

TARTU ÜLIKOOL

LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND

ÖKOLOOGIA JA MAATEADUSTE INSTITUUT

Hanna Soe

**PASSIIVMAJA OLELUSRINGI HINDAMINE
EESTIS ASUVA ERAMU NÄITEL**

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal (30 EAP)

Juhendaja: MSc Janika Laht

Tartu 2016

PASSIIVMAJA OLELUSRINGI HINDAMINE EESTIS ASUVA ERAMU NÄITEL

Lühikokkuvõte

Hoonete energiatarbimine Eestis moodustab rohkem kui 45% lõpptarbest. Energiatõhusate hoonete energiasääst on saavutatud peamiselt tänu hoonekarbi õhutiheduse parandamisele ning isolatsioonikihi suurendamisele välispiiretel. Selliste ehitusmaterjalide tootmine võib olla aga väga energiamahukas, kuigi passiivmajade uuringutes on seda harva käsitletud. Uurimustöö eesmärk oli teha Eestis asuva passiivmaja olelusringi hindamine (LCA). LCA läbiviimiseks kasutati olelusringi hindamise programmi SimaPro ning meetodit Impact 2002+. Analüüsi käigus selgus, et uuritud passiivmaja ehitus ning selle töökäik avaldab suurimat mõju maavaradele (39% hoone eluea kogumõjudest) ning selle peamiseks põhjuseks on hoone tehnosüsteemid, mida omakorda saab põhjendada igapäevase elektritarbimisega hoone operatiivses faasis. Töös on toodud ka lahendused hoone energiatarbe vähendamiseks.

Märksõnad: *passiivmaja, hoonete energiatarve, olelusringi hindamine, LCA, Impact 2002+*
CERCS: T270 Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A PASSIVE HOUSE LOCATED IN ESTONIA

Abstract

Energy consumption of buildings accounts for more than 45% of the final energy demand in Estonia. The energy savings of energy efficient houses have been achieved mainly due to the improved airtightness and increased insulating of the building envelope. However, production of these materials could be very energy-intensive, although it is rarely addressed in previous studies about passive houses. The aim of this research is to do a life cycle assessment (LCA) of a passive house located in Estonia. The LCA was carried out using the SimaPro programme and Impact 2002+ method. The analysis revealed that the studied passive house affects natural resources the most (39% of total impacts of the entire life cycle). The main reason for that is the technological systems of the house which in turn can be explained by the daily electricity consumption during the building's use phase. A number of solutions have been presented to reduce the energy consumption of a passive house.

Keywords: *passive house, energy consumption of buildings, life cycle assessment, LCA, Impact 2002+*

CERCS: T270 Environmental technology, pollution control

Sisukord

| | |
|----------------------------------|----|
| Mõisted..... | 5 |
| Sissejuhatus | 7 |
| 1 Valdkonna ülevaade..... | 9 |
| 1.1 Passiivmaja | 9 |
| 1.2 Olelusringi hindamine | 10 |
| 1.2.1 Tutvustus ja ajalugu | 10 |
| 1.2.2 LCA ülesehitus..... | 11 |
| 1.3 Ülevaade kirjandusest..... | 13 |
| 2 Andmed ja meetodika | 15 |
| 2.1 Uuritav passiivmaja | 15 |
| 2.2 Kasutatavad tööriistad | 16 |
| 2.2.1 PHPP | 16 |
| 2.2.2 SimaPro | 16 |
| 2.2.3 Impact 2002+..... | 17 |
| 2.2.4 Ecoinvent..... | 20 |
| 2.3 Hoone andmed..... | 20 |
| 2.4 Olelusringi hindamine | 22 |
| 2.4.1 Uurimuse eesmärk..... | 22 |
| 2.4.2 Uurimuse käsitusala | 22 |
| 3 Tulemused ja analüüs..... | 23 |
| 4 Arutelu | 32 |
| Kokkuvõte | 35 |
| Summary | 37 |
| Tänuavaldused..... | 39 |
| Kasutatud kirjandus..... | 40 |
| Lisad | 44 |

Mõisted

Energia lõpptarve – kogu energia, mis tarnitakse tööstus-, transpordi-, teenuste ja põllumajandussektorile ning kodumajapidamistele. Tarned energia muundamise sektorile ja energiatööstusele endale on välja arvatud. (Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2012/27/EL, 2012)

Energiatõhususarv [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] – arvutuslik summaarne tarnitud energiatega kaalutud erikasutus hoone tüüpilisel kasutusel, millest arvatakse maha summaarne eksporditud energiatega kaalutud erikasutus. Energiatõhususarv kajastab hoone kompleksset energiakasutust nii sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks kui ka olme- ja muude elektriseadmete kasutamiseks ning see arvutatakse hoone köetava pinna ruutmeetri kohta hoone tüüpilisel kasutamisel.

Kasutusfaas – hoone või toote otstarbeline kasutamise aeg.

Netoenergiavajadus – sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks ning valgustuse ja seadmete kasutamiseks vajalik soojus- ja elektrienergia ilma süsteemikadudeta ning energia muundamiseta.

Olelusring – (ka eluring, elutsükkel) on toote või teenuse eluiga n-ö hällist huanani, mis koosneb tootesüsteemi järjestikustest ja omavahel seotud etappidest.

Operatiivne energia – kasutusfaasis tarbitav lõppenergia (sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks kui ka olme- ja muude elektriseadmete kasutamiseks)

Primaarenergia – ühe kilovatt-tunni tarnitud energia tootmiseks vajalik esmane energiahulk taastuvatest ja mittetaastuvatest energiaallikatest, mis sisaldab kõiki energiaallika ammutamise, energia tootmise, ülekande ja jaotamise kadusid.

Referentsühik – (ka talitusühik) funktsiooni mõõtariiv, mida kasutatakse võrdlusühikuna.

Seotud energia – (ingl *embodied energy*) ehitusmaterjalide tootmiseks, transpordiks ja hoone ehitamiseks kulunud primaarenergia hulk. Termin tuleneb sellest, et protsessideks kulutatud energia n-ö seotakse hoone ehitusmaterjalide sisse.

Soojusjuhtivus ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) – soojustakistuse pöördväärtus, mis näitab soojuskadu vattides läbi ühe ruutmeetriselise piirde, kui temperatuuride erinevus kahel pool piiret on üks.

Summaarne energiakasutus (kWh/a) – hoone sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks ja elektriseadmete kasutamiseks vajalik tehnosüsteemide aastane elektri- ja soojusenergia kasutus, millest on maha arvatud lokaalselt toodetud taastuenergia (välja arvatud soojuspumba poolt toodetud energia).

Tehnosüsteem – küttesüsteem ja tarbevee soojendamise süsteem koos soojusallikaga, ventilatsioonisüsteem, jahutussüsteem, valgustus ning lokaalselt soojusenergiat või elektrit tootvad majandus- ja taristuministri 03.06.2015 määruse nr 55 järgi energiaarvutuses arvestatavad süsteemid.

Välditud energia – maagaasist kondensaatkatlaga toodetud soojusenergia sellises koguses nagu toodeti hoone eluea jooksul päikesepaneelidega.

Õhulekkearv – hoone välispiirde õhupidavust iseloomustav näitaja, mis on määratud õhulekkestiga 50 paskali (Pa) rõhkude erinevusel. Hoone keskmine õhulekkearv [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] antakse välispiirde ruutmeetri kohta. Välispiirde pindala arvutatakse piirde sisemõõtude põhjal.

Sissejuhatus

Aastal 2012 moodustas Euroopas hoonete energiatarbimine umbes 40% energia lõpptarbest. Sellest tulenevalt on ehitised suurimad energia lõpptarbijad, sellele järgnevad energiakulud transpordile (32%), tööstusele (26%) ja põllumajandusele (2%). Hoonete energiatarbimine moodustab isegi rohkem kui 45% lõpptarbest sellistes riikides nagu Eesti, Läti ja Ungari ning eramajad moodustavad sellest lausa kaks kolmandikku. (Intelligent Energy ... , 2015) Seetõttu on majade energiatarbimise suurendamisel suur mõju energia tarbimise ja kasvuhoonegaaside emissioonide vähendamisele (Directive ... , 2002).

Viimaste aastakümnete jooksul on hakatud välja töötama energiatarbimise majade ideid ning liigutud nende arendamise suunas. Üks tulemitest on passiivmaja, mis vajab toimimiseks kuni 120 kWh/m² aastas (Passive House Institute: About ... , 2015). Hetkel Eesti kehtivate hoone energiatarbimise nõuete järgi ei tohi ehitatava hoone energiatarbimisarv ületada piirväärtust 160 kWh/m²·a väikeelamu (kõetava pinnaga üle 100 m²), 120 kWh/m²·a madalenergia väikeelamu korral ning 50 kWh/m²·a liginullenergia väikeelamu korral (Hoone energiatarbimise miinimumnõuded, 2015). Madal- ja liginullenergiahoonete energiasääst on saavutatud peamiselt tänu hoonekarbi õhutiheduse parandamisele ning isolatsioonikihi suurendamisele välispiiretel. Nii säästetakse energiatarbimist majas elades märkimisväärselt igapäevast küttekulu ning läbi selle väheneb ka õhku paisatavate heitgaaside emissioon. Et seda saavutada, vajavad energiatarbimise hooned paremaid ja innovaatilisi ehitusmaterjale, et minimeerida välisseinte ja akende soojusjuhtivust (Stephan, Crawford ja de Myttenaere, 2013). Selliste materjalide tootmine võib olla aga väga energiamahukas, kuigi passiivmajade uuringutes on seda harva käsitletud. Näiteks kergkruusa peetakse üheks parimaks soojusmaterjaliks tänu oma madalale soojusjuhtivusele, kuid selle tootmine on suure keskkonnamõjuga, kuna tootmisprotsessis on vaja suurtes kogustes fossiilseid kütuseid (Pargana jt, 2014).

Kui varasemate hoonete olulusringi hindamise käigus on leitud, et hoone kasutamiseks ja kütmiseks kulunud energia (operatiivne energia) moodustab suurima osa terve hoone elutsükli primaarenergiast ning kasvuhoonegaaside emissioonidest (Sartori ja Hestnes, 2007), siis uute ja madalenergiatarbega elamute korral omab üha suuremat tähtsust hoone ehitusmaterjalide tootmiseks kasutatud energia (seotud energia) (Stephan jt, 2013).

Uurimustöö eesmärk on viia läbi Eestis asuva passiivmaja olelusringi hindamine. Selle jaoks uuritakse kogu hoone ressursikasutust (materjalid, energia) peamiste eluetappide kaudu: hoone ehitusfaas, kasutusfaas ning lammutusfaas. Uurimustöö eesmärgi täitmiseks leitakse antud etappide sisend- ja väljundvood, sh andmed hoone ehitamiseks kasutatud materjalide, masinate, seadmete ja tarbitud energia- ja kütusekoguste kohta. Magistritöö käigus:

- selgitatakse välja hoone operatiivse ja seotud energia osakaalud;
- tehakse kindlaks hoone peamised keskkonnamõjud ja nende osakaalud erinevate hoone komponentide (konstruktsioon, siseviimistlus, tehnosüsteemid ja energia tarbimine) kohta;
- esitatakse ettepanekud hoone keskkonnamõjude vähendamiseks.

Tulemused võimaldavad madal- ja liginullenergiahoonete ehitust, materjalikasutust ja keskkonnamõjusid paremini hinnata ning vastavalt ka planeerida hoone ehitamise- ja kasutamisega seotud tegevusi.

1 Valdonna ülevaade

1.1 Passiivmaja

Passiivmaja mõiste ilmnis esmalt Saksamaal 1990. aastate alguses (Passivhaus ... , 2016). Passiivmajad on hooned, kus on kasutatud väga energiasäästlikke komponente. Nendeks on väga hästi isoleeritud hoone tarindid, väljamineva soojuse taaskasutamine ning talvisel perioodil päikesekiirguse kasutamine (Passiivmaja infokeskus, 2016). Passiivmaja on hästi soojustatud ning selle õhupidavus on niivõrd suur, et hoone küttevajaduse saab rahuldada kasutades vaid ventilatsioonisüsteemi (Feist, 2006). See tähendab, et soojakadu on sedavõrd väike, et tavaline küttesüsteem pole vajalik.

Passiivmaja vajab kütmiseks ja jahutamiseks 75% vähem netoenergiat kui teised tavapärasele standarditele vastavad uued hooned ja 90% vähem energiat kui ülejäänud hooned (Passipedia: What ... , 2005). Tänu sellele on madala energiatarbega hooned populaarsust kogunud, seda eriti Skandinaavias ja Põhja-Euroopas. Kuigi sertifitseeritud passiivmaju on Eestis hetkel 4 (Passive House Database, 2015), siis võib eeldada, et energiatarbivate majade osakaal kasvab veelgi, sest aastaks 2020 peavad kõik uued hooned vastama liginullenergia majade kriteeriumitele (avalike hoonete puhul aastaks 2018) (Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2010/31/EL, 2010).

Passiivmajade eesmärgiks on vähendada hoone kasutusfaasis tarbitavat operatiivset energiahulka (Sartori ja Hestnes, 2007). Operatiivset energiat saab vähendada isolatsioonimaterjalide suurema kuluga, kuid need on tihtipeale väga energiamahukad materjalid – nii hoonekarbi ehitismaterjalid kui ka tehnoloogilised installatsioonid (nt päiksepaneelid) (Sartori ja Hestnes, 2007). Energiatarbivate ehitiste uurimise käigus on leitud, et kui operatiivne energiatarve on suurel määral langenud, siis ehitismaterjalide tootmiseks kulunud energiahulk on suurenenud (Blengini ja Di Carlo, 2010).

Passiivmaja kriteeriumid (Passiivmaja Infokeskus: ... , 2016):

- aastane kütteenergia tarve on <15 kWh ruutmeetri kohta;
- primaarenergia vajadus hoone kasutuse ajal ei tohi ületada 120 kWh/m²a;
- hoonekarbi õhupidavus n50 juures < 0,6 maja mahtu ühes tunnis (n50 – rõhk 50 Pa);
- akende soojusjuhtivustegur on < 0,8 W/(m²K).

Täiendavalt kuulub passiivmaja omaduste hulka ka taastuenergiaallikate kasutamine (nt päikesepaneelid, soojuspumbad), energiasäästlikud kodumasinad, vähemalt 80%-se soojus-tagastuse määraga õhksoojusvaheti, 50%-se päikseenergia kasutuse koefitsiendiga aknad, külmasildade vältimine hoonekonstruktsioonis. (Passiivmaja Infokeskus: ... , 2016; Passipedia: What ... , 2005; Passive House Institute: About ... , 2015).

1.2 Olelusringi hindamine

1.2.1 Tutvustus ja ajalugu

Olelusringi hindamine (ingl *life cycle assessment*, edaspidi lühendatult LCA) on tegevusraamistik, mis analüüsib ja hindab toote või teenuse keskkonnamõju kogu olelusringi kestel. LCA toetub ISO 14000 raamistikule, täpsemalt ISO 14040:2006 ja ISO 14044:2006 standarditele. LCA eesmärk on uurida toote keskkonnaaspekte ja potentsiaalseid keskkonnamõjusid selle olelusringi vältel n-ö hällist hauani – toormaterjalide tootmisest kuni lõpliku kõrvaldamiseni (ISO 14040, 2006). Nii tehakse kindlaks tootesüsteemi ja keskkonna vastastikune mõju. Tootesüsteemi all saab käsitleda nii kaupa kui ka teenust.

Võrreldes teiste keskkonnajuhtimissüsteemidega, mis keskenduvad üldiselt ainult ühele aspektile (nt toomisele või jäätmete kõrvaldamisele), võtab olelusringi hindamine vaatluse alla toote terve olelusringi, s.o kõik toote valmistamise, kasutamise ja kõrvaldamisega kaasnevad tegevused. Sellisel lähenemisel on võimalik esile tuua ka nõ „varjatud” keskkonnamõju. (Talve ja Põld, 2005) Terviklik lähenemine välistab võimaluse, et probleeme viiakse olelusringi ühest faasist teise (Finnveden jt, 2009).

Esimest korda analüüsiti ja hinnati toodete ja materjalide olelusringi 1960. aastate lõpus USAs. 1993. aastal alustati Rahvusvahelise Standardimisorganisatsioon ehk ISO initsiatiivil olelusringi hindamise rahvusvaheliste standardite väljatöötamist. (Talve ja Põld, 2005) Olelusringi hindamist on tootearendusprotsesside keskkonnamõjude hindamiseks kasutatud juba pikka aega, kuid alles viimase 10 aasta jooksul on hakatud LCA metoodikat rakendama ka ehitussektoris (Buyle, Braet ja Audenaert, 2013).

