



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**HOONE SÜSINIKUJALAJÄLJE ARVUTUSE
AUTOMATISEERIMINE MUDELPROJEKTEERIMISE
PLATVORMIL TEKLA STRUCTURES**

**AUTOMATION OF CARBON FOOTPRINT CALCULATION
IN THE MODELLING PROGRAM TEKLA STRUCTURES**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Hurmo Sammal

Üliõpilaskood 192679

Juhendaja: PhD, Ergo Pikas

Tallinn 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

6. mai 2024

Autor:

.....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

"....." 20.....

Juhendaja:

.....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....":20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....

/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, **Hurmo Sammal,**

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
**Hoone süsinikujalajälje arvutuse automatiseerimine mudelprojekteerimise
platvormil Tekla Structures,**
mille juhendaja on Ergo Pikas
 - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil,
sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni
autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna
kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni
autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles
ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi
ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

06.05.2024

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **HURMO SAMMAL**Üliõpilaskood **192679**Õppekava: **EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**

Peeriala: Ehitiste projekteerimine

Lõputöö teema:

**HOONE SÜSINIKUJALAJÄLJE ARVUTUSE AUTOMATISEERIMINE
MUDELPROJEKTEERIMIS PLATVORMIL TEKLA STRUCTURES**

Automation of carbon footprint calculation in the modeling program Tekla Structures

Juhendaja: **PhD, Ergo Pikas**

ergo.pikas@taltech.ee

Lõputöö konsultandid:

Tiitel või ametikoht, Ees- ja
PerekonnanimiKontakt (e-post või
telefon)

Allkiri ja kuupäev

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Hoone süsinikujalajälje hindamise alused, meetodite ja vahendite määrtlemine
2. Arvutusliku kavandamise alused ja meetodite määrtlemine ja sobivus süsinikuheitme arvutamiseks
3. Mallhoone süsinikuheitme arvutuse automatiseerimine Tekla Structures keskkonnas ja lahenduse hindamine

Töö keel: eesti keel

SISUKORD

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
TABELITE LOETELU	9
JOONISTE LOETELU.....	10
SISSEJUHATUS	11
1. SÜSINIKUJALAJÄLJE JA PARAMEETRILISE PROJEKTEERIMISE TEOREETILINE ÜLEVAADE	13
1.1 Süsinikujalajälje taust ja seos ehitussektoriga	13
1.1.1 Direktiivid süsinikujalajäljega arvestamiseks	17
1.1.2 Süsinikujalajälje arvutuse alused ja LCA meetodika	23
1.2 Süsinikujalajälje arvutamise meetodika.....	24
1.2.1 EPD olemus ja meetodika	28
1.2.2 LCA leidmise põhimõtted	30
1.2.3 LCA arvutuse tootmisetapid	31
1.3 Arvutuslik kavandamine	34
1.3.1 LCA ja BIM ühildamine projekteerimises	34
1.3.2 Arvutuslik mõtlemine ja kavandamine.....	36
1.3.3 Parameetiline, generatiivne ja algoritmiline kavandamine	37
1.3.4 Arvutuslik kavandamine süsinikujalajälje arvutuseks	39
2. HOONE SÜSINIKUJALAJÄLJE ARVUTAMISE AUTOMATISEERIMISE METOODIKA	42
2.1 Mallhoone tutvustus	43
2.2 Mallhoone baasmudeli elementide kirjeldused ja alternatiivid	43
2.3 Rhino ja Grasshopperi rakendamine.....	47
2.4 Süsinikujalajälje arvutuse meetodika selles töös.....	47
3. ARVUTUSMUDELI TULEMUSED JA VÕRDLUS TEHTUD ARVUTUSEGA	49
3.1 Grasshopperi programmi arendamine.....	49
3.1.1 Elementide vastavusse viimine Tekla Structures programmis.....	49
3.1.2 Grasshopperi programmi arendamine ja parameetrite avaldamine	52
3.2 Mallhoone süsinikujalajälje arvutuse tulemused.....	55
3.3 Võrdlus 2022. aasta tulemustega.....	58
3.4 Üldised järeldused, piirangud ja tuleviku arendused.....	59
KOKKUVÕTE	61
SUMMARY	63
KASUTATUD KIRJANDUS.....	65

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

BIM – *Building Information Model* / infomudel ehitatavast hoonest

CAD – Computer Aided Design / raalprojekteerimine

CO₂ - Süsinikdioksiid

CO₂e – Süsinikuekvivalendiks arvatud kasvuhooonegaasid

EL – Euroopa Liit

EPD – *Environmental Product Declaration* / toote keskkonnadeklaratsioon

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive* / hoonete energiatõhususe direktiiv

FEA – Finite Elemente Analysis / lõplike elementide analüüs

GWP – *Global Warming Potential* / globaalse soojenemise potentsiaal

KHG - Kasvuhooonegaas

LCA – *Life Cycle Assessment* / ehitise olelusring

TABELITE LOETELU

Tabel 1.1. Elektri- ja soojusenergia (ruumid ja vesi) tarbimine aastas ja sellest tulenevad heitekogused [5]	14
Tabel 1.2. Hoonetüüpide energia lõpptarbimine Eestis [6]	15
Tabel 1.3. Hoonetüüpide CO ₂ heitme väärtused Eestis [6]	15
Tabel 1.4. Viie Euroopa riigi süsinikujalajälje regulatsioonide võrdleva analüüsi peamised	21
Tabel 1.5. Erinevate projektistaadiumite LCA arvutuse etapid [16]	23
Tabel 1.6. Kavandatav hindamisala Eestis [6]	26
Tabel 1.7. Level(s) raamistiku indikaatorid [19].....	27
Tabel 2.1. Hoone ehituslike osade kirjeldus antud uurimistöös raames	45
Tabel 2.2. 2022 teostatud LCA arvutuse ehituslikud osad [33]	46
Tabel 3.1. Tootmisetapi LCA arvutuse tulemused	56
Tabel 3.2. Elemendi gruppide kaupa saadud tulemused.....	57
Tabel 3.3. 2022 teostatud arvutuse tulemused [33]	59

JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1. Kasvuhoonegaaside heitkoguste jagunemine sektoriti 2021. aastal [1].	13
Joonis 1.2. Kasvuhoonegaaside tekkimine elukaare erinevatel etappidel [5].....	16
Joonis 1.3. Eestis tekkivad kasvuhoonegaasid [9].	17
Joonis 1.4. Hoonetele päikesepaneelide paigaldamise nõuete daatumid [12].....	19
Joonis 1.5. Madalsüsinikehituse vaatepunktid [5].....	24
Joonis 1.6. Süsinikujalajälje kalkulaatori arvutusmetoodika moodulid [14].....	25
Joonis 1.7. Keskkonnatoimivuse hindamisprotsessi vooskeem [22].	31
Joonis 1.8. EPD tegemise kasv standardi <i>EN 15804</i> järgi [23].	33
Joonis 1.9. Hoone oleluskaare arvutuse osad [21].	34
Joonis 1.10. LCA ja BIM omavahelise ühendamise skemaatiline töövoog [24].	35
Joonis 1.11. Arvutusliku ja matemaatilise mõtlemise Venni diagramm [25] [26].	36
Joonis 1.12. Näidisfoto parameetrilise mõtlemisest arhitektuuris [27].	37
Joonis 1.13. Grasshopperi struktuur LCA arvutuse tegemiseks [31].	40
Joonis 1.14. Grasshopperi LCA arvutuse visuaalne tulemus [31].	41
Joonis 3.1. Grasshopperi ja Tekla Structures käsuribad.	49
Joonis 3.2. Tekla valiku filtri arendamine Teklas.	50
Joonis 3.3. Tekla valiku filter karkassipostidele.	51
Joonis 3.4. Tekla Object Pipeline käsk karkassipostide integreerimiseks.....	51
Joonis 3.5. Grasshopperi visuaalne kood Tekla elementide massi filtreerimiseks baasmudelile. ..	52
Joonis 3.6. II alternatiivi betoonpostide loomise programmiosa.	53
Joonis 3.7. Heitmeteguri MS Exceli integratsioon Grasshopperisse.....	53
Joonis 3.8. Süsinikujalajälje arvutamise programmiosa raudbetoonpostide näitel.	54
Joonis 3.9. Hoone süsinikujalajalg mallhoones etappides A1-A3.....	55

SISSEJUHATUS

Ehitus- ja kinnisvarasektor on nii Eestis kui mujal maailmas üks suuremaid CO₂ heitkoguse tekitajaid. Eestis tekitab ehitus- ja kinnisvarasektor 49,6% kogu Eesti CO₂ heitmest, millest 32% moodustab energiakasutus, 8,4% ehitus ja 6,5% ehitusmaterjalid. [1]

Antud lõputöö teema on valitud tulenevalt 2027. aastal Euroopa Liidus jõustuvast süsinikujalajälje arvutamise nõudest ning ühiskonna suunast liikumaks süsinikuneutraalsema maailma poole. Euroopa Liit kehtestab kõigis oma liikmesriikides nõude, mille kohaselt tuleb arvutada kõigi avalike hoonete süsinikujalajälge, mis on suuremad kui 2000 m². Samuti laieneb sama nõue erasektorile aastast 2030. Tuleviku perspektiive arvesse võttes on oluline hakata mõtlema selle peale, kuidas võimalikult kiiresti uute nõuetega kohaneda ning olla valmis selle täitmiseks. [2]

Antud uurimistöö raames tutvustatakse süsinikujalajälje tekkepõhjuseid ehitussektoris, süsinikujalajälje arvutamise metoodikat ning poliitikat, mida rakendatakse süsinikujalajälje arvutamise direktiivide täide viimiseks. Lõputöö teises pooles käsitletakse süsinikujalajälje arvuga arvestamist hoone kavandamisetapis. Antud töös on loodud mudel eelprojekti tasemel, kus hoone konstruktsioonide ristlõiked kande- ja kasutuspiiriseisundile on teada ning seeläbi on võimalik optimeerida konstruktsioone lähtuvalt süsinikujalajäljest. Arvutusprotsessi automatiseerimisega on võimalik säilitada kogu ehitusprojekti ajakulu ka peale uute nõuete kehtestamist. Selles töös koostatakse programm, mille abil saab muuta tootmisetapi süsinikujalajälje arvutamise protsessi kiiremaks ja automaatiseeritumaks.

Uurimistöö eesmärk on arvutusliku kavandamise metoodikat kasutades automatiseeritud töövoog arendamine hindamiseks süsinikuheitme arvestamist hoone kavandamise varajases etapis. Tulemuse saamiseks on autor kasutanud arvutusliku kavandamise metoodikat. Selleks luuakse visuaalse programmeerimiskeele abil programm, mida konstruktsioonide projekteerimise ja dimensioneerimise ajal kasutada saab. Programmi arendamiseks kasutatakse arvutusliku kavandamist, mis hõlmab endas käsitsi andmete sisestamise vähendamist, kiiremat lahenduse saamist ja multifunktsionaalsust erinevate projektide vahel kasutamiseks.

Süsinikujalajälje automatiseeritud arvutuse tulemuste hindamiseks ja võrdlemiseks kasutatakse eelnevalt koostatud projekti, kus on juba läbi viidud hoone süsinikujalajälje arvutus. Töös on kasutatud Maru Ehitus AS-i poolt ehitatud Windak OÜ laohoone laiendusprojekti Tallinnas, Peetri alevikus. Hoone kandevkonstruktsioonid ja katendid

on projekteeritud Norte OÜ poolt, kes lasi arendusprojekti raames hoonele teostada süsinikujalajälje arvutuse. Hoone on projekteeritud teraskarkassile, mille seinad moodustavad kergpaneelid ning katuse kandvad profiilterasplekid.

Uurimistöö eesmärgi saavutamiseks on autor püstitanud järgmised ülesanded:

1. Hoone süsinikujalajälje hindamise alused, meetodite ja vahendite määratlemine
2. Arvutusliku kavandamise alused, meetodite määratlemine ja sobivuse hindamine
3. Mallhoone süsinikuheitme arvutuse automatiseerimine Tekla Structures keskkonnas ja lahenduse hindamine

Lõputöö kirjanduse ülevaates käsitletakse kolme erinevat teemat eraldi alapeatükkides.

Esimene alapeatükk käsitleb süsinikujalajälje temaatikat laialdasemalt. Süsinikujalajälje mõiste tekkimist, süsinikujalajäljega arvestamist projekteerimisfaasis ning süsinikujalajälje arvutamisele kehtestavatest kohustuslikest nõuetest

Teises alapeatükis on lahti kirjutatud süsinikujalajälje arvutamise meetodika. Selles keskendutakse erinevatele ehitusmaterjalidele süsinikuekvivalent väärtuse arvutamisele, süsinikuekvivalendi arvu rakendamisele hoone konstruktsioonidele ja hoone tervikliku süsinikujalajälje arvu saamisele.

Kolmanda alapeatüki teemaks on arvutuslik kavandamine (*computational design*). Arvutuslik kavandamine on hea võimalus kiirendamiseks projekteerimise protsessi ja muuta seda efektiivsemaks kui see täna on.

Lõputöö peamine eesmärk on arvutusliku kavandamise põhimõtteid rakendades mallhoone süsinikujalajälje arvutuse automatiseerimine. Mallhoonele koostatud süsinikujalajälje arvutus ja tehtud võrdlus süsinikujalajälje arvutusega, mis on tellitud mallhoonele aastal 2022.

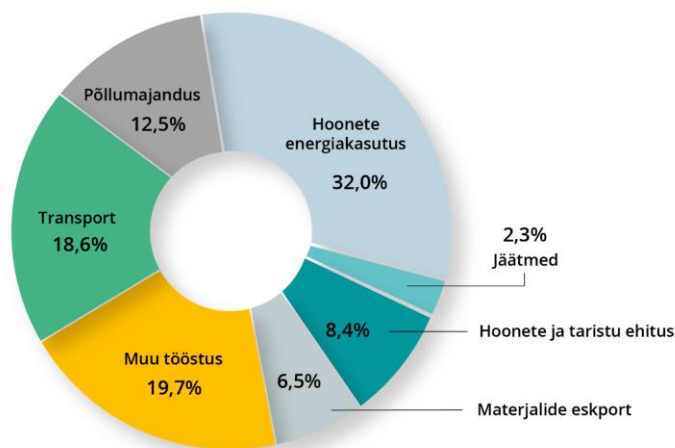
Võtmesõnad: süsinikujalajälje direktiivid, arvutuslik kavandamine, *Grasshopper*, süsinikujalajälje arvu arvutamine, magistritöö

1. SÜSINIKUJALAJÄLJE JA PARAMETRIILISE PROJEKTEERIMISE TEOREETILINE ÜLEVAADE

1.1 Süsinikujalajälje taust ja seos ehitussektoriga

Esimeses alapeatükis käsitletakse süsinikujalajälje olemust, miks see teema on ehituses hetkel väga aktuaalne. Mis meetmeid rakendatakse nii Eesti riigi kui Euroopa Liidu tasandil poliitiliselt selleks, et süsinikujalajälje arvutamine oleks seaduslikult nõutud ja arvutamise meetodika oleks üheselt kasutatav ja mõistetav.

Süsinikujalajälje terminit on pikalt ja laialdaselt kasutatud ja seotud maailma kliimamuutuste kirjeldamiseks. Süsinikujalajälje fraas on tugevalt pilti ilmunud nii ärimaailma, poliitikasse ja meediasse. Süsinikujalajälje terminit saab lahti mõtestada kui teatava hulga kasvuhoonegaaside (KHG) tekkimist, mis mõjutavad oluliselt maailma kliimat nii inimtekkeliste ja loodustekkeliste heitgaaside mõjul. Süsinikujalajälje arvutamine on väga lai mõiste ning ühtset vastet selle kohta on keeruline leida, sest see võib ulatuda materjali süsinikujalajäljearvust kuni terve ehitise olelusringi (LCA – Life Cycle Assessment) arvutamiseni. [3]



Joonis 1.1. Kasvuhoonegaaside heitkoguste jagunemine sektoriti 2021. aastal [1].

Ehitus- ja kinnisvarasektor, sealhulgas hoonete ehitamine, kasutamine ja energiakasutus, on suurima KHG tekitamisega valdkond Eestis. Sellest suurim osa on energiakasutus, mille osakaal on 32% (Joonis 1.1), mis sõltub rohkesti küll energiatootmiseks kasutatavate maavarade tüübist, kuid rolli mängib samuti hoonete energiatõhusus ja ehituskvaliteet. [1]

Euroopa tasandil on ehitussektori KHG heide samas suuruses, mis Eestis. Euroopas ja ka maailmas kulub ligikaudselt üle poole maavaradest ehitamisele ja Euroopa kogu energiatarbimisest moodustab umbes 40% hoonete energiakasutus. Antud suurust ilmestab Tabel 1.1, kus on näha erinevat liiki hoonete energiakasutus Soome hoonete andmetel. Eesti olukorda ilmestavad tabelid Tabel 1.2 ja Tabel 1.3. Lisaks energia tarbimisele tekib kolmandik CO₂ heitmetest ehitistest ja ehitamisprotsessist. [4]

Tabel 1.1. Elektri- ja soojusenergia (ruumid ja vesi) tarbimine aastas ja sellest tulenevad heitekogused [5]

Tarbimine ja heitekogused		
Kirjeldus	kWh/m²	kg CO₂/m²
Uue korterelamu (2018-) soojusenergia tarbimine	91	15,8
Uue korterelamu (2018-) elektrienergia tarbimine	37	5,6
Uue väikeelamu (2018-) soojusenergia tarbimine	96	16
Uue väikeelamu (2018-) elektrienergia tarbimine	27	4,1
Uue büroohoone (2018-) soojusenergia tarbimine	56	9,7
Uue büroohoone (2018-) elektrienergia tarbimine	60	9,1
Vana korruselamu (1971-80) soojusenergia tarbimine	153	26,4
Vana korruselamu (1971-80) elektrienergia tarbimine	36	5,4
Vana väikeelamu (1971-80) soojusenergia tarbimine	191	33,0
Vana väikeelamu (1971-80) elektrienergia tarbimine	40	6,1
Vana büroohoone (1971-80) soojusenergia tarbimine	115	19,9
Vana büroohoone (1971-80) elektrienergia tarbimine	61	9,3

Tabel 1.1 kajastatud numbreid analüüsid on näha, et mõistetavalt on energiatarbimisest tekkiv süsinikujalajälg suurem vanemates hoonetes, kus võrreldes uute hoonetega on ruutmeetri kohta tekkiv CO₂ hulk 2 korda suurem. Siit saab järeldada, et üldise süsinikujalajälje tekkimise vähendamiseks tuleks renoveerida eksisteerivaid vanu hooneid, kuid mõeldes tulevikule on üks variant kavandada täna uusi madalsüsinikeitega hooneid. Pikendades hoone eluiga ja rõhuda kvaliteedile, et renoveerimiseaeg lükata võimalikult kaugemale tulevikku.

Tabel 1.2. Hoonetüüpide energia lõpptarbimine Eestis [6]

Hoonetüüpide energia lõpptarbimine Eestis			
Lõpptarbimine	Lõpptarbimine 2020, TWh/a		
Kirjeldus	Soojusenergia	Elekterenergia	Kokku
Üksikelamu	2,9	0,4	3,2
Korterelamu	3,1	0,6	3,8
Büroo	0,4	0,2	0,7
Kaubandus	0,3	0,4	0,7
Haridus	0,4	0,1	0,5
Muud hooned	1,9	0,9	2,8
Kokku	9,0	2,7	11,7

Eesti energia lõpptarbimine on olnud viimase 15. aasta jooksul olnud vahemikus 31-35 TWh. Tabel 1.2 olevate andmete põhjal on näha, et hooned tarbivad umbes kolmandiku energiast Eestis. Seda arvu saab vähendada energiatõhusamate hoonete kavandamisega. [7]

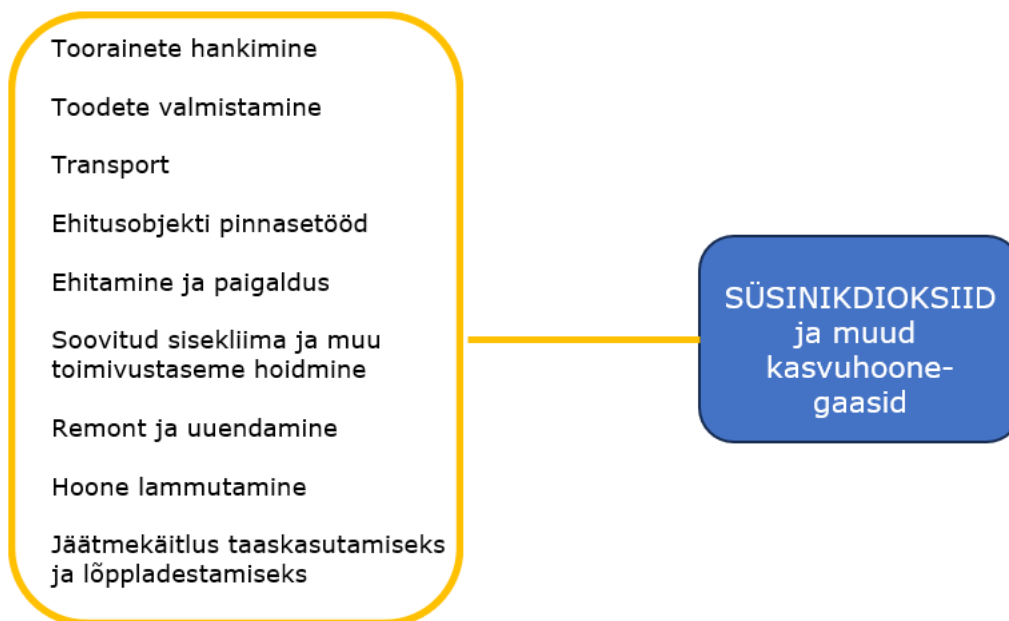
Tabel 1.3. Hoonetüüpide CO₂ heitme väärtused Eestis [6]

Hoonetüüpide CO₂ heide Eestis			
CO₂ heited	CO₂ heited 2020, t/a		
Kirjeldus	Soojus	Elekter	Kokku
Üksikelamu	429 000	432 000	860 000
Korterelamu	467 000	737 000	1 200 000
Büroo	66 000	270 000	340 000
Kaubandus	38 000	515 000	550 000
Haridus	62 000	102 000	160 000
Muud hooned	288 000	1 030 000	1 320 000
Kokku	1 350 000	3 086 000	4 430 000

Hoonete süsinikjalajälge mõjutab suuresti energiatarbimine. Seetõttu on vajalik mõelda hoone kavandamisel, et hooned oleksid võimalikult energiatõhusad ning seeläbi saavutada võitu KHG heitmete kohalt.

