



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu Kollidž

**KALKULAATOR SOOJUSTUSMATERJALIDE
KESKKONNATEADLIKUKS VALIKUKS**

**AN ASSESSMENT TOOL FOR ENVIRONMENTALLY
CONSCIOUS SELECTION OF THERMAL INSULATION
MATERIALS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Jan Markus Raudik

Üliõpilaskood 182962NAEM

Juhendaja: Jane Raamets M.SC

Tartu 2020

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.

“25” mai 2020

Autor: Jan Markus Raudik

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“25.”mai 2020

Juhendaja: Jane Raamets

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

„25” mai 2020

Kaitsmiskomisjoni esimees: Annely Kuu

/ allkirjastatud digitaalselt /

TalTech Instituudi nimetus

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Jan Markus Raudik, 182962NAEM
Õppekava, peeriala: NAEM06/18 - Tööstusökoloogia
Juhendaja(d): Lektor Jane Raamets, +372 55 61 33 44

Lõputöö teema:

(eesti keeles) **KALKULAATOR SOOJUSTUSMATERJALIDE KESKKONNA-
TEADLIKUKS VALIKUKS**

(inglise keeles) **AN ASSESSMENT TOOL FOR ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS
SELECTION OF THERMAL INSULATION MATERIALS**

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda ülevaade ehitusmaterjalide ökoloogilisest jalajäljest, soojustamisest, soojustusmaterjalidest jm antud temaatikaga seonduvatest olulistest aspektidest.
2. Soojustusmaterjalide keskkonnateadliku valiku meetodika edasiarendamine.
3. Arendada välja kalkulaatorrakendus, mis aitab valida soojustusmaterjale keskkonnateadlikumalt.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse läbitöötamine, töö eesmärgiga seotud valdkondadest ja põhimõistetest ülevaate andmine.	30.11.2019
2.	Metoodika väljatöötamine, kalkulaatori arendamine ja testimine.	15.02.2020
3.	Tulemuste analüüs ja arutelu.	31.03.2020

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "25." mai_2020 a

Üliõpilane: Jan Markus Raudik ".....".....202...a
/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Jane Raamets ".....".....202...a
/allkirjastatud digitaalselt/

Programmijuht: ".....".....202...a
/allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

EESSÕNA	5
Lühendite ja tähiste loetelu	6
SISSEJUHATUS	7
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	10
1.1. Ehitusmaterjalide ökoloogiline jalajälg	10
1.2. Soojustuse funktsioon ja materjalide omadused	16
1.3. Soojustusmaterjalide kasutamise keskkonnamõju	26
1.4. Materjalivaliku kriteeriumid, olemasolevad tehnilised abivahendid ja arendusprotsessi meetodika	36
2. KALKULAATORI ARENDUSE METOODIKA	41
2.1. Soojustusmaterjali valikukontseptsioon ning kalkulaatorrakenduse tööpõhimõtte	41
2.2. Materjalispetsiifilised sisendid ning nende sidumine süsteemi andmetega	49
2.3. Rakenduse arendusprotsess ning demoversiooni väljatöötamine	51
2.4. Rakenduse kujundus, testimine, täiustamine ja praktiline kasutamine	57
3. TULEMUSED JA ARUTELU	62
KOKKUVÕTE	67
SUMMARY	70
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	74
LISAD	87
Lisa 1 Kalkulaatori tööpõhimõtte skemaatiline arhitektuur	87
Lisa 2 Kalkulaatorrakenduse andmeväljad koos selgitustega	88
Lisa 3 Soojustusmaterjalide nimekiri	89
Lisa 4 Riikide energiatootmise emissioonifaktorid 2019	91
Lisa 5 Saastekvoodi (EAU) börsihind 2015 - 2020	92
Lisa 6 Materjalide sisendenergia kategooriate lõikes MJ/kg	93
Lisa 7 Kalkulaatori tööpõhimõtte meetodika testi tulemused	94
Lisa 8 Kalkulaatori testimise tulemused	95
Lisa 9 Hoonete uued energiamärgised ja energiatõhususe arvud	98
Lisa 10 Soojustusmaterjalide keskkonnateadliku valiku veebileht	99

EESSÕNA

Ehitussektor on ressursimahukuse, materjalide kasutuse intensiivsuse, energiatarbimise ning jäätmete hulga tõttu üks suurimad keskkonda koormavaid valdkondi. Ehitustegevus koos hoonete ja rajatistega moodustab väga suure osa inimtegevuse ökoloogilisest jalajäljest. Ehitusmaterjalide tootmine on üks energiamahukamaid ning saastavamaid valdkondi. Hoonete tõhusam soojustamine aitab vähendada nende püstitamise ja kasutuse energiakulu ning saastemahtu. Soojustusmaterjalide valik on üks ehitiste keskkonnakoormuse alandamise ja hoonete energiatõhususe tõstmise võtmeküsimustest.

Antud magistr töö annab ülevaate ehitusmaterjalide tootmise ja kasutamise keskkonnamõjust ja hoonete soojustamisega seonduvatest aspektidest ning selle raames on loodud kasutajasõbralik kalkulaator, mis aitab valida soojustusmaterjale keskkonnateadlikumalt. Töö koosneb kolmest osast, millest esimene käsitleb ehitusektori ja soojustusmaterjalide ökoloogilise jalajäljega seonduvaid olulisi tahke, teine kirjeldab kalkulaatori arenduse ja testimise protsessi ning kolmas sisaldab töö analüüsi ja tulemuste arutelu. Magistr töö raames loodud soojustusmaterjalide keskkonnateadliku valiku kalkulaator põhineb osaliselt autori poolt 2018. aastal valminud bakalaureusetöö käigus välja töötatud kontseptuaalsetel alustel, mida on töö käigus olulisel määral edasi arendatud.

Märksõnad: ökoloogiline jalajalg, hoonete soojustamine, kalkulaator, soojustusmaterjali olelusring, soojustusmaterjali keskkonnateadlik valik, magistr töö.

Lühendite ja tähiste loetelu

- EEA - Euroopa Keskkonnaagentuur (*European Environment Agency*)
- IEA - Rahvusvaheline Energiaagentuur (*International Energy Agency*)
- EBRD - Euroopa Rekontstruktsiooni- ja Arengupank (*European Bank for Reconstruction and Development*)
- EE - sisendenergia (*embodied energy*)
- EC - materjali süsinikuemissioon (*embodied carbon*)
- EPS - paisutatud polüstüreen (*expanded polystyrene*)
- EAU - saastemissiooni kvoot (*carbon emission allowance*)
- EPD – toote keskkonnasertifikaat (*environmental product declaration*)
- GW - klaasvill (*glass wool*)
- ISO - Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon (*International Organization for Standardization*)
- PUR - polüuretaan (*polyurethane*)
- PIR - polüisotsüanuraat (*polyisocyanurate*)
- MW - klaasvill (*glass wool*)
- NIM - nanotehnoloogial põhinev soojustusmaterjal (*nano insulation material*)
- SW - kivivill (*stone wool*)
- SW - kivivill (*stone wool*)
- XPS - ekstrudeeritud polüstüreen (*extruded polystyrene*)
- VIP - vaakumtehnoloogial põhinev soojustuspaneel (*vacuum insulation panel*)
- ÜRO – Ühinenud Rahvaste Organisatsioon (*United Nations Organization*)
- UNEP – ÜRO Keskkonnaprogramm (*United Nations Environment Programme*)
- UNIDO - ÜRO Tööstusarengu Organisatsioon (*United Nations Industrial Development Organization*)
- IPCC – Valitsustevaheline kliimamuutuste paneel (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)

SISSEJUHATUS

Inimtegevuse keskkonnamõju ja kliimamuutusega seonduvad teemad on jätkuvalt väga aktuaalsed. Vaatamata keskkonnateadlikkuse tõusule on kasvule orienteeritud maailmamajanduse surve suuremale ressursside kasutamisele pidev ja pöördumatu. Rahvusvaheline üldsus nõuab üha jõulisemalt Pariisi kliimaleppe täitmist ning Euroopa Komisjon on seadnud ambitsioonika eesmärgi muuta Euroopa 2050. aastaks kliimanutraalseks (European Commission, 2019). Modelleeritud kliimamuutust neutraliseerivad meetmed on ka oluline osa ÜRO säästva arengu eesmärkidest ning need on suunatud inimtegevuse ökoloogilise jalajälje vähendamisele (Independent Group of Scientists, 2019).

Loodusvarade vastutustundlik kasutamine, ökoloogilise tasakaalu säilitamine ja inimtegevuse poolt tekitatud saastekoguse optimeerimine on jätkuvalt kriitilise tähtsusega küsimus, et parandada ka tulevastele põlvkondadele elamisväärne keskkond (European Commission, 2011). Ehitusektor koos hoonete ja rajatistega on ressursside kasutuse ning materjalide tarbimise ja jäätmete hulga tekitamise poolest üks enim keskkonda koormavaid valdkondi (European Commission, 2018). Täna sel päeval tarbib ehitussektor veidi alla poole kogu toodetud primaarenergiast (Totland jt, 2019), ligikaudu kolmandiku mineraalsetest ressurssidest ja viiendiku põhjaveest (Chattaraj jt, 2016; Taffese & Abegaz, 2019). Antud valdkond on ka suuruselt teine ohtlike jäätmete tekitaja, paisates õhku veidi alla poole kasvuhoonegaaside koguemissioonist (Saadatian jt, 2016; Rodrigues jt, 2018).

Finantseerimistingimuste lõdvenemisest tingitud krediitpakkumise kasv ning riiklike abiprogrammide raames pakutavad toetused on suurendanud viimasel dekaadil märgatavalt ehitustegevuse mahtu (UNEP, 2019) ja sellega on kaasnenud sektori negatiivse keskkonnamõju tõus (Islam jt, 2019). Ehitustegevuses on väga oluliseks tööloiguks hoonete soojustamine. Välispiirete soojustamine aitab hoonete kasutusaja jooksul kokku hoida nende kütmiseks ja jahutamiseks vajaminevat energiat, kuid samas on tegemist ka väga energia- ja jäätmemahuka materjalikategooriaga ehituses (Pulidindi & Pandey, 2018). Kuna soojustamisel on esimeseks valikuks jätkuvalt kunstmaterjalid, siis käesolevas töös uuritakse võimalusi selle praktika muutmiseks.

Regulatiivne surve hoonete energiatõhususe parandamisele ning materjalide efektiivsemale kasutamisele on suunanud protsesse nii materjalitööstuses kui ka ehitussektoris. Soojustamise tehnoloogiline pool on viimastel aastatel oluliselt edenenud ja materjalide valik on suurenenud. Turule on tulnud uusi ja efektiivseid

soojustusmaterjale ning nende arendustöös on arvestatud ka keskkonnamõju mõõdet. Sünteetiliste materjalide puhul on pandud põhiohk nende isolatsioonivõime ja taaskasutusvõimaluste parandamisele. Positiivsed arengud on toimud ka loodusliku päritolu soojustuslahenduste osas.

Vaatamata sellele, et tootjad on hakanud üha enam pakkuma looduslikke ning taaskasutatud toorainest valmistatud soojustusmaterjale, domineerivad turul jätkuvalt energiamahukalt toodetud sünteetilised soojustusmaterjalid. Viimasel ajal on hakatud märksa rohkem teadvustama materjalide kasutamise negatiivset mõju keskkonnale. Lisaks ehitus- ja soojustehnilistele omadustele on oluline ka see, et materjalide kasutamine kahjustaks võimalikud vähe loodust ning tekitaks minimaalselt probleemseid jäätmeid.

Reeglina valitakse hoone soojustamise materjal lähtuvalt selle hinnast ning materjali kasutamisega kaasnev keskkonnamõju jäetakse tähelepanuta. Sageli ollakse alternatiivsete lahenduste valikul raskustes ning seda toimingut aitaks märgatavalt lihtsustada mõni uudne, praktiline ja kasutajasõbralik tehniline abivahend.

Käesoleva magistr töö eesmärgiks on välja arendada kasutajasõbralik kalkulaator, mis aitab valida soojustusmaterjale keskkonnateadlikumalt.

Eesmärgi täitmiseks seatud uurimisülesanneteks on anda erialakirjanduse põhjal ülevaade probleemi taustast, ehitusmaterjalide ökoloogilisest jalajäljest, soojustamisest, soojustusmaterjalidest jm valdkonnaga seonduvatest aktuaalsetest aspektidest. Lisaks otsitakse kinnitust töö lähteülesande püstitamise käigus sõnastatud hüpoteesidele, milleks on:

- Soojustusmaterjalide keskkonnateadliku valiku lihtsustamiseks on võimalik luua kalkulaator, mis arvestab automaatselt materjali kasutamise keskkonnamõju.
- Sarnaste soojustehniliste omadustega materjalide kasutamise keskkonnamõju erineb olulisel määral ning alati on võimalik valida alternatiivide hulgast kõige keskkonnasõbralikum materjal.
- Arvestades soojustusmaterjalide ökoloogilist jalajälge, võivad loodusõbralikum materjalid olla sünteetilistele materjalidele võrdväärseks alternatiiviks.
- Sünteetiliste, mineraalsete ja looduslike materjalide keskkonnamajanduliku maksumuse erinevus väheneb, kui arvestada materjali kasutamisega kaasneva ökoloogilise jalajälje suurust kogu soojustustoote elutsükli jooksul.

Magistritöö koosneb kolmest osast. Esimene peatükk annab ülevaate ehitusektori ja materjalide kasutamise keskkonnamõjuga seonduvatest olulistest aspektidest, hoonete soojustamisest ja selle tähtsusest, soojustusmaterjalide tehnilistest omadustest ning nende kasutamisega kaasnevast keskkonnamõjust. Teine osa keskendub soojustusmaterjalide keskkonnateadliku valiku meetodika arendamisele ning vastava kalkulaatori loomisele ja selle protsessi tehnilisele kirjeldamisele. Selles moodulis viiakse läbi ka demoversiooni praktiline rakendamine ja testimine ning esitatakse tulemused. Kolmas osa hõlmab testide tulemuste analüüsi, töö käigus tõstatunud probleemide selgitamist, tulemuste arutelu. Selles sektsioonis kommenteeritakse ka töö käigus välja tõotatud meetodika ja kalkulaatori puudusi ning vaadeldakse arendatava tööriista laiemaid kasutusvõimalusi ehitusmaterjalide valiku protsessis.

Ehitussektori ja hoonete keskkonnamõjuga seonduv teemadering on aktuaalne, nüansitikas, huvitav ja mitmetahuline. Tulenevalt käesoleva magistritöö teemast ning eesmärgist hoitakse selle fookust siiski läbivalt soojustusmaterjalidel ja nende valikut mõjutavatel aspektidel. Muu info energiavaldkonna, ehitusturu, jäätmemajanduse arengute jm kohta on esitatud töös taustana laiemas konteksti loomiseks, et lugejal oleks lihtsam näha seoseid ning mõista antud temaatika olulisust.

Autor kasutab APA viitamissüsteemi ning magistritöös esitatud graafika ja arvutuste koostamisel MS Office tarkvarapaketi erinevaid programme ning nendes kätkevaid tehnilisi ja graafilisi võimalusi.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Ehitusmaterjalide ökoloogiline jalajälg

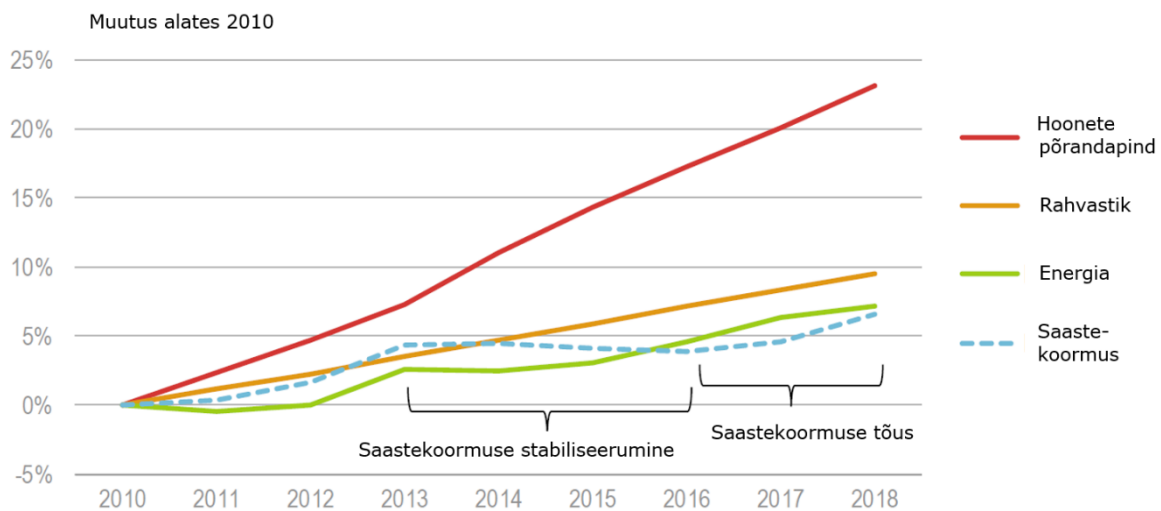
Ehitussektoril on märkimisväärne ja kasvav keskkonnajalajälg, mida defineeritakse energiakasutuse, süsinikdioksiidi heitkoguste ja tekitatud jäätmete mahu järgi. Globaalses plaanis on ehitus endiselt üks suurima keskkonnakoormusega valdkondi. Teostatud uuringute kohaselt tarbivad paljudes riikides ehitussektor ja ehitised kokku 40% kogu toodetud primaarenergiast (Gibson jt, 2012; Asdrubali jt, 2015; Totland jt, 2019), 30% mineraalsetest ressurssidest ning 20% põhjaveest (Syngros jt, 2017). Antud sektori poolt emiteeritakse 40% kogu kasvuhoonegaasidest (Saadatian jt, 2016; Rodrigues jt, 2018), tekitatakse 30% tahketest jäätmetest ning ca 20% kogu veereostusest (Chattaraj jt, 2016). Ka ligikaudu kümne aasta taguste uuringute kohaselt tarbiti ehitussektori poolt energiat kogu maailmas 30-40% koguergiast ning selle valdkonna poolt paisati atmosfääri samuti ca 40-50% kasvuhoonegaasidest (Papadopoulos, 2007; Asif jt, 2007).

Euroopa keskkonnaagentuuri andmetel on maailma rahvaarv viimase 70 aasta jooksul kolmekordistunud 7,6 miljardini, linnades elavate inimeste arv on neljakordistunud 4 miljardini, globaalne majanduse kogutoodang on suurenenud 12 korda ning energia tarbimine on kasvanud selle aja jooksul viis korda. Prognooside kohaselt on oodata järgmise 30 aasta jooksul rahvaarvu kasvu 10 miljardini, globaalne ressursside kasutus peaks kahekordistuma aastaks 2060 ning juba aastaks 2040 on oodata energianõudluse kasvu 30% (EEA, 2020b).

IEA ja UNEP poolt avaldatud viimase uuringu järgi peaks hooned ja ehitussektor olema globaalsete kliimaeesmärkide täitmise põhifookuses, kuna see valdkond tarbib kokku 36% maailmas toodetud energiast ning annab 39% saasteainete emissioonidest (UNEP, 2019). Nendel andmetel moodustab puhtalt ehituse ja materjalide panus globaalsest kogusaastest 11% ning ülejäänud osa on seotud hoonete eksploatatsiooniga. Samas on Põhjamaades hoonetega kaasneva kasvuhoonegaasi emissiooni osas olukord parem. Näiteks Rootsis tarbib hoonete ja kinnisvarasektor samuti 40% energiast, kuid tänu suhteliselt suurele taastuvenergia kasutamise osakaalule on selle segmendi saasteemissiooni määr ainult 15% (Ramírez-Villegas jt, 2019).

Euroopa Liit on võtnud prioriteediks vähendada ehitussektori kasvuhoonegaaside heitkogust, kuna antud sektor tarbib 40% Euroopas toodetud energiast, millest suurem

osa kulub majade soojustamiseks (Directive 2010/31/EU). Ehitussektoril on suur potentsiaal tuua efektiivsema soojustamise kaudu energiatarbimisse pööre ning liikuda kiiremas tempos keskkonnasõbralikuma ja säästlikuma tarbimise poole (Didier-Noaro jt, 2016).



Joonis 1.1 Hoonete ehituse ja keskkonnamõju areng rahvastiku kasvu foonil perioodil 2008 - 2018 (UNEP, 2019).

Joonisel 1.1 esitatud info kohaselt on ehitustegevus olnud alates viimasest suuremast globaalsest majanduslangusest väga aktiivne. Hoonete põrandapinna suhteline kasv on ületanud nii rahvastiku kui ka energiatootmise kasvu. Positiivne on, et üleilmne saastekoormuse kasvutrend on olnud tagasihoidlikum ning perioodil 2013-2016 toimus emissioonide mahu stabiliseerumine. Kahjuks on viimastel aastatel saastekoormus pööranud taas tõusule.

Valitsusvahelise kliimamuutuste rühma IPCC hinnangul hakkab kliima soojenemine pöördumatult kiirenema, kui kasvuhooonegaaside heitkogused 2030. aastaks oluliselt ei vähene. Kuna hoonete ja ehitussektori (sh ehitusmaterjalide tootmine) CO₂ saastemaht oli 2018. aastal 11 gigatonni, mis moodustas 39% ülemaailmsest energiaga seotud heitkogusest, siis kliimaeesmärkide täitmiseks on väga oluline pöörata suurt tähelepanu ka arengutele antud sektoris (Yang jt, 2020). Hoonetega on seotud 32% kogu maailma energiatarbimisest ning nende energiatarbimise muutmiseks on potentsiaal saavutamaks eesmärki vähendada aastaks 2050 hoonete poolt tarbitavast energiast tulenevat saasteemissiooni mahtu 80-90% (Masson-Delmotte jt, 2018).

Inimese poolt rajatud ehitistel on mastaapne mõju looduskeskkonnale läbi ehitusprotsessi, eksploatatsiooni ja materjalide ökoloogilise jalajälje. Hinnanguliselt

tarbitakse tänasel päeval maailmas kokku ligikaudu 10 miljardit tonni ehitusmaterjale, mis teeb ca 1,5 tonni inimese kohta (Sabnis jt, 2015).

2017. aasta andmetel oli globaalse ehitusturu rahaline maht kokku 9,8 triljonit €, millest Euroopa osa oli 2,4 triljonit € ehk ca 24% (Gibbons & Patel, 2020). 2018. aastaks oli see näitaja tõusnud mahuni 11,5 triljonit € ja hoonete energiatõhususe tõstmiseks tehtud investeeringute mahuks oli kokku 4,2 triljonit €, millest puhtalt hoonete välipiiretega seotud ehitustööde maksumus oli ca 70 miljardit € (IEA, 2019).

ÜRO Tööstusarengu Organisatsiooni (UNIDO) andmetel on üleilmne hoonete soojustamisega seotud ehitustööde turu maht viimase 5 aastaga kasvanud 60% mahuni 61 miljardit € (UNIDO, 2017) ning turul domineerivad jätkuvalt energiamahukalt toodetud materjalid. Puhtalt soojustusmaterjalide turu globaalseks mahuks 2018. aastal hinnati erinevate allikate alusel 23-26 miljardit € ning Euroopa turuosa jäi 45% juurde. Jaotus elukondlike- ning ärihoonete soojustamise vahel oli vastavalt 55% ja 45%. Rääkides aga hoonete soojustamise turu valdkonnapõhisest jaotusest, oli suurimaks kategooriaks seinte soojustamine (47%) ning sellele järgnesid katused (37%) ja põrandad (15%). Naftasaadustel baseeruvate soojustustoodete müügi turuosa oli 45% ning 40% tuli mineraalsete materjalide müügist (Pulidindi & Pandey, 2018). Ligikaudu pool maapõuest ammutatud maavaradest leiab peale töötlemist kasutust ehitusmaterjalidena (Taffese & Abegaz, 2019). Tänu ringmajanduse arengule vähenes perioodil 2007-2017 Euroopa Liidus erinevate materjalide kasutus inimese kohta aastas 19% kahanedes 13,6 tonnini, mis teeb materjalikasutuseks ca 37 kg päevas (EEA, 2020a).

EBRD andmetel genereeriti 2017. aastal maailmas ehitus- ja lammutusjätmeid inimese kohta päevas 1,68 kg, mis tegi selle jäätmeliigi kogumahuks aastas 4,6 miljardit tonni (Kaza jt, 2018). Ehitus- ja lammutusprahi moodustavad reeglina need jätmed, mis tekivad hoone või selle osade rajamise, lammutuse, renoveerimise või nende taastamise või ümberehituse protsessi käigus. Valdavalt on need ehitusmaterjalide jäägid ning hoonete lammutamisel tekkivad sorteerimata rusud. Ehitus- ja lammutusjätmed on üks suurimaid segmente üleilmses jäätmevoos ning mitmed uuringud on kinnitanud, et selle jäätmekategooria panus on jõudnud 30-40% kogu tahketest jäätmetest tänu üha suurenevatele ehitusmahtudele, mille on põhjustanud eelkõige linnastumine (Islam jt, 2019).

Ehitus ja lammutusjätmed on mahu poolest suurim jäätmekategooria Euroopa Liidus, moodustades 30% kogu inimtekkelistest jäätmetest ning tänu suurtele pingutustele suudetakse tänaseks juba ca 70% nendest jäätmetest ümber töödelda ja taaskasutada (European Commission, 2016). Ehitussektor on suuruselt teine ohtlike jäätmete tekitaja

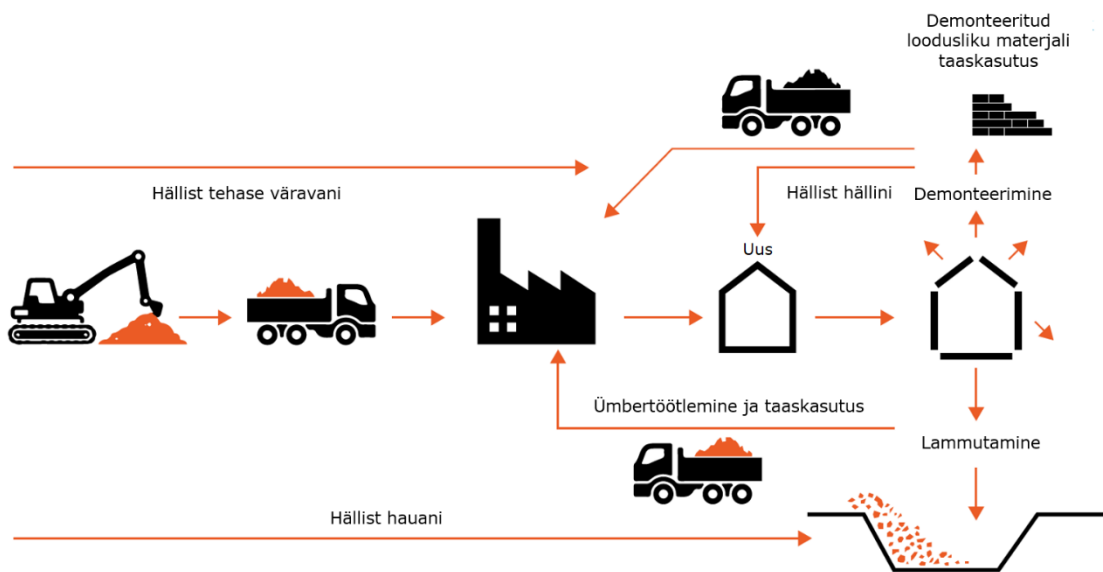
(Wilts jt, 2016). Euroopa Keskkonnaagentuuri andmetel jäi 2019. aastal ehitus- ja lammutusjätmete kogumaht Euroopa Liidus (EU-28) suurusjärku 374 miljonit tonni (va teisedatud pinnas), millest ligikaudu 30% ei lähe ümbertöötlemisele ning ladestatakse (EEA, 2020b).

Ressursi- ja jäätmemahuka põlevkivienergeetika domineerimise tõttu on Eestis jäätmete tekke statistika tugevalt moonutatud. Põlevkivijätmete osakaaluks on ligikaudu 80% kogu jäätmetekkest ning antud juhul moonutab see olulisel määral jäätmevaldkondade proportsioone. Seetõttu on teiste riikidega võrreldava pildi saamiseks mõistlik antud valdkonna mõju välja taandada. Juhul kui elimineerida kogu jäätmetekkest põlevkivijätmed, siis ehitus- ja lammutusprahi osakaaluks kujunes samuti 40% kogujätmetest, mis moodustab ka Eestis ühe suurimatest jäätmekategooriatest. Ehitus- ja lammutusjätmete taaskasutuse osakaal Eestis ületab veidi EL keskmist, jäädes nende kogumassist 72% juurde (Riigi Jäätmekava 2014–2020). Ilma põlevkivienergeetika mõjuta ei erine jäätmete valdkonnapõhine teke Eestis oluliselt teistest riikidest ning ka meil on ehitusvaldkonna poolt tekitatav keskkonnakoormus kogu jäätmekäitlussüsteemile suur. Euroopa Keskkonnaagentuuri andmetel on Eestis materjalide kasutustõhusus euroala keskmisega võrreldes oluliselt madalam (0,45 €/kg vs 1,98 €/kg) ning materjalide kasutus elaniku kohta oluliselt kõrgem (23,3 vs 13,1 tonni elaniku kohta) (EEA, 2016).

Keskkonnaministeeriumi andmetel tekitati 2013. aastal Eestis ehitus- ja lammutusjätmeid kokku 1,95 miljonit tonni (värskemad andmed ei ole hetkel veel avaldatud). Samas taaskasutuse suhtarvu arvestuse aluseks olevate jäätmekategooriate kogumaht oli Keskkonnaagentuuri andmetel 851 tuhat tonni. Suur osa ehitus- ja lammutusjätmetest taaskasutati teedehituses ning pinnasetäitena muudes ehitusprojektides. Puidujätmeid kasutati osaliselt küttegaanulite pressimiseks ning klaasijääkidest valmistati soojustusmaterjale. Ehitus- ja lammutusjätmete tekkekogus on sõltuvuses ehitustööde mahust, mille muutus omakorda korreleerub üldise majanduskonjunktuuriga (Keskkonnaministeerium, 2015). Eelpool esitatud faktidele tuginedes saab järeldada, et ehitussektor tervikuna on jätkuvalt üks suurimaid ökoloogilise jalajäljega valdkondi ka Eestis ning selle keskkonnakoormuse alandamine on tulevikus ühiskonnale tõsine väljakutse.

Üheks enam levinud ja praktikas kasutatavaks materjalide keskkonnamõju hindamise meetodiks on olelusringi käsitlus (*LCA*), mille sisuks on toote tegeliku maksumuse kindlaksmääramine arvestades toote poolt tarbitavat energiat mingis konkreetsetes etapis või kogu selle eluea jooksul (Su jt, 2016; Ding, 2014). Olelusringi hindamine on populaarne toodete ja protsesside ökoloogilise jalajälje hindamise meetodika, mis on

kasutuses alates kaheksakümnendate algusest. Nimetatud meetodika uurib valitud referentsüsteemide keskkonnamõju kas alates hällist hauani või hällist väravani (Antoniadou jt, 2015). See kontseptsioon aitab võrrelda erinevaid alternatiive, mis võimaldavad keskkonnamõju seisukohalt teha kõige otstarbekamaid materjalivalikuid (Haynes, 2013; Morini jt, 2019). Olelusringi analüüsi meetodika on sätestatud rahvusvahelise standardiga ISO 14040, mis aitab süsteemselt hinnata toote või protsessi keskkonnamõju (Rodrigues jt, 2018). Meetodika läbiviimise protseduure on detailselt kirjeldatud ISO 14040 ja 14044 standardites (Olelusringi hindamine, 2006). Ehitusmaterjali olelusringi kontseptsioonist annab kokkuvõtliku ülevaate joonis 1.2.



Joonis 1.2 Ehitusmaterjalide olelusring (UCL Engineering, 2018)

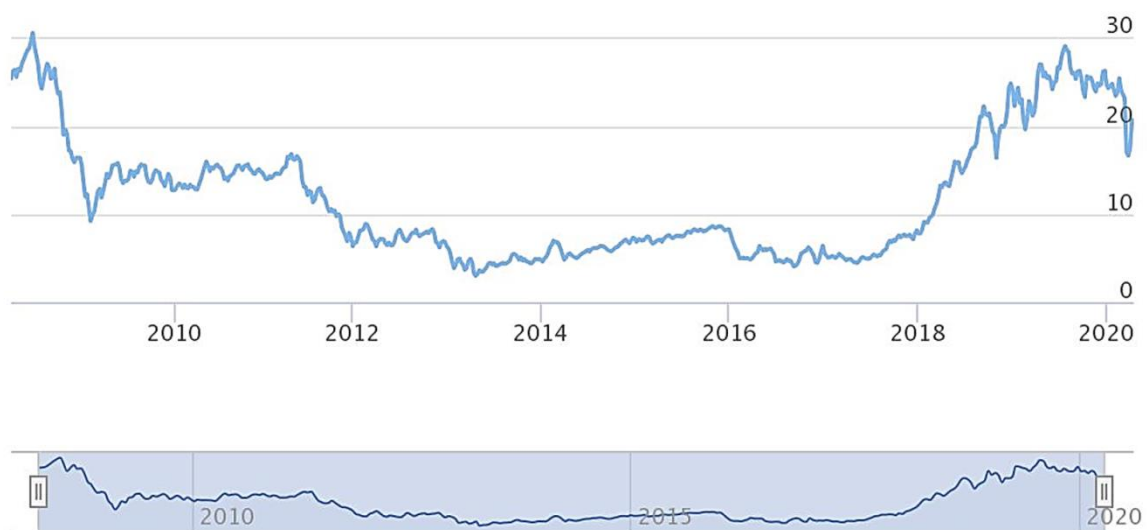
Levinumateks toote sisendenergia ja saastekoguse hindamise etappideks on olelusringi kontseptsioonis hällist tehaseväravani (*cradle to gate*) ja hällist hauani (*cradle to grave*) käsitlused (Hammond jt, 2011). Kasutusel on ka veel hällist hällini (*cradle to cradle*), hällist ehitusplatsini (*cradle to site*) ja ehitusplatsilt hauani (*site to grave*) lähenemised (Silvestre jt, 2011; Carabaño jt, 2017; Jin jt, 2017).

Toote elutsükli analüüs võimaldab mõõta materjali, toote või protsessi keskkonnamõju mitmete indikaatorite kaudu erinevates etappides (Saadatian jt, 2016). Teaduskirjanduse põhjal domineerivad siiski arvestusliku üleilmse soojenemise potentsiaali ja globaalse kumulatiivse energiavajaduse leidmise käsitlusviisid. Antud lähenemise abil leitakse kogu hinnanguline energia hulk ning tekitatud keskkonnamõju, mida tarbitakse ja tekitatakse kogu toote elutsükli jooksul (Kara & Manmek 2009; Morini jt, 2019). Arvestuslikku globaalse soojenemise potentsiaali kasutatakse aga elutsükli jooksul toote ökoloogilise jalajälje mõju hindamiseks, milles võetakse arvesse kõiki

gaaside heitkoguseid, mis on reeglina arvatud CO₂ ekvivalendina tonnides (Schiavoni jt, 2016).

Materjalide tootmisel kulutatud energia teisendamiseks saastekoguseks kasutatakse rahvusvaheliste organisatsioonide poolt avaldatavaid konversioonikoefitsiente (Carbon Reporting, 2016). Levinumateks saastekoefitsientide avaldajateks on veel ICE (*Inventory of Carbon and Energy*) ja EPD (*Environmental Product Declaration*) (Circular Ecology, 2018). Lähtudes sellest, et energia tootmise allikad on riigiti mõnevõrra erinevad ning taastuvatel allikatel baseeruva energia toomine on kasvutrendis, siis sisendenergia kontseptsiooni tulemuste kvaliteet on mõjutatud sisendandmete täpsusest (Haynes, 2013). Maailma juhtivad tööstusriigid (G20) tarbivad 80% kogu maailmas toodetud elektrist, kuid vaatamata keskkonnahoiu teema aktuaalsusele ja riikidele antud suunistele toodetakse jätkuvalt ca 45% elektrienergiast fossiilsete kütuste baasil (Charriau & Crenes, 2019). Viimased avalikult kättesaadavad andmed näitavad, et maailmas domineerib jätkuvalt taastumatutel ressurssidel baseeruv energiatootmine ja taastuvatest allikatest toodetud energia panus jääb endiselt ainult 13,5% juurde (EU energy in figures, 2019). Energiatootmise saastekoormuse koefitsiendid (kgCO₂ kWh kohta) riikide lõikes on avalikud (Carbon footprint, 2019).

Andmebaasidest avalikult kättesaadav statistika iseloomustab kõige täpsemalt eelkõige suurriikide energiatootmise struktuuri, kuid usaldusväärsed andmed on kättesaadavad ka teiste riikide kohta (Pooya & Mustafa, 2017). Kuna ligipääs reaajas avaldatavatele värsketele andmetele on tasuline, siis antud töös tehtud arvutustes on kasutatud nii 2019. aasta keskpaiga andmeid (Grid Electricity Emissions Factors, 2019) kui ka 2020. aasta alguse andmeid (Markets Insider, 2020). Joonisel 1.3 on näha Euroopa (EUA) saastekvoodi hinnaliikumine perioodil 2008 esimene kvartal kuni 2020 esimene kvartal.



Joonis 1.3 Euroopa (EUA) saastekvoodi börsihind viimasel dekaadil (EMBER, 2020).

