

Ehituse ja arhitektuuri instituut

**RAUDBETONIST, RISTKIHTPUIDUST JA  
POORBETONIST UUTE PROJEKTEERITAVATE  
KORTERMAJADE SÜSINIKU JALAJÄLJE VÕRDLEV  
ANALÜÜS**

**CARBON FOOTPRINT ANALYSIS OF REINFORCED  
CONCRETE, CLT AND AUTOCLAVED AERATED CONCRETE  
APARTMENT BUILDINGS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Annemari Tatra

Üliõpilaskood 204097EAXM

Juhendajad: Simo Ilomets, vanemlektor  
Kadri-Ann Kertsmik, ekspert

Tallinn 2023

*(Tiitellehe pöördel)*

## **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.

"....." ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Annemari Tatra (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 12.08.1997)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Raudbetoonist, ristkihtpuidust ja poorbetoonist uute projekteeritavate kortermajade süsiniku jalajälje võrdlev analüüs,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendajad on Simo Ilomets ja Kadri-Ann Kertsmik,

(*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

<sup>1</sup>Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

\_\_\_\_\_ (*allkiri*)

\_\_\_\_\_ (*kuupäev*)

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Annemari Tatra, 204097EAXM (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peeriala: Hooned ja rajatised (EAXM15/18), vee- ja keskkonnatehnika  
(kood ja nimetus)

Juhendaja(d): vanemlektor Simo Ilomets (+372 6202453), ekspert Kadri-Ann  
Kertsmik

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Raudbetoonist, ristkihtpuidust ja poorbetoonist uute projekteeritavate kortermajade süsiniku jalajälje võrdlev analüüs

(inglise keeles) Carbon footprint analysis of reinforced concrete, CLT and autoclaved aerated concrete apartment buildings.

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida projekteeritava korterelamu ehitusliku lahenduse kohandamise vajalikkust kolme peamise ehituskonstruksioonide materjali puhul - puit (CLT), raudbetoon, poorbetoon.
2. Võrrelda projekteeritavale korterelamule esitatavate põhinõuete täitmise võimalikkust, keerukust ja optimaalsust kolme peamise ehituskonstruksioonide materjali puhul
3. Töötada välja meetodika, mis oleks erinevatest ehitusmaterjalidest projekteeritava uue korterelamu elukaare keskkonnamõju hindamise võrreldavuse aluseks
4. Võrrelda hoone ehitamise ja kasutamise ressursitõhusust kolme peamise ehitusmaterjali puhul ning elukaare lõpu ehitusmaterjalide korduskasutuse ja ringlussevõtu potentsiaali

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Hoone valimine ja kohandamine, kirjanduse analüüs, lõputöö tegevuskava koostamine	20.11.20 22
2.	Hoone nõuetele vastavuse analüüs erinevate peamiste ehitusmaterjalide korral	18.12.20 22
3.	Metoodika arendamine, variantide võrdlus, elukaare keskkonnamõju arvutused, ringlussevõtu potentsiaal, tulemuste analüüs	28.03.20 23

**Töö keel:** .....Eesti..... **Lõputöö esitamise tähtaeg:** “.15...”.....mai.....2023.a

**Üliõpilane:** .....Annemari Tatra..... ".....".....201...a  
/allkiri/

**Juhendaja:** .....Simo Ilomets..... ".....".....201...a  
/allkiri/

**Kaasjuhendaja:** .....Kadri-Ann Kertsmik..... ".....".....201...a  
/allkiri/

**Programmijuht:** .....Simo Ilomets..... ".....".....201...a  
/allkiri/

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

SISUKORD.....	6
EESSÕNA .....	8
MÕISTETE JA TÄHISTE LOETELU .....	9
1 SISSEJUHATUS.....	10
2 PROJEKTEERITAVA HOONE NÕUETELE VASTAVUS .....	12
2.1 Referentshoone valik.....	12
2.2 Mehaaniline vastupidavus ja stabiilsus.....	16
2.3 Tuleohutus.....	19
2.4 Hügieen, tervis, (sise)keskkond .....	20
2.5 Kasutamise ohutus ja juurdepääs .....	22
2.6 Kaitse müra eest .....	23
2.6.1 Siseseinad .....	23
2.6.2 Vahelaed .....	25
2.7 Energiatõhusus.....	26
2.7.1 Välisseinad .....	27
2.7.2 Katuslaed .....	27
2.7.3 Põrand pinnasel.....	28
2.8 Loodusvarade säästev kasutamine .....	28
2.8.1 Olelusringi hindamine .....	28
2.8.2 LCA ülesehitus .....	29
2.8.3 Hoone süsiniku jalajälg .....	30
2.8.4 Madalsüsinikehituse põhimõtete rakendamine käesolevas uurimistöös ..	35
2.9 Puudega inimeste erivajadused .....	37
2.10 Ehitise toimivus, koostoimimisvõime ning ühilduvus .....	37
2.11 Kasutusest tulenevad seisundinõuded, sh korrashoiunõuded .....	38
2.12 Ehitise ja selle asukoha märgistamine .....	38
3 MEETODID .....	40
3.1 Arvutusmeetod ja kasutatud tarkvara.....	40
3.2 Käsitlusala .....	41
4 TULEMUSED JA ANALÜÜS .....	44
4.1 Arutelu .....	49
KOKKUVÕTE .....	58
SUMMARY.....	60
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	62
Lisad.....	67

Lisa 1 – Ehitusmaterjalide vasted One Click LCA tarkvaras .....	67
Lisa 2 – Graafiline osa.....	72

## EESSÕNA

Käesoleva inseneriõppe magistritöö uurib kuidas peamistest Eestis kasutatavatest ehitusmaterjalidest projekteerida nõuetele vastav kortermaja, võttes sealjuures arvesse hoone peamise ehitusmaterjali valikust tulenevat keskkonnamõju. Ühe osana keskendub töö kortermaja plaanilahenduste muutmise vajadusele, et süsiniku jalajälje võrdlemisel oleks ehitisele esitatavad põhiohused täidetud. Projekti staadium on laiendatud eelprojekt – projekt on omavahel kooskõlas, määratud on ehitusmaterjalide olulisemad tehnilised näitajad, esitatud insenertehnilised põhimõttelised lahendused ning tüüpsed sõlmlahendused.

Projekteeritud neljakorruselise kortermaja eeldatav asukoht on Harjumaa ning elukaare pikkus 50 aastat. Uurimistöö sissejuhatus annab ülevaate ehitusprojekti staadiumist, selgitab uurimisvajaduse tähtsust ning tutvustab ehituslikke nõudeid, mis on võetud aluseks referentshoone projekteerimisel. Töö esimeses pooles analüüsitakse projekteeritud konstruktsioonide vastavust Ehitusseadustikule ning tutvustatakse hoone olulusringi hindamise ja madalsüsinikehituse põhimõtete rakendamise vajadust ehituses. Töö teises pooles teostatakse projekteeritud kortermaja materjalikulu loendi alusel One Click LCA tarkvaraga süsiniku jalajälje võrdlusarvutused hoone kõigile kolmele variandile ( $v_{1RB}$ ,  $v_{2CLT}$  ja  $v_{3PB}$ ). Antud analüüsi eesmärgiks on esile tuua suurima jalajäljega ehitusmaterjalid, potentsiaalsed paranduskohad ning rõhutada materjalivalikust tulenevat korduskasutuse ja ringlussevõtu potentsiaali. Töö keskendub osaliselt ka kriitiliste kohtade kaardistamisele ehitusmaterjalide valikul. Arvestades jätkusuutlikkuse arendamise vajalikkust ehitussektoris, annab käesolev lõputöö sisendit nii targale tellijale, projekteerijatele, ehitusmaterjalide tootjatele kui ka olulusringi (Life-Cycle Assessment) ekspertidele.

Autor tänab juhendajat Simo Ilometsa igakülgse abi ja juhendamise eest, kes aitas ühtlasi kortermajade asjakohaste plaani- ja sõlmlahenduste väljatöötamisel. Samuti tänab autor kaasjuhendajat Kadri-Ann Kertsmikku, kes toetas nii hoone süsinikujälje arvutuste läbiviimist kui vastava tarkvara kasutust.

Märksõnad: raudbetoon, ristkihtpuit, poorbetoon, süsiniku jalajalg, kehastunud süsinik, magistritöö



# MÕISTETE JA TÄHISTE LOETELU

**GWP** - globaalse soojenemise potentsiaal on suhteline näitaja, mis iseloomustab atmosfääris kinni hoitavate kasvuhoonegaaside kogust. Antud tegur väljendab materjalide heitekoefitsienti, mis on üldlevinud meetodi kohaselt leitud 100 aastasele ajavahemikule ning esitatud ühikuga kg CO<sub>2</sub>-ekv.

**Heitekoefitsient** – näitaja, mis väljendab materjali (kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg) või tehnika (kg CO<sub>2</sub>-ekv/m<sup>2</sup>) tootmisest tulenevat keskmist kasvuhoonegaaside kogust.

**Süsiniku jalajälg** – kliimamuutuste keskkonnamõju hindamise üks kategooriatest väljendatuna ühikuga CO<sub>2</sub>-ekv.

**LCA** – olelusringi analüüs on meetodika, millega hinnatakse tootest või teenusest elutsükli jooksul tekkivat keskkonnamõju.

**Kehastunud süsinik** – materjalidega seotud kasvuhoonegaaside heitkogused, mida hinnatakse LCA moodulites A ja C.

**Kasutusaegne energia** – Hoone tehnosüsteemide poolt kasutatud ostetud energiatarbimine. Kasutusaegse energia süsinikujälge hinnatakse LCA moodulis B6.

**EPD** – keskkonnadeklaratsioon on III tüüpi keskkonnamärgis, mis annab kvantitatiivset teavet toote elukaare jooksul tekkiva keskkonnakoormuse kohta.

**Lokaliseerimistegur** – tegur, mida rakendatakse materjalide heitekoefitsientidele, et kohandada materjali tootmisprotsessist tulenevad heitekogused materjali päritoluriigi asemel asukohariigiga (Eesti).

**Ringlussevõtupotentsiaal** – näitaja, mis esitab ringlussevõetava määra (%) materjalimassist. Jäetakse välja tavapäraest LCA arvutustest, kuid esitatakse vabatahtlikult arvutuste koondtulemustes moodulis D.

**KHG** – kasvuhoonegaas

**CO<sub>2</sub>-ekv** - Kasvuhoonegaaside süsinikdioksiidi ekvivalent. Ühik võimaldab hinnata kasvuhoonegaaside kogumõju ühe väärtusena.

# 1 SISSEJUHATUS

Hoone on midagi enamat, kui erinevate ehitustoodete kogum. Ehitiste jalajälje arvutamine muutub 2027. aastast Euroopa Liidus kohustuslikuks kõigile hoonetele, mis on suuremad kui 2000 m<sup>2</sup>. (Rohetiiger, 2023). Järkjärgult on madalsüsinikehitusel kasvav roll meie ühiskonnas. Eesmärgiga tagada Eestile rahvusvaheline konkurentsivõime ning täita kliima eesmärgid, tuleb eeskuju võtta riikidest, kes on juba käesolevaks ajaks kehtestanud piirmäärad, mida järgida, ja nõude arvutada planeeritava hoone jalajalg (Rohetiiger, 2023).

Madalsüsinikehituse üheks alustalaks on hoone elukaare hindamine, mille käigus summeeritakse kogu hoone elukaare eri etappidel tekkivad kasvuhoonegaaside heitkogused. Oluline osa viimasest on seotud just hoone kasutusaegse energiaga. Käesolevas uurimistöös analüüsitakse ehitisele esitatavate nõuete täitmise võimalikkust erinevate peamiste ehitusmaterjalide korral ning tutvustatakse hoone süsinikuajalje arvutuse põhimõtteid projekteeritud näidiselamu põhjal.

Ehitisele, sh selle kõigile osadele, ja ehitamisele esitatavad (põhi)nõuded määrab Eestis ära Ehitusseadustik, millele vastavust hakatakse järgnevates peatükkides näidishoone puhul ka analüüsima: (Ehitusseadustik, 2023)

§ 11. Ehitisele esitatavad nõuded:

- 1) mehaanilist vastupidavust ja stabiilsust;
- 2) tuleohutust;
- 3) hügieeni, tervist ja keskkonda;
- 4) kasutamise ohutust ja juurdepääsu, sealhulgas ehitisest inimeste evakuatsiooni ja pääste vajadusi ning operatiivkaarti;
- 5) kaitset müra eest;
- 6) energiasäästlikkust ja -tõhusust;
- 7) loodusvarade säästvat kasutamist;
- 8) puudega inimeste erivajadusi;
- 9) ehitise toimivust ja koostoimimisvõimet ning ühilduvust;
- 10) kasutusotstarbest ja kasutamisest tulenevaid nõudeid ehk seisundinõudeid, sealhulgas korrashoiunõudeid;
- 11) ehitise ja selle asukoha märgistamist.

Eestis sätestab nõuded ehitusprojektile majandus- ja taristuministri määrus nr 97, mille kohaselt on ehitusprojekti staadiumiteks eelprojekt (EP), põhiprojekt (PP) ja tööprojekt

(TP), täpsemalt käsitleb ehitusprojekti asjakohane standard EVS 932 Ehitusprojekt. Eelprojekt on ehitusprojekti staadium, milles esitatakse ehitise arhitektuurilahendus ja insener-tehniliste lahenduste põhimõtted, sh analüüsitakse lahenduste sobivust ja ökonoomsust vastavalt konkreetsele projektile. Eelprojekt mõjutab ehituse tervikprojekti edukust kõige enam, mistõttu peab see andma piisavalt õiget teavet, et selle alusel oleks võimalik taotleda ka ehitusluba või esitada ehitusteatist. (Nõuded ehitusprojektile, 2021)

Põhiprojekti staadiumis detailiseeritakse projektlahendust nii, et selle alusel saaks määrata ehituskulud, läbiviia ehitushanke ning koostada ehituspakkumuse. Põhiprojektis harilikult ei esitata ehitustootet või -materjali tootjat, kuid tuuakse välja toodete ja materjalide olulisemad tehnilised näitajad. Erinevalt eel- ja põhiprojektist, täpsustatakse tööprojektis projektlahendust piisavalt, et selle järgi oleks võimalik nõuetekohaselt ehitada, sh esitatakse kasutatavad ehitustooted ning -seadmete margid ja mudelid. (Nõuded ehitusprojektile, 2021)

Käesoleva uurimustöö esimene praktiline osa (projekteeritud kortermaja plaanilahendused ja tüüpsõlmede joonised) on esitatud laiendatud eelprojekti staadiumina – projektlahenduse osad on omavahel kooskõlas ja vastuoludeta, sh on esitatud konstruktsioonides kasutatavate ehitusmaterjalide ja -toodete olulisemad tehnilised näitajad. Praktilise osa teises pooles, mis hõlmab kortermaja olelusringi analüüsi, on kasutatud tarkvara (One Click LCA) andmepunktide valikul lähtunud projekteeritud hoones määratletud ehitusmaterjalide tehnilistest omadustest. Teostatud süsiniku jalajälje arvutustel on esimeses etapis valitud ehitustooted, mis omavad keskkonnadeklaratsiooni (EPD), või valitud asjakohased tootjapõhised/riiklikud keskmised väärtused.

# 2 PROJEKTEERITAVA HOONE NÕUETELE VASTAVUS

## 2.1 Referentshoone valik

Projekteeritava hoone puhul on tegemist 4-korruselise korterelamuga, mille kandekonstruktsioonide planeeritav tööiga on vähemalt 50 aastat. Projekteerimisel on lisaks ehitisele esitatavatele nõuetele lähtutud heast ehitustavast ja ringmajanduse põhimõtetest, millest viimase puhul on käesoleva töö raames eelkõige arvestatud keskkonna funktsionaalsuse ja jäätmetekke vältimisega. Korteriid on planeeritud mõõduka suurusega ning ratsionaalse plaanilahendusega, mille sihtgrupiks on arvestatud tugevat keskklassi. Kortermaja fassaadi pind on maksimaalselt ära kasutatud tänu põrandani ulatuvatele akendele.

Hoone on põhiplaaniilt korrapärase ristkülikukujuline ning plaanilise lahenduse ja konstruktsioonimaterjalide valikul on lähtutud Eestis enam kasutust leidvatest põhimõtetest ja tavadest. Tüüpsed sõlmjoonised on koostatud just raudbetoon (edaspidi: r/b) paneelidest hoonele, sest antud materjal leiab Eestis kortermajade ehitusel enim kasutust, samuti on raudbetoonist sõlmede soojus- ja niiskustehniline toimivus kriitilisem võrreldes puidu või poorbetooniga.

Korterelamu projekteerimist alustati lähteülesande mõtestamisest ja eskiisi koostamisest. Ehituskonstruktsioonide ja piirdetarindite projekteerimisel lähtuti neile esitatavatest nõuetest, mis tähendavad erineva ehitusmaterjali puhul erinevaid lahendusi. Välispiirdetarindite projekteerimisel võeti aluseks ühtne soojuslähivus, mistõttu tarindite paksused ning sellest tulenevalt hoone kasulik pind erinevad sõltuvalt konstruktsiooni põhimaterjalist. Hoone kasulik pind sõltub enim sise- ja välisseinte paksustest. Sise- ja välisseinte peamised kandvad konstruktsioonid (vastavalt monoliitne r/b, poorbetoon ja ristkihtliimpuit (edaspidi: CLT)) valiti sama paksusega (200 mm), et tõsta esile valikust tulenevate lisamaterjalide, nt soojustuse paksuse, vajadust.

Kui väliskeskkonnaga piirnevate tarindite (välisseinad, katuslaed) projekteerimise aluseks oli ühtne soojuslähivus, siis sisekeskkonnaga piirnevate tarindite (siseseinad, vahelaed) aluseks olid heliisolatsiooni miinimumnõuded. Iga korterelamu variandi puhul kasutati katuslae ja vahelagede konstruktsioonides sama paksusega põhielementi (vastavalt õõnes r/b paneel paksusega 265 mm, 7-kihiline CLT-paneel paksusega 280

mm ja poorbetoon laepaneel paksusega 250 mm). Olenevalt kas tegu oli kuiva või märgruumi vahelise vahelaega, lisati kandvale elemendile kõigi variantide puhul sama kombinatsioon sammumüra isolatsioonivillast, PE-kilest, kipspealisvalust, ja parketist või kombinatsioon sammumüra isolatsioonivillast, PE-kilest, kiudbetoonist, hüdroisolatsioonist ja keraamilistest põrandaplaatidest. Tuginedes eelnevale, sõltub kortermaja kõrgus erinevate variantide puhul just vahe- ja katuslagede põhielemendi paksusest. Kusjuures märgruumide vahelae kalle anti põrandale just kiudbetooni kihiga.

Hoone 1. korrusele on projekteeritud panipaigad, tehnoruum, koristusruumid, fuajee ning kaks korterit. 2. ja 3. nn tüüpkorruse ruumiplaneeringud on identsed (ühe korruse kohta neli korterit ning kaks trepikoda koos liftiga), neljanda korruse plaanilahendus erineb vähesel määral trepimarsside ja korterite kasuliku pinna osas. Alates teisest korrusest on korteritele projekteeritud rõdud, mis paiknevad hoone lõunapoolses küljes ning täidavad ühtlasi ka varjestavat funktsiooni suvise ülekuumenemise vältimiseks. Läänesuunalistele akendele on ette nähtud päikesekaitseklaasid (päikesefaktoriga  $g=0,25$ ) suvise ülekuumenemise vältimiseks.

Korterelamule ei ole planeeritud parkimiskorrust ega keldrit ning 0-tsükli maht on analüüsitud mahust teadlikult välja jäetud. Seda põhjusel, et ehitatud keskkond areneb suunas, kus autode, seega ka parkimiskohtade, arv väheneb - maa-alla ehitamine on kallim, keerulisem ning suure keskkonna mõjuga, kuna ehitusmaterjalina on kasutatud lõviosa betooni. Maa-alused parklad tekitavad esilekutsutud nõudlust ning nende osakaal kogu hoone süsinikujäljest võib ulatuda kuni 30-50%-ni (Rohetiiger, 2023). Teiseks ei mõjuta 0-tsükli osa käesoleva töö fookuseks olevat peamise ehitusmaterjali võrdlust, kuna ehitatakse üldjuhul betoonist aga mitte puidust ega poorbetoonist.

Järgnevalt esitatakse projekteeritud korterelamu tehnilised andmed (tabel 1) ning 3D arhitektuursed lõuna- ja idasuunalised vaated (vastavalt joonis 1 ja joonis 2). Hoone plaanilised lahendused on leitavad käesoleva töö graafilistest lisadest. Kortereelamu on hoone tehniliste andmete tabelis jaotatud põhilise konstruktsioonimaterjalide järgi kolmeks variandiks:  $v1_{RB}$  – raudbetoon,  $v2_{CLT}$  – ristkihtpuit (edaspidi: CLT),  $v3_{PB}$  – poorbetoon. Piirdetarindite ja põhiliste liitekohtade sõlmjoonised ja konstruktsioonitüübi joonised on leitavad uurimustöö lisades.

Tabel 1. Projekteeritud hoone tehnilised andmed.

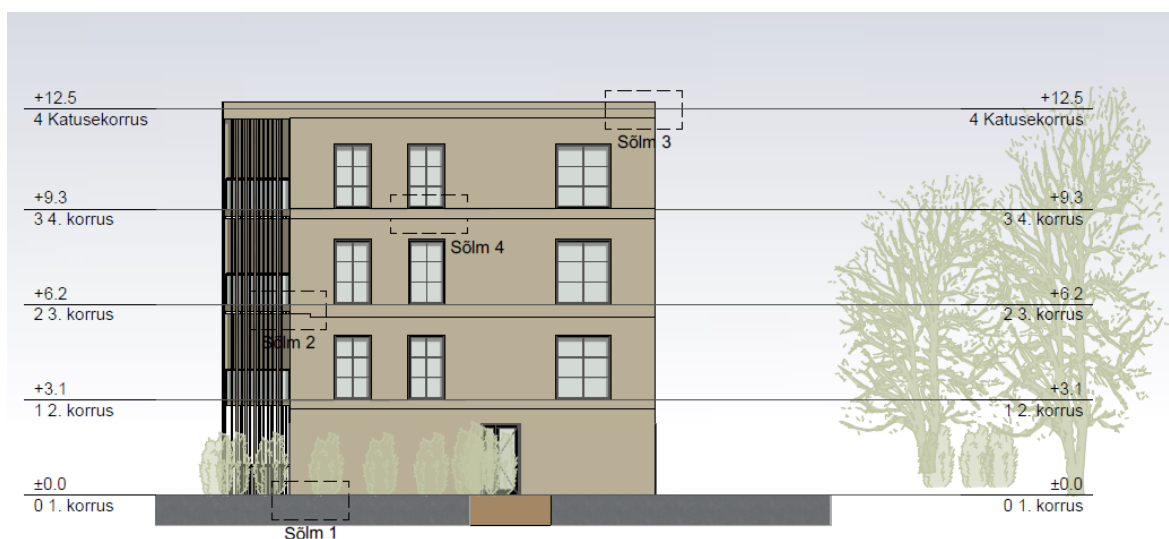
Ehitise tehniline parameeter	Väärtus			Ühik
	v1 <sub>RB</sub>	v2 <sub>CLT</sub>	v3 <sub>PB</sub>	
Ehitisealune pind	470,7	470,7	470,7	m <sup>2</sup>
Maapealse osa alune pind	470,7	470,7	470,7	m <sup>2</sup>
Suletud netopind	1288,3	1297,7	1290,3	m <sup>2</sup>
Maapealse osa korruste arv	4			tk
Maa-aluse osa korruste arv	0			tk
Absoluutne kõrgus	-			m
Kõrgus	12,5	12,5	12,6	m
Sügavus	0			m
Pikkus	33,5			m
Laius	14,0			m
Maht = maapealse osa maht	5863	5863	5909	m <sup>3</sup>
Kõetav pindala	1288,3	1297,7	1290,3	m <sup>2</sup>
Üldkasutatav pind	331,7	327,4	319,8	m <sup>2</sup>
Tehnopind	9,6			m <sup>2</sup>
Vundamendi liik	Lintvundament			-
Kande- ja jäigastavate konstruktsioonide materjal	Raudbetoon (monoliitne/õõnespaneel),	CLT	Poorbetoon (sandwich-paneel/laepaneel/kergplokid)	-
Katuste ja katuslagede kandva osa materjal	Raudbetoon õõnespaneel	7-kihiline CLT	Poorbetoon laepaneel komposiidina raudbetooniga	-
Vahelagede kandva osa materjal	Raudbetoon õõnespaneel	7-kihiline CLT	Poorbetoon laepaneel komposiidina raudbetooniga	-
Välisseina liik	Monoliitne raudbetoon	5-kihiline CLT ja vahetäitega sõrestik	Poorbetoonist sandwich-paneel	-
Katusekatte materjal	SBS rullbituumen			-

Tabel 1 järg. Projekteeritud hoone tehnilised andmed.

Välisseina välisviimistluse materjal	Krohv (tuulutusvahega)	Puitlaudis (tuulutusvahega)	Krohv (tuulutusvahega)	-
Veevarustuse liik	Ühisveevärk			-
Elektrisüsteemi liik	Võrk			-
Kanaliseerimisvarustuse liik	Ühiskanalisatsioon			-
Soojusvarustuse liik	Kaugküte			-
Soojusallikas	Vesipõrandaküte (märgruumides)/radiaatorid			-
Energiaallikas	Küttegaas (võrk)			-
Ventilatsiooni liik	Soojustagastusega mehaaniline sissepuhe ja väljatõmme			-
Jahutuse liik	Puudub – rõdud varjestava elemendina			-
Võrgu- või mahutigaasi olemasolu	Puudub			-
Liftide arv	2			tk
Eluruumide arv	14			tk
Eluruumide pind	934,3	948,0	942,3	m <sup>2</sup>
Mitteeluruumide arv	Puudub			tk
Mitteeluruumide pind	Puudub			m <sup>2</sup>



Joonis 1. 3D arhitektuurne vaade projekteeritud kortermajast (lõunasuunaline).



Joonis 2. 3D arhitektuurne vaade projekteeritud kortermajast (idasuunaline).

## 2.2 Mehaaniline vastupidavus ja stabiilsus

Konstruksioonidele mõjuvad vertikaalkoormused on omakaal, kasuskoormus, ja lumekoormus. Horisontaalkoormused on tuulekoormus, rõhtkoormus piiretele ja käsipuudele, pinnasesurve ning omakaal (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2009). Kuid sellele lisaks peavad piirdetarindid suutma vastu võtta ka välimisi ja sisemisi kliimakoormusi, nagu temperatuur, niiskus, sademed, tuul, otsene ja hajus päikesekiirgus.

Harilikult eristatakse ehituskonstruksioonide kande- ja kasutuspiirseisundit, mille väärtused leitakse insenerarvutuste teel. Neist esimene, kandepiirseisund, on seotud konstruktsiooni purunemise, stabiilsuse kaotuse, staatilise tasakaalu kaotuse või muude konstruktsiooni kandevõime kahjustustega. Teisalt kasutuspiirseisund on määratud sõltuvalt kasutusmugavusest ja ehitise välimusest, nagu vibratsioon ja deformatsioon. Piirseisundi ületamisel jagunevad tagajärjed taastuvateks ja taastamatuteks vastavalt sellele, kas koormuse mõju kadumisel deformatsioonid kaovad või jäävad muutumatuks. (Loorits et al., 2014). Hoone horisontaalpindade kasuskoormused on esitatud tabelis 2.



Tabel 2. Horisontaalpindade kasuskoormused (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2009b).

Horisontaalpindade kasuskoormused		
Ruumirühma klass	Koormus $q_k$ (kN/m <sup>2</sup> )	Koormus $Q_k$ (kN)
A (eluruumide pörandad)	1,5-2,0	2,0-3,0
A (korterite rõdud)	2,5-4,0	2,0-3,0
C5 (trepikojad)	5,0-7,5	3,5-4,5
D (panipaigad)	4,0-5,0	3,5-7,0
Tehnilised ruumid	3,0+seadmete kaal	Olenevalt tehnoloogiast
H (mittekäidav katuslagi)	0,4	1,0

Kergvaheseinte omakaalu võib arvestada ühtlaselt jaotatud koormusena  $q_k$ , kui vahelaed võimaldavad koormust külgsuunas jaotada – andmed esitatud tabelis 3.

Tabel 3. Kergvaheseinte kasuskoormused (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2009b).

Kergvaheseina omakaal (kN/m)	Koormus $q_k$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\leq 1$	0,5
$\leq 2$	0,8
$\leq 3$	1,2
$\geq 3$	Sõltuv vaheseinte konstruktsioonist, paiknemisest ja suunast

Standardi EVS-EN 1991-1-3:2006 kohaselt on lumekoormus Tallinnas maapinnal  $s_k=1,50$  kN/m<sup>2</sup>. Lumekoormuse kujutegur lamekatusel kaldega  $<30^\circ$  on  $\mu_1(0^\circ)=0,8$  (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2009a).

Vastavalt standardile EVS-EN 1991-1-4:2007 on  $v_{b0}=21$  m/s ning keskmine tuule baaskiirusrõhk seeläbi  $q_b=276$  N/m<sup>2</sup>. Avatusetegur  $ce(z)=4,5$  on määratletud vastavalt hoone kõrgusele ( $z=12,5$  m) ja maastikutüübile (II tüüpi). (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2007)

Piirdekonstruktsioonide tüübijoonised on lisatud uurimistöö lisadesse. Hoone vundamendikaevik rajatakse planeeritavast maapinnast (-0,400 m) 0,6 m sügavusele. Lintvundament valatakse monoliitset raudbetoonist tugevusega C25/30, mille taldmik on tugevdatud terasarmatuuriga. Vundamendi taldmiku (alumise kõrgusmärk -1,250 m) alune kaevik täidetakse tihendatud killustikuga, kuhu paigaldatakse drenaažitorustik  $d=110$  mm hoone alusest pinnasest liigvee kokku kogumiseks. Hoone vundamendi konstruktsioon jääb kõigi kortermaja variantide puhul samaks – 200 mm paksust r/b

linti toetab 250x600 mm mõõtmetega samast materjalist taldmik. Vundament on nii välis- kui sisepinnal soojustatud vahtpolüstüreeni XPS isolatsiooniplaatidega (vastavalt 150 ja 50 mm), mille pikaajaline veeimavus on <2%.

Lintvundamendile toetatakse hoone kandvad seinad, mis varieeruvad sõltuvalt kortermaja variandist:  $v1_{RB}$  – raudbetoon (RB),  $v2_{CLT}$  – ristkihtpuitpaneel (CLT),  $v3_{PB}$  – poorbetoon (AAC). Kortermaja  $v1_{RB}$  puhul ehitatakse hoone kandvad seinad 200 mm monteeritavast raudbetoonist tugevusklassiga C30/37, mis soojustatakse omakorda jäiga kivivillaplaadiga. Kortermaja  $v2_{CLT}$  puhul on välisseinad projekteeritud 5-kihilisest CLT-st samuti paksusega 200 mm, mis välisperimeetril soojustatakse kahes kihis paiknevate pehmete mineraalvillaplaatidega, mis on paigutatud risti asetsevate C24 kalibreeritud puidust karkasside vahele. Hoone  $v3_{PB}$  puhul on välissein projekteeritud kolmekihilisest poorbetoonist seinapaneelina, mille sise- ja väliskooriku (paksused vastavalt 200 ja 80 mm) vahele on planeeritud 110 mm PUR vahtu. Kõik välisseinte kandvad konstruktsioonid on projekteeritud sama paksusega, et rõhutada erinevate materjalide soojuseri juhtivusi ja sellest tulenevat vajadust kihtide erinevate paksuste järele.

