geomeetrisest kehast hoone konstruktiivset ja ruumilahenduslikku plaani koostama, tuleb lahendada energiatõhususe analüüsiks vajalikud punktid. IDA-ICE tarkvaraga energiatõhususe analüüsi või suvise ülekuumenemise analüüsi saame teostada ainult kahel viisil. Kas ekspordime mudeldatud hoonelt selle *Space* või *Room* elemendi või mudeldame hoone otse IDA-ICE tarkvaras. Eesmärgiks on kõik BIM protsessis kasutatavad tarkvarad ja andmekandjad ühtlustada ja üksteist mõistvad.

Seega on oluline saavutada ja veenduda, et *space* või *room* elementi on võimalik lisada. Eelistatult tuleks jõuad *Space* elemendini, kuna erinevus nende kahe ruumielemendi vahel on otstarve. *Room* element on arhitektuurne komponent mille eesmärgiks on anda infot ala kohta, millesse ta on määratud. *Space* element on eelkõige määratud ala mahu omaduste analüüsiks [11].



Joonis 4. 4V sagedusega geodeetiline sfäär

Mudeldamise käigus saavutati erineva sagedusega sfäärid, mida on võimalik edasi arendada vastavalt vajadustele. Geodeetilise kupli tugevus saavutatakse läbi diagonaalide, kuid mida pikemad on diagonaalid seda suurem on oht läbipaindele. 12 m diameetriga kupli pikim diagonaal jääb alla 2,5 m, mis on mõistlikkuse piirese tagamaks kupli enda tugevuse ehitusmugavuse. Liiga väikese läbimõõduga geodeetilist kuplit lahendada kõrge sagedusega, teeb ehituse keerukaks ja aeganõudvamaks. Suure diameetriga geodeetilist kuplit lahendada väikese sagedusega, teeb ehituse kiiremaks, kuid jätab diagonaalide vahelised avad suureks. Samuti kannatab üldine koormustaluvus.

2.1.2 Space – Room elemendi lisamine

Antud analüüsis ei oma tähtsust millise sagedusega geodeetilist sfääri analüüsida, oluline on välja selgitada kas kasutades *Conceptual massi*, saame vajalikud *Space* või *Room* elemendid lisada või mitte. Negatiivse tulemuse puhul tuleb leida teine viis mudeli koostamiseks, mis annaks eesmärgipärase tulemuse. Kasutades *Conceptual Mass* malli geodeetilise kupli koostamisel leiame, et ei ole võimalik kasutusel olevate tööriistade abil lisada vajalikke elemente. Seetõttu peame mudeli eksportima teise malli mis võimaldaks meil protsess lõpuni viia. Kasutatud Reviti alusfaili mall pärineb Tallinna Tehnikakõrgkooli õppeaine Ehitusinfo

modelleerimine(BIM) materjalidest. Peale eksportimist saame aga hoiatuse mis ütleb järgmist "Mass contains no solid geometry. Mass Floors, volume, and surface area, won't be computed" (Foto 8). Sellest saame juba eeldada, et Roomi või Space elemendi lisamine ei ole võimalik.



Foto 8. Hoiatus mudelit eksportides

Kontrolliks proovime lisada Mass mudelile Space elemendi, võttes aluseks mudeli esimese korruse mille fikseerime peale Massi importimist. Geodeetilisest kuplist eluhoone puhul kasutatakse peamiselt 1/2 või 5/9 sfääri mahust. Seetõttu näiteks määrame antud mudeli esimeseks korruseks selle keskjoone. Lisades Space elemendi saame hoiatuseks "Space is not in properly enclosed region". Esimesest hoiatusest lähtuvalt, kinnitas ka teine Massi probleemi. Ei ole võimalik analüüsida ruumi mahtu, kuna puudub kindel geomeetria formaat selle tuvastamiseks.

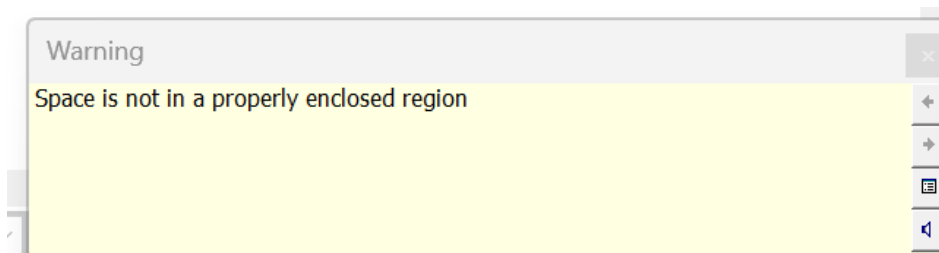
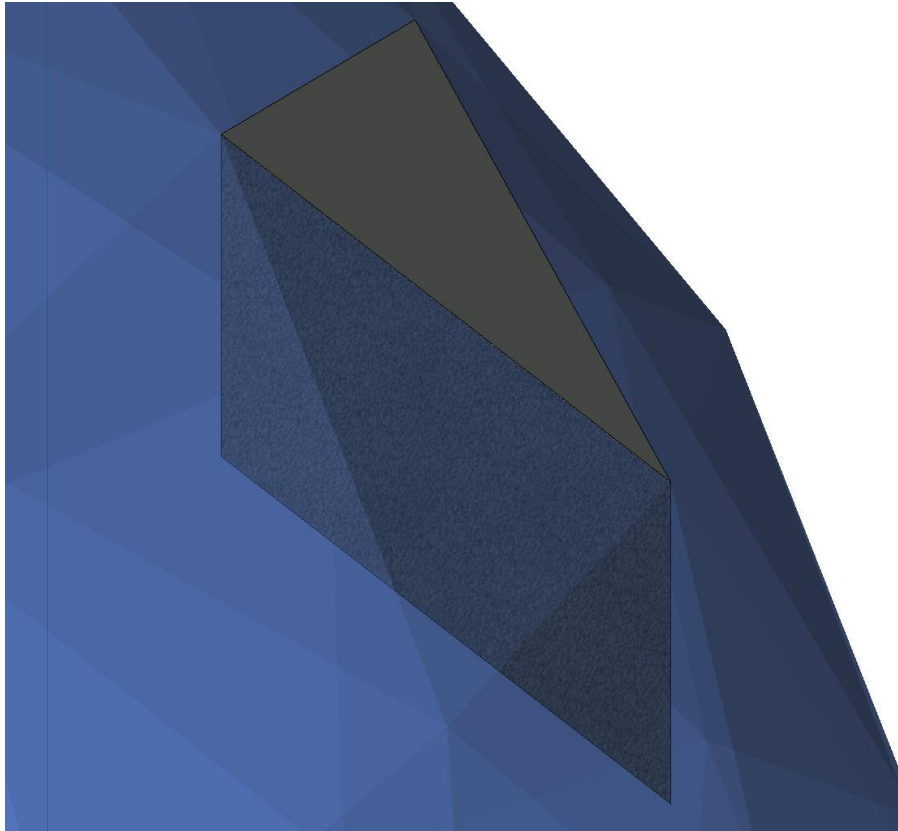


Foto 9. Hoiatus Space elemendi lisamisel

Eesmärgiga luua sobivad tingimused Space elemendi lisamiseks, kus käsklus tunneb ära piirid alla määramiseks, sai katsetatud eelnevalt mudeldatud geomeetriaga geodeetilise kupli tahkude arendamist, ehk tahkude muutmist katuse- või seina elementideks. Selle lahendamiseks kasutame arhitektuurset käsklust "roof by face". Käsklus toimis ja tahud oli võimalik muuta katuse- või seinaelemendiks. Kuid kuna kogu süsteem lähtub elementide sirgjoonelisest suundadest, ei saanud ta aru geomeetria eripärast. Tahkude ristlõike suund peab jääma kupli tsentrisse aga selle asemel suunas ta end sirgelt alla (Joonis 5).