1.2.2 LCA ülesehitus

LCA etapid (ISO 14040, 2006) on:

- 1) eesmärgi ja käsitusala määratlemine;
- 2) inventuuranalüüs;
- 3) mõjude hindamine;
- 4) tulemuste tõlgendamine.

Olelusringi hindamine koosneb neljast etapist, kuid lahenduse otsimisel liigutakse nende faaside vahel edasi ja tagasi, et pidevalt olemasolevat informatsiooni täiendada (Talve ja Põld, 2005).

Eesmärgi ja käsitusala määratlemine

Olelusringi esimeses etapis koostatakse hindamiskava, mis peab sisaldama teavet uurimisobjekti ja hindamiskorralduse kohta ning milles määratakse kindlaks konkreetse töö detailsus, sügavus ja ulatus (Talve ja Põld, 2005). LCA ulatus ja detailirohkus oleneb uuritavast objektist ja uuringu sihtotstarbest (ISO 14040, 2006).

Olelusringi hindamise aluseks on talitusühik, s.t toote funktsiooni mõõtarv, mis on selgelt määratletud ja mõõdetav ning millega seostatakse kõik inventuuranalüüsil kogutud andmed (Talve ja Põld, 2005). Talitusühik sõltub mõjukategooriast ja uuringu eesmärgist ning põhineb tihtipeale uuritava toote massil (Roy jt, 2009).

Esimeses etapis määratakse ka süsteemi piirid ehk ühikprotsessid ja vood, mida peab uuritava tootesüsteemi hindamisel arvesse võtma (Finnveden jt, 2009). See on sageli kujutatud sisend- ja väljundvoogude diagrammina (Roy jt, 2009). Lisaks toote olelusringi piirile peab määratlema ka geograafilise piiri ning kokkupuutepiiri loodusega (Talve ja Põld, 2005). Antud informatsiooni põhjal tuleb edaspidistes etappides valida ka sobivaim meetod olelusringi hindamiseks.

Inventuuranalüüs

Inventuuranalüüs (ingl *life cycle inventory analysis*, lühendatult LCI) on LCA teine faas, mis koosneb sisendite ja väljundite inventuurist (ISO 14040, 2006). Inventuuranalüüs on enamasti kõige aega- ja vaevanõudvam etapp (Finnveden jt, 2009). Selle käigus kogutakse andmeid olelusringi kestel kasutatava energia ja ressursside ning tekkivate heitmete kohta. Spetsiifilisi andmeid peab koguma nende ühikprotsesside kohta, mille sisendid ja väljundid moodustavad enamiku hinnatava süsteemi massi- ja energiavoogudest ning millega kaasneb olulisim arvata keskkonnamõju. (Talve ja Pöld, 2005)

Andmete kogumine on vähem ajamahukas, kui saab baseeruda juba olemasolevale andmebaasile. Mitmed olelusringi hindamise andmebaasid on juba olemas ning neid on võimalik LCA programmidega ühildada. Enamasti sisaldavad andmebaasid üldinformatsiooni transpordi, toormete kaevandamise, materjalitöötuse, kõrvaldamise ning ka mõningate tooteprotsesside kohta. (Roy jt, 2009).

Mõjude hindamine

Mõjude hindamise etapis (ingl *life cycle impact assessment*, lühendatult LCIA) tõlgendatakse ja hinnatakse inventuuranalüüsi tulemustest saadud ressursikasutuse ja heitmete võimalikku keskkonnamõju (Finnveden jt, 2009; Talve ja Pöld, 2005). Olelusringi mõju hindamise detailsus, mõjukatgoriate valik (nt inimese tervis, maavarade kaevandamine) ja kasutatav meetodika sõltuvad hindamise eesmärgist ja käsitluselast (Talve ja Pöld, 2005).

Mõjude hindamine koosneb liigitamisest, iseloomustamisest, normaliseerimisest ning kaalumistest. Liigitamist määratakse inventuuranalüüsi tulemused ühise mõjuga kategooriatesse. Järgmisena iseloomustatakse inventuuranalüüsi iga voo potentsiaalset mõju kindlale mõjukatgoriale. (Roy jt, 2009) Iga mõjukatgoria inventuuranalüüsi tulemused teisendatakse tunnustegurite abil referentsühikusse ning nende liitmisel leitakse iga mõjukatgoria indikaatortulemus. Normaliseerimine on arvutustoiming, mis taandab mõjud taustaga ühilduvaks, et uurida indikaatortulemuselt suhtelist tähtsust. Taustaväärtuseks võib valida näiteks piirkonna koguheitte või ressursikasutuse. Kaalumist käigus korrutatakse tulemused väärtusvalikute põhjal leitud kaaluteguritega. (Talve ja Pöld, 2005)

Tulemuste tõlgendamine

Tulemuste tõlgendamine on LCA viimane faas, kus LCI ja LCIA tulemused võetakse vaatluse alla ning tehakse vastavad järeldused (ISO 14040, 2006). Tõlgendamisel analüüsitakse ja hinnatakse süstemaatiliselt tootesüsteemi inventuuranalüüsi ja/või olelusringi mõju hindamise tulemuste vastavust eesmärgile ja käsitlusalale (Finnveden jt, 2009), kirjeldatakse ka kitsas-kohti, tehakse järeldusi ning antakse soovitusi (Talve ja Põld, 2005). Kui inventuuranalüüsi või olelusringi mõju hindamise tulemused ei vasta püstitatud eesmärgile ega käsitlusalale, peab neid täiendama – korrigeeritakse süsteemi piiri, kogutakse lisaandmeid või tehakse muid toiminguid. Kui vaja, järgneb olelusringi mõju täiendav hindamine. Seda tuleb teha seni, kuni tulemused vastavad eesmärgis püstitatud nõuetele ja küsimustele. (Talve ja Põld, 2005)

1.3 Ülevaade kirjandusest

Kirjanduses on olemas hea ülevaade erinevate ehitusmaterjalide olelusringi kohta, samuti leidub ka eramu ja muu elamutüübi (korter, ridaelamu) olelusringi hindamist ning võrdlust. Energiatõhusate majade olelusringi hindamist kõikides selle eluetappides on aga üpris vähe teostatud ning seotud ja operatiivse ehk hoone kasutusajal tarbitava energia omavahelist võrdlust on uurinud vähesed. Kõige sarnasem uurimustöö on tehtud Stephan jt (2013) poolt, kus uuritakse Belgias asuva passiivmaja olelusringi. Uuritav hoone on 330 ruutmeetrine üheperekelamu. Uuringus leiti, et passiivmaja seotud ja operatiivne energia moodustasid vastavalt 55% ja 45% kogu hoone elutsükli energiavajadusest. Kui võrrelda seotud energiat hoone kütmiseks ja sooja vee tootmiseks kulunud energiaga (jättes välja nt kodumasinate energiatarve), moodustas hoone seotud energia 67%. (Stephan jt, 2013)

Käesoleva uurimustöö jaoks loetud artiklid jaotusid tulemuste poolest peamiselt kahte leeri. Mitmed autorid on leidnud, et operatiivne energia on jätkuvalt suurim hoone olelusringi jooksul tarbitavast energiast. Näiteks Blengini (2009) leidis, et see moodustab 90–95% hoone kogu energiatarbest, Oritz jt (2009) andmete põhjal jääb see vahemikku 80–92%. Teised autorid on järeldanud, et uute ja madalamate energiatarbega elamute seotud energia omab üha suuremat tähtsust – lausa 60% ulatuses (Huberman ja Pearlmutter, 2008; Stephan jt, 2013). Huberman ja Pearlmutter (2008) väitsid, et hoone tootmiseks vajalik energia võib olla

samaväärne energiaga, mis on tarvis hoone soojusliku mugavuse tagamiseks terve eluea vältel. Erinevad seotud energia kogused tulenevad erinevustest hoone asukohas, kliimatilistes tingimustes ning kohalike energialiikide kasutamisel (Ramesh, Prakash ja Shukla, 2010).

Wallhagen jt (2011) viisid läbi hoone olelusringi võrdluse enne ja pärast hoones läbiviidud muudatusi. Nad leidsid, et kui algselt panustas hoone kliimamuutustesse 20 975 kg·CO₂·ekv aastas ning kasutusfaas moodustas sellest 46%, siis pärast hoone energiatarbe tõhustamist oli hoone süsihappegaasi emissioon 11 008 kg·CO₂·ekv aastas, s.h kasutusfaas moodustas sellest vaid 26% (Wallhagen, Glaumann ja Malmqvist, 2011). Seega isegi kui hoone seotud energia protsentuaalne osakaal suurenes, oli kogu hoone süsihappegaasi emissioon siiski $\frac{1}{3}$ väiksem kui enne muudatuste läbiviimist.

Sartori ja Hestnes (2007) ning Wallhagen jt (2011) järeldasid, et hoone eluea valik on olelusringi hindamisel määrava tähtsusega saadud tulemustele ja seega ka edasistele järeldestele. Mida pikem hoone eluiga on määratud, seda väiksem on materjali keskkonnamõju, sest ehitamiseks kulunud materjalide primaarenergia jaotatakse võrdselt hoone eluea aastate vahel ning iga-aastased arvatud keskkonnamõjud on väiksemad. Seetõttu on oluline, et hoone LCA korral arvestataks nii esialgse hoone ehitamiseks kulunud materjalidega kui ka eluea jooksul läbi viidavate renoveerimiste materjalikuluga.

2 Andmed ja metoodika

2.1 Uuritav passiivmaja

Uurimuse objektiks on valitud 2013. aastal ehitatud passiivmaja Tartu lähistel (Ülenurme vald, Õssu küla). Hoone on kahekorruseline ühepereelamu, mille eluruumide pind on 159,6 m². Olelusringi hindamisel on täiendavalt arvesse võetud ka panipaik (20 m²), mis asub krundil eraldi hoonena, kuid on ühendatud elumaja eesukse kohal oleva varjualusega (44,4 m²). Hoone arhitektuursed mahud on kavandatud lihtsa ristkülikukujulise vormina, lääne- ja lõunaküljel on dekoratiivne avar terrass (joonis 1). Terrassi ehitusmaterjali ei ole olelusringi hindamisel arvesse võetud.

Hoone välisviimistluses on kasutatud puitu ja krohvi – hoone esimene korrus on kaetud krohviga, teine korrus puitlaudisega ning panipaik kaetud puitvõrega. Elumaja katus ja varjualune on kaetud kahekordse rullmaterjaliga, samuti on katusele paigaldatud päiksepaneelid sooja vee tootmiseks ja hoone kütmiseks. Hoone kandekonstruktsioonid on puitkarkass, kütteks päikesekütesüsteem, mis on integreeritud maagaasi kütusena kasutatava kondensaatkatlaga, ning soojuskandjaks radiaatorid.



Joonis 1. Uuritav passiivmaja lõunaküljest vaadatuna. Majast vasakul asub panipaik ning hoone taga varjualune, mida pole antud pildilt näha.

Uuritava hoone kohta on olemas PHPP (*Passive House Planning Package*), mis sisaldab täielikku ülevaadet ehitusandmete kohta: ehitusmaterjalide spetsifikatsioon ja kogused, akende ja nende raamide informatsioon, kasutatavad alternatiivenergiaallikad ja nende

võimsus, ventilatsioonisüsteem jpm. Lisaks on olemas ehitusplaanid ja -joonised ning täiendavad andmed majaomanikult siseviimistluse kohta. Ülevaatlikud joonised on välja toodud lisa 1. Vastavalt hoone kohta tehtud energiamärgise arvutustele, on uuritava passiivmaja iga-aastane energiatarve 101 kWh/m² (lisa 2).

2.2 Kasutatavad tööriistad

2.2.1 PHPP

PHPP (*Passive House Planning Package*) on 1998. aastal välja töötatud tarkvarapakett, mida on pidevalt uute teadmiste põhjal edasi arendatud. PHPP sisaldab kõike, mis on tarvilik hästi funktsioneeriva passiivmaja planeerimiseks. Antud simulatsiooniprogramm arvutab kasutaja poolt sisestatud andmete põhjal hoone energiabilansi ja aastase energiavajaduse. PHPP programm baseerub Exceli arvutustabelitel, mille abil on arhitektidel ja inseneridel võimalik planeerida ja optimeerida hoone energiatarvet. Kasutaja saab valida sobiva kliimaregiooni, mille põhjal arvutab programm hoone igakuise kütte- ja/või jahutusvajaduse. Saadud sobivate PHPP tulemuste põhjal võib hoonele väljastada passiivmaja sertifikaadi. (Passipedia: PHPP ... , 2015; Passive House Institute: About ... , 2015) Antud töös on kasutatud programmi PHPP v7.2.

2.2.2 SimaPro

Andmete töötlemiseks, olulusringi modelleerimiseks ja LCA läbiviimiseks kasutatakse olulusringi hindamise programmi SimaPro 8.1.1 PhD versiooni. SimaPro on maailmas üks levinumaid ja kasutatavamaid olulusringi modelleerimise ja hindamise tarkvarasid, mis sai avalikkusele kättesaadavaks 1990. aastal Taani ettevõtte poolt (Pré-Sustainability, 2016). Programmiga on võimalik modelleerida ja analüüsida erinevate toodete ja teenuste olulusringe kaasates kõiki toote/teenuse olulusringi etappe, mõõta kogu olulusringi või etappide keskkonnamõjusid ning ühtlasi identifitseerida kõige problemaatilisemad kohad. Programmi on integreeritud mitmeid andmebaase ja hindamismeetodeid, mida on võimalik kasutada toote või teenuse kogu olulusringi, süsiniku ja/või vee jalajälje arvutamiseks, toodete ökodisainis,

keskkonnadeklaratsiooni koostamisel, keskkonnaaruandluses ja ka keskkonnategevuse tulemuslikkuse seires jms. Selleks tuleb kõik vajalikud andmed võimalikult suure täpsusega sisestada antud simulatsiooniprogrammi, mis arvutab hoone iga olelusringi etapi kohta primaarenergia vajaduse ja keskkonnamõjud erinevate mõju- ja kahjukategooriate kohta lähtuvalt valitud mõjuhindamise meetodist.

Olelusringi hindamise programmi tuleb leida ka sobiv mõjuhindamise meetod ning andmebaas. Olelusringi hindamisel on palju erinevaid suundi ning rakendusalasid, sellest tulenevalt on olemas ka mitmeid erinevaid meetodikaid. Ühegi kategooria käsitlemiseks ei ole üht ja ainust heakskiidetud meetodit (Talve ja Põld, 2005), seega on selle valik subjektiivne ning uurimustöö autori otsustada olenevalt hindamise eesmärgist. Stavropoulos jt (2016) viisid läbi olelusringi hindamise kolme erineva meetodiga ning leidsid, et kuigi iga meetod andis erineva lõppväärtuse, olid saadud tulemused ühesuguse efektiga, st kõige suurema ja kõige väiksema keskkonnakahjuga elemendid olid samad. Antud uurimustöö jaoks valitud meetodit on käsitletud järgmises peatükis (p 2.2.3).

Sisend- ja väljundvoogude hindamiseks on tarvis taustaandmeid, mida saadakse valitud andmebaasist. Andmete kogumise ning inventuuri hõlbustamiseks on välja töötatud rahvusvahelised andmebaasid. Andmebaasid sisaldavad endas antud toote valmistamiseks vajalikke primaarenergia kulusid, mis tulenevad nii tooraine kaevandamisest, transpordist ja töötlustest kui ka selle taaskasutamise potentsiaalset pärast uuritava toote lõppfaasi. Tänu taustaandmetele saab kindlaks teha heitgaaside kogused, mida on emiteeritud mitmeid aastaid tagasi, mida vabastatakse antud hetkel ning mida emiteeritakse ka tulevikus (Finnveden jt, 2009). Olelusringi modelleerimiseks ja keskkonnamõjude hindamiseks on SimaPro-s olemas ligipääs mitmete ülemaailmsetele andmebaasidele. Käesolevas uurimustöös kasutatud andmebaasi on kirjeldatud peatükis 2.2.4.

2.2.3 Impact 2002+

Olelusringi mõju hindamiseks on mitu rahvusvaheliselt tunnustatud ja kasutatavat meetodit. Antud uurimustöö raames valiti Impact 2002+ v2.10, mis hindab mõju viieteistkümne mõju- kategooria ja nelja kahjukategooria alusel. Mõjukategooria on keskkonnamõju liik, millega on võimalik seostada uuritava süsteemi olelusringi inventuuranalüüsi tulemusi. Olelusringi hindamise inventuuranalüüsi tulemused klassifitseeritakse mõjukategooriatesse nende mõju-

indikaatorite põhjal (ILCD Handbook, 2010). Kõik mõjukategooriate tulemused on väljendatud ühikutena, mis on omavahel võrreldavad (referentsühikutes) ning mis on seotud nelja kahjukategooriaga: 1) inimtervis, 2) ökosüsteemide kvaliteet, 3) kliimamuutused ja 4) maavarad.