Hinnaliikumise graafikult nähtub saastekvoodi hind, mis langes oluliselt eelmise majanduskriisi tagajärjel ning jäi peaaegu kaheksaks järgnevaks aastaks suhteliselt madalale tasemele (keskmiselt alla 10 €/tonn). Kvoodi hind hakkas kiiresti tõusma 2018. aastal ning 2019. aasta juuliks oli see liikunud üles tasemeni 29,5 €/tonn. 2020. aasta aprillis maksis CO₂ saastekvoot 25,15 €/tonn. EU kasvuhoonegaaside heitkoguste kauplemisüsteemis on CO₂ kvoodi hind olnud minevikus küllaltki volatiilne, kuid viimastel aastatel on see pööranud tõusule (2018. aastal oli see vahemikus 7-27 €/tonn ning keskmiseks kujunes 15 €/tonn) (Healy jt, 2019).

Valdav osa rahvusvahelistes baasides ja avalikult kättesaadavates andmekogudes leiduvatest sisendenergia ja süsihappegaasi emissiooni andmetest baseeruvad materjali tootmiseks kulutatud arvestuslikul energial. Kõige levinum materjali sisendenergia leidmise käsitlus hõlmab hällist kuni tehaseväravani lähenemisviisi ehk see kajastab kogu toote tootmiseks ning ehitusplatsile transportimise ettevalmistuseks kulutatud energiat ning sellega kaasnevat saastet (Haynes, 2013; Saadatian jt, 2016; Morini jt, 2019).

Euroopa Komisjoni poolt on kinnitatud mitmed keskkonnahoiu alased suunised (Directive 2010/31/EU; Directive 2012/27/EU), mis peaks toetama hoonete energiatõhususe parandamise vajadusega seotud kliimaeesmärgi täitmist. Selle kohaselt peaks 2020. aasta lõpuks hoonete kütte- ja jahutusenergia vajadus olema vähenenud 8% võrra, aastaks 2030 12% võrra ning aastaks 2050 17% ulatuses võrreldes aastaga 2005 (Asdrubali jt, 2015). Kahjuks ei suutu osa suurematest tööstusriikidest üleilmsete kliimaeesmärkide täitmisse piisava tõsidusega ning nende majanduslikud huvid on seatud endiselt esimeseks prioriteediks.

1.2. Soojustuse funktsioon ja materjalide omadused

Soojusisolatsiooni tehnilised omadused ning selle mõõtmine. Soojusisolatsiooni eesmärk on takistada soojuse liikumist kas väljastpoolt sissepoole või vastupidi. Isolatsioonikihi põhifunktsiooniks on vähendada soojusvoo soovimatus suunas liikumist (Veitmans & Grinfelds, 2016). Tehniliselt on hoonete isolatsioonil tähtis roll vaadelduna nii soojustamise kui ka jahutamise poolelt (Kunič, 2017). Sisult ja olemuselt sobib soovitud suuruse ja kujuga pindade isoleerimiseks iga materjal, millel on isolatsioonivõime ning mis vähendab soojusülekannet kahe eri temperatuuriga keskkonna vahel (Deshmukh jt, 2017).

Materjalide isolatsioonivõimet iseloomustavaks näitajaks on soojuseri juhtivus, mis sõltub materjali keemilisest ja füüsikalistest omadustest (Latif jt, 2019). Soojusisolatsiooniks nimetatakse konstruktsioonis asetsevat madala soojusjuhtivusega materjalikihti (Deplazes, 2009). Materjali soojusjuhtivus on soojushulk vattides, mis läbib ruutmeetri suurust ning meetri paksust tasapinnalist homogeenset piiret ühe tunni jooksul, kui temperatuuride vahe piirde välimistel pindadel on üks kraad. Soojuseri juhtivuse ühikuks on λ (W/mK). Soojusvoo liikumise takistamine hõlmab teadlikku materjali valikut, millel on eesmärgi saavutamiseks sobiv soojuseri juhtivus (Qureshi jt, 2018; Latif jt, 2019).

Materjali soojapidavus või isolatsioonivõime sõltub selle tihedusest, poorsusest ja erikaalust. Mida kergem ja poorsem on materjal, seda väiksem on reeglina tema soojusjuhtivus ja vastupidi. Niiskumisel materjali soojajuhtivus suureneb, kuna vee soojusjuhtivus on suurem kui õhul. Mida väikesema on soojuseri juhtivusega materjal, seda efektiivsem ja tõhusam on see isolatsioonimaterjalina. Üldjuhul peetakse heaks isolaatoriks materjali, mille soojuse eri juhtivus jääb vahemikku 0,03 - 0,07 W/mK (Asdrubali jt, 2015).

Hoone välispiirde või mõne muu tarindi üheks omaduseks on takistada sooja läbivoolu ehk igal konstruktsioonil on eriomane soojapidavus (nn kogu materjalide kihi või kihtide soojustakistus). Soojustakistus (R) leitakse materjalikihi paksuse (m) ja materjali soojuseri juhtivuse (λ) suhtena. Soojustakistus näitab aega tundides, mis kulub 1,16 kW soojuse voolamiseks läbi 1 m² seina, kui õhtutemperatuuride vahe on 1° C (Latif jt, 2019).

Soojuseri juhtivus (λ) arvutatakse valemiga (ühik W/mK):

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot d}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (1.1)$$

kus Φ – soojus (W),
 d – materjalikihi paksus (m),
 A – pindala (m²),
 T_1 – materjali sisepinna temperatuur (°C),
 T_2 – materjali välispinna temperatuur (°C).

Soojustakistus arvutatakse valemiga:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (1.2)$$

kus d – materjali kihi paksus (m),
 λ – materjali soojuseri juhtivus (W/mK).

R pöördväärtuseks on soojusjuhtivuse tegur U arv (W/m²K), mis näitab mitu vatti (W) liigub läbi konstruktsiooni ühe ruutmeetri, kui temperatuuri erinevus konstruktsiooni pooltel (sees vs väljas) erineb ühe kraadi võrra.

Soojusjuhtivusarv (U) arvutatakse valemiga (ühik W/m²K):

$$U = \frac{1}{R} \quad (1.3)$$

kus R – soojustakistus (m² K/W).

Seega näitab soojustakistus aega, mis kulub soojuse voolamiseks läbi teatud pinnaühiku mingi kindla temperatuuride erinevuse korral. Antud näitajat defineeritakse kui piirde soojusläbivus. Mida väiksem tuleb U -arv, seda parema soojapidavusega on materjal. Enamus tootjaid annab tootespetsifikaadis oma materjalidele λ väärtuse, kust on võimalik välja arvutada U -arv, vastavalt kasutatava materjalikihi paksusele. Materjali loetakse soojust isoleerivaks kui λ väärtus jääb alla 0,07 W/mK (Asdrubali jt, 2015).

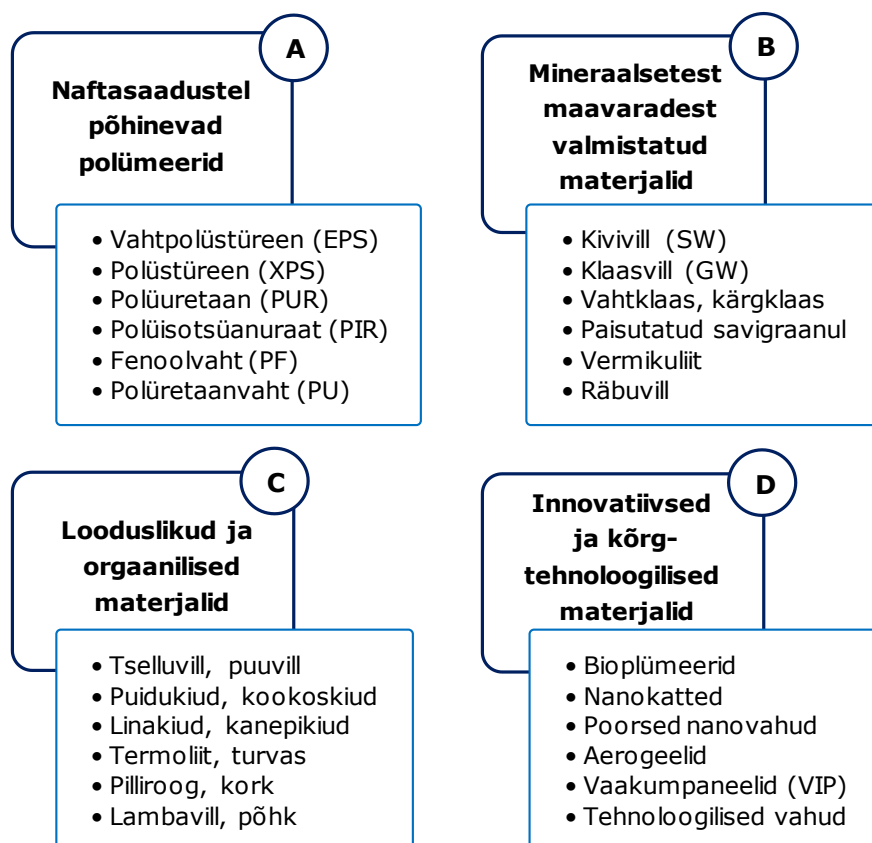
Üheks oluliseks soojustustoote omadusi iseloomustavaks näitajaks on erikaal, mida väljendatakse reeglina kg/m³ kohta ning see näitab materjali tihedust (mahumass). Tihedust ja massi arvutatakse materjaliühiku kohta. Suurema tihedusega materjal suurendab üldist massi ning soojusjuhtivust. Veel eristatakse materjalide juures soojusmahtuvust, milleks on materjali võime säilitada soojust, mis on põhimõtteliselt soojushulk, mida vajatakse 1 kg raskuse materjali temperatuuri tõstmiseks ühe kraadi võrra. Näitaja mõõtühikuks on J/kg (Latif jt, 2019).

Soojustusmaterjalid ning nende päritolu. Üheks olulisemaks võtmekomponendiks hoonete energiatõhususe parandamisel on soojustehniliselt efektiivsete materjalide kasutamine nende välispiiretes (Zhou jt, 2010). Üldisemas vaates jääb isolatsioonikiht nähtamatuks ehitusmaterjaliks, asetsedes reeglina kandekonstruktsiooni ja viimistluskihi vahel (Deplazes, 2009; Chudley & Greeno 2014). Tulenevalt sellest on sarnaste soojustehniliste omadustega materjalide puhul võimalik eelistada alati keskkonnasõbralikumat alternatiivi, kuna see ei muuda hoone arhitektuurset lahendust ja selle välisilmet. Praktikaga aga eksisteerivad sageli mitmed soojustusmaterjali valikut

limiteerivad faktorid, mis tulenevad materjalide füüsilistest omadustest ning paigaldustehnilistest iseärasustest (Barrau jt, 2014; Palmer jt, 2017).

Tänapäeval soojustusmaterjalide turul saadaval enam kui 40 tüüpi soojustusmaterjale ning nende kategoriseerimisel on erinevaid lähenemisviise. Reeglina jaotatakse need tooraine päritolu järgi laiemalt orgaanilisteks (süsinikul põhinevad) ja anorgaanilisteks (mineraalsed), mis omakorda jagunevad kas sünteetilisteks või looduslikeks (Latif jt, 2019).

Soojustusmaterjalide klassifitseerimiseks ning kategoriseerimiseks on kasutusel mitmeid erinevaid jaotuspõhimõtteid. Antud magistritöös on materjalid jaotatud tinglikult nelja alamkategoriasse (A, B, C ja D), mis on esitatud kokkuvõtvalt joonisel 1.4.



Joonis 1.4 Soojustusmaterjali jaotus tooraine päritolu järgi (Pavel jt, 2018; autori täiendatud).

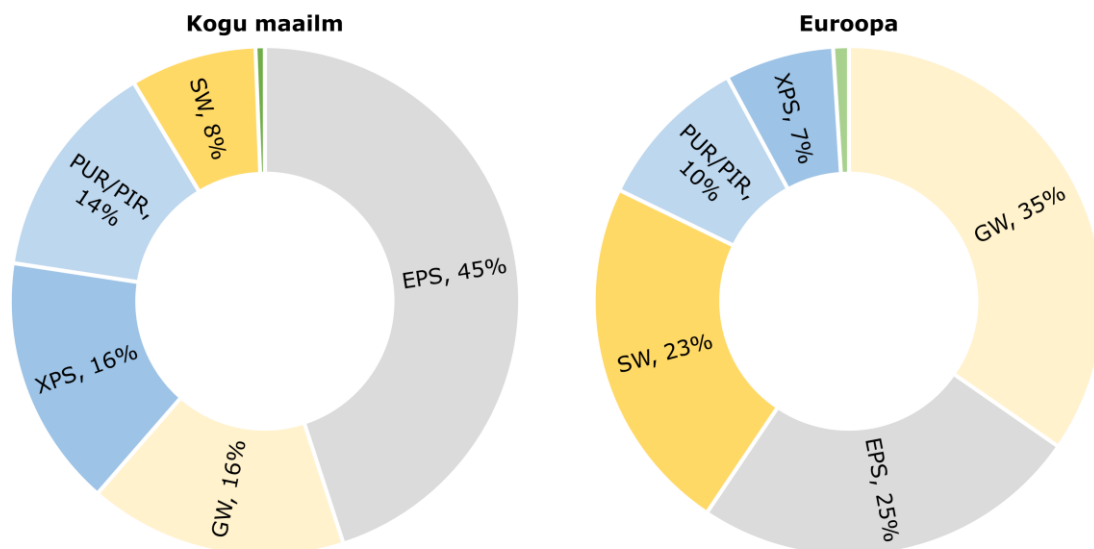
Klassi A moodustavad naftasaadustel põhinevad polümeerid, klassi B kuuluvad anorgaanilised mineraalset päritolu materjalid, klassi C on asetatud looduslikul toorainel baseeruvad soojustustooted ning kategooria D koosseisu jäävad uued kõrgtehnoloogilised materjalid (Jelle jt, 2017; Pavel jt, 2018).

Enam levinud soojustusmaterjalideks on täna mineraalvillad ja vahtplastist valmistatud tooted, kuna uuringute kohaselt on nende kasulikkus ühiku maksumuse kohta kõige kõrgem (Schiavoni jt, 2016).

Vaatamata viimase kümnendi jooksul aset leidnud kiirele tootearendusele ning uute tehnoloogiate juurutamisele looduslike ja taastuvate isolatsioonimaterjalide valdkonnas, domineerivad turul endiselt naftasaadustel ja energiamahukalt toodetud orgaanilised soojustusmaterjalid.

Tegemist on majanduslikus mõistes mastaapse valdkonnaga Euroopas, mille aastaseks rahaliseks mahuks on 13 miljardit €. Koguseliselt teeb see kokku 254 miljonit m³ kogukaaluga 8,12 miljonit tonni (Insul Eco, 2020).

Soojustusmaterjalide globaalse ja Euroopa turu hetkeseisu ilmestab joonis 1.5.



Joonis 1.5 Soojustusmaterjalide turuosad kogu maailmas ja Euroopas (Going Global, 2019).

Joonisel 1.5 esitatud jaotuse põhjal on materjalide eelistused Euroopa ja maailma mastaabis erinevad. Globaalses arvestuses valitsevad sisuliselt naftal põhinevad tooted, millest EPS, PUR, PIR ja XPS annavad kokku $\frac{3}{4}$. Euroopas seevastu domineerivad erinevad villad, mis moodustavad 58% turust. Kokkuvõttes on soojustustoodete hulgas selget domineerimas EPS, klaasvill, kivivill, XPS ning PUR ja PIR, moodustades kokku antud tootevaldkonnas 99% üleilmsest turust.

Tuginedes üle-eelmise kümnendi alguse andmetele, mil klaasivilla turuosad oli Euroopas 32%, kivivillal 28%, EPS-il 26% ja XPS-il 5% (Papadopoulos jt, 2002), on viimase 15 aasta jooksul toimunud küll mõningad muutused, kuid materjalide eelistused on jäänud üldjoontes samaks. Seega endiselt domineerivad sünteetilised ja energiamahukad

orgaanilised soojustusmaterjalid ning keskkonnasõbralike materjalide osakaal on jätkuvalt marginaalne. Sarnane pilt avanes ka analüüsidest teisi globaalses mõistes suuremaid turge. Ameerika turul on populaarseim toode endiselt klaasvill (42%), Hiinas domineerib EPS (60%), Kanadas on enim kasutatav klaasvill (45%) ja Venemaal eelistatakse soojustusmaterjalidest jätkuvalt eelkõige kivivilla (35%) ning kõikidel nendel turgudel on looduslike ja keskkonnasõbralike soojustusmaterjalide kasutus väga väike (Kono jt, 2016; Su jt, 2016).

Soojustusmaterjale saab klassifitseerida ka nende paigalduseelse oleku järgi jäikadeks (paadid), elastseteks (deformeeritavad ja painduvad plaadid, matid), pehmeteks (villad), tahenevateks (õhu ja niiskuse toimel paigalduse käigus tahenevad) ja graanulid (puistematerjalid). Jäikade plaatmaterjalide kasutamise suurimaks puuduseks on vajadus tihendada vuuke, et kindlustada ka ühenduste soojapidavus ning seda tüüpi materjalide paigalduskadod on suuremad. Siinkohal kehtib seaduspärasus, mida jäigem materjal, seda väiksem on selle saagis ja vastupidi (Chudley & Greeno, 2014).

Tänu tehnoloogia ning rahvusvahelise kaubanduse arengule on viimaste dekaadide jooksul eelistatud selgelt energiamahukalt toodetud kunstlikke soojustusmaterjale (Smart houses Portugal, 2020). Peamised põhjused, miks turgudel endiselt valitsevad sünteetilised ja suure sisendenergiaga soojustustooted, on naturaalsete materjalide soojustehniliste omaduste suurem negatiivne muutus ajas, mis on tigitud nende niiskumisavusest ning vastuvõtlikkusest bioloogilistele organismidele (Zach jt, 2012). Bioloogilisel toorainel põhinevate soojustustoodete sisendenergia ja keskkonnamõju on aga märkimisväärselt madalam võrreldes sünteetiliste ja mineraalset päritolu materjalidega (Lucchi jt, 2017).

Naftasaadustel põhinevad soojustustooted. Vahtpolüstereen (EPS) saadakse polüstüreeni graanulitele lisatud pantaani aurustamisel. EPS-i tööstusliku valmistamise algseks tooraineks on stüreeni monomeer. Esmalt moodustatakse tootmiprotsessis polümeerisatsiooni teel granulaat ning seejärel graanulid paisutatakse ja vahustatakse kokku homogeenseks massiks. Viimases etapis lõigatakse plokid sobiva kujuga paneelideks või lehtedeks. EPS plaadi soojusjuhtivus jääb sõltuvalt selle tihedusest vahemikku 0,031 - 0,037 W/m²K ning selle tihedus on 15 - 75 kg/m³. Uuringud on näidanud, et niiskus vähendab antud materjali soojapidavust. Kuna EPS materjal on kergesti süttiv ning põlemisel eritab mürgiseid gaase, siis toodet paigaldatakse koos tuletõkke plaadiga, säilitades materjali soojustehnilisi omadusi (Chudley & Greeno, 2014; Schiavoni jt, 2016). EPS materjali sisendenergia jääb reeglina vahemikku 100 - 125 MJ/kg, sõltuvalt konkreetse materjali mahumassist. Tänu madalale hinnale ja väga heale isolatsioonivõimele on EPS jätkuvalt enim kasutatav soojustusmaterjal maailmas.

Viimastel aastatel on hakatud tootma EPS-i modifikatsioone lisades sinna ka teisi ained nt grafiiti sisaldav EPS Silver (Greenspec, 2020).

Ekstrudeeritud polüstüreen (XPS) valmistatakse vaakumprotsessi käigus. XPS-i tööstusliku valmistamise tooraineks on stüreeni monomeer ning materjal toodetakse vedela polümeerisulandi ekstrudeerimise teel läbi vastava kaliibriga ava, mis annab soovitud paneeli/ploki paksuse. Seejärel lõigatakse küljed ja pikkused katkematus protsessis parajaks. XPS on reeglina tihedam ja seetõttu ka tugevam kui EPS. XPS soojusjuhtivus on 0,025 - 0,027 W/m K ning tihedus vahemikus 20 - 40 kg/m³. XPS seob endasse vähem niiskust (kuni 0,3%), olles sellega parem isolaator kui EPS. XPS tootmiseks kulutatud energia on keskmiselt 95 MJ/kg. Ringlusesse võtt ja materjali tuleohtlikkus XPS-il ja EPS-il on siiani murekohaks (Schiavoni jt, 2016; Lyons, 2010).

PUR polüuretaanvaht on naftasaadustel põhinev materjal, mida valmistatakse kahe monomeeri polümeriseerimise reaktsiooniga. PIR (polüisotsüanuraat) vaht valmistatakse analoogselt, kuid reaktsioon viiakse läbi kõrgel temperatuuril. Reaktsiooni käigus tekkiv kuumus soodustab gaaside aurustumist rakkudesse, mis tagab PIR-materjalile kõrge soojusefektiivsuse. Plaatide puhul kaetakse vahtplast kahe fooliumkihiga. PUR on kinnise booriga isolatsioonimaterjal, millel on väga head soojustehnilised näitajad ning selle niiskust hülgava materjali kasutusala on väga lai. Valmis kujul on see keskkonnasõbralik ja inimesele füsioloogiliselt ohutu isolatsioonitode. Kahjuks on selle valmistamise protsess väga energiamahukas (sisendenergia PUR 102 ja PIR vastavalt 101 ja 110 MJ/kg) ning suure saastekoormusega (tekib ka ohtlikke aineid, mis on määratud direktiiviga EU Directive 91/689/EEC 17). Lisaks vahule on materjal saadaval ka jäikade soojustusplaatidena, mis on lõhnatud, mõõdustabiilsed, survele vastupidavad. Materjali soojuserijuhtivus ja mahutihedus on vastavalt vahemikes 0,022 - 0,040 W/mK ja 15 - 45 kg/m³ (Schiavoni jt, 2016).

Kahjuks hakkab materjali isolatsioonivõime kasutusajal järk-järgult langema, kuna pooridest hakkab aja jooksul lenduma gaasi. Reeglina on tootespetsifikaadis avaldatud soojuserijuhtivuse näitaja puhul selle protsessiga arvestatud. Toote EWC jäätmekoodi järgi kuulub toode jäätmeklassi 17 06 04, mis liigitub harilike ehitusjäätmete hulka (SEPA, 2015). Peale peenestamist on materjali teoreetiliselt võimalik taaskasutada, kuid praktikas materjalijääkide kogumisteenust reeglina tootjad ei paku.

Naftasaadustel põhinevad isolatsioonimaterjalid on oluliselt vähem keskkonnasõbralikumad võrreldes mineraalsete ja looduslike materjalidega, kui arvestada reaalselt keskkonnamõju konteksti, kuna nende ökoloogiline jalajälg on oluliselt

suurem. Samas on kunstmaterjalide omadused stabiilsemad ja need on väga heade soojustehniliste näitajatega. Lisaks on neid lihte paigaldada (Kunič, 2017).

Mineraalsetest maavaradest valmistatud materjalid. Mineraalvill on üldine nimetus kiudmaterjalidele, mis on tehnoloogilises plaanis valmistatud sulatatud mineraalide tõmbamise või keerutamise teel. Tooraineks võib olla klaas, kivim või šlack. Mineraalvilla tööpõhimõtteks on õhu hoidmine kiududevahelistes poorides ning antud materjali soojustakistus piiratud seisva õhu soojustakistusega (Latif jt, 2019).

Kivivill (SW) on valmistatud vulkaanilistes kivimites sisalduvatest oksiididest (peamiselt ränidioksiid, alumiiniumoksiid ja magneesiumoksiid), mis segatakse kokku koksi ja lubjakiviga ning sulatatakse ahjus temperatuuril 1500°C. Sulanud mass kaetakse sideaineks oleva vaiguga ning lisatakse mineraalõli, mis tagab materjali veekindluse. Materjali kiud langevad konveierilindile, kus see pressitakse nõutavale paksusele ja tihedusele ning seejärel suunatakse ahju, seejärel jäetakse sideaine tahkuma. Lõpuks lõigatakse toode kas rullidesse või pressitakse tahvlitesse. Sideainena eelistatakse biopolümeere fenoolvaigule, mis võimaldab vähendada tootmiseks kulutatud energiat. Kivivill on mittesüttiv, veekindel, mädanemiskindel ning ei sisalda fluoroklorosüsinik (CFC) ja hüdrofluoroklorosüsiniku (HCFC) ühendeid (Lyons, 2010). Mineraalvilla soojusjuhtivus on 0,033 - 0,040 W/mK, tihedus 40-200 kg/m³ ning tootmiseks kulutatud energia 15 - 40 MJ/kg (Silvestre jt, 2011; Schiavoni jt, 2016).

Klaasvilla (GW) tootmise protsess on sarnane kivivilla tootmisele, kus sulatatakse naturaalne liiv ja enamasti taaskasutatud klaas kokku 1300 - 1450°C juures. Sulatatud massist transformeeritakse tsentrifugaaljõu ja puhumisprotsessi abil kiud, mis seotakse kokku vaiku lisades. Uuringud näitavad, et klaasvilla isolatsiooniomadusi ei mõjuta kõrge temperatuur ja niisked tingimused. Kord paigaldatud klaasvilla saab taaskasutada (Schiavoni jt, 2016). Klaasvilla soojusjuhtivus on 0,031 - 0,040 W/mK, tihedus 20 - 40 kg/m³ ning tootmiseks kulutatud energia on keskmiselt 28 MJ/kg (Hammond jt, 2011).

Vahustatud klaasi isolatsioon on valmistatud purustatud klaasist, mis segatakse süsinikuga ning kuumutatakse 1000°C. Sellise kuumuse juures süsinik oksüdeerub ning tekivad materjalile iseloomulikud mullid. Vahustatud klaas on suhteliselt tugeva survetugevusega, mis on sobilik suure koormusega ehituskonstruktsioonides (nt lamekatustel, põranda isolatsiooniks). Vahustatud klaasi soojusjuhtivus on 0,018 - 0,028 W/mK ning tihedus kuni 160kg/m³ (Schiavoni jt, 2016). Vahustatud klaas sisaldab pärast tarbimist 60% klaasijätmeid, mida saab uuesti ringlusesse võtta. Lisaks on materjali plussiks veel kerge kaal, hea tule- ja niiskuskindlus. Materjali tootmise miinuseks võib

lugeda klaasitootmisel kaasnevaid heitkoguseid. Vahustatud klaasi isolatsiooni tootmiseks kulutatud energia on 25 - 30 MJ/ kg kohta (Hammond jt, 2011; Greenspec, 2020).

Looduslikud ja orgaanilised materjalid. Tselluloosi isolatsioonimaterjal on valmistatud taaskasutatavast paberist. Materjal töödeldakse booraksi või boorhappega, et tagada tulekindlus ja muu orgaaniliste eluvormide teke. Materjal sobib eelkõige katuste ja vaheseinte soojustamiseks. Tselluloosi soojusjuhtivus on 0,037 - 0,042 W/mK ning tihedus 30 - 80 kg/m³ (Schiavoni jt, 2016). Tselluloosi isolatsioon on saadaval puistematerjalina, mida niisutatakse ja seejärel pihustatakse seinale. Ligi 80% tselluloosi komponentidest sisaldavad üle 90% ringlusesse võetud materjali. Tselluvilla miinusteks on paigaldusel tekkiv tolmu. Lisaks sõltub materjali soojusjuhtivus paigalduse kvaliteedist, kuna toode koosneb 20% ulatuses boori baasil valmistatud biotsiididest, mis prarandavad tulekindlust. Tselluvilla tootmiseks kulutatud energia on vahemikus 0,94 - 3,3 MJ/kg (CAT, 2020).

Korgist isolatsiooniplaadid valmistatakse puukoorest, mis koristatakse iga 25 aasta tagant. Korgi graanulitest pressitakse plokiid, kasutades naturaalselt vaiku ja kõrget temperatuuri. Korgi soojusjuhtivus jääb vahemikku 0,037 - 0,050 W/mK ning tihedus 100 - 170 kg/m³ (Schiavoni jt, 2016). Korgipuude kasvatamine aitab kaasa looduslikule mitmekesisusele. Samuti on kork veekindel, seob süsinikku ning on resistentne putukate ja näriliste vastu. Korgi majanduslik tootmine aitab hoida vaesemate piirkondade põllumajandusest sõltuvaid kogukondi (Olive, 2016). Korgi miinuseks on paigaldusel eralduv tolmu (Greenspec, 2020). Korgi tootmiseks kulutatud energia on 4 MJ/kg (CAT, 2020).

Puitkiudplaadid valmistatakse metsanduses ja saeveskites tekkivatest jääkidest. Isolatsioonimaterjal pressitakse kokku kasutades polülefiini kiudusid. Tuleohutuse tagamiseks kasutatakse ammooniumfosfaati. Puitkiudisolatsioon on toodetud looduslikust taastuvast materjalist, mille soojusjuhtivus on 0,038 - 0,050 W/mK ning tihedus 50 - 270 kg/m³ (Schiavoni jt, 2016). Valmistoodangu miinuseks on materjalis sisalduv ammooniumfosfaat. Samuti suureneb materjali soojusjuhtivus niiskuse tõttu. Puidukiudisolatsiooni tootmiseks kulutatud energia on keskmiselt 20 MJ/kg (European Commission, 2010).

Kanepi isolatsioon on valmistatud kanepist või kanepimassi segust, mis on segatud taaskasutatud puuvillakuidude või puidukiududega. Naturaalselt päriolu toorainemass seotakse polüestervaiguga ning töödeldakse vee- ja tulekindlaks. Kanepi soojusjuhtivus on 0,038 - 0,060 W/mK ning tihedus 20 - 90 kg/m³ (Schiavoni jt, 2016; Claudiu jt,

2013). Miinuseks on materjali tootmisel kasutatavad mittetaastuvad polümeeri ühendid. Kanepi isolatsiooni tootmise energiamahukus on ca 15 MJ/kg (Greenspec, 2020).

Linakiuisolatsioon on valmistatud linkiu sidumisel polüestriga, mis suurendab materjali tulekindlust. Lina sisaldab 70% tselluloosi, mille kiududel on hea omadus hoida endas õhku. Lina soojusjuhtivus on 0,038 - 0,075 W/mK ning tihedus 20 - 100 kg/m³ (Schiavoni jt, 2016). Lina isolatsiooni tootmiseks kulutatud energia on vahemikus 10 -30 MJ/kg. Kuigi lina on looduslik ja see seob CO₂, on tema miinusteks lõpptoodangus sisalduvad broomil põhinevad kemikaalid ning taastumatud polüestri sidemed, mis parandavad tulekindlust (Greenspec, 2020).

Lambavillast pressitud isolatsioonimaterjali müüakse plaatide, mattide või rullidena. Villast soojustusmaterjal on valmistatud naturaalsest villast, mis on reeglina muudetud polüestriga tule ja putukate kindlaks. Lambavilla isolatsiooni suureks miinuseks on lambakasvandustes eritav metaan. Lambavilla isolatsiooni tootmiseks kulub 12 - 37 MJ/kg, mis oleneb lambavilla tüübist ehk kas see on 100% taaskasutatav või mitte. (Greenspec, 2020). Villa soojusjuhtivus on 0,038 - 0,054 W/mK ning tihedus 10 - 25 kg/m³ (Schiavoni jt, 2016).

Innovatiivsed ja kõrgtehnoloogilised soojustusmaterjalid. Tulenevalt tehnoloogia ja materjalide kiirest arengust on viimasel dekaadil jõudnud turule ka palju kaasaegseid soojustusmaterjale, mille soojustehnilised parameetrid on juba täna väga head. Tuntumatest toodetest on juba turul vaakumisolatsioonipaneelid (VIP), gaasiga täidetud booridega materjalipaneelid (GFP), aerogeelid, faasimuutusmaterjalid (PCM). Lisaks on tootjatel arenduses mitmed tulevikumaterjalid, mis põhinevad nanotehnoloogial (NIP). Seega võib leida kirjanduses ka materjalide jaotuse klassifitseerimist traditsioonilisteks, tehnoloogilisteks ning tulevikumaterjalideks (Jelle jt, 2017; Tažiková jt, 2018). Nanotehnoloogiat kasutatakse ka täna turul levinud soojustustoodete omaduste parandamiseks. Näiteks lisatakse EPS materjali tootmisel polüstüreenile peenikest grafiitpulbrit ning seeläbi saavutatakse 20% parem soojuserijuhtivus (Bozsaky, 2016).

Vaakumisolatsioonipaneelid (VIP) on ümbrises nano- või mikropoorse gaasiga täidetud jäik isolatsioonimaterjal, mille gabariiti ei ole võimalik lõikamise abil muuta, kuna paneeli südamik on vaakumis (Kalnæs & Jelle, 2014). Paneelide valmistamiseks kasutatakse kõrgtehnoloogilisi materjale. Kuumtöödeldud ränidioksiidi sisuga paneelide soojuserijuhtivus on 0,004 W/mK. Materjali paksus jääb reeglina vahemikku 10 - 25 mm ehk antud materjaliklass on tavalistest isolatsioonimaterjalidest oluliselt õhem. Seniste uuringute kohaselt halvenevad vaakumpaneelide soojustehnilised omadused 25 aastajooksul ca 50% ning see on tingitud veeauru ja õhu difusioonist läbi paneelide

ümbrise ja avatud booridega sisuks oleva materjali (Kalnæs & Jelle, 2014; Tažiková jt, 2018).

Tulenevalt innovatiivsete materjalide parematest soojustehnilistest omadustest on tulevikus oodata jäikade soojustusmaterjalide kasutamise osakaalu suurenemise jätkumist ning nende eelistamist traditsioonilistele ja keskkonnasõbralikumatele soojustusloodetele. Uudsete kõrgtehnoloogiliste soojustusmaterjalide puhul (nt GFP gaasiga täidetud booridega materjalipaneelid, PCM faasimuutusmaterjalid) saab suletud poorid täita väiksema soojuseri juhtivusega gaasidega ning saada seeläbi parema isolatsioonivõime (Tažiková jt, 2018). Madalama soojuseri juhtivusega materjalide kasutamine võimaldab vähendada materjalikihi paksust ning muudab samaväärsete soojustehniliste omadustega tarindi õhemaks, mis omakorda avardab hoone projekteerimise arhitektuurilisi võimalusi (Jelle jt, 2017).

Aerogeel on madala tihedusega isolatsioonimaterjal, mis on valmistatud ränioksiidist ja õhust. Aerogeeli poorsuse diameeter jääb vahemikku 2 - 50 nm ning poorsus on 85 -99,8 % materjalist. Soojusjuhtivus on materjalil väga madal 0,0131 - 0,0136 W/mK. Äärmise suure poorsuse korral võib tihedus olla 3 kg/m³, kuid tavaliste ehitismaterjalide puhul jääb tihedus vahemikku 70-150 kg/m³ (Schiavoni jt, 2016). Aerogeeli isolatsiooni tootmiseks kulutatud energia on 53 MJ/kg (Pacorinc, 2020). Aerogeeli plaat on suhteliselt kõrge survetugevusega ning vee-, tule- ja hallituskindel. Heas seisukorras plaadid on korduvkasutatavad, kuid materjali miinuseks on suhteliselt kõrge hind (Greenspec, 2020).

1.3. Soojustusmaterjalide kasutamise keskkonnamõju

Hoonete puhul on soojustusmaterjalide põhifunktsiooniks vähendada nende energiavajadust eksploatatsiooniperioodil ja alandada seeläbi keskkonnakoormust. Parema soojapidavuse tähendab väiksemaid kütte- ja jahutuskulusid ja vastupidi.

Energiatõhususe mõistes on võtmetähtsusega välisõhuga kokku puutuva hoone ümbrise (*building envelope*) ehk ehitise välispiirete (katus, seinad, avatäited, vundament) soojapidavus. Soojustamise keerukuse või lihtsuse määrab hoone kuju ehk mida keerukamate arhitektuursete gabariitidega ehitised on, seda raskem on seda muuta soojapidavaks. Sopiline hoone on reeglina alati vähem soojapidavam kui ristkülikukujulise põhiplaani hoone. Selle põhjuseks on asjaolu, et erinevate

tasapindade lõikejooni on alati väga keeruline tasapindadega samaväärselt soojustada ning ühendustesse tekivad külmasillad.

Soojustusmaterjale kasutatakse hoone ümbrise soojakao vähendamiseks. Hoone välispiiret saab käsitleda kui erinevate kihtide kogumit, milles igal kihil on kas üks või mitu funktsiooni (väline ilmastiku kaitsekiht, tuuletõke, soojustus, aurutõke, installatsioonide paigalduskiht, viimistluskiht). Energiatõhususe tagamise seisukohalt on kõige olulisem, et kolm kriitilise tähtsusega kihti (tuuletõke, soojustus, aurutõke) moodustaksid hoone köetava kubatuuri ümber ühtse ümbrise (Khoukhi jt, 2019).