Hoone  $v1_{RB}$  puhul on katuslae kandekonstruktsiooniks projekteeritud monteeritavad r/b õõnespaneelid minimaalse paksusega 265 mm;  $v2_{CLT}$  puhul 7-kihiline ristkihtpuitpaneel paksusega 280 mm ning  $v3_{PB}$  korral poorbetoonist laepaneelid paksusega 250 mm, millest viimasele on lisatud ka terasarmatuur ning 50 mm kiudbetooni kiht minimaalse tugevusklassiga C20/25. Kõigi katuslagede variantide puhul kaetakse kandekonstruktsioon kahekordse soojustusvillaga, millest teise kihiga antakse katusele kalle 1:60. Õhu- ja aurutõkkena kasutatakse SBS aluskatet ning katusekattena kahekordset SBS-rullmaterjali.

Hoone põrand pinnasel on kavandatud kõigi variantide puhul sama konstruktsioonina – 100 mm monoliitne raudbetoonist C30/37 plaat on alt soojustatud 3 x 100 mm EPS plaatidega, millest kahe pealmise soojustuskihi vahele on paigaldatud ka radoonitõkketile. Kõik läbiviigid radoonitõkketist ja hüdroisolatsioonist peavad olema tihendatud vee- ja õhupidavalt ning samaväärselt põhikonstruktsiooniga. R/b põrandaplaat armeeritakse terasarmatuuriga ning eraldatakse vertikaalkonstruktsioonidest min 10 mm laiuse elastse vuugiga ning. Vee kapillaarse tõusu vältimiseks pinnases paigaldatakse soojustuse alla paesõlmed, geotekstiilkangas ja tihendatud killustikalus.

Korterimaja lõunapoolsele küljele projekteeritud rõdude konstruktsioonides kasutatav kandematerjal on määratud vastavalt hoone põhikonstruktsiooni materjalile. Raudbetoonkihi piisav tulepüsivus R60 saavutatakse plaadi piisava paksuse ja betoonist kaitsekihiga. Raudbetoonist hoone  $v_{1RB}$  puhul on konsoolne rõdu lahendatud terasest eridetallidega, mis vähendab liitekohas olevat külmasilda. Ristkihtpuitpaneel hoone  $v_{2CLT}$  ja poorbetoon hoone  $v_{3PB}$  puhul on arvestatud, et rõdud on konsoolsed ning kande element lisasoojustust ei vaja. Käesolevas töös ei võetud arvesse võimalikku rõdu otsa toestamise vajadust poorbetoonist rõdude puhul (nt diagonaaltõmb), kuna see pole antud töö fookus. Rõdude piirded on projekteeritud täisklaasist ning korteritevahelisi rõdusid eraldavad eeltoodetud betoonelementidest vaheseinad.

Ehitise jäikus tagatakse sisemiste ja välimiste jäikusseinte koostöös vahelagedega, kus kõik horisontaalkoormused kantakse edasi lintvundamendini. Peamised sisemised kandeseinad paiknevad korterite vahel ning trepikodade ümber. Hoone vertikaalseteks kandeelementideks on siseosas kandvad siseseinad ja välisperimeetril ehitise välisseinad. Hoone horisontaalseteks kandeelementideks on välis- ja siseseintele toetuvad vahelaed ja katuslagi. Kandeelementide materjalideks on valitud vastavalt raudbetoon, ristkihtpuit või poorbetoon (koos r/b pealiskihi ja vaheribidega).

## 2.3 Tuleohutus

Korstnad puuduvad, kuna hoone soojusvarustuseliigiks on arvestatud kaugkütet ning kütteallikaks I korrusel ja märgruumides vesipõrandkütet ning alates II korrusest kuivades ruumides radiaatoreid. Kuna tegemist ei ole tööstus- ega laohoonega, ei määratleta korterelamu tuleohuklassi ega tulekaitsetaset.

Tuletõkkekonstruktsioonis oleva ukse ja akna tulepüsivusaeg peab olema vähemalt 50 protsenti tuletõkkekonstruktsioonile ettenähtud tulepüsivusajast, kuid kõige vähem 30 minutit. Ehitise kasutamisotstarbest lähtuvalt on eraldi tuletõkkesektsioonideks jaotatud järgnevad hoone osad: (Ehitisele esitatavad tuleohutusnõuded, 2017)

- 1) Evakuatsioonitee
- 2) Evakuatsioonitrepikoda
- 3) Korterid
- 4) Liftipüstak
- 5) Tehnosüsteemide šahtid
- 6) Ruumid, kus asuvad elektrikilbid, mille peakaitsme nimivool on üle 100 ampri (tehnoruum)
- 7) Panipaikade ala (mitte iga panipaik eraldi)

Tabel 4. Hoone tehnilised andmed tuleohutuse kohta.

Ehitise kasutusotstarve	Korterelamu
Ehitise kasutusviis	I KV (eluhooned)
Maapealsete korruste arv	4
Maa-aluste korruste arv	Puudub
Kõrgus maapinnast	12,5 m
Eripõlemiskoormus	<600 MJ/m <sup>2</sup>
Ehitise tuleohutusklass	TP-2 (tuldtakistav)
Niiskusklass	3 (niiskuslisa 6 g/m <sup>3</sup> )
Ehitisesisene tuletõrjevõrk	Puudub
Automaatse tulekahjusignalisatsioonisüsteemi keskseadme asukoht	I korrusel paiknev tehnoruum
Märg/kuivtõusutoru	Puudub
Sprinklersüsteem	Puudub
Lähima tuletõrje veevõtukohta kaugus	-
Suitsutõrje käivitustase	Tase 3: automaatne – suitsueemaldus toimub automaatselt, kuid õhu kompenseerimine käsitsi

Järgnevalt on esitatud ehitisele kehtivad tulepüsivus ja tuletundlikkuse kriteeriumid tabelis 5. (Päästeamet, 2020)

Tabel 5. Ehitisele esitatavad tulepüsivuse ja -tundlikkuse kriteeriumid (Päästeamet, 2020).

Kandekonstruktsiooni tulepüsivus pealmaakorrustel	R60	A2-s1, d0 või soojustusmaterjal vähemalt A2
Tuletõkkekonstruktsioonide (TTS) tulepüsivus pealmaakorrustel	EI60	-
Sisepindade tuletundlikkus	D-s2, d2	Sein, lagi
Välisseina tuletundlikkus	B-d0	Välisseina välispind
Välisseina tuletundlikkus	B-d0	Õhutuspilu välispind
Välisseina tuletundlikkus	B-s1, d0	Õhutuspilu sisepind
Välisseina tuletundlikkus	B-d0	Soojustussüsteem
Rõdu pörandi tuletundlikkus	B <sub>FL</sub> -s1	-
Ehitisevälise tuletõrjevõrgi vooluhulk ja tulekahju kestus	15 l/s	3 h

## 2.4 Hügieen, tervis, (sise)keskkond

Hoone on projekteeritud kasutajate tervise, hügieeningimuste ja ohutuse põhimõtteid silmas pidades ning lähtudes sisekeskkonnale esitatavatest nõuetest. Sisekeskkonna

kvaliteedi saavutamisel on kategooriaks määratud II klass. Küttesüsteemi dimensioneerimisel on lähtunud soojusliku mugavusvahemiku madalamatest väärtustest. Hoone projekteerimisel on välditud olukordi, kus tekiks soojuslik ebamugavus – tuuletõmbus, vertikaalsed õhutemperatuuri erinevused, kiirgustemperatuuri asümmeetria ja erinevused põranda temperatuurides. (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2019)

Euroopa Parlamendi ja nõukogu määruse (EL) nr 305/2011 (2011) kohaselt ei tohi ehitiskogu oma olelusringi jooksul ülemääraselt mõjutada kliimat ja keskkonna kvaliteeti, mistõttu peavad hoone ehitusel, kasutusel ning lammutusel olema välditud järgnevad olukorrad:

- Ohtliku kiirguse eraldumine
- Mürgiste gaaside eraldumine
- Kasvuhoonegaaside (edaspidi: KHG), ohtlike ainete ning lenduvate orgaaniliste ühendite eraldumine sise- või väliskeskkonda
- Ohtlike ainete eraldumine põhjavette, merevette, pinnasesse või pinnavette
- Joogiveele negatiivset mõju avaldavate ainete eraldumine
- Reovee mittetäielik ärajuhtimine, jäätmete puudulik kõrvaldamine, suitsugaaside eraldumine
- Niiskus ehitise pindadel ja osadel

Siseõhu kvaliteet hoones saavutatakse saasteallikate kontrolli, õhufiltrite kasutuse ja piisava arvutusliku ventilatsiooniõhu koguse tagamise läbi. Niiskuslikud nõuded hoonele on ühelt poolt sõltuvad elamu füüsikalistest kriteeriumitest, teisalt siseõhu kvaliteedi ja soojusliku mugavuse tagamise nõuetest. (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2019). Käesoleva korterelamu piirdetarindid on projekteeritud nii, et ka kriitilistel kliimatingimustel (madal temperatuur, kõrge niiskussisaldus) on välditud kondenseerumisoht, hallituseente kasv ning niiskuse ja õhuvoolu sattumine tarindi soojustuse kihti.

Sisekliima tagamiseks on korterelamusse projekteeritud soojustagastusega korteripõhised reguleeritavad sundventilatsioonid ning kütteelemendina on lõviosas kasutuses radiaatorid (v.a märgruumid). Nii üldaladel kui ka korterites on ohutuse ja esteetika kaalutlustel kõik tehnosüsteemid ja küttesüsteemide püstikud paigaldatud tehnilistesse šahtidesse. Juurdepääs tehnosüsteemidele on võimaldatud hooldusluukide kaudu. Sisekliima tagamiseks ja ülekuumenemise vältimiseks on kõik hoone välispiiridel paiknevad elemendid projekteeritud kasutajate/elanike poolt avatavateks. Samuti tagavad kõrged aknad (2,1 m) küllaldase loomuliku päevavalguse sissepääsu



paigaldatud ka metallist väline kohtkindel tuletõrjeredel, mille laius  $\geq 700$  mm ning pulkade vahe  $\leq 300$  mm. (Päästeamet, 2020)

Puudega inimeste kasutamise ohutust ja ligipääsu on analüüsitud alapeatükis 2.9 Puudega inimeste erivajadused.

## 2.6 Kaitse müra eest

Hoonetele ja nende osadele esitatud minimaalseid heliisolatsiooninõudeid käsitleb standard EVS 842:2003 „Ehitiste heliisolatsiooninõuded. Kaitse müra eest“, mille kohaselt peab ka heli kaudse ülekande korral olema heliisolatsioon tagatud. Heliisolatsiooninõudeid saab standardikohaselt esitada nii sise- kui välispiiretele, millest viimase, ka selle elementide, nõuded sõltuvad välismüra suurusest korterelamu vahetus läheduses. Ehitise välispiirded loetakse nõuetekohaseks, kui liikluse müra normtasemeid ruumides pole ületatud: (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2003)

Tabel 6. Liikluse müra normtasemed elamutes (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2003).

Hoone ja ruum	Müra normtasemed (dB)	
Elamu elu- ja magamisruumid	$L_{pA,eq,T}$ päeval	35
	$L_{pA,eq,T}$ öösel	30
	$L_{pA,max}$ öösel	45

Üldjuhul on heliisolatsiooninõuded hoone korruste, üldpindade, korterite ja müra tekitavate ruumide vahel täidetud tänu konstruktsioonide massiivsusele. Vahelagede konstruktsioonidesse on lisatud heli summutamiseks sammumüravilla ja kipsvalu. Seinades parendavad heliisolatsiooni kipsikihid, õhkvahe ning mineraalvillaplaat, millest viimane soovitatavalt heliisolatsiooni parendav pehme plaatvill. Kõik kokkupuutepinnad betooni kihtide vahel on välistatud läbi elastse vuugi kasutuse, vältimaks siirdeheli kandumist ühelt konstruktsioonilt teisele.

### 2.6.1 Siseseinad

Järgnevalt on esitatud sisepiiretele (siseseinad, vahelaed) esitatavad heliisolatsiooni miinimumnõuded vastvalt ruumide tüüpidele, mis on täidetud ka projekteeritud hoones:

Tabel 7. Projekteeritavate tarindite helipidavused (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2003).

Ruumi tüüp	Õhumüratakistus $R'w$ (dB)	Löögimürajuhtivus $L'_{n,w}$ (dB)
Mitme korteri vahelised	$>55$	$<53$

Tabel 7 järg. Projekteeritavate tarindite helipidavused (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2003).

Korterite eluruumide ja üldkasutatavate pindade vahelised	55*	58
Ühe korteri ruumide vahelised (mittekandvad)	43	-
Korteri ja müratekitava ruumi (nt tehnoruum) vaheline	60	48

\*õhumüratakistus on  $R'w=39$  dB, kui korteri ja üldkasutatavate ruumide vahelises seinas on uks, kusjuures ukse/uksekomplekti  $R'w \geq 35$  dB.

R/b hoone  $v_{1RB}$  puhul lisati voodersein (lisakiht 91 mm) ka kortermaja 4. korrusel paikneva korteri nr 12 liftipoolsele magamistoale, et oleks välistatud lifti madalsagedusliku heli ning vibratsiooni kandumine antud ruumi.

Heliisolatsiooninõuetele vastavad siseseinte konstruktsioonid vastavalt kortermaja variandile on esitatud tabelis 8 ja 9.

Tabel 8. Projekteeritud kortermaja variantide kandvate siseseinte andmed.

Hoone variant	Kandvate siseseinte materjalide kihid	Materjalikihi paksus (mm)
$v_{1RB}$	Siseviimistlus Raudbetoon elementsein (C30/37) Siseviimistlus	5 200 5
$v_{2CLT}$	Tugevdatud kipsplaat Kipsplaat Mineraalvillaplaat/karkassipost XR 66/66 Õhkvahe CLT-paneel, 5-kihiline (C24; $\rho=480$ kg/m <sup>3</sup> )	12,5 12,5 50/66 30 200
$v_{3PB}$	Tugevdatud kipsplaat Kipsplaat Mineraalvillaplaat/karkassipost XR 66/66 Õhkvahe Poorbetoonist kergplokid (5 Mpa; $\rho=535$ kg/m <sup>3</sup> )	12,5 12,5 50/66 30 200

Tabel 9. Projekteeritud kortermaja variantide ennastkandvate siseseinte andmed.

Tarindi asukoht	Ennastkandvate siseseinte materjalide kihid	Materjalikihi paksus (mm)
Kuivade ruumide vaheline	Tugevdatud kipsplaat Kipsplaat Mineraalvillaplaat/karkassipost XR 66/66 Kipsplaat Tugevdatud kipsplaat	12,5 12,5 50/66 12,5 12,5



Tabel 9 järg. Projekteeritud kortermaja variantide ennastkandvate siseseinte andmed.

Kuiva ja mägrruumi vaheline	Tugevdatud kipsplaat	12,5
	Kipsplaat	12,5
	Mineraalvillaplaat/karkassipost XR 66/66	50/66
	Tsementplaat	12,5
	Hüdroisolatsioon	0,5
	Keraamilised seinaplaadid	8
Mägrruumi ja leiliruumi vaheline	Lehtpuust sisevoodrilauad	14
	Tuulutusvahe/puitroovid	20
	Fooliumkattega PIR/PUR plaat	30
	Mineraalvillaplaat/karkassipost XR 66/66	50/66
	Tsementplaat	12,5
	Hüdroisolatsioon	0,5
	Keraamilised seinaplaadid	8

Turvalisuse ja helipidavuse tagamiseks on kõigi korterite sissepääsud projekteeritud topelt ustega. Ka kõigi kommunikatsioonide, nagu torustike ja šahtide, tööst tulenev müra ei tohi mõjutada lagede ja seinade heliisolatsiooni üle koldatud nõuete.

## 2.6.2 Vahelaed

Järgnevalt on esitatud heliisolatsiooninõuetega kooskõlas vahelagede konstruktsioonid vastavalt kortermaja variantidele:

Tabel 10. Projekteeritud kortermaja variantide vahelagede andmed.

Hoone variant	Vahelagede (kuiv ruum) materjalide kihid	Materjalikihi paksus (mm)
v1 <sub>RB</sub>	Parkett	14
	Parketi aluskate	2
	Kipspealisvalu	60
	Polüetüleenkile	0,2
	Sammumüravill (20 kPa; dün. jäikus 10 MN/m <sup>3</sup> )	50
	Õõnes raudbetoonpaneel (HCE265)	265
	Siseviimistlus	5
v2 <sub>CLT</sub>	Parkett	14
	Parketi aluskate	2
	Kipspealisvalu	60
	Polüetüleenkile	0,2
	Sammumüravill (20 kPa; dün. jäikus 10 MN/m <sup>3</sup> )	50
	CLT-paneel, 7-kihiline (C24; ρ=480 kg/m <sup>3</sup> )	280
	Siseviimistlus	5
v3 <sub>PB</sub>	Parkett	14
	Parketi aluskate	2
	Kipspealisvalu	60
	Polüetüleenkile	0,2
	Sammumüravill (20 kPa; dün. jäikus 10 MN/m <sup>3</sup> )	50
	Kiudbetoon (C25/30)	50
	Poorbetoonist laepaneel (5 MPa; ρ=500 kg/m <sup>3</sup> )	250
Siseviimistlus	5	

Mägrruumide puhul paigaldatakse kõigi vahelaed variantide puhul kipspealisvalu ja parketi asemele keraamilised põrandaplaadid (d=8 mm), hüdroisolatsioon (d=0,5 mm)

ning kiudbetoon pealisvalu ( $d=50-70$  mm; min. tugevusklass C20/25). Kiudbetoon pealisvalule antakse 2%-ne kalle trapi suunas.

## 2.7 Energiatõhusus

Hoone ehitusliku lahenduse väljatöötamisel on lähtutud energiaefektiivsuse põhimõtetest. Kõik hoone välispiirded (välisseinad, katuslagi, põrand pinnasel) on piisavalt soojustatud, et hoones oleksid täidetud energiatarbimise ja ruumi soojusliku mugavuse nõuded (Hoone energiatarbimise miinimumnõuded, 2020) ning valitud kolmekordse klaaspaketiga avatäited.

Korterelamu energiavajaduse leidmiseks on kasutatud Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi välja pakutud väikeelamu energiatarbimisarvu lihtsustatud tõendamise kalkulaatorit (Hoone energiatarbimise miinimumnõuded, 2020), kus on arvesse võetud piirdetarindite mahtu ja soojuslähivust, liitekohtade joonsoojuslähivusi ning muud energiakasutusele mõju avaldavaid näitajaid. Käesoleva kortermaja puhul on eeldatud tühisa kaugkütte piirkonda, mistõttu on A-klassi piirnorm kortermajadele (A-klassi ETA -  $105 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) saavutatav ka ilma päikesepaneelide (edaspidi PV) lisamiseta. Asjakohaste keskkonnaandmete ( $\text{CO}_2$ -ekv) ja materjalide taaskasutuse info vähesusest tingitult on PV käesoleva töö piiristusest välja arvatud.

Kaalutud energiakasutus ruumide kütteks, ventilatsiooniõhu ja tarbevee soojendamiseks, seadmete (sh valgustuse), ventilaatorite ning pumpade tööks on tänu tühisale kaugküttele  $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (A-klassi ETA piirarv on  $105 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ). Vastavalt hoone variantidele on aastased tarnitud energiatarbimised kogu kortermaja kohta alljärgnevad:

Tabel 11. Projekteeritud kortermaja variantide aastased energiatarbimised (kWh/aastas).

Hoone variant	Tarnitud elektrienergia (kWh/aastas)	Tarnitud soojusenergia (kWh/aastas)
v1 <sub>RB</sub> - raudbetoon hoone	43153	64958
v2 <sub>CLT</sub> - CLT hoone	43468	65431
v3 <sub>PB</sub> - poorbetoon hoone	43220	65058

Energiavajaduse minimeerimiseks hoones on piirdetarindite projekteerimisel lähtutud piisava paksusega madala soojuseriitvusega ehitusmaterjalide valikust. Käesolevas uurimistöös valgustus-, jahutus-, kütte- ja ventilatsiooniseadmeid ei valita, kuid eeldatakse, et tegemist on energiaefektiivsete seadmetega ning energia kogus ei ületa arvutustes kasutatud väärtusi. Välisseinad on kõigi kolme variandi puhul projekteeritud

soojustlähivusega  $U_c=0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , katuslaed soojustlähivusega  $U_c=0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , põrand pinnasel soojustlähivusega  $U_c=0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

### 2.7.1 Välisseinad

Tabel 12. Projekteeritud kortermaja variantide välisseinte andmed.

Hoone variant	Välisseinte materjalide kihid	Materjalikihi paksus (mm)	Materjali soojuseri-juhtivus $W/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	Tarindi soojustlähivus $W/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
v1 <sub>RB</sub>	Krohv	3	-	0,16
	Krohvialusplaat	12,5	-	
	Õhkvahe/terasroovid	25	-	
	Jäik vill	200	0,034	
	Raudbetoon elementsein (C30/37)	200	2,3	
	Siseviimistlus	5	-	
v2 <sub>CLT</sub>	Voodrilaud peenestatud	20	-	0,16
	Õhkvahe/puitroovid	20	-	
	Tuuletõkkeplaat	30	0,031	
	2 x Mineraalvillaplaat	100+50	0,035	
	CLT-paneel, 5-kihiline (C24; $\rho=480 \text{ kg}/\text{m}^3$ )	200	0,13	
v3 <sub>PB</sub>	Fassaadikate	12,5	-	0,16
	Tuulutusvahe/puitroovid	25	-	
	Poorbetoon, väliskoorik	80	0,13	
	PUR	110	0,029	
	Poorbetoon, sisekoorik	200	0,13	
	Pahtel+siseviimistlus	5	-	

### 2.7.2 Katuslaed

Tabel 13. Projekteeritud kortermaja variantide katuslagede andmed.

Hoone variant	Katuslagede materjalide kihid	Materjalikihi paksus (mm)	Materjali soojuseri-juhtivus $W/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	Tarindi soojustlähivus $W/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
v1 <sub>RB</sub>	2 x SBS-rullmaterjal	6	-	0,13
	Tuulutussoontega jäik vill (60 kPa)	50	0,037	
	2 x Kivivillaplaat (30 kPa)	100+110	0,037	
	Õhu- ja aurutõke, SBS aluskate ( $Z_p=100\cdot 10^9 \text{ m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}/\text{kg}$ )	2	-	
	Õõnes raudbetoonpaneel (HCE265)	265	0,74	
	Siseviimistlus	5	-	
v2 <sub>CLT</sub>	2 x SBS-rullmaterjal	6	-	0,13
	Tuulutussoontega jäik vill 60 kPa)	50	0,037	
	2 x Mineraalvillaplaat (30 kPa)	100+60	0,037	
	Õhu- ja aurutõke, SBS aluskate ( $Z_p=100\cdot 10^9 \text{ m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}/\text{kg}$ )	2	-	
	CLT-paneel, 7-kihiline (C24; $\rho=480 \text{ kg}/\text{m}^3$ )	280	0,13	
	Siseviimistlus	5	-	
v3 <sub>PB</sub>	2 x SBS-rullmaterjal	6	-	0,13
	Tuulutussoontega jäik vill (60 kPa)	50	0,037	
	2 x Kivivillaplaat (30 kPa)	100+50	0,037	
	Õhu- ja aurutõke, SBS aluskate ( $Z_p=100\cdot 10^9 \text{ m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}/\text{kg}$ )	2	-	
	Kiudbetoon (C25/30)	50	2,3	
	Poorbetoonist laepaneel (5 MPa)	250	0,13	
	Siseviimistlus	5	-	

### 2.7.3 Põrand pinnasel

Tabel 14. Projekteeritud kortermaja põrand pinnasel andmed

Põrand pinnasel materjalide kihid	Materjalikihi paksus (mm)	Materjali soojuseri-juhtivus W/(m*K)	Tarindi soojus-läbivus W/(m <sup>2</sup> *K)
Parkett	14	-	0.09
Parketi aluskate	2	-	
Monoliitne raudbetoonplaat (C30/37)	100	2.3	
Geotekstiil	-	-	
Vahtpolüstüreen EPS 120 (pikaajaline veeimavus <2%)	100	0.033	
Radoonitõkketile	0.5	-	
2 x Vahtpolüstüreen EPS 120 (pikaajaline veeimavus <2%)	200	0.033	
Paesõelmed, fraktsioon 2-4 mm	30	2.0	
Tihendatud killustikpinnas	250	2.0	

## 2.8 Loodusvarade säästev kasutamine

### 2.8.1 Olelusringi hindamine

Olelusringi hindamine (ingl *life cycle assessment*, edaspidi lühendatult LCA) ehk elutsükli analüüs on meetod määratlemaks toote või teenuse (edaspidi tootesüsteemi) elutsükli mõju keskkonnale. Olelusringi hindamise raamistiku paneb paika keskkonnajuhtimissüsteemide standardite kogum ISO14000, millest peamisteks on tootepõhised standardid ISO 14040:2006 (elutsüklianalüüsi koostamise juhend) ning ISO 14044:2006 (elutsüklianalüüsi juhised ja nõuded). (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2006). Lisaks on koostatud mitmeid juhendmaterjale LCA läbiviimiseks, millest märkimist väärib rahvusvaheliselt tunnustatud ning enamlevinud Greenhouse Gas Protocol'i poolt koostatud standard „The Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard“, mis aitab kasutajal tuvastada ja määratleda toote igas etapis tekkivad KHG heitmed.

Olelusringi hindamine on lähenemisviis, mis võtab arvesse kogu tootesüsteemi eluea („hällist hauani“ e ingl *cradle-to-grave*) jooksul tarbitavat ressursi- ja energiakulu ning sellest tulenevaid potentsiaalseid keskkonnamõjusid. Hindamisel võetakse arvesse kogu toote elutsükli keskkonnamõju alates toote valmistamiseks kaevandatavatest materjalidest (sh maavarad), lõpetades toote lõpliku jäätmeäitlusega. Olelusringi hindamine on ühtlasi oluline osa tootearendusest, võimaldades kõrvutada sarnaste toodete keskkonnamõjusid, tuvastada peamiseid kitsaskohti tehnoloogiate kasutuses,

selgitada välja peamised reostusallikad tootesüsteemi elutsükli ja muud sarnast. (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2006)

Esmakordselt tõusis LCA päevakorda 1960ndatel, mil hakati rõhku panema tarbekaupadest tuleneva keskkonnamõju uurimisele. Esmased LCA-d keskendusid peamiselt energianalüüsile, jäätmetekkele ning erinevatele toodete pakendamise võimalustele. Kuna teabe jagamine LCA kohta oli rahvusvaheliselt piiratud ning praktiliselt puudusid infovahetuskeskkonnad ühese andmestiku kasutamiseks, rakendati ekspertide poolt väga erinevaid meetodikaid LCA teostamiseks. Antud olukord aga põhjustas suuri erinevusi keskkonnamõju hindamise tulemustes. Perioodi 1990-2000 iseloomustab ühtse raamistiku loomine olelusringi hindamisele, raamistiku standardiseerimine ning teaduskirjanduse areng käsitletaval teemal. Lisaks hoogustus ka teiste hindamismeetodite välja töötamine, nagu elutsükli kulumudel (ingl *Life Cycle costing model*). Tänapäeval, 21. sajandil, on kasvanud nii erinevate osapoolte (eraisikud, suurfirmad, ettevõtjad jne) huvi LCA vastu kui ka võimalused selle teostamiseks – tarkvarad ning verifitseeritud andmebaasid nii lihtsustavad ekspertide tööd kui ka pakuvad oluliselt ühtsemaid tulemusi. (Guinée et al., 2011)

### **2.8.2 LCA ülesehitus**

Olelusringi hindamise meetodiline raamistik on järgnev: (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2006)

- 1) Eesmärgi ja käsitusala määratlemine
- 2) Inventuuranalüüs
- 3) Olelusringi mõju hindamine
- 4) Tulemuste tõlgendamine

Olelusringi hindamise tulemused on sõltuvad igast eelnevast ja järgnevast etapist, mistõttu on lõpptulemuste korrektsus otseses sõltuvuses andmete ja vahetulemuste õigsusest (Bhatia et al., 2011). Ulatuslikuma ja üksikasjalikuma pildi saamiseks on käesolevas uurimustöös lisaks ISO 14040 standardile kokku koondatud ka rahvusvaheliselt tunnustatud ja enimkasutatud GHG Protocoli juhendis „The Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard“ esitatud nõuded ja etapid LCA teostamiseks.

ISO 14040		Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard	
	Raporteerimise ja aruandluse põhimõtted	KHG arvestuses ja inventuuranalüüsis järgitakse üldtunnustatud põhimõtteid - tagatakse andmete ja tulemuste aktuaalsus, läbipaistvus, täpsus.	
	Alusteadmised toote olelusringi hindamisel	Uuritava toote inventuuri koostamisel järgitakse üldtunnustatud olelusringi hindamise põhimõtteid.	
Eesmärgi ja käsitlusala määramine	Eesmärgi ja käsitlusala määramine	Valitakse uuritav toode, talitlusühik (referentsühik), valitakse süsteemi piir (nt hällist hauani), täiendavate KHG-de tuvastamine ja omistamine uuritavale tootele.	
Inventuuranalüüs	Süsteemi piiritlemine	Elutsükli etappide määramine ja piiritlemine. Vastavalt elutsükli etappidele omistatakse sobilikud (peamised) protsessid. Põhjendatult välistatakse teatud protsessid (nt. väike mõju lõpptulemustele). Potentsiaalsete kasutus- ja jäätmekäitlusteppide modelleerimine. Ajaperioodi valik. Maakasutuse muutuse mõju arvestamiseks kasutatud meetodi valik.	
	Andmekogumine ja andmete kvaliteedi määramine	Esmaste (primaarsete) andmete kogumine aruandva ettevõtte kontrolli all olevate protsesside kohta. Esmaste (primaarsete) andmete kogumine aruandva ettevõtte kontrolli alt väljas olevate protsesside kohta. Sekundaarsed andmeallikad ja andmete vaikeväärtused (nt tüüpilised sektorile või tootele). Määratakse andmete kvaliteet ning uuritakse võimalusi kvaliteedi parandamiseks.	
	Allokatsioon	Standardi kohaselt on soovitatav allokatsioon ära jätta seal kus võimalik ning kirjeldada allokatsiooni välistamiseks teostatud tegevusi. Selle teostamisel aga valida meetod: füüsiline, majanduslik vms allokatsioon. Kogu uuritava toote olelusringi jooksul on soovitatav kasutada sama allokatsioonimeetodit.	
	Määramatuse omistamine	Ettevõtte määrab andmete inventuuri määramatuse vahemiku ning kirjeldavad meetodilisi valikuid. Meetodilised valikud hõlmavad kategooriaid, nagu toote kasutus- ja eluea lõpu profiil, ringlussevõtu ja jaotusmeetodid, arvutusmodelid ja GWP väärtuste allikad.	
Olelusringi mõjude hindamine	Kalkuleerimisetapp	Inventuuranalüüsi tulemused teisendatakse referentsühikule ning leitakse iga mõjukategooria indikaatoritulemused. Tulemused korrutatakse läbi 100-aastase GWP väärtusega (emissioonifaktoritega), mille tulemusel saadakse tekkivate emissioonide kogused ühikuga CO <sub>2</sub> -ekvivalenti.	
	Korrektuse tõendamine	Inventuuranalüüsi tulemuste korrektus tõendatakse kolmanda osapoole poolt, kellel puudub huvide konflikt. Ettevõtte tõestab, et nende jagatud ja raporteeritav info on tõene.	
Tulemuste tõlgendamine	Raporteerimine	Raportis esitatakse andmed järgnevate kategooriate kohta: üldinformatsioon ning käsitlusala määramine, süsteemi piiritlemine, liigitamine kategooriatesse, andmekogumine ja andmete kvaliteedi määramine, määramatus, inventuuranalüüsi tulemused, korrektuse tõendamine, vähendamisetpanekud ja inventuurtulemuste jälgimine ajas.	
	Vähendamiseesmärkide seadmine ja inventuurtulemuste jälgimine ajas	Vähendamisetpanekute seadmine pole standardi kohaselt kohustuslik, kuid selle teostamisel, on kohustuslik koostada baasinventuur ning seda vastavalt ümber kalkuleerida, kui baasinventuuri metoodikasse tekivad olulised muudatused. Järgnevates raportites on soovitatav kasutada ühtset referentsühikut, et muutused ajas oleksid kergesti võrreldavad.	