Käesolevas töös olulusringi hindamiseks kasutatud mõjukategooriad ja vastavad ühikud on nähtavad tabelis 1 (ILCD Handbook, 2010; Impact 2002+, 2012).

Tabel 1. Impact 2002+ mõjukategooriad, nende ühikud ja seotud kahjukategooriad

| Mõjukategooria | Inglise keeles | Ühik | Seotud kahju-kategooria |
|--|--|--|-------------------------------------|
| Kantserogeensed ühendid | <i>Carcinogens</i> | kg C ₂ H ₃ Cl ekv õhku | Inimtervis |
| Mittekantserogeensed ühendid | <i>Non-carcinogens</i> | kg C ₂ H ₃ Cl ekv õhku | Inimtervis |
| Anorgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | <i>Respiratory inorganics</i> | kg PM _{2.5} ekv õhku ¹ | Inimtervis |
| Ioniseeriv kiirgus | <i>Ionizing radiation</i> | Bq C-14 ekv õhku | Inimtervis |
| Osoonikihi hõrenemine | <i>Ozone layer depletion</i> | kg CFC-11 ekv õhku | Inimtervis |
| Orgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | <i>Respiratory organics</i> | kg C ₂ H ₄ ekv õhku | Inimtervis; ökosüsteemide kvaliteet |
| Vesikeskkonna ökotoksilisus | <i>Aquatic ecotoxicity</i> | kg TEG ekv vette ² | Ökosüsteemide kvaliteet |
| Maapinna ökotoksilisus | <i>Terrestrial ecotoxicity</i> | kg TEG ekv pinnasesse ² | Ökosüsteemide kvaliteet |
| Vesikeskkonna eutrofeerumine | <i>Aquatic eutrophication</i> | kg PO ₄ ³⁻ ekv vette | Ökosüsteemide kvaliteet |
| Vesikeskkonna hapestumine | <i>Aquatic acidification</i> | kg SO ₂ ekv vette | Ökosüsteemide kvaliteet |
| Maapinna eutrofeerumine / hapestumine | <i>Terrestrial acidification / nitrification</i> | kg SO ₂ ekv õhku | Ökosüsteemide kvaliteet |
| Maakasutus | <i>Land occupation</i> | m ² haritavat maad/a | Ökosüsteemide kvaliteet |
| Globaalne soojenemine | <i>Global warming</i> | kg CO ₂ ekv õhku | Kliimamuutused |
| Taastumatud energiaallikad | <i>Non-renewable energy</i> | MJ või kg toornafta ekv (860 kg/m ³) | Maavarad |
| Maavarade kaevandamine | <i>Mineral extraction</i> | MJ või kg Fe ekv | Maavarad |

¹ PM_{2.5} tähistab tahkeid peenosakesi, mille diameeter on väiksem kui 2,5 mikromeetrit (näiteks tolmu, tahmu, suitsu ja vedelad piisad)

² TEG – trietüüleenglükool, keemiline valem HOCH₂CH₂OCH₂CH₂OCH₂CH₂OH

Mõjukategooriate tulemused korrutatakse läbi tunnusteguritega, et leida kahjukategooriate väärtused (Humbert jt, 2012). Kahjudel on järgnevad ühikud (Impact 2002+, 2012):

- DALY – ingl *Disability-Adjusted Life Years*. Kasutatakse inimtervise hindamisel, mis iseloomustab haiguse raskusastet nii enneaegse surma kui ka morbiidsuse ehk halvendatud elukvaliteedi läbi. Näiteks väärtus 3 DALY-t tähendab, et terve populatsiooni peale kaotatakse 3 aastat;
- PDF·m²·a – lühend ingl *Potentially Disappeared Fraction of Species* ehk potentsiaalselt kaduvate liikide osakaal ruutmeetri kohta ühes aastas. Kasutatakse ökosüsteemide kvaliteedi hindamisel. Näiteks väärtusega 0,2 PDF m²a tähendab, et maapinna ühel ruutmeetril võib potentsiaalselt hävineda ühe aastaga 20% selle liikidest;
- MJ – megadžaulid väljendavad kaevandatud energiahulka või energiat, mis on läinud maavara kaevandamiseks. Kasutatakse maavarade kahjukategooria hindamisel;
- kg·CO²·ekv – süsinikdioksiid-ekvivalent, mis näitab kasvuhooonegaaside summeeritud võimet kasvuhoooneefektile panustada ning kasutatakse kliimamuutuste hindamisel.

Impact 2002+ sisaldab ca 1500 ühendi tunnustegureid. Tunnustegurid on väljendatud ühikus kg-ekvivalent, et muuta võrreldavaks erinevate ühendite avalduv mõju keskkonnale. (ILCD Handbook, 2010) Tunnustegurite järgi jagatakse LCI tulemused 15 mõjukategooriasse. Kahjukategooriate väärtuste arvutamiseks korrutatakse mõjukategooriate väärtused läbi kahjustust väljendavate tunnusteguritega. Seejuures on oluline ära märkida, et veekeskkonna hapestumise ja eutrofeerumise tulemused on võimalik esitada vaid mõjukategooria väärtustes, kuna nende kahjukategooriatesse teisendamiseks vajalike tegurite välja töötamine on veel arengujärgus.

Kahjude hindamisele järgneb normaliseerimine. Mõjude normaliseerimine toimub kas mõju- või kahjukategooriate tasemel. (ILCD Handbook, 2010) Tulemuste normaliseerimiseks kasutatakse taustsüsteemi, mis on kogutud 2000. aastal ning esindab keskmise eurooplase poolt tekitatud mõju igale kahjukategooriale. Antud väärtusi väljendatakse ökopunktides (Pt), mis esindab ühe inimese keskmistatud mõju antud kahjukategooriale Euroopa piirides ühes aastas. (Impact 2002+, 2012) Seetõttu on Impact 2002+ meetod mõeldud kasutamiseks eelkõige süsteemidel, mis asuvad Euroopa piirides – sel juhul on taustandmed ning saadud tulemused kõige täpsemad (ILCD Handbook, 2010).

Impact 2002+ meetodi loojad soovivad analüüsida kõiki kategooriaid eraldiseisvalt. Siiski on võimalik kõikide kahjukategooriate tulemused ka kokku liita (esitada tulemused öko-punktides (Pt)), kasutades normaliseerimist ja kaalumist. Impact 2002+ meetodis on kaalumistegur kõikidele kahjukategooriatele võrdne (=1). Normaliseerimine ja kaalumine loovad võimaluse erinevate hoonekomponentide ja faaside keskkonnamõjude omavaheliseks võrdlemiseks.

2.2.4 Ecoinvent

Antud uurimustöös kasutatakse Ecoinvent andmebaasi, mis on välja töötatud *Swiss Centre for Life Cycle Inventories* poolt (Althaus jt, 2007). Antud andmebaas sai valitud, kuna see on üks ulatuslikem rahvusvaheline LCI andmebaas. Eesmärgiks on pakkuda kvaliteetseid, ühtseid ja järjepidevaid olelusringi inventuuranalüüsi andmeid, et lihtsustada olelusringi hindamise uurimist ning suurendada tulemuste tunnustamist (Althaus jt, 2007). Andmebaas on mõeldud kasutamiseks tööstusettevõtetele, konsultatsiooniettevõtetele ja ka riigi- ja teadusasutustele, et aidata kaasa toodete ja teenuste keskkonnahoidlikkuse suurendamisele. Ecoinvent v1.01 algatati 2003. aastal ning aastatega on seda pidevalt täiendatud (Althaus jt, 2007). Antud uurimustöös kasutatakse Ecoinvent 3 versiooni, mida uuendati viimati ajavahemikus oktoober 2013 – veebruar 2014.

2.3 Hoone andmed

Olelusringi hindamise läbiviimiseks on tarvis teada võimalikult detailselt andmeid hoone ehitusmaterjalide kohta. See hõlmab endas nii hoone konstruktsiooni kui ka viimistlusmaterjale.

Hoone PHPP-s oli üksikasjalikult välja toodud välispiirete (hoonekarbi seinad, põrand pinnasel ning katuslagi) konstruktsioon ning erinevate ehitusmaterjalide kihipaksused. Vastavad arvutused said tehtud, et välja uurida kasutatud materjalide hulk – töö autor korrutas kihipaksused pindalaga, millel materjale oli kasutatud ning vajadusel leidis nende massi. Näide: välisseinte soojustamiseks oli kasutatud 24 millimeetri paksust Steico Universal ehitusplaate (naturaalne puitkiud), mis korrutati välisseinte pindalaga, millest oli maha

arvutatud akna- ning ukseavaused. Saadud tulemus korrutati ehitusmaterjali tootelehelt leitud materjali tihedusega – tulemuseks Steico Universal ehitusplaatide mass, mis sisestati SimaPro-sse.

Siseviimistlusmaterjalid, mille mõõtude kohta polnud täpsemat infot, olid peamiselt ostetud looduslike viimistlusmaterjalide poest Safran (www.safran.ee), seega uuriti poe kliendi-teenindajalt informatsiooni tavapärase kihipaksuste kohta ning saadud andmetega talitati sama moodi – leiti kasutatud materjali maht või mass.

Ehitusfaasi lõplikuks simuleerimiseks uuriti välja ka ehitusel kasutatud masinad ning nende ligikaudsed kasutusperioodid, et hinnata võimalikult täpselt hoone ehituse tarbeks vaja läinud primaarenergiahulka.

Tehnosüsteemides on arvesse võetud kogu toodetud ja tarbitud soojusenergia ning võrgust tarbitud elektrienergia. Samuti on lisatud ventilatsioon, kuid selle elektritarbimine sisaldub juba kogu hoone elektritarbimises. Kõikides protsessides on arvesse võetud infrastruktuuri keskkonnamõjud – s.t toode ise, seal hulgas selle tootmiseks kulunud materjalid, transport jm. Tehnosüsteemide andmed sisestati SimaPro programmi hetkeliste elektritarbimise ja maagaasi tarbimise näitude alusel. Eraldi protsessina on arvesse võetud ka nõ välditud soojusenergia. Välditud soojusenergiaks on arvestatud maagaasist kondensaatkatlaga toodetud soojusenergia sellises koguses nagu toodeti hoone eluea jooksul päikesepaneelidega.

Hoone olelusringi kohta kogutud andmed on nähtavad lisas 3, kus on ka nende Ecoinvent protsesside inglisekeelsed nimetused. Modelleerimiseks kasutatud andmed on väljatoodud paksus kirjastiilis.

Hoone elueaks on kavandatud 50 aastat. Saadud väärtus põhineb hoone ehituseks koostatud eelprojektil. Siseviimistluses kasutatud värvide, krohvide ja pahtlite korral on arvestatud, et seinte siseviimistlust renoveeritakse hoone eluea jooksul kolm korda. Põrandakatete korral on arvestatud nende välja vahetamisega kahel korral hoone eluea jooksul. Akende elueaks on arvestatud 25 aastat nagu ka hoone konstruktsioonide väliviimistluse puhul (roomatt, krohv, katusekattematerjal). Kõikide materjalide eluead on esitatud lisas 3. Masinate ja seadmete korral on arvestatud Ecoinvent andmebaasi protsessides olevate standardsete eluigaadega (nt erinevatel pumpadel ja mootoritel küttesüsteemis 10 aastat).

2.4 Olulusringi hindamine

2.4.1 Uurimuse eesmärk

Käesoleva töö eesmärgiks on viia läbi Eestis asuva passiivmaja olulusringi analüüs, mille tulemustena: 1) selgitada välja passiivmaja ehituse ja kasutusega seotud peamised sisendid, 2) tuua välja passiivmaja olulisemad keskkonnamõjud ning 3) esitada ettepanekuid hoone keskkonnamõjude vähendamiseks.

2.4.2 Uurimuse käsitusala

Antud uurimustöös on läbi viidud olulusringi hindamine, mille käigus selgitatakse välja passiivmaja keskkonnamõjud. LCA ulatuseks on hoone ehitusega kaasnevad protsessid:

- ehitusfaasis
 - tooraine kaevandamine ja transport tehasesse, nende töötlemine ja tootmine, ehitusmaterjalide transport objektile, objektile kasutatavate masinate kütusekulu ja protsent nende tootmiseks kulunud energiakulust, tehnika objektile toomine ja äravedu;
- kasutusfaasis
 - üldine elektrikulu, tarbitud soojusenergia, hoone tehnosüsteemid (päikesepaneelid, ventilatsioonisüsteem, maagaasi kondensaatkatel), sh nende tootmine. Arvesse võetakse ka hoone renoveerimine – akende ja põrandakatete vahetus ühel korral ning seinte siseviimistluse uuendamine kahel korral hoone eluea jooksul;
- lammutusfaasis
 - ehitusmaterjalide ladustamine või taaskasutamine.

Arvesse võetakse kõik olulisemad sisendid ja väljundid olulusringi jooksul (50 aastat).

3 Tulemused ja analüüs

Mõjukatgoriate tulemused

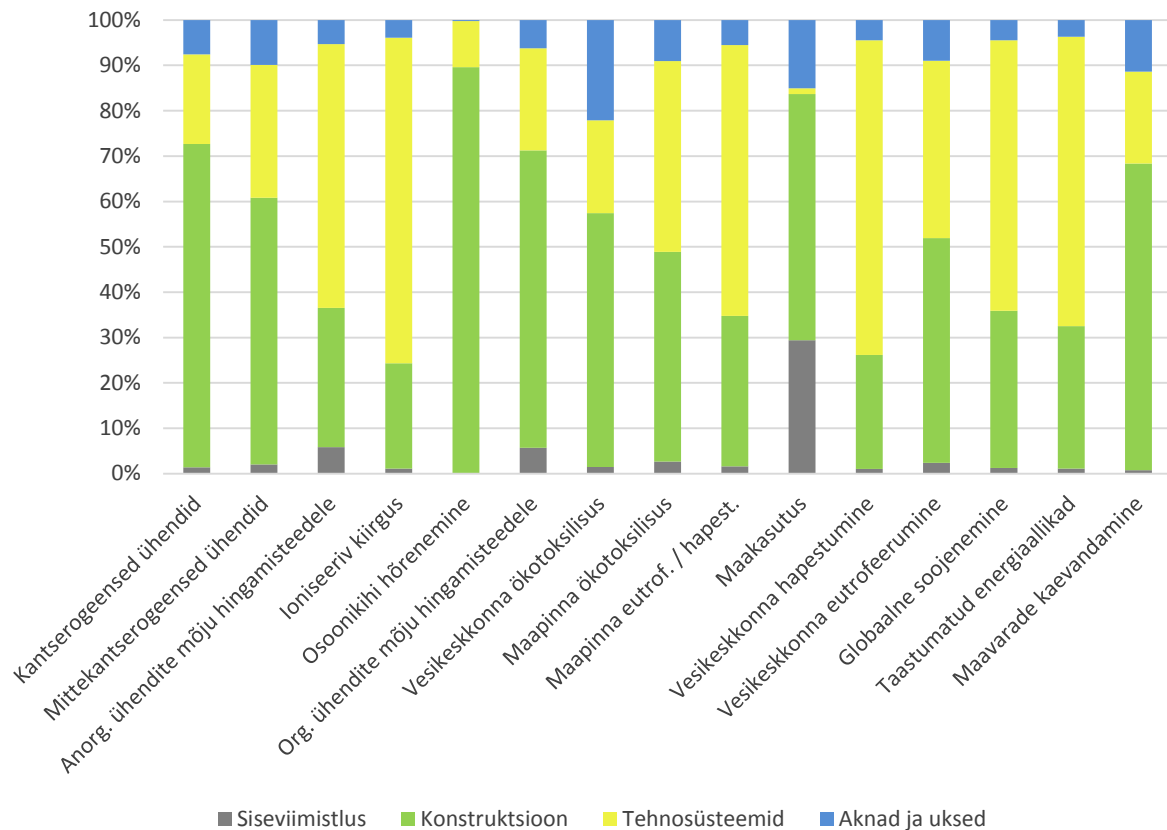
Passiivmaja olelusringi hindamisel klassifitseeritakse tulemused mõjukatgoriatesse ning märgistatakse iga mõju peamised allikad. Tulemused on esitatud hoone 1 ruutmeetri ja 50 aasta kohta.