Hoonete projekteerimisel, ehitamisel, kasutamisel ja utiliseerimises tekib igas etapis keskkonda saastavaid heitmeid. Selleks, et saavutada hoonete puhul langev heitmete tekkimise suund tuleb hooneid kavandades läbi mõelda kõik võimalikud etapid KHG tekkimise vähendamiseks. Eesmärgini aitab paremini jõuda kui hoone tellija ja

projekteerijad teevad tihedat koostööd hoone kavandamisel, mõeldes läbi hoone arhitektuuri, konstruktsiooni tüübid, põhi ehitusmaterjalide valiku ja kvaliteetse projekti abiga vähendada ehitusprotsessi heitmeid. Projekteerimisfaasis tekkiv KHG heitme kogus on küll väike osa kogu ehitusprotsessist, kuid selles faasis tehtud õiged otsused mõjutavad tervet hoone eluiga ehk ehitamist, kasutust ja lammutust. Joonis 1.2 näitab heitmeid tekitavad hoone oleluskaare etappe, millega saab juba projekteerides arvestada. [5]

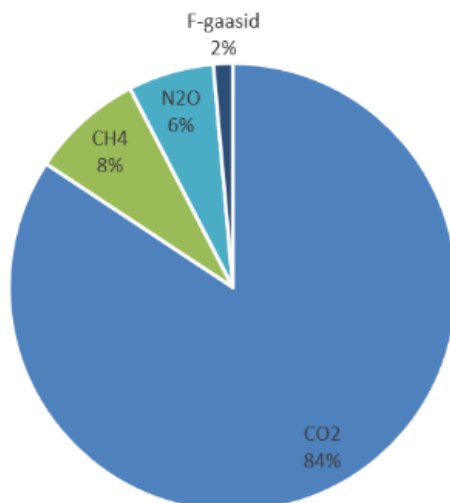


Joonis 1.2. Kasvuhoonegaaside tekkimine elukaare erinevatel etappidel [5].

Süsinikujalajälge mõõdetakse süsinikuekvivalenti kasutades, mille ühik on CO₂e ning väljendab CO₂ heitmeid aasta kohta tonnides. CO₂e on lihtsustatult väärtus, mis näitab kõikide KHG heidete hulka, mille väärtused on konverteeritud CO₂ tasandile. Selleks kasutatakse globaalse soojenemise meetodit, kus vastava kasvuhoonegaasi ühikmass on võrdeline CO₂ ühikmassiga. [8]

CO₂ ei moodusta üksi kogu tekkivatest KHG heitmetest vaid Eestis lisandub CO₂ kõrval veel metaan, diämmastikoksiid ja fluoro süsivesinikud (Joonis 1.3). Kuid CO₂ on suurim heitetekitaja Eestis tekitades 84% kogu Eesti kasvuhoonegaasidest. Hoonete ja taristu ehitamine olles KHG heitme tekitamises 8,4% (Joonis 1.1) suhteliselt suure jalajäljega ehk arvutades hoone süsinikujalajälge on võimalus teha teadlikumaid otsuseid, mis aitavad vähendada hoonete tekitavaid KHG. Keskkonna kaitsmise huvides on EL vastu

võetud meetmeid ja direktiive, millega muudetakse järk-järgult süsinikujalajälje arvutus kõigile hoonetele kohustuslikuks. Mitmed Euroopa riigid on teinud märkimisväärseid samme madalsüsinikehitamise suunas. Skandinaavia riikidest on seda teinud juba kõik ning Eestil on Põhja-Euroopa riigina olemas head näited naaberriikidest, kuidas süsinikujalajälje arvutuse nõue samm-sammult ehitusturule tuua, kasutades selleks teiste riikide tehtud tööd. [9]



Joonis 1.3. Eestis tekkivad kasvuhonegaasid [9].

1.1.1 Direktiivid süsinikujalajäljega arvestamiseks

Euroopa Liidus hakkab kehtima lähiajal kehtima hoonete süsinikujalajälje arvutamise kohustus, kui jõustub uuendatud hoonete energiatõhususe direktiiv (EPBD). Direktiiv nõuab uusehitustelt LCA arvutuse tegemist selleks, et tagada uue ehitatud tehiskeskonna keskkonnaneutraalsuse poole liikumine ning tõsta tähelepanu KHG taseme tõusmise vastu. Ajaliselt toimub arvutuse kohustuslikuks muutumine järk-järgult ning esimene daatum on 01.01.2027 kui jõustub LCA arvutuse nõue hoonetele, mis on suuremad kui 2000 m². 01.01.2030 hakkab nõue kehtima kõikidele ehitatavatele hoonetele, mis annab piisavalt aega eeltöö tegemiseks ja LCA arvutuse jaoks vajaminevate andmete kogumiseks. [10]

EPBD on EL poolt kehtestatud direktiiv, mis on olnud jõus aastast 2002 ning, millele on tehtud täiendusi aastatel 2010, 2018 ja 2024. 2002. aastal jõustunud direktiiv tõi endaga kaasa energiakasutuse nõuded sealhulgas energiatõhususarvu (ETA), mis Eestis hakkasid kehtima aastal 2008. Hilisematel muudatustel energiatõhususe nõuded aina

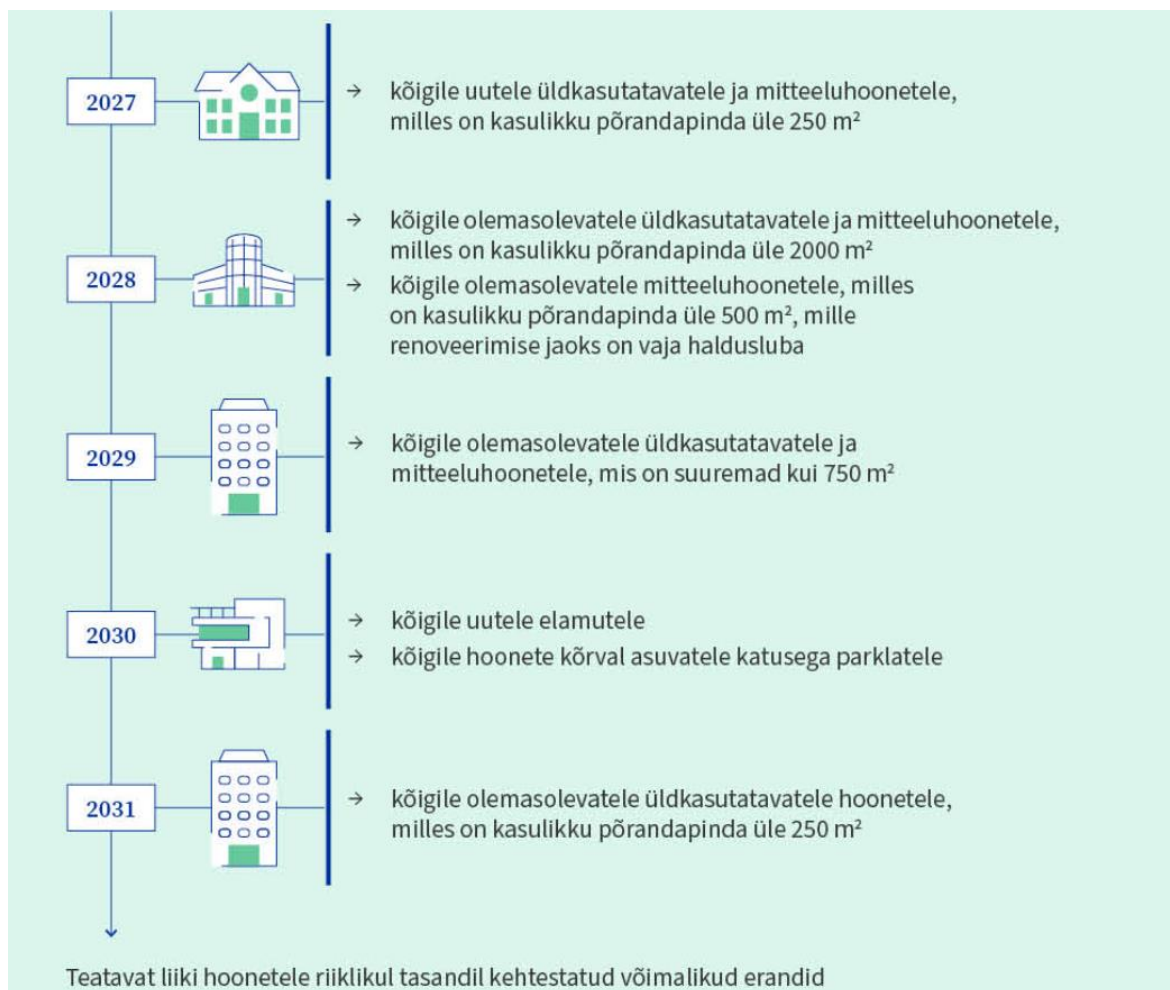
karmistused ning hetkel on tulemuseks liginullenergiahooned. Viimane tehtud uuendus keskendub väga suurel määral hoonete renoveerimisele ja heidete vabaks muutmisele. Heitevabad hooned peavad direktiivi kohaselt vastama järgnevatele nõuetele: heitevaba hoone ei tohi tekitada kohapealset CO₂ heidet fossiilsetest kütustest, heitevaba hoone peab, majandusliku ja tehniliselt teostatava võimaluse korral, omama suutlikkust reageerida väliskeskkonnale ja vastavalt kohandada oma energiakasutust, -tootmist või -salvestust, heitevaba hoone kasutusaegse KHG heidetele piirmäära kehtestamine. [11]

Euroopa Liit on võtnud vastu „Eesmärgi 55“, mille sisu on Euroopa tervikliku kliimaneutraalsuse saavutamine aastaks 2050. Üks osa „Eesmärk 55-st“ on hoonete keskkonnahoidlikumaks muutmine, sest kolmandik KHG heidest EL-is on seotud hoonetega. Kliimaneutraalse Euroopa saavutamiseks on väga tähtsal kohal hoonete puhul suurendada energiatõhusust või vähendada energiatarbimist. Hoonete energiatõhususe direktiiv eeldab, et aastaks 2050 on kõik hooned EL-is täielikult heitevabad. Töö, mida selle saavutamiseks teha tuleb on väga mahukas ja kallis, sest 75% olemasolevatest hoonetest vajavad eesmärgi saavutamiseks põhjalikku renoveerimist selleks, et muuta need energiatõhusaks. Lisaks peavad muutuma uued ehitatavad hooned heitevabaks ning selle saavutamiseks on seatud eesmärgid, et aastast 2027 peavad olema avaliku sektori asutuste hooned heitevabad ning alates 2030. aastast peavad heitevabad olema kõik uued hooned. [12]

Olemasolevatele hoonetele hakkavad samuti nõuded kehtima. Mitmeeluhoonetele kehtestatakse liikmesriigiti energiatõhususe miinimumstandardid ehk maksimaalse energiakoguse maht, mida hoones aasta jooksul m² kohta kasutada võib. Andmete aluseks võetakse kogu, 2020. aasta seisuga, hoonefond. Mitte eluhoonete peab aastaks 2030 olema 16% madalam halvima energiatõhususega hoonetest ning aastaks 2033 26% madalam halvima energiatõhususega hoonetest. Elamute puhul peab vähenema keskmiste primaarenergia kasutus aastaks 2030 16% ja aastaks 2035 20%-22%. Suurim osa energiatarbimise vähendamiseks ehk 55% tuleb saavutada halvima energiatõhususega hoonete renoveerimisest. Eranditeks on: ajaloolised hooned; eraldiseisvad hooned, mis on >50 m²; suvilad ja elamud, mille kasutusaeg on piiratud ja energiakulu väike; pühakojad; relvajõududele kuuluvad ja kaitseotstarbega hooned; tööstusrajatised, töökojad ja eluruumideta põllumajandushooned. [12]

Hoonete energiatarbimisest tekkiva süsinikujalajälje vähendamiseks, tuleb üle liikuda taastuvenergiaallikatele ning muuta neid lokaalseteks hoonete energiaallikateks. Järkjärgult viiakse ellu nõudeid hoonetele päikesepaneelide paigaldamiseks, juhul kui need

on tehniliselt sobivad, majanduslikult toimivad ja funktsionaalselt teostatavad (Joonis 1.4). [12]



Joonis 1.4. Hoonetele päikesepaneelide paigaldamise nõuete daatumid [12].

Igasuguse muutuse tegemine nõuab rahalisi investeeringuid ja poliitikat, mis soodustaks muudatuste ellu viimist. Seda nõuab ka jätkusuutlikkuse ja KHG heidete vähendamise teekond. Selle lihtsamaks elluviimiseks on EL kehtestatud „Keskkonnasäästlike investeeringute hindamise“ määrus, mille eesmärk on teavitada investoreid, kas majandustegevus on keskkonnasäästlik, kehtestades selleks kogu Euroopa Liidus ühised kriteeriumid. Taksonoomia eesmärk on toetada majanduslikult jätkusuutliku majanduskasvu rahastamise tegevuskava (COM/2018/097), mille eesmärgid on suunata kapitalivood ümber kestlikesse investeeringutesse, et saavutada kestlik ja kaasav majanduskasv, hallata kliimamuutustest, loodusõnnetustest, keskkonnaseisundi halvenemisest ja sotsiaalsetest probleemidest tulenevaid finantsriske, suurendada finants- ja majandustegevuse läbipaistvust ning pikaajalisi

vaateid. Lisaks on määruses sätestatud järgnevad kriteeriumid, mida EL ja EL liikmesriigid peavad enda tingimustele vastavaks kohandama, määramaks kindlaks, kas majandustegevus on keskkonnasäästlik. Nendeks kriteeriumiteks on: anda olulist panust mõnele määruses sätestatud keskkonnaeesmärgi saavutamisesse, majandustegevus ei kahjusta oluliselt ühtegi keskkonnaeesmärki, tegevus toimub järgides minimaalseid kaitsemeetmeid. Eelpool läbikäinud keskkonnaeesmärgid on kliimamuutuste leevendamine, kliimamuutustega kohanemine, vee ja mereressursside kestlik kasutamine ja kaitse, üleminek ringmajandusele, saastamise vältimine ja tõrjumine ning elurikkuse ja ökosüsteemide kaitse ja taastamine. [13]

Märkimisväärseid samme süsinikarvutuse suunas on teinud: Taani, Soome, Prantsusmaa, Norra ja Rootsi. Iga riik on Euroopas kehtima hakkavad nõuded kohandanud oma ehitusturuga ja geograafilise asukohaga, riikide võrdlusele viitab Tabel 1.4. Tabelist on selgelt nähtav, kuidas igas riigis on kasutusel oma meetodid süsinikujalajälje meetme rakendamiseks ning teha seda vastavalt enda riigi vajadustega arvestades. [14]

Norra on olnud aastaid kliimaneutraalsuse ja madalsüsinikehitamisega eesrinnas ning nende pealt on hea vaadata edulugusid ja kogemusi hoonete süsinikujalajälje vähendamiseks. Lisaks eeldab heade tulemuste saavutamine koostööd väga paljude osapoolte vahel näiteks arhitektide, linnaplaneerijate, omavalitsuste ja erasektori omavahelist koostööd ja arendust. Norras on loodud nende ühendamiseks vabatahtlik programm nimega *FutureBuilt*, kelle eesmärk on ellu viia madala süsinikujalajäljega ja väikese energiatarbimisega hooneid, lähtudes Pariisi kliimakokkuleppest. Kliimaneutraalsuse saavutamiseks on nad loonud elukaare arvutuse lihtsustatud versiooni, mis arvestab nii otseste kui kaudsete CO₂ tekitavate teguritega terve hoone elukaare jooksul. Sinna hulka kuulub: energiakasutus hoone kasutamisel ja ehitamisel, materjali tootmine, materjalide transport ja jäätmete teke. Lisaks arvestatakse süsinikujalajälje vähendavate teguritega: biogeense süsiniku sidumine, betooni karboniseerumist, materjalide taaskasutuse potentsiaali ja hoone toodetud energia. Kõik see arendus on tehtud selleks, et viia Norra kliimaneutraalsuse poole ning Eestil oleks hea kasutada Norra näiteid. [15]

Tabel 1.4. Viie Euroopa riigi süsinikujalajälje regulatsioonide võrdleva analüüsi peamised tulemused (Lõputöö autori kohandatud) [14]

Kategooria	Taani	Soome	Prantsusmaa	Norra	Rootsi
Reguleerimise ajastus	2023	Hinnanguliselt 2024	jaanuar 2021	jaanuar 2022, 1 aasta ülemineku-periood	jaanuar 2022
Uus või läbi-vaatamine	Uus	Uus	Energiakoodeksi läbivaatamine	Energiakoodeksi läbivaatamine	Uus
LCA metoodika	Jätku-suutlikkuse klass	Kliima-deklaratsioon	RE2020	Lihtsustatud NS3720:2018	Kliima-deklaratsioon 2022
Metoodiliste standardite vastavusse viimine	<i>EN 15978</i>	<i>EN 15978</i>	<i>EN 15978</i> koos kõrvalekalletega	<i>EN 15978 / NS 3720</i>	<i>EN 15978</i>
Piirväärtused	2023 > 1000 m ² puhul, 2025 kõigi puhul	Eeldatavalt 2025	Jah	Ei	Eeldatavalt 2027. aastal
Reguleerimise etapp	Ehitusluba ja lõpetamine	Ehitusluba	Ehitusluba	Pärast lõpetamist	Enne lõpetamist
Hindamise kaasatud elutsükli etapid	A1-A5 B4 B6 C3-C4 D	A1-A5 B4 B6 C1-C4 D	A1-A5 B1-B5 B6-B7 C1-C4 D	A1-A3 B4-B5	A1-A5
Hindamis-periood	50 aastat	50 aastat	50 aastat	60 aastat	Ainult lõpetamine – 0 aastat
Ühik	kgCO ₂ e/(m ² a)	kgCO ₂ e/(m ² a)	kgCO ₂ e, kgCO ₂ e/(m ² a) ja kgCO ₂ e elaniku kohta	Määratlemata	kgCO ₂ e/m ²
Biogeense süsiniku kaasamine	Jah	Jah	Jah	Jah	Ei
Süsinikukäejälg	Ei	Jah	Ei	Ei	Ei
Valituse üldised andmed	Ei	Jah	Jah	Ei	Jah
Turuandmete nõuded	<i>EN 15804</i>	<i>EN 15804+A2</i>	<i>EN 15804, EN 50693</i>	<i>EN 15804</i>	<i>EN 15804+A1+A2</i>
Energiaandmete allikas	Riiklikud stsenaariumid	Riiklikud stsenaariumid	Inies, keskkonnaministeeriumi stsenaariumid	Ei ole asjakohane	Ei ole asjakohane

Tabel 1.4 näitab, et Euroopa riigid on teinud jõulisi samme tagamaks madalsüsinikehitiste nõuete rakendamist, madalsüsinikehituse eesrinnas on Põhjamaad, kes on aastaid liikunud keskkonnasäästlikuma ehitamise suunas.