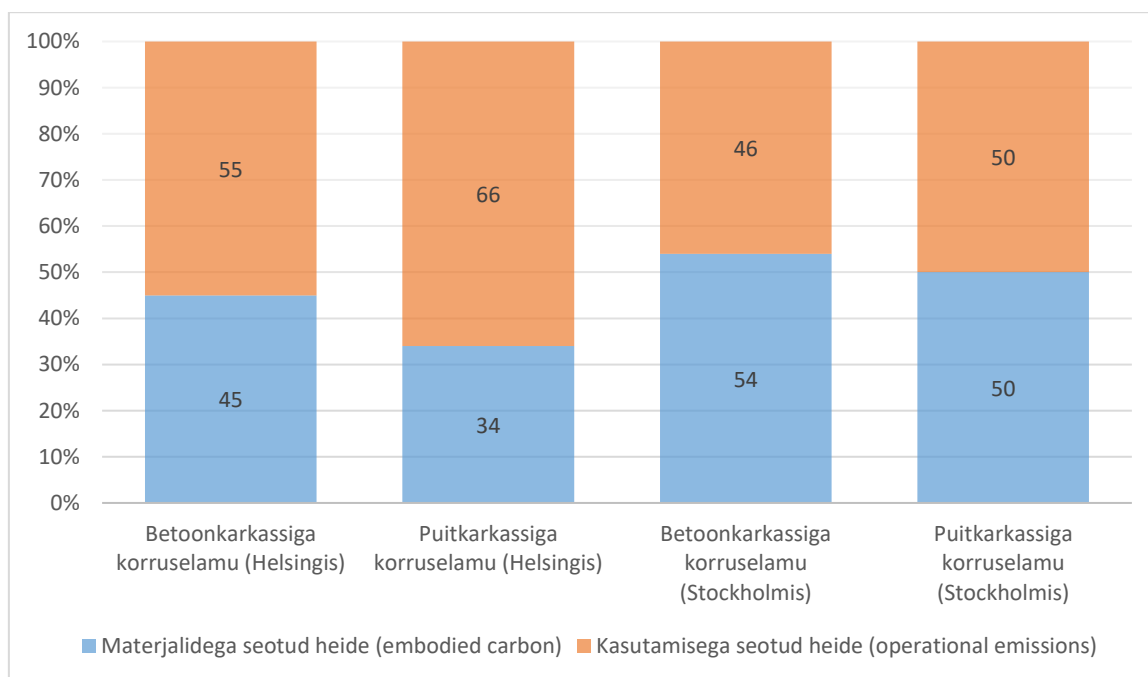
Joonis 3. Olelusringi hindamise meetodiline raamistik. Autori koostatud (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2006; Bhatia et al., 2011) põhjal.

### 2.8.3 Hoone süsiniku jalajalg

Globaalselt tarbivad hooned ära peaaegu 30% toodetavast energiast ning on põhjuseks ligi 40% ülemaailmselt tekkivatest süsiniku emissioonidest (IEA, 2022). Laias plaanis jagatakse hoone elukaare jooksul tekkivad heited kaheks – energiatarbest (*operational GHG emissions*) ja ehitusmaterjalidest tulenev heide (*embodied carbon*) ehk kehastunud süsinik. Energiatarbest tulenev heide on pärit ehitise kasutusel tarbitavast soojus- ja elektrienergiast ning materjalidest tulenev heide pärineb tooraine

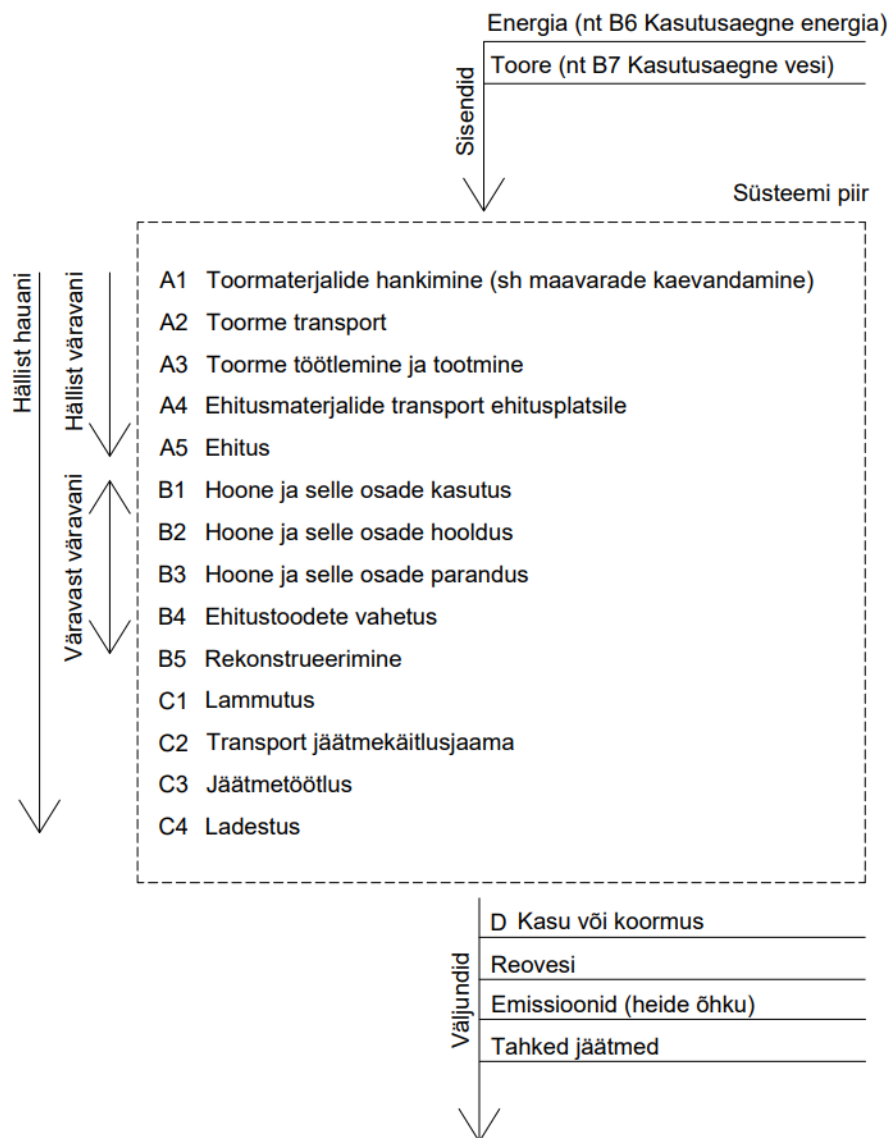
hankimisest, tööstusest, transpordist, hoone ehitusest, remondist ja lammutusest. Suurim energiatarve hoone elukaare jooksul tuleneb hoone kasutusfaasist, mistõttu tagab hoone kõrgem energiatõhusus ka madalamad energiakulud. (Rashid & Yusoff, 2015)

Rahvusvahelise Energiaagentuuri IEA moodustatud teadusrühmad on uurinud materjalist tuleneva heite ja energiatarbest tuleneva heite omavahelist suhet hoone elukaare jooksul, mille tulemusena on selgunud, et energiatõhusates hoonetes on materjaliga seotud heite osakaal vahemikus 20-50% ehitise koguheitest. Üldiselt on suhe kahe heite vahel korrelatsioonis, mistõttu hoone energiatõhususe paranemisel ja väiksemal energiatarbel suureneb materjalidest tuleneva heite suhteline osakaal ning vastupidi. Järgnevalt on esitatud hoone materjalidest ja kasutamisest tekkiva heite jagunemine Soomes projekteeritud ehitiste näitel: (Häkkinen & Kuittinen, 2021)



Joonis 3. Materjali ja kasutamisega seotud heite suhteline jagunemine (Häkkinen & Kuittinen, 2021).

Hoone olelusringi hindamine jaguneb suures plaanis nelja moodulisse – A, B, C ja D, millest esimesed kolm jagunevad omapuhku tütar mooduliteks (B1, B2 jne). Kasvuhoonegaaside (KHG) mõju, kasu või koormus, esitatakse moodulis D, mida küll arvutatakse, kuid tulemustes üldiselt ei arvestata. Viimane kätkeb endas näiteks korduskasutust, ringlussevõttu ning taaskasutust. (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2011)



Joonis 4. Hoone LCA põhimõtteline skeem. Autori koostatud (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2011; Öztaşa, 2018) põhjal.

Kitsaskoht, mis avaldub just ehitussektoris teostatavatele olulusringi analüüsidele, on talitusühiku (ka referentsühik) valik. Nii võib ehitusmaterjali talitusühikuks olla toote mõõtmed (nt tardkivimist valmistatud tellis, standardmõõtmetega 7 x 14 x 28 cm), kaaluline kogus (nt 1 kg erinevat tüüpi telliseid) või ajaline periood (nt 50 või 100 aastat). (Öztaşa, S. K, 2018)

LCA täpsus sõltub paljuski süsinikuajaloo uurimisel tehtud oletustest ja koostatud stsenaariumitest (nt ehitusplatsile jõudva ehitusmaterjali logistika või kasutusaegne energiatarve), sest meetodi abil koostatakse tegelikust olukorrast lihtsustatud mudel. Näiteks on sellest tulenevalt raskendatud kasutusfaasi täpne andmete kogumine, sest

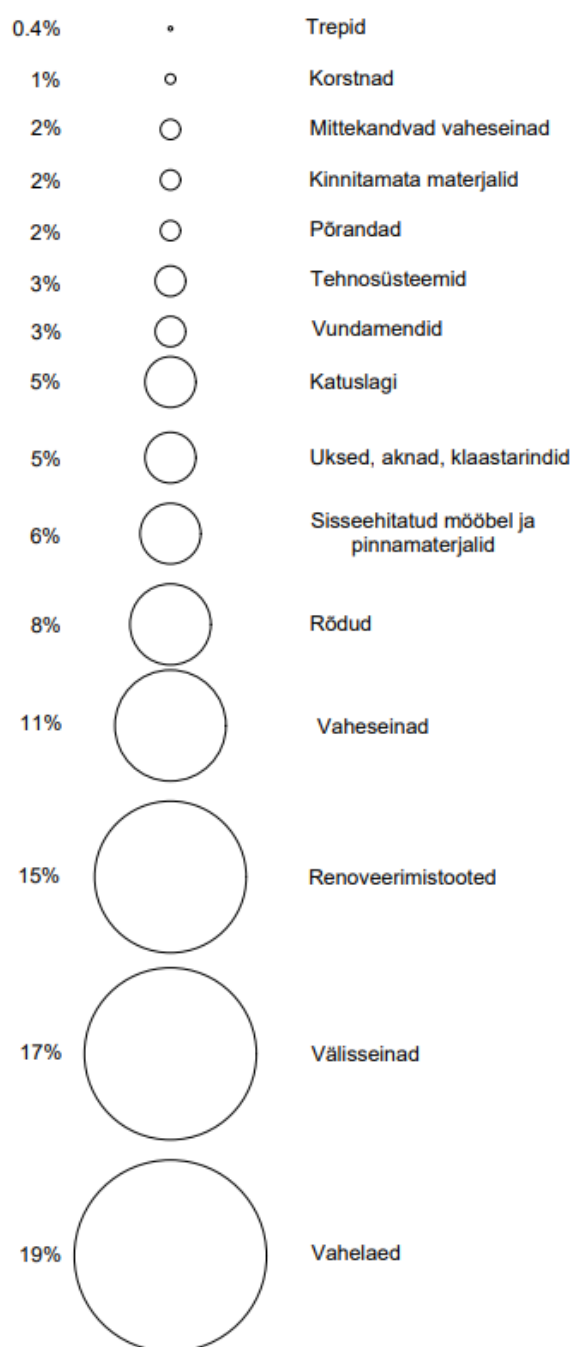


see sõltub tugevalt inimese tarbimisharjumustest. Tähtis osa tulemuste relevantsuse määramisel on raporteerimise läbipaistvus, kuna ka sama objekti kohta koostatavad elutsükli analüüsi tulemused võivad erineda sõltuvalt ekspertide poolt kasutatavatest arvutus- ja hindamismeetoditest, kaastavatest mõjufaktoritest ja protsessidest, süsteemi piiride määratlemisest ja nii edasi. Kui inventuuranalüüsil kogutud andmed ei ole korrektsed või on andmete kättesaadavus piiratud, suureneb arvutuste määramatus ning tulemused võivad erineda tegelikkusest. (FibreNet, 2018)

Hoone energiatarvet on võimalik hinnata aastase tarnitud energia koguse arvelt. Kui vastavad andmed pole kättesaadavad, koostatakse energiatarbimise stsenaarium, kusjuures hindamise aluseks ei ole lubatud võtta energiatarbimise sertifikaadis avaldatud primaarenergiateguritega korrutatud väärtusi. Kui hoonel puudub energiaaudit, on siiski võimalik energiaauditi koostamise põhimõtete järgi hinnata hoone suhtelist energiatarbimist. Hoonete energiatarbimist on võimalik vähendada kas energiatarbimise uusehitise näol või vana elamu renoveerimisel energiatarbimiseks (välispiirete soojuskadude alandamine, väljatõmbeõhu soojussalvestuse parendamine jne). (Häkkinen & Kuittinen, 2021)

Renoveerimisele kuulub ringmajanduse kontekstis eriline tähelepanu, mistõttu on oluline, et ehitised oleksid adapteeruvad ning selle osad hõlpsasti ligipääsetavad, kohandatavad, demonteeritavad ja asendatavad (Technopolis Group et al., 2021). Renoveerimist tuleks ka madalsüsinikehituse puhul olemasoleva hoone puhul alati kaaluda, kui on olemas võimalus renoveerimise teel saavutada sama ruumivajadus uusehitisega. Eeskätt on renoveerimisel tekkivad heitkogused sõltuvad ehitusmaterjalide valikust ning renoveerimisel saavutatavast energiatarbimise tasemest. (Häkkinen & Kuittinen, 2021)

Parima ülevaate saamiseks hoone süsiniku jalajäljest tasub heitkoguseid vaadelda vastavalt hooneosade kaupa. Siinkohal on paslik näitena esitada Soomes koostatud võrdlevad elukaare analüüsid kahe alternatiivse projekteerimislahenduse kohta – puidust ning raudbetoonist tarinditega korterelamu. Käesoleva näite puhul oli betoonkarkass ligi poole suurema süsiniku jalajäljega kui puitkarkass. Korterelamute elukaare heitkogustest ligi 63% tekkis kasutusaegsest energia tarbimisest ning 26% ehitusmaterjalide tootmisest, ülejäänud 11% jagunes ehitamise, renoveerimise ja lammutamise vahel. Ehitusmaterjalide poolt eralduvatest kasvuhooonegaasidest tulenes valdav enamus massiivsetest hooneosadest, nagu välisseinad, vahelaed ja vaheseinad. Järgnevalt on esitatud hooneosadest tulenevate emissioonide ligikaudne jagunemine: (Häkkinen & Kuittinen, 2021)



Joonis 5. Hooneosade suhteline osakaal koguheitest (Häkkinen & Kuittinen, 2021).

Eelnevast näidishoonest tulenevalt on suur osa hoone jalajäljest mõjutatud ehitustoodete valikust. Seetõttu on Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon ISO ja Euroopa Standardikomitee CEN pidanud vajalikuks koostada lisaks hoonete keskkonnatoimivuse hindamise standardile EN15978 ka ehitustoodete valmistamist reglementeeriva standardi EN15804 „Ehitiste jätkusuutlikkus. Keskkonnadeklaratsioonid. Ehitustoodete tootekategooria üldreeglid“. Ehitustoodete

puhul mängib rolli nende keskkonnadeklaratsioon (EPD), mis on III tüüpi keskkonnamärgis, on koostatud vastavalt ISO 14025 juhistele ning annab kvantitatiivset teavet toote elukaare jooksul tekkiva keskkonnamõjude kohta. (Häkkinen & Kuittinen, 2021). Käesolev töö on laiendatud eelprojekti tasemel, kuid projekteerimisfaasis on määratletud hooneosades kasutatavate toodete füüsilised parameetrid hilisema süsiniku jalajälje efektiivsemaks teostamiseks.

Harilikult võetakse hoone elukaare jalajälje hindamise täpsuse aluseks Euroopa standard EN 15978, mille kohaselt võib hindamisprotsessist välja jätta tegurid, mille mõju tervikust jääb alla 1% (nt kipsplaadikruvide vuugivalu), kuid väljajäetud tegurite kogusumma ei ületa 5% (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2011). Inventuuranalüüsil kogutavad andmed (nt ehitusmaterjalide ja tarbitud energia koguste kohta) saadakse hoone projekteerimisprogrammist, kuluarvestuseks koostatud koguste loendist või infomudelitest. Kui viimane on koostatud vaid arhitektimudeli põhjal võtmata arvesse konstruktsioonide või tehnosüsteemide mudelite andmeid, võivad koguste prognoosid olla võrdlemisi ebatäpsed. Praktikast tuleb ette ka olukordi, kus materjalikoguste hindamisel tuleb teha oletusi, sest koguste loendid on ehitustoodete tasandil, kuid enamustel ehitustoodetel puuduvad sealjuures EPD-d. (Häkkinen & Kuittinen, 2021)

#### **2.8.4 Madalsüsinikehituse põhimõtete rakendamine käesolevas uurimistöös**

Euroopa Liidu ja Põhjamaade poliitika suunab üha enam tähelepanu juhtimaks ressursi jätkusuutliku ehituse arendamisesse. Sankelo et al. (2022) on oma juhtumiuuringus tõdenud, et kuigi omavalitsustel ja riigil on võimalik madalsüsinikehitust edendada läbi riigihangete, pole seda võimalust piisavas mahus ära kasutatud. Ringmajanduse ja madalsüsinikehituse põhimõtete kohaselt saab nende rakendamine alguse juba hoone planeerimisfaasis, kus mõeldakse läbi nii materjali- kui lammutusjäätmete minimeerimise võimalused kui ka jäätmete taaskasutamine. (Sankelo et al., 2022)

Ringmajanduse hierahia kohaselt on ideaalolukorraks olemasoleva hoone säilitamine ja renoveerimine, mis läbi pikendatakse hoone eluiga ja hoitakse ära uue hoone ehitus (Technopolis Group et al., 2021; Sankelo et al., 2022). Kui uue hoone ehitust pole võimalik ära hoida, nt juhul kui renoveeritava hoone jalajälg jääb samasse vahemikku uue hoone ehitusega, tasub kandekonstruktsiooni materjalina kasutada madalama keskkonnamõjuga materjali, nagu puit (Sankelo et al., 2022). Seetõttu on käesolevas uurimistöös Eestis peamise kortermaja ehitusmaterjalina kasutatava raud- ja poorbetooni kõrval ühe variandina lisatud põhikonstruktsiooni materjalina ka ristkihtliimpuit (CLT).

Reaalses olukorras on oluline juba ehitise planeerimisetappi kaasata võimalikult suur osa ehituse väärtusahelast, sh ehitusmaterjalide ja -toodete pakkujad, investorid ja ehitajad, et juba algaasis arvestataks kogu hoone elukaart puudutavate otsustega. Mitmed uurimustööd on viidanud ühtsete andmebaaside puudumisele, mistõttu on piiratud ehitussektorit puudutavate regionaalsete andmete kogumine ja kasutamine. (Technopolis Group et al., 2021)

Eestis oli Statistikaameti andmetel 2018. aastal kasutuseta umbes 24% eluruumidest (Technopolis Group et al., 2021). Oluline on ehitatud keskkonna funktsionaalsus ja terviklikkus, mistõttu on käesolevas uurimustöös korterelamu planeeringul lähtutud ruumide funktsionaalsest kasutusest – eluruumide paiknemine ja kasulik pindala, 1-2 tualettruumi korteri kohta, korterid kahe- kolme- ja neljatoalised.

Tehnosüsteemidel on fundamentaalne roll energiatõhususe tagamisel. Käesoleva töö puhul on korterelamu tehnosüsteemide šahtid ja märgruumid paigutatud üksteise peale, mistõttu on projekteerimisel ära hoitud torustike ja kanalite ning nende isolatsioonimaterjalide üleliigne tarbimine. Kuna hoone tarbib kasutusajal energiat, tagab suurem elamu kasutajate hulk efektiivsema energia tarbimise. Antud olukord on osaliselt tulenev asjaolust, et kortermajas on ruutmeetri kohta vähem pinnaseteid, vundamenti ning välispiirdeid võrreldes üksikelamuga. (Häkkinen & Kuittinen, 2021)

Ringlussevõttus peitub oluline kasvupotentsiaal, kuid käesoleval hetkel on peamiseks takistuseks ringlussevõetavate materjalide kvaliteedi tõendamise süsteemi puudumine. Valdavalt on tegu madala väärtusega taaskasutusega, mitte ringlussevõetuga (Technopolis Group et al., 2021). Lisaks leidis Sankelo et al. (2022) oma juhtumiuuringute põhjal, et hoone jalajälje märgatavaks vähendamiseks oleks tarvis, et korduskasutus oleks laialdane ning seda spetsiifiliselt kandekonstruktsioonide materjalides, kuna viimased panustavad ulatuslikult hoone süsiniku jalajälge. (Sankelo et al., 2022)

Jäätmetekke vähendamiseks on käesoleva korterelamu projekteerimisel lähtutud põhimõttest, et hoone moodulid oleksid 600 mm vahemaa tagant. Seda põhjusel, et valdav enamus ehitusmaterjale on pikkusega 600 mm (või selle kordne) ning seeläbi vähendatakse materjalide raiskamist. Kõik projekteeritava korterelamu ehitusavad (aknad, ukсед) ja kandvad seinad, sh liftipüstak, on planeeritud moodulite põhiselt.

Ehituskohal ja pinnasel on oluline roll hoone süsinikujäljes, sest osad pinnased vajavad vundamentide ehitusel vaiamist ja stabiliseerimist, mille jalajälg võib kohati ulatuda

suuremaks kui terve maapealse osa süsiniku jalajälg (Häkkinen & Kuittinen, 2021). Käesolevas projektis ei ole ehituskoha hindamisele olulist rõhku pandud, mistõttu on eeldatud külmakerke ohtu 0.6 m sügavusel maapinnast ning radooniohu tõkestamiseks paigaldatud I korruse põranda perimeetrile radoonitõkkele. Mikrokliimat ja loodusväärtusi pole projekteerimisel arvesse võetud.

## **2.9 Puudega inimeste erivajadused**

Eestis on puudega inimeste erivajadustest tulenevad nõuded ehitisele (2018) kehtestatud ettevõtlus- ja infotehnoloogiainistri määrusega nr 28, millele tuginedes on käesoleva ehitise sissepääsude, nii peasissekäikude kui hädaväljapääsude, ette planeeritud astmeteta pandus ning vaba horisontaalne liikumisruum vaba pöörde läbimõõduga 1,5 m, kusjuures kaldpind ei lõppe vahetult ukse sissepääsu ees. Hoonesisene liikumistee on planeeritud mittelibisevate pindadega ja kõik üldkasutatavad pinnad, nt postkastid, on lihtsasti ligipääsetavad. Ehitise mõlemas trepikojas on lift, mille kandevõime ületab >220 kg ning võimaldab elektrilise liikumisabivahendi teisaldamist. (Puudega inimeste erivajadustest tulenevad nõuded ehitisele, 2018)

Ehitise välisuste (pea- ja hädaväljapääsude) valgusava laius on 1,2 m ja kõrgus 2,3 m, korterite välisustel vastavalt 1,0 m ja kõrgus 2,3 m ning korterite siseuksed (tubadevahelised) vastavalt 0,9 m ja kõrgus 2,1 m. Hoones paiknevatele avalikele ruumidele, nagu trepikojad, koridorid ja panipaigad, on varustatud selgeltloetavate viitadega (piktogrammidega). Üldkasutatava pinna valgustus on piisav ning energiasäästlikkuse ja erivajadustega inimeste vajadusi arvestavalt liikumisanduril põhinev. (Puudega inimeste erivajadustest tulenevad nõuded ehitisele, 2018)

Puudega inimeste erivajaduste tagamiseks hoone variantide puhul erisusi ei esinenud.

## **2.10 Ehitise toimivus, koostoimimisvõime ning ühilduvus**

Ehitusseadustikule tuginedes peavad kogu ehitusprojekt ja selle osad olema omavahel kooskõlas ja toimivad. Seal hulgas sätestab asjatundlikkuse põhimõte (§ 10), et ehitusprojekti osalistel peavad olema eripärased oskused ja teadmised tagamaks projekti, sh ehitise, osade ühilduvust ja toimivust. (Ehitusseadustik, 2023)

Käesoleva töö puhul on ehitise kui terviku projekteerimisel lähtunud kehtestatud nõuetest selliselt, et ehitise oleks ohutu nii selle kasutajatele kui keskkonnale. Seal hulgas on projekteerimisel tuginetud Ehitusseadustikule ning asjakohastele teadmiste ja juhenditele (peamiselt standardid). Projektiga on tagatud kogu hoone, sh selle osade, loogiline kokkusobivus ja koostoimimine.

## **2.11 Kasutusest tulenevad seisundinõuded, sh korrashoiunõuded**

Kogu ehitise eluea jooksul peab olema tagatud selle kasutusotstarbe kohane ja heaperemehelik käitumine. Ehitisele ja selle korrashoiule kehtivad nõuded määratletakse hoone hooldus- ja kasutusjuhendiga, mille koostab ehitise ehitanud isik, arvestades muuhulgas projekteerijalt saadud sisendit. Soovituslikult on hooldusjuhendisse lisatud ka teave auditeerimise kohustuslikkuse kohta, kusjuures hoonet auditeeriv isik peab olema pädev ja erapooletu. Hooldusjuhend pole kohustuslik, kuid selle olemasolu ja nõuete järgimine ei välista omaniku vastutust ehitise kasutusest tulenevate ohtude korral. (Ehitusseadustik, 2023)

Hooldusjuhend määrab ühtlasi ära hoonetes paiknevate tehnosüsteemide ülevaatused ja tehnilised kontrollid. Ehitise hooldus ja kasutamine ei või põhjustada selle kasutajatele ootamatuid ohte, nagu libisemine või kukkumine. Samuti ei tohi hoone projekteeritud konstruktsiooni lahendused ehituse või kasutuse tagajärjel, näiteks valesti paigaldatud soojustus, mis vähendaks sisekliima kvaliteeti. Igal juhul peab vältima olukordi, kus ebapädev hooldamine hoone ohutust ohtlikuks muudaks. (Justiitsministeerium, 2013)

Tagamaks hoone ja selle osade võimalikult pikka eluaega, määratakse hoone hooldusraamatus objekti spetsiifikast tulenevalt korrashoiuperioodid ja hooldusintervallid. Sõltuvalt valitud seadmestikest, kasutatavatest materjalidest ning koormus- ja kasutustingimustest erinevad ka hooneosade korrashoiuperioodid. Igale hoone osale ja süsteemile on määratud ajavahemikuna ülevaatusintervall, mille möödumisel kontrollitakse ehitiseosa seisukorda ja töökindlust. Ehitise ja selle osade tehnilise kasutuse lõppedes kuuluvad vastavad osad väljavahetamisele. (Eesti Ehitusteabe Fond, 2008)

## **2.12 Ehitise ja selle asukoha märgistamine**

Ehitise, sh selle asukoha, andmed kantakse Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi poolt hallatavasse Ehitisregistrisse (EHR). Viimase eesmärgiks on administreerida ja

anda teavet veel kavandatavate kui ka juba olemasolevate ehitiste andmete ja menetlemise kohta. Hoone asukoha määramisel ja märgistamisel tuleb arvestada vastava piirkonna planeeringute ja avalik-õiguslike kitsendustega (nt tehnovõrkude ja -raajatistega), sh peab ehitis olema kooskõlas nii riigi kui kohaliku omavalitsuse (KOV) eriplaneeringutega. Vajadusel viiakse läbi ehitusuuringud, nt riskianalüüsid, ehitise asukoha sobivuse tõendamiseks. Tingimused ehitusuuringutele on kehtestatud vastava valdkonna ministri määrusega ning vastavate uuringute tulemused esitatakse samuti ehitisregistri koosseisus. (Ehitusseadustik, 2023)

Käesoleva töö puhul on kortermaja asukohaks arvestatud Harju maakonnas paiknevat Tallinna linna, kuid projekti staadiumist johtuvalt pole täpsustatud projekti piirkonda. Tulenevalt antud asjaolust, pole võetud arvesse ka piirkonnas potentsiaalselt paiknevaid kitsendusi. Samuti ei toimu ehitise märgistamist Ehitisregistrisse.

## 3 MEETODID

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks on koostada Eestisse projekteeritud kortermaja variantidele süsiniku jalajälje arvutus tuginedes olelusringi hindamise meetodikale (LCA). Töö tulemusena selgitatakse välja järgnevad aspektid:

1. Määratleda erisused materjalide ja hooneosade mahtudes sõltuvalt põhikonstruktsiooni materjali valikust.
2. Tõsta esile erisused hoonete süsiniku jalajälje väärtustes sõltuvalt põhikonstruktsiooni materjali valikust.
3. Kaasata olelusringi hindamise moodul D rõhutamaks süsiniku jalajälje väärtuse kõrval ka materjalivalikust tulenevat korduskasutust ja ringlussevõtupotentsiaali.