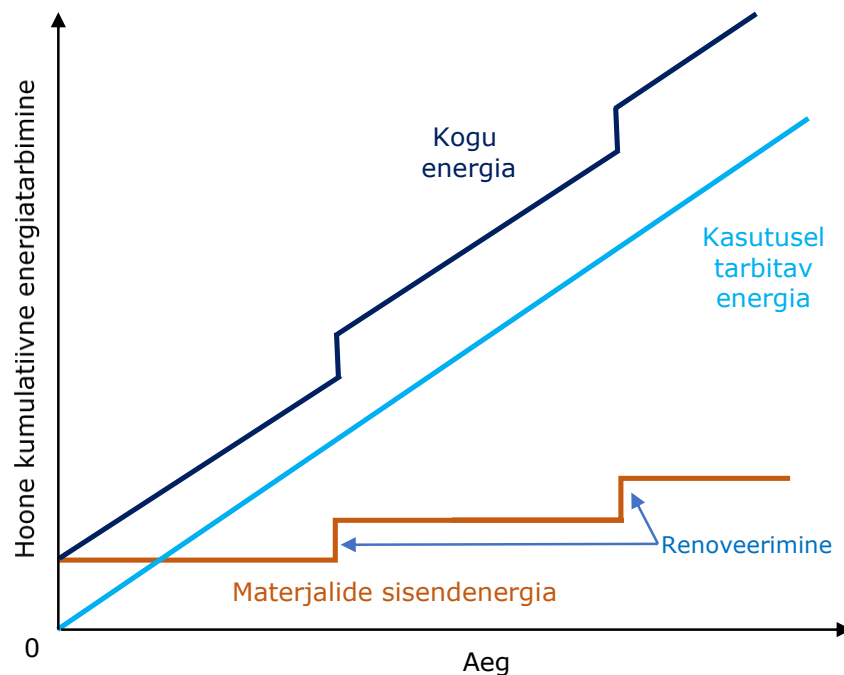
Hoone ümbris ehk välispiire on ehitise peamine osa. Selle ehitusel kasutatud materjalidel on otsene mõju hoone energiatõhususele ja keskkonnakoormusele läbi algse materjalide sisendenergia, eksploatatsioonija energiatarbimise elutsükli keskkonnakulu. Tehtud uuringute kohaselt saab arvestusliku 60-aastase eluea jooksul panna 15% kogu hoone keskkonnamõjust seinte arvele (Silvestre jt, 2011).

Viimastel aastatel on võetud suund hoonete energiatarbimise vähendamisele nende kasutusfaasis ning regulatiivne eesmärk on püstitada ainult nullenergia hooned. Samas on nende rajamine väga kulukas ja eelistatud materjalide keskkonnamõju arvestades ka koormav. Uuringud on näidanud, et minimeerides hoone keskkonnamõju selle kasutusajal, kulutatakse nende ehitamiseks olulisel enam energiat, mis moodustab reeglina 40-60% nende kogu eluea jooksul tarbitavast energiast (Potrč jt, 2016). Seega on oluline arvestada iga hoone puhul keskkonnamõju kogu selle elukaare jooksul.

Hoonete energiaefektiivsuse tõstmine on üks ehitussektori tänastest väljakutsetest. Järgides Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiivi 2012/27/EL suuniseid, peavad kõik Eestis ehitatavad uued hooned vastama alates 2020. aastast A-energiaklassile ehk liginullenergiahoone nõuetele. Hoonete energiatõhusust näitab energiamärgise klassifikatsioon, mis on välja toodud lisas 8. See annab infot olemasoleva hoone tegeliku energiatarbimise kohta. Energiatõhusus on energiakasutuse tõhusus ehk kasuliku ja kulutatud energia suhe. Hoone energiatarvet mõõdetakse energiatõhususe arvuga (ET), mis näitab hoone aastast energiatarvet kWh köetava põrandapinna ruutmeetri kohta. Sõltuvalt hoone kasutamistarbimise klasside väärtused erinevad (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2019).

Keskkonnateadlik soojustamine ei mängi olulist rolli mitte ainult hoonete energiatõhususe tõstmisel ja eksploatatsioonikulude kokkuhoiul, vaid aitab vähendada ka kogu ehitussektori ökoloogilist jalajälge (Saadatian jt, 2016).

Ehitiste energiatarvet ja sellega seonduva emissiooni muutust ajas visualiseerib joonis 1.6.



Joonis 1.6 Hoonete kumulatiivne energiatarbimine kogu elutsükli jooksul (Connor & Bowick, 2014).

Hoone energiatarve alates selle püstitamisest kuni optimaalse kasutusaja lõpuni koosneb peamiselt ehitustegevuse ja materjalide tootmiseks kulutatud energiast ning selle eksploatatsiooni käigus kulutatud energiast. Materjalide sisendenergia maht sõltub otseselt ehitusse ja renoveerimisse paigaldatud materjali hulgast ning suureneb astmeliselt. Hoone kasutuse ajal tarbitava energia kumulatiivne kasv on suhteliselt lineaarne. Reeglina on energiatõhusamatel hoonetel sisendenergia suhteline osakaal kumulatiivses energia tarbimise voos suurem. Hoonete energiatõhususe tõstmisega kaasneb rahaline kokkuvõide ning kahjuliku keskkonnamõju alanemine. Vastavalt Rahvusvahelise Energiaagentuuri (IEA) poolt seatud eesmärgile soovitakse 2050. aastaks vähendada maailma energiavajadust $\frac{1}{3}$ võrra ja seeläbi vähendada globaalset kasvuhoonegaaside emissiooni. Soojustusmaterjali kasutamise peamised keskkonnamõjud olelusringi käsitluses hõlmavad materjali tootmisel ja transportimisel ja materjali paigaldamisel kulutatud energiat ning materjali sihtotstarbelisel kasutamisel kokku hoitud energiat (European Commission, 2010).

Soojustusmaterjalide puhul on oluline arvestada materjali tootmiseks kulutatud energia (*embodied energy*) ja toomisprotsessi käigus õhku paisatud saaste kogust (*embodied carbon*). Materjali sisendenergia arvutatakse reeglina mingi ühe konkreetse etapi või etappide jada kohta kogu materjali elutsükli (alates tooraine ammutamisest kuni valmistoote väljumiseni tehaseväravast) ning seda väljendatakse MJ/kg või MJ/m³ kohta.

Saastekoguse ühikuks on $\text{Kg CO}_2/\text{m}^3$. Need terminid ja arvestusühikud leiavad keskset kasutust materjali elukaare analüüsis (Hammond jt, 2011).

Tabelis 1.1 on esitatud näitlik valik soojustusmaterjalide sisendenergiast (MJ/m^3) ja saastekogusest ($\text{kg CO}_2/\text{m}^3$).

Tabel 1.1 Soojustusmaterjalide sisendenergia ja tootmisel tekitatud saaste (Fernandes jt, 2013; Lucchi jt, 2017).

Materjali nimetus	Sisendenergia MJ/m^3	Saastekogus $\text{Kg CO}_2/\text{m}^3$
Polüretaan	4446	463,9
Polüstüreen	3271	341,3
Vahtklaas	1980	206,6
Kivivill	1390	25,2
Klaasvill	970	16,2
Saepuru	65	0,7
Põhk	25	0,3

Valdavalt arvutatakse siiski soojustusmaterjalide sisendenergiat materjali kaalu kohta ning enamikes allikates on esitatud materjali energiamahukus MJ/kg kohta, mida saab lugeda ka sisendenergia standardühikuks (Hammond jt, 2011). Tabelis 1.2 on tootmise energiamahukuse alusel järjestatud valik enamlevinud soojustusmaterjale.

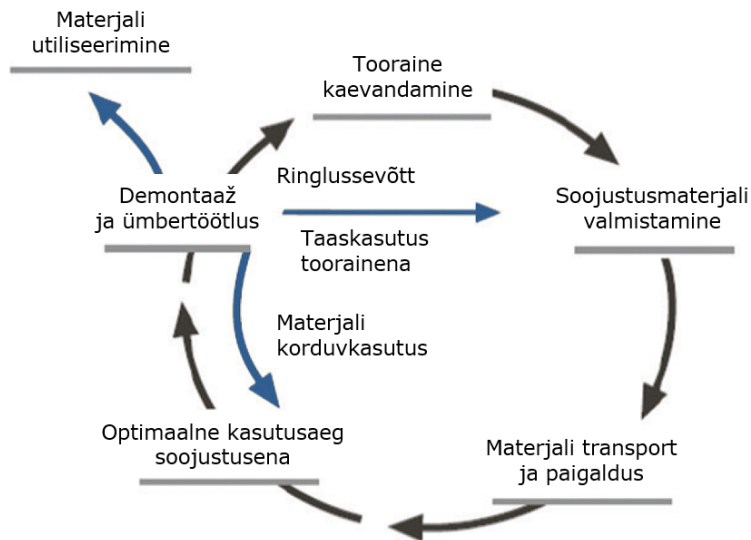
Tabel 1.2 Levinumate soojustusmaterjalide sisendenergia (hällist väravani) MJ/kg (Lushnikova, 2016).

Materjali nimetus	Sisendenergia MJ/kg
Polüretaanvaht (PU)	130
Vahtpolüstüreen (EPS)	125
Polüisotsüanuraat (PIR)	110
Polüuretaan (PUR)	102
Ekstrudeeritud polüstüreen (XPS)	95
Fenoolvaht	88
Vaakumpaneel	62
Aerogeel	53
Lina	50
Kanep	40
Puitkiud	35
Korkplaat	30
Puitvill	28
Klaasvill	28
Vahtklaas	27
Tsellulooskiud	19
Kivivill	17
Põhk	15

Nafta derivaatidel baseeruvate materjalide valmistamine on märkimisväärselt energiamahukam protsess, võrreldes orgaanilist päritolu või looduslike materjalidega. Ka enamlevinud soojustusmaterjalide puhul (näiteks EPS vs kivivill) on sisendenergia erinevus ligikaudu seitsme kordne. Arvestades rahvusvahelise ülduse poolt propageeritud üleilmise rohelise mõtteviisi ja keskkonnaalase teadlikkuse leviku laienemise trendi, on nõudlus looduslike ja kiiresti taastuvate soojustusmaterjalide osas tasapisi kasvamas, kuna nende tootmiseks kulutatakse oluliselt vähem energiat ning taimset päritolu tooraine kasvamisel seotakse CO₂. Lisaks aktsepteeritavatele isolatsiooniomadustele loob taimset päritolu soojustusmaterjalide kasutamine hoonetes ka tervislikuma ja meeldivama elukeskkonna (Bakhom jt, 2015).

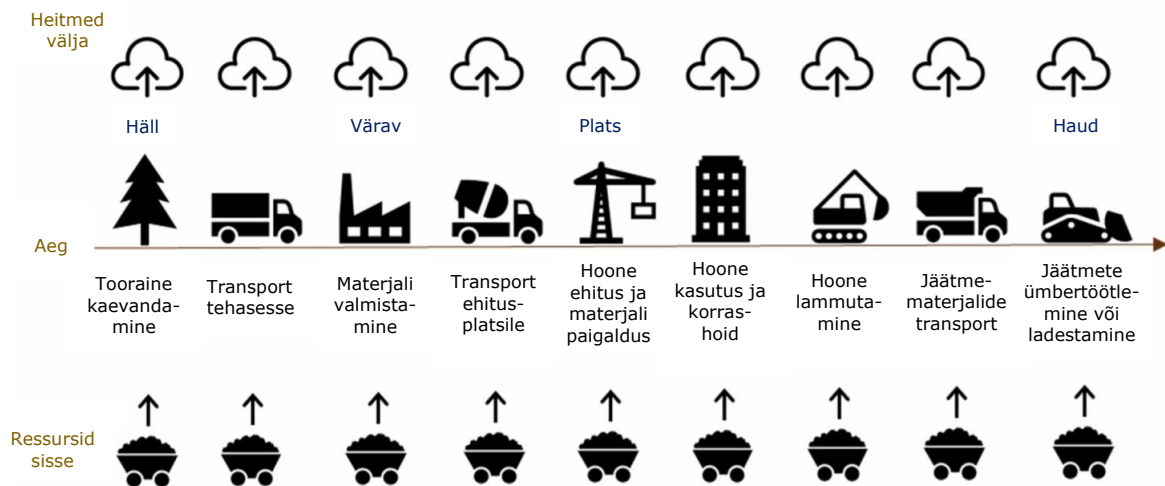
Uuringute tulemustele toetudes on kindlaks tehtud, et ehitusmaterjalide tootmise sisendenergia moodustab 10-20% ja hoonete kasutuse käigus kulutatud energia panuseks on 80-90% kogu hoone elutsükli jooksul kulutatud energiast (Cardenas jt, 2017). Antud infot on tähtis soojustusmaterjali valiku protsessis tehtavate hinnakalkulatsioonide puhul arvestada ning lähtuda tuleks seejuures eelkõige materjali ökoloogilisest mõjust ja selle keskkonnamajanduslikust maksumusest (Kono jt, 2016). Üheks võimaluseks on alandada hoonete negatiivset keskkonnamõju vastutustundliku soojustusmaterjalide valikul abil (Hammond jt, 2011). Lisaks on erialakirjanduses soojustusmaterjalide valiku kriteeriumite puhul ära märgitud veel teisi tehnilisi näitajaid nagu materjali tulekindlus, reageerimine veeaurule, vastuvõtlikkus kahjuritele jne, kuid antud töö eesmärgi ja mahu piiratuse tõttu neid teemasid ei käsitleta.

Olelusringi analüüs (LCA) katab soojustustoote keskkonnamõju kogu selle elutsükli jooksul ning see katab tooraine kaevandamist, toote valmistamist, levitamist, paigaldust, kasutust, demontaaži ja ümbertöötlemist või utiliseerimist (PU EUROPE, 2013). Soojustusmaterjali olelusringi teetähistena defineeritavad etapid on esitatud joonisel 1.7.



Joonis 1.7 Soojustusmaterjali olelusring (Rodrigues jt, 2018).

Joonisel 1.7 on kokkuvõtvalt esitatud soojustustoote kogu elukaare keskkonnamõju hindamise põhikontseptsioon, mis on jagatud tinglikult viide etappi, alustades materjali hankimisest kuni selle sihtotstarbelise kasutuse lõpuni. Iga tsükli etapil on erinev keskkonnamõju suurus ning kõige suurem osa soojustusmaterjali sisendenergiast kulutatakse reeglina selle valmistamisel ja transpordil. Hoone elutsükli alates materjalide kaevandamisest kuni lammutusprahi utiliseerimiseni illustreerib joonis 1.8.



Joonis 1.8 Hoone elutsükli faasid koos viitega materjali sisendenergia arvestamise kontseptsioonidele (Athena Sustainable Materials Institute, 2019)

Ehitusmaterjali keskkonnakoormuse määramisel on kasutusel kolm lähenemisviisi. Esiteks alates tooraine kaevandamisest kuni toote väljumiseni tehase väravast (*cradle to gate*), teiseks tooraine kaevandamisest kuni ehitusplatsini (*cradle to site*) ja kolmandaks alates tooraine kaevandamisest kuni materjali eluea lõpuni (*cradle to grave*). Kusjuures

kehtivate standardite järgi loetakse materjali kokkuleppeliseks elueaks 60 aastat (BRE Global Environmental Profiles methodology, 2008).

Esimeses faasis on suurimaks negatiivseks keskkonnamõjaks materjali toomiseks kasutatava energia saasteekvivalent. Antud juhul läheb arvesse see energia, mis kulutatakse alates tooraine hankimisest kuni valmistoote väljastamiseni tehases. Teise etapina saab käsitleda faasi, mil toimub materjali transportimine ehitusplatsile ning selle paigaldus. Antud lõigus saab peamiste märksõnadena välja tuua materjali transpordiks kulutatud energiat (tootmiskoha kaugus ehitusplatsist), materjali paigaldustehniline efektiivsus (paigaldatud osa materjalist) ning paigaldusprotsessi käigus tekkivate jäätmete kogus, mis hõlmab nii materjalijääke, paigaldustarvikuid kui ka pakendeid (Lassio jt, 2016). Materjalijäägi moodustab see osa soojustusmaterjalist, mille võrra erineb paigaldatud materjali maht ehitusplatsile transporditud materjali mahust ning seda saab väljendada ka rahalise materjalikuluga (John & Itodo, 2013). Keskmine materjalikadu ehitusplatsil võib soojustustoodete puhul moodustada isegi kuni 15%, kuid reegila jääb see näitaja siiski vahemikku 1-10% (Berge, 2009).

Soojustustoodete paigaldusjääkide määrad sõltuvad toote tüübist ning need võivad oluliselt erineda. Jääkade materjalide puhul jäävad materjalikao määrad vahemikku 10-15%, pehmete ja puistematerjalide puhul on need näitajad keskmiselt 8% ja 5% (Houghton jt, 2006). Kuigi nafta baasil valmistatud soojustustooted on ümbertöödeldavad, siis ainult 5-10% nendest ehitus- ja lammutusjäätmest läheb taaskasutusse (PU Europe, 2013).

Kehtib seos, mida jäigem ja sünteetilisem on soojustusmaterjal, seda suurem on paigaldusjääkide osakaal ning paigaldustarvikute pakendite maht ja vastupidi. Looduslikel ja mineraalselt päritolu pehmetel rullmaterjalidel on materjalikad minimaalsed, jäädes mahuliselt 1 - 5% juurde. Mineraalvilla plaatide ja jääkade vahtplastist plaatide puhul, annavad allikad jääkide määraks vastavalt 5% ja 10% (Construction Resources and Waste Platform, 2010).

Alates soojustustootete paigaldusest (optimaalse kasutusaja jooksul), on soojustusmaterjali keskkonnamõju selgelt positiivne, kuid materjali eluea lõpus on see taas negatiivne (demontaaž, lammutus, sorteerimine, transport ja ettevalmistus ümbertöötlemiseks, ümbertöötlemine, utiliseerimine jne). Looduslike materjalide elutsükli lõpus on nende keskkonnamõju oluliselt väiksem kui sünteetilistel materjalidel, millest osa võib liigituda ohtlike ehitusjäätmete kategooriasse (Swedish Environmental Protection Agency, 2016). Sageli ei ole võimalik sünteetilisi materjale arvestatavas osas taaskasutada ning nende jäätmel vajavad kulukat ja energiamahukat ümbertöötlemist (Bolden jt, 2013). Materjalijääkide taaskasutamine muude sõlmede soojustamiseks

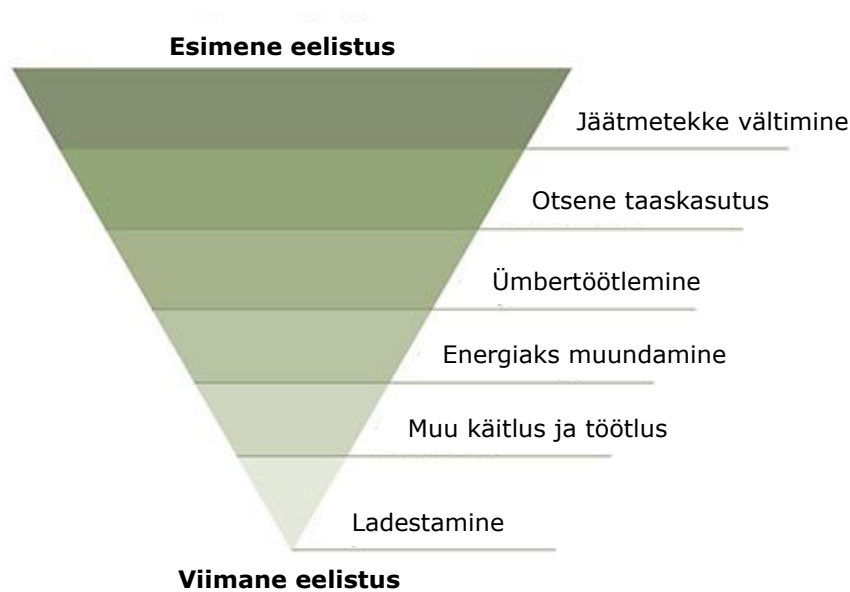
võimaldaks lisaks majanduslikule efektiivsusele vähendada ka otsest keskkonnareostust (Ali jt, 2013). Samuti on materjalikadu võimalik oluliselt alandada ka põhjalikuma planeerimise ja täpsema eelarvestamisega (Ding, 2014). Teostatud uuringute kohaselt võib materjalide ülekulu suurendada ehitusprojekti kogumaksumust isegi 21-30% võrra (John & Itodo, 2013).

Levinud on ka eksimused vajalike materjalikoguste kalkuleerimisel ning nende ebaefektiivsel kasutamisel, millega reegline kaasneb materjali ülekulu. Inglismaal läbi viidud uuringu tulemuste järgi moodustas ehitusplatsilt jäätmekäitlussüsteemi suunatavatest jäätmetest täiesti kasutamata materjal koguni 13% (Building Future, 2018). Kuna arvestatav osa ehitusjäätmetest ei ole otse taaskasutatav, siis kaasneb sellega arvestatav jäätmekäitluskulu ning antud osa toodetud ehitusmaterjalist ei anna hoonele mingit lisandväärtust (John & Itodo, 2013).

Süntheetiliste materjalide eelistamise põhilisteks argumentideks on nende hind ja soojustehnilised omadused, mis sageli kaaluvad esmapilgul üles teised tähtsad aspektid nagu materjali sisendenergia, taaskasutatavus, ümbertöödeldavus jms kaudne keskkonnamõju (Kunič, 2017). Vahetu negatiivne keskkonnamõju avaldub ka materjalide paigaldamisel tekkiva jäätmete koguse kaudu (Thornback, 2013; Singh jt, 2017). Seega on lisaks sünteetiliste materjalide loodust ohustavale keemilisele koostisele suureks probleemiks ka nende pakendid. Kaasuste analüüs on näidanud, et ehitustööde lõpuks moodustavad 35% kogu jäätmetest pakendid (Construction Resources and Waste Platform, 2010).

Arvestatavaks keskkonnaalaseks probleemiks on ka keemilise protsessi käigus tahkuvad isolatsioonimaterjalid, mida transporditakse ehitusplatsile kas vedelal või gaasilisel kujul. Nendel pakenditel puudub alternatiivne ja korduv kasutusotstarve ning reeglina liigituvad need pakendid peale tarvitamist ohtlike jäätmete kategooriasse. Antud jäätmeklassi kuuluvad näiteks kõik ehitusvahud, millega paigaldatakse isolatsiooniplaate ning täidetakse nende ühenduskohti. Ehitusmaterjalide jäätmeteks loetakse kasutusel olnud ehitusmaterjale või seda osa uuest materjalist, mis tuleb paigalduse käigus eemaldada või mis ei leia ehitustööde käigus kasutust (Surendra jt, 2016). Reeglina klassifitseeruvad ehituses kasutatavate keemiatoodete määrduvad pakendid ohtlike ehitusjäätmete klassi (EWC klassifikatsiooni järgi kood 16 05 04*) (Lawrence, 2015).

Järgneval joonisel 1.9 on esitatud jäätmemajanduse põhikäsitlus, mille kontseptuaalset sisu järgides saab materjalide keskkonnakoormust vähendada.



Joonis 1.9 Kaasaegne materjalide jäätmehierarhia (Simon, 2019).

Materjalide valiku protsessis tuleb suunata fookus eelkõige jäätmete tekke vältimisele (joonisel 1.9 märgitud esimene eelistus) ning vältima peaks püramiidi alumise tipu poole jäävaid protsesse (Lehmann, 2011). Vaatamata arenenud riikide pingutustele, on inimtekkeliste jäätmete mahud kogu maailmas jätkuvalt suurenemas. Näiteks 2016. aastal suurenes Euroopa liidu liikmete (EU-28) jäätmemahut 3% ehk 75 miljoni tonnini ning keskmiselt tekkis jäätmeid inimese kohta kokku aastas 1,78 tonni (EEA, 2019).

Suurest nõudlusest tingitud tihe ehitustööde ajagraafik ning kiire ehitustempo ei soosi materjalide tõhusat kasutust, kuna tööde tellijad on sageli nõus keskmisest suuremast materjalikaost tingitud ehitusmaksumuse tõusu kulud katma. Uuringute tulemused ja objektidepõhised küsitlused on näidanud, et mida enam kasutatakse ehitusel allhanketööd, seda ebaefektiivsem on materjalikasutus ehk seda suuremad on nii rikitud materjalide osakaal kui ka paigaldusjäätmete kogus (John & Itodo, 2013; Aleksanin, 2019). Seda järeldust kinnitavad ka autori poolt viimase aasta jooksul teostatud erinevate ehitusplatside vaatlused Tartus ja Tallinnas. Antud olukorda ilmestab ka järgnev illustratsioon 1.10, mis on üles pildistatud käesoleva aasta aprillis.



Joonis 1.10 Kortermaja ehitusplats soojustustööde ajal Tartus 2020. aastal (autori foto).

Soojustamise tööloik on hoonete ehitusel üks jääkide ja jäätmete mahukamaid, kuna selle käigus tekib palju materjali mõõtu lõikamise vajadusest tingitud paigaldusjääke ja kilepakendeid sh montaaživahtude taarat. Suurimad paigaldusjäägid tekivad sopolise arhitektuuriga hoonete soojustamisel jääkade soojustusmaterjalidega. Nende hoonete ehitamisel on suurem ka paigaldusmaterjalide kulu (Sapuy, 2016). Praktikas on keeruline kindlustada materjali ühenduskohtades materjaliga võrdväärne soojapidavus ja eksisteerib oht külmasildade tekkele (Chudley & Greeno, 2014).

Kõik soojustusmaterjalide jäägid, mis sisaldavad üle 0,1% sünteetilisi gaase (CFC) kuuluvad ohtlike jäätmete kategooriasse (regulatsioon EC Nr 1272/2008, jäätmekood 17 06 03*). Antud juhul on levinumateks toodeteks PUR ja XPS soojustused (Swedish Environmental Protection Agency, 2016). Kehtivate regulatsioonide kohaselt on ohtlike ainete otsene kasutamine ehitusmaterjalide tootmises tänaseks keelatud, kuid varasemalt paigaldatud materjalidest pärineval saastel on reaalne oht ümberehitus- ja lammutustööde käigus jõuda looduskeskkonda. Lisaks tekib paljude materjalide paigaldamise protsessi käigus lühilaine saaste, tulenevalt näiteks keemilisest reaktsioonist, millega materjal saavutab oma lõpliku oleku (nt vedela massi tahkumise käigus eralduvad kasvuhoonegaasid). Keskkonnaohtlikuks peetakse lisaks keskkonda otseselt kahjustavatele materjalidele (nt asbest) ka kemikaalidega töödeldud looduslikke materjale.

Nafta rafineerimisprotsessi käigus tekkivate jääkide baasil toodetud sünteetilisest materjalidest on ohtlikumad erinevad montaaživahud, tihendusmaterjalid, isolatsioonained, ehitusvaigud, tuletõkkematerjalid, põrandakattematerjalid jms. Reeglina liigituvad ehitusvaldkonnas kasutust leidnud keemiatoodete määratud

pakendeid ja taara ohtlike ehitusjätmete kategooriasse. Eeltoodust tulenevalt on otstarbekas suurendada ehitajate teadlikkust soojustusmaterjalide kasutamisega kaasnevast otsesest keskkonnamõjust (Lawrence, 2015).

1.4. Materjalivaliku kriteeriumid, olemasolevad tehnilised abivahendid ja arendusprotsessi metoodika

Esmased soojustusmaterjali valiku kriteeriumid määrab ära soojustatava hoone või tarindiosa konstruktiivne materjal ja selle arhitektuurne lahendus. Betoonhoonete soojustamiseks on sobivamad ühed lahendused ja puitkandekonstruktsioonide puhul on eelistatud teised variandid (Chudley & Greeno, 2014). Kuna soojustusmaterjalide valiku osas eksisteerivad reeglina alternatiivid, siis on nende vahel võimalik teha keskkonnateadlikumat valikut. Täna on soojustusmaterjali valiku kaheks peamiseks kriteeriumiks hind ja isolatsioonivõime. Materjali päritolule ning selle keskkonnamõjule reeglina selles faasis ei mõelda. Tootjate suunamine soojustusmaterjalide kasutajate teadlikuma valiku kaudu on üheks võimaluseks liikuda edasi jätkusuutlikuma arengu suunas. Mida suuremas ulatuses kasutatakse ehitustööl keskkonnasõbralikumaid materjale, seda rohkem neid tootjate poolt ka turul pakutakse. Pikemat perspektiivi silmas pidades on looduslike materjalide eelistamine ilmselgelt kõige kestlikum käitumisviis.

Programme, mis aitavad arvutada materjalide kulu ja nende kasutamisega kaasnevaid keskkonnamõjusid on turul mitmeid. Alates 1990. aastatest on arendatud suur hulk ehitussektoris kasutatavaid toote hoone elutsükli analüüsi tööriistu, mis baseeruvad ISO 14040 standardi juhiste peale. Samas on iga rakendus oma spetsiifiliste nüansside ja metoodikaga ning see teeb nende võrdlemise keeruliseks (Lasvaux jt, 2013).

Olelusringi hindamise kontseptsioon jõudis päevakorda 1960-ndatel, kui hakati teadvustama, et rahvastikukasvu ja tarbimise suurenemisega kaasnevad probleemid nii tooraine kui ka energiasektori jätkusuutlikkusele. Seoses toote olelusringi hindamise keerukusega on turule toodud mitmed tarkvarapaketid nagu SimaPro, Open LCA, GaBi, Umberto NxT, Quantis Suite, Bousted Model, CES-Selector jpt. Samas on need tavakasutajale liialt keerulised ning need ei ole kuigi sobivad paigalduseelses staadiumis materjalivaliku tegemiseks (Morini jt, 2019).

Üldises plaanis saab programme ja kalkulaatoreid jagada kolme kategooriasse. Esimeses rühmas on tinglikult olulusringi hindamise tarkvarad. Suurema osa neist järgib olulusringi hindamise ISO standardi suuniseid ning need on tasulised ja litsentseeritud.

Teise kategooriasse saab paigutada materjalide või protsesside süsiniku jalajälge arvutavad abivahendid. Need on erinevalt olulusringi hindamise tarkvarast veebis kättesaadavad ning võimaldavad hinnata ettevõtte või indiviidi poolt tekitatavat keskkonnamõju, arvestades tegevusega kaasnevat süsinikuemissiooni. Kolmandaks on klassifitseeritud väga spetsiifilised ja ehitustehnilised kalkulaatorid, kuhu on integreeritud ka keskkonnamõjude moodulid. Kõigi kolme kategooria ühiseks väärtuseks on suuremal ja vähemal määral tarbimiskäitumisest või tootmisest tuleneva keskkonnamõju teadvustamine läbi olulusringi kontseptsiooni (Lasvaux jt, 2013).

Tabelisse 1.3 on koondatud osa enam levinud tarkvararakendustest, mida täna protsesside, materjalide, hoonete elutsükli keskkonnamõju hindamisel kasutatakse.

Tabel 1.3 Valik olulusringi ja keskkonnamõju hindamise tarkvarapakette (autori koostatud valik).

Programmi nimetus	Riik	Link	Tüüp	Kommentaar
Athena	Kanada	http://www.athenasmi.org	LCA	Hoonespetsiifiline
Arquimedes	Hispaania	http://arquimedes.cype.es/	LCA	Hoonespetsiifiline
BEES	USA	http://www.nist.gov/	LCA	Hoonespetsiifiline
Carbon Footprint	Suurbritannia	https://www.carbonfootprint.com/	GWP	Üldine
eToolLCD	Austraalia	http://etoolglobal.com/	LCA	Hoonespetsiifiline
Eco-Bat	Šveits	http://www.eco-bat.ch/	LCA	Hoonespetsiifiline
EcoCalculator	Kanada	http://www.athenasmi.org/	LCA	Hoonespetsiifiline
EcoEffect	Rootsi	http://www.ecoeffect.se/	LCA	Hoonespetsiifiline
EQUER	Prantsusmaa	http://www.izuba.fr/	LCA	Hoonespetsiifiline
GaBi	Saksamaa	http://www.gabi-software.com	LCA	Üldine
GaBi-Build-IT	Saksamaa	http://www.pe-international.com/	LCA	Hoonespetsiifiline
GreenCalc+	Holland	http://www.greencalc.com/	LCA	Hoonespetsiifiline
LEGEP	Saksamaa	http://www.legep-software.de/	LCA	Hoonespetsiifiline
One Click LCA	Soome	http://www.oneclicklca.com/	LCA	Hoonespetsiifiline
OpenLCA	Saksamaa	http://www.openlca.org/	LCA	Üldine
SimaPro	Holland	https://simapro.com/l	LCA	Üldine
ULCA	Saksamaa	http://www.simulationstore.com/	LCA	Üldine
TEAM	Prantsusmaa	http://ecobilan.pwc.fr/	LCA	Üldine
Umberto	Saksamaa	http://www.umberto.de/en/	LCA	Üldine
HTflux	Saksamaa	https://www.htflux.com/en/	MAT	Materjalispetsiifiline

Eeltoodud valikust on kõige laiema keskkonnanalüüsivõimega tarkvarad kogu LCA metoodikat katvad programmid. Olulistsükli hindamise rakendustest on selgelt populaarsemad SimaPro, OpenLCA, Umbeto ja GaBi.

GaBi ja SimaPro, on olemuselt sarnase ülesehitusega olelusringi hindamise tarkvarad ning need on mõeldud erinevatele sihtrühmadele. Teadlikumatel ja valdkonnas kogenumatel kasutajatel on võimalik valida rakenduste siseselt detailsemaid eelseadeid, mida saab vastavalt olelusringi hindamise tüübile redigeerida. Selliseid olelusringi hindamise programme kasutatakse põhiliselt teadusuuringutes, akadeemilistes ringkondades, ettevõtetes ja konsultatsioonifirmades. Tavakasutajatele võimaldavad need rakendused piiratud juurdepääsu standardseadistustele koos eeldefineeritud raportitega. Ehitustehnilisest ja hoonespetsiifilisest aspektist vaadatuna on lihtsam kasutada olelusringi hindamise tarkvaradest eLCA või CAALA programme. GaBi, SimaPro, Umberto ja LEGEP nõuavad juba kõrgemaid valdkonnaalaseid teadmisi ja kasutusoskusi. Kui eesmärgiks on analüüsida konkreetset materjali, siis parimateks rakendusteks on GaBi, LEGEP või Umberto (Bach jt, 2018).

Olelusringi hindamise protsessi läbiviimiseks vajatakse ligipääsu andmebaasidele, mis sisaldavad informatsiooni nii tootmisprotsesside, toodete, energia, toorainete, töödeldud komponentide, rafineerimise kulude kui ka nendest tulenevate keskkonnamõjude kohta. Teatud juhtudel on olelusringi hindamisel kasutatavad andmebaasid omavahel integreeritud, muutes nende kasutamise mugavamaks. LCA rakenduste litsentseeritud kasutajad saavad piiramatut ligipääsu nende programmidega integreeritud andmebaasidele, kus on alati kõige värskemad andmed (energia- ja heiteandmestik riikide kohta, andmed materjalide ja protsesside energiamahukuse kohta jne). Olelusringi hindamise arvutused põhinevad enamasti massi ja mahuga seotud andmetel.

Tarkvarapaketid on oma ülesehituselt sarnased, hõlmates nii kasutajaliidest tootesüsteemi modelleerimiseks kui ka olulistsükli protsesside mõju hindamise moduleid. Tulemused ühendatakse arvutusmoduli abil baasides olevate andmete abil tootesüsteemi modelleeritud kasutajaliidesesse (Bach jt, 2018).

Olelusringi hindamise üks juhtivatest tarkvaradest GaBi kasutamine põhineb kolmel alusel: plaan, protsessid ja vood. Plaani koostamisel pealkirjastatakse töö, mille kohta olelusringi hindama hakatakse. Järgnevaks otsitakse andmebaasidest protsesse, mis tootmisahela osasid kirjeldaks. Protsesse saab andmebaasist suunata töölauale ning seeläbi üles ehitada moodulitest kogu protsessi jada. Protsesside siduvateks osadeks on vood, mida valides on võimalik näha energia ja ressursikasutust protsessi loomiseks. Juhul kui protsesse omavahel ühendada, siis kuvatakse vood automaatselt. Kõik vood ja protsessid on kujutatud visuaalselt läbi moodulsüsteemide. Laiema mõju hindamiseks saab juurde linkida täiendavaid protsesse. Näiteks transpordiks vajamineva diisli tootmisest tulenev mõju jne. Olelusringi vältel toimuvatest protsessidest ja voogudest on kasutaja töölaual pidev ülevaade. Täpsemaid ja üksikasjalikumaid tulemusi on võimalik

näha ka graafiliste moodulite abil. Valmis analüüsi saab süsteemi poolt struktureeritult raportina alla laadida PDF formaadis (GaBi, 2020).

Vaadeldes teisi olelusringi hindamise programme nagu Umbero, SmartPro, ja OpenLCA, siis rakenduste tööpõhimõtted sarnanevad eelkirjeldatud GaBi tarkavaraga. Olelusringi hindamiseks kasutatakse baasides sisalduvaid andmeid ning need seotakse protsesside ja seotakse voogudega. Programmide peamiseks erinevuseks on algandmete päritolu, mille tõttu võivad keskkonnakoormuse näitajad olla siiski pisut erinevad. Kahe juhtiva LCA programmi GaBi ja SimaPro rakenduste võrdlusel on tähendatud, et juhuslikult valitud 100 protsessi hulgas erinesid tulemustes kuuel juhul märkimisväärsed erinevused, mille põhjustas erinevat metoodikat rakendatavate andmebaaside kasutamine. (Herrmann & Moltesen, 2015).

Teatud juhtudel on olelusringi hindamisel kasutatavate andmete baasid omavahel integreeritud ning see võimaldab pakkuda kasutajatele kõiki soovitud sisendeid. Need rakendused võimaldavad kujundada tooteid keskkonnanõuetele vastavaks, optimeerida toodete ja energia ressursikasutust ning rakendada jätkusuutliku arengu põhimõtteid. Lisaks keskkonnateadlikkuse tõusule ja tootmise optimeerimisele saab olelusringi hindamise tarkvarasid kasutada ka teadustöodes ning muudes analüüsides. Sageli litsentsi alustel pakutavad olelusringi hindamise tarkvarad jäävad tavainimestele kaugeks ning pigem on need kasutust leidnud eelkõige tootmisettevõtetes, konsultatsioonifirmades ja akadeemilistes ringkondades (Bach jt, 2018).

Teiseks suuremaks kategooriaks on süsinikujalajälge teadvustavad tarkavarad, mis erinevalt olelusringi hindamise programmidest on valdavalt tasuta kättesaadavad ning tavakasutajale lihtsamad. Populaarseim ja laiapõhjalisem tööriist süsiniku jalajälje arvutamiseks on Carbon Footprint (Carbon Footprint, 2020). Antud veebirakendus võimaldab süsiniku jalajälge arvutada nii indiviidi, toote kui ka ettevõtte kohta. Kalkulaator kasutab 2019. aasta kasvuhoonegaaside aruandluse teisendustegureid ning riikide saastekoefitsientide andmeid. Tööriist arvutab sisestatud parameetrite põhjal ettevõtte, toote või inimese elustiili arvestades süsiniku jalajälje ühikuga tonni inimese kohta, millele on toodud võrdluseks nii Euroopa Liidu kui ka terve maailma keskmise süsiniku jalajälje võrdlusandmed.