Eesti ehitussektor peaks liikuma suunas, kus olla valmis LCA arvutuse ja süsinikujalajälje piirmäära jälgimise nõude kohustuslikuks muutmisele. Ehitussektor peab olema eesrinnas süsinikujalajälje arvutamisel selleks, et täita Eesti riigi kliimaeesmäärke, jätkata mõistliku hinnaga ehitamist ning hoida Eesti ehitusturu konkurentsivõimet rahvusvahelises mõistes. Selleks aitab valmistuda kõige paremini see, kui arvutamise nõue integreerida võimalikult kiiresti Eesti sisestesse projektidesse. Tänu integratsioonile on Eesti ehitussektoril aastaks 2027 olemas kogemus, andmed ja *know-how*, kuidas LCA arvutust läbi viia ja kuluefektiivsemalt ehitama hakata nii rahaliselt kui keskkonnaga arvestades. Eeltöö on ära teinud Rohetiiger, kes on koostanud ehituse teekaardi aastani 2040, kus on välja toodud 6 soovitus, kuidas integreerida võimalikult kiiresti süsinikujalajälje arvutus Eesti ehitusturuga ning pakkunud välja, millal võiks Eesti LCA arvutust nõudma hakata ja kes on vastutajaks. [1]

Järgnev soovitude loetelu on tsiteeritud Rohetiigri ehituse teekaart 2040 dokumendist:

- Eesti avaliku sektori ehitatud ruumi hangetes tuleb projekteerimisel nõuda Eestile välja töötatud meetodiga hoone süsinikujalajälje arvutamist.
- Riik peab välja töötama lubatud süsinikujälje piirmäärad levinumate hoonetüüpide järgi, seadma sisse järelevalvesüsteemi ning nõustamiseks tugiteenused nii erasektorile kui ka linnadele-valdadele.
- Erasektori ehitusprojektidele tuleb kehtestada süsinikunõuded pärast avaliku sektori pilootprojekte.
- Riik peab näitama eeskuju ja pakkuma tuge erasektorile. Üks viis, kuidas riik saab konkreetselt aidata, on Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi loodud LCA kalkulaatori abil.
- Avaliku sektori uusehitistes tuleb süsiniku mõõtmise näidisprojektidega alustada 2024. aastal, lubatud CO₂ piirmäärad kehtestada 2025. aastal. Erasektori hoonetele peaks arvutusnõue järgnema 2025. aastal ja CO₂ piirmäärad 2026. aastal.
- Ehitusloa väljastamise aluseks on süsiniku heitkoguse arvutamine ning ringmajanduse põhimõtete ja materjali taaskasutuse määrade järgimine. See võimaldaks ringmajanduse põhimõttel kehtestada projektides materjalide taaskasutamise määra.

Kui järgida eespool toodud soovitusi on Eesti teinud ära väga mahuka ja suure töö enne, kui direktiiv jõustub ning Eesti ehitusturg on seeläbi valmis liikuma kliimaneutraalsema ehituse poole. Oma panuse peab andma ka Eesti valitus toetades süsinikuneutraalsema ehitamise poole liikumist omapoolsete näidis arendusprojektidega ja nõuete kehtestamisega avalike hoonete hangetele. [1]

Selleks, et ehitussektori KHG heitmete vähendamine oleks võimalikult sujuv, tuleb teha rohkelt koostööd erinevate osapoolte vahel. Tulemuse saavutamine eeldab panust nii arhitektidelt/projekteerijatelt, investoritelt, ehitajatelt ja kinnisvaraarendajatelt ning tootjatelt. Lisaks tuleb igas projekti etapis leida kohti ja lahendusi süsinikujalajälje vähendamiseks (Tabel 1.5).

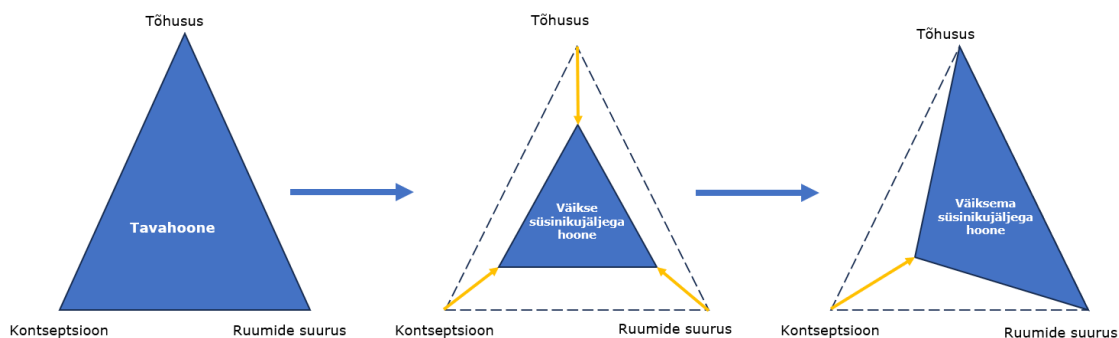
Tabel 1.5. Erinevate projektistaadiumite LCA arvutuse etapid [16]

Eskiis	Põhiprojekt/Tööprojekt	Ehitamine ja järelhinnang
Süsinikujalajälje arvu eesmärgi seadmine	Tõendada eesmärkide seatud eesmärkide saavutamist uuendatud andmetega	Kasutada süsinikujalajälje eesmärgi saamiseks kõige viimaseid andmeid
Esmane süsinikuheite hindamine selleks, et leida probleemseid kohti	Madalsüsiniklahenduste projektiga sidumine	Jääkide optimeerimine (prügi taaskasutusse saatmine)
Lahenduste optimeerimine (ehitusplatsi topograafia, ehitise suurus ja efektiivsus)	Materjalide keskkonna efektiivsuse optimeerimine	Nõuda kasutatud põhitoodetele EPD täpse arvu saamiseks. EPD kontrollimine
Tõendada staadiumis tehtud arvutusi vastavate sertifikaatidega ja vastavust nõuetele		
Algse LCA arvutuse loomine, erinevate lahenduste võrdlemiseks	Võrrelda erinevate lahenduste ja materjalide tulemusi	Suhelda tootjatega, et saada neilt EPD ja uuendada LCA mudel kõige värskemate andmetega

1.1.2 Süsinikujalajälje arvutuse alused ja LCA meetodika

Hoone süsinikujalajälje vähendamist saab alustada juba hoone kavandamise kõige varasemas faasis ehk eskiisis, rakendades selleks madalsüsinikehituse lähenemisviisi. Sellise lähenemisviisi eesmärk on vähendada heiteid, mis tekivad elukaareaegsetest materjali- ja energiavoogudest. Projekteerimist alustades oleks otstarbekas läheneda madalsüsinikehitusele kolmest vaatepunktist: hoone põhikontseptsioon, ruumide

suurus ning tõhusus (Joonis 1.5). Seejuures on võimalik mitme vaatenurga samaaegse kasutamise juures saavutada üldine heitkoguste vähenemine. [5]



Joonis 1.5. Madalsüsinikehituse vaatepunktid [5].

Hoone elukaarering, edaspidi LCA, on üks sobivamaid viise hindamaks hoone süsinikujalajälge ja ehitise kogumõju keskkonnale. LCA annab ülevaate keskkonnamõjudest, mis tekivad hoone oluluskaare erinevates etappides. Nendeks etappideks on tootmisfaas, ehitusprotsess, kasutusaeg, kasutusaja lõpufaas ja tulu ja koormus väljastpoolt ehitise piire. LCA teostamine aitab optimeerida hoone lõpliku KHG heidet ning koostades LCA võimalikult vara on võimalik luua mitmeid erinevaid variante hoone kavandamisel ning leida kõige süsinikuheitme poolest optimaalsem lahendus. [17]

Tihtipeale koostatakse hoone LCA alles pärast projekteerimise lõppu, sest LCA saamise protsess on kompleksne ja nõuab projekteerijatel suurt pingutust, sest hoone eskiisi, eelprojekti ja põhiprojekti faasis on materjalid ja hoone parameetrid pidevas muutuses. Seetõttu ei kasutata LCA-d projekteerimises veel ehitise optimeerimiseks süsinikujalajälje põhjal, vaid luuakse hiljem hinnangu andmiseks. Eelnenud väide on argumendiks arvutusliku kavandamise rakendamiseks, mis võimaldab LCA arvutust muuta palju kiiremaks ja sujuvamaks ning võtab ära käsitsi andmemahu sisestamise. [18]

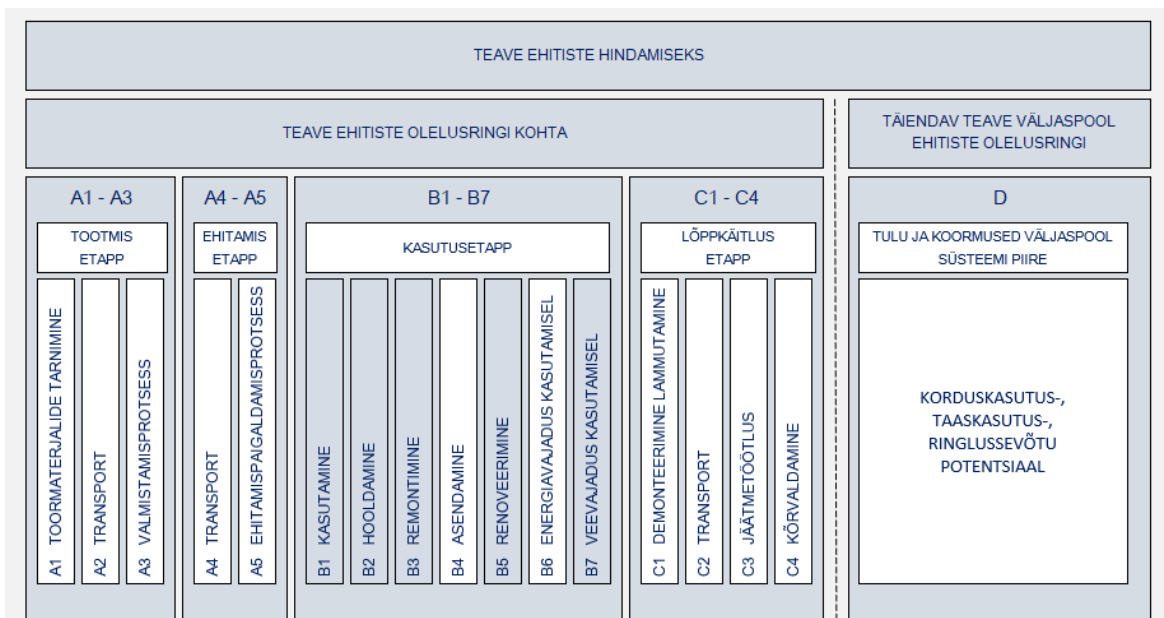
1.2 Süsinikujalajälje arvutamise meetodika

Teises alapeatükis käsitletakse süsinikujalajälje arvutamise meetodikat, mida tuleb järgida selleks, et teostada LCA arvutust.

Eestis ei ole veel lõplikult kokkulepitud hoone eluolelusringi arvutamise meetodikas, kuid loodud on õppevahend süsinikujalajälje arvutusloogika mõistmiseks.

Õppekalkulaator on loodud TalTechi teadlaste ja OneClickLCA koostööl Majandus-ja Kommunikatsiooniministeriumi (MKM) tellimisel. Lõputöö koostamise hetkel on kalkulaatorist avaldatud kasutamiseks versioon 2.0, kuid e-ehituse kodulehel on välja toodud, et riikliku hoonete süsinikujalajälje kalkulaatori avaldamine toimub 2024. aasta suvel. Lisaks on täiendamisel materjalide heitekoefitsentide andmebaas, mille eeldatav valmisaeg on 2024. aasta kevadel. [14]

Antud aruandega on tehtud ära suur töö süsinikujalajälje arvutamise tegemiseks, sest lisaks arvutusmetoodika koostamisele on koostatud ka loodud CO₂e vaikeväärtustega andmekogu 47-le enim levinud ehitusmaterjalile Eestis, mida täiendatakse 2024 kevad. Õppematerjalina on kasutamiseks loodud MS Exceli kalkulaator, mis tutvustab loodud arvutusmetoodikat ja võimaldab arvutada hoone süsinikujalajälge. Arvutuse tegemisel tuleb arvestada mitme teguriga nagu näiteks: ajakohastada energiakandjate CO₂e heitekoefitsente, järgida Level(s) raamistiku (Põhjamaade ja EL vaheline ühtlustus), taksonoomia määrust ja hoonete energiatõhususe direktiivi. Eesti arvutusmeetod põhineb standarditel EN15804, EN15978 ja Euroopa Level(s) raamistikul. Arvutusmetoodika mooduleid, kuidas hinnata hoone süsinikujalajälge, illustreerib Joonis 1.6. Eestile kavandatavat süsinikujalajälje hindamisulatust näeb detailsemalt Tabel 1.6. [6]



Joonis 1.6. Süsinikujalajälje kalkulaatori arvutusmetoodika moodulid [14].

Tabel 1.6. Kavandatav hindamisala Eestis [6]

Etapp	Määratlus	Selgitus
A1-A3 Tootmine	Ehituses kasutatavatest materjalidest ja teenustest tulenevad heitkogused „toormest väravani“	Peamine heiteallikas
A4 Transport	Heitkogused, mis tekivad ehitusmaterjalide transportimisel ehitusplatsile	Võimaldab eristada tarneallikaid
A5 Ehitamine	Materjali raiskamine ehitusplatsil	Jäätmete tekkimine ehitusplatsil
B4 Asendamine	Ehitusmaterjalide asendamine	Vaikeväärtus
B6 Kasutusaegne energia	Hoonete tehnosüsteemide poolt kasutatav energiatarne, mida kasutatakse hoone tehnosüsteemides	Peamine heiteallikas
C1 Lammutamine	Hoone lammutamine	Vaikeväärtus
C2 Transport	Ehitusjäätmete vedu jäätmekäitlusesse või prügilasse	Vaikeväärtus
C3 Jäätmete töötlemine	Ehitusjäätmete töötlemine kuni jäätmete lõpptarbimisse jõudmiseni	Võimaldab eristada kolme materjalikategooriat
C4 Lõplik kõrvaldamine	Lõplik kõrvaldamine, prügilasse ladestamine	Vaikeväärtus
D Eelised – teave väljaspool olusringi	Keskkonnale loodav kasu või koormus materjali ringlussevõttust, korduvkasutamisest ja energia taaskasutamisest	Toetab ringmajandust ja korduvkasutust

Level(s) raamistik on baseerunud kuuel makroeesmärgil, mida saab hinnata 16 jätkusuutlikkuse indikaatoriga (Tabel 1.7). Level(s)-i 6 eesmärki kirjeldavad jätkusuutlikkuse aspekte läbi terve hoone oluskaare. Jätkusuutlikkuse indikaatorite abil saab infot, kuidas viia hoone energiatõhusus EL-i eesmärkidega kooskõlla. Eesmärgid puuduvatavaid valdkondi nagu energia, materjalikasutus ja jäätmed, vesi, siseõhu kvaliteet ja vastupanuvõime kliimamuutustele. Järgides antud indikaatoreid saab EL seatud eesmärgi täita ning muuta hoonet keskkonnasõbralikumaks. [19]

Tabel 1.7. Level(s) raamistiku indikaatorid [19]

Makroeesmärk	Selgitus	Indikaatorid
Hoone olelusringi jooksul tekkivad KHG heitkogused	Minimeerida terve olelusringi CO ₂ heide, arvestades nii hoone energiatarbimist kui ka materjalide saamiseks kulunud energiat.	Hoone kasutusaja energiatõhusus (kWh/m ₂ a) Olelusringi GWP (CO ₂ e/m ₂ a)
Ringmajandusele toetuv materjali kasutus	Optimeerida projekti toetamiseks ringmajandust arvestades: Ehitusmaterjalide kasutust ja mahtu Minimeerida ehitusel ja lammutamisel tekkivaid jäätmeid Võimalus hoone kasutusmuudatustele ja renoveerimisele Võimalus hoone demonteerida lammutamise asemel	Jälgida ehitusmaterjalide mahtu, kulu ja eluiga Ehitus- ja lammutusjäätmete dokumenteerimine Projekteerida hoone võimalusega kasutuseesmärgi muutmiseks Projekteerida hoone mõeldes demontaaži peale ja materjalide taaskasutamisele
Vee tõhus kasutamine	Kasutada vett tõhusalt, peamiselt kindlaks tehtud pikaajalise või prognoositava veepuudusega piirkondades	Kasutusaja veetarbimine (m ³ elaniku kohta aastas)
Tervislikud ja kvaliteetsed ruumid	Kavandada hooneid, mis on mugavad, atraktiivsed ja produktiivsed: Siseõhukvaliteet peab olema normidele vastav Siseõhutemperatuur vastab mugavustemperatuurile Loomuliku ja tehisvalguse kvaliteediga on mugavuseesmärgi täitmiseks arvestatud Hoone heliisolatsiooni tase on hea, mis loob vaikse keskkonna ruumi.	Siseõhukvaliteet Mugavustemperatuurile mittevastav aeg Valgus ja visuaalne mugavus Akustika ja heliisolatsioon väliskeskkonna müra vastu.
Vastupanu kliimamuutustele	Kindlustada hoone kliimamuutuste vastu: Kohandada siseõhutemperatuuri saamist vastavalt tuleviku kliimamuutustele Muuta hoonet vastupidavamaks ekstreemsete ilmastikuolude vastu näiteks üleujutused Arendada hoone projekti arvestamiseks üleujutustega, korraldada jätkusuutlik drenaaž	Ruumis viibivate inimeste tervise kaitse ja mugavustemperatuuriga arvestamine Ekstreemsete ilmastikuoludega arvestamine Jätkusuutlik drenaaž

Optimeeritud hoone oluluskaare maksumus ja väärtus	Pikaajaline vaade hoone oluluskaare maksumusse ja jätkusuutlikute hoonete turuväärtusele Oleluskaare maksumus (ehitus, kasutamine, hooldamine, parandamine ja lammutamine) Julgustada jätkusuutlikkuse aspekte integreerima turuväärtuse saamisel ja riskimarginaalidega ning tagada nende hindamiste läbipaistvus.	Oleluskaare maksumus (€/m ² /a) Väärtuse loomine ja riskidega arvestamine
--	---	---

1.2.1 EPD olemus ja meetodika

Tootmisetappi kirjeldab EPD, mis on toodete keskkonna teavet edastav deklaratsioon. Teave peab olema tõendatud, täpne ja mitteeksitav ehk peab olema teaduslikult põhjendatud ja stimuleerima keskkonna kvaliteedi pidevat parandamist, kasutades turumehhanisme. [20]

EPD olemasolu ehitustoodetel näitab ettevõtte toodetavate toodete keskkonnajälge ning aitab hoone eluoluringi arvutamist oluliselt lihtsustada. Seetõttu on oluline, et Eesti ehitusmaterjalide tootjad ja tarnijad töotaksid selle nimel, et nende toodetel oleks olemas EPD. EPD olemasolu annab alates EL direktiivide kehtima hakkamisest samuti konkurentsieelise, sest nende olemasolu võimaldab projekteerijatel ja ehitajatel nende toodet valida selleks, et teostada oluluskaare arvutusi.

EPD-le tuleb lisada tõendatud tootmisetapi moodulid A1-A3 ning need moodulid EPD-s peavad sisaldama(standardist tsiteeritud [20]):

- A1 toorainete kaevandamist ja töötlemist ning biomassi tootmist ja töötlemist;
- A1 eelmisest tootesüsteemist pärinevate toodete või materjalide korduvkasutust;
- A1 sekundaarmaterjalide töötlemist, mida kasutatakse sisendina toote valmistamisel, kuid mitte neid protsesse, mis kuuluvad eelmise tootmissüsteemi jäätmekäitluse alla;

- A1 elektri, auru ja soojuse tootmist, kasutades primaarenergia allikaid, sealhulgas kaevandamist, rafineerimist ja transporti;
- A1 energia taaskasutust ja teisi sekundaarkütuste taaskasutusprotsesse, va. need protsessid, mis kuuluvad eelmise tootmissüsteemi jäätmekäitluse alla;
- A2 transporti kuni tehase väravani ja sisetransporti;
- A3 abimaterjalide või eeltoodete tootmist;
- A3 toodete ja kaastoodete valmistamist;
- A1-A3 jäätmete töötlemist kuni jäätmeseisundi lõpuni või jäätmete lõpliku kõrvaldamiseni, kaasa arvatud pakendid, mis ei ole väravast tootega väljunud [20]

Pärast tootmisetapi andmete kogumist ja saamist tuleb oluluskaarearvutusena kõik saadud andmed omavahel kokku arvutada ja luua lõplik süsinikuheiteväärtus. Väärtuse saamisel tuleb valmistada aruanne, mis tõendab kõiki kogutud andmeid, nende tõesust ja näitab arvutusmetoodikat. Aruandluse etapp on tarvis kolmanda poole kontrolliks ja kinnitamiseks. Alles pärast aruande ülevaatust kolmanda litsentseeritud osapoolte poolt võib EPD avalikustada ning saadud andmed saab avaldada LCA arvutuse programmides, kus seda saab hakata hoonete LCA arvutuses kasutama. [21]

Järgides eeltoodud punkte on loodud EPD piisavalt põhjalik ning nagu näha esitatud kriteeriumitest, siis on aru saada, miks on tootmisetapp üks peamisi KHG heiteallikaid, sest see sisaldab toorainete kaevandamist, töötlemist ja transporti. [20]

Projekteerimisetapis tehtud otsused määravad suures hulgas terve hoone süsinikujalajälje. Projekteerimises saab läbi mõelda ja luua erinevaid kombinatsioone veendumaks, milline hoone oleks kõige säästlikum ja oleks ka võimalus kasutatud materjale hoone utiliseerimisel taaskasutada. Kui näiteks ehitada hoone terasest, siis tuleks mõelda lisaks terasetarnija valimisele ja ristlõigete kandevõimele ka terrassõlmede lahendamisele sedasi, et oleks olemas võimalus need hoone kasutusea lõpus demonteerida ning kasutada uue hoone ehitamiseks. Terasetaaskasutus annaks märgatava võidu keskkonna mõistes, sest rauamaagi kaevandamisel ja terase töötlemisel tekib märkimisväärne heitekogus.