### 3.1 Arvutusmeetod ja kasutatud tarkvara

Praktilise osana teostati kõigile kolmele hoone variandile ( $v_{1RB}$ ,  $v_{2CLT}$  ja  $v_{3PB}$ ) süsiniku jalajälje arvutus, mis kvantifitseerib olelusringi hindamise ehk LCA (*Life Cycle Assessment*) abil globaalse soojenemise potentsiaali (GWP ehk *Global Warming Potential*) hoone elutsükli jooksul (Kalamees et al., 2021a). Vastav analüüs viidi läbi tarkvaraga One Click LCA, vaatlusperioodiks on standardikohaselt määratud 50 aastat ja referentsühikuks on tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalent/m<sup>2</sup>.

Eestis kavandatav arvutusmeetod ehitussektoris teostatavaks jalajälje arvutuseks põhineb standardil ISO 14040, Euroopa standarditel EN 15804 ja EN 15978, Euroopa Level(s) raamistikul ning rahvusvahelistel parimatel tavadel (Kalamees et al., 2021a). Käesolevas projektis süsiniku jalajälje arvutusteks kasutatav tarkvara One Click LCA on kooskõlas kõigi eelpool nimetatud standardite ja raamistikuga, mistõttu on see kujunenud juhtivaks platvormiks hoonete jalajälje arvutuste teostamisel. Tarkvara usaldusväärsus on tagatud sõltumatu kolmanda osapoole verifitseerimisega, mille on läbiviinud The Instytut Techniki Budowlanej (ITB) (One Click LCA, n.d a).

Mitmed allikad (Sankelo et al., 2021; Technopolis Group et al., 2021; Kalamees et al., 2021a) on viidanud ühtse Eesti-sisese andmebaasi arendamise vajalikkusele, kus hetkeseisuga on kokku kogutud vaikeväärtused 47-le enamkasutatud ehitusmaterjalile. Kuna Eestis kavandatava meetodika andmebaas ehitusmaterjalide kohta on veel täiendamisel ning loodud tööriist pole mõeldud täiemahuliseks kasutuseks ärilise vahendina (Kalamees et al., 2021a), viidi käesoleva projekti arvutused läbi One Click



LCA tarkvaras. One Click LCA pakub kasutamiseks ülemaailmselt suurimat ehitusmaterjalide andmebaasi, kuhu on kokku koondatud üle 150 000 verifitseeritud andmepunkti (*data points*) nii privaatsetest kui avalikest andmebaasidest (One Click LCA Ltd, 2021).

Heale tavale tuginedes peaks LCA koostamisel andmebaasidest valima originaalsele ehitusmaterjalile lähimate omadustega materjali. Silmas tuleb pidada aga projekti staadiumit, mis määrab ära, kui spetsiifilisi toote- või materjalipõhiseid andmeid on vaja kasutada – eskiisi ja eelprojekti staadiumis on soovitatav valida keskmised andmed materjalikategooria/grupi kohta (One Click LCA Ltd, 2021). Käesoleva uurimistöo ehitusprojekt on koostatud eelprojekti staadiumis, mistõttu on ehitusmaterjalide kohta esitatud küll nende füüsilised omadused, kuid mitte spetsiifilist toodet ja tootjat.

Materjalide ja toodete valikul tarkvara andmebaasist, juhitud järgnevast prioriteetsuse järjekorrast: (One Click LCA Ltd, 2021)

1. Konkreetse tootjapõhine EPD
2. Tehniliselt sarnane toode kohalikult tootjalt
3. Tootekategooria tasemel EPD või LCA
4. Keskmised LCA andmed toote kohta (kindel toode teiselt tootjalt)

Pärast inventuuranalüüsi koostamist toimub tulemuste arvutamine, mis on automatiseeritud One Click LCA tarkvara poolt ning järgib võrdlemisi lihtsaid põhimõtteid, mis on kasutusel ka Eesti süsinikujälje meetodis: (Kalamees et al., 2021a)

1. Materjalidest tulenev heitekogus ( $\text{kg CO}_2\text{-ekv}$ ) = materjali mass (kg) x heitekoefitsient ( $\text{kgCO}_2\text{e/kg}$ )
2. Transpordist tulenev heitekogus ( $\text{kg CO}_2\text{-ekv}$ ) = mass (kg) x veokaugus (km) x heitekoefitsient ( $\text{kgCO}_2\text{e/tkm}$ )
3. Energiatarbest tulenev heitekogus ( $\text{kg CO}_2\text{-ekv}$ ) = tarnitud energia ( $\text{kWh/m}^2\text{a}$ ) x heitekoefitsient ( $\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$ )

Kusjuures üks peamisi erinevusi Eesti meetodikas võrreldes Euroopas kasutatava meetodika on, et tarnitud elektrienergia hulka arvestatakse ka seadmete elekter (Kalamees et al., 2021a).

## 3.2 Käsitlusala

Käesoleva uurimistöo praktilise osa käsitlusala kattub Eestis kavandatava meetodi hindamisalaga. Käsitlusalast on välja jäetud moodulid B1-B3 ning B7 andmete vähesuse

ja madala mõju tõttu. Samuti pole arvesse võetud moodulit B5, sest vaatlusperioodi (50 aastat) jooksul ei eeldata vajadust suuremate renoveerimistöde järele. (Kalamees et al., 2021a)

Tabel 15. Käesoleva projekti LCA käsitusala

Moodulid	Kaasatud käesolevasse töösse
A1-A3 tooteetapp	X
A4-A5 ehitusetapp ja transport	X
B1-B3 kasutus, hooldus, remont	-
B4 asendamine	X
B5 renoveerimine	-
B6 kasutusaegne energia	X
B7 kasutusaegne vesi	-
C1-C4 lõppkäitlusetapp	X
D tulu ja koormused	X

Korteremaja variantide (v1<sub>RB</sub> - raudbetoon, v2<sub>CLT</sub> - CLT ja v3<sub>PB</sub> - poorbetoon) projekteerimisel määratud ehitusmaterjalid ja nende vasted tarkvaras One Click LCA on leitavad töö lisast 1. Tarkvaras valitud ehitusmaterjalide kohta on esitatud iga materjali/toote keskkonnamõju (GWP ühikuga kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg) ning materjali hindamise päritolu riik.

Alljärgnevalt on esitatud materjalide tundlikkuseanalüüs, mille eesmärgiks on kõrvutada One Click LCA tarkvaras valitud materjalide sobivust Eesti süsinikujälje meetodi jaoks kogutud ehitusmaterjalide keskmiste andmetega.

Tabel 16. Tundlikkuseanalüüs Eesti ehitusmaterjalide andmebaasi ja One Click LCA tarkvaras kasutatud materjalide vahel.

Materjalid	Eesti ehitusmaterjalide andmebaasi GWP (kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg) (moodulid A1-A3)	One Click LCA tarkvaras valitud materjalide GWP (kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg) (moodulid A1-A3)	Kas on kasutatud toote EPD-d	Kas GWP-s on arvestatud määramatuse tegurit
Armatuur	3,05	2,89	EI	EI
Ehitusteras	3,32	3,66	EI	EI
Eeltoodetud õõnespaneel	0,21	0,17	EI	EI

Tabel 16 järg. Tundlikkuseanalüüs Eesti ehitusmaterjalide andmebaasi ja One Click LCA tarkvaras kasutatud materjalide vahel.

Eeltoodetud betoonelement (seinas)	0,23	0,21	JAH	JAH
Kuivbetoon C25/30	0,14	0,11	EI	EI
Kuivbetoon C30/37	0,15	0,12	EI	EI
Poorbetoon	-	0,32	JAH	JAH
CLT	0,26	0,12	JAH	EI
Kivivill	1,58	1,31	EI	EI
Klaasvill	2,93	1,01	JAH	EI
PIR/PUR	4,37	3,22	EI	EI
XPS	3,54	2,46	JAH	EI
EPS	3,71	2,95	JAH	EI

## 4 TULEMUSED JA ANALÜÜS

Järgnevalt on esitatud süsinikujälje arvutuste tulemused iga kortermaja variandi (v1<sub>RB</sub>, v2<sub>CLT</sub>, v3<sub>PB</sub>) kohta.

Tabel 17. Projekteeritud kortermaja variantide süsiniku jalajälje arvutuste tulemused.

	v1 <sub>RB</sub> - raudbetoon	v2 <sub>CLT</sub> - CLT	v3 <sub>PB</sub> - poorbetoon
Kogu hoone jalajalg GWP ( <b>tonni CO<sub>2</sub>-ekv</b> )	1574	1417	1510
Kehastunud süsiniku kogus (moodulid A1-A4, B4-B5, C1-C4) ( <b>kg CO<sub>2</sub>-ekv/m<sup>2</sup></b> )	554	463	528
Kandestruktuuride süsinikujälje osakaal kehastunud süsiniku kogusest (%)	63,4	44,6	60,0
Kandestruktuuride süsinikujalg ( <b>tonni CO<sub>2</sub>-ekv</b> )	487	250	409
Tehnosüsteemide osakaal kehastunud süsiniku kogusest (%)	13,8	20,1	15,4
Energiatarbest (elektri- ja soojusenergia) tuleneva GWP osakaal kogu jalajäljest (%)	52,2	60,5	55,3
Moodul D ( <b>kg CO<sub>2</sub>-ekv</b> )	-169 623	-288 329	-119 430
Ringlussevõtupotentsiaal (%)	26	45	25

Üldlevinud metoodika kohaselt jäetakse moodul D kogu hoone süsinikujäljest arvestamata ning hinnatakse eraldiseisvalt (vastavalt standardile EN 15978). Moodul D kaasab väljaspoole olelusringi jääva kasu ja koormuse tulenevalt hoone ehitusel kasutatud materjalidest ja tarnitud energiast. Moodul D abil hinnatakse alljärgnevaid aspekte pärast toote elutsükli lõppu: (Kalamees et al., 2021b)

- Materjalide korduskasutus: hinnatakse taaskasutatavate materjalide mõju asendatava materjali suhtes
- Materjalide ringlussevõtt: hinnatakse materjalide ringlussevõtu määra kasutusest kõrvaldatud materjali alusel

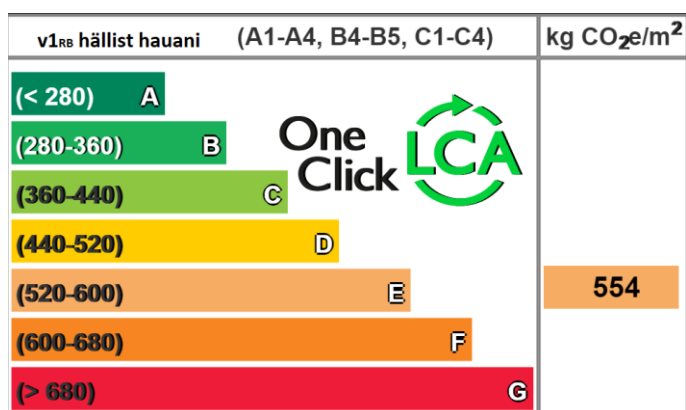
- Energiatootmine materjalidest: hinnatakse põletamisele minevate materjalide saadava energiakoguse alusel
- Eksporditud energia: siinkohal arvestatakse võrku müüdnud energia (elektri-, soojus- ja jahutusenergia) aastaseid koguseid.

Ringlussevõtu potentsiaali hindamisel kaasatakse One Click LCA tarkvaras arvutustesse kaalumistegurid, mis sõltuvalt kasutatud materjali eluea lõpu stsenaariumist (*end of life*) annavad punkte rohkemal või vähemal määral (One Click LCA Ltd, s.a.):

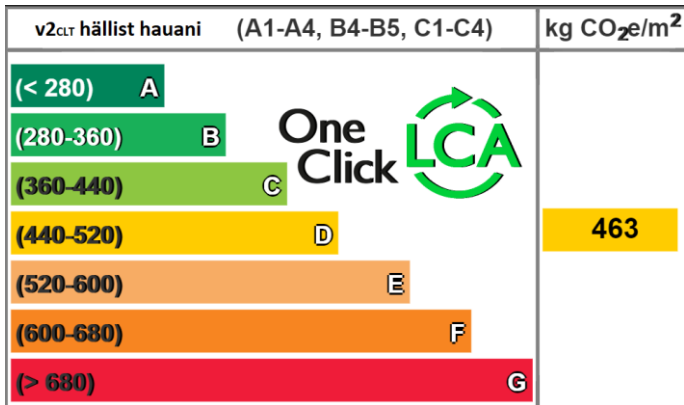
- Materjalide taaskasutus: 1 punkt
- Materjalide korduskasutus: 1 punkt
- Korduskasutus madalama materjalina: 0,5 punkti
- Materjali korduvkasutus energiana: 0,5 punkti
- Materjalide ladestamine: 0 punkti

One-Click LCA tarkvaras on olemas võimalus oma arvutustulemusi võrrelda sama piirkonna keskmistatud väärtustega. Selleks on tarkvaras olemas mõõdupuu (*Carbon Heroes Benchmark*), mis kategoriseerib arvutatud hoone jalajälje vastavalt kehastunud süsiniku kogusele erinevatesse kategooriatesse – A kuni G. Vastav mõõdupuu käsitleb sama funktsiooni ja köetava pinna suurusega hooneid ning tugineb arvutustes standarditele EN 15978 ja ISO 21930. Käesoleva töö puhul on mõõdupuu aluseks Põhja-Euroopa uute kortermajade ehitusprojektid, mis on koostatud One Click LCA tarkvaras ning verifitseeritud vastavate ekspertide poolt (One Click LCA Ltd, n.d b).

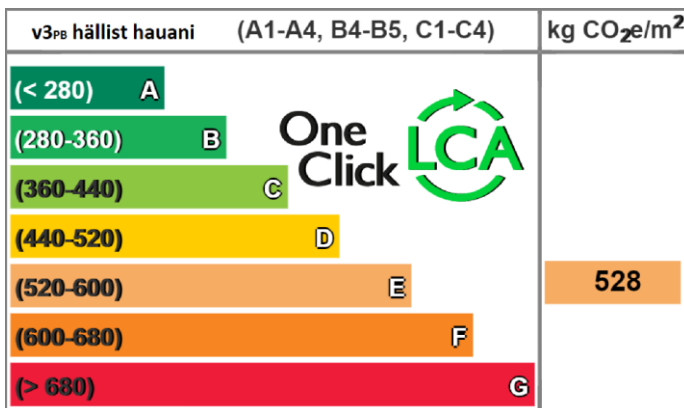
Alljärgnevalt on esitatud projekteeritud kortermajade võrdlus One Click LCA tarkvara mõõdupuuga, mille tulemused on ühtlasi esitatud ka tabelis 17:



Joonis 6. R/b hoone v1<sub>RB</sub> kehastunud süsiniku koguse võrdlus mõõdupuuga.

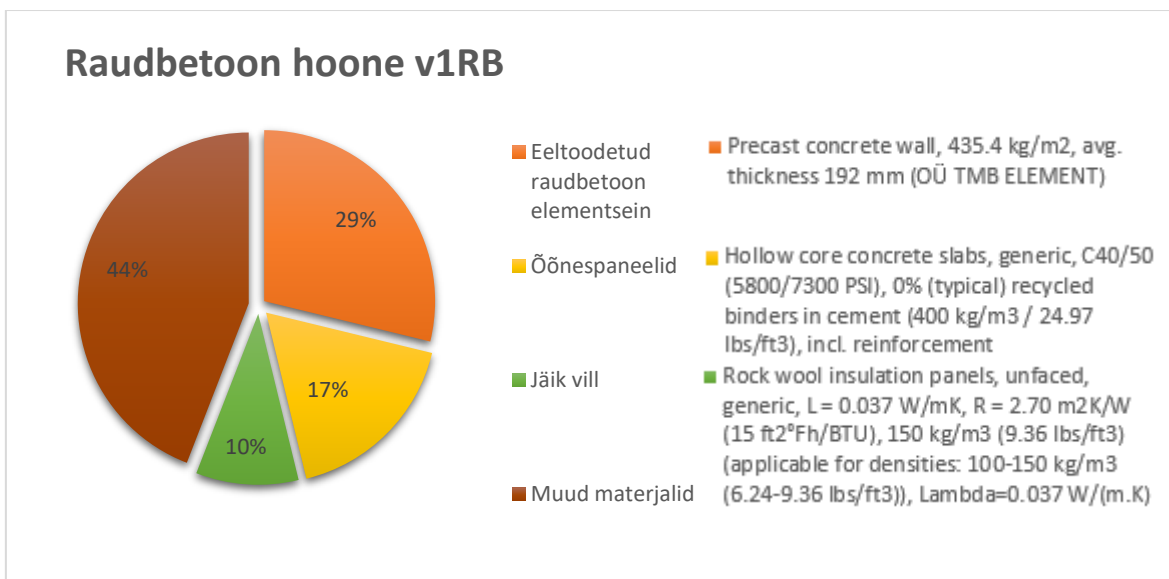


Joonis 7. CLT hoone v2<sub>CLT</sub> kehastunud süsiniku koguse võrdlus mõõdupuuga.

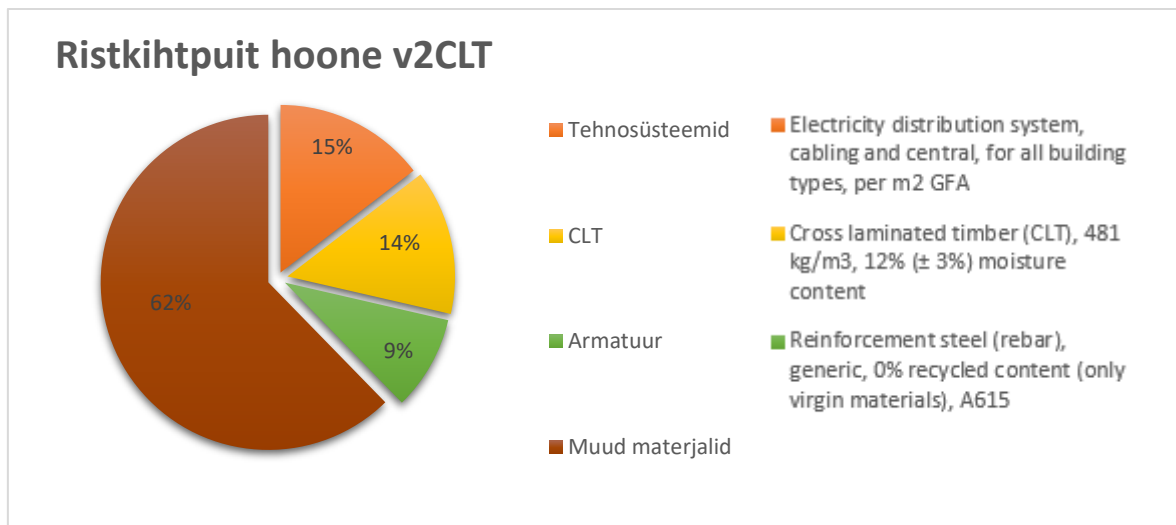


Joonis 8. Poorbetoon hoone v3<sub>PB</sub> kehastunud süsiniku koguse võrdlus mõõdupuuga.

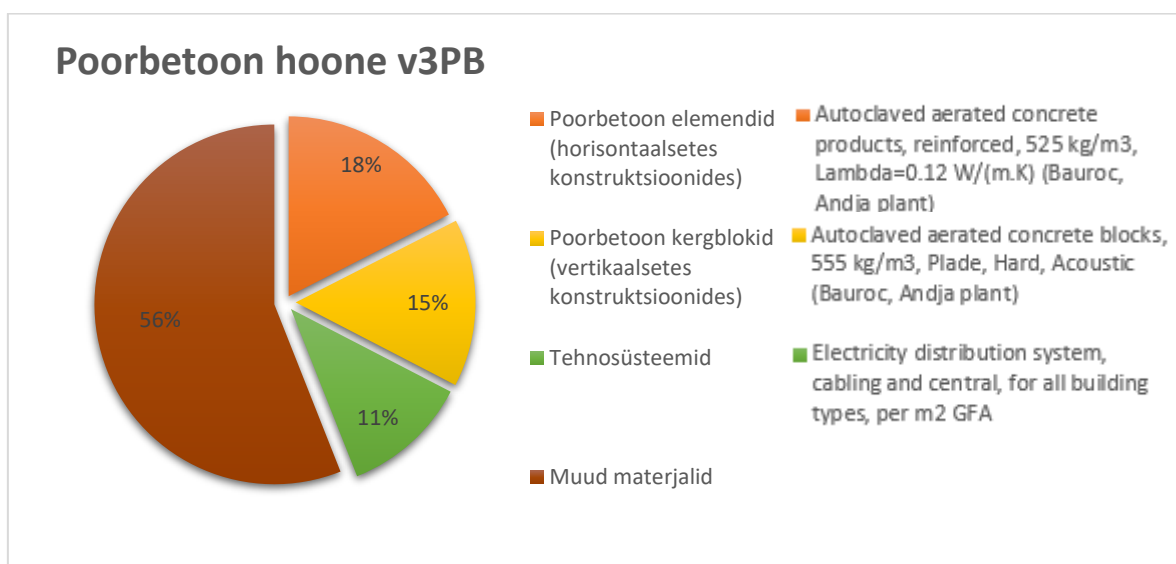
Alljärgnevalt on esitatud iga hoone kohta kolm peamist ehitusmaterjali, mis moodustavad hoone kehastunud süsiniku väärtusest (moodulites A1-A3) suurima osa.



Joonis 9. Ehitusmaterjalid, mis moodustavad suurima osaluse moodulite A1-A3 jalajäljest raudbetoonist hoone v1<sub>RB</sub> puhul.



Joonis 10. Ehitusmaterjalid, mis moodustavad suurima osaluse moodulite A1-A3 jalajäljest ristkihtpuidust hoone v2<sub>CLT</sub> puhul.



Joonis 11. Ehitusmaterjalid, mis moodustavad suurima osaluse moodulite A1-A3 jalajäljest poorbetoonist hoone v3<sub>PB</sub> puhul.

Hooneosade suhteline osakaal projekteeritud kortermajade koguheitest on esitatud alljärgnevas tabelis. Tulemuste asjakohasemaks võrdlemiseks on tabelisse kaasatud käesolevas töös varasemalt esitatud hooneosade osakaal (Joonis 5) tulenevalt Häkkinen & Kuittinen (2021) teosest "Madalsüsinikehituse suunas. Hindamise ja projekteerimise käsiraamat".

Tabel 18. Hooneosade suhteline osakaal kogu hoone jalajäljest (GWP).

	Häkkinen & Kuittinen (2021) (%)	v1 <sub>RB</sub> – raudbetoon (%)	v2 <sub>CLT</sub> – CLT (%)	v3 <sub>PB</sub> – poorbetoon (%)
Vahelaed	19	19,5	20,9	23,3
Välisseinad	17	16,9	4,9	10,8
Vaheseinad (mittekandvad + kandvad)	13	13,4	10,0	10,3
Rõdud	8	8,7	10,5	9,3
Vundamendid	3	3,0	4,4	3,3
Katuslagi	5	9,2	6,8	10,7
Põrandad (põrand pinnasel)	2	8,1	11,8	9,0
Tehnosüsteemid	3	13,8	20,1	15,4

Üheks süsiniku jalajälje meetodi kitsaskohaks on tehnosüsteemide materjalikulu arvestamine. Tehnosüsteemide süsinikujälje leidmiseks tugineti Eesti süsiniku jalajälje metoodikale, kus tehnosüsteemidest tekkivat keskkonnamõju hinnatakse vastavalt hoone tüübile (käesoleva töö puhul kortermaja) ja köetavale pindalale. Eesti metoodika tugineb Soome Keskkonnainstituudi (SYKE) poolt hallatavatel andmetel, mille kohaselt kortermaja tehnosüsteemide kehastunud süsiniku kogus (moodulites A1-A3) on 42 kg CO<sub>2</sub>-ekv/m<sup>2</sup> ning eluiga 25 aastat (Laasonen et al., 2021).

Iga kortermaja tehnosüsteemide andmed (kehastunud süsiniku kogus) modelleeriti One Click LCA tarkvarasse (tabel 21), nii et oleks saavutatud sama kehastunud süsiniku kogus, mis SYKE andmete põhjal. Järgnevalt on esitatud tehnosüsteemide kehastunud süsiniku kogus One Click LCA tarkvaras.



Tabel 19. Kortermaja variantide tehnosüsteemide kehastunud süsiniku andmed.

	v1 <sub>RB</sub> - raudbetoon	v2 <sub>CLT</sub> - CLT	v3 <sub>PB</sub> - poorbetoon
Kõetav pindala (m <sup>2</sup> )	1288,3	1297,7	1290,3
Tehnosüsteemide kehastunud süsiniku kogus (Moodulid A1-A3) (tonni CO <sub>2</sub> -ekv)	52	52	52
Tehnosüsteemide eluaja jooksul kehastunud süsiniku kogus (tonni CO <sub>2</sub> -ekv)	106	106	106
Tehnosüsteemide osakaal kehastunud süsiniku kogusest (%)	13,8	20,1	15,4

## 4.1 Arutelu

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli kõrvutada kortermajade peamise konstruktsioonimaterjali valikust tulenevaid erisusi hoone süsinikujälje arvutuste vaatest. LCA võrdlusarvutus teostati igale hoonele kui tervikule võttes arvesse insenertehnilisi erisusi konstruktsioonides ja sõlmlahendustes.

Tuginedes eelnevalt töö käigus läbitöötatud kirjandusele, moodustas projekteeritud korterelamute kasutusaegne energia kogu hoone süsinikujäljest Eestile omase osakaalu: 50-60%. Võrdlemisi suur kasutusaegse energia kliimamõju on tingitud Eesti energiatootmise süsinikumahukusest, mis on kõrgem kui enamusel meie naaberriikidel, kelle elektrienergiast moodustab märgatava osa ka taastuenergia (Rohetiiger, 2023; Sankelo et al., 2022; Häkkinen & Kuittinen, 2021). Eeldusel, et taastuenergia osakaal ning hoonete energiatõhusus ajas kasvab, muutub kasutusaegse energia osakaal hoone jalajäljest väiksemaks ning kasvab kehastunud süsiniku mõju. Taastuenergia olemasolu üksinda aga ehitatud ruumi jalajälge ei vähenda, mistõttu tuleb hoonete projekteerimisel rõhuda ka taristuehitusele ja optimaalsele planeeringule, lisaks tõsta olemasoleva hoonefondi tervikrenoveerimise mahtusid. (Rohetiiger, 2023)

Seda enam on võimalik jalajälge vähendada mitte lihtsalt põhilise konstruktsioonimaterjali valikuga, vaid edasiste projekteerimislahenduste optimiseerimisega. Viimase alla kuuluvad näiteks kergemate konstruktsioonide paigaldamine ning ehitusmaterjalide optimaalsem kasutus. (Rohetiiger, 2023).

Käesoleva projekteeritud kortermaja puhul on võetud arvesse peamisi konstruktsioonimaterjali valikust tulenevaid erisusi, nagu muutused tarindite konstruktsioonides ja mahtudes, kriitilistes sõlmedes ning hoone kõrgusest tulenevad iseärasused. Kuna välisgabariidid jäid hoone variantide ( $v_{1RB}$ ,  $v_{2CLT}$ ,  $v_{3PB}$ ) puhul samaks, mõjutasid välisseinte paksused kõige enam hoone kasulikku pindala. See on ühtlasi põhjuseks, miks kõige madalama jalajäljega hoonel ( $v_{2CLT}$ ) on kõige suurem energiakasutus – väiksema paksusega välisseinad pakuvad suuremat neto pinda, kuid eeldavad ka suuremat energiatarvet. Suuremast energiatarbest ja madalamast kehastunud süsiniku kogusest tulenevalt, moodustab kasutusaegne energia CLT hoone puhul kogu hoone jalajäljest ka suurema osakaalu kui raud- ja poorbetoon hoone (vastavalt  $v_{1RB}$  ja  $v_{3PB}$ ) puhul – mida madalam on hoone kehastunud süsiniku kogus, seda suurema osakaaluga on kasutusaegne energia.

Hoone kasutusaegse energia mõju leidmisel on määrav roll energia eriheiteteguril, mis Eesti puhul pole veel 50 aasta stsenaariumi ulatuses korrektne ning nõuab edasist teaduspõhist väljatöötamist. Samas pole relevantne arvutustes kasutada ka stsenaariume, mis eeldavad energia eriheiteteguri muutumatust, sest roheenergia osakaal eelduslikult ajas kasvab. Antud põhjusest tingitult on ka Rohetiigri teekaardi koostamisel hoone jalajälje analüüsidest kogu hoone keskkonnamõjust sageli välja jäetud kasutusaegne energia. (Rohetiiger, 2023)

Järgnevalt analüüsitakse projekteeritud korterelamute kehastunud süsiniku jalajälge, mis on peamiselt sõltuv hoone tarindite mahtudest ning sealsest materjali valikust. Seega on analüüsi kaasatud materjalidest tulenev (kehastunud süsinik) keskkonnamõju, mis on käesolevate andmete põhjal piisava täpsusega hinnatav.

Ainuüksi põhimaterjali valikust tulenevalt on hoone jalajälge võimalik vähendada 1/5 võrra (Rohetiiger, 2023), valides r/b asemel puidu. Antud vahemik leidis käesoleva töö puhul ka kinnitust. Nii kogu hoone kui ruutmeetripõhine jalajalg (GWP) oli ootuspäraselt madalaim kortermaja puhul, kus oli projekteeritud proportsionaalselt enam puitu. Kehastunud süsiniku kogus, sh kogu hoone keskkonnamõju, oli kõrgeim raudbetoon hoone puhul -  $v_{1RB}$  hoone kehastunud süsinik hoone ruutmeetri ( $m^2$ ) kohta oli 16,4% kõrgem kui CLT hoone  $v_{2CLT}$  korral. Poorbetoon hoone  $v_{3PB}$  GWP oli 4,6% madalam kui r/b hoonel ning 12,3% kõrgem kui CLT hoonel.

Põhikonstruktsiooni materjali valikust tulenevalt tekkisid erisused ka hoone variantide sõlmlahendustes. Nii oli r/b hoone  $v_{1RB}$  katuslae parapet lisasoojustatud tulenevalt raudbetooni suurest erisoojusjuhtivusest, kuid CLT hoonel  $v_{2CLT}$  ja poorbetoon hoonel

v3<sub>PB</sub> parapeti lisasoojustust ette ei nähtud. Samuti erinesid kortermajade rõdu konstruktsioonid, kus v2<sub>CLT</sub> ja v3<sub>PB</sub> lahendati rõdud konsoolsetena, erinevalt r/b hoonest v1<sub>RB</sub>, kus rõdu liitekohas kasutati külmasilla mõju vähendavat terasest eridetaile. R/b hoone puhul ei lahendatud rõdu konsoolsena, sest vahelae ja rõdu kandeelemendid erinesid – vahelae kandvaks elemendiks on määratud õõnespaneel ja rõdu puhul eeltoodetud betoonelement. Ka terasarmatuuri suhteline kogus oli r/b hoone, sh rõdude, puhul ülekaalukamast betooni kogusest tulenevalt suurem. Terasest eridetailide rohkuse ja eeltoodetud betoonelementide kõrgema heitekoefitsiendi tõttu oli v1<sub>RB</sub> hoone rõdu ka kõrgema süsinikujäljega kui v2<sub>CLT</sub> ja v3<sub>PB</sub>.