Rakenduste loendi kolmandas kategoorias on spetsiifilised ja ehitustehnilised kalkulaatorid, mille abil saab teha laiemale sihtrühmale huvi pakkuvaid arvutusi. Reeglina leiab selliseid arvutusprogramme ka soojustusmaterjalide tootjate veebilehtedel. Suurem osa nendest on lihtsad kalkulaatorid, mis võimaldavad arvutada soojustamiseks vajaliku materjalikoguse ja hinna, et soojustusprojekti sihtparameetrid oleks täidetud.

Soojustusmaterjalide keskkonnamõju sedalaadi kalkulaatorid ei arvesta ning reeglina on need üles ehitatud viisil, mis on kasulik konkreetse materjalitootja ärihuvidele.

Üheks erandiks on antud rakenduste hulgas Saint-Gobain kontserni kuuluva Isoveri poolt loodud kalkulaator TachCalc 2.0, millel on lisaks ehitustehnilistele arvutustele kajastatud ka keskkonnamõjude moodul. Tööriist arvutab nii soojusenergia voogu ja tarindipindade temperatuuride vahemike kui ka soojusmaterjali paksust sõltuvalt konstruktsiooni spetsifikatsioonist. Sinna on integreeritud ka keskkonnamoodul, mis arvestab soojustamisest tingitud süsinikemissiooni vähenemist. Kalkulatsioonid saab teha nii hoone piirete kui ka tehniliste sõlmede soojustamise kohta (Saint-Gobain, 2020).

Üldistades võib öelda, et ka keskmised ja väiksemad ettevõtted on hakanud teadvustama eeliseid, mis kaasnevad keskkonnateadlikkuse propageerimise ja jätkusuutliku ressursikasutuse eelistamisega ning antud temaatikale pööratakse üha enam tähelepanu. Käesoleva magistr töö raames arendatava kalkulaatori kontseptsioon võiks huvi pakkuda ka teiste valdkondade toodete tootjatele, kuna see võimaldab teha keskkonnateadlikke valikuid.

Arendusprotsessi metoodika. Tarkvaraarenduses kasutatakse väga erinevaid protsessimudeleid. Tuntumateks nendest on koskmudel (*waterfall model*), evolutsiooniline mudel (*evolutionary development*) ning erinevad hübriidmudelid (inkrementaalne, spiraalne, prototüüp, agiilne, komponent jne).

Kõige enam levinud nendest on klassikaline arendusmudel ehk koskmudel, mis on jadamisi kulgevat protsessi kirjeldav mudel. See tugineb tavalises insenertehnilises tootearenduses kasutusel olevale protsessimudelile, kus ühe etapi töö tehakse korraga ära ja seejärel liigutakse järgmisesse etappi. Etappide vahele jäävad küll tagasiside tsüklid, kuid praktikas on arendusprotsess pigem rangelt lineaarne (Akhilesh, 2012; Rivero jt, 2014).

2. KALKULAATORI ARENDUSE METOODIKA

2.1. Soojustusmaterjali valikukontseptsioon ning kalkulaatorrakenduse tööpõhimõte

Soojustusmaterjalid liigituvad nende valmistamiseks kasutatud tooraine päritolu põhiselt kolme rühma (naftasaadusel põhinevad, mineraalsed ja looduslikud) ning neljanda kategooriana saab määratleda uudseid ja kõrgtehnoloogilisi materjale. Kuna täna on turul saadaval kõik soojustusmaterjalide kategooriad, siis on valiku tegemisel otstarbekas kaaluda kõiki võimalikke alternatiive.

Kuna soojustusmaterjalide füüsikalised ja tehnilised omadused on erinevad, siis tuleb arvestada nende sobivust iga konkreetse soojustusprojekti tehniliste nõudmiste ja eripäraga (Merritt & Ricketts, 2001). Uute hoonete puhul on soojustusmaterjalide valikuvõimalused laiemad. Vanade hoonete renoveerimisel seab konstruktsioonimaterjal teatud piirangud ning paljusid materjale ei ole võimalik kasutada (füüsilised piirangud, reaktiivsus, sobivus, esteetilisus jne). Kuna uute hoonete ehitus nõuab keerukat planeerimist ning projekteerimist, siis materjalide valiku määravad arhitektide, projekteerijate ja ehitusinseneride vastavad eelised ja otsused (Chudley & Greeno, 2014). Renoveerimistöode puhul on otsustajate ring aga märksa laiem, alates kvalifitseeritud ehitajatest kuni hobi korras töid teostavate remondimeesteni. Seega on keskkonnateadlikum lähenemisviis materjalivalikule endiselt aktuaalne ning materjalide valikuks välja töötatava kalkulaatorrakenduse potentsiaalsete kasutajate ring on väga lai.

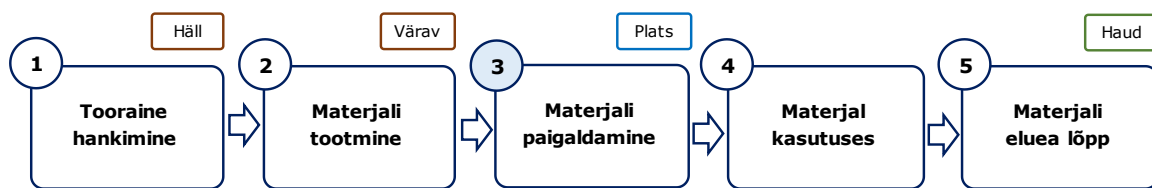
Kalkulaatori arenduse metoodika hõlmab kahte protsessi: kontseptsiooni väljatöötamist, selle sobivuse testimist ning kalkulaatori arendamist ja selle Exceli-põhise versiooni testimist. Metoodika sobivuse testimise tulemuste lühikokkuvõtte on esitatud valikukontseptsiooni tutvustavas osas.

Soojustusmaterjali valikukontseptsioon ning selle testimise tulemused.

Valikumetoodika keskendub erinevate alternatiivsete materjalide võrdlusele, lähtudes eelkõige nende kasutamisega kaasnevast mõjust looduskeskkonnale. Sõltuvalt soojustusmaterjali toorainelisest päritolust ja spetsiifikast, on selle tootmisel ja transpordil kulutatud energiat, mille ekvivalendiks on vastav saastekogus (Morini jt, 2019). Kuna materjalide energiamahukus erineb olulisel määral, siis on sellel aspektil keskkonnateadliku valiku seisukohast tähtis roll. Samuti on oluline soojustusmaterjalide paigaldusjääkide (sh ohtlike jäätmete ja pakendite) teke ning nende nõuetekohase

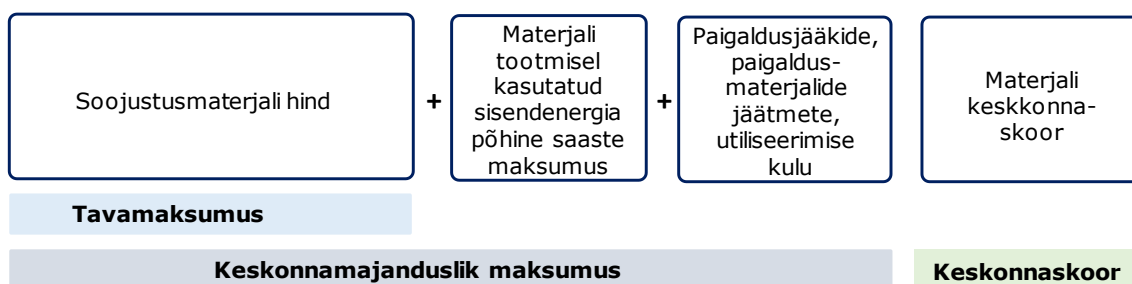
käitlemisega kaasnevad kulutused. Lisaks on juba materjali valiku algstaadiumis mõistlik arvestada seda, mis saab materjalist peale selle efektiivse eluea lõppu. Keskkonnateadlikul valikul on tähtis arvestada materjali kasutamise mõju ökosüsteemile kogu elukaare jooksul. Võimalusel tuleks püsivalt eelistada materjale, mis on ümbertöödeldavad või mille utiliseerimine on keskkonnale ohutum.

Kuidas ja mille alusel valitakse soojustusmaterjale? Millele toetudes teevad tarbijad lõpliku valiku soojustusmaterjali osas? Joonisel 2.1 on esitatud soojustusmaterjali elukaar.



Joonis 2.1 Soojustusmaterjali elutsükkel (autori koostatud).

Materjali valik tehakse soojustustoote elutsükli käsitluses vahetult enne selle paigaldamist (joonisel 2.1 tumeda taustaga märgitud etapp 3). Reeglina on materjalivaliku ainsad kriteeriumid selle hind ja soojustehnilised näitajad ning materjali kasutamise keskkonnamõju jäetakse otsustusprotsessis arvestamata. Antud juhul peetakse keskkonnamõju all silmas materjali sisendenergiat, paigaldusel tekkivaid jääke ja jäätmeid ning materjali staatust selle elukaare lõpus (nt taaskasutatav, ümbertöödeldav, utiliseeritav). Lisaks materjali soojustehnilistele omadustele ja maksumusele on neid aspekte samuti oluline arvestada. Antud valikukontseptsiooni põhialused töötati välja autori poolt 2018. aastal koostatud bakalaureusetöö käigus ning need on kokkuvõtvalt esitatud joonisel 2.2.

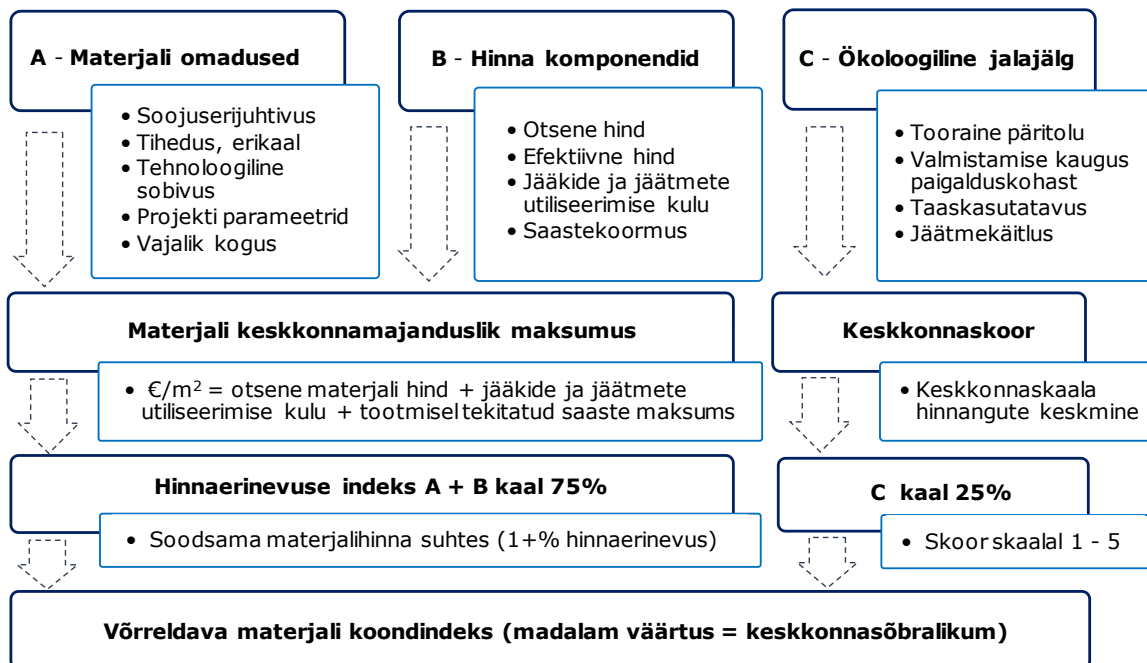


Joonis 2.2. Materjali valikuprotsessis arvestatavad komponendid (autori joonis).

Antud soojustusmaterjali valikukontseptsioon hõlmab kaudselt kogu materjali elutsükli, alates selle valmistamiseks vajamineva tooraine hankimisest kuni demontaaži ja utiliseerimiseni, kaasates otsustusprotsessi eelmainitud kolm täiendavat olulist aspekti. Joonisel 2.2 esitatud kontseptsioon arvestab lisaks materjali tavamaksumusele ka selle

sisendenergiat (tootmisel kulutatud energial põhineva keskkonnamõju moodul), materjali paigaldamisel tekkivate jääkide ja jäätmete käitlemise kulu (jäätmete ja ehitusprahi moodul) ning materjali üldine suhe keskkonnaga (keskkonnaskoori moodul). Oluline on märkida, et antud käsitluses soojustusmaterjali kasutusaja jooksul tekkinud positiivne keskkonnamõju on kõigil materjalidel võrdne, kuna kavandatava soojustuskihi isolatsioonivõime (R väärtus) on konstant ja lisaks on tehtud eeldus, mille kohaselt iga materjali optimaalne kasutusaeg on ühesugune (nt 40 või 60 aastat).

Joonisel 2.3 detailsemalt esitatud lähenemisviis keskendub alternatiivsete materjalide laiendatud keskkonnamajandusliku maksumuse võrdlusele, mis arvestab ka nende päritolust ja füüsilistest omadustest tulenevat mõju meid ümbritsevale looduskeskkonnale.



Joonis 2.3 Soojustusmaterjali valikukontseptsioon koos selgitustega (autori koostatud).

Valikumetoodika hõlmab kolme moodulit. Esimeses kahes moodulis (joonisel A ja B) arvutatakse materjali keskkonnamajanduslik maksumus, mille alusel formeeruvad materjalide hinnaindeksid (iga materjali maksumuse suhteline erinevus kõige soodsama materjali suhtes, mis võetakse baasiks). Hinnaerinevuse indeksile on mudelis omistatud kaal 75%. Materjali ökoloogilise jalajälje moodulis (joonisel C) antakse igale materjalile individuaalne keskkonnaskoor, mis saadakse skaalal 1-5 antud hinnangute keskmisena, kusjuures väiksem näitaja tähendab keskkonnasõbralikum materjali ja vastupidi. Antud komponendi kaaluks on mudelis 25%. Vastavate komponentide lõplike kaalude paikapanelul on lähtunud asjaolust, et majanduslik aspekt (nn materjali maksumus) oleks otsustusprotsessis siiski määrav. Metoodika võimaldab välja arvutada iga

konkreetses materjali maksumuse etteantud pinna soojustamiseks (antud kontseptsiooni puhul on see eeldefineeritud konstant), tuginedes materjalikihi soovitud isolatsiooninäitajale (antud käsitluse puhul on see R väärtus ehk materjalikihi soovitud soojustakistus).

Metoodika rakendamise tulemusena leitakse iga alternatiivse materjali keskkonnamajanduslik koondindeks, mille alusel saab neid võrrelda ning millele saab otsuse tegemisel toetuda. Metoodika sobivuse testimiseks koostati erinevatest turul saadaolevatest soojustusmaterjalidest juhuslik valim (32 materjali) ning teostati mudeli algoritmi kasutades vastavad arvutused. Antud valmisse sattus nii naftasaadustel baseeruvaid materjale (8), mineraalsel toorainel põhinevaid tooteid (10) kui ka taimset ja loomset päritolu toorainest valmistatud looduslike materjale (14). Tabelis 2.1 on esitatud kokkuvõtvalt metoodika väljatöötamisel 2018. aastal teostatud testimise tulemused.

Tabel 2.1 Metoodika aluspõhimõtete testimise tulemused (autori arvutused).

Materjali nimetus	A €/m ²	A+B ↓ €/m ²	Δ %	75%	25%	Koondindeks
1 Tenapors NEO	6,93	8,10	Baas	1,00	4,50	1,88
2 Isover KL-AKU	7,28	8,21	1,4%	1,01	3,00	1,51
3 Paroc eXtra stone	7,71	8,46	4,5%	1,04	4,25	1,85
4 EPS 60 Estplast	7,00	8,51	5,0%	1,05	4,00	1,79
5 Rockslab	7,68	8,70	7,4%	1,07	4,25	1,87
6 EPS 60 Reiden	7,50	8,97	10,7%	1,11	3,75	1,77
7 Rockwool Superrock	8,82	9,40	16,0%	1,16	4,00	1,87
8 UltraTouch	9,29	9,47	16,9%	1,17	3,25	1,69
9 Kanuf Space Slab 035	9,29	10,12	25,0%	1,25	3,25	1,75
10 Ursa Lasivilla Lambda 37	9,29	10,16	25,4%	1,25	3,00	1,69
11 Rockwool Frontrock S	11,00	11,87	46,5%	1,46	3,25	1,91
12 Paroc eXtra	11,37	11,91	47,0%	1,47	3,75	2,04
13 SteicoFlex	14,56	15,01	85,3%	1,85	2,25	1,95
14 Tselluvill Werrowool	15,13	15,33	89,3%	1,89	4,75	2,61
15 Isover KL 33	15,28	15,87	95,9%	1,96	4,50	2,59
16 Technicol Carbon PRO	14,67	16,22	100%	2,00	2,00	2,00
17 Finnfoam FL300PX	14,76	16,24	100%	2,00	2,50	2,13
18 Dow Styrofoam 300	14,78	17,01	110%	2,10	4,75	2,76
19 Isolina ISO-L	19,01	19,23	137%	2,37	1,50	2,16
20 EkovillaLevy	19,10	19,35	139%	2,39	1,75	2,23
21 Hunton Flex	20,90	21,12	161%	2,61	4,75	3,14
22 Kingspan Therma	21,36	22,27	175%	2,75	2,25	2,62
23 Sheepwool Comfort	28,44	28,65	254%	3,54	1,75	3,09
24 Thermo HANF Premium	28,60	29,14	260%	3,60	1,75	3,14
25 Ewonawool	31,05	32,56	302%	4,02	4,50	4,14
26 Stropoly TEC	31,88	33,54	314%	4,14	1,75	3,54
27 Rooplaat	35,09	35,31	336%	4,36	1,25	3,58
28 Konto	38,14	38,41	374%	4,74	1,50	3,93
29 Amorm K50-E	82,76	82,95	924%	10,24	1,75	8,12
30 Ytong Multipor	83,99	86,31	965%	10,65	3,50	8,87
31 Corkoco	96,71	96,92	1096%	11,96	1,75	9,41
32 Ecopanely	149,48	152,29	1780%	18,80	1,75	14,54

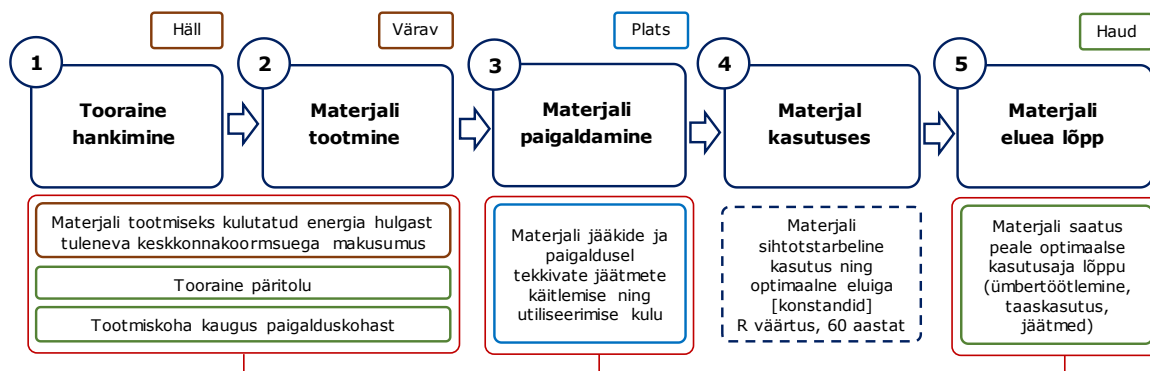
Antud valimis on esindatud kõik enamlevinud plaatkujul (jäik, pehme) müüdavad soojustusmaterjalide liigid. Valdav osa valimis olevatest toodetest on valmistatud Euroopas. Toodete tehnilised andmed jm vajalikud näitajad saadi ametlikelt tootekaartidelt ning hindade osas lähtuti iga toote puhul turu keskmisest hinnast, mis leiti kas avalike hindade ja konkreetsete müügipakkumiste baasil. Metoodika testarvutustel kasutati 600 m² suurust soojustustavat pinda ja soojustuskihi vajalikuks soojapidavuseks oli defineeritud näitaja $R=3,75$. Materjali saagise määr jäi sõltuvalt materjaliklassist vahemikku 90-99% ehk kadude faktor on vahemikus 1-10%. Jääkide ja jäätmete määraks on samuti materjaliklassist sõltuvalt arvestatud 1-3% ehitusplatsile veetava soojustusmaterjali kogumahust. Nimetatud näitajad pärinesid erinevate uuringute tulemustest. Jääkide ja jäätmete utiliseerimise kulu baseerus jäätmekäitlusfirmade poolt pakutava ehitusprügi veo teenuse keskmisele hinnale. Antud juhul arvestati 8 m³ konteineri nädalase rendi ja veo hinda ning see on esitatud ehitusjäätmete utiliseerimise maksumusena mahuühiku kohta €/m³.

Madalama keskkonnamajandusliku hinnaga materjaliks osutus üks valimisse võetud EPS plaatidest (Lätis valmistatud Tenaspors NEO) ning see võeti hinnaindeksi arvutamise baasiks ehk sellele omistati väärtus 1,0. Antud materjali suhtes arvutati kõigi valmissee kaasatud materjalide hinnaindeksid (vt tabeli 2.1 veergu, mille päises on märgitud kaal 75%). Tabeli 2.1 järgmises veerus on esitatud iga materjali individuaalsed keskkonnaskoorid, mis vastavalt välja töötatud metoodikale on 25%-lise kaaluga. Ühtlasi nähtub, et individuaalskooride põhjal on võrreldavate soojustehniliste omadustega isolatsioonimaterjalide kasutamise keskkonnamõju väga erinev. Oodatult olid väiksema reostuspotentsiaaliga taimset päritolu looduslikud materjalid, mille keskkonnaskoorid olid vahemikus 1,25 kuni 2,25. Mineraalset päritolu materjalide keskkonnaskoorid jäid vahemikku 2,50 kuni 4,0 ning selles kategoorias ostus keskkonnasõbralikumaks Soomes valmistatud klaasvillplaat Isover KL33. Valimisse kaasatud naftasaadustel põhinevate soojustusmaterjalide keskkonnaskoorid olid vahemikus 4,25 kuni 4,75 ning selles kategoorias osutusid kõige väiksema keskkonnamõjuga materjalideks Eestis valmistatud vahtpolüstüreenplaadid (EPS Estplast ja EPS Reiden). Toetudes testmaterjalide valimisse kaasatud keskkonnaskooridele, olid materjaliklasside keskmised skoorid vastavalt 1,88 (looduslikud), 3,40 (mineraalsed) ja 4,53 (naftasaadused). Testi tulemustest selgus, et soodsama keskkonnamajandusliku maksumusega materjali (Tenapors NEO) koondindeks osutus lõpuks märksa kõrgemaks kui madalama koondindeksiga materjali (Isover KL-AKU) vastav näitaja. Lähtudes puhtalt keskkonnaskoorist, osutusid materjalikategooriate lõikes keskkonnasõbralikumateks toodeteks kas kohalikud või lähiriikides valmistatud tooted ning seetõttu on võrdväärseks tunnustatud alternatiivide hulgast otstarbekas otsustada alati paigalduskohale lähemal tootetud materjali kasuks ning muuta seeläbi valik keskkonnateadlikumaks. Tulenevalt välja töötatud hindamismetoodika eripärast,

võimaldab skoorimooduli kasutamine lisada valiku tegemise aluseks oleva info koosseisu ka materjali täiendava keskkonnamõju, mis hõlmab muuhulgas ka selle elutsükli viimast faasi (Raudik, 2018).

Teostatud testide tulemused kinnitasid antud meetodilise kontseptsiooni rakendatavust. Detailed hindamiskontseptsiooni testimisel teostatud arvutused ning materjalidele antud individuaalskoorid on esitatud lisis 6.

Materjalivalikuks arendatava tehnilise abivahendi tööpõhimõte. Arendatava kalkulaator-rakenduse loomise lähteülesandeks on asjaolu, et see peab automaatselt arvestama iga spetsiifilise soojustusmaterjali keskkonnamõju, mis hõlmab konkreetse materjali kogu elukaart ehk kaetus oleks nn hällist kuni hauani. Joonisel 2.4 on esitatud otsustusmudeli modifitseeritud tööpõhimõte, koos selgitavate kommentaaridega.



Joonis 2.4. Materjali valikuks väljatöötatava kalkulaatori tööpõhimõte (autori joonis).

Hindamismetoodika aluseks on traditsiooniline materjali elutsükli kontseptsioon, mida on autori poolt vajalikul määral kohandatud. Skeemilt nähtub, et materjali valikumethodika hõlmab kaudselt kogu materjali elukaart alates selle valmistamisest kuni demontaaži ja utiliseerimiseni. Tavaliselt tehakse materjalivalik lähtudes ainult selle hinnast ja soojustehnilistest näitajatest ning materjali võimalik keskkonnamõju jääb otsustusprotsessis fookusest välja. Antud juhul kaasatakse materjali keskkonnamajandusliku maksumuse ja keskkonnaskoori arvestusse ka materjali sisendenergia (arvutus baseerub materjalitüübil, tootmismaa energiasektori üldisel saastemahul ja saastekvoodi hinnal), paigaldusel tekkivate jäätmete utiliseerimise maksumus (arvutus põhineb materjalitüübi saagisel ja paigaldusega kaasnevate jäätmete hulgast tulenevalt selle olekust) ning keskkonnaskoor (arvestab materjali toorainelist päritolu, tootmiskoha kaugust paigalduskohast ja jäätmete staatust materjali eluea lõpus). Materjali elutsükklis jääb antud metoodika puhul selle kasutusaeg vaatluse alt välja kuna materjalikihi isolatsioonivõime ja kasutusaeg on konstandid ehk need on iga materjali puhul samad. Loodav rakendus hakkab kasutama väljundandmete

genereerimisel eeldefineeritud algoritme, kombineerides kasutaja poolt sisestatavaid ja valitud andmeid rakenduse andmebaasides olevate andmetega.

Esimeseks sammuks soojustusmaterjali valikul on toote füüsiliste parameetrite, tehniliste näitajate, tavamaksumuse ja kättesaadavuse väljaselgitamine. Reeglina on tootespetsiifiline info leitav materjali tooteinfo lehelt, paigaldusjuhendist, toote keskkonnasertifikaadilt (EPD) või mõnelt muult tootja poolt materjaliga koos väljastatud dokumendist. Teine osa vajalikust infost (hind, mõõdud, pakendi mõõdud, kaal jms) on hangitav materjali müüjalt. Praktikas ei ole välistatud, et teatud näitajad võivad materjalide lõikes olla sedavõrd erinevad, et ehitustehnoloogiliselt (piirangud konstruktsiooni paksusele, materjalide omavaheline sobivus jms) ei ole otstarbekas sünteetilise materjali asemel orgaanilise või loodusliku soojustustoote kasutamine. Juhul kui mõni konkreetne materjal antud soojustusprojekti jaoks ei sobi, siis peab rakendus olema suuteline väljastama veateate. Niisugusel juhul on mõislik valida võrdluseks sünteetilisest ja anorgaanilistest materjalidest keskkonnasõbralikumad. Siiski on mõistlik testida antud rakendusega võimalikult paljusid alternatiivsete materjalide kombinatsioone.

Kasutajasõbralikkuse huvides viiakse tehnilise abivahendi rakendamiseks vajalike ning käsitsi sisestatavate materjalispetsiifiliste andmete hulk minimaalseks. Kasutajale antakse võimalus võrrelda korraga kolme materjali ning teha saadud tulemustele toetudes nende hulgast valik.

Antud juhul on vajalik lisaks soojustatava pinna suurusele (m^2) ning soojustuskihilt nõutavale isolatsiooninäitajale (R-väärtus, valikuvõimalus etteantud skaalalt) sisestada käsitsi vastavale vormile veel:

- materjali konkreetne nimetus (ei ole kohustuslik),
- materjali hind ($€/m^2$),
- materjali paksus (mm),
- materjali soojuserijuhtivus (W/mK),
- materjali pakendi kaal, kg või otse materjali mahukaal (kg/m^3), jättes järgnev pakendi mõõtmete moodul täitmata
- pakendi pikkus, laius, kõrgus (mm).

Nõutav on ka etteantud menüüdest materjalitüübi, oleku ja tootmismaa valik. Sellega rakenduse kasutaja poolt sisestatavad andmed piirduvad.

Kuigi antud rakendusprogramm arvutab eelkirjeldatud sisendite baasil välja suure hulga informatiivseid näitajaid ning genereerib täiendavaid andmeid, on kalkulaatori väljundmoodulisse valitud:

- sihtnäitaja saavutamiseks vajalik soojustuskihi paksus (mm) + graafikaliides,
- soojustuse maksumus soojustatava pinna m² kohta (€),
- soojustuse keskkonnamajanduslik maksumus soojustatava pinna m² kohta (€),
- keskkonnakoormuse hinnalisa pinna m² kohta (€) + graafikaliides,
- Soojustusmaterjali maksumus kokku (€), mida kuvatakse vastavalt soovile kas tava või keskkonnamajandusliku maksumusena.

Rakenduse kõige olulisemaks väljundiks saab olema materjali keskkonnaindeks, mille alusel antakse ka materjali valikusoovitus (mida lähemal on indeksi väärtus ühele, seda keskkonnasõbralikum on materjal ja vastupidi).

Joonis 2.5 selgitab materjali keskkonnaalase koondindeksi arvutuskäiku.

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{Materjali hinnaindeks} \times 75\% \\ 1 + \% \text{ hinnaerinevus} \times \text{kaal} \end{array}} + \boxed{\begin{array}{l} \text{Keskkonnaskoor} \times 25\% \\ \text{hinnangute keskmine} \times \text{kaal} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{l} \text{Materjali koondindeks} \\ 1,00 \leq \dots \end{array}}$$

Joonis 2.5 Materjali keskkonnaalase koondindeksi komponendid (autori joonis).

Esimeseks materjali koondindeksi komponendiks on konkreetse materjali otsesel keskkonnakoormusel põhinev ühikupõhine hinnaerinevuse indeks. Antud juhul võetakse indeksi baasiks valimi soodsaima keskkonnamajandusliku hinnaga materjali maksumus ning sellele omistatakse väärtus 1,0. Iga teise valimisse võetud materjali hinda vaadeldakse parima hinnaga materjali suhtes ning hinnaindeks formeerub nende protsentuaalse hinnaerinevuse suhtena (1+% hinnaerinevus). Antud näitajale lisandub teise komponendina keskkonnaskoor, mis leitakse skoorimoodulis antud hinnangute aritmeetilise keskmisena ning see jääb vahemikku 1 kuni 5. Niisiis, madalama keskkonnaskooriga materjali ökoloogiline jalajälg on väiksem ja vastupidi. Mõlemale arvutatud komponendile omistatakse kaalud ning selle tulemusena formeerub valimisse võetud materjali keskkonnaalane koondindeks. Kaalude määramisel on lähtutud eeldusest, et kõige soodsama keskkonnamajandusliku hinnaga ja teoreetiliselt kõige väiksema ökoloogilise jalajäljega materjali koondindeks oleks võrdne näitajaga 1,0. Hinnakomponendile mudelis suurema kaalu omistamine on põhjendatud ka majanduslikust printsiibist lähtudes, kuna see on tänapäeval üks olulisemaid otsuste tegemise kriteeriume. Tuleb tõdeda, et antud keskkonnaskoori kriteeriumite raames on siiski äärmiselt keeruline leida materjali, mille hinnangute keskmine oleks võrdne ühega ning praktikas jääb ka kõige soodsama keskkonnamajandusliku maksumusega materjali koondindeks ühest suuremaks. Antud meetodika tulemuste tõlgendamisel kehtib seaduspärasus, mille kohaselt madalama koodindeksiga soojustusmaterjali kasutamine on keskkonnamajanduslikus mõistes säästlikum ja vastupidi.

Keskkonnamõju arvestavad eelistused reastatakse koodindeksi alusel värvide järgi (roheline on ökoloogilist aspekti silmas pidades kõige parem valik, punane on selles suhtes halvim ning keskmisele variandile osundab kollane väli). Kalkulaatori väljundiks on võrdluseks valitud kolme materjali asetuse keskkonnasõbralikkuse hierarhias.

Siinkohal on oluline juhtida tähelepanu koordineeritud väärtuse tõlgendamisele. Silmas tuleb pidada asjaolu, et antud indeksi väärtusel on sisu ainult konkreetset väärtust võrreldava kolme materjali kontekstis, kuna see kujuneb testseisundi soodsama keskkonnamajandusliku maksumusega materjali suhtes (kõrgema maksumusega materjalide puhul lisandub protsentuaalne hinnaerinevus) ja arvestades iga materjali individuaalset keskkonnaskoori. Koordineeritud vormeerub kaalutud kujul nende kahe näitaja põhjal. Koordineeritud genereeritakse puhtalt kolme alternatiivse materjali vahel valiku tegemiseks. Teisisõnu, antud meetodika puhul on võrreldavad ainult iga kolme materjali võrdluseisundi soodsama materjali keskkonnamajanduslikud koordineeritud indeksid ning teiste ja kolmandate valikute koordineeritud indeksid ei oma eraldiseisvalt vaadelduna sisu, kuna need on arvestatud soodsama materjali keskkonnamajandusliku maksumuse suhtes.

2.2. Materjalispetsiifilised sisendid ning nende sidumine süsteemi andmetega

Rakenduse väljundnäitajad genereeritakse arvestades sisendeid ja täiendavaid andmeid, mis on tinglikult jagatud viide ploki (andmeplokkide detailne sisu koos kommentaaridega on esitatud lisa 2):

- A - materjali andmed
- B - projektipõhised andmed
- C - paigalduskadude ja jätmete andmed
- D - materjali sisendenergia ja saasteemiseisundi andmed
- E - materjali keskkonnaskoor

Rakendus kasutab 10 andmeladu või andmekuupi (nt materjalide sisendenergia, riikide energiatootmise struktuurist tulenevad emissioonikoefitsiendid, saastekvoodi turuhind, materjalispetsiifilised saagised, materjalispetsiifilised paigaldustarvikute ja pakendijätmete määrad, tootekategooria, jäätmekategooria, tootmisregioon jms). Andmeid mudeli baasis saab lihtsalt muuta ja uuendada ning veebis kättesaadava reaajas töötava versiooni puhul oleks võimalik andmebaas siduda ka reaajas uuenevate andmetega.

Väljundandemete genereerimisel kasutab kalkulaator mitmete sisendite koostööl loogikafunktsioonide abil määratud kombinatsioone ning eeldefineeritud reegleid, et selle rakenduse praktiline kasutamine oleks kasutajale võimalikult lihtne ja mugav. Seega

keskkonnaskoorimoodulis täidetakse väljad rakenduse poolt loogikafunktsioonide jm eeldefineeritud reeglite alusel automaatselt ehk kalkulaatori kasutaja seda spetsiaalselt täitma ei pea. Hinnangud formeeruvad viie palli skaalal, millest väiksem väärtus näitab keskkonnasõbralikumat hinnangut ning suurem arv viitab valikus negatiivsemale kaudsele keskkonnamõjule. Tabelis 2.3 on esitatud igale materjalile keskkonnaskoori määramise kriteeriumid.

Tabel 2.3 Soojustusmaterjalile individuaalse keskkonnaskoori määramise kriteeriumid.

Tooraine päritolu	Skoor	Materjali ja jääkide taaskasutatavus	Skoor
Naftasaadus	5	Ei ole taaskasutatav (alla 20%)	5
Mineraalne	4	Osaliselt taaskasutatav (20%-60%)	4
Taaskasutatud mineraalne	3	Oulises osas taaskasutatav (60%-80%)	3
Taaskasutatud looduslik	2	Taaskasutatav (üle 80%)	2
Looduslik taastuv	1	Täielikult taaskasutatav	1

Materjali päriolumaa (tootmismaa)	Skoor	Jäätmete klassifikatsioon	Skoor
Muu maailm (kaugemal kui 3000 km)	5	Ohtlik	5
Euroopa (600-3000 km raadiuses)	4	Tavaline ladestatav	4
Lähiriigid (300-600 km raadiuses)	3	Osaliselt ümbertöödeldav (kuni 80%)	3
Kodumaine (100-300 km raadiuses)	2	Suures osas ümbertöödeldav (üle 80%)	2
Kohalik (kuni 100 km raadiuses)	1	Ümbertöödeldav või keskkonnale ohutu	1

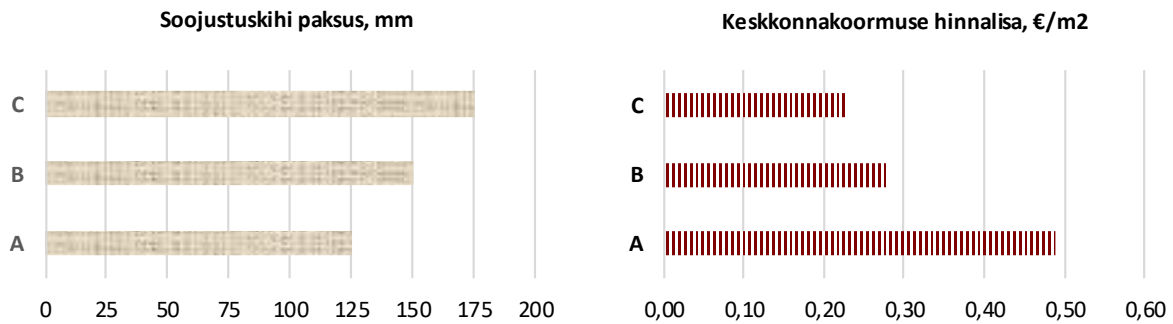
Materjalile keskkonnaskoori omistamise aluseks on nii materjalispetsiifilised, kui ka materjaliklassi põhised andmed.