Antud töö raames hinnati Eestis asuva passiivmaja olelusringi ning saadud tulemused väljendatakse viieteistkümne mõjukatgoria kaudu, mis on nähtavad tabelist 2, kus on toodud ka mõjukatgoriate väärtuseid neile iseloomulikus ühikus. Mõjude võrdlemiseks on tabeli teises tulbas toodud samad tulemused referentsühikutes. Mõjukatgoriate sisendite osakaalu protsentidega tabel on nähtav lisast 4.

Tabel 2. Uuritava passiivmaja mõjukatgoriate tulemused ning nende teisendatud tulemused referentsühikutes

| Mõjukatgoria | Ühik | Kokku | Referentsühik | Kokku |
|--|--------------|--------|---------------|----------|
| Kantserogeensed ühendid | kg C2H3Cl eq | 10,9 | DALY | 3,06E-05 |
| Mittekantserogeensed ühendid | kg C2H3Cl eq | 11,9 | DALY | 3,34E-05 |
| Anorgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | kg PM2.5 eq | 0,95 | DALY | 0,0007 |
| Ioniseeriv kiirgus | Bq C-14 eq | 44 271 | DALY | 9,30E-06 |
| Osoonikihi hõrenemine | kg CFC-11 eq | 0,002 | DALY | 1,69E-06 |
| Orgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | kg C2H4 eq | 0,29 | DALY | 6,12E-07 |
| Vesikeskkonna ökotoksilisus | kg TEG water | 72 319 | PDF·m2·yr | 3,6 |
| Maapinna ökotoksilisus | kg TEG soil | 13 834 | PDF·m2·yr | 109,4 |
| Maapinna eutrofeerumine / hapestumine | kg SO2 eq | 18,6 | PDF·m2·yr | 19,4 |
| Maakasutus | m2org.arable | 47,7 | PDF·m2·yr | 51,9 |
| Vesikeskkonna hapestumine | kg SO2 eq | 6,5 | - | - |
| Vesikeskkonna eutrofeerumine | kg PO4 P-lim | 0,13 | - | - |
| Globaalne soojenemine | kg CO2 eq | 1 111 | kg CO2 eq | 1 111 |
| Taastumatud energiaallikad | MJ primary | 21 946 | MJ primary | 21 947 |
| Maavarade kaevandamine | MJ surplus | 46,0 | MJ primary | 46,0 |

Tabelist 2 on näha, et suurima toimega inimtervisele on mõjud, mis tulenevad anorgaaniliste ühendite toimest hingamisteedele. Ökosüsteemide kvaliteeti mõjutab enim maapinna ökotoksilisus ning maavaradele avaldab survet taastumatute energiaallikate kasutamine. Mõjuühikute konverteerimise suhted referentsühikutesse on toodud lisa 5.



Joonis 2. Passiivmaja komponentide keskkonnamõju osakaal erinevates mõjukategooriates

Joonisel 2 on keskkonnamõjud esitatud protsentuaalselt, et näha, kuidas panustasid erinevad hoone komponendid igasse mõjukategooriasse. Peamised mõjud keskkonnale avalduvad nii hoone konstruktsiooni kui ka tehnosüsteemide kaudu, mis oli ka uurimustöö alguses loetud kirjanduse põhjal kõige tõenäolisem tulemus.

Hoone konstruktsioon omab suurimat osakaalu üheksas mõjukategoorias: kantserogeenid, mittekantserogeenid, osoonikihi hõrenemine, hingamisteid mõjutavad orgaanilised ühendid, vesikeskkonna ja ka pinnase ökotoksilisus, maakasutus, vesikeskkonna eutrofeerumine ning maavarade kaevandamine. Konstruktsiooni keskkonnamõjudesse panustavad enim metall-roovid, mis on valdavates mõjukategooriates suurimaks konstruktsioonisiseseks mõjuteguriks, varieerudes 37%-st kuni 93,4%-ni, välja arvatud osoonikihi hõrenemise ning maakasutuse mõjukategoorias, kus peamised mõjud on vastavalt EPS 200 Perimeeter Plussi (93,4%) ja

puitkonstruktsiooni kasutamisel (41,5%) (lisa 6). Osoonikihi hõrenemisele panustab konstruktsioonist just EPS 200 Perimeeter Pluss kasutamine – vahtpolüstüreenplaat, mis on mõeldud kasutamiseks soojustusvahendina. See mõju on põhjustatud EPS koostises olevate HCFC (klorofluormetaan) ühendite poolt, mis on kordades väiksema osoonikihi hõrendamise potentsiaaliga kui 1980datel keelatud CFC (klorofluorosüsinik) ühendid, kuid omavad siiski mõju osoonikihile (Greenhome, 2013).

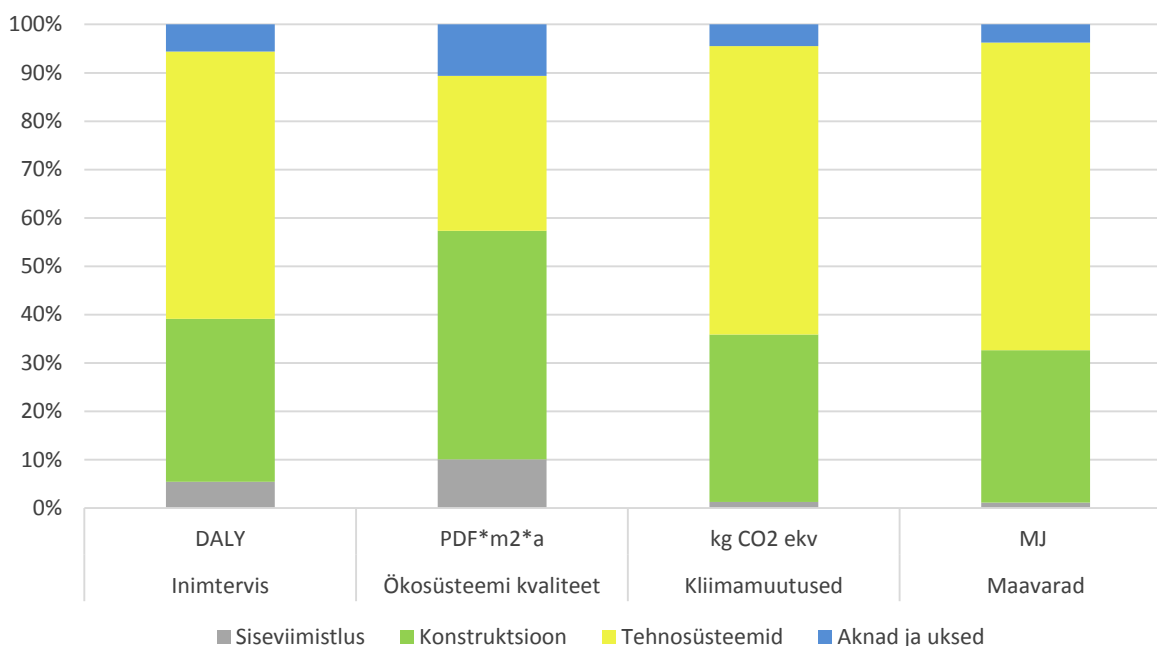
Tehnosüsteemid panustavad enim kuute mõjukategooriasse: hingamisteid mõjutavad anorgaanilised ühendid, ioniseeriv kiirgus, pinnase hapestumine ja eutrofeerumine, vesikeskkonna hapestumine, globaalne soojenemine ning taastumatud energiaallikad.

Eraldi saab välja tuua akende ja uste 22%-list mõju vesikeskkonna ökotoksilisusele, mis on peamiselt tingitud kolmekordsete aknaklaaside kasutamisest. Tuleb meeles pidada, et töös on arvestatud akende ühekordse väljavahetamisega hoone eluea jooksul.

Siseviimistluse mõjud on peaaegu kõikides kategooriates väikseimad, välja arvatud hingamisteid mõjutavate anorgaaniliste ühendite kategoorias, kus akendel ja ustel on 0,55 protsendi võrra väiksem väärtus, ning maakasutuses, kus väikseim mõju on tehnosüsteemidel (vt lisa 6). Siseviimistlus avaldab suurimat mõju maakasutusele, see on tingitud looduslähedaste materjalide kasutamisest, seejuures peamine mõju avaldub tammeparketi kasutamisest. Siseviimistluse mõjud teistele mõjukategooriatele on võrreldes teiste sisenditega suhteliselt madalad.

Kahjukategooriate tulemused

Modelleerimise tulemusena saadud keskkonnamõjud teisendati referentsühikutesse (tabel 2) ning nende liitmisel on saadud joonis 3, mis väljendab sisendite protsentuaalset mõju neljas kahjukategoorias (väärtuselised tulemused on toodud lisa 7). Keskkonnakahjude hindamisest on Impact 2002+ meetodis välja jäetud vesikeskkonna hapestumise ja eutrofeerumise mõjud, kuna nende taustandmete kohta ei ole veel piisavalt informatsiooni, et antud kategooriaid saaks edukalt ning adekvaatselt kahjudeks ümber hinnata (Impact 2002+, 2012).



Joonis 3. Passiivmaja komponentide keskkonnamõju osakaal erinevates kahjukategooriates

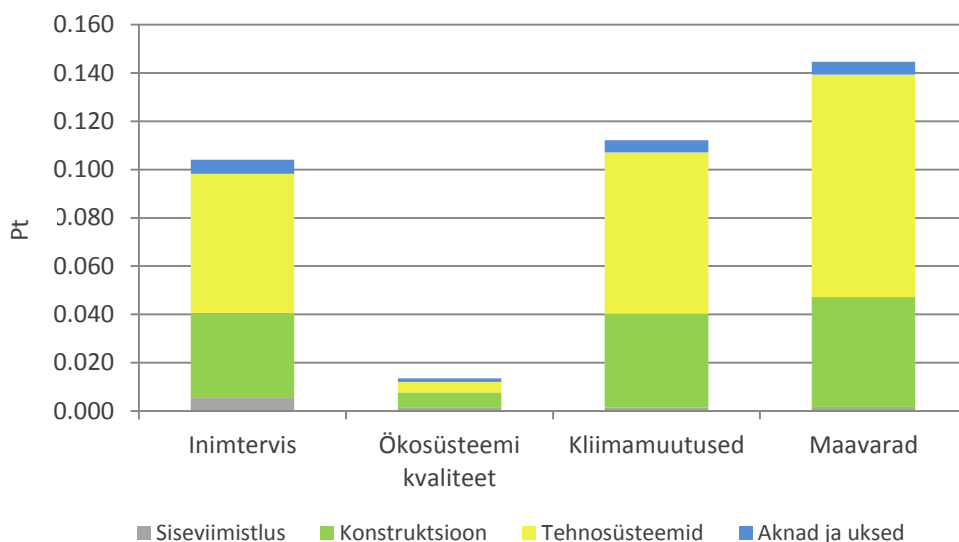
Tehnosüsteemid avaldavad suurimat kahju kolmes valdkonnas: inimtervis (55,3%), kliimamuutused (59,6%) ning maavarad (63,7%). Nende kahjukategooriate tehnosüsteemide suurimaks sisendiks on elektrienergia tarbimine, mille osakaal jääb antud kategooriates 76,9 ja 83,6 protsendi vahele (vt lisa 7). Suurimat mõju avaldavad ökosüsteemide kvaliteedi kahjukategoorias konstruktsioonide sisendid (47,3%).

Kõige vähem kahju avaldab igas kategoorias siseviimistlus. Siseviimistluse kõige suurem mõju avaldub ökosüsteemide kvaliteedile, mis tuleneb peamiselt tammeparketide kasutamisest.

Normaliseeritud ja kaalutud tulemused

Joonisel 4 on esitatud passiivmaja olelusringi hindamise tulemused pärast normaliseerimist ja kaalumist. Tulemused on toodud ühe ruutmeetri kohta 50. aasta jooksul. Normaliseerimise ja kaalumise tegurid on toodud lisa 8.

Passiivmaja ühe ruutmeetri kogumõju on 0,37 ökopunkti. Jooniselt 4 selgub, et kõige suuremad mõjud avalduvad maavarade kasutamisele – vastavalt 0,145 ökopunkti (Pt) ja 39% hoone elua kogumõjudest. Seejuures kõige enam panustavad maavarade ammendumisse hoone tehnosüsteemid (0,092 Pt, 64%), hoone konstruktsioonide kogumõju maavaradele on ligi poole väiksem (0,046 Pt, 31%) (lisa 9).



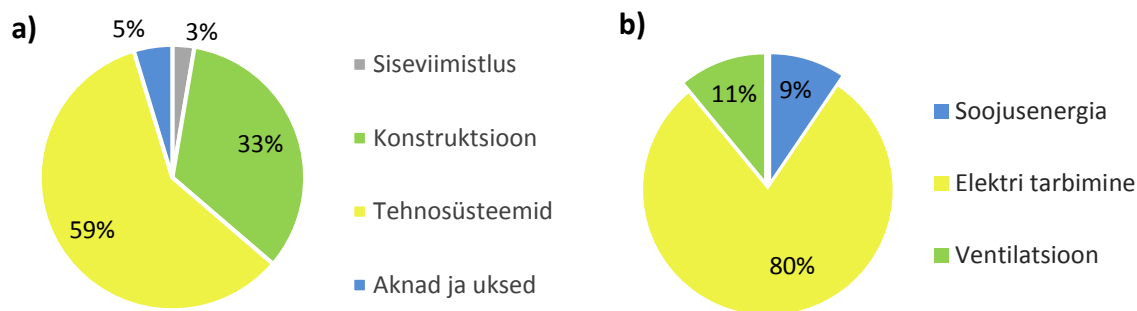
Joonis 4. Passiivmaja olerusingi hindamise tulemused nelja kahjukategooria kohta pärast normaliseerimist ja kaalumist

Kõige vähem mõju oma eluea jooksul avaldab analüüsitud passiivmaja ökosüsteemide kvaliteedile, vaid 0,013 Pt ruutmeetri kohta. See moodustab 3,6% hoone eluea kogumõjudest. Mõju inimtervisele ning kliimamuutustele on suhteliselt sarnane, vastavalt 0,104 Pt (28%) ja 0,112 Pt (30%).

Ökosüsteemide kvaliteedile mõjub kõige negatiivsemalt hoone konstruktsioon (47%) ning ülejäänud kolmele kahjukategooriale avaldavad suurimat mõju tehnosüsteemid (55–64%) (vt lisa 9). Kõikides kahjukategooriates on siseviimistluse mõju kõige väiksem varieerudes 1,1% kuni 10%-ni sõltuvalt kahjukategooriast. Siseviimistluse kogumõju kõikide kahjukategooriate tulemuste kokku liitmisel on 0,01 Pt ning see moodustab vaid 2,7% hoone eluea kogumõjudest. Akende ja uste kogumõju hoone eluea jooksul on kõikide kahjukategooriate peale kokku 0,018 Pt (4,7%) (vt joonis 5a).

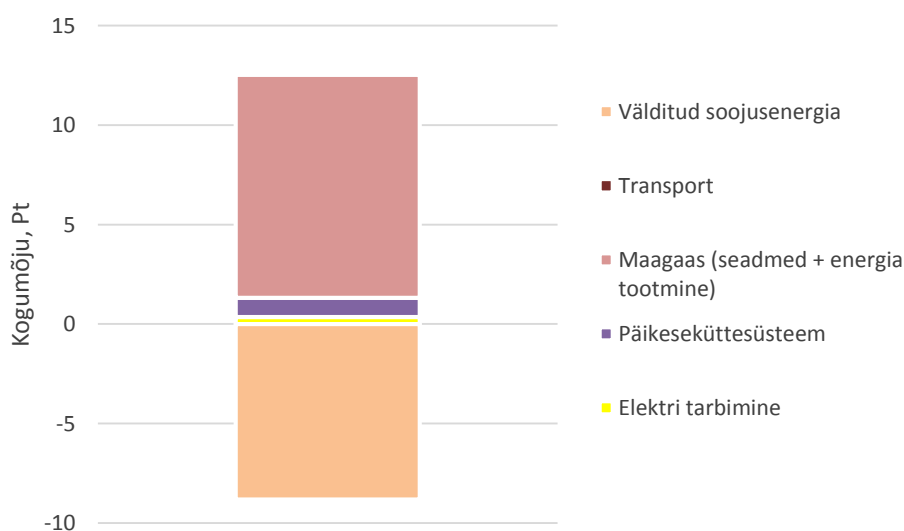
Joonisel 5 on esitatud a) hoone eluea kogumõju jagunemine hoone komponentide vahel ning b) tehnosüsteemi sisendite osakaal tehnosüsteemide kogumõjust hoone eluea jooksul. Seejuures on oluline märkida, et tehnosüsteemide kogumõju on 0,22 Pt ja see moodustab 59% hoone eluea kogumõjudest (vt joonis 4a).