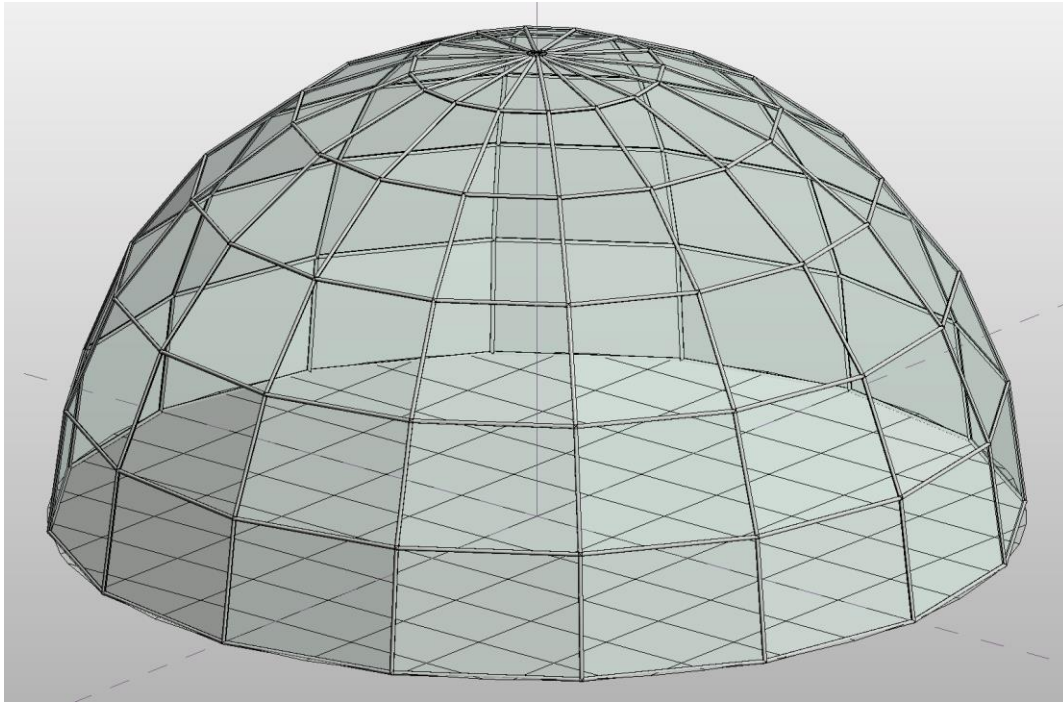
Joonis 5. "Roof by face"

Tulemusest järeltame, et sellise meetodiga geodeetilise kupli mudeldamiseks ei õnnestu meil lisada vajalikku space elementi. Leida tuleb teine lahendus, näiteks kasutades teist Revit malli ja lihtsustades geomeetria. Geomeetria lihtsustamisel me küll muudame planeeritavat mudelit, kuid ei kaota ära eesmärki jõuda ICA-ICE analüüsini. Selle saavutamiseks tuleb leida teine mudeldamise viis, kuidas üldse on Revitis võimalik kumeratele ja ka kaldus tahkudega kehadele lisada Space või Room elementi.

2.1.3 Lihtsustatud geomeetria

Geomeetria lihtsustamisel, kasutades endiselt *Conceptual mass* perekonda, koostame ristkülikutest koosneva geodeetilise kupli, mille arendame sobivaks. Selleks, et luua lihtsustatud geomeetriaga kuppel koostame kõigepealt visandi. Kasutades *Line* ja *Arc* käsklusi ja vormistame käsiribalt käsklusega *Great Solid form*. Seejärel määrame mustri mille valikuks on Revitis mitmeid variante. Võttes arvesse, et eesmärgiks on jõuda *Space* elemendini, ei oma antud hetkel mustri sagedus tähtsust. Reviti pakutud mustrid teevad lihtsamaks mustri raamistiku ja kihtide arendamise läbi *Curtain Panel Pattern Based* perekonna, kui selleks

vajadus on. Läbi *Curtain Panel* perekonna saame koostada raamitud ühekihilisi elemente, kus saame valida raami ja kattematerjalid ning nende omadused. Hetkel koostame justkui trapetsitest koosneva mustriga klaasist kasvuhoonet (Joonis 6).

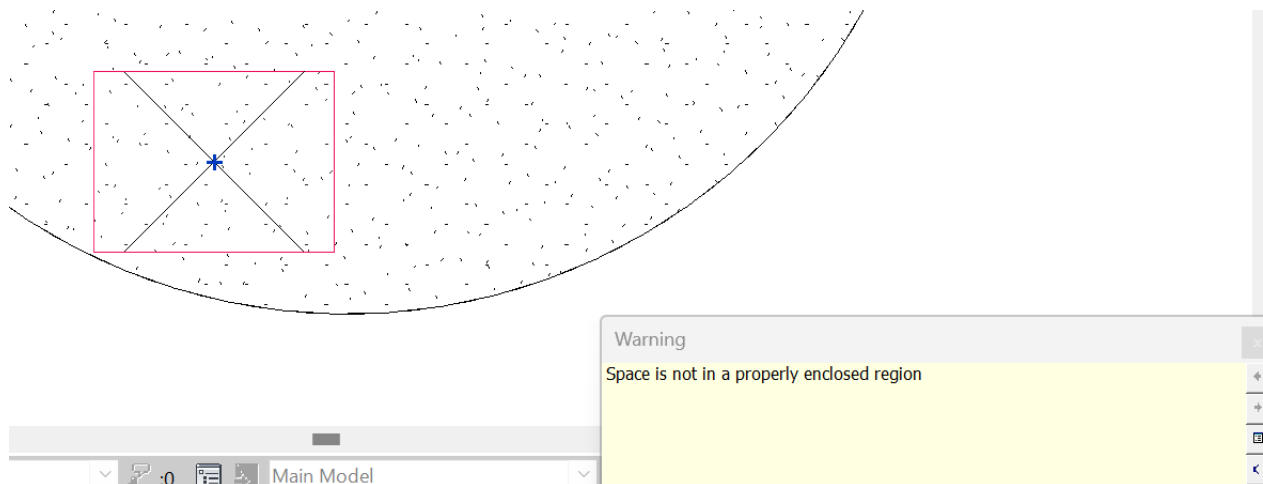


Joonis 6. Lihtsustatud geomeetriaga geodeetiline kuppel

Geodeetilise kupli arhitektuurne vorm, lihtsustatud kujul, on loodud. Veendumaks, et kupli lahendamine *Solid form* 'I käskluse abil annab vajaliku tulemuse, kontrollime kas selline lahendus võimaldab meil lisada *Space* elemendi.

2.1.4 Space – Room elemendi lisamine lihtsustatud geomeetriaga mudelile

Esimesel katsel selgus, et me ei saa kasutada *Space* elemendi lisamiseks *Conceptual massi*. Seetõttu peame eksportima mudeli arhitektuursesse malli. Kasutatud Reviti alusfaili mall pärineb samuti Tallinna Tehnikakõrgkooli õppeaine Ehitusinfo modelleerimine(BIM) materjalidest.



Joonis 7. Space elemendi lisamine lihtsustatud geomeetriaga kuplile

Kupli eksportimine ei ole Revitile probleemiks ja hoiatusi ei anna, kuid Space elemendi lisamine on endiselt võimatu, kuna ei käsklus ei suuda tuvastada suletud regiooni millele *Space* element lisada (Joonis 7).

2.1.5 Tulemus

Revitis mudeldamisel on palju võimalusi ja kasutatud lahendused ei ole ainsad, ega ka pruugi olla kõige õigemad.

Modelleerimise käigus kasutatud meetoditega ei ole võimalik teostada vajalikke protseduure saavutamaks *Space* või *Room* elementi geodeetilise kupli mudelisse. Energiatõhususe simulatsiooni läbimiseks IDA-ICA tarkvaras on see vajalik, seetõttu Reviti võimaluste lahkamine tuleb ajakokkuhoiu mõttes asendada alternatiivse variandiga.

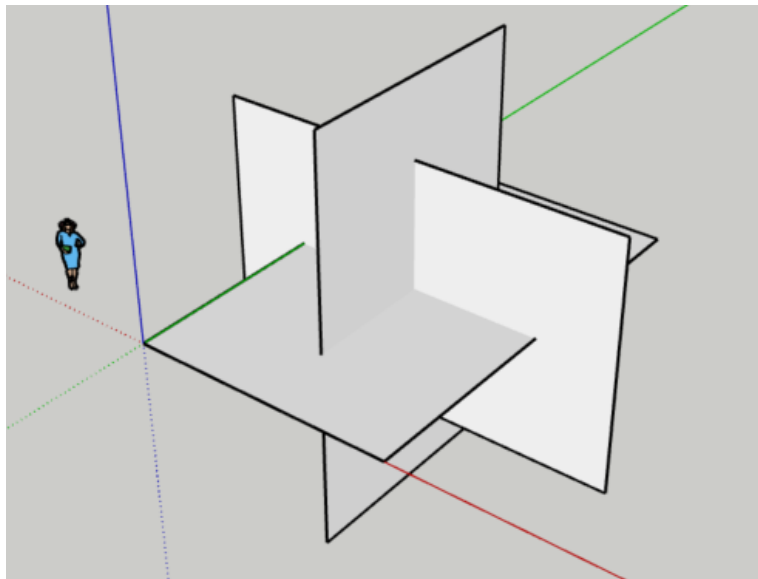
2.2 SketchUp Pro 2024

Teiseks vajaliku mudeli lahendamiseks kasutame Sketchup Pro 2024 tarkvara. Selle puhul on teada, et ebapärase kujuga hoone mudelite *Space* elementi on eksporditud IDA-ICE tarkvarasse, kuid sedagi teatud eripäradega. Pole aga teada kas õnnestub luua ja eksportida vajalik element ka ikosaeedri baasil loodud geodeetilise kuplina.