Tabel 2.4 annab ülevaate väljundandmete valikust koos vastava selgitusega, mida kuvatakse rakenduse kasutajale.

Tabel 2.4 Mudeli kasutajale kuvatavad väljundandmed (autori koostatud).

Väljundandmed	Selgitus
Materjali keskkonnaindeks, min. väärtus 1, mida väiksem, seda parem	Algoritm
Soojustuskihi paksus, mm	Algoritm
Soojustuse maksumus pinna m ² kohta, €	Algoritm
Soojustuse keskkonnamajanduslik maksumus pinna m ² kohta, €	Algoritm
Keskkonnakoormuse hinnalisa, €/m ²	Algoritm
Soojustusmaterjali maksumus kokku, €	Algoritm

Antud juhul on kalkulaator seadistatud nii, et soojustusmaterjali maksumust on võimalik kuvada nii materjali tavamaksumuse kui ka keskkonnamajandusliku maksumuse baasil (valikuoption, märkides vastava andmevälja). Lisaks on kalkulaatoril graafikaliides, mis kuvab visuaalselt kolme võrreldava materjali soojustuskihi vastavad paksused ning keskkonnakoormuse hinnalisad (joonis 2.6).



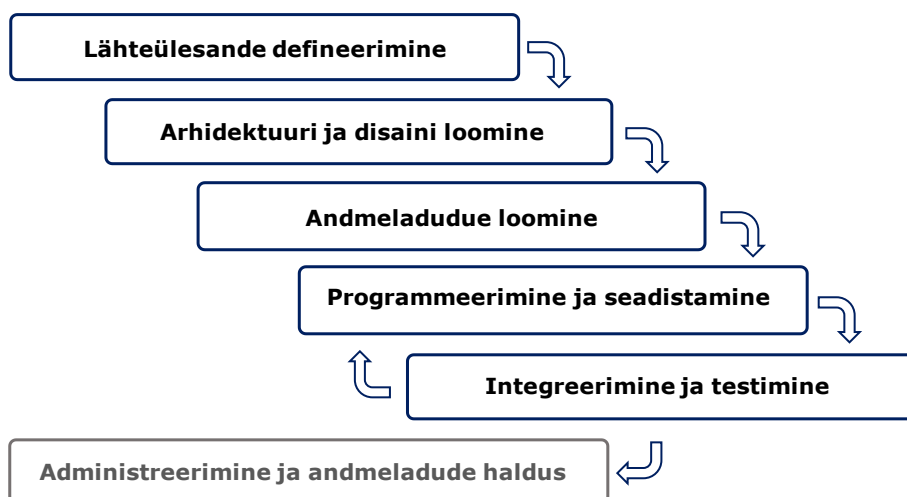
Joonis 2.6 Kalkulaatori graafikamooduli disain (autori koostatud).

Kalkulaator suudab ka välistada antud soojustusprojekti jaoks tehniliste või füüsiliste parameetrite poolest mittesobiva materjali, andes vastava veateate. Näiteks nimetatud veateated ilmuvad vastava materjaliveeru alaossa juhul, kui valitud materjali paksus ületab soojustuskihi paksuse või kui materjali isolatsioonivõime on sedavõrd nõrk, et soojustuskihi paksus ületab 400 mm piiri. Antud juhul kujuneks soovitava sihtnäitaja saavutamiseks vajaliku soojustuskihi paksus liiga suureks ning see ei vasataks ehitus või renoveerimisprojekti parameetritele ning ei oleks ka arhitektuurses mõistes esteetiline.

Lisaks ümardab rakendus materjali soojuseri juhtivusest tuleneva soojustuskihi paksuse ülespoole arvestades sammuks 25 mm. Antud kalkulaatorit saab kasutada ka etteantud pinna soovitud isolatsioonivõime parameetri kohaselt soojustamiseks vajaliku materjalkoguse ja selle maksumuse väljaarvestamiseks. Selleks ei ole vaja määrata materjali päritolumaad ning siis lülitub materjali sisendenergia ja keskkonnaskoori moodul välja. Antud juhul arvestatakse ainult materjali tüübipõhist saagist ja jäätmete hulka. Seda võib pidada antud kalkulaatori lisafunktsionaalsuseks.

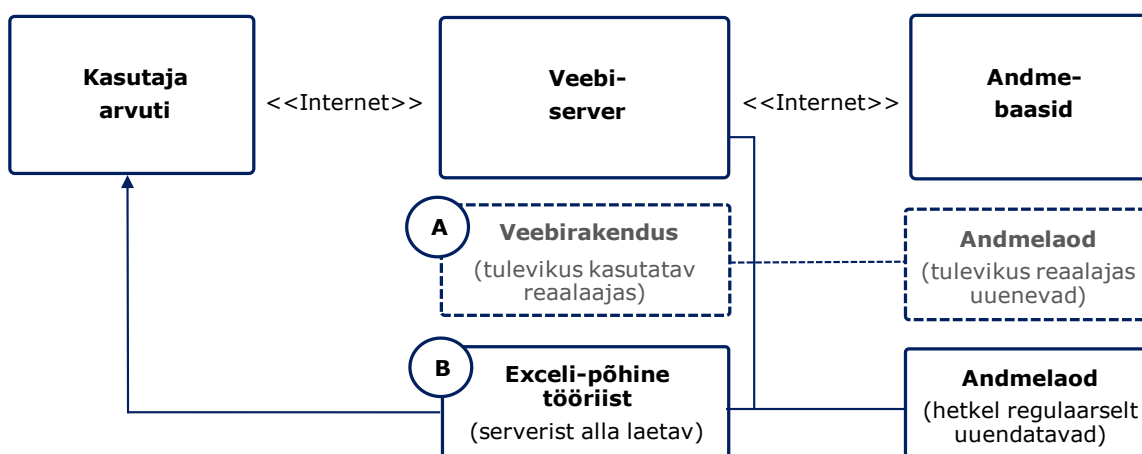
2.3. Rakenduse arendusprotsess ning demoversiooni väljatöötamine

Rakenduse arendusprotsessis kasutati klassikalist jadamudelit ehk koskmudelit, kus tööd tehti etappide kaupa kuni seadistamise ja testimiseni, mille käigus toimus pidev kahe etapi vaheline liikumine. Arendusprotsessi kulgu kirjeldab joonis 2.7.



Joonis 2.7 Kalkulaatorrakenduse arendusprotsessi etapid (autori koostatud).

Algselt oli plaanis käesoleva magistritöö raames valmis arendada nii soovitusmaterjalide valiku veebirakendus, mis kasutaks reaajas uuenevaid andmeid, kui ka Exceli-põhise tööriist, mida saavad kõik soovijad oma arvutisse alla laadida ja kasutada. Arenduse esimese etapis alustati Exceli-põhise tööriista demoversiooni väljatöötamist, et seda oleks võimalik arendustöö käigus jooksvalt testida. Töö valmimise käigus ilmnis, et reaajas täisfunktsionaalsusega töötava veebirakenduse loomiseks tuleb teha algse eelarvega võrreldes oluliselt suuremal määral kulusid ning selle lõplik väljaarendamine lükati edasi. Antud magistritöö raames arendatakse välja regulaarset uuendatavaid andmeladusid sisaldav Exceli-põhine rakendus, mida on kõigil huvilistel võimalik veebist tasuta alla laadida. Joonisel 2.8 on esitatud rakenduse juurutusvaade, mis näitab et füüsilise kihi moodustavad kasutaja arvuti, veebiserver ja andmebaasid.



Joonis 2.8 Rakenduse füüsilist kihti kajastav juurutusdiagramm (autori koostatud).

Exceli-põhise tööriista puhul saavad peale rakenduse allalaadimist olema kõik komponendid ühes kohas ehk kasutaja arvutis või nutiseadmes.

Arendust alustati vajalike andmeladude loomisega ja seejärel kirjutati vastavate näitajate saamiseks vajalikud algoritmid ning defineeriti vastastikkused seosed. Mudelisse on sisse ehitatud suur hulk spetsiaalseid peidetud andmevälju, mille abil tehakse täiendavaid arvutusi, mis aitavad soovitud tulemusi saavutada. Rakendus kasutab suurt hulka Exceli erinevaid funktsioone ja nende kombinatsioone. Enim kasutati andmeladudest vastavate näitajate ja parameetrite otsimiseks LOOKUP ja MATCH funktsioone. Exceli-põhise tööriista loomisel oli eesmärgiks vältida keeruliste makrode kirjutamist, kindlustamaks rakenduse töökindlust Exceli eri versioonidega. Kahjuks täisfunktsionaalsuse tagamiseks makrodest täielikult loobuda ei õnnestunud.

Rakendus sisaldab nelja eraldi arvestusmoodulit (materjali sisendenergia, materjali saagis, jäätmed ja materjali keskkonnaskoor) ning selle andmebaasis on 10 eraldi andmeladu/andmekuupi, milles sisalduvaid näitajaid saab lihtsalt uuendada. Informatsiooni loodud andmeladude ja -kuupide kohta hoiab Exceli-põhine rakendus selles sisalduvas andmebaasis. Kalkulaatorrakenduse loogiline ülesehitus sisaldab kahte kihti, milleks on kasutajat teenindav rakenduskiht ning seda andmetega varustav andmekiht. Kalkulaatorrakenduse detailne arhitektuurne disain on esitatud graafiliselt töö lisas 1. Tabel 2.5 annab ülevaate rakenduse töölehe algsest kuvandist, mis osutus sedavõrd funktsionaalseks, et seda hilisema arendusprotsessi käigus oluliselt ei muudetudki.

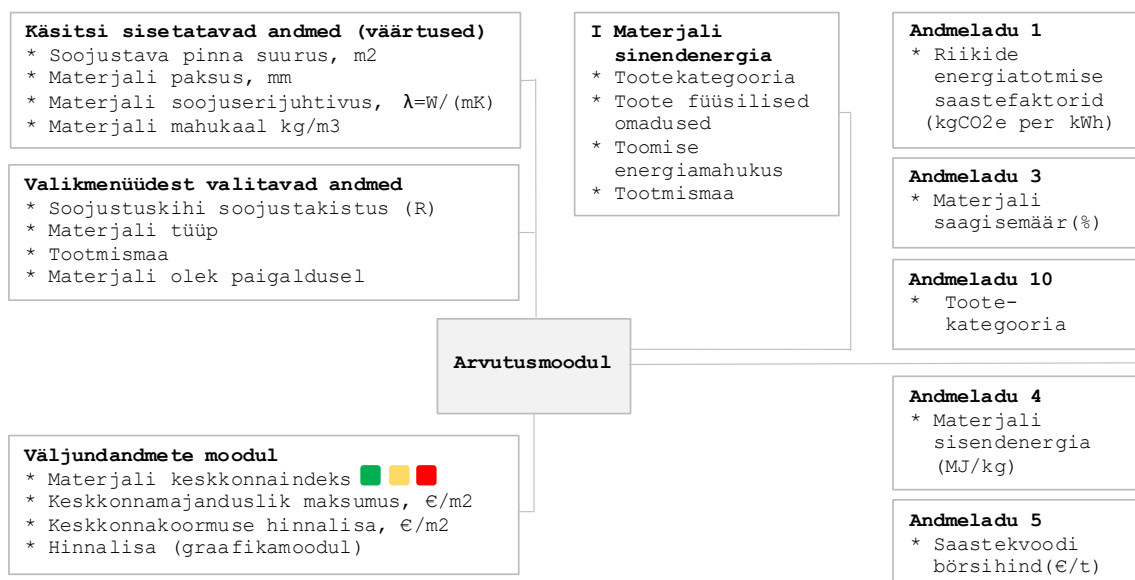
Tabel 2.5 Kalkulaatorrakenduse andmeväljade ja moodulite paigutus (autor koostatud).

Rakenduse kasutaja poolt määratud sisendid	Selgitus
R-väärtus, m ² K/W	Valikväärtus/käsitsi sisestatav parameeter
Soojustatav pind, m ²	Käsitsi sisestatav parameeter
Materjali nimetus	Käsitsi sisestatav tekst (nn lisainfo)
Materjali hind, €/m ²	Käsitsi sisestatav parameeter
Materjali paksus (möödi tootespetsifikaadis), mm	Käsitsi sisestatav parameeter
Materjali soojuserijuhtivus $\lambda=W/(mK)$	Käsitsi sisestatav parameeter
Materjalipaki kaal, kg või materjali mahukaal, kg/m ³	Käsitsi sisestatav parameeter
Paki pikkus, mm	Käsitsi sisestatav parameeter
Paki laius, mm	Käsitsi sisestatav parameeter
Paki kõrgus, mm	Käsitsi sisestatav parameeter
Materjali tüüp	Valikmenüü (eeldefineeritud nimekiri)
Tootmismaa	Valikmenüü (eeldefineeritud nimekiri)
Materjali olek paigaldusel	Valikmenüü (eeldefineeritud nimekiri)

Rakenduse väljundinfo	Selgitus
Materjali keskkonnaindeks	Väärtus, taustavärv annab valikusoovituse ■ ■ ■
Soojustuskihi paksus, mm	Väärtus
Materjali maksumus soojustatava pinna kohta, €/m ²	Väärtus
Soojustuse keskkonnamajanduslik maksumus, €/m ²	Väärtus
Keskkonnakoormuse hinnalisa, €/m ²	Väärtus
Soojustusmaterjali maksumus, €	Väärtus (vajalik teha eelnevalt täpsustav valik)
Soojustusmaterjali keskkonnamajanduslik maksumus, €	Väärtus (vajalik teha eelnevalt täpsustav valik)
Soojustuskihi paksus, mm	Andmete graafiline esitlus
Keskkonnakoormuse hinnalisa, €/m ²	Andmete graafiline esitlus

Arendusprotsessi käigus on valminud Exceli-põhisest rakendusest kokku juba 36 versiooni ning suuri muudatusi hetkel laiemal testimisel oleva versiooni osas enam lähiajal kavas teha ei ole. Versiooniuuendus tähendas konkreetse arendustöö käigus mõne funktsionaalselt olulise täienduse tegemist. Näiteks lisati sisendmete sektsiooni võimalus sisestada materjali mahumass, müügipakendi mõõtmete ja kaalu kaudu, kuna tavakasutajale ei pruugi see näitaja olla kergesti leitav või näiteks asendati väljundandmete moodulis keskkonnakoormuse suhtelise hinnalisa näitaja absoluutsummas keskkonnakoormusega soojustata pinnahüki kohta (€/m²), mis on universaalsem näitaja ning see ei sõltu materjali hinnatasemest.

Kalkulaatori tehnilisest tööpõhimõttest annab ülevaate joonis 2.9, kus on skemaatiliselt kirjeldatud sisendenergia hinnalisa arvutamise algoritmi, mis on üheks materjali keskkonnamajandusliku maksumuse komponendiks (kalkulaatori tervikarhitektuur on esitatud skemaatiliselt töö lisas 1).



Joonis 2.9 Materjali sisendenergia hinnalisa arvutamine ning selleks kasutatavad andmed (autori koostatud).

Materjali sisendenergia hinnalisa arvutamisel kasutatavateks andmeteks on materjali tüüp, materjali olek paigaldusel (nt jäik, mis määrab ära materjali saagise), tootekategooria, mahumass (kg/m³), materjali tüübipõhine sisendenergia (MJ/kg), tootmismaa (energiatoomise saastekoormuse koefitsient CO₂ kg/kWh), saastekvoodi maksumus (€/tonn). Selleks, et algoritm annaks välja adekvaatse tulemuse teeb mudel automaatselt vajalikud teisendused (nt arvestab MJ kWh-deks jms). Kokku kasutab rakenduse vastav arvestusmoodul lisaks kasutaja poolt sisestatud näitajatele veel viie andmelao parameetreid.

Kuna ligipäas reaalaajas uuenevate andmetega baasidele (materjalide sisendenergia, riikide energiatoomise saastekoefitsiendid) on tasuline, siis on loodud võimalus uuendada Exceli-põhises rakenduses andmed käsitsi ning veebist alla laetava versiooni puhul on kavas vastavaid andmeid uuendada sagedusega üks kord kuus (kalkulaatori andmelaos olevad saastekofitseindid on esitatud töö lisa 4). Täna katavad rakenduse andmebaasid 194 riigi ja 120 materjalitüübi vastavaid andmeid ning andmebaasi täiendatakse pidevalt ning andmed saastekvoodi börsihinna kohta on esitatud nädalase intervalliga (lisa 5). Kuna saastekvoodi hind on nädalate lõikes väga volatiilne, siis on rakendus seadistatud nii, et saastekvoodi maksumuseks võetakse 10 viimase aasta libisev keskmine.

Kalkulaatori üheks oluliseks sisendiks andmete osas on soojustusmaterjalide sisendenergia. Tabelis 2.6 on esitatud materjalitüüpide keskmised energiamahukuse näitajad.

Tabel 2.6 Materjalitüüpide energiamahukuse näitajad (autori arvutused).

Materjalitüüp, millest soojustustoode on valmistatud	Materjali sisendenergia MJ/kg*
Komposiit	117,6
Polüesterkiud	112,7
Polüestervill	107,8
Polüretaan	107,0
Vahtpolüstüreen	105,5
Polüretaan	102,8
Vahtpolüstürool	93,5
Ekstrusioonpolüstürool	93,1
Polüisotsüanuraad	92,2
Mineraalsed materjalid	30,1
Kergkruus	24,9
Kanepikiud	23,5
Klaasvill	23,0
Kivivill	19,1
Tekstiilikiud	18,2
Turvas/puidukiud	17,4
Põhukiud	14,7
Linakiud	14,6
Villakiud	11,7
Tselluvill	7,5
Korgimass	4,6
Puidukiud	3,2
Kookoskiud	1,4
Pillirookiud	0,9

* Materjalide keskmised näitajad

Soojustusmaterjali tootmise energiamahukus sõltub ka materjali füüsilistest omadustest. Näiteks plaatvilla ja rullvilla tootmiseks kulutatakse veidi erinevas mahus energiat. Seetõttu kasutab rakendus konkreetse toote spetsiifilisi sisendenergia näitajaid, mis küll materjalitüübi siseselt ei erine üle 10%. Materjalitüüpide põhine sisendenergia

soojustustoodete lõikes on leitud eri allikate andmete keskmisena. Detailsemad materjaliklaaside põhised sisendenergia andmed, mida kalkulaatori viimane versioon kasutab on esitatud lisan 6.

Tabelid 2.7 ja 2.8 annavad kokkuvõtva ülevaate rakenduse andmebaasides olevate materjalitüüpide saagise ja jäätmete määradest.

Tabel 2.7 Materjali saagised tootegruppide lõikes (autori koostatud).

Materjali saagis	Jäik	Elastne	Pehme	Tahenev	Graanul
Maksimaalne	93,00%	93,50%	97,50%	97,50%	98,50%
Minimaalne	90,00%	92,50%	95,50%	93,50%	97,50%
Keskmine	92,27%	93,08%	96,67%	94,67%	98,08%

Tabel 2.8 Soojustusprojektiga otseselt seotud jäätmete määrad (autori koostatud).

Paigaldusjäätmed	Jäik	Elastne	Pehme	Tahenev	Graanul
Maksimaalne	2,50%	2,50%	2,00%	3,50%	1,50%
Minimaalne	1,50%	1,50%	1,25%	1,50%	0,95%
Keskmine	2,35%	2,35%	1,82%	2,70%	1,27%

Materjali saagis ehk puhta paigaldatud materjali mahu ja kogu kasutatud materjali suhe ja otseste jäätmete hulk on materjalitüüpide lõikes erinev. Antud koefitsiendid on leitavad ehituse eelarvestamisealastest erialakirjandusest ning vastavatest käsiraamatutest ja juhenditest. Materjalid on nn oleku järgi jagatud viide kategooriasse ning teostatud uuringute kohaselt joonistub välja selge seaduspärasus, mille puhul olekult tahkema ja jäigema materjali paigalduskaod on suuremad kui pehmetel ja puistematerjalidel. Üldjuhul jäävad vastavad näitajad soojustusmaterjalide saagise ning paigaldusjäätmete puhul vahemikku vastavalt 1-12% ja 1-3%. Mudeli andmeladudes on kasutusel kogutud info põhjal tootetüüpide lõikes arvutatud materjaliklasside keskmised näitajad. Saagise puhul on need sõltuvalt tootekategooriast vahemikus 90-98,5% ning jäätmete (pakendid, paigaldustarvikute taara jms) määrad jäävad vahemikku 0,95-3,5%.

Soojustustööde käigus tekkivate paigaldusmaterjalide jäätmete koguse ja nende klassifikatsiooni selgitamiseks toome ühe näite. Näiteks 800 m² vahtpolüstüreenplaatide paigaldamiseks kahes kihis (100 + 50 mm) läheb vaja arvestuslikult 380 ballooni liimuvat montaaživahtu (Penosil, 2018). Penosil Premium Polystyrol FixFoami müüakse 1000 ml aerosoolballoonidena 12 tk kastis (kokku 32 kasti). Tardunud vahu tihedus on 25-30 kg/m³ ja selle soojusjuhtivustegur on 0,034 W/mK. Antud toote jäätmekoodiks on EWC klassifikatsiooni järgi 16.05.04* ehk see kuulub kategooriasse mida kirjeldatakse kui ohtlikke aineid sisaldavad gaasid (sealhulgas haloonid) survemahutis. Toote

ohutuskaardi andmetel töödeldakse kasutatud pakendit samamoodi nagu tegelikku toodet juhul, kui mahuti on olnud otseses kokkupuutes tootega. Lisaks kehtivad antud soojustusliigi paigaldusele erinõuded ning töö teostajatel on kohustuslik kasutada kaitsevahendid, milleks on ühekordsed tarvikud.

Oluline on märkida, et jääkide ja jäätmete arvestuslik kogus on materjali kategooria põhine, mille määrab ära soojustustoote füüsiline olek paigaldusel (jäik plaat, pehme plaat, vill, graanul jne). Üldiselt kehtib saagise puhul seaduspärasus, et mida jäigem on materjal, seda suurem on selle suhteline paigalduskadu ja vastupidi (nt jäiga plaatvilla saagis on väiksem kui pehmel rullvillal ja EPS plaadi paigalduskadud on suuremad kui EPS graanulil). Samuti on jäikade materjalide puhul paigaldusel tekkivate jäätmete hulk suurem (suurem pakkematerjali kogus, külmasildade vältimiseks kasutatavate vuugitaidete jm paigaldustarvikutega seotud jäätmed nagu taara jm soojustustöödega otseselt seotud ehituspraht jne).

2.4. Rakenduse kujundus, testimine, täiustamine ja praktiline kasutamine

Rakenduse arendusetöö käigus renditi andmete maht ühes tasulises veebiserveris ja domeen *www.insmat.org*. Seal tutvustatakse arendatavat rakendust ja sealt on kõigil soovijatel võimalus kalkulaatorrakenduse Exceli-põhist versiooni oma arvutisse või nutiseadmesse tasuta alla laadida ja kasutada. Rakendus sisaldab vajalikke andmeladusid ning see töötab täisfunktsionaalsusega. Vastavalt eelistusele on rakendus kasutatav kahes keeles (EST, ENG) ning sõltuvalt kodulehel valitud keelest on alla laetav rakendus vaikimisi kas eesti- või inglisekeelne.

Rakenduse kasutajakihi disainimisel lähtuti lihtsusest ja selgusest. Sisestatavad ja rippmenüüdest valitavad andmed on paigutatud töölehe ülaosasse ja need on jagatud loogilistesse plokkidesse ning eristatud taustavärvidega. Väljundandmete ning graafikamoodul jäävad raamitud tsooni alumisse sektsiooni. Joonisel 2.10 on esitatud kalkulaatori kasutajavaate kujundus koos väljade otstarvet selgitava infoga.



Joonis 2.10 Kalkulaatori kasutajavaate kujundus koos selgitustega (autori koostatud).

Jooniselt 2.10 nähtub, et kalkulaatori kasutaja jaoks on käsitsi sisestatavate andmete hulk viidud minimaalseks. Juhul kui kasutajal on teada konkreetse materjali mahumass, siis ei ole vajalik müügipakendi mõõtmetete ja pakendi transpordikaalu väljade täitmine. Kalkulaator on seadistatud nii, et juhul kui mõne maretjali puhul kasvõi üks pikkuse, laiuse või kõrguse väärtus on sisestamata või see võrdub nulliga, siis võetakse automaatselt arvesse materjali mahukaal kg/m³. Arvestatav osa kalkulaatori kasutamiseks vajalikest andmetest saab täida ka valides etteantud menüüdest kas sobiv väärtus (nt R väärtus) või muu näitaja. Numbriliste väärtuste puhul võib ka eeldefineeritud väärtused käsitsi üle kirjutada. Selleks, et rakenduse kasutamine oleks soojustusmaterjalide erinevate alternatiivide võrdlemisel võimalikult efektiivne, saab kõik sisestatavad väljad ühe klahvivajutusega puhastada ning alustada uue võrdlussessiooniga. Juhul kui mõni materjalidest ei osutu sobivaks, siis annab kalkulaator vastava veateate, mis ilmub punase tekstina rakenduse kõige alumisele väljale.

Juhul kui kalkulaatori andmeväljadele sisestatakse ainult soojustuskihi soovitud soojustakistus (R väärtus) ja konkreetse materjali soojuseriühtivus (λ) siis arvutatakse rakenduse poolt välja soojustuskihi vajalik paksus. Kui täidetakse kõik muud väljad va tootmismaa, siis kuvab kalkulaator ainult soojustuse tavamaksumuse, arvestades materjalitüübi põhise saagise ja jäätmete määra. Seega saab kalkulaatori funktsionaalsust pidada mitmetasandiliseks.

Järgnevalt kirjeldatakse ja kommenteeritakse konkreetse näite varal ühte kalkulaatori valikusessiooni, kus võrreldakse kolme jäika soojustusplaati. Tabelist 2.9 on leitavad võrdluse kaasatud materjalide põhiandmed.

Tabel 2.9 Kolme juhuslikult valitud soojustusplaadi võrdlusandmed (autori koostatud).

	A	B	C
Materjali nimetus	Knauf Earthwool RS60	Finnfoam FL300PX	Unilin Utherm KD
Materjali tüüp	Kivivill	XPS	PIR
Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaat
Soojuseri juhtivus λ	0,0350	0,0350	0,0230
Tootmismaa	Saksamaa	Soome	Belgia
Materjalihind, €/m ²	7,34	5,11	8,61
Materjali paksus, mm	50	50	50
Materjali mahumass, kg/m ³	60	33	32
Keskkonnaindeks	1,87	1,88	1,96

Kalkulaatori tööpõhimõtte konkreetseks selgitamiseks on kirjeldatud ühe võrdluse kaasatud materjali (Finnfoam FL300PX) keskkonnamajandusliku maksumuse ja keskkonnaindeksi kujunemist. Tegemist on Soomes toodetud XPS tüüpi 50 mm paksuse jäiga soojustusplaadiga (joonis 2.11), mille soojuseri juhtivuseks ja mahumassiks on vastavalt 0,035 W/mK ja 33 kg/m³.



Joonis 2.11 Soojustusplaat Finnfoam FL300PX (<https://www.finnfoam.com/>).

Kuna sisendmoodulis on valitud materjali tüübiks Ekstrusioonpolüstürool (XPS) ja selle olekuks jäik, siis tuginedes andmeladudes sisalduvale infole kvalifitseerib kalkulaator selle automaatselt naftasaaduseks (andmekuup kvalifikatsioon tooraine päritolu järgi), mis on valmistatud polüstüroolist (andmekuup põhitooraine). Sisendmoodulis valitud tootmismaa järgi kvalifitseeritakse tootmispiirkonnaks Skandinaavia (andmekuup tootmisregion). Nende andmete pealt genereeritakse kokku materjali individuaalne keskkonnaskoor. Kuna tegemist on naftasaadusega, mille paigaldustarvikute jäägid on ohtlikud (montaaživahu purgid), siis antud materjali keskkonnaskooriks on 4,5, mis on materjali koondindeksi üheks komponendiks. Tootmismaa järgi võtab mudel andmelaost ka riigipõhise energiatootmise saastekoefitsiendi (Soome CO₂ emissioonikoefitsiendiks on 0,1430 kg/kWh kohta). Materjali tootmiseks kulutatud sisendenergia leitakse tootekategooria andmekuubi andmete järgi (XPS ekstrusioonpolüstürool plaadi tootmise sisendenergiaks on 104,5 MJ/kg).

Projekti andmetel on soojustatavaks pinnaks 800 m² ning materjalikihi soojusisolatsiooni võimeks (R väärtus) on kavandatud vähemalt 3,75. Arvestades materjali soojuserijuhtivust peab sihtnäitaja saavutamiseks olema materjalikihi pakuseks vähemalt 131,25 mm. Tulenevalt jäiga materjali mõõtmetest on vajalik paigaldada kolm kihti ehk materjalikihi pakuseks kujuneb praktikas 150 mm. Tootekategooria põhise saagise määra (ümardatult 92%) ja soojustatava pinna suurusele (800 m²) tulinedes on ehitusplatsile transporditava ning soojustustöödeks vajaliku materjali koguseks kokku 130,2 m³, millest puhas paigaldatud materjali osa on ca 120 m³. Antud materjali puhul kujuneb otseste jääkide mahuks 10,2 m³ ning sellele lisandub veel ca 3,3 m³ jäätmelis paigaldustarvikute jm soojustusprojektiga seotud ehitusprahi arvelt. Kokku saab olema antud pinna puhul jääke ja jäätmeid 13,5 m³ ehk ca 10% platsile veetud kogu materjali mahust, mille utiliseerimise kuluks kujuneb tänaste jäätmekäitlushindade juures (ca 18 €/m³) kokku 242 €.

Võttes arvesse materjali sisendenergiat MJ/kg ja mahukaalu kulub m³ materjali tootmiseks energiat kokku 3449 MJ, mis ümber arvestatuna tähendab kWh 958 kWh. Tuginedes Soome energiatootmise saastekoeffitsiendile on m³ materjali tootmise emissiooniks arvestuslikult 139 kg, mis 10 aasta libiseva keskmise CO₂ kvoodi hinna juures (EAU 10,8 €/tonn) tähendab arvestuslikku keskkonnakoormuse lisakulu ca 1,5 €/m³ ehk kokku 193 €. Kokku kujuneb antud materjali puhul nn keskkonnakoormuse lisakuluks 435 € ehk 0,54 € soojustatava pinna m² kohta. Juhul kui arvestada pikaajalise keskmise asemel EAU tänase hinnaga (25,2 €/tonn), tõuseks arvestusliku keskkonnakoormuse lisakulu tasemeni 0,87 €/m². Vaatamata sellele, et kalkulaatori andmelaos on saastekvoodi andmed nädalate lõikes, on otsustatud siiski pikaajalise keskmise kasuks ning kalkulaator on seadistatud selle parameetri osas 10 aasta libisevale keskmisele.

Kuna antud materjal osutus kalkulaatoriga võrreldud kolmest alternatiivist kõige soodsama keskkonnamajandusliku maksumusega materjaliks (antud võrdlusesseisoonis olid teiste materjalide maksumused vastavalt 11% ja 41% kõrgemad), siis arvestades koondskoori genereerimise algoritmi, kujunes materjali koondskooriks 1,88 (1,0 x 0,75 + 4,5 x 0,25). Kuna ülejäänud materjalide individuaalsed keskkonnaskoorid olid vastavalt 4,5 (Unilini PIR plaat) ja 3,25 (Knaufi plaatvill), siis teiste materjalide koondskoorideks kujunes vastavalt 1,87 (plaatvill 1,41 x 0,75 + 3,25 + 0,25) ja 1,96 (PIR 1,11 x 0,75 + 4,5 x 0,25). Vaatamata kõrgemale keskkonnamajanduslikule maksumusele andis kalkulaator soovitus otsustada väiksema ökoloogilise jalajäljega materjali kasuks, milleks antud valimis oli Saksamaal toodetud mineraalvilla plaat.

Joonisel 2.12 on ära toodud ka tömmis kalulaatori kasutajavaatest, mis näitab kokkuvõtvalt eelkirjeldatud testi tulemusi.



Joonis 2.12 Kolme soojustusmaterjal võrdlusetesti tulemused (autori joonis).

Rakenduse testimiseks laiendati meetodika testiga võrreldes materjalide valmit 32-lt 136-le. Materjalide nimekiri koos vajalike andmetega koostati materjalidest, mis olid magistritöö kirjutamise ajal müügil kas kohalikes ehituspoodides või internetiportaalides. Täielik nimekiri on leitav lisas 3. Valimisse sattus 65 naftasaadust, 35 mineraalset päritolu ja 36 looduslikku materjali. Testimise käigus võrreldi omavahel nii samasse klassi kuuluvaid materjale (nt mineraalsed kivivillad) kui ka erinevaid materjalikategooriaid (nt naftasaadused EPS, XPS, PIR). Võrdusse sattus ka nii looduslikke (nt kanepikiuplaad, korkplaat) kui tulevikumaterjale (VIP, komposiitplaat). Testimise käigus ilmnas, et kalkulaator suudab materjale hästi eristada ning järjestada need keskkonnaindeksi alusel, mis on kooskõlas antud käsitluse üldiste loogiliste eeldustega. Nt sarnase hinnataseme, füüsiliste omaduste ja soojustehniliste parameetrite puhul saab olemuselt keskkonnasõbralikum ja paigalduskohale lähemal toodetud materjal (nt klaasivill) madalama keskkonnaindeksi kui mõni naftasaadustest ja vastupidi. Samuti eelistab rakendus selgelt looduslikku soojustusmaterjali, juhul kui selle hind ja soojustehnilised parameetrid osutuvad konkurentsivõimelisteks.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

Käesoleva magistritöö raames on autori bakalaureusetöös välja pakutud materjalide keskkonnateadliku valiku meetodikat olulisel määral edasi arendatud ning sellel baseeruvat Exceli-põhist rakendust saab pidada küllaltki unikaalseks, kuna antud käsitlusega sarnast lähenemisviisi ei õnnestunud töö autoril erialakirjanduse läbitöötamisel varasematest töödest leida.

Antud töö teemaatikaga seonduvalt on enam levinud uurimissuundadeks materjalide sisendenergia arvutamise, hoonete soojustamise, hoone elutsükli ja materjalide tehnilise isolatsioonivõime teemad. Rahvusvahelises plaanis on tuntumateks tarkvaraprogrammideks kogu olelusringi analüüsi meetodikat katvad programmid SimaPro, OpenLCA, Umbeto ja GaBi (Morini jt, 2019), kuid nende praktiline rakendamine nõuab valdkonnapõhist oskusteavet ning need on tavakasutajale liialt keerulised.

Kirjanduses võib kohata ka soojustusmaterjalide keskkonnasõbralikkuse skaalale positsioneerimise lahendusi, kuid reeglina lähenetakse sellele teemale materjaliklasside lõikes väga üldistatult. Autori senisele kogemusele tuginedes saab väita, et kõige vähem on uuritud siiani soojustusmaterjalide saagise ja toote paigaldusel tekkivate jääkide ja jäätmete teemat. Kuna ehitusektor on tervikuna üks suurimaid jäätmeid sh ka ohtlikke jäätmeid tekitavaid valdkondi (Wilts jt, 2016), siis on see teematika väga oluline.

Põhimõtteliselt ei ole autori poolt välja töötatud valikukontseptsiooni ja sellel baseeruva rakenduse kasutusvõimalused piiratud ning juhul kui eksisteerivad ehitustehniliselt sobivad alternatiivid, saab analoogset meetodikat rakendada mistahes ehitusmaterjalide valiku protsessis. Kasutajasõbralik ja unikaalselt üles ehitatud kalkulaatorrakendus võimaldab lihtsalt saada teada kolme võrreldava variandi osas konkreetsetele kriteeriumitele baseeruva eelistuse, mis viitab selgelt antud alternatiivide hulgast kõige keskkonnasõbralikumale tootele. Sisulise poole pealt lisab antud lähenemisviis materjalivaliku otsustusprotsessi materjalide ökoloogilise jalajälje mõju, hõlmates seejuures kaudselt kogu toote elukaart. Kalkulaatori kasutajate sihtrühmana nähakse kõiki huvilisi, kellel on vaja valida soojustamiseks materjali ning kes hoolivad meid ümbritsevast keskkonnast.

Testid tehti rakenduskalkulaatori versiooniga v36. Kalkulaatorit testiti nii sama materjalitüübi eri toodetega kui ka erinevat päritolu ja tüüpi soojustusmaterjalidega. Materjalide kolmesed kombinatsioonid saadi juhusliku valiku teel töö käigus koostatud soojustusmaterjalide nimekirjast, mis sisaldas kõiki vajalikke andmeid (vt lisa 3).

Tabelise 3.1 on koondatud valik teostatud testide tulemustest, kus on näha võrreldud kolme materjali keskkonnaliste koondskooride kombinatsioonid. Detailed testide tulemused on esitatud käesoleva töö lisas 8.

Tabel 3.1 Kalkulaatoriga võrreldud materjalide koondindeksid ja vastavad valikusoovitused (autori koostatud).