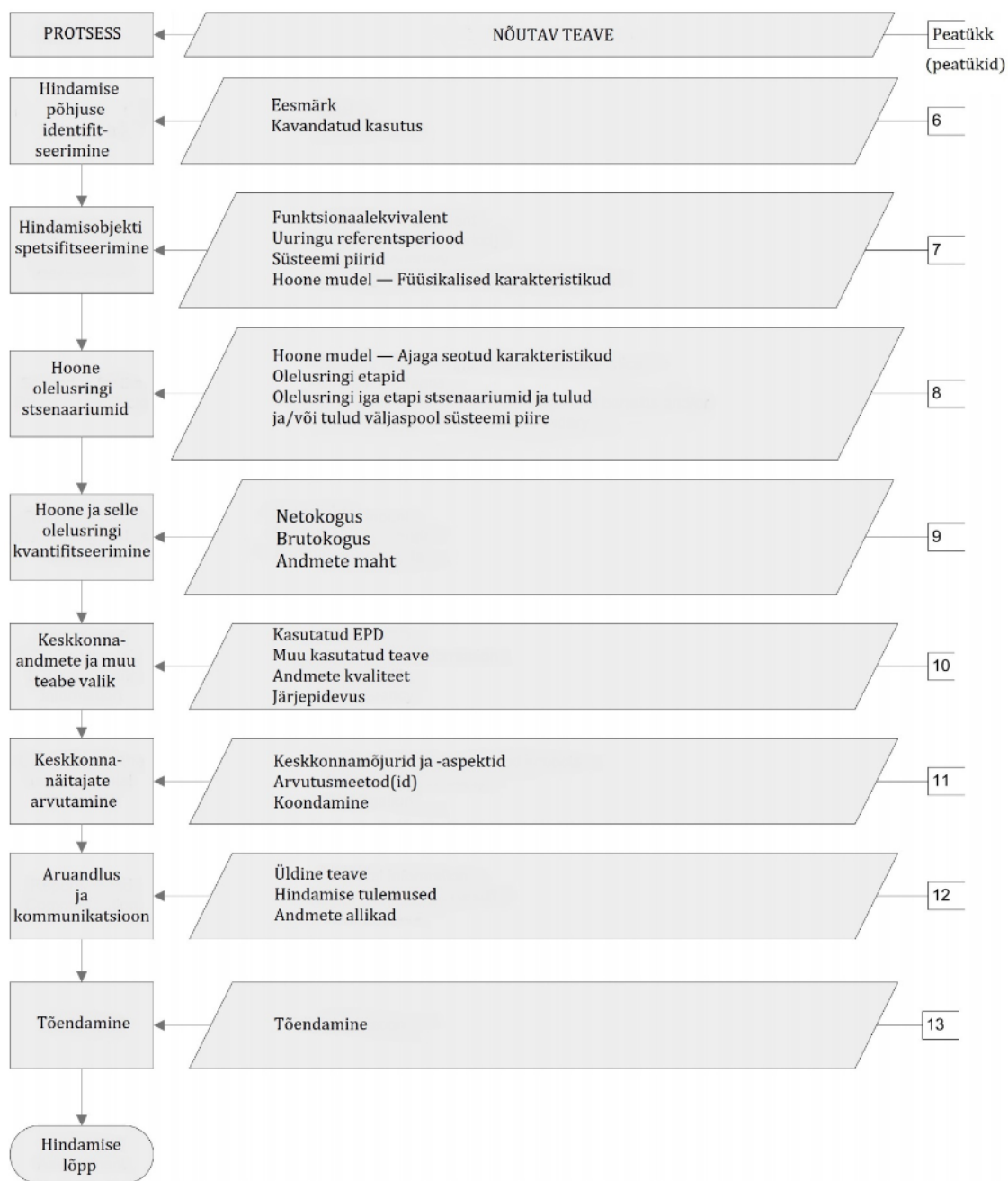
1.2.2 LCA leidmise põhimõtted

Hoone süsinikujälje saamiseks LCA-meetodil saab hinnata hoones kasutatavate toodete ja/või materjalide keskkonnamõjusid terve hoone eluringi ajal. Mõju hinnatakse alates toodetele või materjalidele toorainete hankimisest kuni nende taaskasutamisele võtuni või utiliseerimiseni välja. LCA meetodis käsitletakse läbi ligi 30 erinevat keskkonnategurit. Nendest enim pannakse rõhku globaalse soojendamise potentsiaalile (GWP), mis on materjalide süsinikujalajälje iseloomustavaks teguriks ning ühikuks kgCO₂e (süsinikdioksiidi-ekvivalent). [1]

Kogutud teabe eesmärk on anda hinnang hoone keskkonnatoimivusele läbi keskkonnateabe kogumisest. Hindamise kavandatud ulatus on refereeritud standardist *EVS-EN 15978:2011*, mis on hoonete keskkonnatoimivuse hindamist käsitlev standard ning LCA hindamise ulatus võib hõlmata järgmisi punkte:

- a) Otsustusprotsessi toetust, näiteks:
 - erinevate projektlahenduste keskkonnatoimivuse võrdlust;
 - renoveerimise, rekonstrueerimise ja/või uusehituse keskkonnatoimivuse võrdlust;
 - keskkonnatoimivuse parandamisvõimaluste selgitamist;
- b) toimivuse deklareerimist seoses juriidiliste nõuetega
- c) hoone keskkonnatoimivuse dokumenteerimist, kasutamiseks näiteks:
 - sertifitseerimisel;
 - keskkonnatoimivuse deklareerimisel;
 - märgistamisel;
 - turundamisel;
- d) toetust suuniste väljatöötamisele.

Ulatus ja kavandatud kasutus määravad keskkonnateabe ja teiste arvutustes kasutatavate andmete üksikasjalikkuse nõutava taseme. Arvutusmeetod jääb samaks. Keskkonnatoimivuse hindamisprotsess on kirjeldatud järgmisel lehel asuval joonisel Joonis 1.7. [22]



Joonis 1.7. Keskkonnatoimivuse hindamisprotsessi vooskeem [22].

1.2.3 LCA arvutuse tootmisetapid

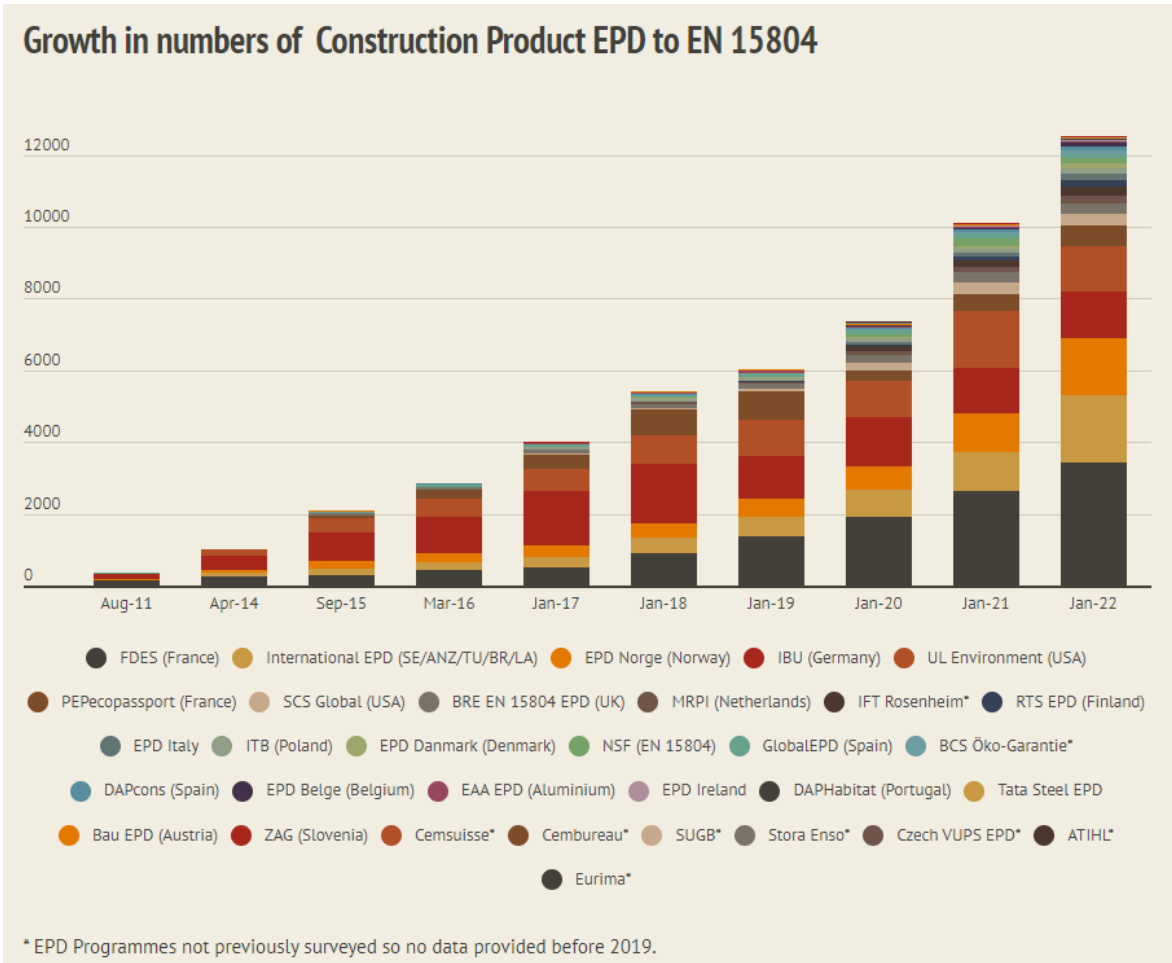
Antud lõputöö keskendub etappide A1-A3 ning D analüüsimisele ja selgitamisele, sest need on punktid, mida saab enim mõjutada hoone projekteerimise varajases perioodis. Ehk peamine fookus on materjali valikul ning ristlõigete optimeerimisel lähtudes KHG heitest. Lisaks on etapp A1-A3 peamine KHG heiteallikas (Tabel 1.6). Moodulid A1-A3

kirjeldavad materjalide tootmist ning vastav keskkonnateave etapi A1-A3 on määratletud toodete EPD-s (EPD - *Environmental Product Declaration* / toote keskkonnadeklaratsioon). Tootmisetapp hõlmab kokkuvõetult:

- A1, tooraine kaevandamist ja töötlemist, sekundaarse sisendmaterjali töötlemist (nt taaskasutusprotsesse);
- A2, transporti tootja juurde
- A3, valmistamist,

sealhulgas varustamist kõigi materjalide, toodete ja energiaga, samuti jäätmekäitlust kuni jäätmeseisundi lõpuni või lõplike jääkide kõrvaldamist tootmisetapi jooksul. [20]

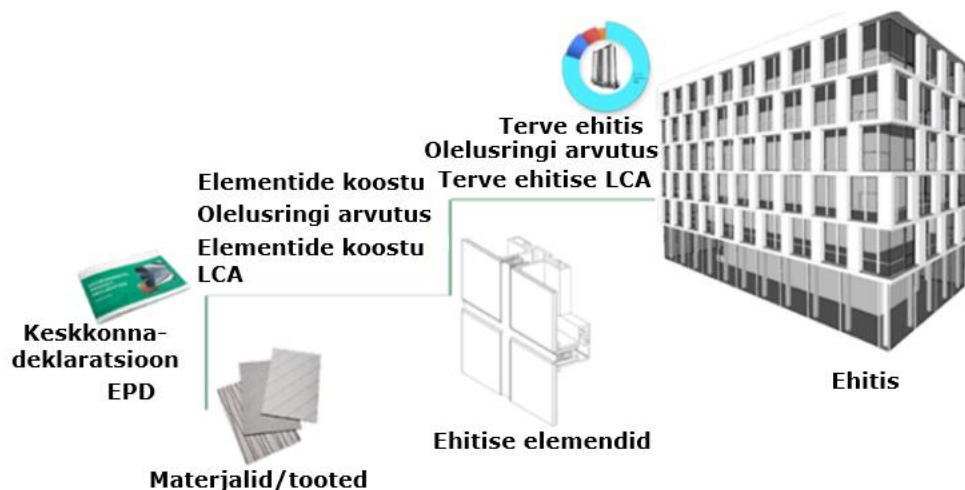
EPD loomine ehitustoodetele on saanud viimastel aastatel tänu kehtima hakkavatele nõutele suure tõuke. Standardi *EN 15804* järgi tehtud 2022 aasta alguse seisuga üle 12000 EPD ehitusmaterjalidele, mis on rahvusvaheliselt avalikustatud (Joonis 1.8). Lisaks on tehtud standardi *ISO 21930* ca 66000 EPD-d betooni ja betoontoodete kohta ning 2500 EPD-d viimistlusmaterjalide kohta, mis tähendab, et kogu loodud EPD arv maailmas, mis on tõendatud, on ületanud 80 000 piiri ning on ka pärast seda jõudsalt kasvanud. [23]



Joonis 1.8. EPD tegemise kasv standardi *EN 15804* järgi [23].

Joonis 1.8 on näha suurt kasvu EPD tegemisele ehitusmaterjalidele, eriti suurt rolli on selles mänginud Prantsusmaa.

Süsinikujalajälje arvutus käib etappide kaupa ning alustatakse väiksematest elementidest kuni jõutakse välja terve hooneni. Alguses luues ehitusmaterjalile EPD, mis on arvutuse tegemiseks kõige tähtsam lähteinfo. Edasi saab leida näiteks hoone katuse süsinikujalajälje arvutades katusekattematerjalide CO₂e väärtused m² kohta. Viimasena saab teha terve hoone oleluskaarearvutuse liites omavahel kokku kõik hoones esinevad elemendid või elementide grupid (Joonis 1.9).



Joonis 1.9. Hoone oleluskaare arvutuse osad [21].

Joonis 1.9 põhjal on näha, et hoone oleluskaare arvutus liigub materjalidest, materjali koostudest, osasüsteemidest ehitiseni.

1.3 Arvutuslik kavandamine

Kolmas alapeatükk keskendub arvutuslikule kavandamisele ning selle kirjeldab selle rakendamise sobivust hoone süsinikujalajälje arvutuse teostamiseks. Antud uurimistöö raames on arvutuslik kavandamine kasutusel süsinikujalajälje arvutuse protsessi kiirendamiseks ning võimaldab saada vajalikke ehitusmaterjalide mahte ja arvutuseks vajaminevaid andmeid kiirelt ning võimaldab luua mitmeid erinevaid lahendusi lähtudes süsinikujalajälje arvust.

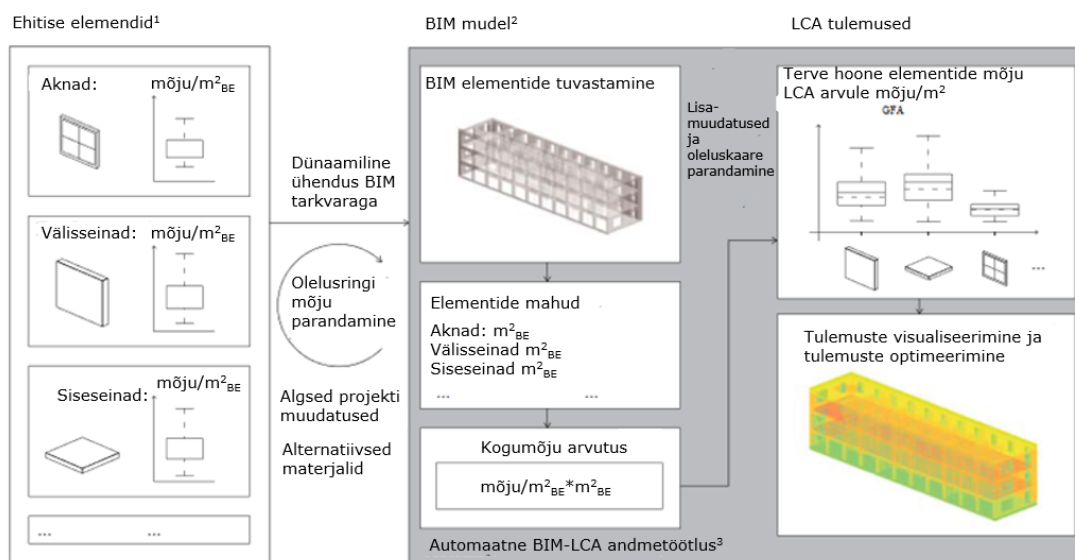
1.3.1 LCA ja BIM ühildamine projekteerimises

Alapunktis 1.2.1 mainiti, et enamasti koostatakse hoonele LCA alles peale projekteerimise lõppu, sest LCA leidmine on küllaltki keerukas ning andmemahukas protsess. Selleks, et muuta LCA arvutus projekteerimisetapis juba kasutatumaks on hea moodus ühildada see BIM-iga (Building Information Model), mille abil koostatakse tänapäeval juba enamik ehitusprojekte. BIM ja LCA omavahel integreerimine võimaldab siduda omavahel reaajas jooksvad LCA tulemused, nende visualiseeringu. See annab projekteerijatele võimaluse arvestada hoonet projekteerides nii hoone kandeskeemi ja

süsinikujalajälje omavahelisi seoseid, luua erinevaid kombinatsioone ning leida nende seast optimaalseim variant. [24]

Seni on BIM ja LCA ühildamine toimunud läbi BIM mudelist materjalimahtude väljastamise ja seejärel saadud andmed on sisestatud LCA kalkulaatorisse. Kuid selline lähenemine ei ole olnud automaatne ja LCA tegemiseks vajaminevaid algandmeid ei pruugi algses BIM mudelis veel sees olla. See muudab selle tegevuse endiselt väga manuaalseks ja mittekvaliteetseks. Selleks, et muuta BIM ja LCA ühildamine realselt praktiliseks ja kasutatavaks tööriistaks tuleb tegevusi automatiseerida. [24]

Šveitsi Zürichi tehnikaülikooli ja Austria Grazi tehnikaülikooli koostööl on tehtud arendustööd ning on liidetud BIM ja LCA arvutus omavahel kasutades visuaalset programmeerimist. Visuaalse programmeerimise kohta on antud lõputöös koostatud eraldi alapeatükk 1.3. Arendustöös kasutatakse: *Microsoft Exceli* programmi, kus asub LCA andmebaas, kuhu on kogutud süsinikekvivalendi väärtused hoone elementidele ruutmeetri kohta; *Autodesk Reviti* mudelprojekteerimise programmi, kus mudeldati hoone elemendid ning saab anda vajalikud mahulised parameetrid LCA arvutuseks ning *Autodesk Dynamo* visuaalset programmeerimise programmi, kus viidi läbi vastavate parameetrite omavaheline korrutamine ning saadi kogu hoone süsinikekvivalent ruutmeetri kohta CO_2e/m^2 . Tänu *Dynamost* saadud väärtustele saab 3D mudelile juurde lisada vastava informatsiooni graafiliselt (Joonis 1.10). [24]



¹Kogutud LCA andmebaas ehitiselementide jaoks; nt MS Excel

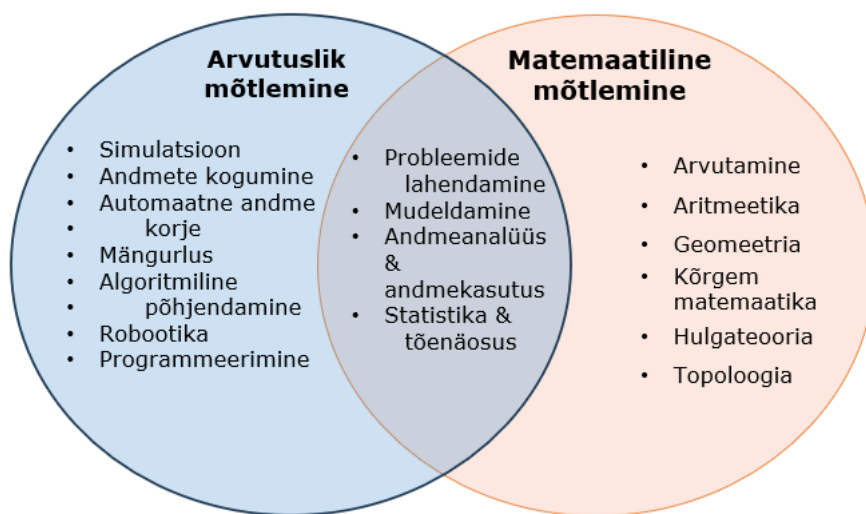
²BIM mudel, nt [Autodesk Revit](#)

³Loodud programm, nt [Autodesk Dynamo](#)

Joonis 1.10. LCA ja BIM omavahelise ühendamise skeemiline töövoog [24].