Sketchup Pro 2024 näol on tegemist lihtsama tarkvaraga, mis võimaldab koostada nii 2D jooniseid, kui ka 3D mudeleid. Hinnanguliselt on tegemist kasutajasõbralikuma tarkvaraga, kui Revit.

2.2.1 Ikosaeeder - 3V geodeetuline kuppel

Mudeldamise alustamiseks saame lähtuda samadest põhimõtetest nagu Reviti puhul. Kasutame kuldse suhte valemist saadud ristkülikuid, moodustamaks ikosaeedri loomise tarbeks aluskujund (Joonis 8). Hoolimata harjumatust tarkvarast, teeb mudeldamise lihtsamaks Sketchupis olevad abi omadused. Kuldses suhtes ristküliku joonestamiseks peame teadma ühe külje pikkust. Ristkülikut moodustades annab tarkvara teada, diagonaalse joonega ristküliku sees, kui saavutatakse nn kuldne suhe.



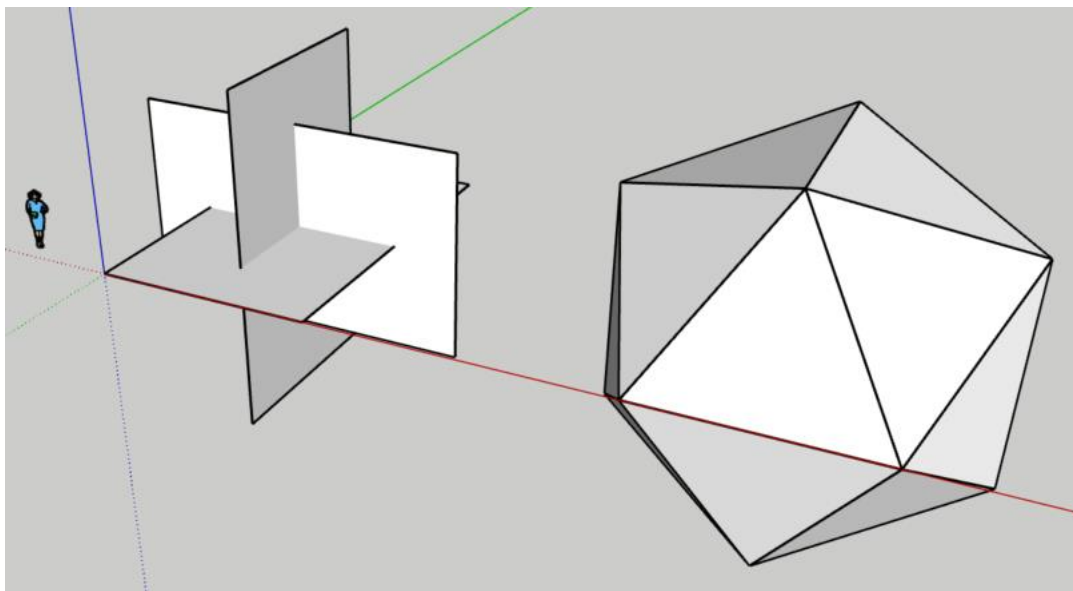
Joonis 8. Ristkülikutest moodustatud ikosaeedri aluskujund

Kuna ei ole kindel, kas antud tarkvara võimaldab jõuda soovitud *Space* elemendini mida vajame IDA-ICE tarbeks, ei ole vaja pikalt aega raisata geomeetria täiustamisele vaid veenduda otse, kas tarkvara võimaldab soovitud elementi saavutada lihtsama geomeetriaga.

Näiteks jääme püsima 1V sagedusega geodeetilise kupli juures, kontrollimne *Space* elemendi olemasolu ja selle ühitavust IDA-ICE tarkvaraga. Selle ebaõnnestumisel võime järeltada, et geomeetria arendamisel ei jõua me parema tulemuseni. Peab valima, kas geomeetriat samuti lihtsustada või leida teine sobilikum tarkvara.

Geomeetria mudeldamise saavutamine saab oluliseks, kui jõuda sobiva tulemuseni. Seetõttu siinkohal jätkame mudeli täiustamist 12 m läbimõõduga 3V sagedusega geodeetilise kuplini jõudmiseks.

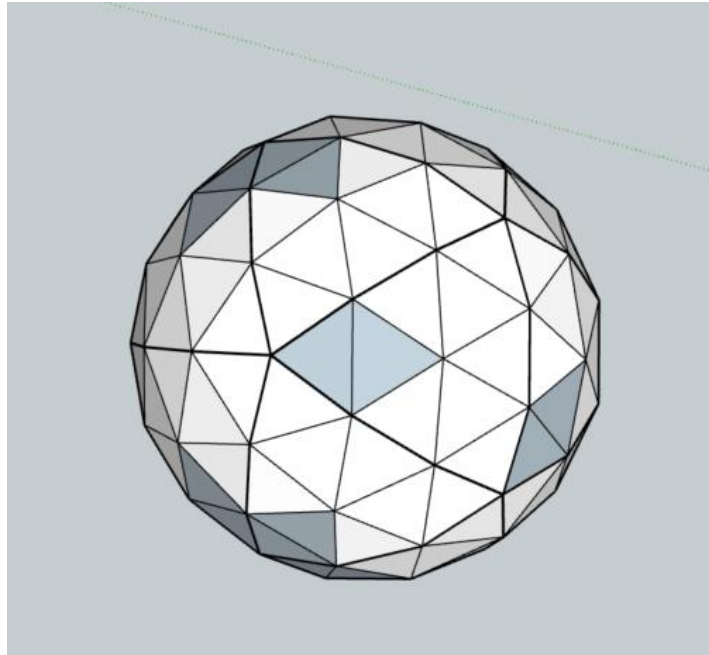
Esmase mudeldamise tulemuseks saame 1V sagedusega ikosaeedri.



Joonis 9.1V Ikosaeeder

Sketchupi 3D mudeldamine ei erine palju AutoCad 3D mudeldamise põhimõtetest. Harjumatud käsklused, kuid täiesti kasutuskõlblik mudeldamise tarkvara. Lisaks erinevalt AutoCAD'ist võimaldab Sketchup üldiselt luua ja eksportida *Space* elemendi.

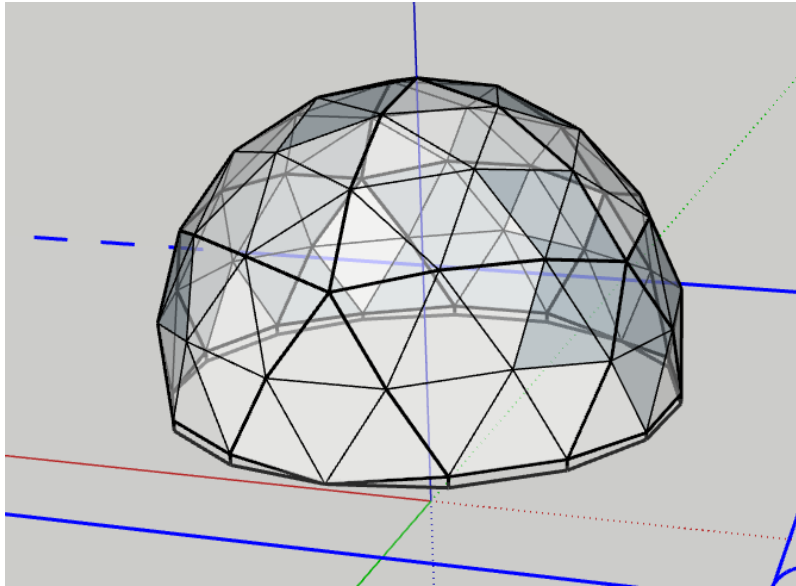
Geodeetilise kupli mudeldamise tulemusel jõuame 3V sagedusega geodeetilise kupli mudelini, mille diameetriks on 12 m ja koosneb kokku 180-st kolmnurgast (Joonis 10).



Joonis 10. 3V Geodeetiline kuppel

Valdavalt planeeritakse seda tüüpi geodeetilisi kupleid mitte terves tükis vaid jagatakse osadeks. Klassikaliseim lahendus on 5/9 kogu sfäärist, mis koosneb 105 kolmnurksest tahust. Kui jätta välja detailne hoone lahendus, võib rakendada laiendusi ja kolmnurkade asendamist ruumidega, mida on otstarbekam lahendada kasutades sirgemaid seinu.

Sketchup võimaldab meil mugavamalt mudeldada planeeritavat hoonet, seetõttu loome mudeli mis on 5/9 lahendusega poolkera (Joonis 11).



Joonis 11. 5/9 geodeetilise kupli mudel

Mudeli valmides oleme saavutanud esimese eesmärgi luua geomeetriline keha, mida eksportida IDA-ICE tarkvarasse energiatõhususe simulatsiooni koostamiseks.

2.2.2 Building body ja Zone Geometry

Olles mudeldanud sobiliku geomeetrilise keha peame importima selle kas *building body*'na või *zone geometry*'na (Foto 10). Selle alusel saame koostada analüüsitava keha IDA-ICE tarkvaras.