Jooniselt 5b on selgelt näha, et hoone tehnosüsteemidest moodustab märkimisväärse osa (80%) elektri tarbimine. Selleks, et paremini mõista, kuidas panustavad tehnosüsteemi sisendid erinevatesse keskkonnakahjudesse, seletatakse järgnevas lõikus detailsemalt tehnosüsteemide modelleerimist SimaPro programmis.



Joonis 5. a) Passiivmaja komponentide kogumõju jaotumine nelja kahjukategooria vahel
b) Tehnosüsteemide kogumõju jaotumine kolme sisendi vahel

Uuritava passiivmaja tehnosüsteem koosneb antud juhul kolmest komponendist: soojusenergia, ventilatsioon ja elekter. Seejuures sisaldab iga komponent sisendina tehnoloogilisi seadmeid, nende seadmete tootmiseks kasutatud materjale ja protsesse ning tarbitud energiahulka. Näiteks küttesüsteemi koguseks on sisestatud hoones 50. aasta jooksul toodetud ja tarbitud soojusenergia hulk ühe ruutmeetri kohta (kWh) ning see sisaldab omakorda alamprotsessidena päikeseküttesüsteemi tootmist ja kasutatud materjale, päikesepaneelidest toodetud energiahulka, maagaasi kondensaatkatalaga toodetud energiahulka ning välditud energiat. Alamprotsesside sisendiks on kõik alates tooraine kaevandamisest kuni seadme tootmise, transportimise ja kasutamiseni. Küttesüsteemi mõjud ökopunktides on kirjeldatud joonisel 6.



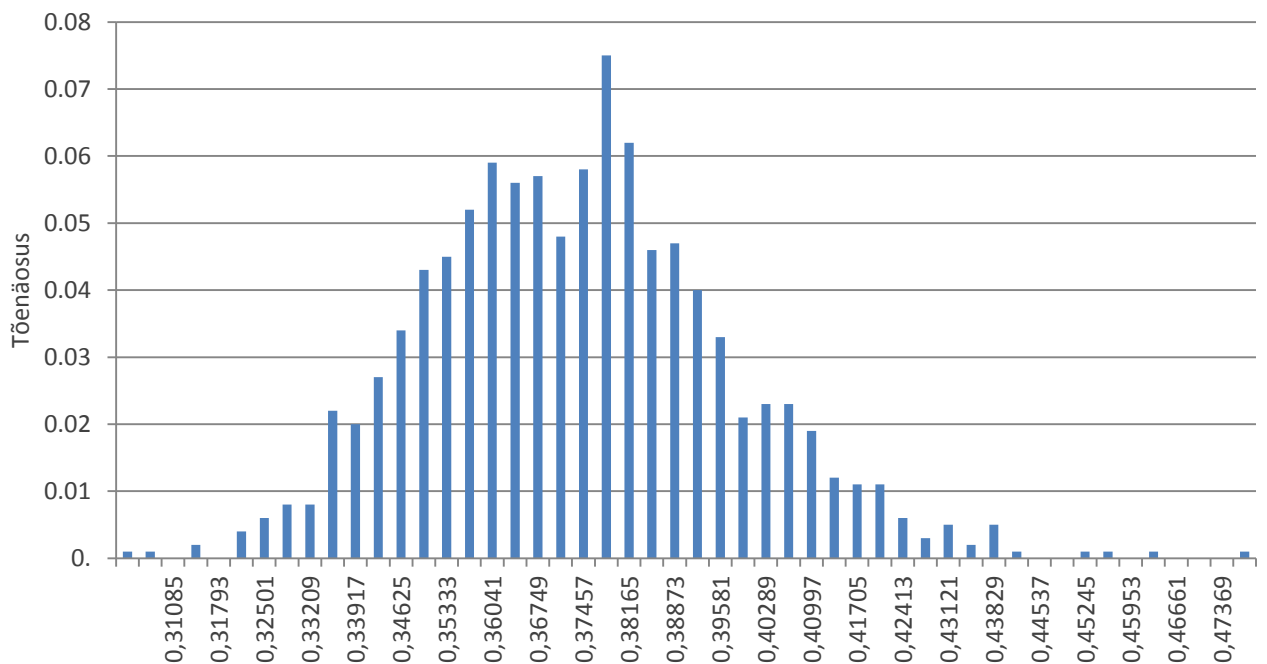
Joonis 6. Hoone küttesüsteemi mõjud esitatuna ökopunktides (Pt)

Elektri tootmisel ja tarbimisel on oluline mõju, kuna arvesse on võetud kõik materjalid ja protsessid, mis on vajalikud primaarenergia tootmiseks ning selle edastamiseks tarbijani. Märkimisväärne mõju on tingitud peamiselt elektri tootmiseks kasutatavatest kütustest. Modelleerimisel on kasutatud Euroopa Liidu keskmistatud elektri tootmise andmeid, et vältida Eestile omase põlevkivielektri mõju ülevõimendamist hoone olelusringi analüüsis.

Statistiline analüüs

Monte Carlo on üks kõige väärtuslikemaid statistilisi vahendeid, mida saab kasutada süsteemi töökindluse ja usaldusväärsuse kontrollimiseks ehk riskianalüüsiks. Monte Carlo meetod seisneb võimalike sisendite määratlemisel, nende juhuslike jaotuse tõenäosuse genereerimisel, tulemuste analüüsi tegemisel ning parima ja halvima väärtuste valimisel.

Antud uurimistöö raames viidi läbi Monte Carlo analüüs usaldusväärsusega 95% ning tulemused on esitatud nii mõju- ja kahjukategooriate kui ka kogumõju kohta. Kokku kasutati analüüsis 74 325 materjali või protsessi. Enamik (52 683, 71%) sisendandmetest omasid log-normaalset jaotust, seitse protsessi olid normaaljaotusega ning ülejäänud sisendandmed oli määratlemata jaotusega. Monte Carlo analüüsis viidi läbi 1000 arvutust samade sisendandmetega. Saadud tõenäosuslik jaotus on esitatud joonisel 8.



Joonisel 8 nähtub, et tulemused järgivad normaaljaotust. Normaaljaotust iseloomustav statistiline karakteristik on standardhälve, mida on kasutatud ka edaspidises analüüsis kirjeldamiseks saadud keskmiste tulemuste hajuvust.

Monte Carlo analüüsist saab välja tuua usaldusväärse tulemused kõikide hindamisetappide kohta ehk siis nii mõju- ja kahjukategooriate kui ka terve hoone ökopunktilise väärtuse kohta. Järgnevalt on esitatud graafilised joonised riskianalüüsi tulemuste paremaks mõistmiseks, täpsed väärtused koos keskmise ja standardhälbe väärtustega on lisatud lissasse 10.

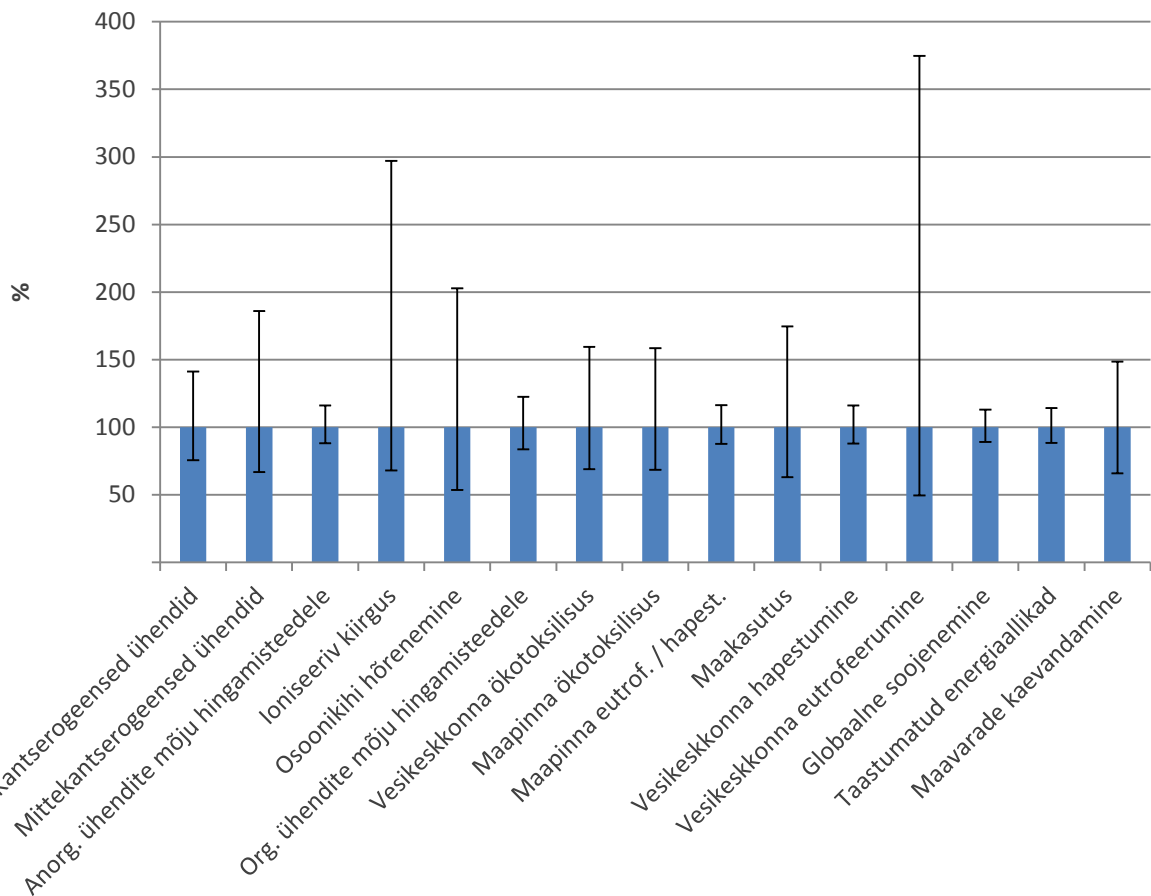
Mõjukategooriate analüüsi tulemustest (joonis 9) võib täheldada, et suurima määramatusega on vesikeskkonna eutrofeerumine, mille maksimumväärtus võib küündida isegi 275% suuremaks (lisa 10 a). Samuti on ka antud mõjukategooria miinimumväärtus ühe suurima hälbega – 50% madalam. Teisena võib välja tuua ioniseeriva kiirguse hälbed, mis näitavad kogusummas 229%-st variatsiooni.

Nende kahe mõjukategooria suur tulemuste laialivalgumine ei mänginud antud töös saadud LCA tulemustes suurt rolli, kuna ioniseeriva kiirguse absoluutväärtus DALY-des oli üks väiksemaid (tabel 3) ning selle väärtuse kõikumine ei muuda oluliselt kahju inimtervisele. Samuti ei mõjuta vesikeskkonna eutrofeerumine saadud LCA kahjukategooriate tulemusi, sest antud mõjukategooriat ei olnud tarkvara arendaja poolsetel põhjustel arvesse võetud.

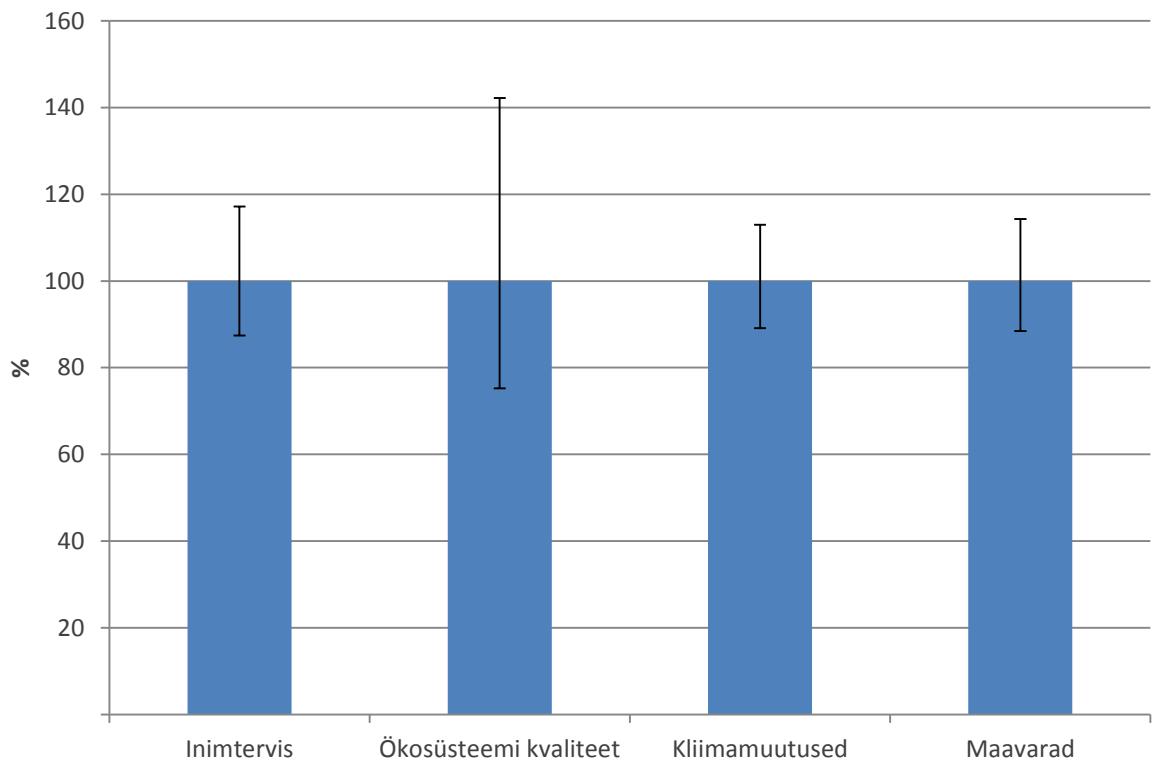
Joonisel 10 on kujutatud kahjukategooriate riskianalüüsid, mille varieeruvus on tunduvalt väiksem kui mõjukategooriates. Kõige suurem kõikumine on ökosüsteemide kvaliteedis, kus maksimumväärtus võib olla kuni 42% kõrgem ning miinimumväärtus 25% madalam. Vaadates joonist 4, on näha, et uuritava passiivmaja mõjud ökosüsteemi kvaliteedile on kõige väiksemad, seega selle kahjukategooria kõikumine väheoluline. Kõige suurem uuritud hoone mõju avaldus maavarade kaudu ning seejärel kliimamuutuste kaudu. Riskianalüüsi andmetel on nende mõjude varieeruvus suhteliselt väike – kuni 14%-ne kõikumine (lisa 10 b).

Passiivmaja ühe ruutmeetri kogumõju on 0,37 ökopunkti, mille varieeruvus on -0,04 ja +0,05 punkti. Kogumõju keskmiseks väärtuseks on 0,37 ning standardhälbeks 0,02 (lisa 10 c).

Riskianalüüsi andmetele põhinedes on olelusringi hindamised usutavad ning lähenevad keskmistele väärtustele.



Joonis 8. Mõjukategooriate riskianalüüs. Usaldusvahemik 95%. Simulatsioonide arv: 1000.



Joonis 9. Kahjukategooriate riskianalüüs. Usaldusvahemik 95%. Simulatsioonide arv: 1000.

4 Arutelu

Keskkonnamõjude paremaks hindamiseks on toodud passiivmaja mõju ühe ruutmeetri kohta (0,37 Pt). See võimaldab hoone energiatarvet võrrelda ka teiste analoogsete ehitistega. Terve hoone keskkonnamõjude teadasaamiseks tuleb tulemus korrutada passiivmaja põrandapindalaga, mis on 176,9 m² – tulemuseks 65,5 ökopunkti.