1.3.2 Arvutuslik mõtlemine ja kavandamine

Parameetrilise projekteerimise mõistmiseks on hea alguses lahti mõtestada, mis on arvutuslik mõtlemine. Arvutuslikku mõtlemist saab lahti mõtestada, kui siduda see märksõnadega: probleemide lahendamine ja süsteemide arendamine. Arvutusliku mõtlemise abil saab analüüsida ja lahendada tohutul hulgal probleeme, mis nõuvad sisendina andmepõhist informatsiooni. Lisaks saab arvutusliku mõtlemist defineerida kui võimet mõelda kasutades tööriistadena inimaju ja arvutiprogramme, sest arvuti abil saab oma ideed kiirelt arendada kas programmiks, mis probleemi lahendab, milleks ehitussektoris võib olla ehitusprojektile mudeli loomine. Arvutuslikku mõtlemist saab siduda omavahel matemaatilise mõtlemisega, mida insenerid kasutavad igapäevaselt näiteks geomeetria, aritmeetika, algebra ja kõrgem matemaatika. Kuid insener ei saa toetuda ainult matemaatilise mõtlemisele, sest oma töös kasutatakse ka arvutuslikku mõtlemise võtteid näiteks simulatsioonide ja programmeerimist. Lisaks on arvutuslikul ja matemaatilisel mõtlemisel ka ühisosad, mida insenerid oma mõttemaailmaga siduda saavad näiteks probleemide lahendamise oskus ja andmeanalüüs. Antud mõtteid kirjeldab Venni diagramm (Joonis 1.11) ,kus on näidatud arvutusliku ja matemaatilise mõtlemise eriosad ja ühisosad. [25]

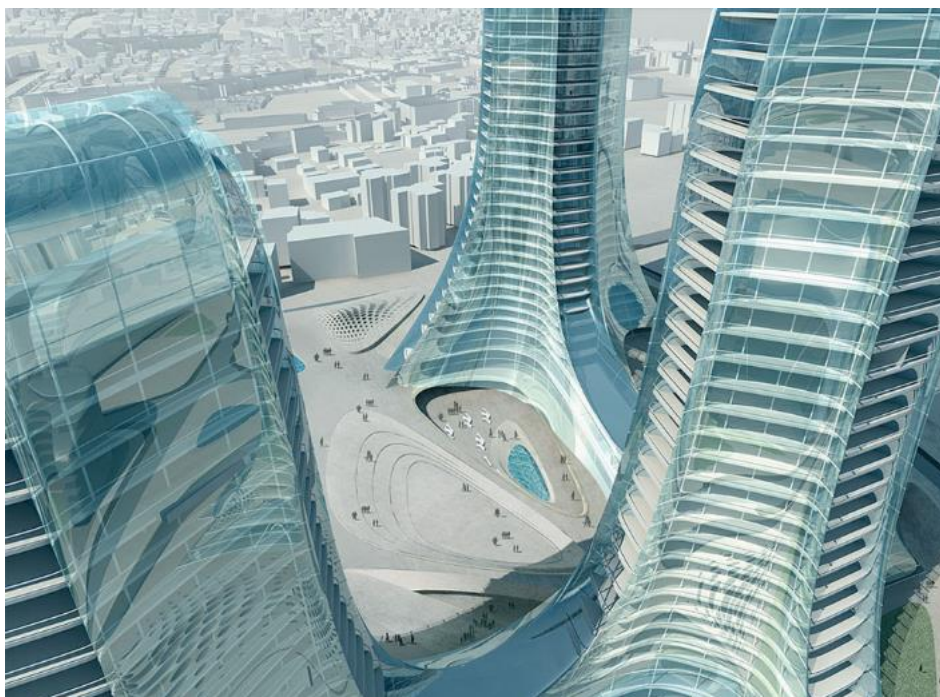


Joonis 1.11. Arvutusliku ja matemaatilise mõtlemise Venni diagramm [25] [26].

Arvutusliku mõtlemist saab insenerivaldkondadest hästi siduda arhitektuuriga, sest arhitektid on isikud, kes loovad hoone visuaale ja kujundust ning parameetrika kasutamine on loonud võimaluse luua väga komplekseid hooneid ning seeläbi ka ehitusmudeleid. Arvutuslik mõtlemine arhitektuuris on teinud populaarseks „voolava“

linnaruumi ja hoonete projekteerimise, kus hooned on ebakorrapärased, kuid samas matemaatiliselt saab neid võrrelda kaarjate, elliptilise ja ringjate objektidega (Joonis 1.12). [27]

Arvutuslik kavandamine saab igal hoonel mingil määral alguse, just visandamisest ja eskiisimisest ning eeldab suuresti, et arhitekt mõtleb välja midagi geomeetriselt innovatiivset. Hetkel kui projekteeritavad objektid võivad tunduda väga keerulisena ja nende projekteerimise tulemus võib olla ebakvaliteetne projekti kompleksuse tõttu siis välja töötatud parameetriselised projekteerimistarkvarad võimaldavad hooned projekteerida väga täpselt ja suudavad siduda kõiki elemente ja süsteeme omavahel. Arvutuslik kavandamine on seetõttu väga asjakohane suund ehitusinseneridele ja projekteerijatele, kelle ülesandeks on arhitektide visioon reaalsuseks teha ning tänu arvutuslikule kavandamisele saab hulgalise andmemahu käitlemisega luua tervikliku ja värskendavat ühiskonda ja keskkonda. [27]



Joonis 1.12. Näidisfoto parameetrisest mõtlemisest arhitektuuris [27].

1.3.3 Parameetiline, generatiivne ja algoritmiline kavandamine

Parameetiline kavandamine on lisaks järjekordsele ehitiste mudelprojekteerimise platvormile, millega annab luua huvitavaid lahendusi ja keerulisi geomeetriaid ka uus, unikaalne ja silmapaistev viis hoonete projekteerimiseks. Parameetiline kavandamine on tulema aastate pikkuse arendustööle, kus arhitektid, projekteerijad, insenerid ja

teadlased on katsetanud erinevaid arvutipõhiseid tehnoloogiaid selleks, et muuta projekteerimist kiiremaks ning korduvaid tegevusi automaatsemaks näiteks tootre. Loodud on mitmeid erinevaid tarkvarasid nagu näiteks CAD (Computer Aided Design) programmid, mis on üks esimesi edulugusid virtuaalses projekteerimises ning võimaldas liikuda käsitsi paberi ja pliiatsiga tehtud 2D joonised arvutisse, mis kiirendas märgatavalt ehitusprotsessi. Lisaks on võimalus teha CAD programmidega ka 3D kujutisi, kuid võrreldes BIM mudelprojekteerimise tarkvaraga on see meetod aega nõudvam. [28]

Generatiivne kavandamine on statistiline mudel, mis põhineb mingi elemendi esinemisel läbi tõenäosuse. Generatiivne mudel analüüsib talle antud lähteinfo mustreid ning seeläbi pakub välja uusi, sarnaseid andmeid, mida saab antud probleemi lahendamiseks kasutada. Generatiivne kavandamine võimaldab hoonete kavandajatel uurida erinevaid stsenaariume, saades seeläbi kvaliteetseid lahendusi uuele kavandatavale. Generatiivne kavandamise rakendamine hoone kavandamises on tõestanud, et see suurendab projekti valmimise efektiivsust ja kvaliteeti. Generatiivse kavandamise elluviimiseks saab kasutada näiteks programmeerimistarkvarasid Dynamo ja Grasshopper, millest viimast kasutatakse selles uurimistöös eesmärkide täitmiseks. Generatiivne kavandamine on avanud uue akna kiirele hoone kavandamisele ning selle abil saab luua mitmeid erinevaid lahendusi, mida omavahel võrrelda ning seda saab teha väga efektiivselt. [29]

Algoritmiline kavandamine on kavandamise protsess, mis lähtub algoritmidest. Defiinerides terminit algoritm saab selle kohta öelda, et see on hulk matemaatilisi reegleid, mis aitavad probleemile lahendust saada ehk algoritmilist ja generatiivset kavandamist toetavad üksteist. Algoritmiline kavandamine kasutab hoone mudeli loomiseks algoritme, mis võimaldab mudeli kasutajal identifitseerida algoritmi osasid, mis vastava osa/elemendi mudelisse loodud on. Algoritmilist kavandamist saab väga hästi rakendada näiteks terase tootmisprotsessis, kus masinale on ette antud programm, mis on mudeli põhjal loodud automaatselt ning seal ei ole tingimata vaja parameetrilisi andmeid, sest loodud algoritmilise programmiga suudab masin luua soovitud elemendi. [30]

Kõiki eelnevalt nimetatud kavandamise meetodeid saab ühildada BIM programmidega, mis võimaldavad kiirelt ja lihtsalt mudeldada 3D-s objekte ning edasiarendus CAD tarkvarast on, et objektidele saab juurde lisada veel muud olulist infot (materjali tüüp, asukoht, ristlõige). Lisaks saab BIM mudelite abil leida erinevaid kokku jooksmisi erinevate osade vahel näiteks jookseb elektrikaabliredel kokku ventilatsioonišahtiga.

BIM on edasi viinud hoone kavandamise kiirust ning parandanud kvaliteeti, kuid suurte andmete kiireks töötamiseks tuleks mõelda arvutatud kavandamisele.

BIM mudelid on suuresti seotud parameetrilise projekteerimisega, sest parameetrilise projekteerimise tulemusena luuakse samuti hoone mudelid, mis vastavad BIM nõuetele või on parameetrilise projekteerimise programmid ühildatud mudelprojekteerimise programmidega nagu näiteks Rhinoceros saab ühildada nii Autodesk Reviti kui ka Tekla Structures mudelprojekteerimise programmidega. Lisaks on võimalik arvutite abil teostada, mudeldada ja visualiseerida hoone kandevõime, deformeerumise ja dünaamikaga seotud arvutusi kasutades selleks FEA (Finite Element Analysis) programme (SCIA, ARSA). Parameetrist projekteerimist kasutades on võimalus ühildada kõik eelnevalt mainitud tarkvarad ning panna need tarkvarad koos töötama, mis võimaldab projekteerijatel vähendada ajakulu mitme erineva programmi vahel ning kõike saab teha optimaalsemalt. [28]

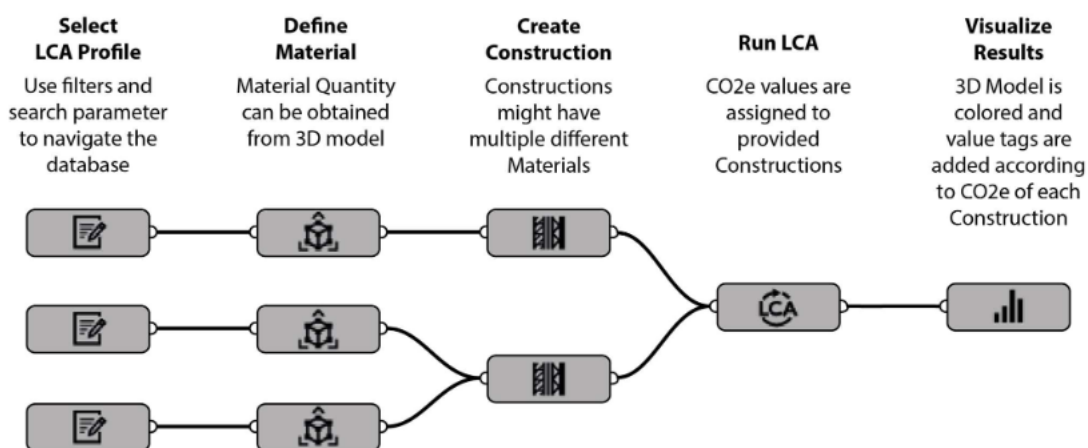
1.3.4 Arvutuslik kavandamine süsinikujalajälje arvutuseks

Hetkel on levinuim viis hoone LCA arvutuse tegemiseks ehitusmaterjalide EPD info ja andmete kogumine MS Exceli või sarnase andmeprogrammi faili ning need väärtused seotakse manuaalselt materjalide mahtudega. Selline lähenemine küll töötab, kuid on väga aeganõudev ning eksimiskohti on palju seetõttu võib järeldada LCA tegemise hirmu projekteerijatel, sest selle tegemine on raske ja ajakulukas. [31]

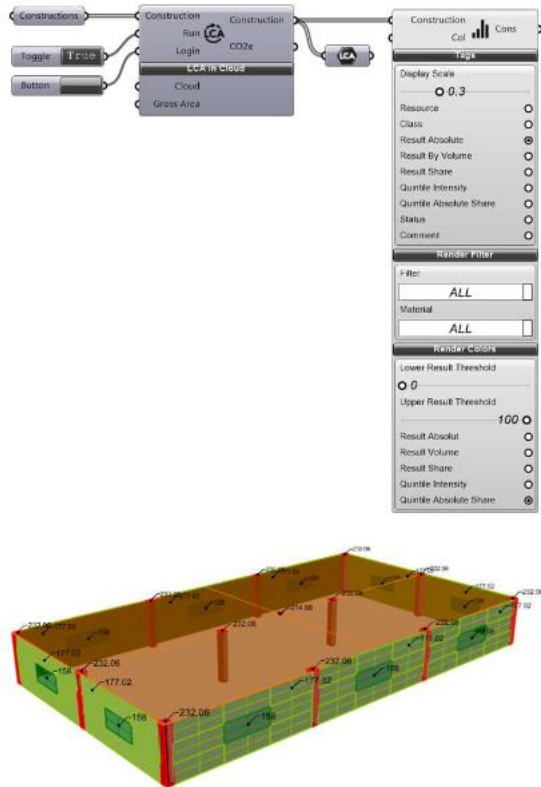
BIM mudeli kasutamine mahtude saamiseks ja EPD andmetega sidumiseks on küll võimalik ja samuti hea moodus LCA arvutuse tegemiseks, kui sageli saab BIM mudel valmis alles projekteerimise lõppfaasis ning sellel hetkel pole enam projekti muutmise mõistlik tegevus. Selleks, et LCA arvutus muuta lihtsamaks, luua kergesti erinevaid kombinatsioone ning neid ka mugavalt visualiseerida on võimalus kasutusele võtta parameetrilise projekteerimise programmid nagu näiteks Rhinoceros ja selle sees olev visuaalse programmeerimise programm Grasshopper. Nende kasutamine võimaldab õige programmi jupi kirjutamisel ja mudelite omavahelisel ühendamisel teha kiiresti ja kvaliteetselt ära LCA arvutuse. Lisaks on võimalik Rhinoceros ja Grasshopperi programmiga mugavalt programmi siseselt ära ühildada One Click LCA rakendus. One Click LCA on spetsiaalselt hoonete ja infrastruktuuri LCA arvutuseks loodud tarkvara, kuhu on kokku kogutud väga suurel hulgal ehitusmaterjalide EPD-sid üle maailma. BIM mudeli abil on võimalik Rhinoceroses kujutada hoone elemendid ning kasutades erinevaid filtreid saab kõikidele elementidele anda One Click LCA andmebaasist vastava CO₂e väärtuse, mille abil suudab programm arvutuse kiiresti teostada. Lõpptulemusena

saab kätte LCA raporti, kus on kujutatud valitud materjalide süsinikuheide vastava ühiku kohta. Kasutades Grasshopperit tuleb erinevalt Rhinocerosest kõik ehituse elemendid parameetriselt kaardistada One Click LCA-ga seotud profiilidega. See tegevus võimaldab teha LCA arvutust Grasshopperi siseselt ning tulemuste visualiseerimine toimub samuti automaatselt läbi Grasshopperi. Grasshopperis LCA arvutuse tegemise struktuuri kirjeldab Joonis 1.13. Joonisel nähtavad käskude plokid kirjeldavad ära visuaalse programmeerimise mõiste ning programmi omavahelist toimivust kirjeldavad plokkide vahelised jooned. [31]

Grasshopperi programmi jooksmise tulemusena saadud hoone visuaalne kujutis, kus on näidatud süsinikujalajälje arvutuse tulemused illustreerib Joonis 1.14. Parameetriselise projekteerimise sidumine LCA arvutusega annab väga suure ajalise võidu võrreldes manuaalsema lähenemisega ning parameetriselise projekteerimise eeliseks on, et loodud programmi saab samuti kasutada teiste sarnaste hoonete süsinikuarvutuse teostamiseks. [31]



Joonis 1.13. Grasshopperi struktuur LCA arvutuse tegemiseks [31].



Joonis 1.14. Grasshopperi LCA arvutuse visuaalne tulemus [31].

2. HOONE SÜSINIKUJALAJÄLJE ARVUTAMISE AUTOMATISEERIMISE METOODIKA

Selles lõputöös on kasutatud juhtumiuuringu uurimisstrateegiat ning koostatud juhtumiuuring eksisteerivale tootmishoonele. Selleks, et uurida hoone süsinikujalajälge on eelnevalt kirjanduse ülevaates uuritud süsinikujalajälje tausta, lahti selgitatud selle arvutamise meetoodika ja kogutud infot kavandatud mallhoone kohta projekteerimisbüroost Norte OÜ. Lisaks on uuritud arvutusliku kavandamise võimalusi süsinikujalajälje arvutuse automatiseerimiseks ning selle raames on loodud programm, mis võimaldab hoone süsinikujalajälge arvutada. Selle abil luuakse unikaalsust ja innovaatsust süsinikujalajälje arvutamisele kehtestatud nõuete sujuvamaks rakendamiseks. [32]

Uurimistöö üks eesmärk on välja töötada, arvutusliku kavandamist kasutades, programm, mis suudaks teostada süsinikujalajälje arvutust mallhoonele automaatselt. Selleks loodi vastav programm Grasshopperis, mis on ühildatud Tekla Structures mudelprojekteerimise programmiga. Esimeseks sammuks on Tekla Structures mudelprojekteerimise programmis vastavusse viimine selleks, et lihtsustada Grasshopperis programmi loomist. Teine samm on Teklast pärineva andmete põhjal Grasshopperis süsinikujalajälje arvutamiseks vastava parameetri kätte saamine, mis selles töös on materjali kaal kilogrammides. Kolmas samm on materjali kaalude põhjal arvutada Eesti süsinikujalajälje andmeid kasutades kõikidele hoone elementidele ja kogu hoonele süsinikujalajälg. Programmi arendamise eesmärk on muuta süsinikujalajälje arvutamine automaatseks hoone kavandamise etapis, kus valitakse hoone materjale, arvutatakse esimesed ristlõiked konstruktsioonidele ning selle abil luua efektiivne võrdlemise võimalus lähtudes süsinikujalajäljest.

LCA arvutus on loodud tootmishoonele, millele on koostatud LCA arvutus 2022. aastal. Loodud arvutus annab võimaluse võrrelda tootmisetapi A1-A3 tulemusi ning sellepärast on valitud mallhooneks hoone, millel on olemas süsinikujalajälje arvutus.

Loodud Grasshopperi programmi funktsionaalsuse testimiseks pakuti lisaks baasmudelile välja veel kolm alternatiivset varianti selleks, et üritada vähendada algselt saadavat süsinikujalajälge ning katsetada loodud programmi töövõimet ja kiirust.

2.1 Mallhoone tutvustus

Mallhooneks, millele teostada süsinikujalajälje arvutus, on selles töös valitud teraskarkassist tootmishoone. Hoone aadressiks on Treiali tee 5, Rae vald, Harjumaa, Eesti. Hoone on valmis ehitanud Maru Ehitus AS ning projekteerinud Norte OÜ.

Tegu on Windak OÜ tootmishoone laiendusega. Süsinikujalajälje arvutus on teostatud kahemahulisele hoonele, millest üks on tootmishall ja teine on kontoriosa. Hoone on tootmishall projekteeritud teraskarkassile, mille seinteks on kergpaneelid ja katuse kandev osa on tehtud terasprofiilplekist. Kontoriosa on eraldab tootmishallist 190 mm paksune täisvalatud õõnsustega Columbia kivi sein. Kontori vahelae ja katuse moodustavad õõnespaneelid ning seinteks on samuti kergpaneelid. Hoone konstruktsioonidele viitab Tabel 2.1, baashoone tulp.

Mallhoone valimise põhjuseks on see, et hoonele on teostatud 2022. aasta suvel LCA arvutus ning see annab võimaluse võrrelda kahe erineva programmi arvutustulemusi. 2022 teostatud arvutuse jaoks kasutati ettevõtte OneClick LCA poolt loodud tarkvara. Antud tarkvara omab kolmanda osapoole sertifikaati ja vastab enam kui 30 sertifikaadile ning standardile hoonete oluluskaare hindamiseks. Täpsemalt kirjeldab arvutuses olnud ja tehtud erisusi alapeatükk 2.2.