Kõigi hoone variantide puhul lisati armeering järgnevatele hooneosadele: vundament, põrand pinnasel ja rõdu raudbetoonist tasanduskiht. Lõviosas on eeltoodetud betoonelementide (trepid, rõdu element, õõnespaneelid, poorbetoonelement vahelagedele) puhul juba eelnev armeering sissearvatud, mida võeti arvesse ka jalajälje arvutustes. Suuremast raud- ja poorbetooni kogusest tulenevalt oli armeeringu jalajalg ka v1<sub>RB</sub> ja v3<sub>PB</sub> hoonete puhul oluliselt kõrgem kui v2<sub>CLT</sub>. Kuigi v2<sub>CLT</sub> hoone armeeringu kogus oli madalam kui raud- ja poorbetoon hoonel, oli see CLT hoone kolme peamise ehitusmaterjali seas, mis moodustasid kehastunud süsiniku kogusest suurima osa (joonis 10). Armeeringu võrdlemisi suur suhteline osakaal v2<sub>CLT</sub> hoone moodulite A1-A3 arvestuses (9%) tuleneb osaliselt kandekonstruktsiooni materjali madalast heitekoefitsiendist (vastavalt CLT GWP=0,12 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg ja armatuuri GWP=2,89 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg), mistõttu hakkavad jalajäljes domineerima peamise materjali valikust mittesõltuvad osad.

Peamise kontsuktsioonimaterjali valikust tulenevad erisused mõjutasid ühelt poolt sõlmlahendusi, kuid teisalt ka tarindite paksusi ja köetavat pindala. Kuigi kõigi kortermaja variantide välisseinte ja kandvate siseseinte kandevelemendid olid valitud sama paksusega (200 mm), olid tarindid tulenevalt energiatõhususe ja heliisolatsiooni nõuetest siiski erinevate paksustega. Nii kujunesid sama soojusläbivuse ( $U_C=0,16$  W/(m<sup>2</sup>\*K) saavutamiseks r/b hoone v1<sub>RB</sub> välisseinad kõige paksemaks (446 mm) ning CLT hoonel v2<sub>CLT</sub> kõige õhemaks (420 mm). Kuigi raudbetoon hoone v1<sub>RB</sub> kandvad siseseinad olid erinevalt välisseintest kõige õhemad, oli kandvate siseseinte maht kõikide korterelamute puhul väiksem kui välisseinte maht, mistõttu jäi peamiseks köetava pindala suurust mõjutavaks teguriks välisseinte paksus. Käesolevas töös jäid ennastkandvate siseseinte konstruktsioonid kortermajade puhul läbivalt samaks ning ei sõltunud peamise konstruktsioonimaterjali valikust.

Lisaks vertikaalsetele konstruktsioonidele muutusid tarindite paksused osaliselt ka horisontaalsetes konstruktsioonides – vahelaed ja katuslaed. Põrand pinnasel ja vundamendi konstruktsioon jäid kortermaja variantide puhul läbivalt samaks, kuna põhikonstruktsiooni materjal ei mänginud siinkohal rolli. Vahelagede ja katuslae paksusest tulenevalt kujunes kõige kõrgemaks hooneks v3<sub>PB</sub> ehk poorbetoonist hoone. Hoone variantide kõrguste vahed olid aga piisavalt väikesed, et sellest tulenevad suuremad mahud trepi betoonelementides, välisseinte kõrgustes ja lifti püstakus ei olnud määravaks mõjuteguriks arvutustulemustes – üldine heitekogus (CO<sub>2</sub>-ekv) lifti püstaku ja trepi konstruktsioonides jäi kortermaja variantide puhul samasse hindamisjärku.

Ringmajanduse põhimõtete kohaselt on süsinikujälje arvutuste kõrval oluline aspekt ka ringlussevõtul ja taaskasutusel, mistõttu on käesolevasse uurimistöösse kaasatud ka moodul D. Tabelist 17 nähtub, et r/b hoone v1<sub>RB</sub> ja poorbetoon hoone v3<sub>PB</sub> ringlussevõtu potentsiaal (vastavalt 26% ja 25%) on oluliselt madalam kui CLT hoone v2<sub>CLT</sub> puhul (45%). Madal ringlussevõtu potentsiaal on osaliselt tingitud modelleerimisel tehtud oletustes, mille kohaselt on ehitusmaterjalide valikul eeldatud taaskasutatud materjalide osakaaluks 0%. Seda põhjusel, et tuua välja nõ „must stsenaarium“ ning näidata, kui palju suurema mõjuga on tooted, mille tootmisel on 100% ulatuses kasutatud kaevandatud maavarasid.

Eelnevast tingitult tulenes r/b hoone v1<sub>RB</sub> ja poorbetoon hoone v3<sub>PB</sub> puhul madal ringlussevõtu potentsiaal peamiselt vähesest taastuvate materjalide osakaalust kogu hoone ehituses – mõlema korterelamu puhul olid >95% ehitusmaterjalidest toodetud kaevandatavatest esmatoorme maavaradest (*virgin materials*). Teisalt on antud hoone variantide (v1<sub>RB</sub> ja v3<sub>PB</sub>) madalamate ringlussevõtupotentsiaalide (vastavalt 26% ja 25%) põhjuseks ka asjaolu, et hoone elukaare lõppedes kättesaadavatest materjalidest (ca 47%) sama eesmärgiga (funktsiooniga) pole võimalik neid enam kasutada (korduskasutus - 0%). Demonteeritavatest materjalidest <7,2% taaskasutatakse sama väärtusliku materjalina ning lõviosa (v1<sub>RB</sub> puhul 84% ja v3<sub>PB</sub> puhul 69,9%) taaskasutatakse madalama kvaliteediga materjalidena, nt betooni taaskasutatakse teise materjali täitematerjalina. Ringlussevõetavatest materjalidest vaid <3,3% taaskasutatakse energiana (nt puidutooted põletatakse) ning osa (v1<sub>RB</sub> puhul 9% ja v3<sub>PB</sub> puhul 19,6%) liigub ladustamisele.

Kui raud- ja poorbetoon hoonete puhul olid ehitusel kasutatavad materjalid valdavas enamuses toormaterjalid (maavarad), siis CLT hoone puhul v2<sub>CLT</sub> moodustasid taastuvad maavarad ja taaskasutatud materjalid lausa 41,1% kogu hoone

ehitusmaterjalidest, mis panustas ka D mooduli kasvu. One Click LCA andmete põhjal jääb ka CLT hoone  $v_{2CLT}$  puhul samaväärtusliku materjali taaskasutuse protsent kättesaadavast materjalist (46,7%) samasse suurusjärku raud- ja poorbetoon hoonega - 8,2%. Vähem väärtusliku materjalina taaskasutatakse 35,5%, kuid põletamisele kuulub 41,1% ning ladustamisele liigub 14,9%.  $v_{2CLT}$  hoone puhul kuuluvad ladustamisele peamiselt kips-, soojustus- ja SBS (bituumeni põhised) materjalid. CLT hoone puhul panustab D mooduli kasvu ka biogeense süsiniku salvestamine, mis tuleb eriti esile just puidupõhiste toodete puhul. Antud põhjusest tulenevalt, mõjutab see ka CLT hoone  $v_{2CLT}$  D mooduli kasvu, mis on 41% kõrgem kui raudbetoon hoonel ja pea 59% kõrgem kui poorbetoon hoonel. Eelnevalt esitatud kättesaadavate materjalide massipõhised osakaalud jäid One Click LCA tarkvara põhjal küll kõigi hoone variantide puhul samasse suurusjärku (47%), kuid ühe kitsaskohana ei arvesta tarkvara hoone variantide põhikonstruktsioonimaterjali valikust tulenevaid erisusi sõlmlahendustes.

Lisaks suuremale biogeense süsiniku sidumisele, on puit (nagu ka poorbetoon) materjalina massi poolest oluliselt kergem raudbetoonist, mistõttu on seda nii lihtsam paigaldada, demonteerida kui transportida. Transpordisektori suur keskkonnamõju on aktuaalne ja palju kõneainet leidnud teema, mistõttu tasub sellele tähelepanu pöörata ka käesoleva töö kontekstis. Suuremast materjali massist tingitult, kulub raudbetooni transportimisele rohkem kütust. R/b hoone on ka kõige suurema kogumassiga (2623 tonni), sh ligi 24% suurema massiga kui CLT hoone  $v_{2CLT}$  (1988 tonni) ning 17% suurema massiga kui poorbetoon hoone  $v_{3PB}$  (2168 tonni), mistõttu on vastavate elementide transportimine ja paigaldamine ressursimahukam, sh suurema süsinikujäljega.

Transpordi aspekti on arvestatud ka emissioonifaktorite valikul arvutustarkvaras One Click LCA, kus eelisjärjekorras valiti materjale, mille tootmispiirkond jääks võimalikult lähedale projekteeritud kortermaja eelduslikule asukohale (Eesti). Kõik ehitusmaterjalide vasted tarkvaras One Click LCA on esitatud töö lisas 1. Materjalide ja toodete valikul arvutustarkvaras lähtuti põhimõtetest, et kortermajade projekteerimisel valitud ehitusmaterjalide/-toodete füüsikalised omadused oleksid korrelatsioonis tarkvara materjalidega, materjalide tootmispiirkond oleks võimalikult lähedal projekti asukohale (Eesti) ning valitud materjalide heitekoefitsiendid ( $\text{kg CO}_2\text{-ekv}$ ) oleksid võimalikult sarnase väärtusega Eesti süsiniku jalajälje meetodika raames koostatud vaikeväärtustele. Viimase põhimõtte rakendamiseks viidi kortermaja ja Eesti meetodikas kokku koondatud materjalide seas läbi tundlikkuseanalüüs, mis on leitav tabelist 16. Kuna Eesti ehitusmaterjalide andmebaasi on käesoleval hetkel koondatud heitekoefitsiendid 47 peamise ehitusmaterjali kohta (Kalamees et al., 2021a), piirduti

tundlikkusanalüüsil peamiselt kandekonstruktsioonide ja soojustusmaterjalide heitekoefitsientide võrdlusega.

Tundlikkuseanalüüsi (tabel 16) eesmärgiks on tagada võimalikult asjakohaste heiteteguritega materjalide valik. Analüüsi kaasati peamised konstruktsiooni- ja isolatsioonimaterjalid, mille mõjud hoone kehastunud süsiniku kogusele olid kõige suuremad. Tundlikkuseanalüüsile tuginedes olid peamised erinevused One Click LCA ja Eesti ehitusmaterjalide andmebaasis järgnevate materjalide seas: CLT, klaasvill, PIR. CLT materjali puhul oli One Click LCA tarkvaras saadaval riigi keskmistatud väärtus (0,35 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg), mis oli aga Eesti meetodi keskmisest väärtusest (0,26 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg) põhjendamatult kõrgem. Oluliselt kõrgema heiteteguriga materjali kasutus oleks andnud ka ebamääraselt suure jalajälje ristkihtpuidust kandekonstruktsioonidele. Kuna arvutustarkvarasse pole võimalik ise õpilasversiooniga andmeid sisestada (teatud määral õigustatud andmete korrektsuse tagamise põhimõtte kohaselt), arvestati usaldusväarsuse tagamiseks CLT materjalina toodet, mida tarnitakse Eestisse ning on turul vabalt kättesaadav (toodetud Stora Enso poolt; toote GWP=0,12 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg). Vastavat toodet on Eestis asuva hoone süsinikujälje analüüsil ka varasemalt kasutatud (Rebane, 2015), mistõttu on valik põhjendatud.

Lisaks CLT-le esinesid suuremad erisused heitetegurites soojustusmaterjalide seas, nagu klaasvill ja PIR. Klaasvilla toote puhul on arvestatud samuti Eesti ehitusturul sagedaselt kasutatava tootja materjale (Isover), mille madalam heitekoefitsient (1,01 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg) Eesti keskmisest (2,93 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg) on seega põhjendatud. Erinevus tarkvaras kasutatud PUR materjali ja Eesti keskmise materjali heitetegurites tuleneb tõsiasjast, et Eesti ehitusmaterjalide andmebaasis on esitatud heitekoefitsiendid küll PIR materjali kohta, kuid PUR-vahule väärtused puuduvad. Materjalide võrdlemisi sarnase keemilise koostise poolest on neid käesolevas töös siiski kõrvutatud. Samuti tuleb tundlikkuseanalüüsil (tabel 16) arvestada, et Eesti andmebaasi materjalid on eelnevalt läbi korrutatud lokaliseerimisteguriga (*local compensation factor*), mis võtab materjali tootmisel arvesse kohaliku riigi energia eriheitetegureid. Teisalt One Click LCA tarkvaras pole seda lõviosas materjalide puhul esialgsete andmete vaatlusel arvestatud, vaid lisandub hilisemal koondarvutusel. Seetõttu on mõningased erinevused heitekoefitsientides tundlikkuseanalüüsil põhjendatud.

Varasemalt on hoone peamise kandekonstruktsiooni materjali mõju uurinud Kristel Rebane (2015), kes kõrvutas Päästetepoo ja Häirekeskuse Tallinna ühishoone raudbetoonist ehitist alternatiivse CLT variandiga. Antud töö piirnes peamiste kandetarindite, nagu vahelagede, katuslae, välis- ja siseseinte, kõrvutamisele ning

tödes, et insenerpuidu kasutus vähendas hoone energiamahukust ligi 59% (Rebane, 2015). Mitmed allikad (Rebane, 2015; Häkkinen & Kuittinen, 2021) on tõdenud vahelagede domineerivust ehitise kehastunud süsiniku jalajäljest, mida toetavad ka käesoleva töö tulemused (tabel 18) – vahelaed moodustasid suurima osa iga kortermaja variandi süsinikujäljest. Eelnevalt nimetatud uurimistöös suudeti ühishoone puhul raudbetoonist konstruktsioonide vahetamisel CLT vastu kehastunud süsiniku kogust vähendada välisseinte puhul ligi 2,9 korda ja vertikaalsete konstruktsioonide (vahelaed ja katuslagi) korral lausa 5 korda (Rebane, 2015). Käesoleva töö puhul vähenes raudbetoonist ehitiselt üleminekul CLT-le välisseinte süsinikujalg ligi 5 korda ning vahelagede ja katuslae puhul 1,5 korda. Kui Rebase (2015) töö puhul suudeti kandekonstruktsioonide jalajälge vähendada 2,7 korda, siis käesoleva töö puhul oli see pea 2 korda. Samas on käesoleva töö puhul kandekonstruktsioonide sisse arvestatud ka rõdu, mis Rebase (2015) töö puhul oli välja jäetud ning ka hoone funktsioon ja geomeetria kahe töö vahel erinevad.

Tundlikkuseanalüüsist (Tabel 16) nähtub, et Eesti ehitusmaterjalide andmebaasist on puudu poorbetooni andmed, kuigi materjal leiab tihti kasutust hoone ja selle osade, nt sokli, ehitusel. Lisaks võis One Click LCA tarkvara andmebaasi puhul täheldada sandwich-paneelide andmete puudulikkust, mistõttu on algselt v<sub>3PB</sub> hoone projekteerimisel arvestatud sandwich-paneelid asendatud arvutustarkvaras leiduva poorbetoonblokiga. Sellele tuginedes lähtuti toote valikul varasemalt kirjeldatud põhimõttest, mille kohaselt valiti arvutustarkvarasse Eesti turul kättesaadav ja kortermajade ehitusel palju kasutusteleidev toode (Bauroci kergplokkid). Kergplokkide valikust tulenevalt võis aga osaliselt jääda arvestamata sandwich-paneelide tootmisest, sh PUR vahu lisamisest tootmisfaasis, tulenev keskkonnamõju.

Tuginedes Eesti süsinikujälje meetodile, pole käesoleval hetkel leitud efektiivsemat meetodit hindamaks hoonete tehnosüsteemide materjalikulu jalajälge, kui hoone tüübile ja pindalale vastavalt leitav kehastunud süsiniku kogus – korterelamu puhul 42 kg CO<sub>2</sub>-ekv/m<sup>2</sup> (moodulid A1-A3). Tehnosüsteemide eluaja (25 aastat) alusel saab aga teha eelduse, et hoone elukaare (50 aastat) jooksul vahetatakse tehnosüsteeme vähemalt ühe korra. Võttes arvesse, et arvutustarkvaras One Click LCA ei saa sisestada privaatsaid andmeid ja tarkvara andmebaasis polnud saadaval ühtset relevantset heitetegurit kaasamaks elamuhoone kõiki tehnosüsteeme, modelleeriti tehnosüsteemide materjalikulu süsinikujalg arvutustarkvarasse tuginedes Eesti meetodile. Moodulites A1-A3 on kortermajade tehnosüsteemide keskmine süsinikujalg 52 tonni CO<sub>2</sub>-ekv ning tulenevalt nende elueast (tehnosüsteemidel 25 aastat) vahetatakse need kortermaja elukaare jooksul 1 korra välja, mis omakorda duubeldab

nende süsinikujälge. Käesoleva töö puhul moodustavad tehnosüsteemid kehastunud süsiniku kogusest võrdlemisi suure osa (tabel 19) - vastavalt kortermaja variandile vahemikus 14-20%. Tehnosüsteemide osakaal kehastunud süsiniku kogusest ei ole korrelatsioonis Häkkinen & Kuittinen (2021) poolt leitud hooneosade jalajälje osakaaluga (3%) (tabel 18), kuid tuleneb osaliselt One Click LCA tarkvaras kasutatud arvutusmetoodikast (heide duubeldatakse eluaja lõppedes).

Kuigi One Click LCA tarkvara hoone LCA programm on väga kasutajasõbralik ning lihtsasti järgitav, mida lihtsustavad enamgi tarkvaras olevad tasuta kättesaadavad juhendid analüüside koostamiseks, esines seal mõningasi kitsaskohti. Ühe kitsaskohana tuuakse välja riigi keskmiste materjalide heitetegurid, mille tootmisel on arvestatud riigi energia heitetegureid, mis võivad aga kohati põhjustada ebamääraselt suuri erinevusi, nt CLT materjali heitekoefitsiendi puhul oli riigi keskmistatud väärtus 26% kõrgem Eesti ehitusmaterjalide andmebaasis esitatuga. Lisaks tuuakse välja materjali valiku osaline nappus (nt poorbetoonist sandwich-paneelide puhul) ning privaatandmete sisestamise puudulikkus tasuta õpilasversioonis. Lisaks eelnevale esines vahetulemustes kohati vähesel määral arvutusvigu, millest käesoleva töö autor andis teada ka tarkvara kasutajaabile.

Hooneosade osakaalud kogu kehastunud süsiniku kogusest vastava hoone variandi kohta pidasid üldjoontes paika – suurima osa moodustasid horisontaalsed konstruktsioonid (vahelaed, katuslaed, põrand pinnasel), peale mida tulid vertikaalsed konstruktsioonid (välisseinad, siseseinad) ning viimaks rõdud, trepid ja vundament. R/b hoone v1<sub>RB</sub> puhul oli vertikaalsete konstruktsioonide osakaal võrdväärne horisontaalsetega, mis tuleneb vertikaalkonstruktsioonides kasutatud suure heitekoefitsiendiga eeltoodetud raudbetoonelementidest. Kasutatud betoonelement (toodetud TMB Element OÜ poolt) on jalajälje arvutustes kasutamiseks sobilik, kuna on toodetud Eestis ning esitatud ka Eesti süsinikujälje meetodi ehitusmaterjalide andmebaasis ühe valikuvariandina. Nimetatud toodet kasutati läbivalt ka CLT ja poorbetoon hoone eeltoodetud raudbetoonelemendina rõdu seinte konstruktsioonides (kahe korteri vahelisi rõdusid eraldav sein). Antud asjaolust tulenevalt on rõdu konstruktsioonidel ka suurem osakaal kogu hoone kehastunud süsinikust (tabel 20) tuginedes võrdluspunktiks seatud Häkkinen & Kuittinen (2021) jaotustabelile.

Suurima süsinikujäljega materjalid põrand pinnasel konstruktsioonis olid: armatuur 11 t CO<sub>2</sub>-ekv, kuivbetoon 11 t CO<sub>2</sub>-ekv, EPS – 15 t CO<sub>2</sub>-ekv ning üllatuslikult ka parkett 16 t CO<sub>2</sub>-ekv. Parketi suur osalus kehastunud süsiniku kogusest on suuresti tingitud selle eluaja pikkusest (25 aastat), mille lõppedes vahetatakse see välja ning ühtlasi toimub



duubeldamine GWP koguses. Viimane kuulub küll olelusringi moodulisse B4, kuid avaldab siiski mõju kogu kehastunud süsiniku kogusele. Kõigi hoone variantide puhul samaks jäänud konstruktsioonid - vundament, põrand pinnasel, mittekandvad siseseinad, avatäited ning tehnosüsteemid, moodustasid suurema osa CLT hoone v2<sub>CLT</sub> kehastunud süsiniku osakaalust kui v1<sub>RB</sub> ja v3<sub>PB</sub> hoonetel. Sama tööka võib täheldada ka hoone kasutusaegse energiatarbe hindamisel (tabel 17), kus hoone kasutusfaas moodustas suuremast netopindalast ja madalamast kehastunud süsiniku kogusest tingitult hoone kogu süsinikujäljest ka suurema kaalu (v2<sub>CLT</sub> - 60,5%) võrreldes raudbetoon v1<sub>RB</sub> (52,2%) ja poorbetoon v3<sub>PB</sub> hoonega (55,3%). Järeldust toetab samuti joonised 9, 10 ja 11, kus on esitatud iga kortermaja variandi kõige suurema kaaluga materjalid kehastunud süsiniku kogusest – kui raudbetoon hoone v1<sub>RB</sub> ja poorbetoon hoone v3<sub>PB</sub> kehastunud süsiniku kogusest moodulites A1-A3 moodustasid suurima osa konstruktsioonimaterjalid, siis CLT hoone v2<sub>CLT</sub> puhul tuli peamine süsinikujälg mitte kandelementidest, vaid tehnosüsteemidest. Samuti oli suurima osalusega materjalide seas armatuur, mida tegelikult CLT hoone puhul oli koguseliselt kõige vähem võrreldes raud- ja poorbetooniga.

Tabelist 18 järeldub, et Häkkinen & Kuittinen (2021) jaotustabelile kõige sarnasemad osakaalud hooneosade jalajälgedes saavutas suurima süsinikujäljega kortermaja variant v1<sub>RB</sub>. Antud asjaolu tõendab veelgi eelnevalt esitatud järeldust, mille kohaselt madalama süsinikujäljega hoone puhul hakkavad domineerima mittekandvad hooneosad ja süsteemid, samuti ka kasutusaegne energiatarve. Lisaks eelnevale tulenes hooneosade jaotustabeli võrdlusel (tabel 18), et olulisemalt suurema osa kehastunud süsiniku kogusest moodustasid lisaks tehnosüsteemidele (vastavalt hoone variantidele 14-20%) ka põrand pinnasel (vastavalt hoone variantidele 8-12%). Häkkinen & Kuittinen (2021) hooneosade osakaalu jaotusesse süsinikujäljest olid algselt kaasatud ka renoveerimistooted, sisseehitatud mööbel, korstnad jm (joonis 4), mida käesolevas töös arvesse ei võetud. Suuremast hooneosade kaasatusest tingitult on teatav osakaalude erinevus Häkkinen & Kuittinen (2021) jaotustulemustes (tabel 18) võrreldes käesoleva tööga ka õigustatud.

# KOKKUVÕTE

Käesoleval ajal, mil hooned tarbivad ära globaalselt pea 30% toodetavast energiast ning on põhjuseks ligi 40% ülemaailmselt tekkivatest süsiniku emissioonidest, on üha enam hoogustumas ka madalsüsinik ehituse rakendamine. Antud uurimistöö eesmärgiks on edendada ja analüüsida vastava suuna põhimõtete rakendamist, seal hulgas võttes arvesse peamisest konstruktsioonimaterjali valikust tulenevaid erisusi.

Käesolev uurimistöö koosneb kahest suuremast osast, mille esimeses pooles tutvustati töö raames projekteeritud nõuetelevastavat kortermaja ning teises pooles viidi läbi projekteeritud näidiselamu näitel süsiniku jalajälje arvutused rõhuasetusega kehastunud süsinikul. Kusjuures kortermajast koostati kolm plaaniliselt samasugust, kuid põhikonstruktsiooni materjalilt erinevat hoone varianti ( $v_{1RB}$  – raudbetoon,  $v_{2CLT}$  – ristkihtpuit,  $v_{3PB}$  - poorbetoon) laiendatud (koos peamiste sõlmedega) eelprojekti näol.

Magistritöö eesmärkidena seatud analüüs ja võrdlus projekteeritava hoone ehitusliku lahenduse kohandamise vajalikkuse kohta tulenevalt peamise konstruktsioonimaterjali valikust, said täidetud. Analüüsi alusel nähtus, et kortermaja konstantsete välisgabariitide ja tarindite soojuslähivuse korral tekkisid hoone variantides erisused nii sõlmlahendustes, materjalikulus, tarindite paksustes kui ka köetavas pindalas, mistõttu leiti ühe järeldusena, et hoonet tuleks käsitleda kui tervikut ning süsinikujälje arvutustesse tuleks kaasata ka hoone sõlmlahendused. Nii osutus kaalult ja köetavalt pindalalt kõige optimaalsemaks variandiks CLT hoone  $v_{2CLT}$ , mille puhul välisseinte paksused jäid kõige madalamaks, kuid teisalt suurenes energiatarve. Suurimast betooni sisaldusest tingitult vajas raudbetoon hoone  $v_{1RB}$  koguseliselt kõige rohkem armatuuri (jms terasdetalle), sõlmlahenduste külmasildade vältimiseks lisasoojustust ning ühtlasi oli ka massilt kõige raskem. Viimasest asjaolust tingitult on raudbetoonist hoone elementide transport, paigaldus ja demonteerimine ka ressursikulukam.

Magistritöö teiste eesmärkidena seatud süsiniku jalajälje analüüs ja võrdlus projekteeritud kortermaja peamise konstruktsioonimaterjali aspektist said samuti täidetud. Süsinikujälje arvutused koostati One Click LCA tarkvaras vastavalt projekteeritud kortermaja materjalikulule ja valitud ehitusmaterjalidele, kusjuures antud tarkvara ja andmestik on kooskõlas oleluringi hindamise raamistiku ja järgitavate standarditega. Töö kaasas tulemustesse ka oleluringi hindamisel vabatahtlikult esitatava mooduli D, mis tõendas lisaks süsinikujälje arvutustele enamgi puidutoodete suuremat potentsiaali nii kordus- kui taaskasutuseks. Ringlussevõtupotentsiaal oli ristkihtpuit hoonel  $v_{2CLT}$  töö tulemustele baseerudes 41% kõrgem kui raudbetoon hoonel

$v_{1RB}$  ja lausa 59% kõrgem kui poorbetoon hoonel  $v_{3PB}$ . Ringlussevõtupotentsiaali kasvu hoogustas CLT hoone puhul esmajärgus taastuvate loodusvarade suur osalus kortermaja kandekonstruktsioonides võrreldes raud- ja poorbetoon hoonega, kus valdav enamus materjalidest olid toodetud kaevandatavatest esmatoorme maavaradest.

Optimaalseimaks variandiks nii insenertehniliste põhimõtete kui süsinikujälje seisukohalt oli ristkihtpuidust hoone  $v_{2CLT}$ , mille puhul kehastunud süsiniku kogus oli hoone ruutmeetri kohta ligi 16% madalam võrreldes raudbetoon hoonega  $v_{1RB}$  ning 12% madalam võrreldes poorbetoonist hoonega  $v_{3PB}$ . Veelgi enam tuli esile kandekonstruktsioonide, mis on sõltuvad peamise konstruktsioonimaterjali valikust, suur osalus hoone jalajäljes - raudbetoonist hoone  $v_{1RB}$  puhul oli kandekonstruktsioonide jalajälg (487 tonni CO<sub>2</sub>-ekv) pea kaks korda kõrgem kui ristkihtpuidust hoonel  $v_{2CLT}$  (250 tonni CO<sub>2</sub>-ekv) ning 1,2 korda kõrgem kui poorbetoonist hoonel  $v_{3PB}$  (409 tonni CO<sub>2</sub>-ekv). Vastavalt hoone variantidele oli kandekonstruktsioonide osalus kehastunud süsiniku kogusest raudbetoon hoone  $v_{1RB}$  puhul 63,4%, ristkihtpuidust hoonel  $v_{2RB}$  44,6% ja poorbetoonist hoonel  $v_{3PB}$  60,3%. Sellest tulenevalt leiti ühe järeldusena, et madalama jalajäljega hoonete puhul muutuvad domineerivaks peamisest konstruktsioonimaterjalist mittesõltuvad osad ja süsteemid, nagu tehnosüsteemid, samuti kasutusaegne energiatarve.

Töö käigus tulid esile nii süsinikujälje meetoodika kui kasutatud tarkvara (One Click LCA) kitsaskohad. Ühe kitsaskohana tuuakse meetoodika puhul välja tehnosüsteemide jalajälje hindamise keskmistatud meetod, mis võib ühtlasi olla üheks põhjuseks, miks tehnosüsteemide jalajälg moodustas hoonete kehastunud süsiniku kogusest niivõrd suure osakaalu (13-20%). Tarkvara peamiste kitsaskohtadena esinesid materjalide (näiteks sandwich-paneelide) osaline puudulikkus, riigi keskmistatud materjalide heitekoefitsientide võrdlemisi suured erinevused Eesti ehitusmaterjalide andmebaasiga ning kohati esinevad kalkuleerimisvead. Viimaseid aga arvestati töö koostamisel ning viidi sisse vajaminevad muudatused.

Edasine uurimisvajadus kätkeb endas tehnosüsteemide jalajälje meetoodika täpsustamist, potentsiaalset päikesepaneelide lisamist energiatarbe katmiseks ja sellest tuleneva süsinikujälje uurimist, põhikonstruktsiooni materjalidest tulenevate hooneosade demonteeritavuse ning selle mõju uurimist süsinikujäljele.

## SUMMARY

Currently, buildings consume almost 30% of the globally produced energy and are responsible for nearly 40% of generated carbon emissions worldwide. As a result, the use of low-carbon construction techniques are becoming increasingly popular. The aim of the present thesis is to promote and analyze the application of low-carbon construction principles, taking into account the differences arising from the main structural material selection.

Current thesis is divided into two major parts. The first part introduces a compliant apartment building designed as part of this study, and the second part calculates the carbon footprint of a designed reference building, with an emphasis on embodied carbon. Three similar in plans but structurally different versions of the apartment building ( $v_{1RB}$  - reinforced concrete,  $v_{2CLT}$  - cross-laminated timber,  $v_{3PB}$  - aerated concrete) were developed (including main construction attachments) as part of an extended preliminary design.