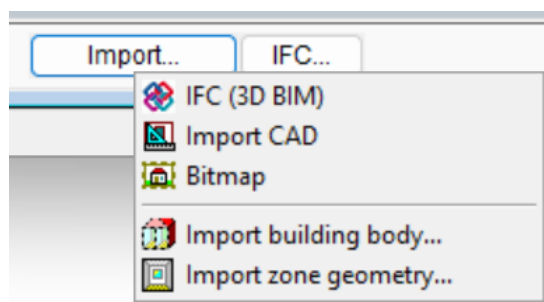


Foto 10. Sobiliku keha importimine IDA-ICE tarkvaras

Nii *building body*, kui ka *zone geometry* importimisel saame errori, mis viitab sellele, et meie poolt kasutatav Sketchupi versioon on liiga uus ja nõuab vanemat tüüpi Sketchupis moodustatud mudelit. Seetõttu tuleb leida moodus mudeli ümber konverteerimiseks vanemasse Sketchup versiooni (Foto 11).

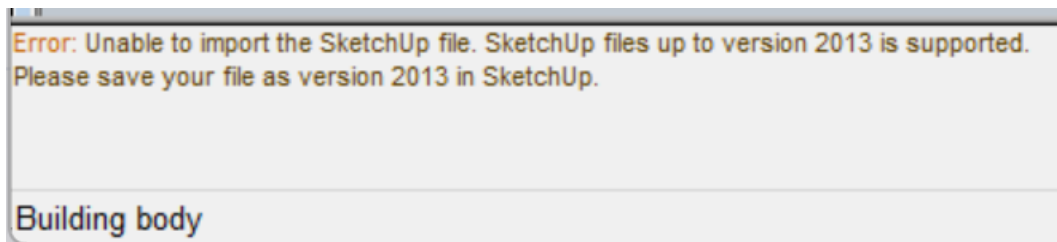


Foto 11. Esimene impordi katsetus

Ümberkonverteerimine ei õnnestu, kuna uurimuse käigus olev Sketchup Pro 2024 prooviversioon ei võimalda seda. Sketchupi laienduste *warehouse* pakub lahendusi ja võimalusi, kuidas avada vanemas versioonis koostatud mudeleid ja jooniseid, kuid vastupidiselt mitte. Kuna aga antud töös on kasutatud Sketchup Pro 2024 versiooni, ei sobi meile lihtsalt mudeli salvestamine vanemasse, sest see raskendab kogu protsessiga edasi minemist. Probleem võib peituda selles, et antud uurimuses on kasutatud Sketchup Pro 2024 prooviversiooni. Seetõttu ei pruugi olla kõik võimalused kasutajale saadaval.

Üheks sellise probleemi lahenduseks võime proovida alla laadida nõutud Sketchupi versiooni ja mudeldada seal uus mudel, mida saaksime eksportida IDA-ICE. Vanema versiooni leidmine tootja kodulehelt ei õnnestu. Samuti on leitav avalik info selle kohta, et nii vana versiooni nagu Sketchup Pro 2013, tootja enam ei toeta ega arenda.

2.2.3 Tulemus

Hoolimata sellest, et Sketchup Pro 2024 on mudeldamise mõttes lihtsam ja mugavam, kui Revit 2023, ei ole see antud tingimustel sobilik tarkvara meie uurimuse läbiviimiseks. Seetõttu ei ole praeguse uurimuse meetod sobiv lahendamaks eesmärki - luua geomeetiline kuju mis ühildub IDA-ICE tarkvaraga. Ei oleks ka ajaliselt mõistlik ja kasulik luua lihtsustatud geomeetriaga versioon, kuna keha importimise osas on takistuseks versiooni reeglid, mitte geomeetria.

2.3 IDA-ICE 5.0

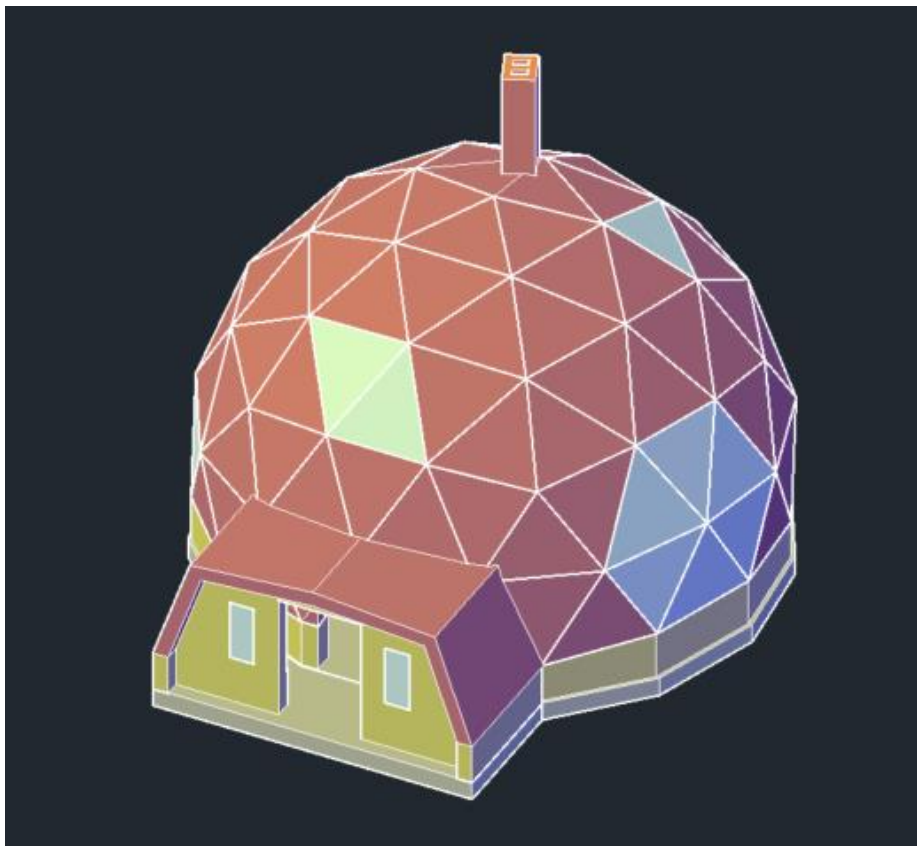
IDA-ICE on sisekliima ja energiatõhususe analüüsimiseks loodud tarkvara, kuid oma tööriistade poolest on võimalik kasutada seda ka analüüsitava keha mudeldamiseks [12].

Üldiselt kasutatakse seda lihtsamate risttahukatest koosnevate mudelite, mudeldamiseks, kuid teoreetiliselt on võimalik seda kasutada ka keerukamate geomeetria moodustamiseks.

2.4 3V mudeli loomine

Sellise mudeli moodustamiseks ei ole IDA-ICE kindlasti esimene tarkvara mida kasutada, kuna tarkvara eesmärk ei ole mudeldada hooneid vaid analüüsida energiatõhusust. Kuna energiatõhususe analüüsi ja simulatsiooni koostamiseks peame IDA-ICE tarkvarasse jõudma, siis tasub seda varianti siiski proovida.

IDA-ICE 5.0 tarkvaras mudeldamise alustamiseks vajame täpseid elemendi mõõtmeid. Täpsete mõõtmete saamiseks kasutame varasemalt AutoCAD tarkvaras mudeldatud geodeetilise kupli lõiget (Joonis 12).



Joonis 12. AutoCAD'is vormistatud mudel

Antud uuringus ei kasutata mudeli täielikku plaani, sest eesmärk on leida moodus energiatõhususe analüüsi läbiviimiseks, mitte luua reaalne hoone. Ei ole kindel, kas selline meetod annab soovitud tulemuse, seetõttu säilitame antud uurimustöös lihtsuse ja keskendume geodeetilisele kuplile endale ja selle sobitamisele analüüsi tegemiseks.

Kuna tegemist on hoonega mis on väga eripärase geomeetriaga, peame alustama mudeldamist IDA-ICE'is täiesti uue ja tühja mudeliga, mis ei sisalda tsoone. Loomes selle eripärase kujuga tsooni ise.