2.2 Mallhoone baasmudeli elementide kirjeldused ja alternatiivid

Antud hoonele on 2022. aastal juba tehtud LCA arvutus ning seelses arvutuses kasutatud andmetele tootmisetapis viitab

Tabel 2.2. 2022. aasta arvutus on teostatud Maru Ehitus AS/Norte OÜ tellimusel ning arvutuse on koostanud ettevõtte LCA Support. [33]

Antud juhul on siinses uurimistöös tehtud paar erisust näiteks ei arvestata LCA arvutuses selles uurimistöös avatäidetega, siseseinte osas kipsplaatidega ning treppide ja redelitega, sest magistristöo fookuses on ehitise konstruktsioonid ning selles mudelis eelnevalt nimetatud elemente ei kajastata.

Lisaks on tehtud üldistus betoonkonstruktsioonides esineva armatuuri kohta. Armatuuri koguseks on arvestatud 100 kg armatuuri 2400 kg betooni kohta ehk armatuuri mass moodustab kogu betooni massist umbes 4%. [34]

Grasshopperis loodud programmi testimiseks loodi veel lisaks baasmudelile veel 3 alternatiivi, mille süsinikujalajälge tootmisetapis leida. Esimeseks alternatiiviks loodi kergpaneeli muutev lahendus, kus asendatakse eksisteerivad soojustatud SP2E-PIR paneelid SPA-F mineraalvilla kergpaneelidega. Mineraalvilla tooted on valitud nende tootja Ruukki kodulehelt ning valituks sai 175mm paksune mineraalvill soojustusega kergpaneel. Teise variandi puhul on muudetud hoone karkassi teraspostid raudbetoonpostideks. Kolmas variant on kahe eelneva variandi koosmõju süsinikujalajäljele. Selles töös kasutatud mallhoones esinevad elemendid kirjeldab lahti Tabel 2.1. [35]

Erinevusi kahe süsinikujalajälje arvutuse vahel esineb lisaks tehtud erisustele ka alternatiivsete variantide loomisel. 2022. aastal loodud arvutuses on üheks alternatiiviks loodud kahe katuse soojustuse kihi paksuse suurendamine 60mm võrra ning PIR vahuga soojustatud kergpaneeli on muudetud mineraalvillapaneeliks ja paksust suurendatud 160mm pealt 300mm peale. Selles uurimistöös on alternatiivideks valitud teraspostide asendamine betoonpostidega ja välja vahetada PIR kergpaneelid mineraalvilla omadega, mille tõttu muutusid tootest tulenevalt välisseinte kergpaneelid 15mm paksemaks. Põhjus, miks selles lõputöös pakuti välja sellised alternatiivid on, et tutvudes 2022 loodud arvutusega selgus, et sealsete alternatiivide korral läks süsinikujalajälje arv suuremaks. Antud töös sooviti süsinikujalajälge vähendada ning esmasel hinnangul osutus valituks postikonstruktsioonide ja kergpaneelide soojustuse muutmise.

Tabel 2.1. Hoone ehituslike osade kirjeldus antud uurimistöö raames

Element	Baasmudel	I alternatiiv Kergpaneeli alternatiiv	II alternatiiv Betonposti alternatiiv	III alternatiiv Kergpaneeli ja betonposti alternatiiv kombineeritult
Vundament, sokkel ja põrand	Betoonist, soklipaneeli soojustus mineraalvill, tootmishalli põrand kiudbetoonist C30/37	Betoonist, soklipaneeli soojustus mineraalvill, tootmishalli põrand kiudbetoonist C30/37	Betoonist, soklipaneeli soojustus mineraalvill, tootmishalli põrand kiudbetoonist C30/37	Betoonist, soklipaneeli soojustus mineraalvill, tootmishalli põrand kiudbetoonist C30/37
Karkass	Teraspostid ja terastalad	Teraspostid ja terastalad	Betonpostid C25/30 ja terastalad	Betonpostid C25/30 ja terastalad
Välisseinad	Soojustatud SW paneel 160mm SP2E X-PIR Soojustatud SW paneel 100mm SPA F - min. vill	Soojustatud SW paneel 175mm SPA F - min. vill Soojustatud SW paneel 100mm SPA F - min. vill	Soojustatud SW paneel 160mm SP2E X-PIR Soojustatud SW paneel 100mm SPA F - min. vill	Soojustatud SW paneel 175mm SPA F - min. vill Soojustatud SW paneel 100mm SPA F - min. vill
Katus	PVC katusekate, Isover OL-TOPP 30mm, EPS 60 170mm, aurutõkkekile, Paroc RO50 70 mm, kandev-profiilplekk	PVC katusekate, Isover OL-TOPP 30mm, EPS 60 170mm, aurutõkkekile, Paroc RO50 70 mm, kandev-profiilplekk	PVC katusekate, Isover OL-TOPP 30mm, EPS 60 170mm, aurutõkkekile, Paroc RO50 70 mm, kandev-profiilplekk	PVC katusekate, Isover OL-TOPP 30mm, EPS 60 170mm, aurutõkkekile, Paroc RO50 70 mm, kandev-profiilplekk
Kontori vahelagi	Õõnespaneel EBE HCE320, Isover OL-A 30mm, kiudbetoonplaat 70mm	Õõnespaneel EBE HCE320, Isover OL-A 30mm, kiudbetoonplaat 70mm	Õõnespaneel EBE HCE320, Isover OL-A 30mm, kiudbetoonplaat 70mm	Õõnespaneel EBE HCE320, Isover OL-A 30mm, kiudbetoonplaat 70mm
Kontori ja tootmishalli vaheline sisesein	Columbia 190mm	Columbia 190mm	Columbia 190mm	Columbia 190mm

Tabel 2.2. 2022 teostatud LCA arvutuse ehituslikud osad [33]

Element	Baasmudel	I alternatiiv katuse alternatiiv	II alternatiiv Väliseina alternatiiv	III alternatiiv Katuse ja väliseina alternatiiv koos
Vundament ja esimese korruse põrand	Betoonist, tootmisosal kiudbetoon põrand	Betoonist, tootmisosal kiudbetoon põrand	Betoonist, tootmisosal kiudbetoon põrand	Betoonist, tootmisosal kiudbetoon põrand
Välisseinad ja karkass	Tootmine- Soojustatud SW paneel 160mm SP2E X-PIR, teraspostid ja talad Kontor- SW paneel +kassett 240mm	Tootmine- Soojustatud SW paneel 160mm SP2E X-PIR, teraspostid ja talad Kontor- SW paneel +kassett 240mm	Tootmine- Soojustatud SW paneel 300mm SPA EE, vahel mineraalvill soojustus, teraspostid ja talad Kontor- SW paneel +kassett 240mm	Tootmine- Soojustatud SW paneel 300mm SPA EE, vahel mineraalvill soojustus, teraspostid ja talad Kontor- SW paneel +kassett 240mm
Katus	PVC katusekate, Isover OL-TOPP 30mm, EPS 60 170mm, aurutõkkekile, Paroc RO50 70 mm, kandev-profiilplekk	PVC katusekate, Isover OL-TOPP 70mm, Isover OL-P 190mm, aurutõkkekile, Paroc RO50 70 mm, kandev-profiilplekk	PVC katusekate, Isover OL-TOPP 30mm, EPS 60 170mm, aurutõkkekile, Paroc RO50 70 mm, kandev-profiilplekk	PVC katusekate, Isover OL-TOPP 70mm, Isover OL-P 190mm, aurutõkkekile, Paroc RO50 70 mm, kandev-profiilplekk
Vahelagi	Õõnespaneel EBE HCE320, Isover OL-A 30mm, kiudbetoonplaat 70mm	Õõnespaneel EBE HCE320, Isover OL-A 30mm, kiudbetoonplaat 70mm	Õõnespaneel EBE HCE320, Isover OL-A 30mm, kiudbetoonplaat 70mm	Õõnespaneel EBE HCE320, Isover OL-A 30mm, kiudbetoonplaat 70mm
Avatäited	Tootmine: PVC aknad, metallist tõstuksed ja käänduksed, metall- ja sileuksed, katuseaknad Kontor: Alumiinium-profiilidel klaasfassaad, PVC aknad, metall- ja	Tootmine: PVC aknad, metallist tõstuksed ja käänduksed, metall- ja sileuksed, katuseaknad Kontor: Alumiinium-profiilidel klaasfassaad, PVC aknad, metall- ja	Tootmine: PVC aknad, metallist tõstuksed ja käänduksed, metall- ja sileuksed, katuseaknad Kontor: Alumiinium-profiilidel klaasfassaad, PVC aknad, metall- ja	Tootmine: PVC aknad, metallist tõstuksed ja käänduksed, metall- ja sileuksed, katuseaknad Kontor: Alumiinium-profiilidel klaasfassaad, PVC aknad, metall- ja sileuksed, katuseaknad

	sileuksed, katuseaknad	sileuksed, katuseaknad	sileuksed, katuseaknad	
Siseseinad	Valdavalt kipskarkass, lisaks Columbia 190mm	Valdavalt kipskarkass, lisaks Columbia 190mm	Valdavalt kipskarkass, lisaks Columbia 190mm	Valdavalt kipskarkass, lisaks Columbia 190mm
Trepid, redelid	Katuseredelid, tootmishoone betootrepp	Katuseredelid, tootmishoone betootrepp	Katuseredelid, tootmishoone betootrepp	Katuseredelid, tootmishoone betootrepp

2.3 Rhino ja Grasshopperi rakendamine

Süsinikujalajälje arvutuse läbiviimiseks kasutades arvutusliku kavandamist tuli koguda alginfot ja selgeks õppida arvutusliku kavandamise programm Grasshopper. Selleks tuli algselt koguda infot kas ja kuidas on võimalik ühildada omavahel visuaalse programmeerimise programmi Grasshopper ja mudelprojekteerimise programmi Tekla Structures. Kui Tekla Structures kasutamiskogemus on lõputöö autoril eelnevalt olemas, siis Grasshopperi kasutamine eeldas selle programmi kasutamiseks algtõdede ja põhimõtete selgeks õppimist. Selleks kasutati Learn Grasshopperi lehekülje veebipõhist teoreetilist materjale, webinare ja katsetati ning tutvuti erinevate näidisprogrammidega. [36]

Lisaks tuli tutvuda Grasshopperi ja Tekla Structures ühildamisega. Välja on arendatud Grasshopperi ja Tekla Live Link (Grasshopperi ja Tekla ühildaja), mille abil on võimalik kahte programmi omavahel siduda ja paralleelselt programme kasutada. Ühenduse kasutamise õppimise jaoks on loonud Tekla arendaja Trimble loonud juhendi, kuidas ühildamine üles seadistada ning kuidas kasutada välja arendatud ühendust. Juhendis on toodud algtõed, juhendid, õppematerjalid ja õppevideod, mis aitavad Grasshopperi ja Tekla ühendamist õppida. [37]

2.4 Süsinikujalajälje arvutuse metoodika selles töös

Süsinikujalajälje arvutus viidi samuti läbi Grasshopperi programmis. Süsinikujalajälje arvutus põhineb kasutades standardeid *ISO 14040* ja *ISO 14044* ning arvutuse tegemiseks vajaminevad heitekoefitsendid on võetud Eesti süsinikuheitmete tegureid kajastavast Exceli failist.

Eesti esialgses andmebaasis on ligikaudu 100 materjali ning need on liigitatud vastavalt materjali spetsiifikale ja kasutusotstarbele. Andmebaasis on olemas betootooted,

teras, soojustusmaterjalid ja kergpaneelid. Osadel toodetel on olemas alamliigid näiteks betoonil, kus saab valida betooniklasside vahel, valida saab õõnespaneeli ja ka seinapaneeli. Materjalide heitetegurid on esitatud mitu kilogrammi CO₂ ekvivalenti ühe kilogrammi materjali kohta. Heitetegur võtab arvesse materjali tootmise käigus tekkinud süsinikuheidet ja süsinikku, mis on materjaliga endaga seotud. Materjalide heitmeteguritele on lisaks lisatud osavarutegurid, mis moodustab 20% heitme algväärtusest, sest süsinikuandmete kogumine ja tootja poolsetesse esitatud andmetesse suhtutakse konservatiivselt. Selles lõputöös leidsid Eesti heitetegurid kasutust selleks, et see oli olemas ja annab Eesti tingimustes parima tulemuse. Võrreldes saadud tulemusi 2022. aastal koostatud arvutusega on tulemused erinevad, sest kasutati erinevaid heitmetegurite andmebaase [38]

Arvutuse tegemisel on kätte saadud hoone materjalidest ja konstruktsiooni suurustest sõltuv süsinikujalajälje arv, mille ühikuks on kgCO_{2e} ehk mitu kilogrammi CO₂ heidet tekib hoone materjalidest tootmisetapis A1-A3. Arvutuse tegemiseks kasutati Eesti GWP A1-A3 heitetegureid, mille ühikuks on kgCO_{2e}/kg. Lõpp süsinikuheite saamiseks korrutati läbi elementide massid GWP heiteteguritega. Saadud tulemusi kajastab ja võrdleb kolmas peatükk. [39]

3. ARVUTUSMUDELI TULEMUSED JA VÖRDLUS TEHTUD ARVUTUSEGA

Käesolevas peatükis esitatakse Grasshopperis loodud automaatse süsinikuarvutamise programmi ning esitatakse programmist saadud tulemused ja tehakse võrdlus 2022. aastal tehtud mallhoone LCA arvutusega tootmisetapis A1-A3.

3.1 Grasshopperi programmi arendamine

Selle lõputöö peamine väljund on arvutusliku kavandamise juurutamine süsinikusisalduse arvutuse automatiseerimiseks hoone kavandamise staadiumis Selleks loodi Grasshopperi programmi arendus, mis suudab süsinikujalajälge arvutada. Antud alapeatükis on välja toodud programmi arendamise etapid ning kirjeldatakse, miks need sammud olid vajalikud lõppresultaadiks.

3.1.1 Elementide vastavusse viimine Tekla Structures programmis

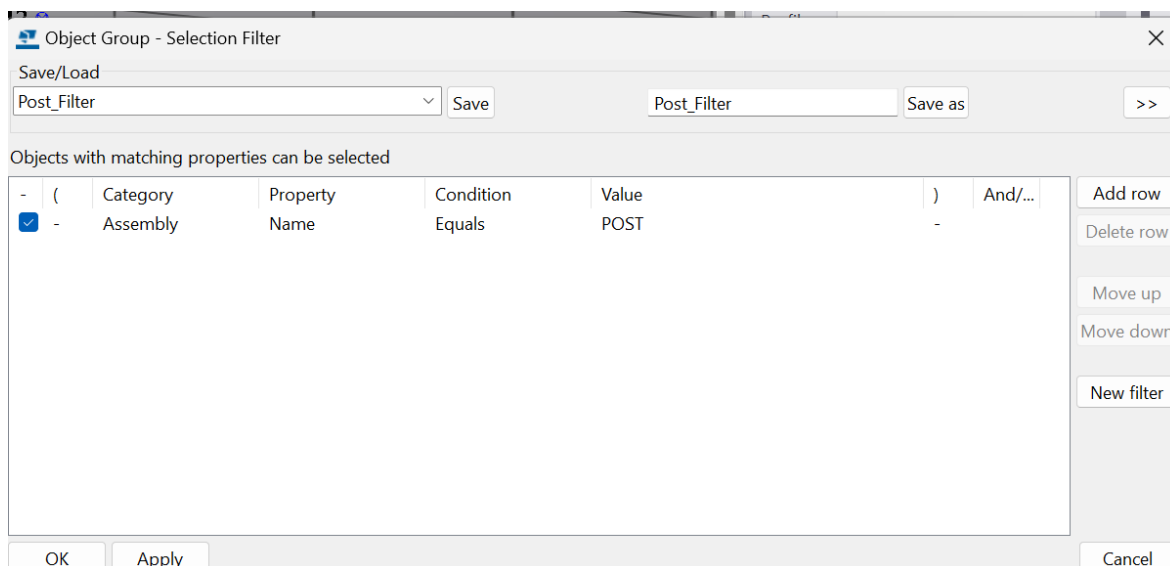
Selleks, et Grasshopperis saaks hakata programmi koostama, tuli mallhoone mudel Teklas viia vastavusse andmete integreerimiseks. Grasshopperi ja Tekla vahel on loodud reaajas toimiv ühendus (Grasshopper – Tekla Live Link), mis võimaldab Grasshopperit kasutades modelleerida Teklas elemente. Grasshopperis on olemas Teklas kasutusel olevad peamised käsud, mis töötavad samal põhimõttel nagu mudelprojekteerimise programmis (Joonis 3.1).



Joonis 3.1. Grasshopperi ja Tekla Structures käsuriid.

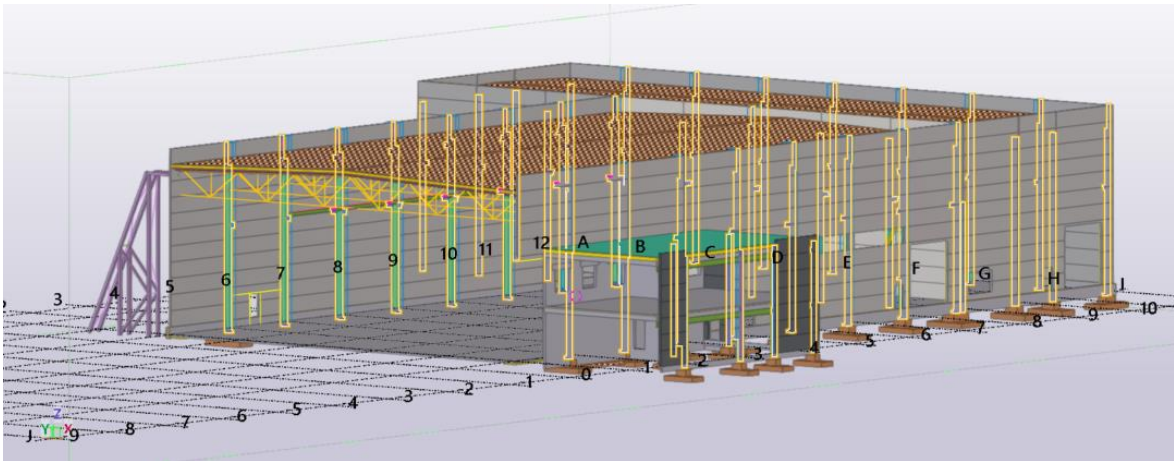
Kasutades Grasshopperis olevaid Tekla käskusid on võimalik muuta programmi valmisist palju lihtsamaks ning lisaks on Tekla kasutajatele antud käsud tuttavad ning nende abil on samuti lihtsam programm valmis kirjutada.

Grasshopperi ja Tekla programmide omavahel integreerimiseks, tuleb varem loodud mallhoone mudeli kasutamiseks luua Teklas elementide valiku filtrid (Selection filter, Joonis 3.2). Valiku filter võimaldab Grasshopperil aru saada, mida soovitakse mudelis defineerida. Valiku filtrid loodi eristamaks erinevaid elementide gruppe näiteks: feramid, postid, kergpaneelid, vundamendid ja katuseelemendid (näide posti valiku filtrist, Joonis 3.3).



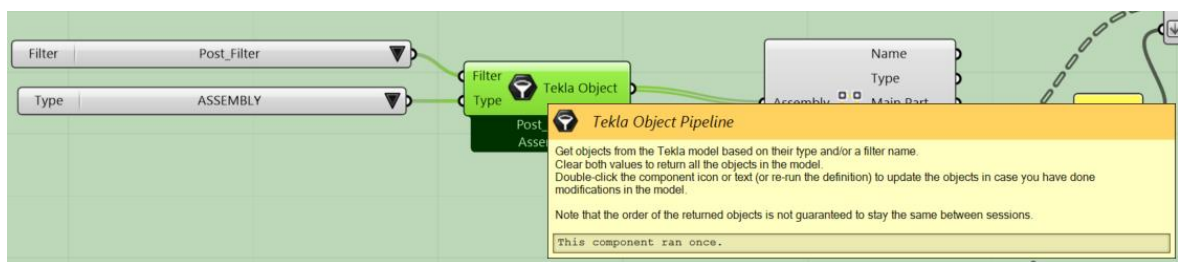
Joonis 3.2. Tekla valiku filtri arendamine Teklas.

Antud töös loodi Tekla valiku filter elementide koostude põhjal, kasutades selleks elemendikoostudele pandud nimesid. Võimalik on luua valiku filtreid ka elemendi tasandil, millega saab väga detailselt välja filtreerida kõik elemendid. Antud töös otustati kasutada koostude valiku loomist, sest väiksemale andmetasandile saamiseks loodi vastavad filtrid Grasshopperis ning see võimaldas luua vähem filtreid Teklas ning vähendas Teklas tehtava töö mahtu.



Joonis 3.3. Tekla valiku filter karkassipostidele.

Elementide sisse toomiseks Grasshopperisse kasutati Grasshopperi ja Tekla ühildamise käsku Grasshopperis, mille nimi on Tekla Object Pipeline (Tekla objekti ühendus), mis tänu valiku filtri kasutamise integreeris elementide grupid Grasshopperisse (Joonis 3.4).