The goals of the master's thesis, which were to analyze and compare the necessity of adapting the building's construction solution based on the main structural material selection, were achieved. Although the apartment buildings had constant external dimensions and structural thermal transmittance, differences in construction attachments, material quantities, constructions thicknesses and net areas were found based on the analysis. Therefore, one of the conclusions found was that buildings should be treated as a whole, and the constructions attachment solutions should be included in the carbon footprint calculations. The most optimal version in terms of weight and net area was the CLT building  $v_{2CLT}$ , which had the lowest exterior wall thickness, as well as highest energy consumption. Due to the highest content of concrete, the reinforced concrete building  $v_{1RB}$  required the most reinforcement (including other steel elements), additional insulation to avoid thermal bridges, and was also the heaviest in mass. As a result, the transportation, installation, and disassembly of reinforced concrete building elements are more intensive in resources.

The other goals of the master's thesis, which were to analyze and compare the carbon footprint of the designed apartment building from the perspective of the main construction material, were also achieved. Carbon footprint calculations were performed using the One Click LCA software, based on the quantities of used materials and selected building materials of the designed apartment building. The software and datasets used follow the life cycle assessment framework and the applicable standards. In addition, the current thesis included otherwise voluntarily submitted Module D in the life cycle

assessment, which demonstrated a great potential for wood products in both reuse and recycling. Based on the study's results, the recycling potential of cross-laminated timber apartment building was 41% higher than it was for reinforced concrete building and 59% higher compared to aerated concrete building. Higher circularity potential for the CLT building was mainly due to the high proportion of renewable resources used in the apartment building's load-bearing structures, compared to the predominance of virgin materials produced used in the reinforced and aerated concrete buildings.

The optimal version in terms of designed solutions and carbon footprint was found to be the cross-laminated timber building ( $v_{2CLT}$ ), with approximately 16% lower in embodied carbon per square meter compared to the reinforced concrete building ( $v_{1RB}$ ) and 12% lower compared to the autoclaved aerated concrete building ( $v_{3PB}$ ). Furthermore, it was discovered that the structural elements, which were dependent on the main construction material selection, had the most significant impact on the apartment building's carbon footprint. Moreover, the carbon footprint of the structural elements in  $v_{1RB}$  was nearly twice as high (487 tonnes CO<sub>2</sub>-eq) compared to  $v_{2CLT}$  (250 tonnes CO<sub>2</sub>-eq) and 1,2 times higher than  $v_{3PB}$  (409 tonnes CO<sub>2</sub>-eq). Depending on the building variant, the contribution of the structural elements to building's embodied carbon was 63.4% for  $v_{1RB}$ , 44.6% for  $v_{2CLT}$ , and 60.3% for  $v_{3PB}$ . As a result, it was concluded that in low-carbon buildings, non-structural components and systems, such as building services and operational energy, become dominant.

As a result of present study carried out some limitations were identified in the carbon footprint methodology and used software (One Click LCA). One limitation was the method used for assessing the carbon footprint of building services, which may be the reason why building services contributed such significant proportion of building's embodied carbon (13-20%). Limitations in the software included incomplete material data (for example sandwich panels), relatively large variations in emission factors for generic country average materials, and occasional calculation errors. However, the calculation issues were addressed in the study and necessary adjustments were made.

Future research needs include adjustments to the methodology of assessing the carbon footprint of building services, investigating the potential benefits of adding solar panels to cover energy consumption and their impact on the carbon footprint, examining the disassembly of building elements dependent on the main construction materials and investigating the effects of disassembly on the carbon footprint.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- Bhatia P, Cummis C, Brown A, Drauker L, Rich D, Lahd H. (2011). Greenhouse Gas Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. Washington DC: World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development
- Eesti Ehitusteabe Fond. (2008). RT 18-10922-et Kinnisvara tehnilised kasutusead ja korrashoiuperioodid. Eestikeelne lisaleht 2 lk.
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2003). Ehitiste heliisolatsiooninõuded. Kaitse müra eest (EVS 842:2003).  
<https://www.evs.ee/et/evs-842-2003>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2006). Keskkonnajuhtimine. Olelusringi hindamine. Põhimõtted ja raamistik (EVS-EN ISO 14040:2006).  
<https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-3834-3-2021>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2007). Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-4: Üldkoormused. Tuulekoormus (EVS-EN 1991-1-4:2005+NA:2007).  
<https://www.evs.ee/et/evs-en-1991-1-4-2005-na-2007-consolidated>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2009a). Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused Osa 1-3: Üldkoormused. Lumekoormus (EVS-EN 1991-1-3:2006).  
<https://www.evs.ee/et/evs-en-1991-1-3-2006>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2009b). Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-1: Üldkoormused . Mahukaalud, omakaalud, hoonete kasukoormused (EVS-EN 1991-1-1:2002).  
<https://www.evs.ee/et/evs-en-1991-1-1-2002>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2011). Ehitiste jätkusuutlikkus. Hoonete keskkonnatoimivuse hindamine. Arvutusmeetod (EVS-EN 15978:2011).  
<https://www.evs.ee/et/evs-en-15978-2011>

Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus (2019). Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-6 (EVS-EN 16798-1:2019).

<https://www.evs.ee/et/evs-en-16798-1-2019>

Ehitisele esitatavad tuleohutusnõuded. (2021). RT I, 23.02.2021, 13.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/123022021013>

Ehitusseadustik. (2023). RT I, 07.03.2023, 72.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/107032023072>

Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrus (EL) nr 305/2011, 9. märts 2011. (2011). Euroopa Liidu Teataja.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0305&from=ET>

FibreNet. (2018). *Life Cycle Assessment: Benefits and limitations*. Loetud 20. Detsembril 2022 aadressil

<http://fibrenet.eu/index.php?id=blog-post-eleven>

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., Rydberg, T. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science & Technology*, 45 (1), 90-96.

<http://dx.doi.org/10.1021/es101316v>

Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. (2020). RT I, 07.07.2020, 11.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/107072020011>

Häkkinen, T., Kuittinen, M. (2021). *Madalsüsinikehituse suunas. Hindamise ja projekteerimise käsiraamat*. ET Infokeskuse AS.

IEA. (2022). *Buildings*.

<https://www.iea.org/reports/buildings>

Justiitsministeerium. (2013). *Ehitusseadustiku seletuskiri*.

[https://www.just.ee/sites/www.just.ee/files/elfinder/article\\_files/ehitusseadus\\_tiku\\_seletuskiri.pdf](https://www.just.ee/sites/www.just.ee/files/elfinder/article_files/ehitusseadus_tiku_seletuskiri.pdf)

Kalamees, T., Kertsmik, K.-A., Kurnitski, J., Lylykangas, K., Oviir, A., Pasanen, P., Tikka, S. (2021a). Uuring ehituse süsinikujalajälje hindamisprintsiiptide rakendamiseks Eestis. Lõpparuanne.

<https://eehitus.ee/wp-content/uploads/2022/04/Uuring-ehituse-susinikujalajalje-hindamisprintsiiptide-rakendamiseks-Eestis.pdf>

Kalamees, T., Kertsmik, K.-A., Kurnitski, J., Lylykangas, K., Oviir, A., Pasanen, P., Tikka, S. (2021b). Uuring ehituse süsinikujalajälje hindamisprintsiiptide rakendamiseks Eestis. Meetodi kirjeldus. Lisa 2.

One Click LCA Ltd. (n.d a). *ISO and EN standard-compliant Life-Cycle Assessment software*. Loetud 02. märts 2023 aadressil

<https://www.oneclicklca.com/iso-en-compliant-lca-software/>

Kalju Loorits, Tiit Masso, Vassil Hartšuk, Alar Just, Elmar Just, Otto Pukk, Tõnu Peipman, Vello Otsmaa, Valdo Jaaniso, Ivar Talvik, Rein Mägi, Jaan Rohusaar, Karl Õiger, Väino Voltri. (2014). *Ehituskonstruktori käsiraamat*. Ehitame-kirjastus.

Laasonen, N., Pluuman, K., Suur-Uski, T. (2021). Talotekniikan päästötietojen selvityshanke. Versio 1.0.

[https://co2data.fi/rakentaminen/reports/YM\\_TATE\\_Paastot\\_loppuraportti.pdf](https://co2data.fi/rakentaminen/reports/YM_TATE_Paastot_loppuraportti.pdf)

Nõuded ehitusprojektile. (2021). RT I, 26.02.2021, 7.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/126022021007>

One Click LCA LTd. (s.a.). *Building Circularity: Circular Assessment*. Loetud 01. mail 2023

<https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360014998199-Building-Circularity-Circular-Assessment>

One Click LCA Ltd. (n.d b). *Carbon Heroes Benchmarking*. Loetud 23. aprillil 2023 aadressil

<https://www.oneclicklca.com/construction/carbonheroes/>



One Click LCA Ltd. (2021). *Life Cycle Assessment for Buildings - Why it matters and how to use it.*

[https://www.oneclicklca.com/wp-content/uploads/2021/10/Life-Cycle-Assessment-for-Buildings-](https://www.oneclicklca.com/wp-content/uploads/2021/10/Life-Cycle-Assessment-for-Buildings-2021.pdf?vgo_ee=fehcxac1DsDegY7uj7CtfN26ziIX4g3Pmjy%2FVP4pVbs%3D)

[2021.pdf?vgo\\_ee=fehcxac1DsDegY7uj7CtfN26ziIX4g3Pmjy%2FVP4pVbs%3D](https://www.oneclicklca.com/wp-content/uploads/2021/10/Life-Cycle-Assessment-for-Buildings-2021.pdf?vgo_ee=fehcxac1DsDegY7uj7CtfN26ziIX4g3Pmjy%2FVP4pVbs%3D)

Puudega inimeste erivajadustest tulenevad nõuded ehitisele. (2018). RT I, 31.05.2018, 55.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/131052018055>

Päästeamet. (2020). Ehituslike tuleohutusnõuete kokkuvõte. Täiendatud trükk.

<https://www.rescue.ee/files/2020-09/est-rgb.pdf?9867bcada1>

Rashid, A. F. A., Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 244-248.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>

Rebane, K. (2015). *Engineered timber solution for carbon footprint reduction on example of Estonian Rescue Service building in Tallinn* [Unpublished manuscript]. Department of Environmental Engineering, Tallinn University of Technology.

Rohetiiger. (2023). *Ehituse teekaart 2040.*

<https://rohetiiger.ee/wp-content/uploads/2023/04/EHITUSE-TEEKAART-2040-v1.pdf>

Sankelo, P., Alhola, K., Chartrand, É., Borg, A., Andresen, I., Lylykangas, K., Aljas, H.-K., Kertsmik, K.-A. (2022). Synergies and trade-offs between carbon footprint and other environmental impacts of buildings: Cases from Finland, Norway and Estonia.

<https://doi.org/10.6027/temanord2022-551>

Technopolis Group, Vastutustundliku Ettevõtluse Foorum, Teeme Ära SA. (2021). Eesti ringmajanduse tulevikupotentsiaali ja vajalike meetmete uuring. Lisa 1 – Ehitussektor.

<https://ringmajandus.envir.ee/sites/default/files/Ehitussektor.pdf>

Öztaşa, S. K. The limitations of LCA methodology towards sustainable construction materials. (2018). *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017)*, 102-113.

[http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-63709-9\\_8](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-63709-9_8)

## Lisad

### Lisa 1 – Ehitusmaterjalide vasted One Click LCA tarkvaras

Materjali nimetus	Eluiga	Materjali nimetus One Click LCA tarkvaras	GWP (kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg) A1-A3 moodulite kohta	GWP päritolu riik
<b>Teras</b>				
Armatuur	50	Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615	2.89	Eesti
Terasroovid kübarprofiilina	50	Galvanized steel profile for partition systems, 0.39-2.90 kg/m (Favor As)	2.01	Eesti
Nelikanttorud	50	Structural hollow steel sections (HSS), cold rolled, generic, 10 % recycled content, circular, square and rectangular profiles, S235, S275 and S355	3.66	Eesti
Tsingitud terasplekk (veeplekk)	50	Hot-dip galvanized steel sheets, Steel thickness range: 0.4-3.0 mm (0.015-0.12 in), zinc coating: 20 µm (787.4 µin) (0.28kg/m <sup>2</sup> / 0.057 lbs/ft <sup>2</sup> sheet steel), 80% recycled content	1.67	Eesti
<b>Betoon</b>				
Kuivbetoon C25/30 (vundamenti)	50	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI), with CEM I, 0% recycled binders (280 kg/m <sup>3</sup> ; 17.5 lbs/ft <sup>3</sup> total cement)	0.11	Eesti
Eeltoodetud raudbetoonelement C30/37 (välisseinas, kandvates siseseintes)	50	Precast concrete wall, 435.4 kg/m <sup>2</sup> , avg. thickness 192 mm (OÜ TMB ELEMENT)	0.21	Eesti
Eeltoodetud raudbetoonelement C30/37 (rõdule)	50	Precast concrete balcony, C30/37, 475 kg/m <sup>2</sup> (Hedareds Sand & Betong AB)	0.18	Rootsi
Raudbetoonist trepid	50	Precast concrete stairs (Benders Byggsystem AB)	0.14	Rootsi

Lisa 1 järg. Ehitusmaterjalide vasted One Click LCA tarkvaras.

Raudbetoonist õõnespaneel	50	Hollow core concrete slabs, generic, C40/50 (5800/7300 PSI), 0% (typical) recycled binders in cement (400 kg/m <sup>3</sup> / 24.97 lbs/ft <sup>3</sup> ), incl. reinforcement	0.17	Eesti
Kiudbetoonist tasandusvalu	50	Multipurpose floor leveling screed, 1700kg/m <sup>3</sup> , 20-80mm/10-80mm, EN13813, Floor 4350 fibre base flow; Floor 4360 base flow rapid (Weber)	0.17	Rootsi
Poorbetoonist paneelid (horisontaalsed konstruktsioonid)	50	Autoclaved aerated concrete products, reinforced, 525 kg/m <sup>3</sup> , Lambda=0.12 W/(m.K) (Bauroc, Andja plant)	0.35	Eesti
Poorbetoonist kergplokid (vertikaalsed konstruktsioonid)	50	Autoclaved aerated concrete blocks, 555 kg/m <sup>3</sup> , Plade, Hard, Acoustic (Bauroc, Andja plant)	0.32	Eesti
Tsementplaat	50	Cement board, 12.5mm, 15 kg/m <sup>2</sup> , 1200 kg/m <sup>3</sup> , AQUAPANEL Indoor (KNAUF)	0.66	Prantsusmaa
<b>Soojustus ja veekindlus</b>				
XPS soojustusplaat	50	XPS insulation panels, L = 0.033-0.039 W/mK, 20-400 mm, 35 kg/m <sup>3</sup> , Lambda=0.033 W/(m.K), Finnfoam XPS Insulation (Finnfoam Oy)	2.46	Soome
Mineraalvillaplaat (siseseintes)	50	Glass wool insulation, L=0.040 W/mK, R=1.00 m <sup>2</sup> K/W, 40 mm, 0.44 kg/m <sup>2</sup> , 11 kg/m <sup>3</sup> , Lambda=0.04 W/(m.K), ISOVER Acoustic (Saint Gobain)	1.01	Soome
Mineraalvillaplaat (välisseintes)	50	Glass wool insulation, L=0.035 W/mK, R=1.00 m <sup>2</sup> K/W, 35 mm, 0.63 kg/m <sup>2</sup> , 18 kg/m <sup>3</sup> , Lambda=0.035 W/(m.K), ISOVER Standard 35, ISOVER Standard 35 Roll (Saint Gobain)	0.98	Soome
Fooliumkattega PIR/PUR plaat	50	PIR insulation panels with aluminium laminate facing, L = 0.022 W/mK, R = 4.54 m <sup>2</sup> K/W, 100 mm, 3.62 kg/m <sup>2</sup> , 36.2 kg/m <sup>3</sup> , FF-PIR AL (Finnfoam Oy, Salo plant)	3.11	Soome
Vahtpolüstüreen EPS	50	EPS insulation panels, L= 0.034 W/mK, R=1.118 m <sup>2</sup> K/W, 38 mm, 600 x 1200 mm, 1.08 kg/m <sup>2</sup> , 28.5 kg/m <sup>3</sup> , Sundolitt EPS S200 (Brødr. Sunde AS)	2.95	Norra

Lisa 1 järg. Ehitusmaterjalide vasted One Click LCA tarkvaras.

PUR vaht	50	PUR foam insulation, in-situ closed-cell sprayed, L=0.025 W/mK, R=4 m <sup>2</sup> K/W, 100 mm, 3.79 kg/m <sup>2</sup> , 37.9 kg/m <sup>3</sup> , Lambda=0.025 W/(m.K), HEATLOK HFO Pro, HEATLOK EZ, FOAMLOK 2001 4G (ICYNENE LAPOLLA FRANCE)	3.22	Prantsusmaa
Tuulutussoontega jäik vill	50	Glass wool insulation, single side glass fiber tissue faced, T: 50 mm, L: 0.037 W/mK, R: 1.35 Km <sup>2</sup> /W, 5.0 kg/m <sup>2</sup> , 100 kg/m <sup>3</sup> , OL-TOP 50 mm (Isover Saint Gobain)	1.42	Soome
Kivivillaplaat (katusel, jäik vill välisseinas)	50	Rock wool insulation panels, unfaced, generic, L = 0.037 W/mK, R = 2.70 m <sup>2</sup> K/W (15 ft <sup>2</sup> Fh/BTU), 150 kg/m <sup>3</sup> (9.36 lbs/ft <sup>3</sup> ) (applicable for densities: 100-150 kg/m <sup>3</sup> (6.24-9.36 lbs/ft <sup>3</sup> )), Lambda=0.037 W/(m.K)	1.31	Eesti
Sammumüra isolatsioonivill	50	Glass wool insulation, with glass fiber facing, 35 mm, R = 1.0 m <sup>2</sup> K/W, 2.695 kg/m <sup>2</sup> , 77 kg/m <sup>3</sup> , Lambda=0.035 W/(m.K), ISOVER FLO (Saint-Gobain Finland)	0.91	Soome
Tuuletõkkeplaat	50	Glass wool insulation, single side glass tissue faced, yellow, T: 30 mm, L: 0.031 W/mK, R: 0.95 Km <sup>2</sup> /W, 2.1 kg/m <sup>2</sup> , 70 kg/m <sup>3</sup> , RKL-31 Facade 30 mm (Isover Saint Gobain)	1.81	Soome
PE-kile (vahelaes)	50	Polyethylene vapor barrier, 0.9 kg/m <sup>2</sup> , DONNEE PAR DEFAUT (DED)	0.45	Prantsusmaa
Õhu- ja aurutõke (katuslaes)	50	Membrane, waterproofing, for roofs, Polyester reinforced, 1.5-2.0 mm, 2x15/20 m, 2.4 kg/m <sup>2</sup> , Sika (Sarnafil TS 77)	1.79	Euroopa
Hüdroisolatsioon (rullmaterjalina)	50	Membrane, waterproofing, for roofs, Polyester reinforced, 1.5-2.0 mm, 2x15/20 m, 2.4 kg/m <sup>2</sup> , Sika (Sarnafil TS 77)	1.79	Euroopa
Hüdroisolatsiooni vööp	50	Waterproofing liquid membrane, Kiilto KeraPro (T1705) (Kiilto Oy)	2.37	Soome
SBS aluskate	20	Bitumen-polymer membrane roofing, 2 layer, mechanically fastened (EWA)	0.63	Euroopa
<b>Puitmaterjalid</b>				
Puitroovid	50	Glulam beams and pillars, 430 kg/m <sup>3</sup> (Setra)	0.1	Rootsi
Sisevoodrilauad	50	Timber lining (interior), conifer (Treindustrien)	0.14	Norra

Lisa 1 järg. Ehitusmaterjalide vasted One Click LCA tarkvaras.

Parkett	25	Wood floor covering, 13-14 mm, 7.66 kg/m <sup>2</sup> , Professional, Pure, Shade (Tarkett, Hanaskog plant)	0.75	Rootsi
Immutatud puitpruss	50	Copper-impregnated wood, 545.96 kg/m <sup>3</sup> , 25% moisture, class AB (Moelven Wood)	0.11	Norra, Rootsi
Välisvoodrilauad	50	Wooden cladding and decking, pine or spruce, 445 kg/m <sup>3</sup> , 7-29 mm, 8-18%, moisture content (Stora Enso)	0.16	Eesti, Soome, Hollandi
Ristkihtpuit ehk CLT	50	Cross laminated timber (CLT), 470 kg/m <sup>3</sup> , 12% moisture content (Stora Enso)	0.12	Eesti
Veekindel vineer	50	Laminated plywood, waterproof, 10.2 mm (Fibo Trespo)	0.37	Norra
<b>Mineraal- ja klaastooted</b>				
Krohvialusplaat	50	Gypsum plaster board, regular, generic, 6.5-25 mm (0.25-0.98 in), 10.725 kg/m <sup>2</sup> (2.20 lbs/ft <sup>2</sup> ) (for 12.5 mm/0.49 in), 858 kg/m <sup>3</sup> (53.6 lbs/ft <sup>3</sup> )	0.29	Eesti
Kipsplaat	50	Gypsum plaster board, regular, generic, 6.5-25 mm (0.25-0.98 in), 10.725 kg/m <sup>2</sup> (2.20 lbs/ft <sup>2</sup> ) (for 12.5 mm/0.49 in), 858 kg/m <sup>3</sup> (53.6 lbs/ft <sup>3</sup> )	0.29	Eesti
Tugevdatud kipsplaat	50	Gypsum plasterboard reinforced core, 14 kg/m <sup>2</sup> , 12.5 mm +/- 0.5 mm, Floorboard/Gulv type DIR (Norgips)	0.22	Norra
Krohv ja pahtel	50	Gypsum plaster (Bundesverband der Gipsindustrie)	0.2	Euroopa
Klaas (rõdu piirded)	50	Insulating glass unit, double glazed, 16.22 mm, 42.5 kg/m <sup>2</sup> (Klaasimeister AS)	1.73	Eesti
<b>Põranda- ja pinnasekattematerjalid</b>				
Keraamilised seinaplaadid	30	Ceramic wall tiles, 7.938-7.95 mm (avg. thickness 7.94 mm), avg. weight 15.14 kg/m <sup>2</sup> , avg. density 1906.8 kg/m <sup>3</sup> (Daltile, plant El Paso)	0.89	US
Geotekstiil	30	Geotextile, generic, 312 g/m <sup>2</sup> (1.02 oz/ft <sup>2</sup> ), Composition: PP net, non-woven PE felt	2.36	Eesti
Radoonitõke	50	Radon and moisture membrane for site construction, PP, 1.2 mm (Icopal)	2.45	Norra

Lisa 1 järg. Ehitusmaterjalide vasted One Click LCA tarkvaras.

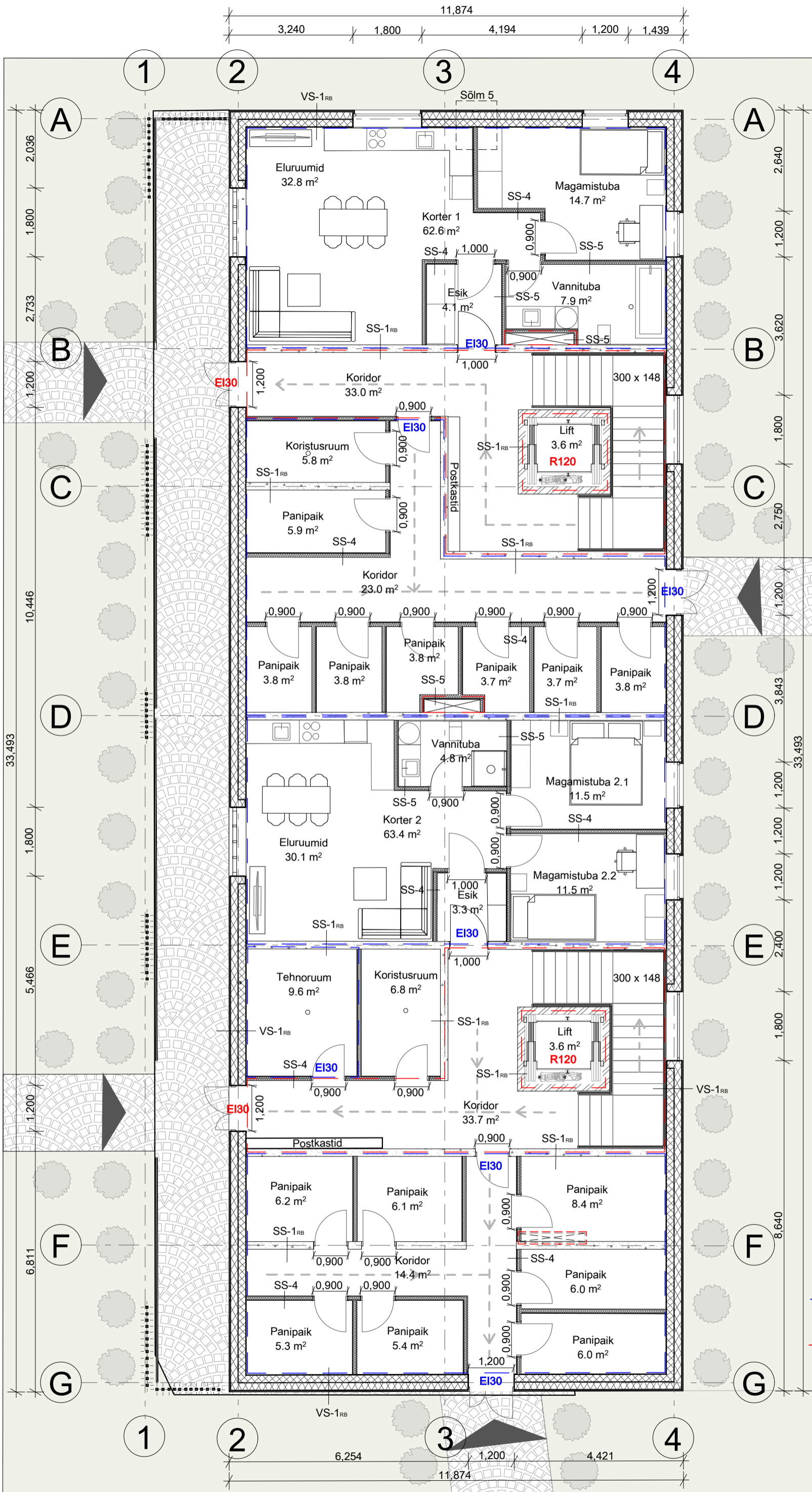
Parketi aluskate	25	Floor underlay from polyurethane and polyester, 1 kg/m <sup>2</sup> (WINDMÖLLER GMBH)	0.48	Saksamaa
Keraamilised põrandaplaadid	30	Ceramic floor tile, 8-8.9 mm (avg. thickness 8.45 mm), avg. weight 18.8 kg/m <sup>2</sup> (Ragno, plant Sunnyvale)	0.62	USA
Kipspealisvalu	50	Levelling screed for floors, Application for 10 mm thickness 18 kg/m <sup>2</sup> (FE80), FE 50 Largo, FE 80 Allegro, FE 25 Atempo, FE Fortissimo, FE Eco, FE Sprint, N440 (Knauf)	0.11	Saksamaa
<b>Avatäited ja täiendavad ehitustooted</b>				
Aknad	50	Wood-aluminium inward window, Kipp-dreh, 3-glass, per m <sup>2</sup> , 880 x 1280 mm, U = 1.2 W/m <sup>2</sup> K, 43.95 kg/unit, triple glazed (Svenska Fönster AB (2020))	1.37	Rootsi
Rõdu ukseüsteem	50	Sliding glass door, with wood-alu frame, U: 0.76 W/m <sup>2</sup> K, 1.89x2.09 m, 168.83 kg/unit, eXtra (Gilje Tre)	0.93	Norra
Siseuksed	30	Doors with wooden frame, interior, DONNEE PAR DEFAUT (DED)	0.98	Prantsusmaa
Leiliruumide klaasuksed	50	Interior glass door, Donnee par default (MDEGD)	1.98	Prantsusmaa
Kortermaja välisuksed	30	Entrance metal door with metal frame, 34.85 kg/m <sup>2</sup> , - ATHENA STANDARD ISOLANT (NEUF ET REHA) - ATHENA ACOUSTIQUE (NEUF ET REHA) - ATHENA STANDARD ISOLANT 2V TIERCES (NEUF ET REHA) (MALERBA)	3.9	Prantsusmaa
Korterite välisuksed	40	Wooden entrance door with glass openings, 40.28 kg/m <sup>2</sup> , Louna (Kaskipuu Oy)	0.89	Soome
Trepi käsipuu	50	Stainless steel handrail, diam. 45mm, Donnee par default (MDEGD)	10.43	Prantsusmaa
Tehnosüsteemid*	25	Electricity distribution system, cabling and central, for all building types, per m <sup>2</sup> GFA	20.22	Eesti

Tabel 16. Modelleerimiseks kasutatud ehitusmaterjalid ja nende vasted One Click LCA materjalidele (GWP-le pole lisatud lokaliseerimistegurit).

\*Toote süsinikujälje (GWP) ühikuks on kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>2</sup>.