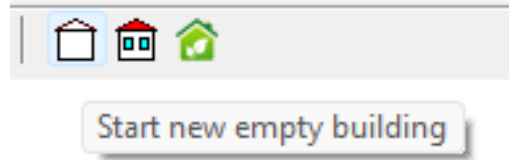


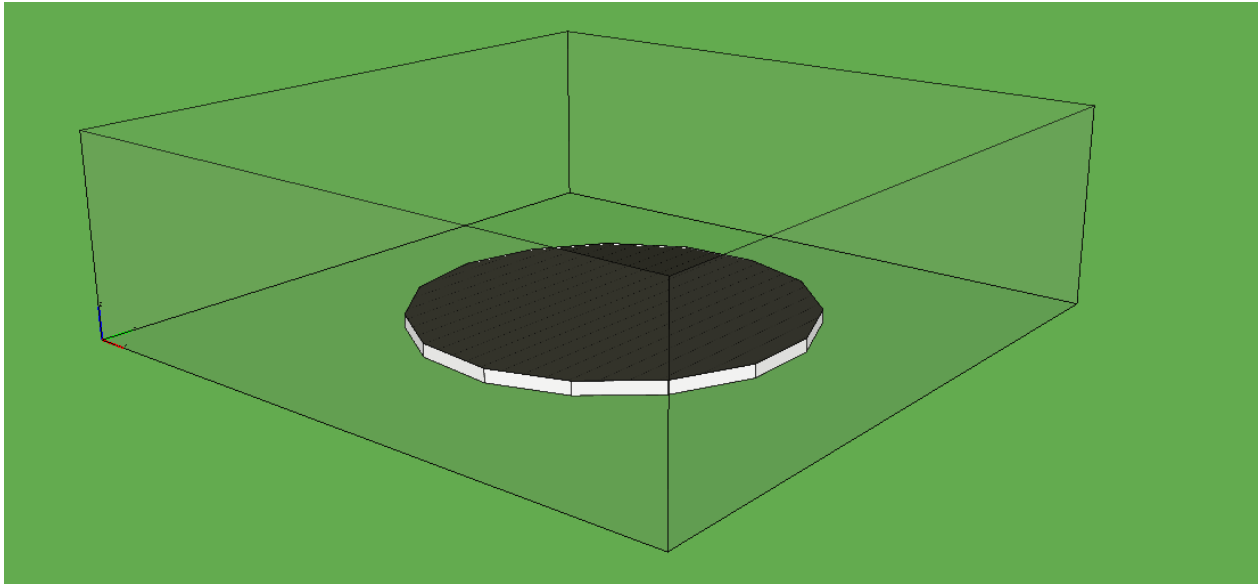
Foto 12. Uue hoone loomise alustamine

Töö lihtsustamiseks impordime ka AutoCADis koostatud geodeetilise kupli põhiplaani. Antud lahendus impordib meile vajaliku alusplaani, kuid nagu selgub, seda katuse vormistamiseks kasutada ei saa. Keha mudeldamist alustame kasutades AutoCADist saadavaid andmeid pikkuste ja nurkade osas ning sisestades need manuaalselt IDA-ICE'i. Tarkvaras ei saa kaldus tsoone mudeldada, seetõttu kasutame kogu kupli mudeldamiseks nn katuse meetodit. See tähendab, et märgime iga tahu tipu koordinaadid eraldi tarkvarasse. Protsess on aeganõudev, keeruline ja on suur risk teha vigu koordinaatide täpsuses. Paraku ei ole teada paremat lahendust antud tarkvaras olukorra lahendamiseks, samuti ei saa kindel olla kas selline meetod toimib.

Tarkvara tootja juhendid on suunatud tavapärase geomeetriaga hoonetele, mis tähendab, et hoone plaanil planeeritud ruumidesse saab läbi IDA-ICE tarkvara sisestada uusi analüüsitavaid tsoone, milleks on geomeetriliselt risttahukad. Geodeetilisel kuplil, sfääri ulatuses, ei teki ühtegi risttahukat. Seda saaks luua ainult juhul, kui on loodud ruumiprogramm, mis hõlmab ka kupli keskel piiritletud siseseinte ja vahelaega ruume. Eelnev pole aga antud uurimuse peamine eesmärk, mistõttu tuleb improviseerida ja katsetada, kuidas sobituksid IDA-ICE tarkvaras leitavad tööriistad eesmärgi saavutamiseks. IDA-ICE tarkvaras leitavad tööriistad on eelkõige mõeldud abistamiseks, kuid mitte mudeli loomiseks. Ideaaltingimustel toimuks töö IDA-ICE'is läbi *building body* või *zone geometry* importimisel, kuid siiani kasutatud meetoditega ei ole sobivat lahendust nende kasutamiseks leidnud.

Olles laadinud IDA-ICE'i geodeetilise kupli alusplaani DWG faili, saab selgeks et see ei aita palju. Kogu geodeetilise kupli koordinaadid tuleb sisse kanda manuaalselt. Ainukeseks alusplaani abistavaks funktsiooniks on oma kujuga silma all olek, mis aitab silmas pidada, kui koordinaadid valesti lähevad. See hetkel ei aita, kuna selline abivahend toimiks kõige paremini risttahukatest koosnevate tsoonide puhul.

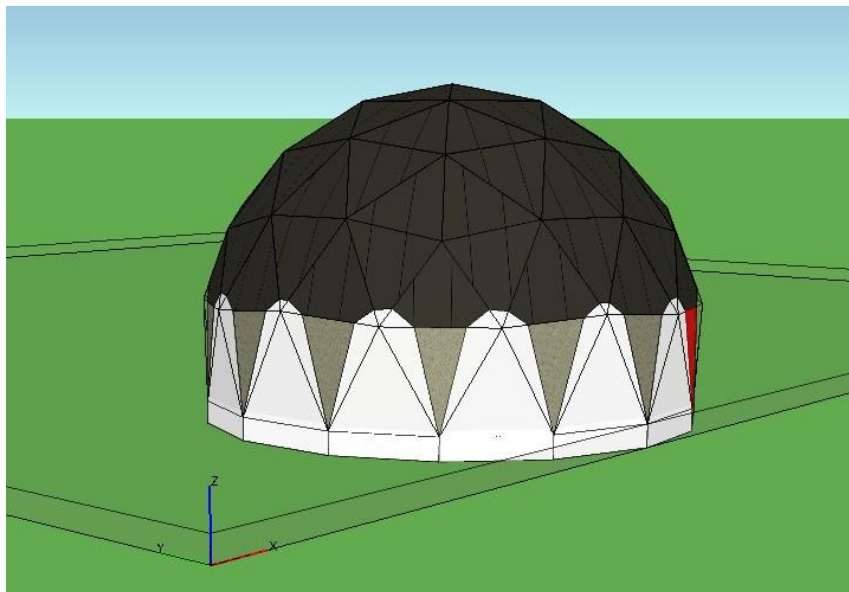
Olles märkinud seinte ja katuse tsooni, saame joonisel nähtava tulemuse (Joonis 13).



Joonis 13. Kupli aluspõhi

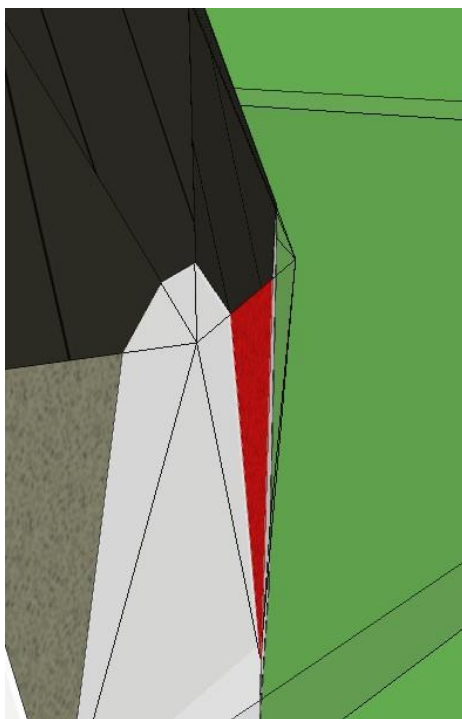
Aluspõhja koordinaatide lisamist tuli alustada koordinaatide kupli tahkude tippude vahel. See tegevus on keerukam, kuna peab sisestama $x;y;z$ teljestiku koordinaadid, millest igaüks tuleb eraldi välja mõõta olemasolevalt DWG jooniselt. See omakorda eeldab, et koordinaadid mõlemas tarkvaras on samad ehk null-punkt asub koordinaat teljestikul samas punktis. Kui nad peaksid asetsema erinevates punktides, tuleks iga koordinaat, mida sisestame, eraldi välja arvutada. See oleks ülemäära aeganõudev tegevus, mis sisaldab suurt riski teha koordinaatides vigu.

Täpsete koordinaatide olemasolul, nende sisestamisel ja katuse osaks määramisel saame geodeetilise kupli 3D mudeli (Joonis 14).