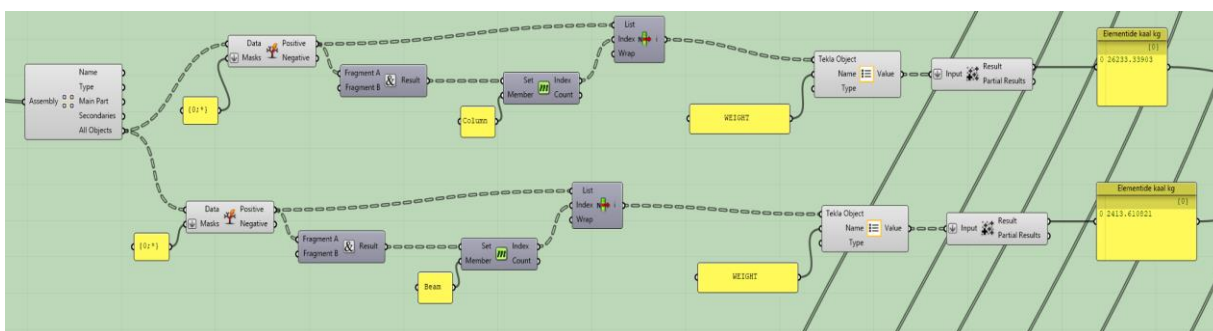
Joonis 3.4. Tekla Object Pipeline käsk karkassipostide integreerimiseks.

Tänu Tekla Object Pipeline kasutamisele sai kasutada olemasolevat Tekla mudelit ning võimaldas kõiki Teklas olevaid objekte koos oma andmemahitudega edasi kasutada. Selle käsu kasutamine kiirendas oluliselt tööprotsessi, sest vastasel oleks tulnud hoone mudeli elementide tekitamiseks koostada Grasshopperisse vastav kood.

Kokku loodi 14 elementide grupe defineerivat valiku filtrit: fermid, karkassipostid, muu teras (sidemed, diagonaalid, lisateras), katuseplekk, katuse soojustus I kiht, katuse soojustus II kiht, katusekate, õõnespaneel, kergpaneelid mineraalvillaga, kergpaneelid PIR, vundament, sokkel, põrand ja müüritis. Loodud elementide gruppide järgi teostati ka süsinikujalajälje arvutus ehk arvutatud on nende elementide gruppide süsinikujalajalg tootmisetapile A1-A3 ning kokkuvõtvalt terve hoone süsinikujalajalg lähtudes ehitusmaterjalidest ja nendest elemendigruppidest.

3.1.2 Grasshopperi programmi arendamine ja parameetrite avaldamine

Süsinikujalajälje arvutuse teostamiseks loodi Grasshopperi visuaalse programmeerimise programmi kasutades arvutust teostav visuaalne kood. Varasemalt Teklast sisse toodud elementide andmetest sai järgnevalt välja filtreerida arvutuseks vajalik parameeter ehk elementide massid kilogrammides. Elementide massi on vaja süsinikujalajälje arvutamiseks, sest massi ja heitetegurit korrutades saab teada tekkiva süsinikuekvivalendi. Teklas on massiühikud eelnevalt seadistatud kilogrammide peale nii, et Grasshopperisse tekkisid kaalu (Weight) üles otsimisel kohe õiged andmed.

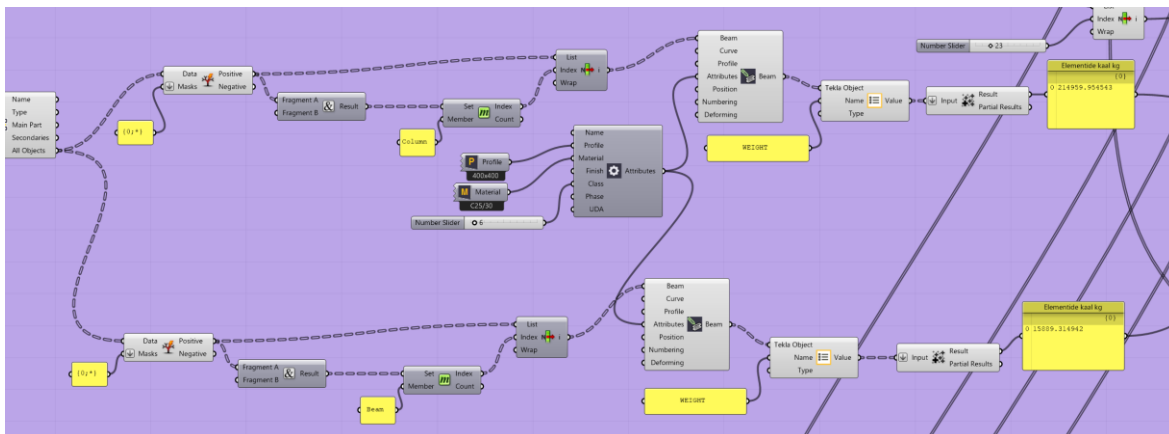


Joonis 3.5. Grasshopperi visuaalne kood Tekla elementide massi filtreerimiseks baasmudelile.

Massi parameetri kätte saamiseks tuli Teklast tulevate elementide jaoks luua Grasshopperis kood, mida kujutab Joonis 3.5. Grasshopper defineerib Teklast tulevaid horisontaalsed elemendid taladeks (Beam) ja vertikaalsed elemendid postideks (Column), seetõttu on programmikoodis defineeritud need parameetrid eraldi, et oleks võimalik muuta profiilide ristlõikeid ja terase klassi. Pärast elementide defineerimist Grasshopperile arusaadavale kujule saab välja filtreerida elementide kaalu otsides parameetrite seast otsingusõnaga Weight (mass). Igas elemendigrupis on elemente kokku üle kümne, siis seetõttu tuleb Grasshopperis kasutada Mass Addition (summeerimine) käsku, millega saab terve andmemahu pealt teada näiteks kõikide teraspostide kaalu. Antud meetodit kasutati mallhoone süsinikujalajälje arvutamiseks. Alternatiivsete lahenduste saamiseks, kus sõltuvalt materjalist ja/või ristlõikest süsinikujalajalg muutub, modifitseeriti programmikoodi vastavaks, et oleks võimalik muudatusi teha. Lisaks baasmudelile loodi Grasshopperisse ja seeläbi tekivad ka Teklasse veel 3 alternatiivset varianti.

II alternatiivi loomiseks tuli muuta Grasshopperis eelnevalt kirjutatud programmi osa. Selleks, et muuta teraspostid betoonpostideks tuli Grasshopperisse lisada Modify Beam

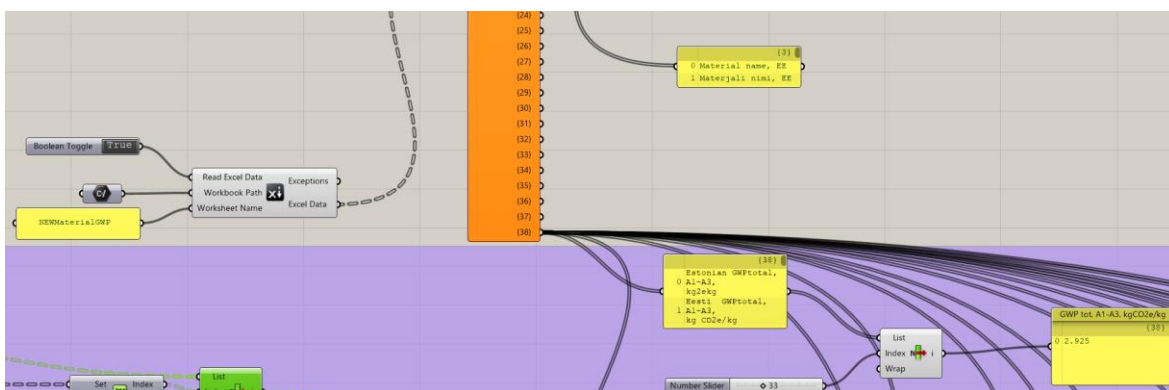
(modifitseeri tala) käsk, mis nõuab muutuse tegemiseks uusi lähteandmeid. Uued lähteandmed anti betoonpostide tekitamiseks Attributes (atribuudid) käsuga ning sellega on seotud posti ristlõige (Profile) ja betooni materjaliklass, mis tuleb Teklasse loodud materjalidekogust (Material) (Joonis 3.6).



Joonis 3.6. II alternatiivi betoonpostide loomise programmiosa.

Sarnaselt II alternatiivile toimiti ka I alternatiivi puhul, sest PIR vahuga soojustatud kergpaneelid tuli muuta mineraalvillaga soojustatud paneelideks. Sellel juhul kasutati samuti materjalide kogu.

Kui teada oli saadud elementide massid, siis edasi sai igale vastavale elemendigrupile leida süsinikujalajälje arvu. Elementide massid korrutati läbi heitmetegurite tabelist materjalile vastava heitmeteguriga. Heitmetegurid integreeriti Grasshopperisse ning kõik heitmeteguritega seotud andmed on Grasshopperis olemas. Heitmetegurite algkoht asub eraldi MS Exceli failis ning see fail on Grasshopperiga ühildatud läbi vastava käsu (Joonis 3.7).

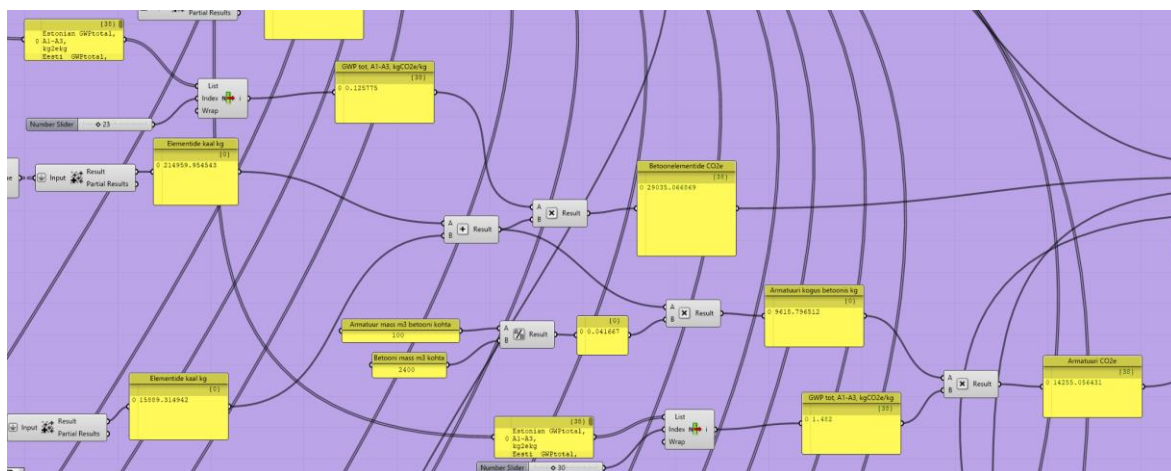


Joonis 3.7. Heitmeteguri MS Exceli integratsioon Grasshopperisse.

Taolise programmi loogika seisneb selles, et MS Exceli faili uuendades saab uueneb see samuti Grasshopperis automaatselt ning lisaks vähendab MS Exceli integreerimine Grasshopperisse tähelepanematuses tekkivad hoolatusvigu. Seetõttu sai valitud MS Exceli integreerimine ning selle rakendamine aitab vältida pidevat Exceli vahel käimist ja andmete ülekontrollimist.

Pärast heitmetegurite integreerimist on võimalik teostada süsinikujalajälje arvutus. Joonis 3.8 kujutab raudbetoonpostidele teostatud arvutust. Selleks on võetud betoonpostide kaal ning välja otsitud betooniklassile C25/30 vastav GWP heitmetegur, milleks on 0,125775 kgCO₂e/kg. Nende kahe arvu korrutamisel saadi teada betoonpostide süsinikuekvivalent, milleks tuli 29 035 kgCO₂e. Ülejäänud elemendigruppidele on arvutused teostatud sama loogikat kasutades.

Betoontoodete puhul on üks erisus ning selleks on armatuuri kasutamisest tekkinud süsinikujalajalg. Betoontoodetele lisati juurde ligikaudne armatuuri kogus (armatuuri koguse saamine on lahti seletatud alapeatükk 2.2 3. lõigus). Kui betoonis oleva armatuuri mass oli teada saadud siis korrutati see samuti vastava heitmeteguriga läbi. Armatuuri GWP on 1,482 kgCO₂e/kg ja betoonpostides sisalduva armatuuri massiks tuli 9619 kg ning nende kahe väärtuse korrutamisest saadud süsinikuekvivalent on 14 255 kgCO₂e. Pärast armatuuri süsinikuekvivalenti teada saamist sai selle lisada betoonpostide omale ning saadi teada kogu raudbetoonpostide ekvivalent, milleks on 43 290 kgCO₂e. (Joonis 3.8)

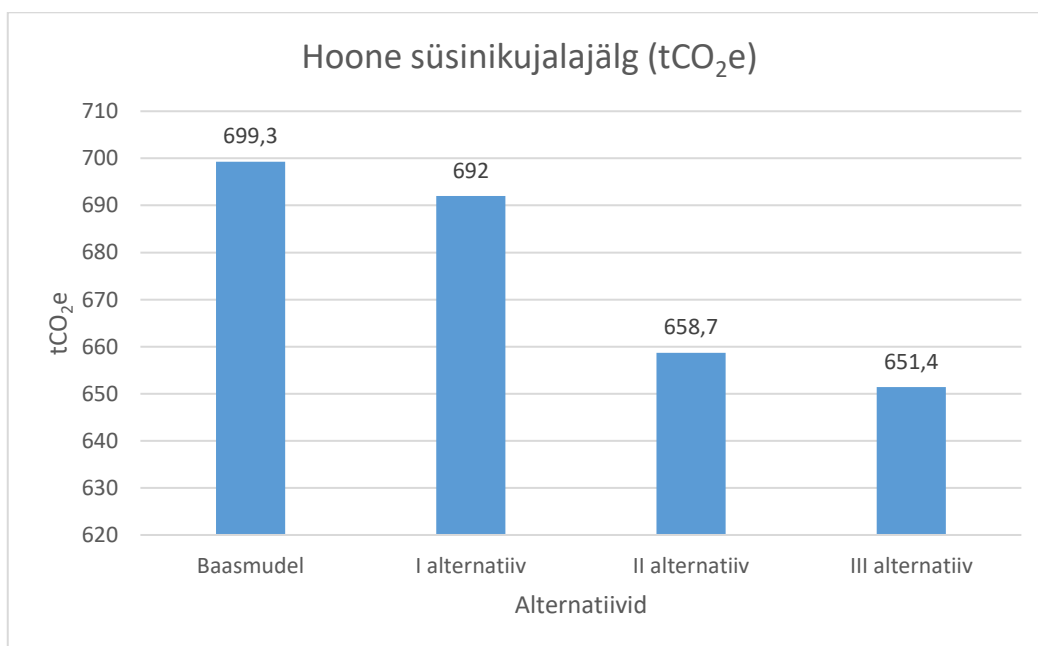


Joonis 3.8. Süsinikujalajälje arvutamise programmiosa raudbetoonpostide näitel.

Kokku loodi 4 erinevat Grasshopperi programmi faili baasmudeli ja kõikide alternatiivsete variantide jaoks. Hetkel kui baasmudeli jaoks oli arvutusmodel loodud, oli alternatiivsete variantide loomine ja uute süsinikujalajälje saamine väga kiire protsess, mis oli samuti selle uurimistöö üks eesmärkidest. Alternatiivse variandi jaoks ei pidanud kogu arvutust uuesti teostama vaid sai minimaalse vaevaga teada alternatiivi süsinikujalajälje. See eeldas ainult eelpool nimetatud ja visualiseeritud muudatuste sisse viimist Grasshopperisse.

3.2 Mallhoone süsinikujalajälje arvutuse tulemused

Baasmudelile ja loodud kolmele alternatiivsele variantidele teostati hoone oluluskaare arvutus arvestades hoone oluluskaare tootmisetappi A1-A3. Kõige väiksema süsinikujalajäljega variant on III alternatiiv, mille süsinikujalajalg on 651,4 tCO₂e. III alternatiiv sisaldas endast teraspostide asendamist raudbetoonpostidega ning soojustatud PIR kergpaneelid asendati mineraalvilla kergpaneelidega. Baasmudelil tuli süsinikujalajäljeks 699,3 tCO₂e, I alternatiivi puhul 692 tCO₂e ja II alternatiivi puhul 658,7 tCO₂e (Joonis 3.9).



Joonis 3.9. Hoone süsinikujalajalg mallhoones etappides A1-A3

Välja pakutud alternatiivid õigustasid end, sest iga alternatiiv oli süsinikuekvivalendi arvu järgi väiksema süsinikujalajäljega kui mallhoone algvariant. Kogu tekkivat süsinikujalajälge õnnestus vähendada 7% 699,3 tCO₂e pealt 651,4 tCO₂e peale.

Erinevate konstruktsioonide tulemuste jaotust kirjeldab Tabel 3.1, kus on näha, et enim annab antud hoone materjalide puhul optimeerida teraskonstruktsioone süsinikujalajälje vähendamiseks, seetõttu otsustati II alternatiivi puhul ka teraspostid asendada betoonpostidega. Terase poolt tekitatud süsinikujalajälg on mallhoone puhul võrreldes betooniga halvem, sest terase maht hoones on väike ning seetõttu on betoon antud hoones süsinikujalajälje koha pealt mõistlikum. Terase kasutamise plussiks on asjaolu, et terast ja terassõlmi saab projekteerida nii, et teraselemendid on hoone kasutusaja lõppedes demonteeritavad ning neid samu elemente saab kasutada kuskil mujal. Sarnast meetodikat saab rakendada ka betoonelementidega, kuid olukordi, millega arvestada tuleb on rohkem.

Betoonpostide puhul on taoline tegevus keerulisem, sest betoonis olev armatuur võib olla ajaga korrodeerunud ning oma tugevusomadusi kaotanud, mistõttu ei saa neid nii hästi taaskasutada. Lisaks kui on vaja ehitada kõrgemaid hooneid siis teraskarkassi puhul tekib antud juhul eelis, sest terase kulu võrreldes betoonist massiividega on siis väiksem ja süsinikujalajälg samuti. Välisseinte puhul on näha, et PIR vahuga soojustatud kergpaneelide kasutamine on samuti süsinikujalajälje poolt vaadates halvem variant, kui mineraalvillaga soojustatud kergpaneelide kasutamine. PIR paneelide kasutades on tekkiv süsinikuekvivalent 34,4 tCO₂e ja mineraalvilla paneelide kasutades 27,1 tCO₂e. [40]

Tabel 3.1. Tootmisetapi LCA arvutuse tulemused

A1-A3 mõjud (tCO₂e)				
Kirjeldus	Baasmudel (tCO₂e)	I alternatiiv (tCO₂e)	II alternatiiv (tCO₂e)	III alternatiiv (tCO₂e)
Vundament, sokkel ja põrand	223,2	223,2	223,2	223,2
Karkass	338,9	338,9	298,3	298,3
Välisseinad	34,4	27,1	34,4	27,1
Katus	46,3	46,3	46,3	46,3
Kontori vahelagi ja katus	31,6	31,6	31,6	31,6
Kontori ja tootmishalli vaheline sisesein	24,9	24,9	24,9	24,9
Kokku	699,3	692	658,7	651,4

Tabel 3.2 kirjeldab endas selle lõputöö raames tehtud arvutusi elemendigruppide kaupa. Tulemustest on märgata, et suurima jalajälje tootmisetapis annavad hoonele süsinikujalajäljele teraselemendid: fermid, postid, muu teras (sidemed, diagonaalid, avaraamid), mille süsinikuekvivalendid on vastavalt 64,0, 83,8 ja 102,8 tCO₂e. See oli ka üks ajendeid üritamiseks leida alternatiive terase kasutamisele lähtudes GWP arvust ja lõplikust süsinikujalajäljest. Valituks ostus betoonpostide kasutamine teraspostide abil, tänu millele sai postide süsinikujalajälge vähendada 48% 83,8 tCO₂e pealt teraspostide puhul 43,3 tCO₂e peale betoonpostide puhul. Kogu hoone karkassi süsinikujalajälje langes väärtus 12%. Täpsustusena tuleb lisada, et betoonpostide süsinikujalajälje arvu saamise puhul on tehtud üldistus armatuuri koguse kohta betoonis, mis mõjutab teatud määral saadud tulemust. Kuid antud töö eesmärk oli hinnata hoone süsinikujalajälge hoone kavandamise varajases staadiumis ning loodud programmi abil on võimalik hetkel, kui täpne armatuur on betoonpostidele välja arvatud lisada arvutusele ning saada kiirelt täpne süsinikujalajälje väärtus.