Hoone peamised mõjud on põhjustatud tehnosüsteemide poolt – kuigi kasutusel on ka päikesepaneelid, gaasikondensaatkatel ning soojustagastusega ventilatsioon, siis nende kasutamine leevendab vaid osaliselt kasutusfaasiga seostatud keskkonnamõjusid. Olgugi et hoone tarbib tavapärasel koguses elektrienergiat, on selle mõju siiski suur, sest elektri tootmine on keskkonnakahjulik tegevus. Sarnaselt leidsid Pajchrowski jt (2014) oma uuringus, et hoolimata ehitise tüübist, selle energiamärgisest või kasutatud materjalidest, energiatarve on hoone pikaajalises kasutamises peamine negatiivne keskkonnamõju. Sellest võib järeldada, et mitte ainult energiakogus ei ole oluline tegur, vaid ka energialiik, mida tarbitakse. Lisaks, fossiilsetest kütustest toodetud elektri muundumise kaod selle tarneahela siseselt võivad olla suuremad, kui taastuvate energiaallikate võrgukaod (Ramesh, Prakash ja Shukla, 2010). Seega keskkonnamõjude vähendamiseks tuleks asendada võrguelektri tarbimine kohapealsetest taastuvatest allikatest toodetud elektriga. Üheks enim kasutatavaks lahenduseks on päiksepaneelide kasutamine, mis võivad suvekuudel produtseerida terve hoone energiavajaduse. Siiski on päiksepaneelide kui seadmete tootmise primaarenergiakulu suur (Lamnatou, Braig jt, 2015). Uuenduslik suund on hoonega ühendatud päiksepaneelid (ingl *building integrated*, lühend BI). BI paneelide eelis on nende väiksem materjalikulu, kuna nad asendavad hoone komponenti (nt katus või aknad). Tänu sellele on ka tasuvusaeg väiksem. Lisaks on sellisel süsteemil kõrgem esteetiline väärtus kui traditsioonilistel päiksepaneelidel. (Lamnatou, Mateus jt, 2015)

Hoone ehitamiseks kulutatud primaarenergiat saab vähendada hoone konstruktsiooni- ja isolatsioonimaterjalide muutmise teel. Mõned materjalid, millel on suur energiasisaldus kilogrammi kohta, kuid mida kasutatakse vaid väikeses koguses, võivad omada samasugust keskkonnamõju kui suures koguses kasutatavad materjalid, mille energiasisaldus kilogrammi kohta on väike (Gratz ja Indriksone, 2011). Kahe erineva materjali väärtusi on mõistlik võrrelda juhul, kui üht materjali saab teisega asendada. Suurimad muutused on saavutatavad kasutades alternatiivseid ehitusmaterjale, mis on saadud näiteks ümbertöötlemise teel või

kohalike (lähedal toodetud) ehitusmaterjalide kasutamise, sest selliste materjalide tootmine ja transport võtab vähem energiat. Samuti saab materjali energiasisaldust vähendada uuenduslike, kuid tavapäraste ehitusmaterjalide tarvitamisega, näiteks täidetud betoonplokkide asendamine õõnes betoonplokkidega (Huberman ja Pearlmutter, 2008).

Tetty, Dodoo ja Gustavsson (2014) leidsid, et järgneva kolme isolatsioonimaterjali võrdusel oli kõige väiksema primaarenergia sisaldusega tselluloos, järgmisena tuli kivivill ning seejärel klaasvill. Kuigi nii kivi- kui ka klaasvilla valmistatakse looduslikust toorainest, on nende tootmine on väga energiamahukas, sest temperatuur peab ületama 1400°C (Gratz ja Indriksone, 2011). Uuritud Õssu maja puhul kasutati tselluvilla, mida võib valmistada nii tselluloosist, paberist või puitkiust. Seega on tegemist madala energiatarbega soojustusmaterjaliga ning seda on näha ka antud uurimustöö tulemustest – tselluvilla osakaal konstruktsiooni ökopunktidest on 5,9% (lisa 11). Metallroovide kasutamine moodustas peaaegu 45% konstruktsiooni mõjust. Lisades sellele ka EPS-i, OSB-i ning rullmaterjalide osakaalud, on see kokku 72% konstruktsiooni ökopunktidest. Norman, MacLean ja Kennedy (2006) viisid läbi uuringu, kus leidsid, et tellised, aknad, kipsplaadid ja betoon vastutasid 60-70 protsendi väärtuses seotud energia ja emiteeritud kasvuhooonegaaside eest. Seega on ehitise välispiiretel suured mõjud hoone konstruktsiooni energiatarbimisse. Petersen ja Solberg (2002) uurisid teras- ja liimpuittalade seotud energia erinevusi ja leidsid, et terastalade tootmine on 2-3 korda energiamahukam ning fossiilseid kütuseid kasutatakse 6-12 korda rohkem kui liimpuittalade tootmisel. Õssu passiivmaja kandekonstruktsiooniks oli puitkarkass ja seetõttu oli ka selle mõju konstruktsiooni ökopunktidele suhteliselt madal (lisa 11).

Passiivmajade eesmärk on vähendada ruutmeetri energiatarvet alla 15 kWh/m²a (Passipedia: What ... , 2015) ning on teada, et kõige lihtsamalt saavutatakse soovitud tulemus, kui hoone on kompaktne, st kahe- või kolmekorruseline risttahukas. Samas on hoone olelusringi ehitusfaasi energiatarve suuresti sõltuv materjalide kogusest. Võrreldes kahekorruselise majaga suureneb kolmekorruselise puhul seotud energiahulk märgatavalt, sest ehitamiseks kulub rohkem ehitusmaterjali. Stephan jt (2013) leidsid oma uurimustöös, et kui muuta kolmekorruseline passiivmaja kahekorruseliseks (põranda pindala vähenes 330-ne ruutmeetri pealt 180-le), jääb ühe ruutmeetri küttevajadus samaks, samas kui olelusringi energiatarve väheneb 19,4 protsendi võrra. Järeldusena võib öelda, et eluruumi vähendamine, ilma et selle kvaliteeti ohtu seataks, alandab ka hoone elutsükli energiatarvet.

Antud töös viidi läbi lühike olelusringi hindamine ehk andmete taustaväärtused saadi Ecoinvent andmebaasist, mis baseerub Euroopa keskmistele andmetele. See tähendab, et ühegi materjali primaarenergiavoo protsessi ei modelleeritud täiesti algusest, vaid kasutati andmebaasist saadud taustväärtusi. Täismahulise hoone LCA teostamine on keeruline peamiselt suure andmemahu tõttu. Protsessi lihtsustamiseks leidsid Pajchrowski jt (2014), et LCA tulemused jäävad 90% ulatuses puutumata, kui jätta inventuurianalüüsist välja järgnevad andmed: ehitusmaterjalide transport objektile, hoone ehitamiseks kuluv energia, remondi ja renoveerimisega seotud tööd, lammutus, ehitusprahi transport ja prügi ladestamine/ümbertöötlemine. Eelnevalt toodud andmete väljajätmine inventuurianalüüsist ei muuda otsustaval kombel LCA tulemusi, kuid vähendaks kuni 75% ulatuses andmete mahtu (Pajchrowski jt, 2014). Ka antud magistritöö toetab antud teooriat – konstruktsiooni ja tehnosüsteemide osakaal on 92% (joonis 5 a).

Kokkuvõte

Hoonete energiatõhusus on Euroopas üha suurema tähelepanu all peamiselt Euroopa Liidu poolt sätestatud energiasäästliku kliimapoliitika tõttu, samuti tänu madalenergiamaajade väiksemale summaarenergia vajadusele, mis vähendab tarbijate kulutusi küttele. Hoone hea õhupidavus tagatakse peamiselt isolatsioonikihi tõhustamisega – kihi paksuse suurendamise ja/või innovaatiliste materjalide kasutuselevõtuga. Uued ehitusmaterjalid võivad aga olla energiamahukamad, mis tähendab suuremat mõju keskkonnale.

Kuigi varasemas kirjanduses on uuritud hoone energiatarvet, on seda peamiselt tehtud vaid hoone operatiivse ehk kasutusfaasi kohta. Leidub ka võrdluseid erinevate ehitusmaterjalide primaarenergia väärtuste kohta, kuid vähe on uurimustöid, mis sisaldaksid informatsiooni terve hoone ehitamiseks kulunud konstruktsiooni primaarenergia koguväärtuse kohta. Analüüse, mis seovad kaks uurimusküsimust kokku – hoone ehituseks kulunud primaarenergia hulk ning kasutusfaasi energiatarbe omavaheline suhestumus – on piiratud kujul.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida Eestis asuva passiivmaja energiatarvet terve olelusringi vältel. Antud eesmärk viidi läbi olelusringi hindamise (LCA) meetodikaga, kasutades SimaPro programmi. Uurimustöö jaoks koguti andmeid ehitusmaterjalide, tehnoloogiliste seadmete ning summaarse energiakasutuse kohta. Tulemused saadi Impact 2002+ meetodit kasutades, mis andis tulemid 15 mõjukategooria ning 4 kahjukategooria kohta. Antud tulemused normaliseeriti ja kaaluti ning leiti, et uuritava passiivmaja ühe ruutmeetri keskkonnamõju selle eluea (50 a) jooksul on 0,37 ökopunkti.

Analüüsist selgus, et uuritud passiivmaja ehitus ja kasutus avaldab suurimat mõju maavaradele (39% hoone eluea kogumõjudest). Antud mõju tuleneb peamiselt hoone tehnosüsteemidest, mida saab põhjendada igapäevase elektritarbimisega hoone operatiivses faasis. Passiivmaja avaldab kõige vähem mõju ökosüsteemide kvaliteedile (3,6%). Suhteliselt sarnased on hoone mõjud kliimamuutustele ja inimtervisele, vastavalt 30% ning 28%.

Kõige rohkem mõjutavad hoone primaarenergia tarvet tehnosüsteemid ning konstruktsioon ning nende mõjude vähendamiseks on toodud mitmeid lahendusi, mida võiks edaspidistel hoone planeerimistel arvesse võtta. Peamiseks probleemiks on võrgust saadav elekter, seega lokaalsetest taastuvatest energiaallikatest elektri tarbimine oleks keskkonnale positiivse

mõjuga. Konstruksiooni primaarenergiat saab vähendada optimaalse hoone kuju ja mõõtmetega ning alternatiivsete, näiteks kohalike või ümbertöödeldud ehitusmaterjalide kasutamisega. Materjalide keskkonnamõju vähendamiseks tuleks valida materjalid, millel on pikk eluiga ja madal keskkonnamõju.

Üha rohkem leidub Eestis inimesi, kes kasutavad teadlikumalt elektrienergiat hoone efektiivsemaks majandamiseks. Antud töös tehtud analüüs ning pakutud lahendused aitaksid panustada hoone ehitusest ning kasutusest tulenevate kasvuhoonegaaside emissioonide alandamisele ning seega ka keskkonnamõjude vähendamisele. Euroopa Liidu energiatõhusate ehitiste direktiivi raames on Eestis madalenergiahoonete ehitus tõusujoones, seega eelnev põhjalik ehitusprotsessi planeerimine on otstarbekas.

Summary

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A PASSIVE HOUSE LOCATED IN ESTONIA

The energy performance of buildings is gaining greater attention mainly due to the new energy efficient climate policy implemented by the European Union, and also because of the decreased total energy demand of low-energy buildings that would reduce the consumer's expenses on heating and cooling. The energy savings of energy efficient houses has been mainly achieved by the improved airtightness and increased insulating of the building envelope. However, production of these materials could be very energy-intensive, meaning greater impact on the environment.

There are previous studies that have researched the energy performance of buildings, but for the most part, only the use phase has been analysed. Some studies have analysed the construction materials as well, but it has been done as a comparison of different materials, rather than modelling the whole building's embodied energy.

The aim of this thesis was to analyse the energy consumption of a passive house in Estonia throughout its life cycle. A life cycle assessment (LCA) was carried out, using the SimaPro programme. For this purpose, information about the building materials, technological systems and total energy use was acquired. The results were obtained by using the Impact 2002+ method which presented the results in 15 impact categories and in 4 damage categories. The results were normalized and weighted in order to find the passive house's environmental impact. The final result showed that 1 m² of the passive house accounts for 0,37 ecopoints during its life cycle (50 years).

The analysis revealed that the construction materials and the usage of the passive house have the greatest impact on natural resources (39% of total impacts of the entire life cycle). The main reason behind it is the technological system of the house which in turn can be explained by the daily electricity consumption during the building's use phase. The passive house has the least impact on ecosystem quality (3,6%). Relatively similar are the influences on climate change and human health, respectively 30% and 28%.

Altogether, the primary energy consumption of the passive house is primarily affected by the technological systems and the construction of the building. In order to decrease these impacts

on the environment, a number of solutions were presented. The main issue is the electricity coming from the grid, therefore using the electricity from local renewable energy sources would have a positive effect on the environment. The embodied energy of the building construction can be decreased with optimal shape and measurements of the building, but also with the use of alternative building materials, e.g. local or recycled materials. Furthermore, materials with low environmental impact and long life span should be used, so as to reduce the impact.

Increasingly more people in Estonia are aware of their daily electricity use in order to manage their homes effectively. The results of this paper and subsequent discussion can contribute to the reduction of the environmental impact caused by the construction and usage of buildings. As a result of the European Union's energy efficient buildings' directive, construction of the low-energy houses in Estonia shows an upward trend, therefore prior thorough planning of the building construction is relevant.

Tänuavaldused

Erilise tänu osaliseks saab minu juhendaja, Janika Laht, kelle abi ja nõuannete toel töö valmis. Soovin tänada ka Margus Valget, kes jagas uuritava hoonega seostuvat vajalikku informatsiooni.

Kasutatud kirjandus

Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hirschler, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., Wernet, G. (2007). Ecoinvent Overview and Methodology: Data v2.0 (2007). Ecoinvent report No. 1. Dübendorf.

Blengini, G. A. (2009). Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin-Italy, *Building and Environment* 44, lk 319–330.

Blengini, G. A., Di Carlo, T. (2010). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings* 42, lk 869-880.

Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, lk 379–388.

Directive 2002/91/EC of the European parliament and the of the council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. (2002). Kasutatud 14.04.16. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0071:EN:PDF>

Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2010/31/EL. (2010). Kasutatud 04.05.16 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:ET:PDF>

Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2012/27/EL. (2012). Kasutatud 04.05.16 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:ET:PDF>

Feist, W. (2006). Definition of passive houses. *Passive Houses*. Darmstad: Passivhaus Institute.

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management* 91, lk 1–21.

Gratz, M., Indriksone, D. (2011). Ökoloogilised ehitusmaterjalid. AS Rebellis.

Greenhome: What's wrong with Styrofoam? (2013) Kasutatud 17.05.16 <http://www.greenhome.com/blog/styrofoam>

Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. (2015). Kasutatud 15.05.16.
<https://www.riigiteataja.ee/akt/105062015015>

Huberman, N., Pearlmutter, D. (2008). A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert, *Energy and Buildings* 40, lk 837–848.

ILCD Handbook: Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. (2010). Kasutatud 04.05.16
<http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>

Impact 2002+: User Guide. Draft for version Q2.21 (version adapted by Quantis). (2012)
Kasutatud 05.05.16 http://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.21.pdf

Intelligent Energy Europe Programme of the European Union: Energy Efficiency Trends and Policies in the Household and Tertiary Sectors. (2015). Kasutatud 15.03.16
<http://www.odyssee-mure.eu/publications/br/energy-efficiency-trends-policies-buildings.pdf>

ISO 14040:2006 – Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. (2006). Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardization

Lamnatou, Chr., Braig, H., Chemisana, D., Mallick, T.K. (2015). Life cycle energy analysis and embodied carbon of a linear dielectric-based concentrating photovoltaic appropriate for building-integrated applications. *Energy and Buildings* 107, lk 366–375.

Lamnatou, Chr., Mateus, R., Chemisana, D., Almeida, G.M., Silva, S.M. (2015). Review and perspectives on Life Cycle Analysis of solar technologies with emphasis on building-integrated solar thermal systems. *Renewable Energy* 75, lk 833-846.

Norman, J., MacLean, H.L., Kennedy, C.A. (2006). Comparing High and Low Residential Density: Life-Cycle Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Urban Planning and Development*, 132(1), lk 10.

Ortiz, O., Bonnet, C., Bruno, J. C., Castells, F. (2009). Sustainability based on LCM of residential dwellings: a case study in Catalonia, Spain. *Building and Environment* 44, lk 584-594.

Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., Strykowski, W. (2014). Materials composition or energy characteristic – What is more important in environmental life cycle of buildings? *Building and Environment* 72, lk 15-27.

Pargana, N., Pinheiro, M. D., Silvestre, J. D., de Brito, J. (2014). Comparative environmental life cycle assessment of thermalinsulation materials of buildings. *Energy and Buildings* 82, lk 466-481.

Passiivmaja infokeskus: Mis on passiivmaja? Kasutatud 04.04.2016
<http://www.passiivmajad.ee/index.php?page=100&>

Passipedia: PHPP – Passive House Planning Package. (2015). Kasutatud 04.04.2016
http://www.passipedia.org/planning/calculating_energy_efficiency/phpp_-_the_passive_house_planning_package

Passipedia: What is a Passive House? (2015). Kasutatud 04.04.2016
http://www.passipedia.org/basics/what_is_a_passive_house

Passivhaus: The Passivhaus Standard. Kasutatud 04.05.2016
<http://www.passivhaus.org.uk/standard.jsp?id=122>

Passive House Database. Kasutatud 15.05.16 <http://www.passivhausprojekte.de/>

Passive House Institute: About Passive House – What is a Passive House? (2015). Kasutatud 04.04.2016
http://www.passiv.de/en/02_informations/01_whatisapassivehouse/01_whatisapassivehouse.htm

Passive House Institute: Passive House Planning Package (PHPP). (2015). Kasutatud 04.04.2016 http://www.passiv.de/en/04_phpp/04_phpp.htm

Petersen, A.K., Solberg, B. (2002). Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction. Case: beams at Gardermoen airport, *Environmental Science & Policy* 5, lk 169–182.

Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42, lk 1592–1600.

Pré-Sustainability: About Pré, Company Values. Kasutatud 06.04.2016 <https://www.pre-sustainability.com/about-pre>

Reich-Weiser, C., Vijayaraghavan, A., Dornfeld, D. (2010). Appropriate use of Green Manufacturing Frameworks. Laboratory for Manufacturing and Sustainability

Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., Shiina, T. (2009). A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering* 90, lk 1–10.

Sartori, I., Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings* 39, lk 249-257.

Stavropoulos, P., Giannoulis, C., Papacharalampopoulos, A., Foteinopoulos, P., Chryssolouris, G. (2016). Life cycle analysis: comparison between different methods and optimization challenges. *Procedia CIRP* 41, lk 626-631.

Stephan, A., Crawford, R. H., de Myttenaere, K. (2013). A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses. *Applied Energy* 112, lk 23-24.

Talve, S., Põld, E. (2005). *Olelusingi hindamine*. Pärnu: 2005

Tetty, U. Y. A., Dodoo, A., Gustavsson, L. (2014). Effects of different insulation materials on primary energy and CO₂ emission of a multi-storey residential building. *Energy and Buildings* 82, lk 369-377.

Wallhagen, M., Glaumann, M., Malmqvist, T. (2011). Basic building life cycle calculations to decrease contribution to climate change - case study on an office building in Sweden. *Build Environment* 46, lk 1863-1871.

Lisad

Lisa 1. Uuritava passiivmaja joonised ja plaanid

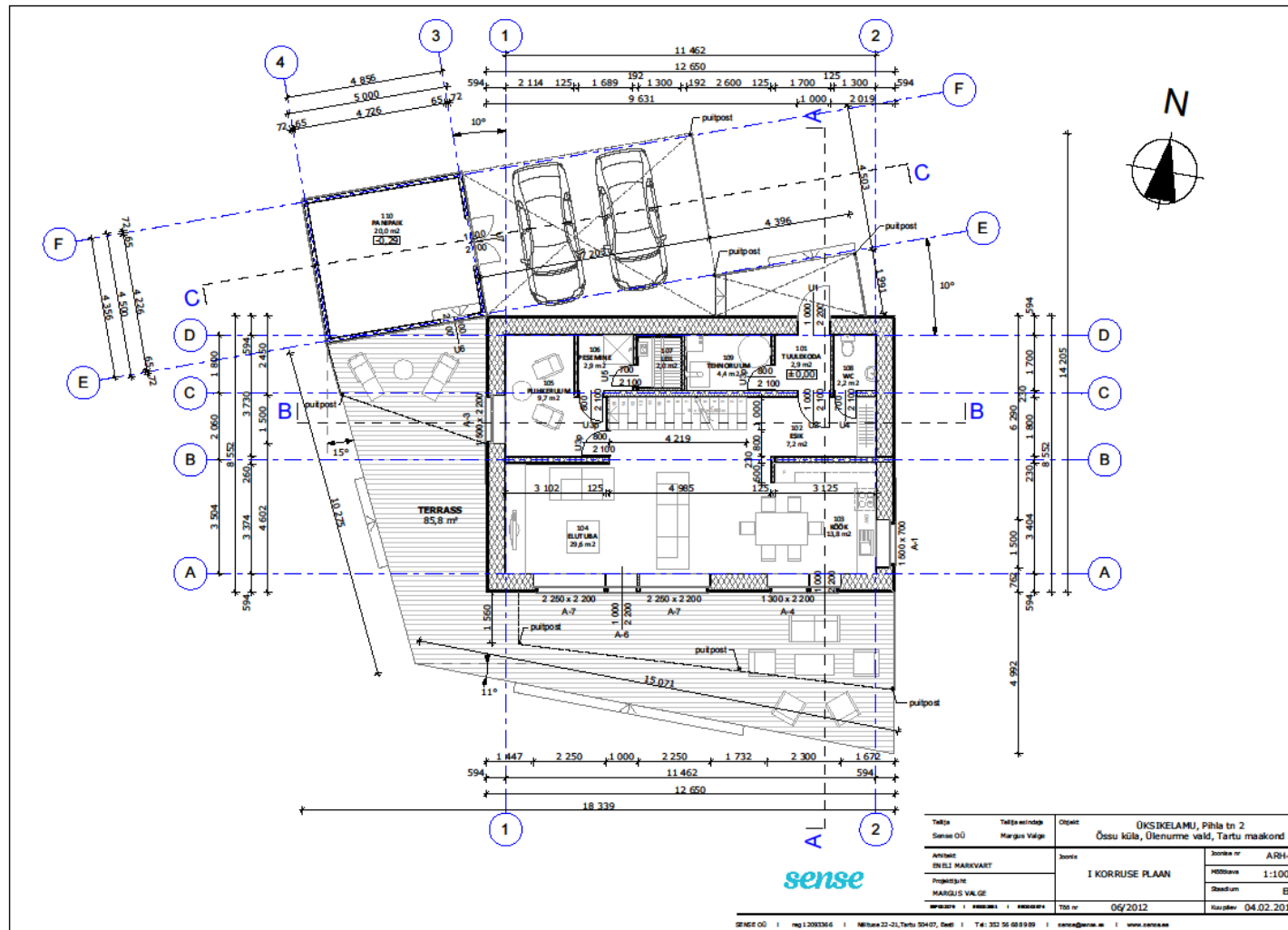
a) Vaade lõunaküljelt



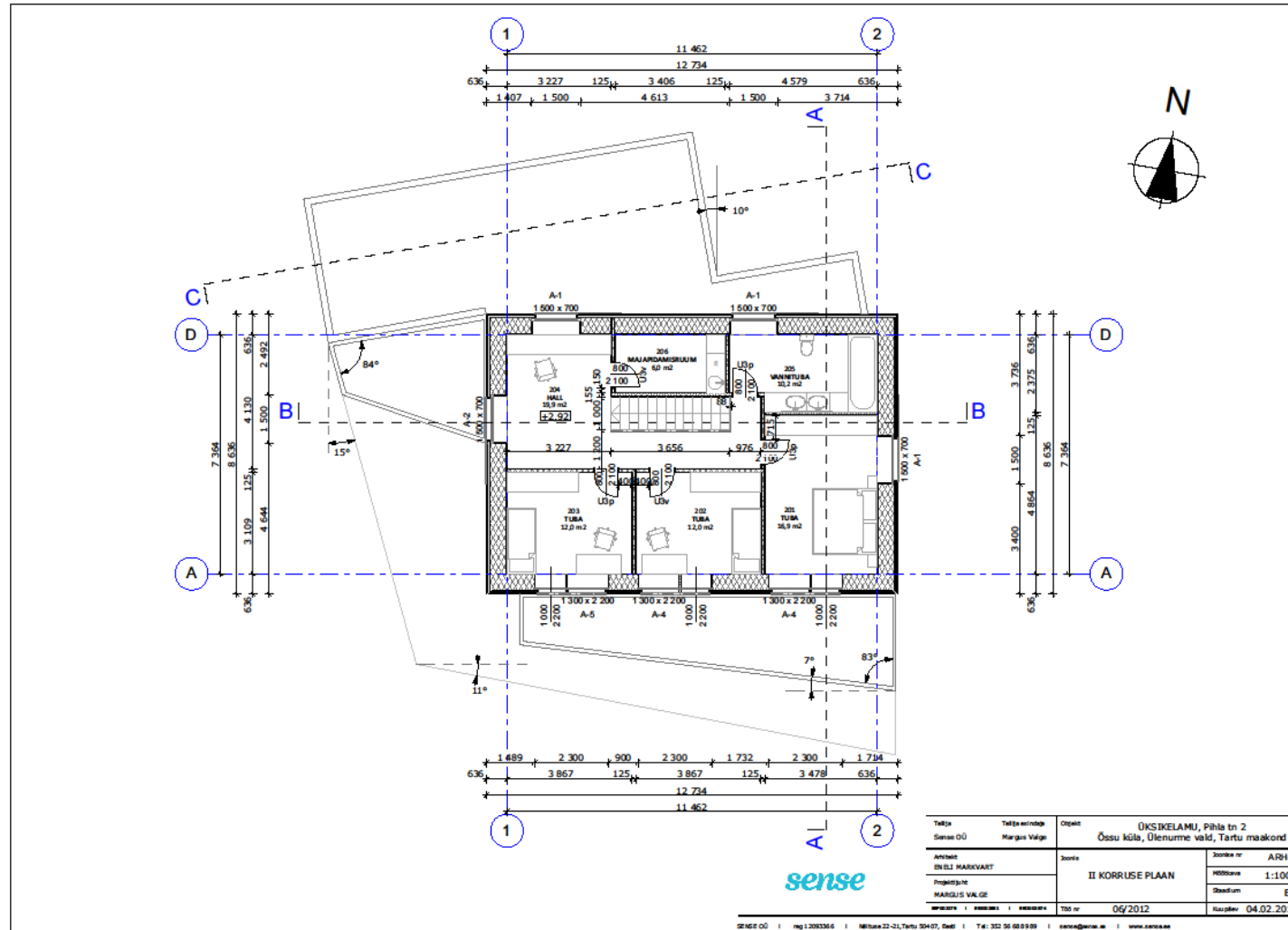
b) Vaade põhjaküljelt










c) Esimese korruse plaan



d) Teise korruse plaan



Lisa 2. Uuritava passiivmaja energiamärgise tõend

| ENERGIAARVUTUSEL PÕHINEV ENERGIAMÄRGIS | | |
|--|--|--|
| Hoone kategooria: ELAMUD Hoone kasutamise otstarve: Üksikolamu (11101) Soojusvarustus: lokaalkütte Energiaallikas: maagaas, elekter Telija: Hr. Margus Valge Address: Pihla tn 2, Üismurme vald, Tartumaa | | Ehitusaasta: 2013 Ehitisregistri kood: - Kõnetav pind, m²: 151,7 |
| Energiamärgis on koostatud: | | Hoone osiprojekti andmete põhjal |
| Energiasõhususarv (ET) | Vähe kulutav | Klass: |
| ET ≤ 120 |  | 101,0 |
| 121 ≤ ET ≤ 130 |  | |
| 131 ≤ ET ≤ 150 |  | |
| 151 ≤ ET ≤ 190 |  | |
| 191 ≤ ET ≤ 250 |  | |
| 251 ≤ ET ≤ 320 |  | |
| ET ≥ 321 |  | |
| | Palju kulutav | |
| Hoone energiasõhususarv *, kWh/(m²·a): | | 101 |
| Väljastamise kuupäev: 4.02.2013 | Kehitub kuni: - | |
| Märgise väljastaja: | | |
| <small>Kinnitan, et projekteeritud/rekonstrueeritud hoone vastab energiasõhususe miinimumnõuetele.</small> | | |
| Ettevõtte või FIE: Sense OÜ Näituse 22-21, 50407 Tartu, Eesti | | Reg nr: 12093366 |
| Vastutav spetsialist: Eneli Markvart | Allkiri: | |

* arvutatud energiasõhususarv on siseseadmetesse sisestatud energiakoguse ja kütustitegaarv järele

Lisa 3. Passiivmaja kohta kogutud andmed ja modelleerimiseks kasutatud sisendid hoone eluea (50. aasta) kohta

| | Materjali omadused | | | | | Elu- iga | Sisend SimaPro- sse | | Materjali nimetus Ecoinvent andmebaasis ja SimaPro-s |
|-------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-------------------|--------|-------------|------------------------|-----------|--|
| | Paksus | Pind- ala | Ruum- ala | Tihedus | Mass | | Kogus | Ühik | |
| | m | m ² | m ³ | kg/m ³ | kg | | | | |
| Hoone konstruktsioonid | | | | | | | | | |
| Rullmaterjal SBS (kahekordne) | | 417 | | 4,5 ¹ | 1 877 | 25 | 3 753 | kg | Bitumen sealing VA4, at plant/RER U |
| OSB | | 639 | 18,9 | 700 | 13 227 | 50 | 13 227 | kg | Oriented strand board, OSB III, production mix, at plant, 4,8% water content EU-27 S |
| Tselluvill | | 469 | 206 | 45 | 9 291 | 50 | 9 291 | kg | Cellulose fibre, inclusive blowing in, at plant/CH U |
| Puit | | | 7,6 | 650 | 4 947 | 50 | 7,6 | m3 | Sawn timber, softwood, raw, air dried, u=20%, at plant/RER U |
| Steico | 0,024 | 352 | 8,5 | 270 | 2 283 | 50 | 2 283 | kg | Wood wool, u=20%, at plant/RER U |
| Isover RKL-31 | 0,06 | 352 | 10,6 | 72 | 761 | 50 | 761 | kg | Glass wool mat, at plant/CH U |
| Isover KL-32 | | 107 | 9,8 | 21,8 ¹ | 2 340 | 50 | 2 340 | kg | Foam glass, at plant/RER U |
| Raudbetoon (maja) | 0,15 | 107 | 16,1 | | | 50 | 16,1 | m3 | Concrete, normal, at plant/CH U |
| Betoonplaat (panipaik) | 0,10 | 20 | 2,0 | | | 50 | 2,0 | m3 | Concrete, normal, at plant/CH U |
| EPS 200 Perimeeter Pluss | 0,40 | 107 | 42,9 | 31,0 | 1 331 | 50 | 1 331 | kg | Polystyrene, extruded (XPS), at plant/RER U |
| Kipskiudplaat | 0,025 | 497 | 12,43 | 1 150 | 14 289 | 50 | 14 289 | kg | Gypsum fibre board, at plant/CH U |
| Sammumüraplaat | 0,03 | 80 | 2,40 | 72 | 173 | 50 | 173 | kg | Glass wool mat, at plant/CH U |
| XPS 100mm | 0,1 | 20 | 2,00 | 30 | 60 | 50 | 60 | kg | Polystyrene, extruded (XPS), at plant/RER U |
| Metallroov | | 190 | | | | 50 | 190 | m2 | Cladding, crossbar-pole, aluminium, at plant/RER U |
| Puittalad (kõik kokku) | | | 0,35 | 650 | 228 | 50 | 228 | kg | Glue laminated beam, at plant, US PNW/kg/US |
| Laudis (kõik kokku) | 0,02 | 160,0 | 3,20 | 650 | 2 080 | 50 | 3,2 | m3 | Particle board, outdoor use, at plant/RER U |
| Ehituskile | | 20,0 | | 0,0014 | 0,03 | 50 | 0,03 | kg | PVC film E |
| Krohv | 0,04 | 84,9 | 3,40 | 2,8 | 238 | 25 | 476 | kg | Thermal plaster, at plant/CH U |
| Roomatt | 0,01 | 84,9 | 0,85 | 2,5 ¹ | 212 | 25 | 204 | kg | Straw, from straw areas, at field/CH U |
| Aknad ja ukсед | | | | | | | | | |
| Aknaklaas (3-kordne) | | 39,5 | | | | 25 | 79 | m2 | Glazing, triple (3-IV), U<0.5 W/m2K, at plant/RER U |

| | Materjali omadused | | | | | Elu- iga | Sisend SimaPro- sse | | Materjali nimetus Ecoinvent andmebaasis ja SimaPro-s |
|--|--------------------|----------------|----------------|-------------------|------|-------------|------------------------|------------|---|
| | Paksus | Pind- ala | Ruum- ala | Tihedus | Mass | | Kogus | Ühik | |
| | m | m ² | m ³ | kg/m ³ | kg | | | | |
| Aknaraam (puit-alumiinium) | 78,9 | 6,8 | | | | 25 | 14 | m2 | Window frame, wood-metal, U=1.6 W/m2K, at plant/RER U |
| Välisuks (puit) | | 2,2 | | | | 50 | 2,2 | m2 | Door, outer, wood-aluminium, at plant/RER U |
| Siseuksed (puit, 11 tk) | | 21,6 | | | | 50 | 21,6 | m2 | Door, inner, wood, at plant/RER U |
| Siseuks (puit-klaas, 1 tk) | | 2,1 | | | | 50 | 2,1 | m2 | Door, inner, glass-wood, at plant/RER U |
| Saunauks (klaas, 1 tk) | | 1,5 | | | 37 | 50 | 37 | kg | Flat glass, coated, at plant/RER U |
| Siseviimistlus | | | | | | | | | |
| Marmor lubikrohv | | 141 | 0,42 | | 141 | 17 | 423 | kg | Lime mortar, at plant/CH U |
| Lubivärv | 0,0005 | 39,6 | 0,02 | | 31,7 | 17 | 95,0 | kg | Alkyd paint, white, 60% in H2O, at plant/RER U |
| Kaseiinvärv | 0,0003 | 158 | 0,05 | | 23,7 | 17 | 71,1 | kg | Alkyd paint, white, 60% in H2O, at plant/RER U |
| Lubipahtel | 0,002 | 54,9 | 0,11 | | 54,9 | 17 | 165 | kg | Clay plaster, at plant/CH U |
| Tammeparkett | 0,015 | 129 | 1,93 | | | 25 | 3,9 | m3 | Three layered laminated board, at plant/RER U |
| Põrandaplaat | 0,008 | 33,2 | 0,27 | | 426 | 25 | 851 | kg | Ceramic tiles, at regional storage/CH U |
| Betoon | 0,1 | 4 | 0,44 | | | 50 | 0,44 | m3 | Concrete, normal, at plant/CH U |
| Vesi (pahtli, krohvi jaoks) | | | 72,7 | | 73 | | 218,0 | kg | Tap water, at user/RER U |
| Tehnosüsteemid ja energia tarbimine | | | | | | | | | |
| Päikesepaneelid | | 12,5 | | | | | 12,5 | m2 | Flat plate collector, at plant/CH/I U |
| Ventilatsioonisüsteem | | | | | | | 7 980 | m2 | Ventilation of dwellings, decentralized, 6 x 120 m3/h, steel ducts, without GHE/CH U |
| Soojusenergia tarbimine | | | | | | | 336 434 | kWh | Heat, at solar+gas heating, flat plate, one-family house, combined system/CH U/Õssu |
| Elektrienergia tarbimine | | | | | | | 174 489 | kWh | Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, < 1kV EU-27 S |
| Välditud energia | | | | | | | 41 120 | kWh | Heat, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW/RER U |