## **Lisa 2 – Graafiline osa**





**Tarindite tähised**

- VS-1<sub>RB</sub>
- Krohv 3 mm
- Krohvialusplaat 12,5 mm
- Õhkvahe/terasroovid 25 mm
- Jäik vill 200 mm
- R/b elementsein 200 mm
- Krohv 5 mm

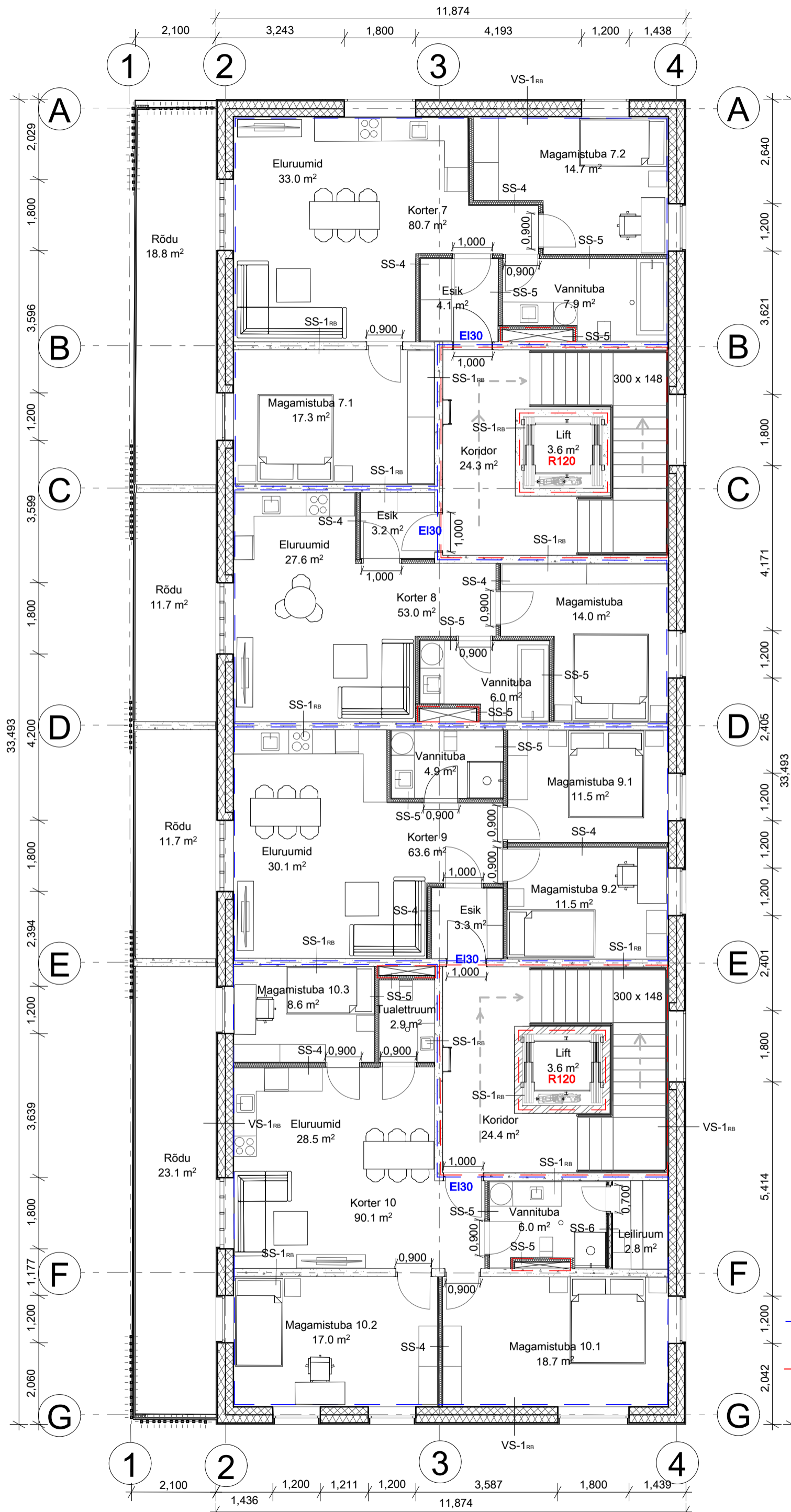
- SS-1<sub>RB</sub>
- R/b elementsein 200 mm

- SS-4
- Tugevdatud kipsplaat 12,5 mm
- Kipsplaat 12,5 mm
- Metallkarkass XR66 66 mm
- Mineraalvillaplaat 50 mm
- Kipsplaat 12,5 mm
- Tugevdatud kipsplaat 12,5 mm

- SS-5
- Tugevdatud kipsplaat 12,5 mm
- Kipsplaat 12,5 mm
- Metallkarkass XR66 66 mm
- Mineraalvillaplaat 50 mm
- Tsementplaat 12,5 mm
- Hüdroisolatsioon 0,5 mm
- Keraamilised seinaplaadid 8 mm

**Tingmärgid**

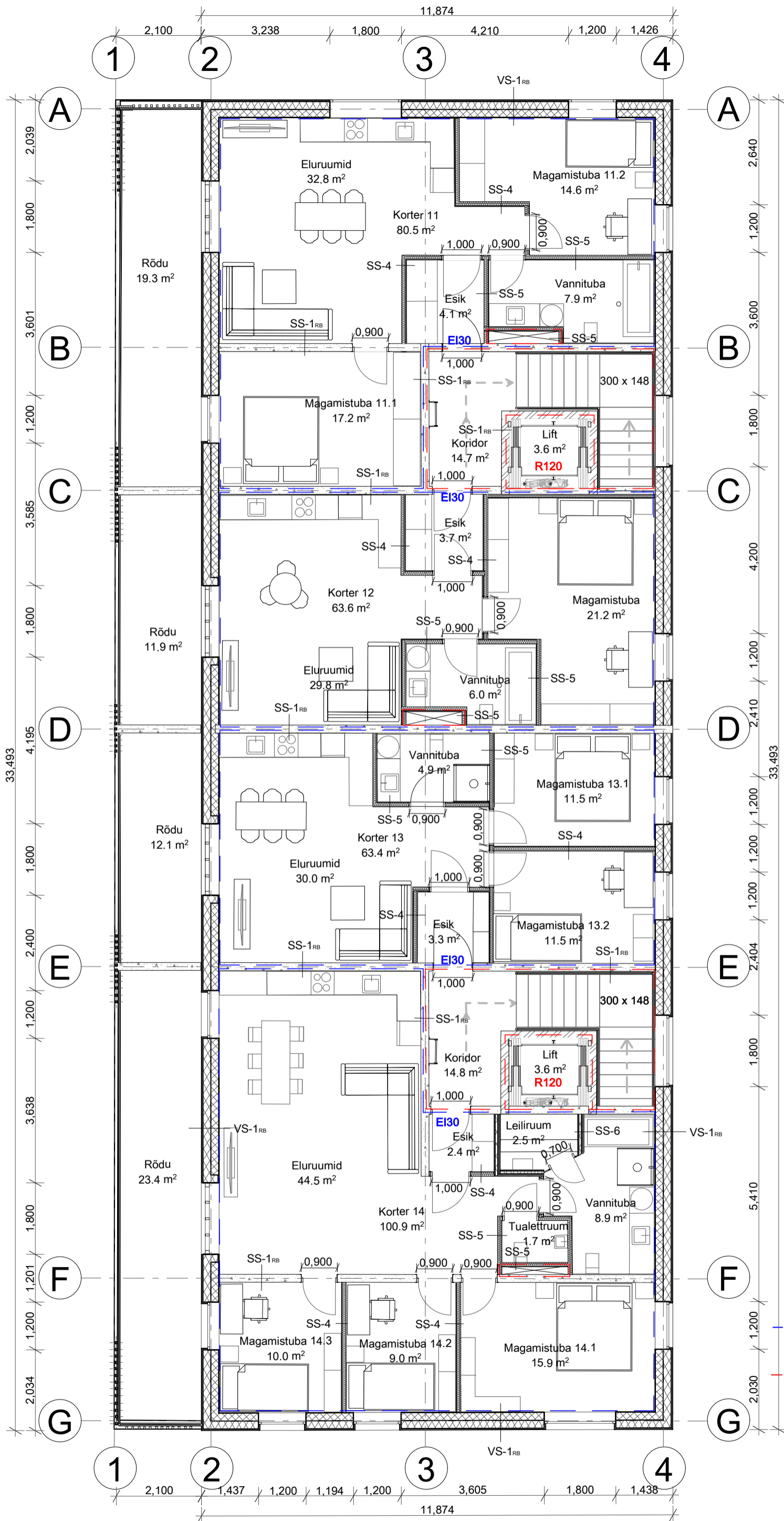
- Konkreetse objekti vajadustest tulenevad tuletõkkesektsioonid
- Kohustuslikud tuletõkkesektsioonid
- Trapp



**Tarindite tähised**

- VS-1<sub>RB</sub>
- Krohv 3 mm
- Krohvialusplaat 12,5 mm
- Õhkvahe/terasroovid 25 mm
- Jäik vill 200 mm
- R/b elementsein 200 mm
- Krohv 5 mm
  
- SS-1<sub>RB</sub>
- R/b elementsein 200 mm
  
- SS-4
- Tugevdatud kipsplaat 12,5 mm
- Kipsplaat 12,5 mm
- Metallkarkass XR66 66 mm
- Mineraalvillplaat 50 mm
- Kipsplaat 12,5 mm
- Tugevdatud kipsplaat 12,5 mm
  
- SS-5
- Tugevdatud kipsplaat 12,5 mm
- Kipsplaat 12,5 mm
- Metallkarkass XR66 66 mm
- Mineraalvillplaat 50 mm
- Tsementplaat 12,5 mm
- Hüdroisolatsioon 0,5 mm
- Keraamilised seinaplaadid 8 mm
  
- SS-6
- Keraamilised seinaplaadid 8 mm
- Hüdroisolatsioon 0,5 mm
- Tsementplaat 12,5 mm
- Metallkarkass XR66 66 mm
- Mineraalvillplaat 50 mm
- Fooliumkattega PIR/PUR plaat 30 mm
- Tuulutusvahe/puitroovid 20 mm
- Lehtpuu sisevoodrilauad 14 mm
  
- Tingmärgid**
- Konkreetse objekti vajadustest tulenevad tuletõkkesektioonid
- Kohustuslikud tuletõkkesektioonid
- Trapp

	Tallinna Tehnikaülikool Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Joonise nimetus: Tüüpse korruse (II ja III) plaaniline lahendus	Lehe nr: 2
	Autor: Annemari Tatra	Kuupäev: 07.05.2023	Mõõtkava: M 1:100



**Tarindite tähised**

VS-1<sub>RB</sub>  
 Krohv 3 mm  
 Krohviausplaad 12,5 mm  
 Õhkvahe/terasroovid 25 mm  
 Jäik vill 200 mm  
 R/b elementsein 200 mm  
 Krohv 5 mm

SS-1<sub>RB</sub>  
 R/b elementsein 200 mm

SS-4  
 Tugevdatud kipsplaat 12,5 mm  
 Kipsplaat 12,5 mm  
 Metallkarkass XR66 66 mm  
 Mineraalvillplaat 50 mm  
 Kipsplaat 12,5 mm  
 Tugevdatud kipsplaat 12,5 mm

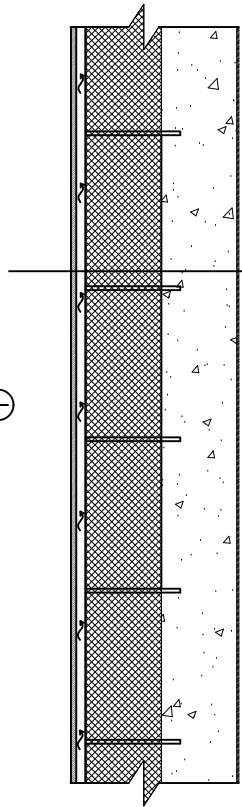
SS-5  
 Tugevdatud kipsplaat 12,5 mm  
 Kipsplaat 12,5 mm  
 Metallkarkass XR66 66 mm  
 Mineraalvillplaat 50 mm  
 Tsementplaat 12,5 mm  
 Hüdroisolatsioon 0,5 mm  
 Keraamilised seinplaadid 8 mm

SS-6  
 Keraamilised seinplaadid 8 mm  
 Hüdroisolatsioon 0,5 mm  
 Tsementplaat 12,5 mm  
 Metallkarkass XR66 66 mm  
 Mineraalvillplaat 50 mm  
 Fooliumkattega PIR/PUR plaat 30 mm  
 Tuulutusvahe/puitroovid 20 mm  
 Lehtpuu sisevoodrilauad 14 mm

**Tingmärgid**

- Konkreetse objekti vajadustest tulenevad tuletõkkesektsioonid
- Kohustuslikud tuletõkkesektsioonid
- Trapp

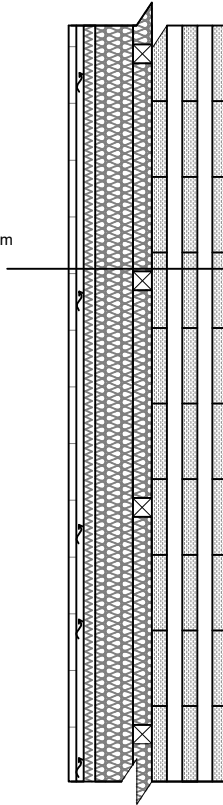
VS-1<sub>RB</sub>



Krohv 3 mm  
 Krohvialusplaat 12.5 mm  
 Õhkvahe/terasroovid kübarprofiilina 1x25mm 25 mm  
 Jäik vill ( $\lambda=0.034 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 200 mm  
 Raudbetoon elementsein (C30/37;  $\lambda=2.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 200 mm  
 Krohv 5 mm

$U_c=0.16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$   
 $d=446 \text{ mm}$

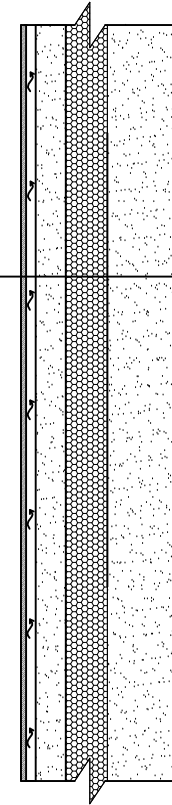
VS-2<sub>CLT</sub>



Voodrilaud peenestatud 20 mm  
 Õhkvahe/puitroovid 20x50mm, s. 600 mm 20 mm  
 Tuuletõkkeplaat ( $\lambda=0.031 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 30 mm  
 Mineraalvillaplaat ( $\lambda=0.035 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) / 100 mm  
 puitroovid 50x100mm, s. 600 mm  
 Mineraalvillaplaat ( $\lambda=0.035 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) / 50mm  
 puitroovid 50x50mm, s. 600 mm  
 Ristkihtpuitpaneel, 5-kihiline (C24;  $\lambda=0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 200 mm


$U_c=0.16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$   
 $d=420 \text{ mm}$

VS-3<sub>PB</sub>

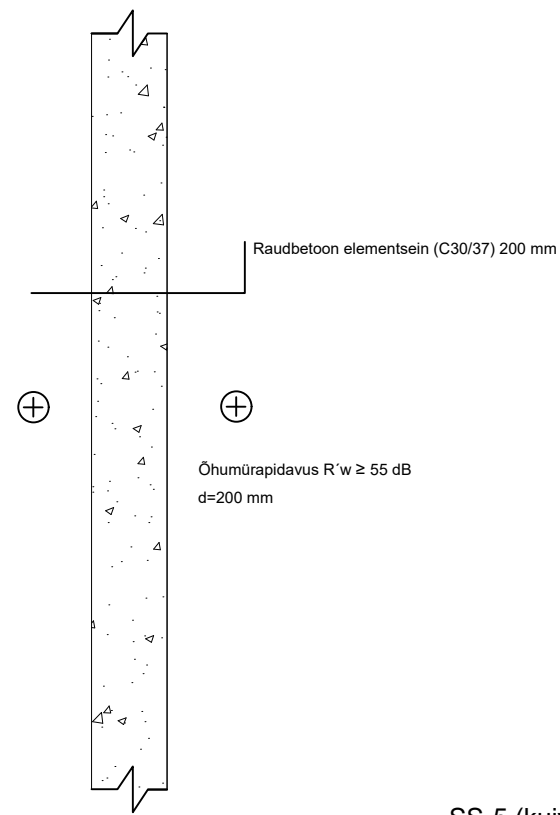


Krohv 3 mm  
 Krohvialusplaat 12.5 mm  
 Õhkvahe/terasroovid kübarprofiilina 1x25mm 25 mm  
 Poorbetoon, väliskoorik ( $\lambda=0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 80 mm  
 PUR ( $\lambda=0.029 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 110 mm  
 Poorbetoon, sisekoorik ( $\lambda=0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 200 mm  
 Pahtel 5 mm

$U_c=0.16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$   
 $d=436 \text{ mm}$

	Tallinna Tehnikaülikool Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Joonise nimetus: Välisseinade (VS) konstruktsioonid	Lehe nr: 3
	Autor: Annemari Tatra	Kuupäev: 09.05.2023	Mõõtkava: M 1:20

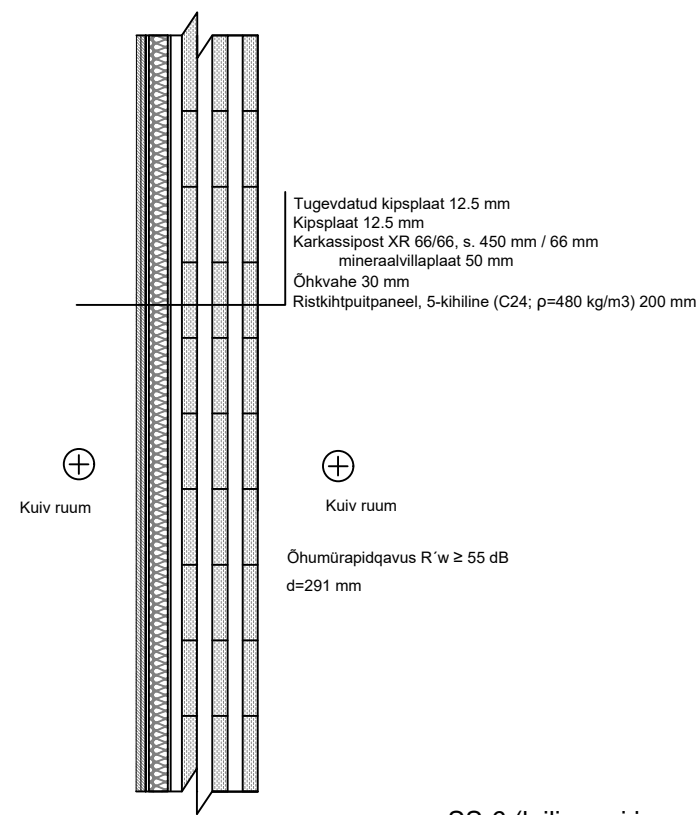
SS-1<sub>RB</sub>  
(kandev)



Raudbetoon elementsein (C30/37) 200 mm

Õhumürapidavus  $R'w \geq 55$  dB  
d=200 mm

SS-2<sub>CLT</sub>  
(kandev)

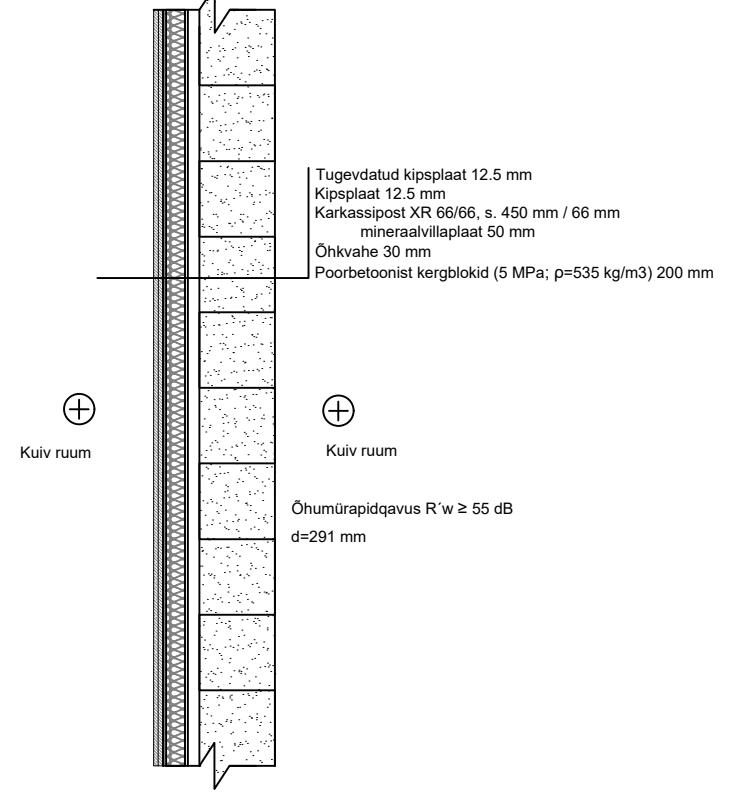


Tugevdatud kipsplaat 12.5 mm  
Kipsplaat 12.5 mm  
Karkassipost XR 66/66, s. 450 mm / 66 mm  
mineraalvillaplaat 50 mm  
Õhkvahe 30 mm  
Ristkihtpuitpaneel, 5-kihiline (C24;  $\rho=480$  kg/m<sup>3</sup>) 200 mm

Kuiv ruum

Õhumürapidavus  $R'w \geq 55$  dB  
d=291 mm

SS-3<sub>PB</sub>  
(kandev)

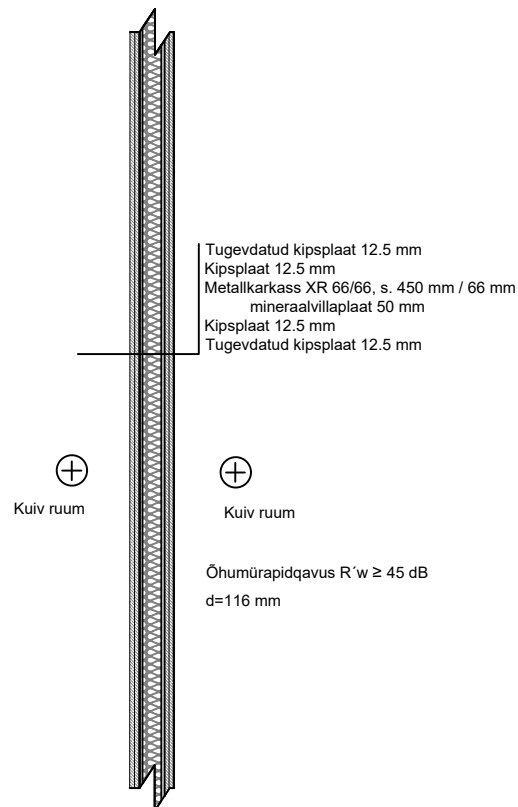


Tugevdatud kipsplaat 12.5 mm  
Kipsplaat 12.5 mm  
Karkassipost XR 66/66, s. 450 mm / 66 mm  
mineraalvillaplaat 50 mm  
Õhkvahe 30 mm  
Pöörbetoonist kergblokid (5 MPa;  $\rho=535$  kg/m<sup>3</sup>) 200 mm

Kuiv ruum

Õhumürapidavus  $R'w \geq 55$  dB  
d=291 mm

SS-4 (kuivade  
ruumide vaheline)

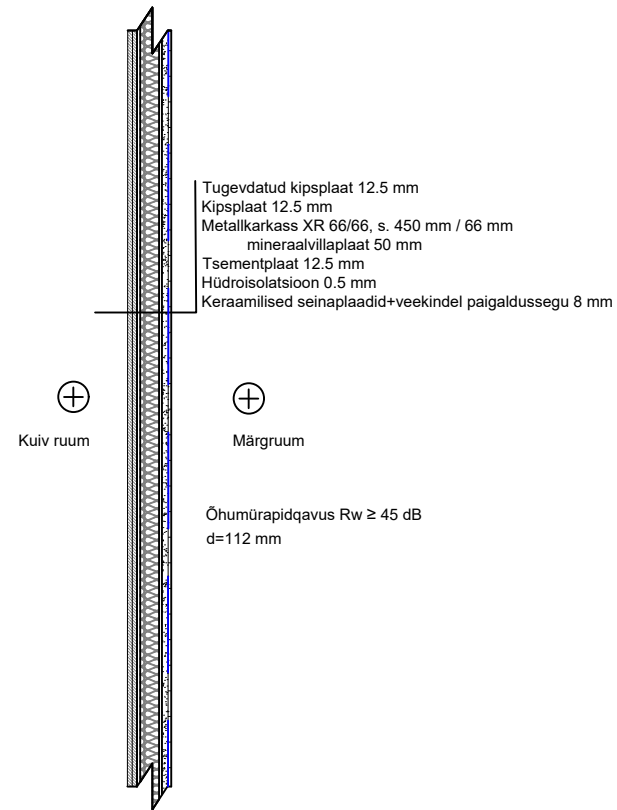


Tugevdatud kipsplaat 12.5 mm  
Kipsplaat 12.5 mm  
Metallkarkass XR 66/66, s. 450 mm / 66 mm  
mineraalvillaplaat 50 mm  
Kipsplaat 12.5 mm  
Tugevdatud kipsplaat 12.5 mm

Kuiv ruum

Õhumürapidavus  $R'w \geq 45$  dB  
d=116 mm

SS-5 (kuiva ja  
märgruumi vaheline)



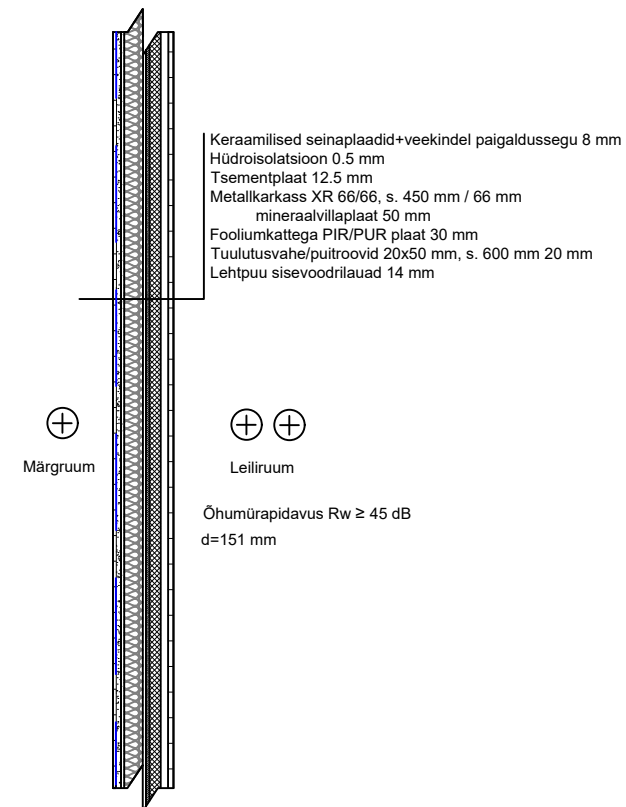
Tugevdatud kipsplaat 12.5 mm  
Kipsplaat 12.5 mm  
Metallkarkass XR 66/66, s. 450 mm / 66 mm  
mineraalvillaplaat 50 mm  
Tsementplaat 12.5 mm  
Hüdroisolatsioon 0.5 mm  
Keraamilised seinaplaadid+veekindel paigaldussegu 8 mm

Kuiv ruum

Märgruum

Õhumürapidavus  $Rw \geq 45$  dB  
d=112 mm

SS-6 (leiliruumi ja  
märgruumi vaheline)



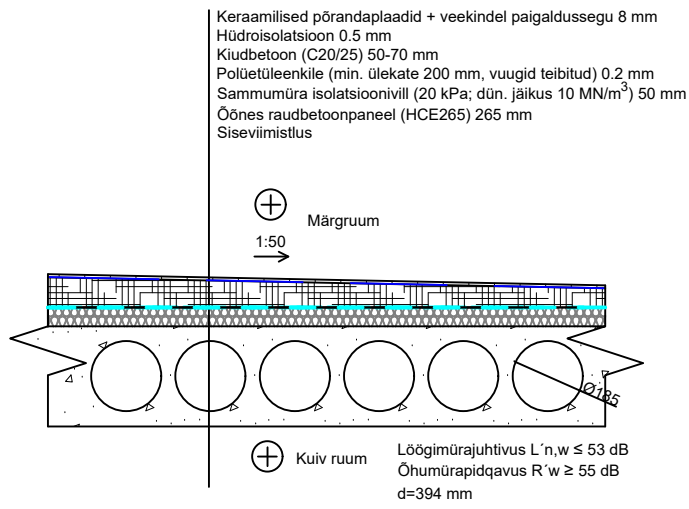
Keraamilised seinaplaadid+veekindel paigaldussegu 8 mm  
Hüdroisolatsioon 0.5 mm  
Tsementplaat 12.5 mm  
Metallkarkass XR 66/66, s. 450 mm / 66 mm  
mineraalvillaplaat 50 mm  
Fooliumkattega PIR/PUR plaat 30 mm  
Tuulutusvahe/puitroovid 20x50 mm, s. 600 mm 20 mm  
Lehtpuu sisevoodrilauad 14 mm

Märgruum

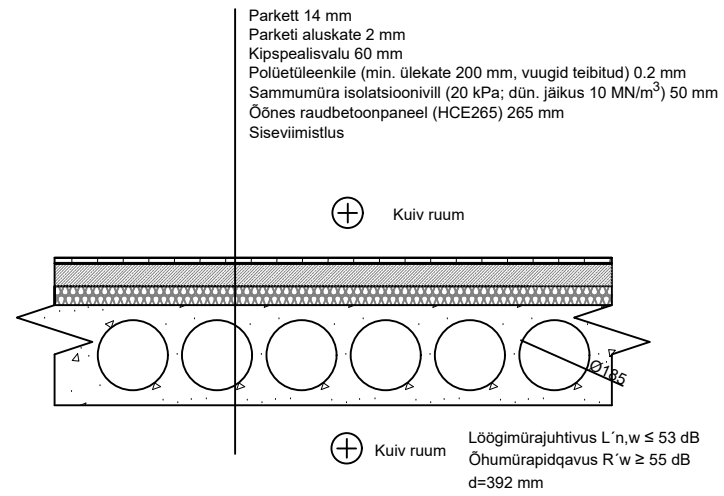
Leiliruum

Õhumürapidavus  $Rw \geq 45$  dB  
d=151 mm

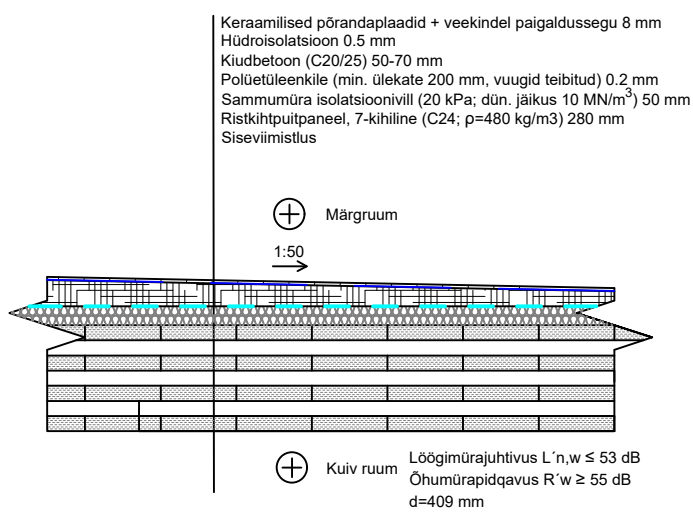
VL-1<sub>RB</sub> (märgruum)



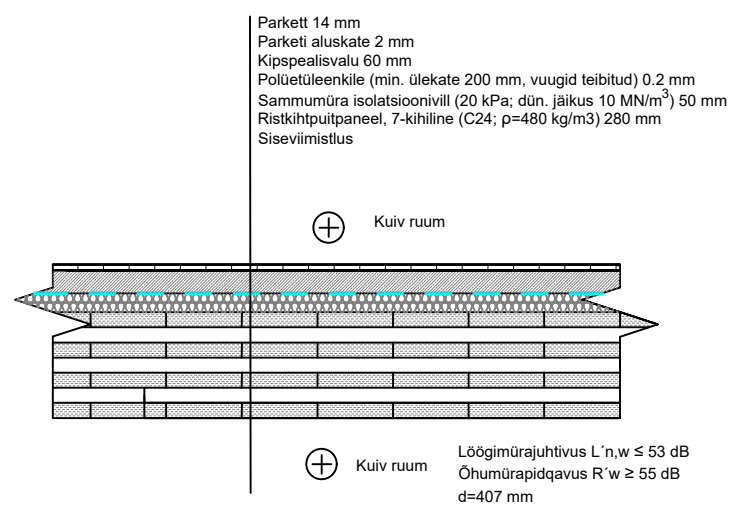
VL-2<sub>RB</sub> (kuiv ruum)