Tabel 3.2. Elemendi gruppide kaupa saadud tulemused

A1-A3 mõjud				
(tCO₂e)				
Elemendid	Baasmudel (tCO₂e)	I alternatiiv (tCO₂e)	II alternatiiv (tCO₂e)	III alternatiiv (tCO₂e)
Fermid	64,0	64,0	64,0	64,0
Postid	83,8	83,8	43,3	43,3
Muu teras	102,8	102,8	102,8	102,8
Katuseplekk	88,3	88,3	88,3	88,3
Katuse soojustus I kiht	34,7	34,7	34,7	34,7
Katuse soojustus II kiht	11,5	11,5	11,5	11,5
Katusekate	0,098	0,098	0,098	0,098
Õõnespaneel	31,6	31,6	31,6	31,6
SW paneel min. vill	2,79	27,1	2,79	27,1
SW paneel PIR	31,6	-	31,6	-
Vundament	41,6	41,6	41,6	41,6
Sokkel	12,2	12,2	12,2	12,2
Põrand	169,3	169,3	169,3	169,3
Müüritis	24,9	24,9	24,9	24,9

3.3 Võrdlus 2022. aasta tulemustega

2022. aastal teostatud süsinikujalajälje arvutust ja selle töö raames tehtud arvutust saab omavahel võrrelda baasmudeli põhjal (Tabel 3.1 ja Tabel 3.3), sest loodud alternatiivid on omavahel erinevad ja neid otseselt võrrelda ei saa. Lisaks esineb erinevusi heitmetegurites, sest kasutatud on erinevaid andmebaase.

Hoone karkassi ja välisseinte puhul saadi 2022. aasta arvutuses tulemuseks 376,96 tCO_{2e} ning selles töös tehtud arvutuse tulemusena 373,3 tCO_{2e}. Suurem erinevus on tekkinud vundamendi ja põranda tulemuste vahel. 2022. aasta arvutuses on saadud tulemuseks 159,76 tCO_{2e} ja selles töös on saadud tulemuseks 223,2 tCO_{2e}. Selles töös on antud kategooria sisse arvestatud ka soklipaneelid, kuid neid arvestamata jättes on vundamentide ja põranda tulemus endiselt suurem kui 2022 teostatud arvutuses. Ilma soklipaneelideta on tulemuseks 211 tCO_{2e}. Antud juhul võib tulemusi eristada armatuuri koguse määramine, sest armatuuri kogus betoonis annab väga suure osakaalu kogu betoonkonstruktsiooni süsinikuekvivalendist. 2022. aasta arvutuse aruandest ei ole tuvastatav, kuidas 2022. aasta arvutuses armatuuri hulka arvestati ning seetõttu on keeruline välja tuua täpne põhjus tulemuste erinevuses.

Katuse süsinikuheitmete tulemuste puhul paistab alguses samuti erinevusi, kui 2022. aasta arvutuses on katusematerjalide poolt tekkiv süsinikuekvivalent 68,66 tCO_{2e}. Selles töös saadi katuse süsinikuekvivalendiks 46,3 tCO_{2e}. Selles töös ei ole kajastatud kontoriploki katust katuse kategooria all vaid on koondatud eraldi õõnespaneelide kategooria alla. Kontoriplakil on nii vahelagi kui ka katus õõnespaneelidest ning kui lisada katuse väärtusele pool õõnespaneelide väärtusest, on kätte saadud kogu katuse süsinikuekvivalent, mis annab tulemuseks 62,1 tCO_{2e}. Kui seda teha siis on katuste poolt tekitatud süsinikuekvivalendid samuti sarnased.

Tabel 3.3. 2022 teostatud arvutuse tulemused [33]

A1-A3 mõjud (tCO₂e)	Baasmudel (tCO₂e)	I alternatiiv (tCO₂e)	II alternatiiv (tCO₂e)	III alternatiiv (tCO₂e)
Välisseinad ja karkass	376,96	376,96	504,19	488,79
Katus	68,66	136,68	68,66	136,68
Vundament ja põrand	159,76	159,76	159,76	159,76
Vahelagi	19,59	19,59	19,59	19,59
Avatäited	45,74	45,74	45,74	45,74
Siseseinad	58,51	58,51	58,51	58,51
Trepid ja redelid	11,22	11,22	11,22	11,22
Kokku	740,44	808,46	867,67	920,29

3.4 Üldised järeldused, piirangud ja tuleviku arendused

Kokkuvõtlikult õnnestus selles töös süsinikujalajälje arvutamise protsess ning võrreldes saadud tulemusi 2022. aasta arvutusega on saadud tulemused asjakohased. Süsinikujalajälje automatiseerimine, mis oli üks selle töö suurematest eesmärkidest õnnestus samuti, sest loodud Grasshopperi programm aitas teha süsinikujalajälje arvutust väga kiirelt ja efektiivselt.

Väärtuse loodud programmile annab asjaolu, et seda sama programmi on võimalik kasutada ka teiste sarnaste tootmishoonete puhul kohandades Tekla modelleerimistarkvaras elementide grupeerimise ja vajaduse korral lisada või eemaldada programmis loodud elemendigruppe. Grasshopperi programmi viia vastavusse eksisteeriva projektiga on tunduvalt kergem kui teostada hoonele nullist uut süsinikujalajälje arvutust kasutades selleks mõnda teist LCA arvutust teostavat programmi. Hoone kavandamise varajases staadiumis on võimalik loodud tööriista kasutada väga edukalt ning vajaduse korral saab programmi sarnaselt välja pakutud meetodile edasi arendada viies selle vastavusse hinnatava projekti detailsusastmega.

Loodud programmi piirab süsiniku heitmetegurite kättesaadavus andmemahu põhjalt ning lisaks puudub nende tegurite leidmise puhul läbipaistvus. Seda saab parandada,

kui luua üleriigiline süsinikuheitmete andmebaas, kus on olemas nii GWP tegurid kui ka tootjate EPD info, mis võimaldab läbipaistvust.

Antud programmi saab tulevikus edasi arendada selleks, et lisada süsinikujalajälje arvutusele ka ristlõigete dimensioneerimine, mis võimaldab võrrelda süsinikujalajälje arvu lähtudes ristlõigetest ning leida optimeerimis kohti lähtudes mõlemast parameetrist.

KOKKUVÕTE

Süsinikujalajälje arvutamine ei ole täna veel kohustuslik, kuid lähiaastatel rakenduvad sellel uued kohustuslikud nõuded. Euroopa Liidu poolt on heaks kiidetud hoonete energiatõhususe direktiivid, mille sekka kuuluvad samuti süsinikujalajälje arvutuste koostamise nõuded. 2027. aastast tuleb koostada süsinikujalajälge arvutust kõigile avalikele hoonetele, mille brutopindala on suurem kui 2000m² ning aastast 2030 tuleb süsinikujalajälje arvutust teostada ka erasektoris. See tähendab, et hoonete energiatõhususe süsteemi kõrvale tuleb hakata arvestama hoone ehituse, kasutuse ja lammutamise käigus tekkivat süsinikujalajälge. See uurimistöö on aktuaalne nende muutuste toimumise tõttu ning tutvustab süsinikujalajälje arvutamise meetodeid.

Antud uurimistöö eesmärgiks oli välja selgitada ja tutvustada hoonete süsinikujalajälje hindamise kontseptsioone, tavasid, protsesse ja meetodeid selle arvutamiseks. Tutvustada arvutusliku kavandamise kontseptsioone, protsesse ja hinnata arvutusliku kavandamise rakendamise võimalust süsinikujalajälje arvutamiseks. Luua arvutusliku kavandamise põhimõtted ja protsesse järgiv süsinikujalajälje automatiseeritud arvutamise protsess ja rakendada seda Tekla Structures mudelprojekteerimise tarkvara ja süsinikujalajälje arvutamise ühildamiseks.

Eesmärkide täitmiseks koostati põhjalik ülevaade süsinikujalajälje arvutamise tekkimisest, selle vajalikkusest ja tutvustati selle käigus süsinikujalajälje arvutamise metoodikat ja selle protsesse. Lisaks toodi välja Euroopa Liidu tehtud sammud keskkonnasäästlikuma ehitamise suunas liikumisel, mida rakendatakse reaalsesse ellu läbi Euroopa Parlamendis vastu võetud direktiivide. Töös põhjendati süsinikujalajälje arvutamise vajalikkust selgitades seda läbi süsinikuheitme statistika, mis näitab ehitussektori ja hoonete suurt mõju süsinikujalajäljele. Teiseks loodi arvutusliku kavandamise põhimõtteid jälgides visuaalset programmeerimiskeelt Grasshopper kasutades juhtumiuuring mallhoonele ning arvutati mallhoone algne süsinikujalajalg ja pakuti välja kolm alternatiivi alglahendusele katsetamaks loodud programmi töökindlust.

Käesoleva magistritöö raames keskenduti süsinikujalajälje arvutamisele hoone kavandamise varajastes etappides. Kirjanduse ülevaates kogutud info põhjal loodi välja valitud mallhoonele süsinikujalajälje arvutus ning üheks uurimistöö eesmärgiks oli süsinikujalajälje arvutust automatiseerida. Selleks loodud visuaalne programmikood täitis oma eesmärgi. Süsinikujalajälje arvutuse koostamine suudeti viia tasandile, kus programmile ette antud lähteinfo põhjal ja vastavaid heitmetegureid modifitseerides,

genereeris programm lähteinfole vastava süsinikuheitme arvulise väärtuse. Programmile lähteinfo ette andmiseks kasutati Tekla Structures mudelprojekteerimise tarkvara ning antud lõputöö keskendus Teklas loodud mudelite põhjal süsinikujalajälje arvutuse automatiseerimisele.

Lõputöö käigus selgus, et süsinikujalajälje arvutust tuleks hakata koostama juba hoone kavandamise varajastes staadiumites näiteks alates eskiisist, sest varajasem alustamine võimaldab projektiga edasi liikudes süsinikujalajäljega arvestada konstruktiivsete lahenduste välja töötamisel. Sellega tekib hoonete projekteerijatele juurde uus parameeter lisaks olemasolevatele, mida arvestada tuleb. Teiseks selgus uurimistöö käigus, et hetkel veel on hoonete süsinikujalajälje arvutuse koostamine väga aja- ja infomahukas tegevus ning nõuab projekteerijalt suurt pingutust. Selle murekoha tõttu tehti esimene samm automaatsema süsinikujalajälje arvutamise suunas ning hoone konstruktsioone on võimalik valida süsinikujalajälge arvesse võttes.

Tulevikus tuleks edasi arendada süsinikujalajälje arvutamise automatiseerimist, sest antud uurimistöös keskenduti vaid süsinikujalajälje tekkimisele tootmisetapis. Loodud lahenduse edasiarendus peaks olema hoone ehitamise, kasutamise ja lammutamise käigus tekkinud süsinikujalajälje liitmine hoones kasutatud materjalidest tekkinud jalajäljele ning seda edasiarendust automatiseerida. Läbi selle sammu on Eesti ehitussektor valmis süsinikujalajälje arvutamise nõuete kehtima hakkamiseks aidates täita seatud kliimaeesmäärke nii Eestis kui Euroopa Liidus.

SUMMARY

Carbon footprint calculation is not yet mandatory, but in the coming years it is expected to become so in the near future. The European Union has approved directives on the energy efficiency of buildings, which also includes requirements for carbon footprint calculations. Starting from 2027, carbon footprint calculations will be required for public buildings with a gross floor area exceeding 2000m² and from 2030, the calculation will extend to the private sector. This implies that alongside the energy efficiency system of buildings, consideration must be given to the carbon footprint generated during construction, use and demolition. This research is timely due to these impending changes and aims to introduce methods for carbon footprint calculation.

The objective of this research was to explore and introduce concepts, practices, processes and methods for assessing the carbon footprint of buildings. Additionally, it aimed to introduce computational design processes and evaluate the feasibility of implementing computational design for carbon footprint calculation. The research established principles and processes of computational design, followed by an automated process for calculating the carbon footprint, implemented through Tekla Structures model design software and carbon calculation integration.

To achieve these objectives a comprehensive overview of carbon footprint calculation emergence, necessity, methodology and processes was provided. The steps taken by the European Union towards environmentally friendly construction were highlighted implemented through directives adopted by the European Parliament. The necessity of calculating the carbon footprint was justified by explaining it through carbon emission statistics, indicating the significant impact of the construction sector and buildings on the carbon footprint. Secondly, using computational design principles, a visual programming language Grasshopper was employed to create a case study model building and the initial carbon footprint was calculated. Three alternatives to the initial solution were proposed to test the workflow of the program.

This master's thesis focused on calculating the carbon footprint in the early stages of building design. Based on the literature review, carbon footprint calculation for the selected model was developed and one of the research objectives was to automate this calculation. The visual program code fulfilled its purpose, automating the carbon footprint calculation to a level where initial material information needs to be provided to the program and emission factors corresponding to the materials adjusted. Initial information was provided to the program using Tekla Structures model design

software, focusing on automating the carbon footprint calculation based on models created in Tekla.

It became clear during the thesis that carbon footprint calculation should start early in the building design process, allowing consideration of the footprint as structural solutions are developed. This adds a new parameter that needs to be taken into consideration for building designers. Additionally, it was found that currently, calculating the carbon footprint of buildings is timely and resourcefully intensive, requiring significant effort from designers. The first step towards automated carbon footprint emission calculation was made and building structures should be selected while taking carbon footprint into consideration.

In the future further development of automated carbon footprint calculation is necessary. This research focused only on the carbon footprint generated during the production stage. Further development should integrate the footprint generated during building construction, use and demolition and adding it to the emissions created by the materials used by automating the whole carbon footprint calculation. With this step the Estonian construction sector will be ready for the introduction of carbon footprint calculation requirements and will be contributing towards the climate goals set in Estonia and the European Union.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „Rohetiigri ehituse teekaart 2040“. Vaadatud: 28. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://ehituseteekaart.rohetiiger.ee/>
- [2] *Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2010/31/EL*. 2021. Vaadatud: 23. aprill 2024. [Online]. Available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/2021-01-01/est>
- [3] C. C. Pertsova, *Ecological Economics Research Trends*. Nova Publishers, 2007.
- [4] „E2BA, 'Energy efficient buildings European initiative,'.“ Vaadatud: 22. märts 2024. [Online]. Available at: http://ectp.ectp.org/cws/params/ectp/download_files/36D928v2_E2BA_Brochure.pdf
- [5] T. Häkkinen, M. Kuittinen, M. Suomela, L. Lehtinen, ja M. Kuittinen, *Madalsüsinikehituse suunas: hindamise ja projekteerimisekäsiiraamat*. Tallinn : [Helsinki]: ET Infokeskus ; Rakennustieto, 2021.
- [6] „Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium“. Vaadatud: 28. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://mkm.ee/ehitus-ja-elamumajandus/elamud-ja-hooned/renoveerimislaine>
- [7] „KE024: ENERGIABILANSS, TERADŽAULI | Aasta, Näitaja ning Kütuse/energia liik. Statistika andmebaas“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: https://andmed.stat.ee/et/stat/Lepetatud_tabelid__Majandus.%20Arhiiv__Energeetika.%20Arhiiv/KE024/table/tableViewLayout2
- [8] Y. H. Labaran, V. S. Mathur, S. U. Muhammad, ja A. A. Musa, „Carbon footprint management: A review of construction industry“, *Clean. Eng. Technol.*, kd 9, lk 100531, aug 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100531.
- [9] „Kliimaministeerium“. Vaadatud: 22. märts 2024. [Online]. Available at: <https://kliimaministeerium.ee/rohereform-kliima/kasvuhoonegaasid>
- [10] „Revision of the Energy Performance of Buildings Directive“, European Commission - European Commission. Vaadatud: 26. märts 2024. [Online]. Available at: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_6686
- [11] J. K. Kurnitski TTÜ ehituse ja arhitektuuri, „Hoonete energiatõhususe direktiiv jõustub peagi“, EhitusEST. Vaadatud: 27. aprill 2024. [Online]. Available at:

<https://ehitusest.ee/uudis/2024/02/16/hoonete-energiatohususe-direktiiv-joustub-peagi/>

[12] „Pakett 'Eesmärk 55': ELi hoonete keskkonnahoidlikumaks muutmine". Vaadatud: 28. märts 2024. [Online]. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/et/infographics/fit-for-55-making-buildings-in-the-eu-greener/>

[13] *Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrus (EL) 2020/852*, kd 198. 2020. Vaadatud: 27. aprill 2024. [Online]. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj/est>

[14] Majandus- ja Kommunikatsiooniministerium, „Uuring ehituse süsinikujalajälje hindamisprintsipiide rakendamiseks Eestis", e-ehitus. Vaadatud: 29. märts 2024. [Online]. Available at: <https://eehitus.ee/timeline-post/uuring-ehituse-susini-ku-jalajalg/>

[15] „Resch et al. - 2022 - FutureBuilt Zero - A simplified dynamic LCA method.pdf".

[16] „OneClick LCA_Life-Cycle-Assessment-for-Buildings-2021.pdf". Vaadatud: 31. märts 2024. [Online]. Available at: <https://143253260.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/143253260/Life-Cycle-Assessment-for-Buildings-2021.pdf>

[17] H. Birgisdottir ja F. N. Rasmussen, „Introduction to LCA of Buildings", Trafik-og Byggestyrelsen, Kbh., Report, 2016.

[18] E. Meex, A. Hollberg, E. Knapen, L. Hildebrand, ja G. Verbeeck, „Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design", *Build. Environ.*, kd 133, lk 228–236, apr 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.02.016.

[19] „Level(s) - European Commission". Vaadatud: 26. aprill 2024. [Online]. Available at: https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels_en

[20] „EVS-EN 15804:2012+A2:2019", EVS. Vaadatud: 29. märts 2024. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/evs-en-15804-2012-a2-2019-consolidated>

[21] „OneClick LCA, How to make an EPD.pdf". Vaadatud: 30. märts 2024. [Online]. Available at: <https://143253260.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/143253260/How%20to%20make%20an%20EPD.pdf>

- [22] „EVS-EN 15978:2011“, EVS. Vaadatud: 24. märts 2024. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/evs-en-15978-2011>
- [23] „Constructionlca’s 2022 guide to EPD by jane anderson - Infogram“. Vaadatud: 5. märts 2024. [Online]. Available at: <https://infogram.com/constructionlcas-2022-guide-to-epd-1h8n6m3kwp8ej4x>
- [24] M. Röck, A. Hollberg, G. Habert, ja A. Passer, „LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages“, *Build. Environ.*, kd 140, lk 153–161, aug 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.05.006.
- [25] V. J. Shute, C. Sun, ja J. Asbell-Clarke, „Demystifying computational thinking“, *Educ. Res. Rev.*, kd 22, lk 142–158, nov 2017, doi: 10.1016/j.edurev.2017.09.003.
- [26] „Venn Diagram - an overview | ScienceDirect Topics“. Vaadatud: 4. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/venn-diagram>
- [27] P. Schumacher, „Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design“, *Archit. Des.*, kd 79, nr 4, lk 14–23, 2009, doi: 10.1002/ad.912.
- [28] R. Liu, C. Wang, S. Xue, ja Y. Zou, „Next generation parametrical design“, *J. Int. Assoc. Shell Spat. Struct.*, kd 63, nr 1, lk 5–15, märts 2022, doi: 10.20898/j.iass.2021.018.
- [29] J. Zaraza, B. McCabe, M. Duhamel, ja D. Posen, „Generative design to reduce embodied GHG emissions of high-rise buildings“, *Autom. Constr.*, kd 139, lk 104274, juuli 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104274.
- [30] I. Caetano, L. Santos, ja A. Leitão, „Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design“, *Front. Archit. Res.*, kd 9, nr 2, lk 287–300, juuni 2020, doi: 10.1016/j.foar.2019.12.008.
- [31] D. Apellániz, P. Pasanen, ja C. Gengnagel, „A Holistic and Parametric Approach for Life Cycle Assessment in the Early Design Stages“, apr 2024.
- [32] „Juhtumiuurimus – Sotsiaalse Analüüsi Meetodite ja Metodoloogia õpibaas“. Vaadatud: 4. mai 2024. [Online]. Available at: <https://samm.ut.ee/juhtumiuurimus/>
- [33] „LCA Report_Windak_KAKertsmik_AOviir_06062022.pdf“.

[34] „Average Quantities of Reinforcement in Concrete“, One Click LCA Help Centre. Vaadatud: 30. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360020943800-Average-Quantities-of-Reinforcement-in-Concrete>

[35] „Sandwichpaneel (kergpaneel) SPA F välis- ja siseseintele | Ruukki“, Eesti~Ruukki. Vaadatud: 5. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.ruukki.com/est/ehitustooted/tooted/seinakonstruksioonid/sandwich-paneelid-valisseintele/sandwich-panel-detail/sandwich-panel-spa-f-for-external-and-internal-wall>

[36] „Learn Grasshopper“, Learn Grasshopper. Vaadatud: 4. mai 2024. [Online]. Available at: <https://learngrasshopper.com/>

[37] „Grasshopper-Tekla Live Link | Tekla User Assistance“. Vaadatud: 4. mai 2024. [Online]. Available at: <https://support.tekla.com/help/tekla-structures/not-version-specific/grasshopperteklalink>

[38] A. Alvela, „Süsinikujalajalg hoonetes vajab õige pea hindamist“, EhitusEST. Vaadatud: 4. mai 2024. [Online]. Available at: <https://ehitusest.ee/uudis/2024/04/01/susinikujalajalg-hoonetes-vajab-oige-pea-hindamist/>

[39] „Kliimaministeerium. Heitetegurite andmebaas.“

[40] V. J. L. Gan, C. M. Chan, K. T. Tse, I. M. C. Lo, ja J. C. P. Cheng, „A comparative analysis of embodied carbon in high-rise buildings regarding different design parameters“, *J. Clean. Prod.*, kd 161, lk 663–675, sept 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.156.