	A	B	C
Materjali nimetus	Knauf TP115	Isover KL33	Ursa KL37
Materjali tüüp	GW	GW	GW
Tootmismaa	Saksamaa	Soome	Hispaania
Keskkonnaindeks	1,50	1,99	1,56
Materjali nimetus	Balpol E-100	Rotaflex TP 01	Rockwool Cavity Insulation
Materjali tüüp	EPS	GW	SW
Tootmismaa	Leedu	Tšehhi	Taani
Keskkonnaindeks	1,81	1,72	2,32
Materjali nimetus	Kanuf Space Slab 035	Balpol E-100	Reiden Therm 100
Materjali tüüp	GW	EPS	EPS
Tootmismaa	Saksamaa	Leedu	Eesti
Keskkonnaindeks	1,59	1,81	1,90
Materjali nimetus	Balpol E-100	Reiden Therm 100	Tenapors Neo Plus 100
Materjali tüüp	EPS	EPS	EPS
Tootmismaa	Leedu	Eesti	Läti
Keskkonnaindeks	1,85	1,94	1,81
Materjali nimetus	Celotex GA4000	Finnfoam FF-PIR	Unilin Utherm KD
Materjali tüüp	PIR	PIR	PIR
Tootmismaa	Suurbritannia	Soome	Belgia
Keskkonnaindeks	1,88	2,44	1,96
Materjali nimetus	Kingspan Therma	Recticel Eurowall	Kingspan Kooltherm K12
Materjali tüüp	PUR	PUR	PUR
Tootmismaa	Holland	Suurbritannia	Holland
Keskkonnaindeks	2,03	1,88	2,43
Materjali nimetus	Polyfoam Super Grade	Technicol Carbon Prof	Kingspan Styrozone XPS
Materjali tüüp	XPS	XPS	XPS
Tootmismaa	Suurbritannia	Tšehhi	Iirimaa
Keskkonnaindeks	3,05	2,60	1,88
Materjali nimetus	Styrofoam 250SL-A 50	Emimar Eurowall	Polyfoam ECO
Materjali tüüp	EPS	PIR	XPS
Tootmismaa	Šveits	Läti	Suurbritannia
Keskkonnaindeks	3,38	1,81	3,73
Materjali nimetus	Aerogel Porogel Spaceloft M	Kingspan OPTIM-R	Actis HControl Hybrid
Materjali tüüp	Komposiit	VIP	Polüester
Tootmismaa	USA	Holland	Prantsusmaa
Keskkonnaindeks	4,74	2,06	1,88
Materjali nimetus	EstPlast MINI EPS50	Kurtin Foam XPS	Isover KL 37
Materjali tüüp	EPS	XPS	GW
Tootmismaa	Eesti	Hiina	Soome
Keskkonnaindeks	2,26	2,60	1,50
Materjali nimetus	JabaLite PIB 100	Finnfoam FL300PX	Unilin Utherm KD
Materjali tüüp	EPS	XPS	PIR
Tootmismaa	Suurbritannia	Soome	Belgia
Keskkonnaindeks	2,15	1,88	1,96
Materjali nimetus	ThermaFleece UltraWool	Stropoly TEC	Steico Flex 036
Materjali tüüp	Lambavill	Põhk	Puit
Tootmismaa	Suurbritannia	Saksamaa	Saksamaa
Keskkonnaindeks	1,91	2,25	1,38
Materjali nimetus	Konto Wave	Thermo Natur Combi	Isolina ISO-L
Materjali tüüp	Turvas	Kanep	Lina
Tootmismaa	Soome	Saksamaa	Soome
Keskkonnaindeks	2,29	1,13	1,54
Materjali nimetus	Unilin Utherm KD	EstPlast MINI EPS50	Kurtin Foam XPS
Materjali tüüp	PIR	EPS	XPS
Tootmismaa	Belgia	Eesti	Hiina
Keskkonnaindeks	1,89	1,85	1,94
Materjali nimetus	Rockwool Superrock	Paroc Extra Stone	Petralana Petrafas Rock
Materjali tüüp	SW	SW	SW
Tootmismaa	Soome	Venemaa	Poola
Keskkonnaindeks	1,56	1,90	1,87

Kalkulaatori testimise käigus viidi läbi 21 kolme materjali võrdlusesseiooni. Testide käigus võrreldi erineva 63 materjali kolmeseid kombinatsioone, mille puhul järjestati iga testisessiooni kolm soojustustoodet keskkonnaindeksi alusel. Kõige madalam indeksi väärtus osundab võrdlusvariantidest kõige väiksema ökoloogilise jalajäljega materjalile ning see on ka kalkulaatori poolt antud valikusoovituseks (tabelis 3.1 toodud roheline taustaga väljad). Materjalid koos andmetega võeti juhusliku valikuga käesoleva töö käigus koostatud soojustusmaterjali valmist, mis sisaldas vajalikke andmeid kokku 136 materjali kohta. Materjalide keskkonnaindeksid jäid vahemikku 1,13 kuni 8,14. Soodsama koondskoori andis Saksamaal valmistatud kanepist kiudplaat Thermo Natur Combi, mille keskkonnajätkusuutlik maksumus oli võrreldes kahe teise materjaliga kõige soodsam (sessioonisisene võrdlusbaas väärtusega 1,0) ning mille individuaalne keskkonnaskoor oli kokku 1,5 ($1,0 \times 0,75 + 1,5 \times 0,25$). Madal indeks formeerus antud juhul eelkõige konkurentsivõimelise hinna, heade soojustehniliste omaduste ning materjali loodusliku päritolu koostõel. Samas kõige kõrgema skoori sai Suurbritannia päritolu soojustusplaat Sundolitt XPS300, millel oli nii kõrge hind kui ka suur individuaalne keskkonnaskoor (naftasaadus, toodetud paigalduskohast kaugel, ei ole taaskasutatav materjal, ohtlikud paigaldusmaterjalide jäätmed jne) ning mis sattus võrdlusesse kordades madalama hinnaga mineraalset päritolu materjalidega, millel olid ka olulisel madalamad individuaalsed keskkonnaskoorid.

Kalkulaatori üheks väljundiks olid ka andmed iga materjali keskkonnakoormuse hinnalisa kohta, mis oli iga konkreetse soojustusmaterjali kasutamise keskkonnajätkusuutliku maksumuse üheks komponendiks. Reeglina jäi konkreetsest materjalist ja selle tüübist sõltuvalt keskkonnakoormuse hinnalisa vahemikku 30-60 euro senti soojustatava pinna m² kohta. Samas oli valmis ka materjale, mille puhul see näitaja oli alla 20 senti (nt Rockwool Superrock, Climowool TW1-E) ja mõne puhul lähenes see isegi 2 eurole (Polyfoam Super Grade, Aerogel Porogel Spaceloft). Antud suured erinevused tingib materjali energiamahukus ja millises riigis antud materjal on toodetud. Teatud riikide energiatootmise allikate üldisest struktuurist tingitud arvestuslikud saastefaktorid on endiselt väga erinevad (nt Eesti vs Soome, kus need näitajad on vastavalt 0,875 vs 0,143). Teostatud testide tervik tulemused on esitatud töö lisa 8.

Vaatamata sellele, et kalkulaatori testimisel saadud tulemused andsid aluse pidada seda hästi töötavaks otsustusprotsessi abivahendiks ning tehtud arendustööd edukaks, leidub sellel ka mõningad kitsaskohti, mille kõrvaldamiseks oleks vaja teha täiendavat uurimis- ja arendustööd.

Testid näitasid, et materjalidele eelistuse andmise aluseks olev koondskoor suudab hästi mõõta soojustustoote kasutamise mõju keskkonnale ning neid üksteisest eristada. Siiski on kalkulaatori tööpõhimõtte aluseks olev meetodika ja tänane seadistus kõige sobivam suhteliselt sarnase hinnataseme ja soojustehniliste omadustega materjalide võrdlemiseks. Seepärast on töös läbivaldt osundatud materjalide valiku osas mõistele alternatiivsed materjalid. Antud kalkulaatori puhul saab võrdväärsete alternatiividena käsitleda keskkonnajanduslikust sisust lähtuvalt kolme niisugust materjali, mille hinnataseme erinevus on kuni $\frac{1}{3}$ ja mille soojuserijuhtivus ei erine üksteisest üle $\frac{1}{3}$. Niisugusel juhul jäävad võrdlussesiooni puhul ka vähem keskkonnasõbralikumate materjalide koondskoorid vahemikku 1 kuni 2,5. Juhul kui materjalide soojustehnilised parameetrid on liialt erinevad, toob see endaga kaasa soojustuskihi paksuse suure varieeruvuse ning soojustamiseks vajamineva materjali koguse suure erinevuse (Barrau jt, 2014; Palmer jt 2017). Niisiis on kalkulaatori abil mõistlik võrrelda suhteliselt sarnase hinnataseme, füüsilise oleku ja gabariitidega ning soojustehniliste omadustega materjale.

Tänane kalkulaatori versioon annab selle kasutajale veateate ainult siis, kui materjali paksus ületab soovitud sihtnäitaja saavutamiseks vajalikku materjalikihi paksust ja juhul, kui soojustuskihi paksus ületab 400 mm. Materjali hindade suure erinevuse osas piiranguid seatud ei ole ning kaaluda tuleks selle kriteeriumi kehtestamist järgmise kalkulaatori versiooniuuenduse käigus. Antud juhul oleks sobiv võtta hinnaerinevuse ulatuse võrdluse aluseks etteantud pinna soojustamiseks vajamineva materjali maksumus mahuühiku kohta ($\text{€}/\text{m}^3$). Seetõttu võiks olla kalkulaatori edasise arendustöö fookuses täiendavate loogikareeglite ja limiteerivate piirangute kehtestamine, et rakendus suudaks informeerida selle kasutajat võimalikest ebakõladest juba materjalide kohta andmete sisestamisel.

Kalkulaatorit võiks täiendada ka materjali paigalduskoha kriteeriumi sissetoomisega ning see muudaks materjali individuaalse keskkonnaskoori täpsemaks. Tänane mudeli versioon kasutab ühe keskkonnaskoori kriteeriumina materjali tootmiskoha kaugust selle paigalduskohast ning vaikimisi eeldatakse, et materjal paigaldatakse Eestis. Näiteks kui kalkulaatorit otsustab kasutada keegi Aasiast, siis selles regioonis toodetud materjali individuaalse keskkonnaskoori tulemus saab antud juhul olema pisut moonutatud.

Antud kalkulaatori nõrgaks kohaks on materjalispetsiifiliste andmete osas ka saagise ja paigaldustarvikute jäätmete määrade suur üldistuse aste. Praegu kasutatakse mudelis erialakirjanduse ja ehitusmaterjalide eelarvestamise juhendite põhjal kaardistatud näitajaid, mis on klassifitseeritud materjaliklasside lõikes, toetudes nende füüsikalistele

parameetritele (jäik plaat, rullvill, graanul jne). Väga vähe infot on uudsete materjalide kohta (nt vaakumpaneelid), mille puhul peaks saagis kujunema kõrgeks, kuna neid materjale ei ole võimalik kohapeal sobivasse mõõtu lõigata ega töödelda ehk siis kaob koheselt nende väga hea isolatsioonivõime (Jelle jt, 2017; Tažiková jt, 2018). Need paneelid tellitakse tehases reeglina projekteerimise käigus paika pandud spetsiaalmõõtmega, arvestades soojustatava pinna eri osade mõõte ja hoone arhitektuurset lahendust (Kalnæs & Jelle, 2014).

Edasiste uuringute käigus võiks koguda täpsemaid andmeid materjalide individuaalse saagise, paigaldusjätmete ja pakendite koguste kohta, arvestades tänaseid materjalikoguste eelarvestamise võimalusi ning ehitajate töökultuuri. Materjalide võimalikult täpne eelarvestamine ja ehitusplatsile tellimine peaksid olema projektijuhtimise hierarhias kõrge prioriteetsusega, et kindlustada materjalide kasutamise efektiivsus (Sapuyay, 2016). Kirjanduses tuuakse välja, et mida suurem on allhanketööde kasutamine ehitusel, seda suuremad on tegelikud materjalikaod ning ehitustööde käigus tekkivate jätmete kogus (John & Itodo, 2013). Soojustusmaterjalide kasutamise suurt ebaefektiivsust ning selle tööloigu käigus tekkivat mastaapset ehitusprügi hulka on autor täheldanud ka viimase kolme aasta jooksul teostatud erinevate ehitusobjektide vaatluse käigus. Seega soojustusmaterjalide saagise ja paigaldusega seotud otseste jätmete määrad vajaks täiendavate spetsiaaluuringute abil täpsustamist.

Üheks kalkulaatori arendusega seotud probleemiks on ka rakenduse andmeladude sidumine reaajas uuenevate andmebaasidega. Andmeedastuse tehnilise poole pealt on see küsimus tulevase veebiversiooni puhul lahendatav, kuid peamiseks taksituseks on selles osa asjaolu, et paljud põhjalikud ja ajakohased andmebaasid materjalide võimaliku kasutustõhususe ning nende tootmise energiamahukuse kohta on tasulised. Kalkulaatori varustamine reaajas uuenevate andmetega toob kaasa arvestatava püsikulu ning see ei võimalda rakendust kõigile soovijatele vabavarana pakkuda. Siinkohal võiks abiks olla tulevane koostöö mõne materjalitootjaga, kelle huvidega võiks antud rakenduse kasutamine haakuda. Kuna karmistunud energianormatiivide ja püstitatud kliimaeesmärkide tõttu on nii vanade kui ka uute hoonete soojustamise teema järgnevatel kümnenditel aktuaalne (Asdrubali jt, 2015), siis võiks antud magistritöö raames loodud materjalivaliku abivahendit edasi arendada, et seda oleks võimalik kasutada ka teiste ehitusmaterjalide valiku protsessis. Kuigi rakenduse kasutamise tarbeks tuleb toodete kohta koguda teatud kriitiline kogus informatsiooni, on selle rakendamine jõukohane ka inimestele, kes ei oma spetsiaalset erialast ettevalmistust (iseehitajad).

KOKKUVÕTE

Ehitussektor on ressursimahukuse, materjalide kasutuse intensiivsuse, energiatarbimise ning jäätmete tekitamise hulga tõttu üks suurimad keskkonda koormavaid valdkondi. Hoonete keskkonnateadlikum ja tõhusam soojustamine aitab vähendada nende püstitamise ja kasutuse energiakulu ning sellest tulenevat saastemahtu. Soojustusmaterjalide valik on üks ehitiste keskkonnakoormuse alandamise ja hoonete energiatõhususe tõstmise võtmeküsimustest ning antud teema on endiselt väga aktuaalne. Ajendatuna sellest sõnastatigi magistritöö eesmärk ning püstitati hüpoteesid.

Magistritöö eesmärgiks oli välja arendada kasutajasõbralik kalkulaator, mis aitab valida ehituses kasutatavaid soojustusmaterjale keskkonnateadlikumalt.

Töö esimeses osas anti erialakirjanduse põhjal ülevaade ehitusektori ja materjalide kasutamise ökoloogilise jalajäljega seonduvatest olulistest aspektidest, hoonete soojustamisest ja selle tähtsusest sh hoonetete energiatarbimisele kehtestatud uutest nõuetest. Selles peatükis käsitleti ka soojustusmaterjalide tehnilisi omadusi ja nende kasutamisega kaasnevat keskkonnamõju ning toodi välja materjalivaliku peamised kriteeriumid. Lisaks tutvustati antud peatükis olemasolevaid meetodeid ning tehnilisi abivahendeid, mis on leidnud laiemat rakendust ka soojustamise valdkonnas. Antud osas esitati valikuliselt ka püstitatud uurimisülesannetega seotud asjakohast statistikat nii ehitussektori, ehitusmaterjalide keskkonnamõju kui ka levinumate soojustusmaterjalide kasutuse kohta.

Teise osa esimeses peatükis selgitati soojustusmaterjalide keskkonnateadliku valiku meetoodika aluste väljatöötamise käiku, tutvustati hindamismudeli toimimispõhimõtet ja tehti kokkuvõtte selle kasutuskõlblikkuse hindamisest. Antud meetoodika sobivust testiti 32 soojustusmaterjalist koostatud valmi andmetel ning tulemused kinnitasid nende võrdlemise sobivust antud kontseptsiooni põhjal arvutatud keskkonnaalase koondindeksi alusel. Teise osa järgnevatel alapunktides keskenduti soojustusmaterjalide keskkonnateadliku valiku meetoodika arendamisele ning vastava IT tehnilise abivahendi loomisele ning selle rakenduse arendusprotsessi tehnilisele kirjeldamisele. Selles moodulis viidi läbi ka kalkulaatori täisfunktsionaalsusega demoversiooni praktiline kasutamine ja testimine ning selle rakenduse kõigile soovijatele kättesaadavaks tegemine. Rakenduse Exceli-põhine eesti- ja inglisekeelse toega versioon on alla laetav kodulehelt www.insmat.org.

Kolmandas osas keskenduti magistritöö raames välja arendatud rakenduse testimise tulemuste analüüsimisele ja arutelule kalkulaatori arendusprotsessi käigus tõstatunud probleemide üle. Kalkulaatori testid hõlmasid valimist (136 soojusmaterjalist koosnev valim) juhusliku valiku teel komplekteeritud kolme materjali võrdlustest. Kokku tehti 21 testi, mis sisaldas 63 erinevat soojustustoodet. Materjalide keskkonnaindeksid jäid vahemikku 1,13 kuni 8,14 ning sõltuvalt soojustustoote tüübist jäi materjali keskkonnakoormuse hinnalisa reeglina vahemikku 30-60 eurosentit soojustatava pinna m² kohta. Testimise käigus ilmnis, et kalkulaator suudab materjale hästi eristada ning järjestada need keskkonnaindeksi järgi viisil, mis on kooskõlas antud käsitluse üldiste loogiliste eeldustega. Näiteks sarnase hinnataseme, füüsiliste omaduste ja soojustehniliste parameetrite puhul sai olemuselt keskkonnasõbralikum ja paigalduskohale lähemal toodetud materjal madalama keskkonnaindeksi, võrreldes mõne energiamahukalt toodetud naftasaadusega ja vastupidi. Samuti eelistas rakendus selgelt looduslikku soojustusmaterjali, juhul kui selle hind ja soojustehnilised parameetrid osutusid konkurentsivõimelisteks. Selles peatükis kommenteeriti ka kalkulaatori testimise käigus tuvastatud puudusi ning pakuti välja ka antud rakenduse võimalikud edasiaredu suunad. Lisaks käsitleti antud metoodika ja rakenduse laiemaid kasutusvõimalusi ka teiste ehitusmaterjalide valiku protsessis.

Magistritöö lähteülesande püstitamise käigus formuleeritud eesmärk sai täidetud ja sõnastatud hüpoteesid leidsid töö tulemustele tuginedes kinnitust. Arendatud Exceli-põhine rakendus töötab ning selle abil saab valida soojustusmaterjale keskkonnateadlikumalt. Seega soojustusmaterjalide keskkonnateadliku valiku lihtsustamiseks oli võimalik luua kalkulaator, mis arvestab automaatselt materjali kasutamise keskkonnamõju.

Kalkulaatori abil teostatud praktiliste testide tulemusele tuginedes leidsid kõik töö lähteülesandes püstitatud hüpoteesid kinnitust. Testitulemuste analüüsi põhjal saab väita, et sarnaste soojustehniliste omadustega materjalide kasutamise keskkonnakoormus erineb olulisel määral ning alati on võimalik valida võimalike alternatiivide hulgast kõige keskkonnasõbralikum materjal. Samuti leidis kinnitust väide, et arvestades soojustusmaterjalide ökoloogilise jalajälje suurust, võivad looduslikud ja mineraalsed materjalid olla konkurentsivõimelise hinna juures sünteetilistele materjalidele võrdväärseks alternatiiviks. Lisaks joonistus testide tulemusi analüüsides selgelt välja muster, mille kohaselt looduslike ja energiamahukate materjalide arvestuslik maksumuse erinevus väheneb, kui arvestada materjali kasutamisega kaasnevat keskkonnakoormust kogu soojustustoote elutsükli jooksul.

Käesolevas magistritöös välja arendatud töötav rakendus aitab teha keskkonnateadlikumat valikut võimalike alternatiivsete soojustusmaterjalide hulgast. Valikukriteeriumiks on keskkonnamajanduslik efektiivsus ja väiksem negatiivne mõju loodusele. Antud kontseptsiooni kasutusvõimalused ei ole piiratud ning ehitustehniliselt sobivate alternatiivide olemasolu puhul saaks analoogset rakendust kasutada mistahes ehituse või muu valdkonna materjali valikuks.

SUMMARY

The construction industry together with the building sector is a major source of negative environmental impacts in terms of resource intensity, material utilization and generation of solid wastes. The buildings are responsible for large consumption of energy and the most significant part of the energy is going for heating and cooling. Therefore, the insulation is continually a globally topical issue and due to new and more strict energy-efficient requirements for the buildings, this is becoming increasingly important.

The selection of materials is one of the key issues in reducing the environmental impact and increasing the energy efficiency of buildings. Unfortunately, the synthetic and energy-intensive insulation materials are still preferred in the building envelope and the use of natural thermal products remains tiny.

There are multiple criteria like thermal performance, dimension limit, a factor of installation efficiency, waste rate, environmental cost, architectural feasibility, aesthetic outcome etc., that all must be taken into consideration regarding the selection of thermal insulation solution for building envelope. The possibility to use a proper and user-friendly IT tool can be a powerful resource for builders and designers, making the decision process easier and supporting the sustainable selection of insulation solutions. A series of benefits can be yielded, when applying the developed assessment tool. It provides a wide range of users an option to compare and evaluate materials with different origin, to measure their environmental impact and their installation cost to design more reasonable thermal insulation solutions.

The master thesis aimed to develop and launch an assessment tool for the environmentally conscious selection of thermal insulation materials. The main research tasks set for reaching the goal covered the themes related to insulation materials, their embodied energy and environmental impact and costs. There were formulated also four hypotheses try to prove or disprove in this study, which included feasibility to create user-friendly IT solution for materials selection that relies on specific criteria for ranking of equivalent alternatives, the dissimilar environmental impact of the use of various insulation materials, the environmental cost difference of synthetic and natural materials and their possible substitution.

The thesis contains three main parts. The first one covers the theoretical background of a defined range of topics. The second part focuses on explanation and elaborating further

the materials selection principles and methodology. There are also described the development process and testing of this IT application being the main goal of this work. The third section includes test results analysis and this part comprises also discussion about different aspects, shortcomings and prospects of the developed and launched Excel-based application.

To be more detailed, in the first paragraph were given an overview about the ecological footprint of the construction sector and materials, insulation of the building and its worldwide importance including new requirements for their energy consumption, the function, importance the types of insulation, materials technical properties, the environmental impact of use and main selection criteria as well as there are presented basics of existing methods and currently available tools related to LCA approach.

The second chapter covers construction materials selection principles and further development of the methodology, design, development and launching IT application and it's testing. Thus, the first chapter of the second paragraph explains thoroughly the methodology for the environmentally conscious selection of insulation materials, introduces its principles of operation and summarizes the assessment about suitability for use of these principles. The elaborated specific comparison method for thermal insulation material selection considers with embodied energy-based carbon, rate of installation residues and solid wastes, general environmental impact and the main cost or benefit using the different insulating materials both synthetic and natural origin. In principle, an assessment tool covers the whole life cycle of material starting from cradle to grave. The developed application can provide an objective evaluation of prices, technical parameters, resources use, ecological load and performance that altogether forming the real environmental costs, allowing more accurate comparison of different thermal insulating solutions.

The following chapters of the second paragraph concentrate on the further development of a materials selection methodology and the technical description of the IT application development process. This module also includes the practical use and testing of a full-featured demo version of IT tool and explains how it was made publicly available. Namely, the Excel-based version incl. updated datasets of an assessment tool can be downloaded from the website www.insmat.org for free. The website and application are supporting Estonian and English language languages.

The third paragraph focuses on the analysis of the tool test sessions results and the discussion of the problems raised during an application development process. In this

chapter was also commented on the shortcomings that were identified for the testing process of tool and discussed possible development directions of this tool.

The tool developed in the framework of this thesis is targeted on the ranking of the thermal insulation materials based on economic and environmental efficiency criteria. It bases partially on the conceptual principles created by the author as part of a bachelor`s thesis in 2018. The key data stored to datasets of Excel-based an assessment tool come from different sources and these will be updated regularly. The information about the embodied energy of insulation materials was collected from various databases, different researches as well as manufacturer`s product specification sheets. The data of installation residues and waste rates by material type are estimates based on different surveys, articles, construction budgeting guidelines and construction handbooks. The country-specific electricity grid emission factors and carbon emission allowance market prices are the latest publicly available official figures. The functional unit selected for the thermal insulation materials` environmental evaluation is embodied energy MJ/kg based on the cradle to gate approach by the means of LCA.

The tests of Excel-based tool included a comparison of three randomly selected materials selected from a sample set out of 136. A total of 21 tests sessions were made on 63 different insulation products. The environmental indexes of the materials ranged from 1.13 to 8.14 and, depending on the type of insulation product, the environmental mark-up of the material usually ranged from 30 to 60 euro cents per m² of the surface to be insulated. Testing results proved that the tool enables to differentiate materials well and rank them according to an environmental index in a way that is consistent with the general logical assumptions of this approach. For example, with similar price levels, physical characteristics and thermal parameters, the more environmentally friendly material that was produced closer to the installation site had a lower environmental index than some energy-intensive synthetic insulation product and vice versa. The application also preferred natural insulation material if its price and thermal parameters proved to be competitive. Summing up the results, it can be concluded that it is always possible to do the specific parameters and fact-based choices, considering an environmental impact of the use of each particular material.

The thesis aimed to create an assessment tool for the environmentally conscious selection of thermal insulation materials and this task was completed successfully. The results of developed Excel-based tool testing showed that it can be used for a more sustainable choice of thermal insulation materials. Thus, to simplify the environmentally conscious choice of insulation materials, it was possible to create a calculator that

automatically considers with an ecological footprint of each specific insulation material. Moreover, based on the test results, all hypotheses can be considered also proven. It can be stated that the whole environmental load of using materials with similar thermal properties differs significantly and it is always possible to choose the most environmentally friendly material from available alternatives. The overall pattern of test results confirmed clearly that the real ecological footprint of insulation materials differs to a great extent and the natural and mineral materials can be an equivalent alternative to synthetic materials in case of technical feasibility and competitive price. Also, the tests sessions proved that the difference in the true cost of natural and synthetic materials reduces when the actual ecological footprint of each particular material has taken into account.

Since insulation theme is still up and coming and the environmentally conscious selection of insulation materials is topical, it is highly recommended to develop further the tool functionality and to link it with online databases. Further research is also needed to determine more accurate and material-specific yields of installation residues and quantities of generated solid wastes during insulation works in the construction sites. It can be also noted that the possibilities of using this kind selection concept are not limited and in a case of existence of technically suitable alternatives, this kind of application can be always used in the process of selecting any construction or other material.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

Akhilesh (2012). Assessment of Software Process Model. *International Journal of Engineering and Management Science (IJEMS)*, Vol.3 (4), 500-506.

Aleksanin, A. (2019). Development of construction waste management. *E3S Web of Conferences*, 97. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706040>

Ali, T. Z. S., Rosli, A. B., Gan, L. M., Billy, A. S., & Farid, Z. (2013). Investigation of potential waste material insulating properties at different temperature for thermal storage application. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 50, 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/50/1/012049>

Antoniadou, P., Giama, E., Boemi, S.-N., Karlessi, Th., Santamouris, M., & Papadopoulos, A. M. (2015). Integrated Evaluation of the Performance of Composite Cool Thermal Insulation Materials. *Energy Procedia*, 78, 1581–1586. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.214>

Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>

Asif, M., Muneer, T., & Kelley, R. (2007). Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. *Building and Environment*, 42(3), 1391–1394. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.023>

Athena Sustainable Materials Institute. (2019). About Whole-building LCA and Embodied Carbon. Loetud aadressil http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2019/09/About_WBLCA.pdf

Bach, R., Mohtashami, N., & Hildebrand, L. (2019). Comparative Overview on LCA Software Programs for Application in the Façade Design Process. Search Results. *Journal of Facade Design and Engineering*, 7(1). <https://doi.org/10.7480/jfde.2019.1.2657>

Bakhoun, E. S., Garas, G. L., Allam, M. E. (2015). Sustainability Analysis of Conventional and Eco-friendly Materials: a Step Towards Green Building. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(2), 778-796.

Barrau, J., Ibanez, M., & Badia, F. (2014). Impact of the insulation materials' features on the determination of optimum insulation thickness. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(2-3). <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0079-3>

Berge, B. (2009). *The Ecology of Building Materials*. Maarsse, Netherlands: Elsevier Gezondheidszorg.

Bozsaky, D. (2016). Application of Nanotechnology Based Thermal Insulation Materials in Building Construction. *Acta Technica Jaurinensis*, 9(1), 29. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v9.n1.391>

BRE Global Environmental Profiles methodology . (2008). BRE Global Methodology for Environmental Profiles of Construction Products (SD6050 Issue 1.0). Loetud aadressil <https://www.bregroup.com/greenguide/page.jsp?id=2106>

Building Futures. (2020). Waste facts. Loetud aadressil <https://www.hertfordshire.gov.uk/microsites/building-futures/a-sustainable-design-toolkit/technical-modules/waste/waste-facts.aspx>

Carabaño, R., Hernando, S. M., Ruiz, D., & Bedoya, C. (2017). Life Cycle Assessment (LCA) of building materials for the evaluation of building sustainability: the case of thermal insulation materials. *Revista de La Construcción*, 16(1), 22-33. <https://doi.org/10.7764/rdlc.16.1.22>

Carbon footprint. (2019). COUNTRY SPECIFIC ELECTRICITY GRID GREENHOUSE GAS EMISSION FACTORS (2019 Grid Electricity Emissions Factors v1.0). Loetud aadressil https://www.carbonfootprint.com/docs/2019_06_emissions_factors_sources_for_2019_electricity.pdf

Carbon Footprint. (2020). carbonfootprint.com - Carbon Footprint Calculator. Loetud aadressil <https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx>

Cárdenas-R, J. P., Cea, M., Santín, K., Valdés, G., Hunter, R., & Navia, R. (2018). Characterization and application of a natural polymer obtained from *Hydrangea macrophylla* as a thermal insulation biomaterial. *Composites Part B: Engineering*, 132, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.086>

Centre of Alternative Technology (CAT). (2020). Natural and low impact building materials. Loetud aadressil <https://www.cat.org.uk/info-resources/free-information-service/building/natural-building-materials/>

Charriau, P., & Crenes, M. (2019). Global Energy Trends A new historic high in Energy Consumption and CO₂ Emissions (Global Energy Trends-2019 Edition). Loetud aadressil <https://www.enerdata.net/publications/reports-presentations/world-energy-trends.html>

Chattaraj, S., Das, S., Sengupta, A., Mallick, K. (2016). Green Buildings Overview and Analysis of Energy Efficient Building. *International Journal of Recent Research in Electrical and Electronics Engineering*, 3(1), 41-49.

Chudley, R., & Greeno, R. (2014). *Building Construction Handbook*. Abingdon, United Kingdom: Routledge.

Claudiu, A., & Cobirza, N. (2013). Use of Agricultural Products and Waste in the Building Materials Industry. *ProEnvironment*, 6, 472–478.

Connor, J., & Bowick, M. (2014). Advancing sustainable design with life cycle assessment (Athena Sustainable Materials Institute). Loetud aadressil http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2015/09/Advancing_Sustainable_Design_with_LCA.pdf

Construction Resources and Waste Platform. (2010). The true cost of waste - an online tool to help reduce waste from construction sector.

Deplazes, A. (2009). *Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures: a Handbook* (2nd ed. 2008. 2nd printing ed.). Basel, Switzerland: Birkhäuser Architecture.

Deshmukh, G., Birwal, P., Datir, R., & Patel, S. (2017). Thermal Insulation Materials: A Tool for Energy Conservation. *Journal of Food Processing & Technology*, 8(4), 670. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000670>

Didier-Noaro, F., Jan, O., Hestin, M., Chanoine, A., Croison, F., Menten, F., Lecerf, L. (2016). Circular economy potential for climate change mitigation. *Deloitte Sustainability*, 1-42.

Ding, G. K. C. (2014). Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials: an overview. *Eco-Efficient Construction and Building Materials*, 38–62. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.1.38>

Directive 2010/31/EU. (2010). Energy Performance of Buildings. Official Journal of the European Union.

EMBER. (2020). Carbon Price Viewer. Loetud aadressil <https://ember-climate.org/carbon-price-viewer/>

European Commission. (2019). Going CLIMATE-NEUTRAL by 2050. Loetud aadressil <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/92f6d5bc-76bc-11e9-9f05-01aa75ed71a1>

European Commission. (2018). Improving energy and resource efficiency (Analytical Report – Improving energy and resource efficiency). Loetud aadressil <https://www.buildup.eu/en/practices/publications/improving-energy-and-resource-efficiency-european-construction-sector>

European Commission. (2016). EU Construction & Demolition Waste Management Protocol. Loetud aadressil <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/attachments/1/translations/en/renditions/native>

European Commission. (2011). Analysis of the key contributions to resource efficiency (Final Report). Loetud aadressil <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5d57d4ed-9d81-4e2e-8d32-d35fdaae59e4/language-en>

European Commission. (2010). Green Public Procurement –Thermal Insulation Technical Background Report. DG Environment, Brussels. Loetud aadressil https://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/thermal_insulation_GPP_%20background_report.pdf

European Environment Agency (EEA). (2016). More from less — material resource efficiency in Europe. 2015 overview of policies, instruments and targets in 32 countries - EEA Report No 10/2016. Luxembourg: Publications Office of the European.

European Environment Agency (EEA). (2019). Waste generation in Europe. Loetud aadressil <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/waste-generation-4/>

European Environment Agency (EEA). (2020a). Construction and demolition waste: challenges and opportunities in a circular economy. Loetud aadressil <https://www.eea.europa.eu/publications/construction-and-demolition-waste-challenges>

European Environment Agency (EEA). (2020b). Resource efficiency and the circular economy in Europe 2019 – even more from less: An overview of the policies, approaches and targetsof 32 European countries. Loetud aadressil <https://www.eea.europa.eu/publications/even-more-from-less>

Fernandes, J., Mateus, R., & Bragança, L. (2013). The potential of vernacular materials to the sustainable building design. *Vernacular Heritage and Earthen Architecture*, Chapter: *Energy Efficiency and Sustainable Design*, 623–629. <https://doi.org/10.1201/b15685>

GaBi. (2020). Product Sustainability Performance. Loetud aadressil <http://www.gabi-software.com/international/overview/product-sustainability-performance/>

Gibbons, M., & Patel, T. (2020). *Middle East Property & Construction Handbook 2018/19* (twelfth edition ed.). AECOM.

Gibson, G., & Ramsson, T. (2012). Building Shell and Thermal Insulation. *IEA ETSAP-Technology Brief R01*. Loetud aadressil https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/R01_Building%20shell-thermal%20insulation%20FINAL_GSOK.pdf

Going Global. (2019). Structural insulated panels (SIPs) Industry Background. Loetud aadressil <http://www.rialteam.com/rialteam.mozello.com/news/waterproofing-and-thermal-insulation/index.html>

GreenSpec. (2020). Insulation materials and their thermal properties. Loetud aadressil <http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/>

Hammond, G., Jones, C. (2011). Embodied Carbon - The Inventory of Carbon and Energy (ICE). A BSRIA guide. Loetud aadressil <https://greenbuildingencyclopaedia.uk/wp-content/uploads/2014/07/Full-BSRIA-ICE-guide.pdf>

Haynes, R. (2013). Embodied Energy Calculations within Life Cycle Analysis of Residential Buildings, 1-16. Loetud aadressil <https://www.etoologlobal.com/wp-content/uploads/2012/10/Embodied-Energy-Paper-Richard-Haynes.pdf>

Healy, S., Graichen, V., Graichen, J., Nissen, C., Gores, S., Siemons, A. (2019). Trends and projections in the EU ETS in 2019. The EU Emissions Trading System in numbers: Eionet Report. European Topic Centre on Climate change mitigation and energy.

Herrmann, I. T., & Moltesen, A. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production*, 86, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.004>

Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. (2019). RT I, 22.08.2019, 2. Loetud aadressil <https://www.riigiteataja.ee/akt/122082019002?leiaKehtiv>

IEA. (2019). Global Status Report for Buildings and Construction 2019. *Technology report*, Paris. Loetud aadressil <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>

Independent Group of Scientists. (2019). The Future is Now – Science for Achieving Sustainable Development (Global Sustainable Development Report). Loetud aadressil https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/24797GSDR_report_2019.pdf

Insul Eco. (2020). Competitors in the European insulation market. Loetud aadressil <http://www.insul-eco.eu/competitors/>

Islam, R., Nazifa, T. H., Yuniarto, A., Shanawaz Uddin, A. S. M., Salmiati, S., & Shahid, S. (2019). An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. *Waste Management*, 95, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.049>

Jelle, B. P., Tilset, B. G., Gao, T., Grandcolas, M., Løvvik, O. M., Bohne, R. A., ... Sagvolden, E. (2017). High-Performance Nano Insulation Materials for Energy-Efficient Buildings. *Proceedings of TechConnect World Innovation Conferenc*, 289–292.

Jin, H., & Ling, W. (2017). External wall structure of green rural houses in Daqing, China, based on life cycle and ecological footprint theories. *Frontiers of Architectural Research*, 4 (3), 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2015.04.002>

John, A. O., & Itodo, D. E. (2013). Professionals' views of material wastage on construction sites and cost overruns. *Organization, Technology & Management in Construction: An International Journal*, 5(1), 747-757. <https://doi.org/10.5592/otmcj.2013.1.11>

Kalnæs, S. E., & Jelle, B. P. (2014). Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways. *Applied Energy*, 116, 355-375. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.032>

Kara, S., & Manmek, S. (2009). Composites: calculating their embodied energy (Life Cycle Engineering & Management Research Group). Loetud aadressil <https://www.wagner.com.au/media/1189/uns-w-life-cycle-analysis.pdf>

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Loetud aadressil <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>

Keskkonnakorraldus. Olelusringi hindamine. Nõuded ja kasutusjuhised. (2006). EVS-EN ISO 14044:2006.