¹ tihedus on antud ruutmeetri kohta ehk ühikuga kg/m²

Lisa 4. Hoone eluea komponentide osakaal mõjukateooriate tulemustes

| Mõjukateooria | Osakaal mõjukateooria kogumõjust | | | |
|--|---|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Siseviimistlus | Konstruksioon | Tehnosüsteemid | Aknad ja ukсед |
| Kantseroogeensed ühendid | 1,4% | 71,3% | 19,7% | 7,6% |
| Mittekantseroogeensed ühendid | 2,0% | 58,8% | 29,3% | 9,9% |
| Anorgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | 5,8% | 30,7% | 58,2% | 5,3% |
| Ioniseeriv kiirgus | 1,1% | 23,2% | 71,8% | 3,9% |
| Osoonikihi hõrenemine | 0,1% | 89,5% | 10,2% | 0,2% |
| Orgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | 5,7% | 65,6% | 22,5% | 6,2% |
| Vesikeskkonna ökotoksilisus | 1,5% | 56,0% | 20,4% | 22,1% |
| Maapinna ökotoksilisus | 2,7% | 46,2% | 42,1% | 9,1% |
| Maapinna eutrofeerumine / hapestumine | 1,6% | 33,1% | 59,7% | 5,5% |
| Maakasutus | 29,4% | 54,3% | 1,2% | 15,1% |
| Vesikeskkonna hapestumine | 1,1% | 25,1% | 69,4% | 4,5% |
| Vesikeskkonna eutrofeerumine | 2,4% | 49,6% | 39,1% | 9,0% |
| Globaalne soojenemine | 1,2% | 34,7% | 59,6% | 4,5% |
| Taastumatud energiaallikad | 1,1% | 31,4% | 63,7% | 3,7% |
| Maavarade kaevandamine | 0,8% | 67,6% | 20,2% | 11,4% |

Lisa 5. Mõjuühikute teisendustegurid referentsühikutesse

| Mõjukategooria | Teisendustegur | Ühik |
|--|-----------------------|---------------------------|
| Kantserogeensed ühendid | 2,80E-06 | DALY / kg C2H3Cl eq |
| Mittekantserogeensed ühendid | 2,80E-06 | DALY / kg C2H3Cl eq |
| Anorgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | 7,00E-04 | DALY / kg PM2.5 eq |
| Ioniseeriv kiirgus | 2,10E-10 | DALY / Bq C-14 eq |
| Osoonikihi hõrenemine | 1,05E-03 | DALY / kg CFC-11 eq |
| Orgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | 2,13E-06 | DALY / kg C2H4 eq |
| Vesikeskkonna ökotoksilisus | 5,02E-05 | PDF*m2*yr /kg TEG water |
| Maapinna ökotoksilisus | 7,91E-03 | PDF*m2*yr /kg TEG soil |
| Maapinna eutrofeerumine / hapestumine | 1,04 | PDF*m2*yr /kg TEG SO2 eq |
| Maakasutus | 1,09 | PDF*m2*yr /m2 org. arable |
| Vesikeskkonna hapestumine | | |
| Vesikeskkonna eutrofeerumine | | |
| Globaalne soojenemine | 1 | kg CO2 eq/kg CO2 eq |
| Taastumatud energiaallikad | 1 | MJ primary/MJ primary |
| Maavarade kaevandamine | 1 | MJ primary/MJ surplus |

Lisa 6. Konstruksiooni sisendite osakaalu protsendid mõjukategoriatele

| Mõjukategooria | Rullmaterjal SBS | OSB | Tselluvill | Steico | Isover RKL-31 | Isover KL-32 | EPS 200 | Kipskiudplaat | Sammumüraplaat | XPS | Puittalad | Ehituskile | Krohv | Roomatt | Puit | Raudbetoon | Metallroov | Laudis |
|--|------------------|------|------------|--------|---------------|--------------|-------------|---------------|----------------|-----|-----------|------------|-------|---------|-------------|------------|-------------|--------|
| Kantserogeensed ühendid | 3,2 | 0,6 | 2,3 | 0,1 | 1,0 | 3,1 | 9,6 | 1,5 | 0,2 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,4 | 1,0 | 74,4 | 1,7 |
| Mittekantserogeensed ühendid | 5,0 | 1,0 | 3,9 | 0,2 | 1,4 | 2,2 | 2,0 | 2,6 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 0,0 | 0,3 | -2,0 | 0,3 | 4,0 | 77,2 | 1,2 |
| Anorgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | 6,6 | 5,6 | 8,4 | 0,3 | 1,5 | 3,6 | 5,5 | 6,8 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 1,4 | 3,3 | 54,5 | 1,6 |
| Ioniseeriv kiirgus | 10,0 | 0,8 | 9,1 | 0,4 | 7,5 | 14,1 | 3,9 | 4,1 | 1,7 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,8 | 3,0 | 42,7 | 1,7 |
| Osoonikihi hõrenemine | 0,5 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 93,4 | 0,2 | 0,0 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 1,1 | 0,0 |
| Orgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | 15,1 | 6,0 | 4,9 | 0,3 | 1,8 | 2,5 | 13,9 | 4,9 | 0,4 | 0,6 | 0,3 | 0,0 | 0,8 | 0,0 | 5,6 | 2,1 | 37,0 | 3,9 |
| Vesikeskkonna ökotoksilisus | 7,3 | 0,1 | 3,4 | 0,1 | 1,8 | 3,2 | 1,4 | 4,2 | 0,4 | 0,1 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | -0,7 | 0,3 | 1,6 | 75,6 | 1,0 |
| Maapinna ökotoksilisus | 10,5 | 0,5 | 6,5 | 0,2 | 1,5 | 3,4 | 1,7 | 10,9 | 0,3 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | -5,4 | 0,7 | 2,1 | 64,7 | 2,0 |
| Maapinna eutrofeerumine / hapestumine | 6,1 | 9,0 | 7,4 | 0,3 | 2,8 | 4,3 | 5,6 | 6,8 | 0,6 | 0,3 | 0,2 | 0,0 | 0,3 | 0,0 | 1,6 | 4,7 | 48,6 | 1,4 |
| Maakasutus | 0,9 | 0,0 | 10,2 | 1,6 | 0,2 | 1,0 | 0,1 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 22,8 | 41,5 | 0,3 | 17,2 | 2,6 |
| Vesikeskkonna hapestumine | 7,8 | 6,4 | 8,8 | 0,3 | 1,9 | 3,4 | 7,2 | 4,9 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,0 | 0,3 | 0,0 | 1,0 | 3,1 | 52,4 | 1,4 |
| Vesikeskkonna eutrofeerumine | 19,2 | 1,0 | 5,8 | 0,3 | 2,0 | 3,1 | 5,8 | 5,5 | 0,4 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,4 | 0,7 | 1,4 | 50,9 | 2,9 |
| Globaalne soojenemine | 6,1 | 13,8 | 4,8 | 0,2 | 1,6 | 5,2 | 11,0 | 5,9 | 0,4 | 0,5 | 0,1 | 0,0 | 0,5 | 0,0 | 0,6 | 6,8 | 41,2 | 1,4 |
| Taastumatud energiaallikad | 16,0 | 8,3 | 5,5 | 0,2 | 2,9 | 6,8 | 10,9 | 5,5 | 0,6 | 0,5 | 0,1 | 0,0 | 0,3 | 0,0 | 0,6 | 2,0 | 37,5 | 2,3 |
| Maavarade kaevandamine | 1,8 | 0,0 | 1,0 | 0,1 | 0,3 | 1,4 | 0,6 | 0,4 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 93,4 | 0,3 |

Lisa 7. Hoone eluea komponentide osakaal kahjukategooriate tulemustes

| Kahjukategooria | Osakaal kahjukategooria kogumõjust | | | |
|------------------------|---|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Siseviimistlus | Konstruksioon | Tehnosüsteemid | Aknad ja uksed |
| Inimtervis | 5,4% | 33,7% | 55,3% | 5,6% |
| Ökosüsteemi kvaliteet | 10,1% | 47,3% | 32,0% | 10,6% |
| Kliimamuutused | 1,2% | 34,7% | 59,6% | 4,5% |
| Maavarad | 1,1% | 31,5% | 63,7% | 3,7% |

Lisa 8. Impact 2002+ normaliseerimise- ja kaalumistegurid

| Kahjukategooria | Normaliseerimistegur | Kaalumistegur |
|------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Inimtervis | 141 | 1 |
| Ökosüsteemi kvaliteet | 7,30E-05 | 1 |
| Kliimamuutused | 0,000101 | 1 |
| Maavarad | 0,00000658 | 1 |

Lisa 9. Hoone komponentide ökopunktid ühe ruutmeetri kohta

| Kahjukategooria | Ühik | Kokku | Siseviimistlus | Konstruksioon | Tehno-süsteemid | Aknad ja uksed |
|------------------------------|-------------|--------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Kokku | Pt | 0,374 | 0,010 | 0,126 | 0,221 | 0,018 |
| Inimtervis | Pt | 0,104 | 0,006 | 0,035 | 0,058 | 0,006 |
| Ökosüsteemi kvaliteet | Pt | 0,013 | 0,001 | 0,006 | 0,004 | 0,001 |
| Kliimamuutused | Pt | 0,112 | 0,001 | 0,039 | 0,067 | 0,005 |
| Maavarad | Pt | 0,145 | 0,002 | 0,046 | 0,092 | 0,005 |

Lisa 10. Tulemuste väärtused, riskianalüüsiga leitud keskmine ja standardhälve

a) Mõjukategooriate riskianalüüsi tulemused

| Mõjukategooria | Ühik | Tulemus | Keskmine | Standardhälve | Madalaim% | Kõrgeim% | 2,50% | 97,50% |
|--|--------------|---------|----------|---------------|-----------|----------|---------|----------|
| Kantserogeensed ühendid | kg C2H3Cl eq | 10,9 | 10,9 | 1,8 | 24,5 | 41,2 | 8,1 | 15,1 |
| Mittekantserogeensed ühendid | kg C2H3Cl eq | 11,9 | 11,9 | 3,9 | 33,2 | 86,0 | 7,4 | 20,6 |
| Anorgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | kg PM2.5 eq | 0,9 | 0,9 | 0,1 | 12,0 | 16,0 | 0,8 | 1,1 |
| Ioniseeriv kiirgus | Bq C-14 eq | 44271,0 | 43941,0 | 28818,5 | 32,0 | 197,0 | 24854,2 | 108566,5 |
| Osoonikihi hõrenemine | kg CFC-11 eq | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,4 | 102,7 | 0,0 | 0,0 |
| Orgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele | kg C2H4 eq | 0,3 | 0,3 | 0,0 | 16,3 | 22,4 | 0,2 | 0,3 |
| Vesikeskkonna ökotoksilisus | kg TEG water | 72318,7 | 72424,9 | 16646,7 | 31,0 | 59,5 | 48233,0 | 111564,5 |
| Maapinna ökotoksilisus | kg TEG soil | 13834,2 | 13850,0 | 3379,8 | 31,6 | 58,4 | 9091,1 | 21049,9 |
| Maapinna eutrofeerumine / hapestumine | kg SO2 eq | 18,6 | 18,6 | 1,4 | 12,3 | 16,4 | 16,2 | 21,5 |
| Maakasutus | m2org.arable | 47,6 | 47,7 | 13,5 | 37,0 | 74,6 | 28,6 | 79,1 |
| Vesikeskkonna hapestumine | kg SO2 eq | 6,5 | 6,5 | 0,5 | 12,0 | 16,2 | 5,7 | 7,5 |
| Vesikeskkonna eutrofeerumine | kg PO4 P-lim | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 50,4 | 274,7 | 0,1 | 0,4 |
| Globaalne soojenemine | kg CO2 eq | 1110,8 | 1110,0 | 67,8 | 10,9 | 12,9 | 987,3 | 1251,8 |
| Taastumatud energiaallikad | MJ primary | 21946,6 | 21869,5 | 1471,0 | 11,6 | 14,3 | 19258,2 | 24893,7 |
| Maavarade kaevandamine | MJ surplus | 46,0 | 46,2 | 9,3 | 34,2 | 48,6 | 30,0 | 67,7 |

b) Kahjukategooriate riskianalüüsi tulemused

| Kahjukategooria | Ühik | Tulemus | Keskmine | Standardhälve | Madalaim% | Kõrgeim% | 2,50% | 97,50% |
|-----------------------|------------|---------|----------|---------------|-----------|----------|---------|---------|
| Inimtervis | DALY | 0,0007 | 0,0007 | 0,0001 | 12,6 | 17,2 | 0,0006 | 0,0009 |
| Ökosüsteemi kvaliteet | PDF*m2*yr | 184,4 | 184,5 | 31,3 | 24,7 | 42,2 | 136,2 | 257,4 |
| Kliimamuutused | kg CO2 eq | 1110,8 | 1110,0 | 67,8 | 10,9 | 12,9 | 987,3 | 1251,8 |
| Maavarad | MJ primary | 21992,7 | 21915,7 | 1473,9 | 11,5 | 14,3 | 19299,5 | 24946,7 |

c) Kogu hoone riskianalüüsi tulemused ökopunktides

| Kahjukategooria | Ühik | Tulemus | Keskmine | Standardhälve | Madalaim% | Kõrgeim% | 2,50% | 97,50% |
|--------------------------------|------|---------|----------|---------------|-----------|----------|-------|--------|
| 1 m ² keskkonnamõju | Pt | 0,37 | 0,37 | 0,024 | 0,04 | 0,05 | 0,33 | 0,42 |

Lisa 11. Konstruktsiooni sisendite osakaalud ökopunktides (%)

| | Rullmaterjal SBS | OSB | Tselluvill | Steico | Isover RKL-31 | Isover KL-32 | EPS 200 | Kipskiudplaat | Sammumüraplaat | XPS | Puittalad | Ehituskile | Krohv | Roomatt | Puit | Raudbetoon | Metallroov | Laudis |
|---------------------------------------|------------------|-----|------------|--------|---------------|--------------|---------|---------------|----------------|-----|-----------|------------|-------|---------|------|------------|------------|--------|
| Konstruktsiooni sisendite osakaal (%) | 9,7 | 8,6 | 5,9 | 0,2 | 2,0 | 5,2 | 9,1 | 5,8 | 0,5 | 0,4 | 0,1 | 0,0 | 0,3 | 0,2 | 1,5 | 3,8 | 44,9 | 1,8 |

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Hanna Soe (sünnikuupäev: 28.12.1990),

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Passiivmaja olelusringi hindamine Eestis asuva eramu näitel“, mille juhendaja on Janika Laht,
 - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 18.05.2016