Joonis 14. 3D mudel IDA-ICE tarkvaras

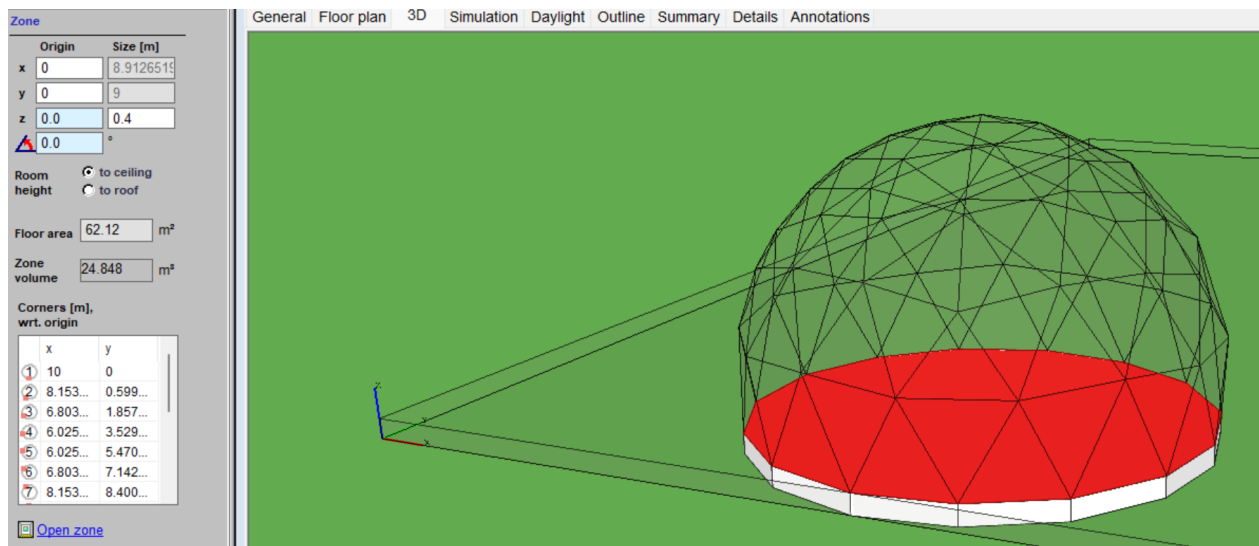
Probleem tekib elemendi terviklikkusega. Kupli põrand on määratud maapinnale jõudvate tahkude koordinaatide põhjal, kuid kuna kolmnurkade vöö pöörab ennast, siis tekib olukord, kus kolmnurga rahud kalduvad väljapoole maapeale ulatuvat piiri (Joonis 15).



Joonis 15. Tahkude ülekaldumine

Selle probleemi lahendamiseks on hetkel kolm varianti: laiendada aluse, ehk põranda ja seinte mõjuala; muuta geometriat sellisel määral, mis tooks kolmnurksete tahkude tipud sisse poole ja eemaldaks ülekaldumise probleemi või lihtsustada kogu geometriat sarnaselt Revit 2023 tarkvaras katsetatud lihtsustatud geometriaga (Joonis 6).

Muutes põranda ja seinte mõjuala mudelis kuni kupli alguseni, saavutame selle, et mudelina säilib ainult põrand ja kupli sõrestik (Joonis 16). Muutes ruumi kõrguse tagasi "to ceiling", tekib sama vaade nagu joonisel 14. Seetõttu selline lahendus tulemuse saavutamiseks ei sobi.

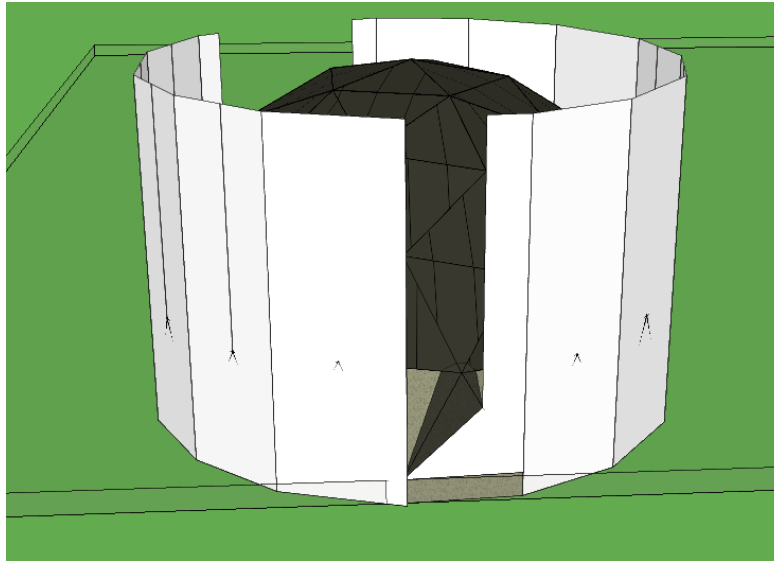


Joonis 16. Põranda kõrguse mõjuala muutmine

2.4.1 Koordinaatide muutmine

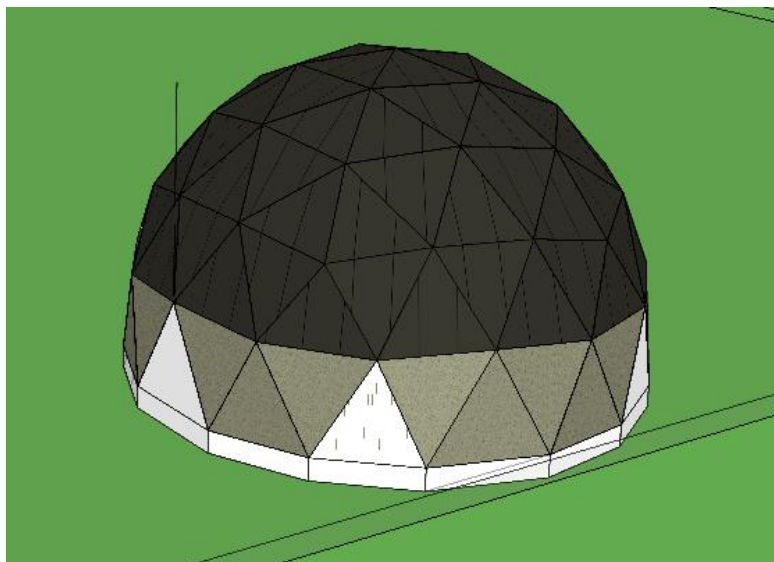
Järgnev katse saavutada terviklik mudel on läbi aluspõhja laiendamise. Laiendame kuni alus- ja väljaulatuv kolmnurkade vöö tipud kattuvad ning tekib ühtne sein.

Koordinaatide nihutamiseks on kasutatud AutoCAD tarkvaras vormistatud plaani ja mudelit, mille põhjal leiti uued koordinaadid. Joonisel on nähtav tulemus aluspõhja laiendamine alumise kolmnurkade tippude kaugusele (Joonis 17). Katse eesmärgil võime proovida nihutada alumise kolmnurga vöö alumisi nurki samadele punktidele nagu seda aluspõhja puhul tegime.



Joonis 17. Aluspõhja laiendamine

Kolmnurkade vöö nihutamine aluspinnaga samadele koordinaatidele ei andnud tulemust, endiselt pole mudel terviklik. Siinkohal võib eeldada, et tulemust ei saa ka anda kolmnurkade alumise vöö ülemiste tippude nihutamine aluspinnaga paralleelseks (Joonis 18).



Joonis 18. Kolmnurkade vöö nihutamine alupinnaga paralleelseks

Selline geomeetria muutmine võib anda tulemuste saavutamaks sobilik keha, kuid ei anna tulemust meie algsele eesmärgile - kuidas mudeldada 3V sagedusega geodeetilise kupli mudel, mille põhjal teostada energiatõhususe analüüs. Seetõttu ei pea vajalikuks mudeldada lihtsustatud geomeetriaga kuppel nagu joonisel (Joonis 6). Eriti arvestades asjaolu, et IDA-

IDA-ICE tarkvara ei ole mõeldud hoonete mudeldamiseks vaid on tööriistaks energiatõhususe simulatsiooni ja analüüsi läbiviimisel.

Akna lisamine puudulikule mudelile ja testiks jahutuskooormuse simulatsiooni käivitamisel andis programm hoiatuse (Foto 13).