Keskkonnakorraldus. Olelusringi hindamine. Põhimõtted ja raamistik. (2006). EVS-EN ISO 14040:2006.

Keskkonnaministeerium. (2015). Ehitus- ja lammutusjäätmete käitlusnõuete mõju analüüs. Loetud aadressil https://www.envir.ee/sites/default/files/ehitus-ja_lammutusjaatmete_kaitlusnouete_moju_analuus.pdf

Khoukhi, M., Hassan, A., Al Saadi, S., & Abdelbaqi, S. (2019). A dynamic thermal response on thermal conductivity at different temperature and moisture levels of EPS insulation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100481. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100481>

Kono, J., Goto, Y., Ostermeyer, Y., Frischknecht, R., & Wallbaum, H. (2016). Factors for Eco-Efficiency Improvement of Thermal Insulation Materials. *Key Engineering Materials*, 678, 1–13. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.678.1>

Kunič, R. (2017). Carbon footprint of thermal insulation materials in building envelopes. *Energy Efficiency*, 10(6), 1511–1528. <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9536-1>

Lassio, J., França, J., Espirito Santo, K., & Haddad, A. (2016). Case Study: LCA Methodology Applied to Materials Management in a Brazilian Residential Construction Site. *Journal of Engineering*, 2016, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/8513293>

Lasvaux, S., Gantner, J., Schiopu, N., Nibel, S., Bazzana, M., Bosdevigie, B., & Galdric, S. (2013). Towards a new generation of building LCA tools adapted to the building design process and to the user needs. Proceedings of the International Conference on Sustainable Buildings, Construction Products and Technologies .Graz: Austria.

Latif, E., Woolley, T., & Bevan, R. (2019). *Thermal Insulation Materials for Building Applications: The Complete Guide*. Zaltbommel, Netherlands: Van Haren Publishing. <https://doi.org/10.1680/timfba.63518.049>

Lawrence, M. (2015). Reducing the Environmental Impact of Construction by Using Renewable Materials. *Journal of Renewable Materials*, 3(3), 163–174. <https://doi.org/10.7569/jrm.2015.634105>

Lehmann, S. (2011). Optimizing Urban Material Flows and Waste Streams in Urban Development through Principles of Zero Waste and Sustainable Consumption. *Sustainability*, 3(1), 155–183. <https://doi.org/10.3390/su3010155>

Lucchi, E., Tabak, M., & Troi, A. (2017). The “Cost Optimality” Approach for the Internal Insulation of Historic Buildings. *Energy Procedia*, 133, 412–423. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.372>

Lushnikova, N. (2016). Approaches to Teaching Building Materials and Technologies for Energy - Efficient Sustainable Construction. *Budownictwo i architektura* 15(3), 52-62. [10.24358/Bud-Arch_16_153_04](https://doi.org/10.24358/Bud-Arch_16_153_04)

Lyons, A. (2010). *Materials for Architects and Builders, Fourth Edition (4th ed.)*. Oxford, England: Butterworth-Heinemann.

Markets insider. (2020). CO₂ European Emission Allowances PRICE Today | CO₂ European Emission Allowances Spot Price Chart | Live Price of CO₂ European Emission Allowances per Ounce | Markets Insider <https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-european-emission-allowances>

Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla. (2018). Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

Merritt, F. S., & Ricketts, J. T. (2001). *Building Design and Construction Handbook, 6th Edition*. New York, United States: McGraw-Hill Education.

Morini, A. A., Ribeiro, M. J., & Hotza, D. (2019). Early-stage materials selection based on embodied energy and carbon footprint. *Materials & Design*, 178, 107861. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107861>

Pacorinc. (2020). Going Green: Embodied Energy and CO₂ Values for Aerogel and Other Insulations (High-performance aerogel insulation for appliances and refrigerated equipment). Loetud aadressil <https://www.pacorinc.com/pdf/Aspen-Pacor-Green-Table.pdf>

Palmer, J., Terry, N. (2017). Solid Wall Insulation: Best Practice and Innovation - Report for the Department of Business, Energy and Industrial Strategy.

Papadopoulos, A. M., & Giama, E. (2007). Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building. *Building and Environment*, 42(5), 2178–2187. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.012>

Papadopoulos, A. M., Karamanos, A, Avegelis, A. (2002). Environmental impact of insulating materials at the end of their useful lifetime. *Protection and restoration of the environment*, 1625-1632.

Pavel, C., Blagoeva, D. (2018). Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings . Revised edition - Study. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Pooya, P., & Mustafa, E. K. (2017). Optimizing the life cycle of an office building at semiarid region. *Scientific Research and Essays*, 12(12), 113–119. <https://doi.org/10.5897/sre2017.6509>

Potrč, T., Rebec, K. M., Knez, F., Kunič, R., & Legat, A. (2016). Environmental Footprint of External Thermal Insulation Composite Systems with Different Insulation Types. *Energy Procedia*, 96, 312–322. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.154>

PU Europe. (2013). Waste management and polyurethane insulation in the context of resource efficiency. Loetud aadressil http://highperformanceinsulation.eu/wp-content/uploads/2016/08/Polyurethane_insulation_and_waste_management.pdf

Pulidindi, K., & Pandey, H. (2018). Building Thermal Insulation Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product, (Glass Wool, Mineral Wool, EPS, XPS), By Application (Roof, Wall, Floor), By End Use, By Region, And Segment Forecasts, 2019 -2025. Loetud aadressil <https://www.gminsights.com/industry-analysis/building-thermal-insulation-market>

Qureshi, Z. A., Ali, H. M., & Khushnood, S. (2018). Recent advances on thermal conductivity enhancement of phase change materials for energy storage system: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 838–856. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.049>

Ramírez-Villegas, R., Eriksson, O., & Olofsson, T. (2019). Life Cycle Assessment of Building Renovation Measures—Trade-off between Building Materials and Energy. *Energies*, 12(3), 344. <https://doi.org/10.3390/en12030344>

Raudik, J.M. (2018). Isolatsiooni- ja soojustusmaterjalide keskkonnateadlik valik. (Bakalaureusetöö). Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, Estonia.

Riigi jäätmekava 2014-2020. Keskkonnaministeerium. Loetud aadressil https://www.envir.ee/sites/default/files/riigi_jaatmekava_2014-2020.pdf

Rivero, J. M., Grigera, J., Rossi, G., Robles Luna, E., Montero, F., & Gaedke, M. (2014). Mockup-Driven Development: Providing agile support for Model-Driven Web Engineering. *Information and Software Technology*, 56(6), 670–687. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2014.01.011>

Rodrigues, V., Martins, A. A., Nunes, M. I., Quintas, A., Mata, T. M., & Caetano, N. S. (2018). LCA of constructing an industrial building: focus on embodied carbon and energy. *Energy Procedia*, 153, 420–425. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.018>

Saadatian, S. S., Freire, F., & Simões, N. (2016). Comparative Life-Cycle Analysis of Insulation Materials in A Dwelling, Addressing Alternative Heating Systems and Life Spans. *Journal of Clean Energy Technologies*, 4(6), 462–465. <https://doi.org/10.18178/jocet.2016.4.6.333>

Sapuay, S. E. (2016). Construction Waste – Potentials and Constraints. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 714–722. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.074>

Sabnis, A. S., Mysore, P., & Anant, S. (2015). Construction Materials-Embodied Energy Footprint-Global Warming; Interaction. Structural Engineers World Congress. Singapore.

Saint-Gobain. (2020). TechCalc 2.0 - Thermal Calculation Software. Loetud adressil <https://www.isover-technical-insulation.com/techcalc-20-thermal-calculation-software>

Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988–1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>

Scottish Environment Protection Agency (SEPA). (2015). Guidance on the classification and assessment of waste (1st edition). Loetud adressil <https://www.sepa.org.uk/media/162771/waste-classification-technical-guidance-wm3.pdf>

Silvestre, J. D., Brito, J. de, & Pinheiro, M. D. (2011). Life-Cycle Assessment of Thermal Insulation Materials for External Walls of Buildings. *International Conference of Constructions - Towards a Better Built Environment*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1756.7768>

Simon, J. M. (2019). A Zero Waste hierarchy for Europe: New tools for new times from waste management to resource management. Loetud adressil <https://zerowasteurope.eu/2019/05/a-zero-waste-hierarchy-for-europe/>

Singh, R. ,Rao B., Asolekars R. (2017). Treatment and Disposal of Glass-wool and Asbestos Bearing Waste-Insulation Materials from Ship Dismantling Yards in India. *15th International Conference on Environmental Science and Technology*. Rhodes: Greece.

Smart houses Portugal. (2020). Insulation materials: how to choose them? Loetud adressil <https://www.ecopassivehouses.com/insulation-materials/>

Su, X., Luo, Z., Li, Y., & Huang, C. (2016). Life cycle inventory comparison of different building insulation materials and uncertainty analysis. *Journal of Cleaner Production*, 112, 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.113>

Surendra, S., Manoj, H., & Madhav, K. (2016). Impact of the Construction Waste on the Cost of the Project. *International Journal of Engineering Research*, 1(5), 1. <https://doi.org/10.17950/ijer/v5i1/028>

Swedish Environmental Protection Agency. (2016). Insulation material may be hazardous waste. Information facts: CFC in building and demolition waste. Loetud adressil <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-8762-3.pdf?pid=18354>

Syngros, G., Balaras, C. A., & Koubogiannis, D. G. (2017). Embodied CO₂ Emissions in Building Construction Materials of Hellenic Dwellings. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 500–508. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.113>

Zach, J., Korjenic, A., Petráněk, V., Hroudová, J., & Bednar, T. (2012). Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. *Energy and Buildings*, 49, 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.014>

Zhou, X., Zheng, F., Li, H., & Lu, C. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, 42(7), 1070–1074. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.020>

Taffese, W. Z., & Abegaz, K. A. (2019). Embodied Energy and CO₂ Emissions of Widely Used Building Materials: The Ethiopian Context. *Buildings*, 9(6), 136. <https://doi.org/10.3390/buildings9060136>

Tažiková, A., & Struková, Z. (2018). An assessment and comparative study of modern thermal insulation systems. *Tem Journal*, 7(4), 769–774. <https://doi.org/10.18421/TEM74-11>

Thornback, J. (2013). Building Insulation Foam Resource Efficiency Partnership . A Resource Efficiency Action Plan, 1 - 52. Loetud aadressil http://www.strategicforum.org.uk/download/downloads/Building_Insulation_Foam_Resource_Efficiency_Partnership.pdf

Totland, M., Kvande, T., & Bohne, R. A. (2019). The effect of insulation thickness on lifetime CO₂ emissions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323, 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012033>

UCL Engineering. (2018). Embodied Carbon: Factsheet - Refurbishment & Demolition of Housing. Loetud aadressil <https://www.ucl.ac.uk/engineering-exchange/sites/engineering-exchange/files/fact-sheet-embodied-carbon-social-housing.pdf>

UNIDO. (2017). Thermal insulation: Properties and applications in housing (Technical manual). Loetud aadressil https://www.unido.org/sites/default/files/2017-09/House_Insulation_v_5.8_EN_0.pdf

United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). 2019 global status report for buildings and construction: *Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. Loetud aadressil <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30950/2019GSR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Veitmans, K., & Grinfelds, U. (2016). Wood Fiber Insulation Material. *Research for Rural Development*, 2, 1–8.

Wilts, H., Arnold, M., Bogdanovic, J. (2016). Prevention of hazardous waste in Europe - the status in 2015. European Environment Agency Report No 35/2016. Luxembourg Publications Office of the European Union.

Yang, Q., Kong, L., Tong, H., & Wang, X. (2020). Evaluation Model of Environmental Impacts of Insulation Building Envelopes. *Sustainability*, 12(6), 2258. <https://doi.org/10.3390/su12062258>

LISAD

Lisa 1 Kalulaatori tööpõhimõtte skemaatiline arhitektuur



Lisa 2 Kalkulaatorrakenduse andmeväljad koos selgitustega

A - Materjali andmed, tehnilised näitajad ja hind	Selgitus
Materjali nimetus	Sisestatav tekst
Materjali tüüp	Valik, andmebaas
Materjali olek paigaldusel	Valik, andmebaas
Tooraine	Andmebaas, algoritm
Materjali liik/klassifikatsioon tooraine päritolu järgi	Andmebaas, algoritm
Tootmismaa	Valik, andmebaas
Materjali taaskasutatavus	Andmebaas, algoritm
Materjalipaki kaal, kg või materjali mahukaal, kg/m ³	Sisestatav väärtus
Paki pikkus, mm	Sisestatav väärtus
Paki laius, mm	Sisestatav väärtus
Paki kõrgus, mm	Sisestatav väärtus
Materjali paksus, mm	Sisestatav väärtus
Materjali soojuseri juhtivus, W/(mK)	Sisestatav väärtus
Materjali €/m ² hind	Sisestatav väärtus
Materjali hind €/m ³	Algoritm
B - Projektipõhised andmed ja soojustehnilised näitajad	Selgitus
Soojustuskihi paksus vajaliku sihtnäitaja saavutamiseks, mm	Algoritm
Soojustatav pind, m ²	Sisestatav väärtus
Materjali R arv soojustakistus, m ² K/W	Sisestatav väärtus/valik
Materjali U arv soojusjuhtivus vajaliku paksuse puhul, W/(m ² K)	Algoritm
Materjali paksus (mõõt tootespetsifikaadis), mm	Sisestatav väärtus
Materjali vajalik kogus (m ³) soovitud pinna (m ²) soojustamiseks	Algoritm
Materjali kogumaksumus soovitud pinna (m ²) soojustamiseks, €	Algoritm
Maksumus soojustatava pinna m ² kohta	Algoritm
C - Paigalduskaod, jäätmed, utiliseerimise kulu	Selgitus
Materjali saagis (%) ehk suhteline kadu paigaldusel, (1 - jääkide %)	Andmebaas, algoritm
Puhas paigaldatud materjali kogus m ³	Andmebaas, algoritm
Materjali otsesed jäägid, m ³	Andmebaas, algoritm
Jääke ja jäätmeid kasutatud materjalikoguse m ³ kohta	Andmebaas, algoritm
Utiliseeritavate paigaldusjäätmete osakaal materjali m ³ kohta	Andmebaas, algoritm
Jäätmete (pakendid, paigaldusmaterjalid, paigaldustarvikud) kogus m ³	Andmebaas, algoritm
Jääkide ja jäätmete kogus kokku, m ³	Andmebaas, algoritm
Jääkide ja jäätmete utiliseerimise maksumus, €/m ³	Andmebaas, algoritm
Jääkide utiliseerimise kulu, €	Andmebaas, algoritm
D - Materjali sisendenergia (tootmisel tekitatud saaste)	Selgitus
Materjali energiasisaldus (valmistamiseks kasutatud energia), MJ/kg	Andmebaas
Materjali energiasisaldus (valmistamiseks kasutatud energia), MJ/m ³	Andmebaas, algoritm
Energia konversioonikoefitsient (MJ->kWh)	Konstant
Ühe m ³ materjali tootmiseks kulutatud energia, kWh	Andmebaas, algoritm
Materjali päritolumaa energiatootmise saastefaktor (kgCO ₂ e per kWh)	Andmebaas
Ühe kg materjali tootmisel õhku paisatud CO ₂ kogus, kg	Andmebaas, algoritm
Materjali tootmisel õhku paisatud CO ₂ maksumus, €/m ³	Andmebaas, algoritm
CO ₂ saastekoodi maksumus (EAU), €/t	Andmebaas
Arvestulik CO ₂ saastekoodi maksumus materjalikoguse tootmisel, €	Andmebaas, algoritm
E - Materjali keskkonnaskoor (skaalal 1-5)	Selgitus
Tooraine päritolu	Andmebaas, algoritm
Materjali päritolumaa (tootmismaa)	Valik, andmebaas
Materjali ja jääkide taaskasutatavus	Andmebaas, algoritm
Jäätmete (pakendid, paigaldustarvikud) klassifikatsioon	Andmebaas, algoritm

Lisa 3 Soojustusmaterjalide nimekiri

Nr Materjali nimetus	Toote-kategooria	Materjali tüüp	Tootmis-maa	Soojuseri-juhtivus λ	Materjali paksus mm	Mahu-mass kg/m3	Materjali hind €/m2
1 Tenapors Tenax 100	Plaat	EPS	Läti	0,0360	50	20	1,67
2 Reiden Therm 100	Plaat	EPS	Eesti	0,0340	50	18	3,08
3 Balpol E-100N	Plaat	EPS	Leedu	0,0310	50	21	3,08
4 Styrofoam 300	Plaat	EPS	Šveits	0,0330	20	22	4,30
5 EstPlast MINI EPS50	Plaat	EPS	Eesti	0,0420	50	13	3,38
6 Styrofoam 250SL-A 50	Plaat	EPS	Šveits	0,0330	50	32	7,90
7 Penoplex Base 150kPA 30	Plaat	EPS	Tšehhi	0,0330	30	19	2,34
8 Tenapors Neo Pluss 100	Plaat	EPS	Läti	0,0320	50	20	3,32
9 Estplast E60 Fassaad	Plaat	EPS	Eesti	0,0400	50	20	2,12
10 Reiden E60 Fassaad	Plaat	EPS	Eesti	0,0390	50	20	2,33
11 Balpol E-100	Plaat	EPS	Leedu	0,0350	50	22	2,84
12 Tenax Tenapors 60 FPP	Plaat	EPS	Läti	0,0370	50	19	3,11
13 EstPlast Perimeter Plus 120	Plaat	EPS	Eesti	0,0340	50	22	3,33
14 Arbet Fundamentowy Hydroplan	Plaat	EPS	Poola	0,0360	100	20	1,83
15 Yetico Fundamentowy AQUA	Plaat	EPS	Poola	0,0360	100	21	1,57
16 Termo Organica EPS100	Plaat	EPS	Poola	0,0310	100	23	1,86
17 Reiden Therm Granule	Graanul	EPS	Eesti	0,0360	100	18	1,20
18 Balpol Granule	Graanul	EPS	Leedu	0,0370	100	16	1,15
19 Cellofoam High Density EPS	Plaat	EPS	USA	0,0380	50	38	6,25
20 Reiden E60 Silver	Plaat	EPS	Eesti	0,0320	50	22	5,65
21 Kore E Grey	Plaat	EPS	Iirimaa	0,0310	50	26	6,15
22 JabaLite PIB 100	Plaat	EPS	Suurbritannia	0,0360	50	20	7,05
23 Styropoz Grey Polystyrene	Plaat	EPS	Poola	0,0310	10	15	1,37
24 Kay-Metzeler EPS 50S	Plaat	EPS	Suurbritannia	0,0370	50	19	5,30
25 Jablite Claymaster A10	Plaat	EPS	Suurbritannia	0,0350	50	11	8,26
26 Technonicol Carbon Prof	Plaat	XPS	Tsehhi	0,0340	50	38	5,23
27 Finnofoam FL300PX	Plaat	XPS	Soome	0,0350	50	33	5,11
28 Styrofoam Dow 300	Plaat	XPS	Šveits	0,0330	50	71	5,43
29 Styrofoam 300 PL-A-N	Plaat	XPS	Soome	0,0330	20	30	4,30
30 Finnofoam FL 300	Plaat	XPS	Soome	0,0350	50	29	6,06
31 Kingspan Styrozone XPS	Plaat	XPS	Iirimaa	0,0290	50	28	3,20
32 Kurtin Foam XPS	Plaat	XPS	Hiina	0,0310	40	30	3,70
33 Saviro XPS Blue Board	Plaat	XPS	Prantsusmaa	0,0280	50	32	23,12
34 Polyfoam ECO	Plaat	XPS	Suurbritannia	0,0330	50	28	9,05
35 Polyfoam Super Grade	Plaat	XPS	Suurbritannia	0,0340	50	38	7,16
36 Sundolitt XPS300	Plaat	XPS	Suurbritannia	0,0340	30	33	7,12
37 Kingspan GreenGuard GG500	Plaat	XPS	Holland	0,0340	50	35	15,42
38 Knauf TP115	Plaatvill	GW	Saksamaa	0,0370	50	27	1,84
39 Isover KL33	Plaatvill	GW	Soome	0,0350	50	37	3,15
40 Knauf TP116	Rullvill	GW	Saksamaa	0,0370	50	27	1,60
41 Isover Standart 40	Rullvill	GW	Soome	0,0400	50	36	1,40
42 Isover KL 37	Plaatvill	GW	Soome	0,0370	100	36	3,91
43 Ursa Granulo 38	Puistevill	GW	Hispaania	0,0380	100	40	1,19
44 Ursa KL37	Plaatvill	GW	Hispaania	0,0370	30	51	1,20
45 Isover KL-AKU	Plaatvill	GW	Soome	0,0400	50	38	2,31
46 Kanuf Space Slab 035	Plaatvill	GW	Suurbritannia	0,0350	50	40	3,37
47 Ursa Lambda 37	Plaatvill	GW	Soome	0,0370	50	38	3,19
48 Rockwool Frontrock	Plaatvill	GW	Venemaa	0,0360	50	40	3,88
49 Isover KL 33	Plaatvill	GW	Soome	0,0330	50	22	5,88
50 Paroc Pro Slab 40	Rullvill	GW	Soome	0,0400	50	11	1,87
51 Knauf Ekoboard	Plaatvill	GW	Saksamaa	0,0390	50	32	6,51
52 Climowool TW1-E	Plaatvill	GW	Saksamaa	0,0370	50	28	1,02
53 Rotaflex TP 01	Plaatvill	GW	Tsehhi	0,0390	50	29	3,94
54 Superglass Euro 39	Rullvill	GW	Suurbritannia	0,0390	50	32	3,14
55 Therm Basic	Puistevill	GW	Eesti	0,0400	100	15	2,00
56 Rockwool RollBatt Loft	Rullvill	SW	Taani	0,0440	100	22	7,37
57 Rockwool Cavity Insulation Batt	Plaat	SW	Taani	0,0370	50	38	4,67
58 Paroc 565-Extra-50	Plaatvill	SW	Soome	0,0360	50	45	1,85
59 Rockwool Superrock	Plaatvill	SW	Soome	0,0350	50	38	1,89
60 Paroc Extra	Plaatvill	SW	Soome	0,0360	50	36	6,57
61 Rohhe Flow A Alu	Rullvill	SW	Poola	0,0380	50	40	6,30
62 Isorock Isofas	Plaatvill	SW	Poola	0,0360	50	100	14,90
63 Paroc Extra Stone	Plaatvill	SW	Venemaa	0,0420	50	48	2,33
64 Rockwpll Rockslab Sonic	Plaatvill	SW	Soome	0,0360	50	53	2,71
65 Rockwool Slab HTG	Plaatvill	SW	Venemaa	0,0350	50	38	3,20
66 Paroc Extra	Plaatvill	SW	Soome	0,0360	50	28	4,01
67 Isorock Album	Plaatvill	SW	Poola	0,0360	50	90	2,54
68 Petralana Petrafas Rock	Plaatvill	SW	Poola	0,0350	50	30	2,63
69 Rockwool Frontrock Plus	Plaatvill	SW	Venemaa	0,0360	60	39	4,41
70 Knauf Earthwool RS60	Plaat	SW	Saksamaa	0,0350	50	60	7,34

Nr	Materjali nimetus	Toote-kategooria	Materjali tüüp	Tootmis-maa	Soojuseri-juhtivus λ	Materjali paksus mm	Mahu-mass kg/m3	Materjali hind €/m2
71	Recticel Eurothane G 30-10	Plaat	PIR	Belgia	0,0220	30	30	15,00
72	Recticel Eurothane EWall 50	Plaat	PIR	Belgia	0,0220	50	30	8,45
73	Kingspan Therma TW56 Anselmi	Plaat	PIR	Soome	0,0230	40	35	12,44
74	Finnfoam FF-PIR	Plaat	PIR	Soome	0,0220	30	50	8,23
75	Recticel Eurothane Ewall	Plaat	PIR	Saksamaa	0,0220	30	38	7,29
76	Unilin Utherm KD	Plaat	PIR	Belgia	0,0230	50	32	8,61
77	Kingspan PalDuct	Plaat	PIR	Iirimaa	0,0200	30	43	9,40
78	Eurothane G 30mm+10 kips	Plaat	PIR	Suurbritannia	0,0220	40	22	18,47
79	Recticel Eurothan Silver	Plaat	PIR	Suurbritannia	0,0220	100	31	17,28
80	Emimar Eurowall	Plaat	PIR	Läti	0,0220	100	41	6,19
81	Celotex GA4000	Plaat	PIR	Suurbritannia	0,0230	50	31	7,71
82	Kingspan Therमारooft TR31	Plaat	PIR	Iirimaa	0,0220	56	32	22,33
83	Kingspan Thermwall TW55	Plaat	PIR	Holland	0,0200	40	32	8,42
84	Celotex GA4000	Plaat	PIR	Suurbritannia	0,0230	50	31	7,70
85	Xtratherm Thin-R XT/CW	Plaat	PIR	Iirimaa	0,0220	35	30	9,68
86	Kingspan GreenGuard GG500	Plaat	PIR	Holland	0,0220	56	32	25,23
87	Kingspan GreenGuard GG500	Plaat	PIR	Holland	0,0220	37,5	28	23,52
88	Celotex CG5000	Plaat	PIR	Suurbritannia	0,0210	50	36	15,16
89	Therm PUR-F	Vaht	PUR	Eesti	0,0400	50	12	8,10
90	Kingspan Therma	Plaat	PUR	Holland	0,0220	50	30	11,77
91	Recticel Eurowall	Plaat	PUR	Suurbritannia	0,0200	30	31	7,92
92	Kingspan Kooltherm K12	Plaat	PUR	Holland	0,0230	50	31	17,26
93	Ewonawool	Plaat	Polüester	Soome	0,0400	50	19	9,41
94	Actis HControl Hybrid Multi-Foil	Plaat	Polüester	Prantsusmaa	0,0240	45	20	9,72
95	Kingspan OPTIM-R	Plaat	VIP	Holland	0,0070	50	180	25,91
96	Tradematt Aerogel Fiber	Matt	Komposiit	Hiina	0,0160	50	200	14,91
97	Tradematt Aerogel Ceramic	Matt	Komposiit	Hiina	0,0160	50	220	28,80
98	Aerogel Porogel Spaceloft M	Matt	Komposiit	USA	0,0160	15	18	34,01
99	Thermo Hanf Premium Plus	Plaat	Kanep	Saksamaa	0,0396	50	37	9,44
100	Thermo Hemp Premium	Plaat	Kanep	Saksamaa	0,0396	50	37	3,87
101	Thermo Natur Combi	Plaat	Kanep	Saksamaa	0,0400	50	36	4,14
102	Black Mount NatuHemp insulation	Plaat	Kanep	Suurbritannia	0,0390	100	30	8,50
103	Thermafleece NatraHemp	Rullvill	Kanep	Suurbritannia	0,0400	50	26	7,57
104	ThermaFleece NatraHemp Flex	Rullvill	Kanep	Suurbritannia	0,0400	50	26	7,64
105	Corkoco	Plaat	Kork	Portugal	0,0430	40	120	23,52
106	Amorim K50-E	Plaat	Kork	Portugal	0,0370	50	120	29,30
107	VersaCork Industrial	Plaat	Kork	Saksamaa	0,0370	30	105	21,42
108	Ty-Mawr EcoCork	Plaat	Kork	Suurbritannia	0,0400	100	100	37,27
109	Sheepwool Comfort	Plaat	Lambavill	Iirimaa	0,0420	100	14	17,70
110	Isolena Optimal SD OPI	Rullvill	Lambavill	Austria	0,0380	50	18	8,57
111	Sheepwool Insulation Comfort Rolls	Rullvill	Lambavill	Iirimaa	0,0420	100	14	14,76
112	Sheepwool Insulation Premium Rolls	Rullvill	Lambavill	Iirimaa	0,0369	100	20	19,74
113	Thermafleece Cosy Wool Slabs	Rullvill	Lambavill	Suurbritannia	0,0380	50	22	7,64
114	ThermaFleece UltraWool Flex	Rullvill	Lambavill	Suurbritannia	0,0350	50	31	9,85
115	Isolina ISO-L	Plaat	Lina	Soome	0,0380	50	25	6,54
116	Ytong Multopor	Plaat	Mineraalid	Saksamaa	0,0450	25	115	11,85
117	Rooplaat	Plaat	Pilliroog	Eesti	0,0550	50	225	8,34
118	SteicoFlex	Plaat	Puit	Poola	0,0380	50	62	5,01
119	EkovillaLevy	Plaatvill	Puit	Soome	0,0409	50	29	6,11
120	Tselluvill Werrowool	Puistevill	Puit	Eesti	0,0390	50	35	4,95
121	Thermofloc Loose Fill Cellulose	Puistevill	Puit	Saksamaa	0,0390	100	40	4,25
122	Ekorema Ekovata	Puistevill	Puit	Läti	0,0390	100	58	4,84
123	Schneider FIBRE Air	Puistevill	Puit	Saksamaa	0,0410	50	35	2,45
124	Steico Zell	Puistevill	Puit	Saksamaa	0,0400	100	40	4,92
125	Tselluvill Werrowool Slab	Plaat	Puit	Eesti	0,0390	50	30	5,07
126	Steico Flex 036	Plaat	Puit	Saksamaa	0,0360	100	60	9,05
127	Hunton Flex	Plaat	Puit	Saksamaa	0,0380	50	50	7,19
128	Steico Flex	Plaatvill	Puit	Prantsusmaa	0,0400	50	50	7,19
129	Steico Isorel	Plaat	Puit	Prantsusmaa	0,0380	40	160	9,83
130	PAVATHERM Woodfiber	Plaat	Puit	Saksamaa	0,0380	60	110	9,45
131	Schneider FLEX 50	Plaat	Puit	Saksamaa	0,0370	50	50	7,25
132	Steico Protect DRY	Plaat	Puit	Suurbritannia	0,0410	60	160	20,87
133	Stropoly TEC	Plaat	Põhk	Saksamaa	0,0500	120	200	20,00
134	Ecopanely Straw 58	Plaat	Põhk	Tsehhi	0,0990	38	250	15,00
135	UltraTouch	Plaatvill	Tekstiil	USA	0,0250	89	24	9,70
136	Konto Wave	Plaat	Turvas	Soome	0,0370	50	23	14,41

Lisa 4 Riikide energiatootmise emissioonifaktorid 2019

Country	CO2 emission intensity (kg/kWh)	Country	CO2 emission intensity (kg/kWh)	Country	CO2 emission intensity (kg/kWh)
Afganistan	0,4930	Iraak	0,8206	Poola	0,8460
Albaania	0,0091	Iraan	0,6311	Portugal	0,3070
Alžeeria	0,6642	Island	0,0000	Prantsusmaa	0,0470
Ameerika Ühendriigid	0,4759	Itaalia	0,3270	Põhja-Korea	0,4953
Andorra	0,4963	Jaapan	0,4916	Põhja-Makedoonia	0,5123
Angola	0,0379	Jamaica	0,4109	Roheneemesaared	0,4225
Antigua ja Barbuda	0,5897	Jeemen	0,7961	Rootsi	0,0120
Araabia Ühendemiraadid	0,4333	Jordaania	0,7122	Rumeenia	0,4010
Argentina	0,3583	Kambodža	1,1708	Rwanda	0,4725
Armeenia	0,1282	Kamerun	0,2165	Saalomoni Saared	0,2453
Aserbaidžaan	0,3918	Kanada	0,1300	Saint Kitts ja Nevis	0,4291
Austraalia	0,8000	Kasahstan	1,0211	Saint Lucia	0,4723
Austria	0,1420	Katar	0,8823	Saint Vincent & Gren	0,5478
Bahama	0,4083	Keenia	0,3675	Saksamaa	0,4690
Bahrein	0,7268	Kesk-Aafrika Vabariik	0,8921	Sambia	0,5211
Bangladesh	0,6371	Kiribati	0,2312	Samoa	0,5021
Barbados	0,7023	Komoorid	0,3762	San Marino	0,4891
Belau	0,6023	Kongo DV	0,1202	São Tomé ja Príncipe	0,7826
Belgia	0,1670	Kongo Vabariik	0,0042	Saudi Araabia	0,7176
Belize	0,6903	Kreeka	0,5670	Seišellid	0,2817
Benin	0,7007	Kuuba	0,9380	Senegal	0,0634
Bhutan	0,6729	Kuveit	0,7263	Serbia	0,1643
Birma	0,8034	Körgözstan	0,6702	Sierra Leone	0,6312
Boliivia	0,5349	Küpros	0,6390	Singapur	0,0355
Bosnia ja Hertsegoviina	1,3262	Laos	0,5931	Slovakkia	0,1690
Botswana	1,8256	Leedu	0,3620	Sloveenia	0,3350
Brasiilia	0,0927	Lesotho	0,5261	Somaalia	0,8712
Brunei	0,7371	Libeeria	0,5342	Soome	0,1430
Bulgaaria	0,4700	Liechtenstein	0,1982	Sri Lanka	0,0443
Burkina Faso	0,8701	Liibanon	0,6328	Sudaan	0,6149
Burundi	0,8732	Liibüa	0,5313	Suriname	0,6221
Colombia	0,1114	Luksemburg	0,2010	Suurbritannia	0,2773
Costa Rica	0,0067	Lõuna-Aafrika Vabariik	0,9606	Svaasimaa	0,6424
Djibouti	0,8413	Lõuna-Korea	0,5170	Süüria	0,0678
Dominica	0,5902	Lõuna-Sudaan	0,4871	Šveits	0,0140
Dominikaani Vabariik	0,6417	Läti	0,3130	Zimbabwe	0,0637
Ecuador	0,2696	Madagaskar	0,3043	Taani	0,2090
Eesti	0,8750	Malaisia	0,3741	Tadžikistan	0,0232
Egiptus	0,5008	Malawi	0,4871	Tai	0,6267
Ekvatoriaal-Guinea	0,7843	Maldiivid	0,4266	Tansaania	0,2667
El Salvador	0,2561	Mali	0,5632	Togo	0,2072
Elevandiluurannik	0,7806	Malta	0,7610	Tonga	0,5683
Eritrea	0,6779	Maroko	0,3742	Trinidad ja Tobago	0,7667
Etiopia	0,1189	Marshalli Saared	0,3023	Tšaad	0,5427
Fidži	0,2031	Mauritaania	0,4875	Tšehhi	0,5760
Filipiinid	0,3402	Mauritius	0,5211	Tšiili	0,0434
Gabon	0,4252	Mehhiko	0,4640	Tuneesia	0,5721
Gambia	0,5093	Mikroneesia	0,2112	Tuvalu	0,5173
Ghana	0,2147	Moldova	0,5242	Türgi	0,5434
Grenada	0,4093	Monaco	0,5238	Türkmenistan	0,6446
Gruusia	0,0894	Mongoolia	0,5723	Uganda	0,6416
Guatemala	0,3415	Montenegro	0,5843	Ukraina	0,5631
Guinea	0,5261	Mosambiik	0,6324	Ungari	0,3140
Guinea-Bissau	0,5263	Namiibia	0,6149	Uruguay	0,3037
Guyana	1,0343	Nauru	0,5382	Usbekistan	0,5674
Haiti	0,5346	Nepal	0,2313	Uus-Meremaa	0,0977
Hiina	0,6236	Nicaragua	0,4524	Valgevene	0,6109
Hispaania	0,2880	Nigeeria	0,4001	Vanuatu	0,5229
Holland	0,4570	Niger	0,3924	Vatikan	0,1832
Honduras	0,7093	Norra	0,0110	Venemaa	0,3302
Horvaatia	0,4170	Omaan	0,5294	Venezuela	0,2081
Ida-Timor	0,6024	Paapua Uus-Guinea	0,4313	Vietnam	0,4668
Iirimaa	0,3930	Pakistan	0,4734		
Iisrael	0,7403	Panama	0,2768		
India	0,7429	Paraguay	0,2231		
Indoneesia	0,7551	Peruu	0,2377		