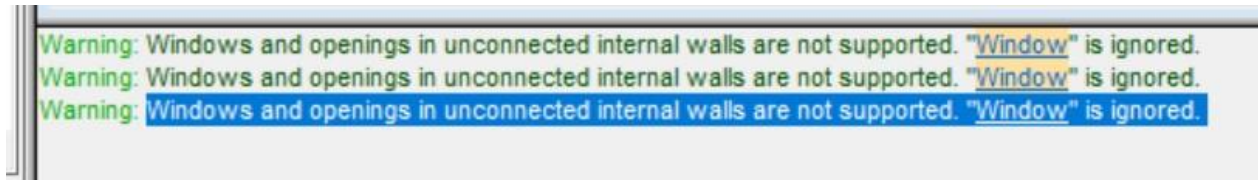
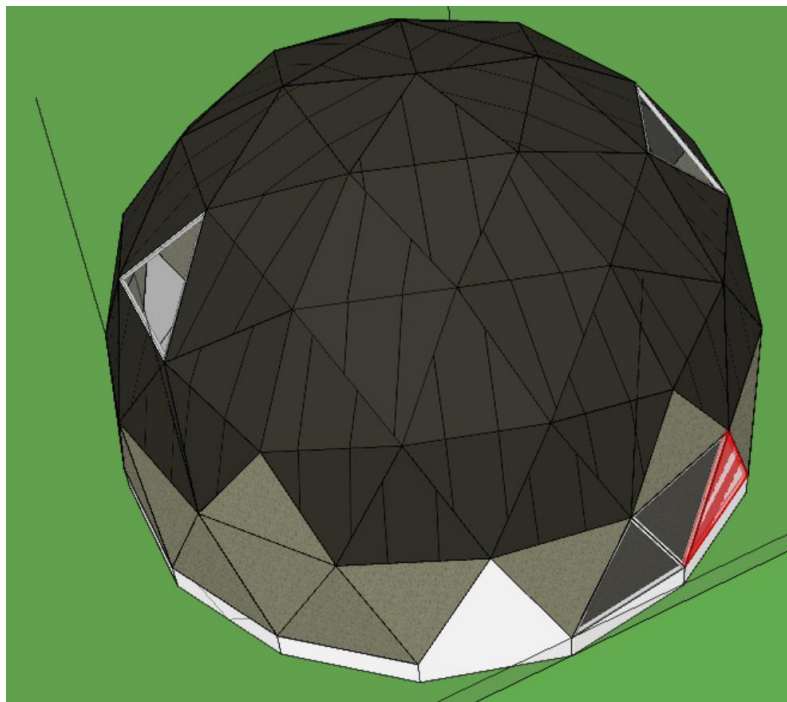


Foto 13. Hoiatus peale simulatsiooni

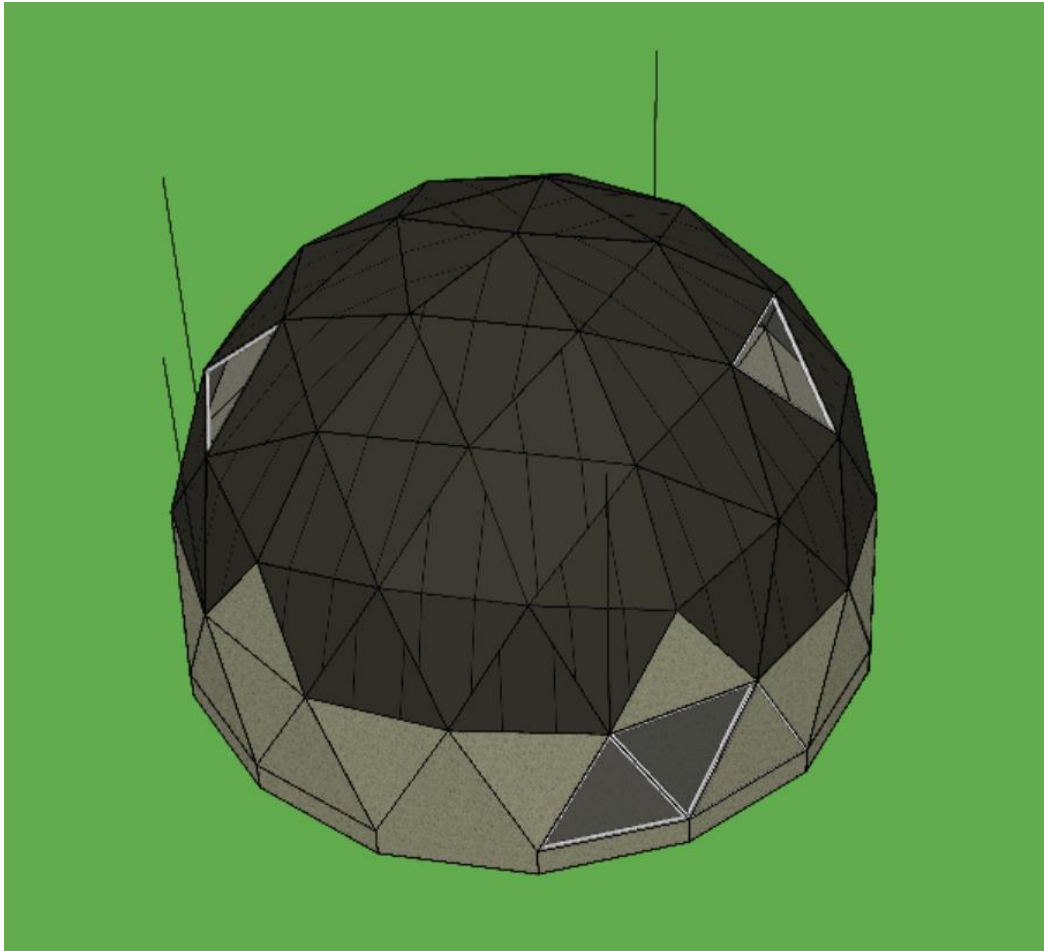
Saadud simulatsiooni analüüsi tulemused ei ole arvestatavad, kuna ei ole kasutatud kogu infot, mis oli antud testi tarbeks mõeldud.

Kuna tarkvara ei tunnistanud olemasolevat akent, pidi leidma põhjuse milliste akende lisamise puhul võib esineda märguandeid ja hoiatusi tarkvara poolt. Lisades aknaid ei ilmne ühtegi hoiatust. Lisame juurde neli akent (Joonis 19).



Joonis 19. Mudel akendega

Hetkel on geodeetilise kuplit ümbritsev building body märksa suurem, kui seda on kupli tsoon. See põhjendab valgeid tahke, kuna IDA-ICE tunnistab neid alasid, kui sisekeskonda. Seetõttu selle tsooni alas IDA-ICE ei arvesta välistingimusi. Building body muutmise samale geomeetriaale nagu seda on tsooni geomeetria, likvideerib valged tahud (Joonis 20).



Joonis 20. Building body muutmise

Eelnevale tegevusele ei järgne ühtegi hoiatust, ega errorit. Sellest jäeldame, et võime sooritada uue katse simulatsiooni läbiviimiseks. Antud hetkel ei ole mudelit täiustatud detailse infoga konstruktsiooni omaduste ega ruumide näol, eesmärgiks on veenduda simulatsiooni läbiviimise võimalikkusest.

3 ENERGIATÕHUSUSE ANALÜÜS

Energiatõhususe analüüse saame teostada keskendudes ühele kindlale osale või teha üldine simulatsioon, millega saame info hoone energiakulust, ülekuumenemisest, jahutus- ja kütmis energiavajadustest. Võttes ette simulatsioonid nii eraldi, kui ka korraga saame errori mis ei anna meie analüüsile tulemust (Foto 14).



Foto 14. Simulatsiooni järgne error

Sellest võime järeldada, et ebatäiuslikust mudelist tulenevalt ristuvad sein ja akna elemendid, mistõttu ei saa me teostada toimivat simulatsiooni.

Samuti ei toimu simulatsiooni kasutades "Advanced level" simulatsiooni(Foto 15).

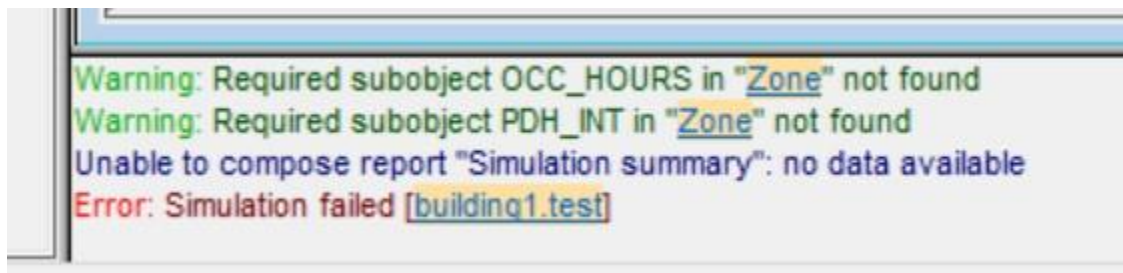


Foto 15. Advanced level

Eemaldades probleemsetelt seinatahkudelt aknad, likvideerime errori teated. Käivitades simulatsiooni me ei saa ühtegi errorit ja simulatsioon töötab lõpuni.

3.1 Järeldus

Jõudes simulatsioonini saame väita, et mudeldada geodeetiline kuppel ja selle kohta teostada energiatõhususe simulatsioon IDA-ICE tarkvaras, on võimalik. Kuid antud uurimuse simulatsioon teostati mitte täieliku mudeliga. Proovides lisada sobivas koguses avatäiteid,

tekitas see simulatsiooni läbiviimisel tõrkeid. Samuti simulatsiooni tulemus on ebatäpne, kuna puuduvad andmed seinte soojusläbistavuse näitajate kohta. Suureks puudeks on ruumilahenduse puudumine tsoonidena, mis takistab suvise ülekuumenemise simulatsiooni läbiviimist. Kuna tegemist ei ole tavapärase geomeetriaga, siis ei saa kasutada näiteks joonkülmasildade tegureid mis on kasutusel ristahukalistest geomeetriaest koosnevaltel hoonetel. Samuti puudub kütte- ja ventilatsiooni lahendus kuppelhoonele, mis annaks hoone osade energiavajadustest parema ülevaate.

Me teame, et geodeetilise kupli mudelit on võimalik luua mitmes tarkvaras, sealhulgas IDA-ICE'is, kuid saavutamaks toimivat simulatsiooni, vajame korrektset mudelit koos vajalike andmetega. Uurimuse jätkamiseks tuleb leida, mis on mudeldamisel tehtud valesti, kuidas vältida geomeetriaest tulenevaid erroreid ja siduda mudel reaalse andmetega.

Sellest tulenevalt uurimuse jätkamiseks tuleb läbi mõelda hoone konstruktiivne ja plaaniline lahendus. Samuti tehnosüsteemide osa mis annaks hoone energiavajaduse kohta infot.

KOKKUVÕTE

Käesoleva uurimustöö tulemusena, leiti mitmeid mooduseid, kuidas kasutades erinevaid tarkvarasid mudeldada ikosaeedri baasil loodud geodeetilist kuplit. Peamise eesmärgini jõudmiseks pidime katsetama erinevaid meetodeid ja geomeetria, et saavutada analüüsi koostamiseks sobilik mudel. Veenduti mudeldamise võimalikkusest valitud tarkvarade ja meetoditega, samuti välistasiti sobimatud lahendused eesmärgi saavutamiseks.

Uurimustöös kasutatud tarkvarad ja meetodid ei ole kindlasti ainsad. Küll aga eesmärgiga viia läbi kuppelhoone energiatõhususe analüüs, on vaja mudelit mis vastaks IDA-ICE tarkvaraga ühildumise nõuetele. Antud uurimustöös kasutatud Revit 2023 võimaldas edukalt ja võrdlemisi lihtsalt mudeldada geodeetiline kuppel, kuid ei leitud moodust, kuidas lisada sobiv *Space* element Mass tüüpi mudelisse. Siinkohal ei saa väita, et antud tarkvaraga sobilikku mudeldamist ei saagi teostada, pigem jääb küsimus tarkvara ja meetodite tundmise taha. Uurimustöö jätkamise võimaluseks on katsetada samade tarkvaradega teisi meetodeid. Eesmärgile vastav ligilähedane olukord saavutati Sketchup Pro 2024 tarkvaraga. Seega saab väita, et tarkvara tõhusamal kasutusel võib jõuda eesmärgini millega saab eksportida IDA-ICE'I sobiva *building body* või *zone geometry*, mille põhjal mudel seadistada sobivaks kehaks, teostada energiatõhususe simulatsioon ja analüüs. Samuti tõestati keerulise geomeetriaga hoone mudeldamise võimalikust IDA-ICE tarkvaras. Meetodiga veenduti selle võimalikkuses, kuid aeglasel ja tülikal moel. Lõpptulemusena ebaõnnestumine tõendab see seda, et sellisel moel mudeldades on suur risk teha vigu, mis ei lase protsesse lõpuni viia.

Uurimustöö tulemusena saab väita, et geodeetilise kupli mudelit on võimalik koostada mitmel moel. Samuti seda, et analüüsi on võimalik teostada, kuid täpsete andmete saamiseks on vaja korrektset mudelit ning, et analüüsi läbiviimiseks tunnistab IDA-ICE kõiki elemente ja tegureid. Järeldati, et valitud meetodid ei olnud lõpptulemuse saavutamiseks piisavad. Tuleb kasutada kas samade tarkvarade teisi võimalusi või läheneda ülesande lahendamisele teiste meetoditega.

Uurimustöö tõhusamaks jätkamiseks oleks lisaks hoone 3D mudeldamisele ja tarkvaradega sobitumisele ka reaalse hoone loomine või kasutada olemasolevatelt kuppelhoonetelt ja nende loojatelt protsesside ja tulemuste andmeid. Sellega tekiks võimalus analüüsida hoone efektiivsust, lisaks energiatõhususele, ka teistest punktidest. Lõpptulemusena oleks võimalik ühildada teooria ja kogemused, saavutamaks eesmärgi – kuidas luua põhjalik kuppelhoone

loomise BIM protsess, mis võimaldaks koos analüüsida ja võrrelda seda klassikalise eluhoone ja selle omadustega.

SUMMARY

BIM Process and Energy Efficiency Analysis for Creating a Dome Building

Dome structures have been built for centuries, if not millennia. Geodesic domes with a light-weight truss solution were first designed in the beginning of the twentieth century by a German engineer, Walther Bauersfeld. Over the decades, this type of structure has been used for various purposes. In the middle of the previous century, it was popular to build this type of residential building in North America. The advantages of a dome building are the technical strengths arising from structural details. This makes this type of structure common in regions with extreme weather conditions.

It is widely believed that buildings with a geodesic dome structure are more energy efficient. Unfortunately, there are no comprehensive studies and analyses to prove this hypothesis. As such, the aim of this study is to analyse the energy efficiency of a dome structure building through the BIM process. The aim is achieved by creating an architectural 3D model that includes the necessary Space element in order to reconcile it with the IDA-ICE software for analysing energy efficiency and summer overheating.

Common modelling softwares Revit 2023, AutoCAD 2024 and Sketchup Pro 2024 have been used to create a 3D model of a suitable element at different stages of the process. As the last solution, modelling was also carried out in the IDA-ICE 5.0 software for analysing energy efficiency and summer overheating.

Different software have different capabilities in terms of modelling and analysis, so not every software is suitable for preparing this analysis. A bigger problem arises with the choice of methods, which can be based on knowing the capabilities of modelling software. Different softwares offer several solutions to achieve the goal, so it is important to know the software you are using and reconcile it with the goal. This study uses methods which include building a model directly in a single software, with the aim of creating a geodesic dome with a frequency of 3V. To obtain the desired result, various techniques are used, including simplified geometry in modelling and combining data from models created in different software.

As a result of the study, suitable software for modelling and bringing the model to a format that would provide the opportunity to export the necessary Space element in the IDA-ICE 5.0 analysis software for energy efficiency and summer overheating are identified.

By creating the desired model and importing the information, we achieve the opportunity to continue the BIM process of creating a dome building and its analysis. Knowing the energy efficiency advantages and problems of a dome building gives better results in planning the structure of a dome building in the future. Failure to arrive at a suitable model or simulation provides a basis for continuing the same research with other methods and software until a suitable and workable solution is found.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Paul Robinson, „Geodesic dome frequency explained“. Vaadatud: 17. märts 2024. [Online]. Available at: <https://geo-dome.co.uk/article.asp?uname=domefreq>
- [2] Davis, T. (2011). Geodesic domes. Vaadatud: 17.03.2024, from <https://scholar.google.com>
- [3] J. R. Chasnov, „Fibonacci Numbers and the Golden Ratio“. Vaadatud: 17. märts 2024. [Online] from <https://www.math.hkust.edu.hk/~machas/fibonacci.pdf>
- [4] J. M. H. III, „3V 5/8 Geodesic Dome Calculator“, Zip Tie Domes. Vaadatud: 26. märts 2024. [Online]. Available at: <https://www.ziptiedomes.com/geodesic-dome-calculators/3v-geodesic-dome-calculator.htm>
- [5] „The optimization process leading to the tessellation of the first geodesic dome structure, the first Planetarium of Jena“. Vaadatud: 17. märts 2024. [Online]. Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/09560599211064110>
- [6] „Dome Construction of the Jena Planetarium | ZEISS“. Vaadatud: 17. märts 2024. [Online]. Available at: <https://www.zeiss.com/planetariums/int/about-us/image-download/dome-construction-of-the-jena-planetarium-zeiss.html>
- [7] „Biography“, Buckminster Fuller Institute. Vaadatud: 17. märts 2024. [Online]. Available at: <https://www.bfi.org/about-fuller/biography/>
- [8] Peng, Z (2016). „Geodesic Dome Structural Analysis and Design“ . Vaadatud: 27. märts 2024. [Online]. Available at: <https://core.ac.uk>
- [9] „North America’s Arctic radar shield is due for an upgrade“, *The Economist*. Vaadatud: 17. märts 2024. [Online]. Available at: <https://www.economist.com/the-americas/2021/07/29/north-americas-arctic-radar-shield-is-due-for-an-upgrade>
- [10] „Muldelprojekteerimise üldjuhend“ (2012). Vaadatud: 27. märts 2024. [Online]. Available at: https://www.evs.ee/images/uploaded/juhendmaterjalid/Juhendmaterjal_107_Mudelprojekteerimise_%C3%BCldjuhendid_2012_Osa_1_Mudelprojekteerimise_%C3%BCldjuhendid.pdf
- [11] „Help | About Spaces | Autodesk“. Vaadatud: 16. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/ENU/?guid=GUID-B876A6F6-4091-40CA-ADCD-AA5D0EFC5EE3>
- [12] „IDA ICE - Simulation Software | EQUA“. Vaadatud: 26. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.equa.se/en/ida-ice>