2019 Grid Electricity Emissions Factors
June 2019 v1.0
www.carbonfootprint.com

Lisa 5 Saastekvoodi (EAU) börsihind 2015 - 2020

Date	Price	Date	Price	Date	Price	Date	Price
04.05.2020 00:00	19,15	21.01.2019 00:00	24,31	09.10.2017 00:00	7,29	27.06.2016 00:00	4,61
27.04.2020 00:00	19,77	14.01.2019 00:00	23,27	02.10.2017 00:00	6,95	20.06.2016 00:00	5,53
20.04.2020 00:00	20,65	07.01.2019 00:00	22,24	25.09.2017 00:00	7,04	13.06.2016 00:00	5,79
13.04.2020 00:00	20,47	31.12.2018 00:00	24,10	18.09.2017 00:00	6,77	06.06.2016 00:00	6,08
06.04.2020 00:00	20,68	24.12.2018 00:00	24,81	11.09.2017 00:00	6,97	30.05.2016 00:00	6,01
30.03.2020 00:00	17,45	17.12.2018 00:00	24,34	04.09.2017 00:00	6,61	23.05.2016 00:00	5,88
23.03.2020 00:00	16,61	10.12.2018 00:00	21,64	28.08.2017 00:00	5,98	16.05.2016 00:00	6,02
16.03.2020 00:00	17,05	03.12.2018 00:00	20,26	21.08.2017 00:00	5,89	09.05.2016 00:00	5,85
09.03.2020 00:00	23,12	26.11.2018 00:00	19,85	14.08.2017 00:00	5,69	02.05.2016 00:00	6,05
02.03.2020 00:00	23,56	19.11.2018 00:00	20,00	07.08.2017 00:00	5,32	25.04.2016 00:00	6,37
24.02.2020 00:00	24,00	12.11.2018 00:00	19,70	31.07.2017 00:00	5,34	18.04.2016 00:00	5,65
17.02.2020 00:00	25,38	05.11.2018 00:00	18,50	24.07.2017 00:00	5,16	11.04.2016 00:00	5,55
10.02.2020 00:00	23,76	29.10.2018 00:00	16,35	17.07.2017 00:00	5,33	04.04.2016 00:00	5,31
03.02.2020 00:00	23,38	22.10.2018 00:00	19,04	10.07.2017 00:00	5,39	28.03.2016 00:00	4,98
27.01.2020 00:00	24,10	15.10.2018 00:00	19,32	03.07.2017 00:00	5,17	21.03.2016 00:00	4,82
20.01.2020 00:00	24,77	08.10.2018 00:00	20,49	26.06.2017 00:00	4,94	14.03.2016 00:00	4,91
13.01.2020 00:00	24,48	01.10.2018 00:00	21,41	19.06.2017 00:00	4,89	07.03.2016 00:00	5,01
06.01.2020 00:00	24,26	24.09.2018 00:00	21,19	12.06.2017 00:00	4,93	29.02.2016 00:00	4,95
30.12.2019 00:00	24,67	17.09.2018 00:00	21,32	05.06.2017 00:00	5,02	22.02.2016 00:00	5,05
23.12.2019 00:00	26,24	10.09.2018 00:00	22,21	29.05.2017 00:00	5,11	15.02.2016 00:00	4,99
16.12.2019 00:00	26,12	03.09.2018 00:00	21,05	22.05.2017 00:00	4,95	08.02.2016 00:00	4,97
09.12.2019 00:00	24,73	27.08.2018 00:00	21,03	15.05.2017 00:00	4,62	01.02.2016 00:00	5,65
02.12.2019 00:00	24,54	20.08.2018 00:00	19,71	08.05.2017 00:00	4,43	25.01.2016 00:00	6,00
25.11.2019 00:00	24,83	13.08.2018 00:00	18,07	01.05.2017 00:00	4,49	18.01.2016 00:00	6,48
18.11.2019 00:00	23,88	06.08.2018 00:00	17,57	24.04.2017 00:00	4,56	11.01.2016 00:00	7,06
11.11.2019 00:00	24,25	30.07.2018 00:00	17,49	17.04.2017 00:00	4,78	04.01.2016 00:00	7,77
04.11.2019 00:00	25,14	23.07.2018 00:00	17,24	10.04.2017 00:00	4,88	28.12.2015 00:00	8,28
28.10.2019 00:00	25,49	16.07.2018 00:00	16,46	03.04.2017 00:00	4,85	21.12.2015 00:00	8,24
21.10.2019 00:00	25,35	09.07.2018 00:00	16,09	27.03.2017 00:00	4,74	14.12.2015 00:00	8,13
14.10.2019 00:00	25,62	02.07.2018 00:00	15,40	20.03.2017 00:00	4,92	07.12.2015 00:00	8,33
07.10.2019 00:00	23,26	25.06.2018 00:00	15,05	13.03.2017 00:00	5,14	30.11.2015 00:00	8,55
30.09.2019 00:00	24,03	18.06.2018 00:00	14,62	06.03.2017 00:00	5,27	23.11.2015 00:00	8,60
23.09.2019 00:00	25,48	11.06.2018 00:00	15,05	27.02.2017 00:00	5,47	16.11.2015 00:00	8,57
16.09.2019 00:00	26,22	04.06.2018 00:00	15,90	20.02.2017 00:00	5,18	09.11.2015 00:00	8,39
09.09.2019 00:00	26,16	28.05.2018 00:00	15,70	13.02.2017 00:00	5,00	02.11.2015 00:00	8,47
02.09.2019 00:00	25,31	21.05.2018 00:00	15,93	06.02.2017 00:00	5,17	26.10.2015 00:00	8,63
26.08.2019 00:00	26,00	14.05.2018 00:00	14,91	30.01.2017 00:00	5,23	19.10.2015 00:00	8,48
19.08.2019 00:00	25,91	07.05.2018 00:00	14,05	23.01.2017 00:00	5,09	12.10.2015 00:00	8,38
12.08.2019 00:00	26,51	30.04.2018 00:00	13,16	16.01.2017 00:00	5,03	05.10.2015 00:00	8,20
05.08.2019 00:00	28,38	23.04.2018 00:00	13,24	09.01.2017 00:00	5,28	28.09.2015 00:00	8,07
29.07.2019 00:00	28,57	16.04.2018 00:00	13,59	02.01.2017 00:00	5,52	21.09.2015 00:00	8,01
22.07.2019 00:00	29,03	09.04.2018 00:00	13,50	26.12.2016 00:00	6,39	14.09.2015 00:00	8,17
15.07.2019 00:00	28,50	02.04.2018 00:00	13,02	19.12.2016 00:00	5,69	07.09.2015 00:00	8,21
08.07.2019 00:00	27,70	26.03.2018 00:00	13,21	12.12.2016 00:00	4,89	31.08.2015 00:00	8,07
01.07.2019 00:00	26,48	19.03.2018 00:00	12,01	05.12.2016 00:00	4,45	24.08.2015 00:00	8,12
24.06.2019 00:00	26,65	12.03.2018 00:00	11,18	28.11.2016 00:00	4,53	17.08.2015 00:00	8,27
17.06.2019 00:00	25,03	05.03.2018 00:00	10,72	21.11.2016 00:00	5,34	10.08.2015 00:00	8,13
10.06.2019 00:00	24,94	26.02.2018 00:00	9,98	14.11.2016 00:00	5,64	03.08.2015 00:00	7,85
03.06.2019 00:00	24,14	19.02.2018 00:00	9,72	07.11.2016 00:00	6,02	27.07.2015 00:00	7,96
27.05.2019 00:00	25,19	12.02.2018 00:00	9,59	31.10.2016 00:00	6,22	20.07.2015 00:00	7,99
20.05.2019 00:00	25,63	05.02.2018 00:00	9,02	24.10.2016 00:00	5,85	13.07.2015 00:00	7,73
13.05.2019 00:00	25,41	29.01.2018 00:00	9,06	17.10.2016 00:00	5,79	06.07.2015 00:00	7,47
06.05.2019 00:00	26,07	22.01.2018 00:00	9,09	10.10.2016 00:00	5,61	29.06.2015 00:00	7,43
29.04.2019 00:00	25,59	15.01.2018 00:00	8,24	03.10.2016 00:00	5,51	22.06.2015 00:00	7,50
22.04.2019 00:00	26,92	08.01.2018 00:00	7,78	26.09.2016 00:00	4,80	15.06.2015 00:00	7,45
15.04.2019 00:00	26,96	01.01.2018 00:00	7,78	19.09.2016 00:00	4,35	08.06.2015 00:00	7,54
08.04.2019 00:00	25,90	25.12.2017 00:00	8,16	12.09.2016 00:00	4,11	01.06.2015 00:00	7,39
01.04.2019 00:00	23,15	18.12.2017 00:00	7,78	05.09.2016 00:00	4,05	25.05.2015 00:00	7,25
25.03.2019 00:00	21,53	11.12.2017 00:00	7,14	29.08.2016 00:00	4,43	18.05.2015 00:00	7,38
18.03.2019 00:00	21,13	04.12.2017 00:00	7,35	22.08.2016 00:00	4,72	11.05.2015 00:00	7,60
11.03.2019 00:00	22,31	27.11.2017 00:00	7,64	15.08.2016 00:00	4,68	04.05.2015 00:00	7,52
04.03.2019 00:00	22,80	20.11.2017 00:00	7,53	08.08.2016 00:00	4,87	27.04.2015 00:00	7,37
25.02.2019 00:00	20,73	13.11.2017 00:00	7,48	01.08.2016 00:00	4,56	20.04.2015 00:00	7,17
18.02.2019 00:00	19,59	06.11.2017 00:00	7,67	25.07.2016 00:00	4,51	13.04.2015 00:00	6,83
11.02.2019 00:00	20,73	30.10.2017 00:00	7,51	18.07.2016 00:00	4,68	06.04.2015 00:00	7,07
04.02.2019 00:00	23,02	23.10.2017 00:00	7,34	11.07.2016 00:00	4,71	30.03.2015 00:00	7,02
28.01.2019 00:00	22,56	16.10.2017 00:00	7,56	04.07.2016 00:00	4,68	23.03.2015 00:00	6,95

<https://ember-climate.org/carbon-price-viewer/>

Lisa 6 Materjalide sisendenergia kategooriate lõikes MJ/kg

Toote kategooria	Materjali tüüp	Materjal	Sisendenergia MJ/kg
Plaat	EPS	Vahtpolüstüreen	118,44
Graanul	EPS	Vahtpolüstüreen	91,52
Plaat	XPS	Vahtpolüstürool	104,99
Graanul	XPS	Vahtpolüstürool	81,13
Plaat	XPS	Ekstrusioonpolüstürool	104,50
Graanul	XPS	Ekstrusioonpolüstürool	80,75
Plaat	PIR	Polüretaan	120,12
Vaht	PIR	Polüretaan	114,66
Graanul	PIR	Polüretaan	92,82
Plaat	PIR	Polüisotsüanuraad	103,53
Vaht	PIR	Polüisotsüanuraad	98,83
Graanul	PIR	Polüisotsüanuraad	80,00
Plaat	PUR	Polüretaan	115,38
Vaht	PUR	Polüretaan	110,13
Graanul	PUR	Polüretaan	89,15
Plaat	PCB	Komposiit	132,00
Plaatvill	PCB	Komposiit	120,00
Rullvill	PCB	Komposiit	108,00
Graanul	PCB	Komposiit	102,00
Plaat	Polüester	Polüester	126,50
Plaatvill	Polüester	Polüester	115,00
Rullvill	Polüester	Polüester	103,50
Puiste	Polüester	Polüester	93,50
Plaat	GW	Mineraalne	25,78
Plaatvill	GW	Mineraalne	23,44
Rullvill	GW	Mineraalne	21,09
Puistevill	GW	Mineraalne	19,92
Plaat	SW	Mineraalne	21,48
Plaatvill	SW	Mineraalne	19,53
Rullvill	SW	Mineraalne	17,57
Puistevill	SW	Mineraalne	16,60
Plaat	Muu	Mineraalne	33,74
Pehme plaat	Muu	Mineraalne	30,67
Puiste	Muu	Mineraalne	27,60
Graanul	Muu	Mineraalne	26,07
Plaat	Kergkruus	Mineraalne	27,94
Graanul	Kergkruus	Mineraalne	21,59
Plaatvill	Tekstiil	Taimne	18,60
Rullvill	Tekstiil	Taimne	16,74
Puistevill	Tekstiil	Taimne	15,81
Plaat	Puidukiud	Puit	3,63
Pehme plaat	Puidukiud	Puit	3,30
Rullvill	Puidukiud	Puit	2,97
Puiste	Puidukiud	Puit	2,81
Pehme plaat	Telluvill	Puit	7,62
Rullvill	Telluvill	Puit	6,86
Puistevill	Telluvill	Puit	6,48
Plaat	Lina	Taimne	16,37
Pehme plaat	Lina	Taimne	14,88
Rullvill	Lina	Taimne	13,39
Puiste	Lina	Taimne	12,65
Pehme plaat	Lambavill	Loomne	11,99
Rullvill	Lambavill	Loomne	10,79
Puistevill	Lambavill	Loomne	10,19
Plaat	Kanep	Taimne	26,32
Pehme plaat	Kanep	Taimne	23,93
Rullvill	Kanep	Taimne	21,54
Puiste	Kanep	Taimne	20,34
Plaat	Põhk	Taimne	16,50
Pehme plaat	Põhk	Taimne	15,00
Rullvill	Põhk	Taimne	13,50
Puiste	Põhk	Taimne	12,75
Plaat	Pilliroog	Taimne	1,01
Pehme plaat	Pilliroog	Taimne	0,92
Rullvill	Pilliroog	Taimne	0,83
Puiste	Pilliroog	Taimne	0,78
Plaat	Turvas	Taimne	19,57
Pehme plaat	Turvas	Taimne	17,79
Rullvill	Turvas	Taimne	16,01
Puiste	Turvas	Taimne	15,12
Plaat	Kork	Taimne	5,13
Pehme plaat	Kork	Taimne	4,67
Rullvill	Kork	Taimne	4,20
Puiste	Kork	Taimne	3,97
Plaat	Kookos	Taimne	1,52
Pehme plaat	Kookos	Taimne	1,38
Rullvill	Kookos	Taimne	1,24
Puiste	Kookos	Taimne	1,17

Lisa 7 Kalkulaatori tööpõhimõtte metoodika testi tulemused

Materjali nimetus	Materjali tüüp	Materjali liik/klassifikatsioon	Tootismaa	Mahtmass (materjali tihedus) kg/m ³	Materjali soojusjuhtivus W/(mK)	Soojusisikhi paksus n väljalüsihina (R = 3,75)	Materjali R arv soojusisikstus m ² K/W	Materjali paksus mm (nõut tootepeskrikaadis)	Materjali €/m ² hind	Puhas paigaldatud materjali kogus m ³ 600 m ² soojusisikses	Vajalik materjalkogus m ³ arvestades saagise määra	Materjali kogumaksimus 600 m ²	Hind pinda m ² kohta	Materjali saagis % ehk 1 - % kadu paigaldusel	Utliseerivate jätteme osa	Jätteme (pakendit, paigaldusmaterjalid, jääkide ja jätteme kogus m ³ kokku	Jätteme utliseerimise kulu €/m ³	Jääkide utliseerimise kulu €/m ³	Materjali energiasaldus (vähimtasemeks kasutatud energia) MJ/kg	Materjali energiasaldus (vähimtasemeks kasutatud energia) MJ/m ³	Uhe m ³ materjali tootmiseks kulutatud Uhe kg materjali tootmiseks õhku paisatud CO ₂ kogus kg	Materjali tootmiseks õhku paisatud CO ₂ kogus kg	Saastekvoodi maksimus pinnal väljalüsihina koguutiseerimiseks	Keskonnaajanduslik maksimus pinnal väljalüsihina koguutiseerimiseks	Keskonnaajanduslik maksimus pinnal väljalüsihina koguutiseerimiseks	Soojuste keskkonnaajanduslik maksimus m ² kohta €	Keskonnaajanduslik maksimus pinnal väljalüsihina koguutiseerimiseks	Keskonnaajanduslik maksimus pinnal väljalüsihina koguutiseerimiseks	Töoaine päritolu	Materjali päritoluma (tootismaa)	Jätteme (pakendit, paigaldusmaterjalid)	Materjali ja jääkide taaskasutatus	Klassifikatsioon	
Tenapors NEO	Vahtpoliüstreene	Naftasaadus	Läti	20,0	0,031	0,116	3,75	50	2,71	69,25	76,73	4158	6,93	90,0%	5%	3,5	10,5	36	376,7	125	2500	695	373	4,2	326	70	8,10	16,9%	5	3	5	5	4,50	
Isover KL-ÄKKU	Klaasvilla plaat	Mineraalne	Soome	20,0	0,040	0,150	3,75	50	2,31	90,00	94,50	4366	7,28	95,0%	3%	2,7	7,2	36	259,2	50	1885	524	312	302	55	8,21	12,9%	3	3	3	3	3,00		
Paroc eXtra stone	Kivivilla plaat	Mineraalne	Venemaa	20,0	0,040	0,150	3,75	50	2,33	94,50	99,23	4624	7,71	95,0%	3%	2,8	7,6	36	272,2	22	1075	299	160	1,8	181	54	8,46	9,8%	4	4	4	4	4,00	
EPS 60 Fassaad Estiplast	Vahtpoliüstreene	Naftasaadus	Eesti	20,0	0,040	0,150	3,75	50	2,12	90,00	99,00	4198	7,00	90,0%	5%	4,4	13,5	36	486,0	125	2500	695	373	4,2	420	57	8,51	21,6%	5	2	5	4	4,25	
RocksIab	Kivivilla plaat	Mineraalne	Soome	20,0	0,036	0,135	3,75	50	2,71	81,00	85,05	4610	7,68	95,0%	3%	2,4	6,5	36	233,3	50	2629	730	392	4,5	380	64	8,70	13,3%	4	3	4	4	4,75	
EPS 60 Fassaad Reiden	Vahtpoliüstreene	Naftasaadus	Eesti	20,0	0,036	0,135	3,75	50	2,33	87,25	96,53	4498	7,50	90,0%	5%	4,4	13,2	36	473,9	125	2500	695	373	4,2	410	61	8,97	19,6%	5	2	5	4	4,25	
Rockwool Superrock	Kivivilla plaat	Mineraalne	Venemaa	20,0	0,035	0,131	3,75	50	3,20	78,75	82,69	5292	8,82	95,0%	3%	2,4	6,3	36	226,8	22	851	236	127	1,4	119	72	9,40	6,5%	4	4	4	4	4,00	
UltraTouch	Tekstiilkiudplaat	Looduslik	USA	24,1	0,025	0,094	3,75	89	8,65	56,25	57,38	5576	9,29	98%	1%	0,6	1,7	36	60,8	19	448	125	67	0,8	44	101	9,47	1,9%	2	5	3	3	3,25	
Kanuf Space Slab 035	Klaasvilla plaat	Mineraalne	Suurbritannia	39,0	0,035	0,131	3,75	50	3,37	78,75	82,69	5573	9,29	95%	3%	2,4	6,3	36	226,8	50	1959	544	292	3,3	275	77	10,12	9,0%	3	4	3	3	3,00	
Ursa Lasvilla Lamba 37	Klaasvilla plaat	Mineraalne	Soome	35,0	0,037	0,139	3,75	50	3,19	83,25	87,41	5577	9,29	95%	3%	2,5	6,7	36	239,8	50	1885	524	281	3,2	280	73	10,16	9,3%	3	3	3	3	3,00	
Rockwool Frontrock S	Klaasvilla plaat	Mineraalne	Venemaa	40,0	0,036	0,135	3,75	50	3,88	81,00	85,05	6600	11,00	95%	3%	2,4	6,5	36	233,3	50	1984	551	296	3,4	286	88	11,87	7,9%	3	4	3	3	3,00	
Paroc eXtra	Kivivilla plaat	Mineraalne	Soome	28,0	0,036	0,135	3,75	50	4,01	81,00	85,05	6621	11,37	95%	3%	2,4	6,5	36	233,3	22	627	174	94	1,1	91	88	11,91	4,7%	4	3	4	3	3,25	
Stecoflex	Puukuduplaat	Looduslik	Poola	62,2	0,038	0,143	3,75	50	5,01	85,50	87,21	8738	14,56	98%	1%	0,9	2,6	36	92,3	19	1182	328	176	2,0	175	105	15,01	3,1%	1	4	2	2	2,25	
Tsellivill Werrowool	Plaatvill	Looduslik	Soome	38,6	0,039	0,146	3,75	50	5,07	87,75	89,51	9076	15,13	98%	1%	0,9	2,6	36	94,8	5	189	58	3,3	29	105	15,33	1,4%	2	3	2	2	2,00		
Isover KL 33	Klaasvilla plaat	Mineraalne	Soome	21,5	0,033	0,124	3,75	50	5,88	74,25	77,96	9168	15,28	95%	3%	2,2	5,9	36	213,8	50	1068	297	159	1,8	141	128	15,87	3,9%	2	3	2	3	2,50	
Technonicoi Carbon Pro	Ekstrusioonpolüüstriol	Naftasaadus	Tsehh	38,0	0,034	0,128	3,75	50	5,23	76,50	84,15	8802	14,67	90%	5%	3,8	11,5	36	413,1	95	3610	1003	539	6,1	516	127	16,22	10,6%	5	4	5	5	4,75	
FINNROAM F300PX	Ekstrusioonpolüüstriol	Naftasaadus	Soome	33,2	0,035	0,131	3,75	50	5,11	78,75	86,63	8850	14,76	90%	5%	3,9	11,8	36	425,3	95	3158	877	471	5,4	464	124	16,24	10,0%	5	3	5	5	4,75	
DOW STYROFOAM 300	Ekstrusioonpolüüstriol	Naftasaadus	Switzerland	70,9	0,033	0,124	3,75	50	5,43	74,25	81,68	8870	14,78	90%	5%	3,7	11,1	36	401,0	95	6736	1871	1005	11,4	934	137	17,01	15,0%	5	4	5	5	4,75	
Isolina ISO-L	Linakuduplaat	Looduslik	Soome	59,1	0,038	0,143	3,75	50	6,54	85,50	87,21	11407	19,01	98%	1%	0,9	2,6	36	92,3	11	276	77	41	0,5	41	135	19,23	1,2%	1	3	1	1	1,50	
EkovillaLevy	Plaatvill	Looduslik	Soome	50,0	0,041	0,153	3,75	50	6,11	92,03	93,87	11463	19,10	98%	1%	0,9	2,8	36	99,4	5	289	80	43	0,5	46	126	19,35	1,3%	2	2	2	2	1,75	
Huntun Flex	Puukuduplaat	Looduslik	Saksamaa	50,0	0,038	0,143	3,75	50	7,19	85,50	87,21	12541	20,90	98%	1%	0,9	2,6	36	92,3	5	245	68	37	0,4	36	148	21,12	1,0%	1	4	2	2	2,25	
Kingspan Thermo	Põlretaanplaat (PUR)	Naftasaadus	Saksamaa	30,0	0,022	0,083	3,75	50	11,77	49,50	54,45	12818	21,36	90%	5%	2,5	7,4	36	267,3	101	3030	842	452	5,1	280	270	22,27	4,3%	5	4	5	5	4,75	
Sheepwool Comfort	pehme villiplaat	Looduslik	Irirmaa	14,0	0,042	0,158	3,75	100	17,70	94,50	96,39	17061	28,44	98%	1%	0,9	2,8	36	102,1	12	168	47	25	0,3	27	182	28,65	0,8%	1	4	1	1	1,75	
Thermo Hanf Premium	Kanepikiudplaat	Looduslik	Saksamaa	37,0	0,040	0,149	3,75	50	9,44	89,10	90,88	17159	28,60	98%	1%	0,9	2,7	36	96,2	40	1480	411	221	2,5	228	196	29,14	1,9%	1	4	1	1	1,75	
Ewotawool	Põlretavilla plaat	Naftasaadus	Soome	19,2	0,040	0,150	3,75	50	9,41	90,00	99,00	18632	31,05	90%	5%	4,5	13,5	36	486,0	130	2496	693	372	4,2	419	217	32,56	4,9%	5	3	5	5	4,50	
Stropvol TEC	Põlretavilla plaat	Looduslik	Saksamaa	300,0	0,050	0,188	3,75	120	20,00	112,50	114,75	19125	31,88	98%	1%	1,1	3,4	36	121,5	15	4500	1250	671	7,6	877	179	33,54	5,2%	5	3	5	5	4,50	
Rooplaat	Pillirooplaat	Looduslik	Eesti	225,0	0,055	0,206	3,75	50	8,34	123,75	126,23	21054	35,09	98%	1%	1,2	3,7	36	133,7	0	0	0	0	0	0	0	171	35,31	0,6%	1	2	1	1	1,25
Konto	Turba/puidukiudplaat	Looduslik	Soome	54,2	0,035	0,130	3,75	50	14,41	77,85	79,41	22885	38,14	98%	1%	0,8	2,3	36	84,1	11	585	163	87	1,0	79	296	38,41	0,7%	1	3	1	1	1,50	
Amorim K50-E	Korkplaat	Looduslik	Portugal	120,0	0,037	0,139	3,75	50	29,24	83,25	84,92	49658	82,76	98%	1%	0,8	2,5	36	89,9	1	166	46	25	0,3	24	598	82,95	0,2%	1	4	1	1	1,75	
Yong Multipor	Mineraalsoojusplaat	Mineraalne	Saksamaa	115,0	0,045	0,169	3,75	25	11,85	101,25	106,31	50392	83,99	95%	3%	3,0	8,1	36	291,6	53	6095	1693	909	10,3	1100	511	86,31	2,8%	3	4	3	3	3,50	
Corkoco	Komposiitplaat	Looduslik	Portugal	100,0	0,043	0,161	3,75	40	23,52	96,75	98,69	58027	96,71	98%	1%	1,0	2,9	36	104,5	1	138	38	21	0,2	23	601	96,92	0,2%	1	4	1	1	1,75	
Ecopanely	Põhuplaad	Looduslik	Tsehh	250,0	0,099	0,371	3,75	38	115,00	222,75	227,21	89686	149,48	98%	1%	1,2	6,7	36	240,6	15	3750	1042	559	6,4	1446	410	152,29	1,9%	1	4	1	1	1,75	





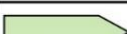
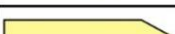




Lisa 8 Kalkulaatori testimise tulemused

		A	B	C
A - EPS B - EPS C - EPS	Materjali nimetus	Tenapors Tenax 100	Styrofoam 300	Penoplex Base 150PA 30
	Materjali tüüp	EPS	EPS	EPS
	Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaat
	Soojuserijuhtivus λ	0,036	0,033	0,033
	Tootmismaa	Läti	Šveits	Tšehhi
	Materjalihind, €/m ²	1,67	4,3	2,34
	Materjali paksus, mm	50	50	30
	Materjali mahumass, kg/m ³	20	22	19
	Keskkonnaindeks	1,81	2,59	2,55
		A	B	C
A - EPS B - EPS C - EPS	Materjali nimetus	Balpol E-100	Reiden Therm 100	Tenapors Neo Pluss 100
	Materjali tüüp	EPS	EPS	EPS
	Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaat
	Soojuserijuhtivus λ	0,035	0,034	0,032
	Tootmismaa	Leedu	Eesti	Läti
	Materjalihind, €/m ²	2,84	3,08	3,32
	Materjali paksus, mm	50	50	50
	Materjali mahumass, kg/m ³	22	18	20
	Keskkonnaindeks	1,85	1,94	1,81
		A	B	C
A - GW B - GW C - GW	Materjali nimetus	Knauf TP115	Isover KL33	Ursa KL37
	Materjali tüüp	GW	GW	GW
	Materjali liik	Plaatvill	Plaatvill	Plaatvill
	Soojuserijuhtivus λ	0,037	0,035	0,037
	Tootmismaa	Saksamaa	Soome	Hispaania
	Materjalihind, €/m ²	1,84	3,15	1,20
	Materjali paksus, mm	50	50	30
	Materjali mahumass, kg/m ³	27	37	51
	Keskkonnaindeks	1,50	1,99	1,56
		A	B	C
A - Komposiit B - VIP C - Polüester	Materjali nimetus	Aerogel Porogel Spaceloft	Kingspan OPTIM-R	Actis HControl Hybrid
	Materjali tüüp	Komposiit	VIP	Polüester
	Materjali liik	Matt	Plaat	Plaat
	Soojuserijuhtivus λ	0,016	0,007	0,024
	Tootmismaa	USA	Holland	Prantsusmaa
	Materjalihind, €/m ²	34,01	25,91	9,72
	Materjali paksus, mm	15	50	45
	Materjali mahumass, kg/m ³	18	180	20
	Keskkonnaindeks	7,15	2,10	1,13
		A	B	C
A - GW B - EPS C - EPS	Materjali nimetus	Kanuf Space Slab 035	Balpol E-100	Reiden Therm 100
	Materjali tüüp	GW	EPS	EPS
	Materjali liik	Plaatvill	Plaat	Plaat
	Soojuserijuhtivus λ	0,035	0,035	0,034
	Tootmismaa	Saksamaa	Leedu	Eesti
	Materjalihind, €/m ²	3,37	2,84	3,08
	Materjali paksus, mm	50	50	50
	Materjali mahumass, kg/m ³	40	22	18
	Keskkonnaindeks	1,59	1,81	1,90
		A	B	C
A - SW B - SW C - SW	Materjali nimetus	Rockwool Superrock	Paroc Extra Stone	Knauf Earthwool RS60
	Materjali tüüp	SW	SW	SW
	Materjali liik	Plaatvill	Plaatvill	Plaatvill
	Soojuserijuhtivus λ	0,0350	0,0420	0,0350
	Tootmismaa	Soome	Venemaa	Saksamaa
	Materjalihind, €/m ²	1,89	2,33	7,34
	Materjali paksus, mm	50	50	50
	Materjali mahumass, kg/m ³	38	48	60
	Keskkonnaindeks	1,56	2,03	4,01

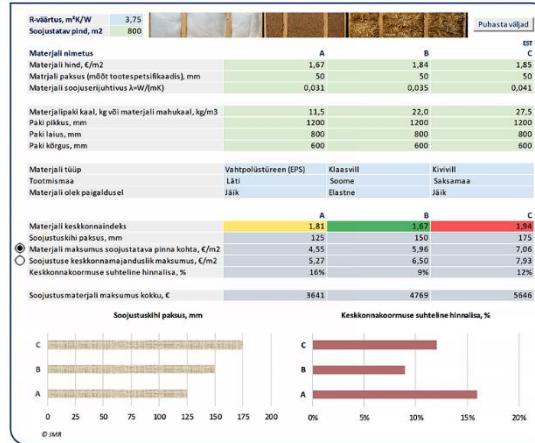
		A	B	C
A - XPS B - XPS C - XPS	Materjali nimetus	Polyfoam Super Grade	Technonicol Carbon Prof	Kingspan Styrozone XPS
	Materjali tüüp	XPS	XPS	XPS
	Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaat
	Soojuserijuhtivus λ	0,0340	0,0340	0,0290
	Tootmismaa	Suurbritannia	Tšehhi	Iirimaa
	Materjalihind, €/m2	7,16	5,23	3,20
	Materjali paksus, mm	50	50	50
	Materjali mahumass, kg/m3	38	38	28
	Keskkonnaindeks	3,05	2,60	1,88
		A	B	C
A - PUR B - PUR C - PUR	Materjali nimetus	Kingspan Therma	Recticel Eurowall	Kingspan Kooltherm K12
	Materjali tüüp	PUR	PUR	PUR
	Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaat
	Soojuserijuhtivus λ	0,0220	0,0200	0,0230
	Tootmismaa	Holland	Suurbritannia	Holland
	Materjalihind, €/m2	11,77	7,92	17,26
	Materjali paksus, mm	50	30	50
	Materjali mahumass, kg/m3	30	31	31
	Keskkonnaindeks	2,03	1,88	2,43
		A	B	C
A - PIR B - PIR C - PIR	Materjali nimetus	Celotex GA4000	Finnfoam FF-PIR	Unilin Utherm KD
	Materjali tüüp	PIR	PIR	PIR
	Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaat
	Soojuserijuhtivus λ	0,0230	0,0220	0,0230
	Tootmismaa	Suurbritannia	Soome	Beliga
	Materjalihind, €/m2	7,70	8,23	8,61
	Materjali paksus, mm	50	30	50
	Materjali mahumass, kg/m3	31	50	32
	Keskkonnaindeks	1,88	2,44	1,96
		A	B	C
A - EPS B - GW C - SW	Materjali nimetus	Balpol E-100	Rotaflex TP 01	Rockwool Cavity Insulation
	Materjali tüüp	EPS	GW	SW
	Materjali liik	Plaat	Plaatvill	Plaat
	Soojuserijuhtivus λ	0,0350	0,0390	0,0370
	Tootmismaa	Leedu	Tšehhi	Taani
	Materjalihind, €/m2	2,84	3,94	4,67
	Materjali paksus, mm	50	50	50
	Materjali mahumass, kg/m3	22	29	38
	Keskkonnaindeks	1,81	1,72	2,32
		A	B	C
A - Komposiit B - VIP C - Polüester	Materjali nimetus	Aerogel Porogel Spaceloft M	Kingspan OPTIM-R	Actis HControl Hybrid
	Materjali tüüp	Komposiit	VIP	Polüester
	Materjali liik	Matt	Plaat	Plaat
	Soojuserijuhtivus λ	0,016	0,007	0,024
	Tootmismaa	USA	Holland	Prantsusmaa
	Materjalihind, €/m2	34,01	25,91	9,72
	Materjali paksus, mm	25	50	45
	Materjali mahumass, kg/m3	15	180	20
	Keskkonnaindeks	4,74	2,06	1,88
		A	B	C
A - EPS B - PIR C - XPS	Materjali nimetus	Styrofoam 250SL-A 50	Emimar Eurowall	Polyfoam ECO
	Materjali tüüp	EPS	PIR	XPS
	Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaat
	Soojuserijuhtivus λ	0,0330	0,0220	0,0330
	Tootmismaa	Šveits	Läti	Suurbritannia
	Materjalihind, €/m2	7,90	6,19	9,05
	Materjali paksus, mm	50	100	50
	Materjali mahumass, kg/m3	32	41	28
	Keskkonnaindeks	3,38	1,81	3,73
		A	B	C
A - EPS B - XPS C - PIR	Materjali nimetus	JabaLite PIB 100	Finnfoam FL300PX	Unilin Utherm KD
	Materjali tüüp	EPS	XPS	PIR
	Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaat
	Soojuserijuhtivus λ	0,0360	0,0350	0,0230
	Tootmismaa	Suurbritannia	Soome	Belgia
	Materjalihind, €/m2	7,05	5,11	8,61
	Materjali paksus, mm	50	50	50
	Materjali mahumass, kg/m3	20	33	32
	Keskkonnaindeks	2,15	1,88	1,96

		A	B	C
A - EPS B - XPS C - GW	Materjali nimetus	EstPlast MINI EPS50	Kurtin Foam XPS	Isover KL 37
	Materjali tüüp	EPS	XPS	GW
	Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaatvill
	Soojuseri juhtivus λ	0,0420	0,0310	0,0370
	Tootmismaa	Eesti	Hiina	Soome
	Materjalihind, €/m ²	3,38	3,70	3,91
	Materjali paksus, mm	50	40	100
	Materjali mahumass, kg/m ³	13	30	36
	Keskkonnaindeks	2,26	2,60	1,50
			A	B
A - SW B - XPS C - GW	Materjali nimetus	Rohhe Flow A Alu	Sundolitt XPS300	Climowool TW1-E
	Materjali tüüp	SW	XPS	GW
	Materjali liik	Rullvill	Plaat	Plaatvill
	Soojuseri juhtivus λ	0,0380	0,0340	0,0370
	Tootmismaa	Poola	Suurbritannia	Saksamaa
	Materjalihind, €/m ²	6,30	7,12	1,02
	Materjali paksus, mm	50	30	50
	Materjali mahumass, kg/m ³	40	33	28
	Keskkonnaindeks	4,33	8,14	1,50
			A	B
A - Lambavill B - Põhk C - Puitkiud	Materjali nimetus	ThermaFleece UltraWool	Stropoly TEC	Steico Flex 036
	Materjali tüüp	Lambavill	Põhk	Puit
	Materjali liik	Rullvill	Plaat	Plaat
	Soojuseri juhtivus λ	0,0350	0,0500	0,0360
	Tootmismaa	Suurbritannia	Saksamaa	Saksamaa
	Materjalihind, €/m ²	9,85	20,00	9,05
	Materjali paksus, mm	50	120	100
	Materjali mahumass, kg/m ³	31	200	60
	Keskkonnaindeks	1,91	2,25	1,38
			A	B
A - Turvas B - Kanep C - Lina	Materjali nimetus	Konto Wave	Thermo Natur Combi	Isolina ISO-L
	Materjali tüüp	Turvas	Kanep	Lina
	Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaat
	Soojuseri juhtivus λ	0,037	0,04	0,0380
	Tootmismaa	Soome	Saksamaa	Soome
	Materjalihind, €/m ²	14,41	4,14	6,54
	Materjali paksus, mm	50	50	50
	Materjali mahumass, kg/m ³	23	36	25
	Keskkonnaindeks	2,29	1,13	1,54
			A	B
A - Kork B - Mineraalid C - Tekstiil	Materjali nimetus	Amorin K50-E	Ytong Multipor	UltraTouch
	Materjali tüüp	Kork	Mineraalid	Tekstiil
	Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaatvill
	Soojuseri juhtivus λ	0,0370	0,0450	0,0250
	Tootmismaa	Portugal	Saksamaa	USA
	Materjalihind, €/m ²	29,30	11,85	9,70
	Materjali paksus, mm	50	25	89
	Materjali mahumass, kg/m ³	120	115	24
	Keskkonnaindeks	6,55	6,55	1,25
			A	B
A - PIR B - EPS C - XPS	Materjali nimetus	Unilin Utherm KD	EstPlast MINI EPS50	Kurtin Foam XPS
	Materjali tüüp	PIR	EPS	XPS
	Materjali liik	Plaat	Plaat	Plaat
	Soojuseri juhtivus λ	0,0230	0,0420	0,0310
	Tootmismaa	Belgia	Eesti	Hiina
	Materjalihind, €/m ²	8,61	3,38	3,70
	Materjali paksus, mm	50	50	40
	Materjali mahumass, kg/m ³	32	13	30
	Keskkonnaindeks	1,89	1,85	1,94
			A	B
A - SW B - SW C - SW	Materjali nimetus	Rockwool Superrock	Paroc Extra Stone	Petalana Petrafas Rock
	Materjali tüüp	SW	SW	SW
	Materjali liik	Plaatvill	Plaatvill	Plaatvill
	Soojuseri juhtivus λ	0,0350	0,0420	0,0350
	Tootmismaa	Soome	Venemaa	Poola
	Materjalihind, €/m ²	1,89	2,33	2,63
	Materjali paksus, mm	50	50	50
	Materjali mahumass, kg/m ³	38	48	30
	Keskkonnaindeks	1,56	1,90	1,87

Lisa 9 Hoonete uued energiamärgised ja energiatõhususe arvud

ENERGIAARVUTUSEL PÕHINEV ENERGIAMÄRGIS		
Energiatõhususarv (ET)	Vähe kulutav	MÄRK
ET-15	 Passiivmaja	PH
ET-35		A++
ET-45		A+
ET-120		A
121·ET-130		B
131·ET-150		C
151·ET-190		D
191·ET-250		E
251·ET-320		F
ET-321		G

Lisa 10 Soojustusmaterjalide keskkonnateadliku valiku veebileht



© 2020 by JMR



Download calculator

© 2020 by JMR