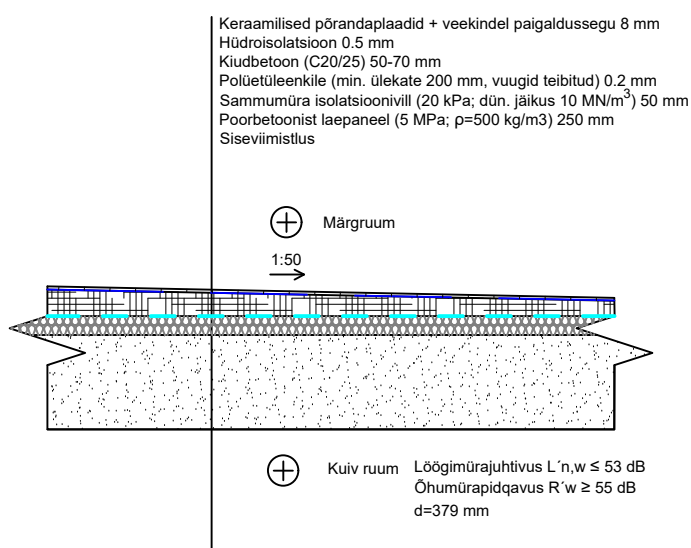
VL-3<sub>CLT</sub> (märgruum)



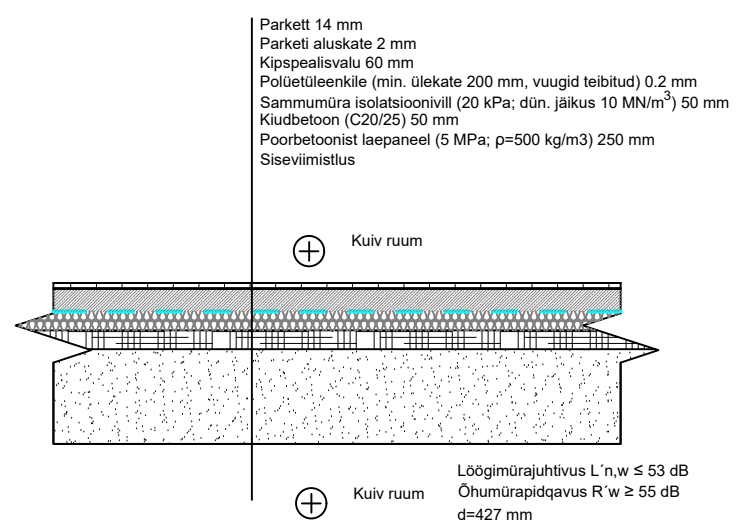
VL-4<sub>CLT</sub> (kuiv ruum)



VL-5<sub>PB</sub> (märgruum)

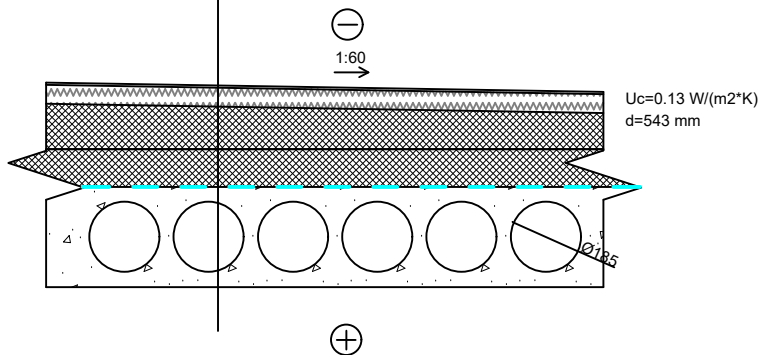


VL-6<sub>PB</sub> (kuiv ruum)



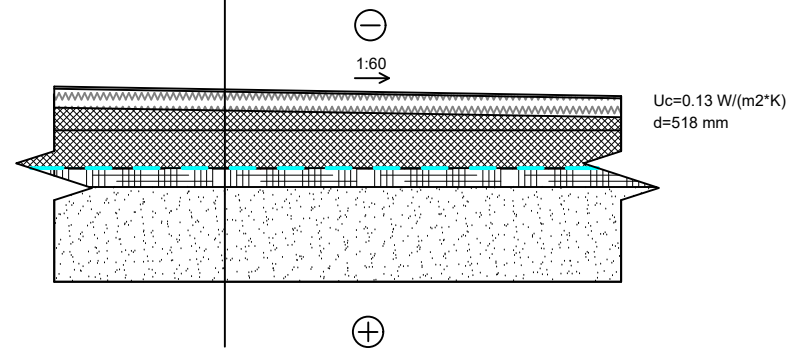
### KL-1 RB

2 x SBS kate 6 mm  
 Tuulutussoontega jäik vill (60 kPa) ( $\lambda=0.037 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 50 mm  
 Kivivillaplaat (30 kPa) ( $\lambda=0.036 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 100-120 mm  
 Kivivillaplaat (30 kPa) ( $\lambda=0.036 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 100 mm  
 Öhu- ja aurutõke, ehitusaegne veetõke SBS aluskate 2 mm  
 ( $Z_p=100 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa/kg}$ )  
 Õõnes raudbetoonpaneel (HCE265;  $\lambda=0.74 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 265 mm  
 Siseviimistlus



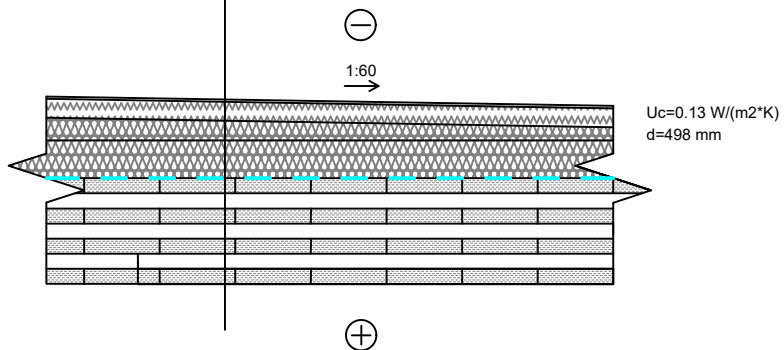
### KL-3 PB

2 x SBS kate 6 mm  
 Tuulutussoontega jäik vill (60 kPa;  $\lambda=0.037 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 50 mm  
 Kivivillaplaat (30 kPa;  $\lambda=0.036 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 60-40 mm  
 Kivivillaplaat (30 kPa;  $\lambda=0.036 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 100 mm  
 Öhu- ja aurutõke, ehitusaegne veetõke SBS aluskate 2 mm  
 ( $Z_p=100 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa/kg}$ )  
 Kiudbetoon (C20/25;  $\lambda=2.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 50 mm  
 Poorbetoonist laepaneel (5 MPa;  $\lambda=0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 250 mm  
 Siseviimistlus



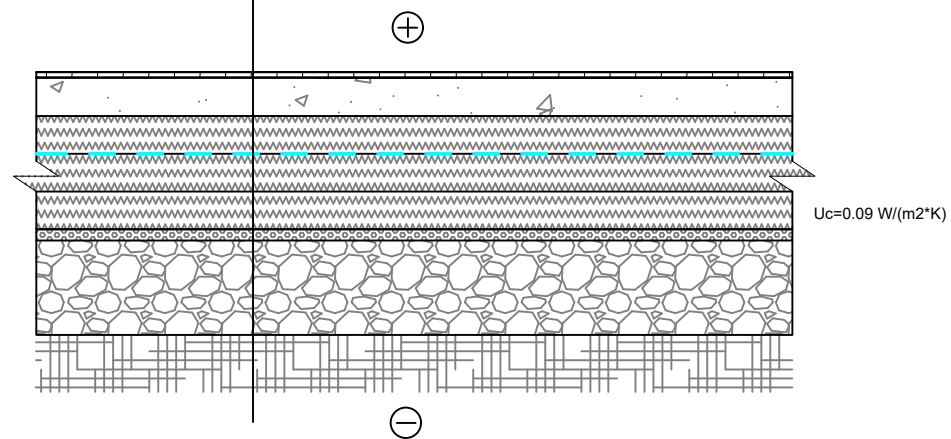
### KL-2 CLT

2 x SBS kate 6 mm  
 Tuulutussoontega jäik vill (60 kPa) ( $\lambda=0.037 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 50 mm  
 Mineraalvillaplaat (30 kPa) ( $\lambda=0.037 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 50-70 mm  
 Mineraalvillaplaat (30 kPa) ( $\lambda=0.037 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 100 mm  
 Öhu- ja aurutõke, ehitusaegne veetõke SBS aluskate 2 mm  
 ( $Z_p=100 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa/kg}$ )  
 Ristkihtpuitpaneel, 7-kihiline (C24;  $\rho=480 \text{ kg/m}^3$ ;  $\lambda=0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 280 mm  
 Siseviimistlus

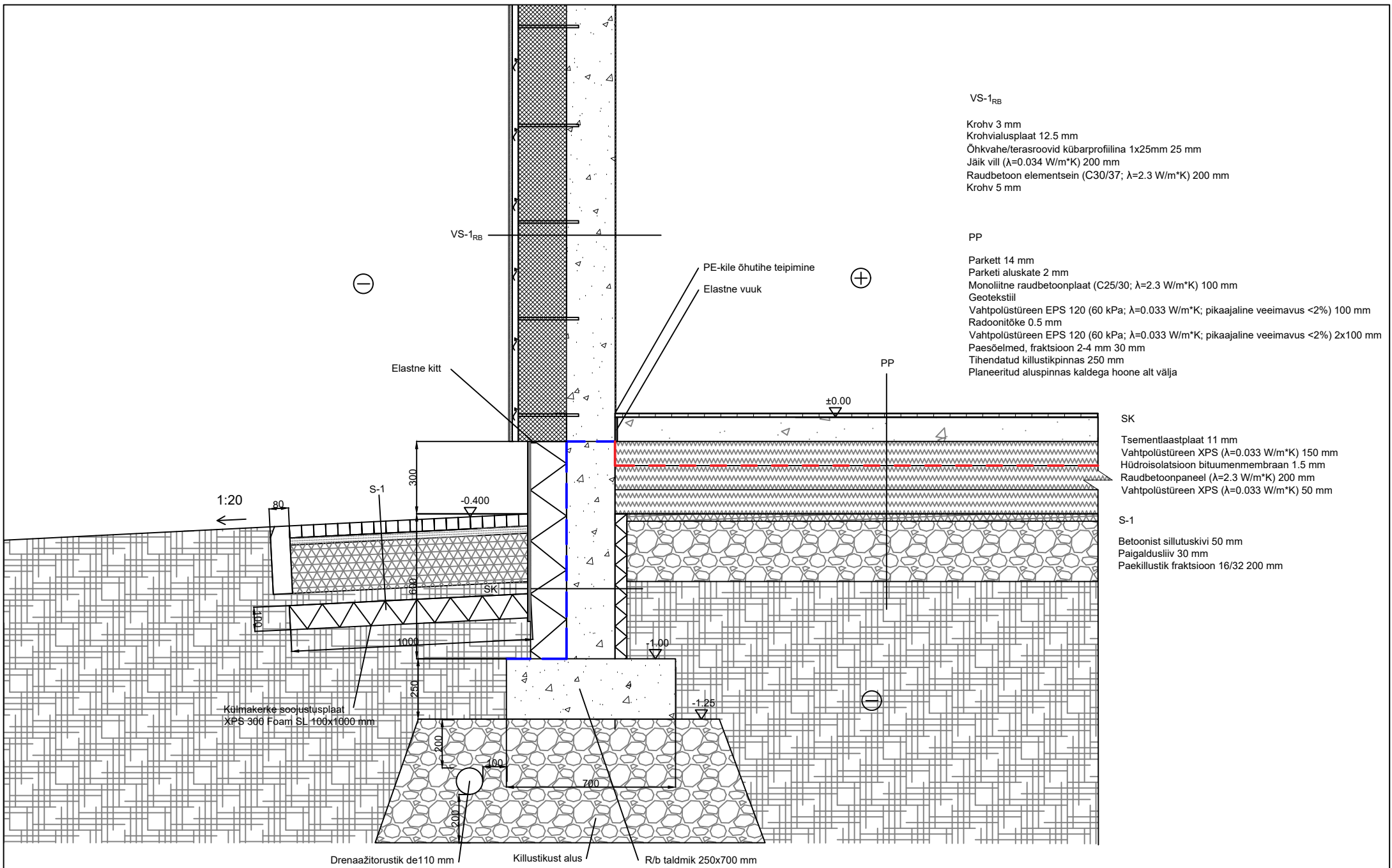


### PP

Parkett 14 mm  
 Parketi aluskate 2 mm  
 Monoliitne raudbetoonplaat (C30/37;  $\lambda=2.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 100 mm  
 Geotekstiil  
 Vahtpolüstüreen EPS 120 (60 kPa;  $\lambda=0.033 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; pikaajaline veemavus <2%) 100 mm  
 Radoonitõke 0.5 mm  
 Vahtpolüstüreen EPS 120 (60 kPa;  $\lambda=0.033 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; pikaajaline veemavus <2%) 2x100 mm  
 Paesõelmed, fraktsioon 2-4 mm 30 mm  
 Tihendatud killustikpinnas 250 mm  
 Planeeritud aluspinnas kaldega hoone alt välja



	Tallinna Tehnikaülikool Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Joonise nimetus: Katuslagede (KL) ja põrand pinnasel (PP) konstruktsioonid	Lehe nr: 6
	Autor: Annemari Tatra	Kuupäev: 13.05.2023	Mõõtkava: M 1:20



VS-1<sub>RB</sub>

Krohv 3 mm  
 Krohvialusplaat 12.5 mm  
 Õhkahe/terasroovid kübarprofiilina 1x25mm 25 mm  
 Jäik vill ( $\lambda=0.034 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 200 mm  
 Raudbetoon elementsein (C30/37;  $\lambda=2.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 200 mm  
 Krohv 5 mm

PP

Parkett 14 mm  
 Parketi aluskate 2 mm  
 Monoliitne raudbetoonplaat (C25/30;  $\lambda=2.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 100 mm  
 Geotekstiil  
 Vahtpolüstüreen EPS 120 (60 kPa;  $\lambda=0.033 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; pikaajaline veemavus <2%) 100 mm  
 Radoonitõke 0.5 mm  
 Vahtpolüstüreen EPS 120 (60 kPa;  $\lambda=0.033 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; pikaajaline veemavus <2%) 2x100 mm  
 Paesõelmed, fraktsioon 2-4 mm 30 mm  
 Tihendatud killustikpinnas 250 mm  
 Planeeritud aluspinnas kaldega hoone alt välja

SK

Tsementlaastplaat 11 mm  
 Vahtpolüstüreen XPS ( $\lambda=0.033 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 150 mm  
 Hüdroisolatsioon bituumenmembran 1.5 mm  
 Raudbetoonpaneel ( $\lambda=2.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 200 mm  
 Vahtpolüstüreen XPS ( $\lambda=0.033 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 50 mm


S-1

Betoonist sillutuskivi 50 mm  
 Paigaldusliiv 30 mm  
 Paekillustik fraktsioon 16/32 200 mm

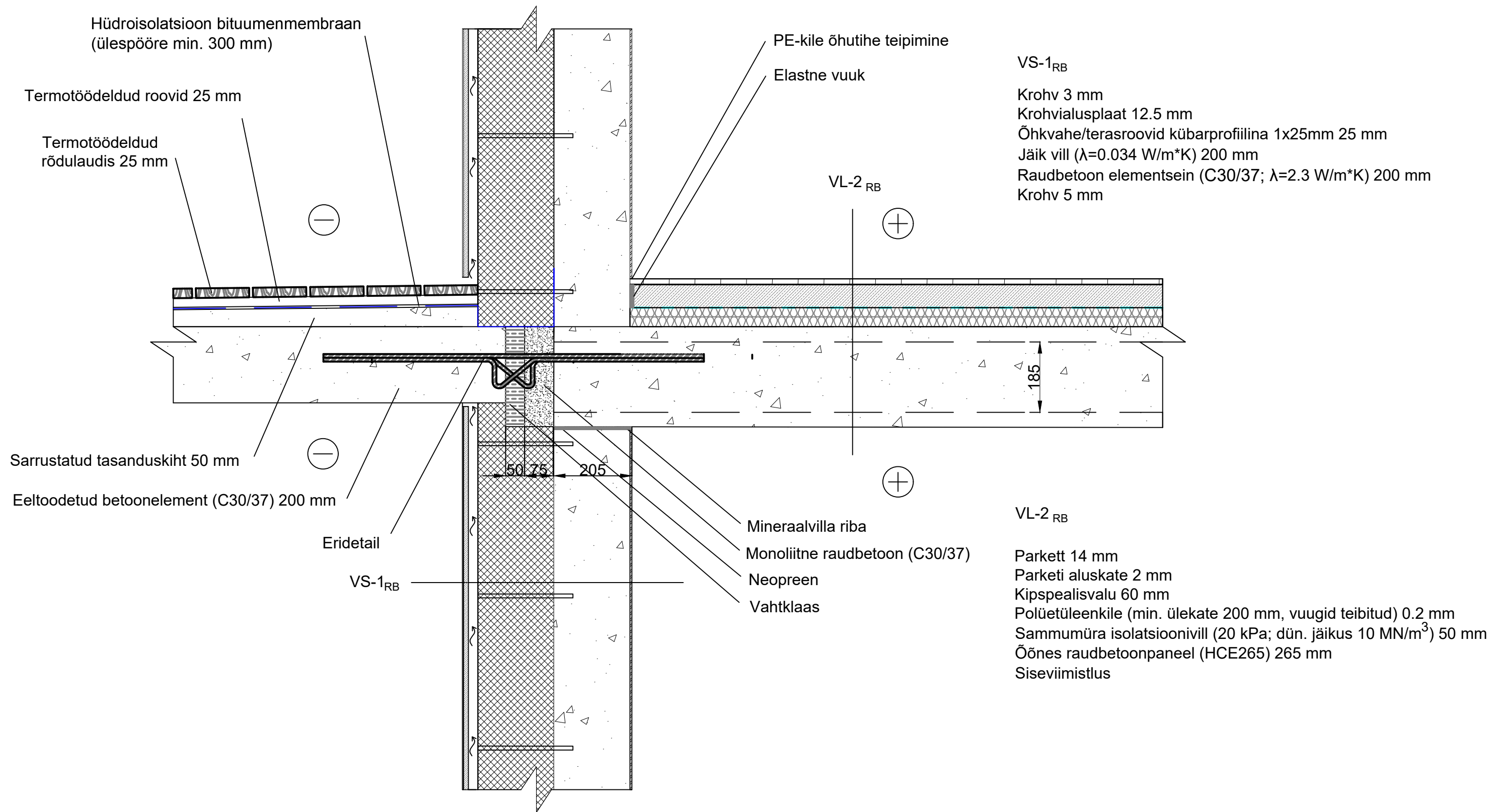
1:20


Külmakerke soojustusplaat  
 XPS 300 Foam SL 100x1000 mm

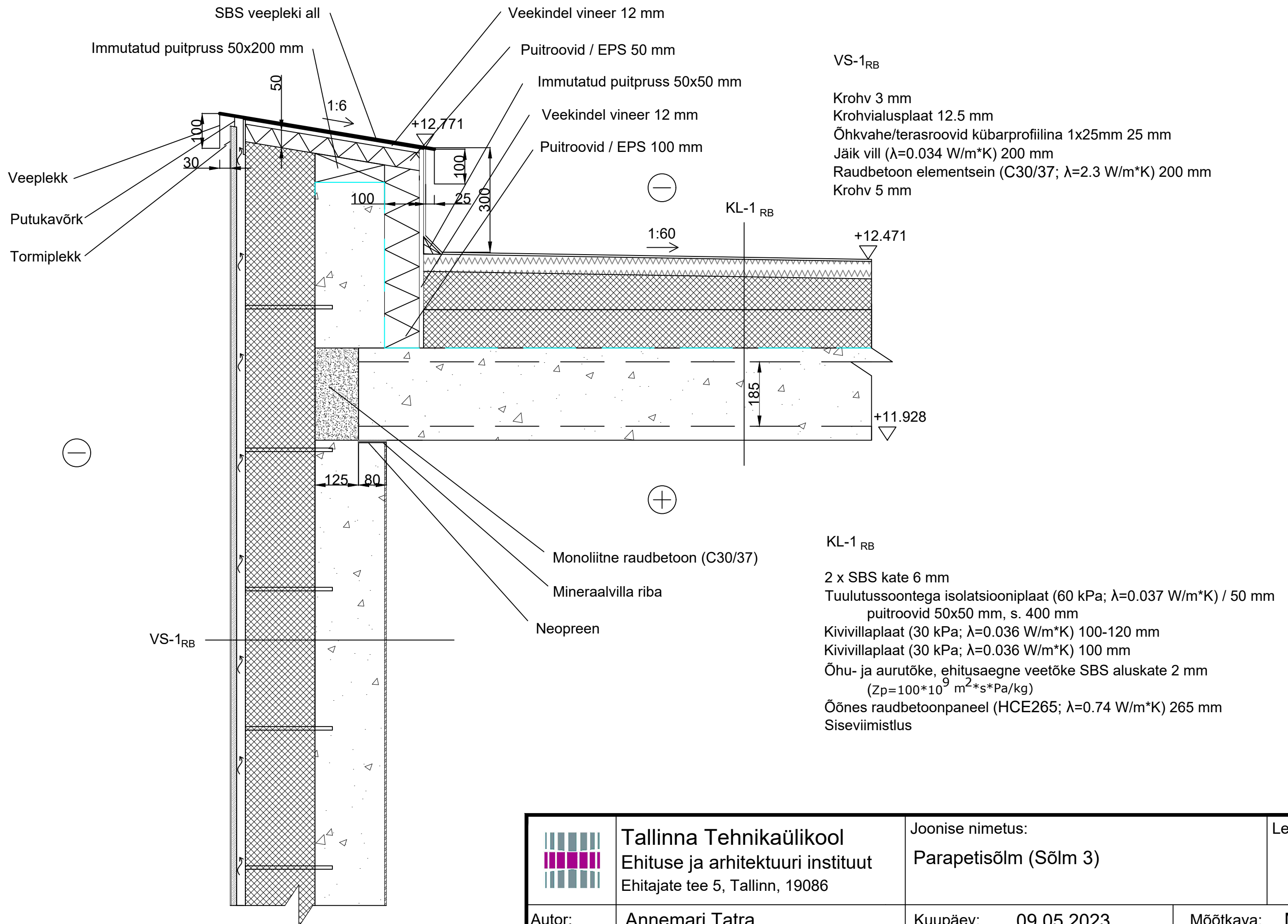
Drenaažitorustik de110 mm      Killustikust alus      R/b taldmik 250x700 mm


	<b>Tallinna Tehnikaülikool</b> Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Joonise nimetus: <b>Soklisõlm (Sõlm 1)</b>	Lehe nr: 7
	Autor: Annemari Tatra	Kuupäev: 09.05.2023	Mõõtkava: M 1:20

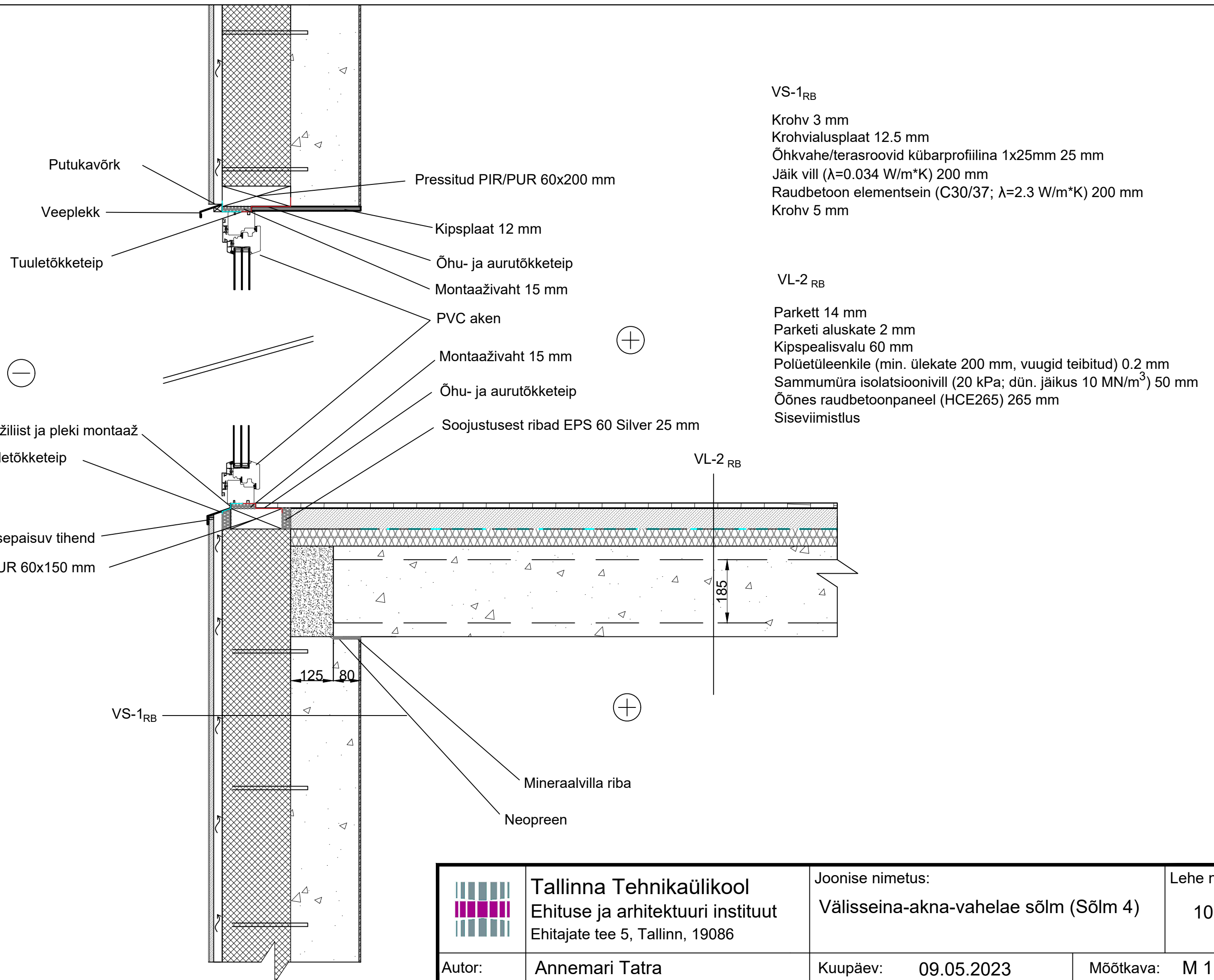




	<b>Tallinna Tehnikaülikool</b> Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Joonise nimetus:	Lehe nr:
		Rõdu-välisseina-vahelae sõlm (Sõlm 2)	8
Autor:	Annemari Tatra	Kuupäev: 09.05.2023	Mõõtkava: M 1:10



	<b>Tallinna Tehnikaülikool</b> Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086		Joonise nimetus: <b>Parapetisõlm (Sõlm 3)</b>	Lehe nr: <b>9</b>
	Autor: <b>Annemari Tatra</b>	Kuupäev: <b>09.05.2023</b>	Mõõtkava: <b>M 1:10</b>	




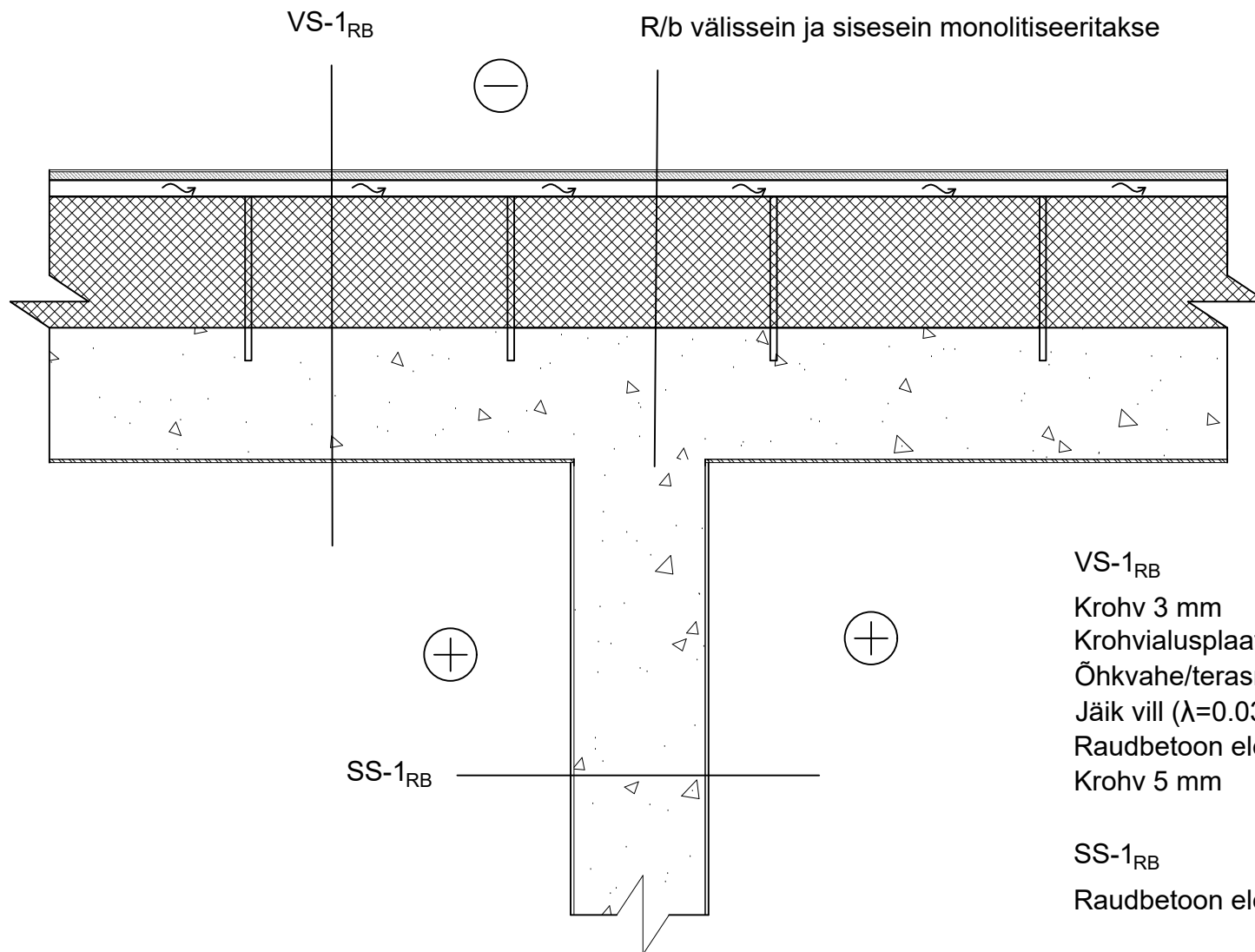
VS-1<sub>RB</sub>

Krohv 3 mm  
 Krohivialusplaat 12.5 mm  
 Õhkvahe/terasroovid kübarprofiilina 1x25mm 25 mm  
 Jäik vill ( $\lambda=0.034 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) 200 mm  
 Raudbetoon elementsein (C30/37;  $\lambda=2.3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) 200 mm  
 Krohv 5 mm

VL-2<sub>RB</sub>

Parkett 14 mm  
 Parketi aluskate 2 mm  
 Kipspealisvalu 60 mm  
 Polüetüleenkile (min. ülekate 200 mm, vuugid teibitud) 0.2 mm  
 Sammumüra isolatsioonivill (20 kPa; dүн. jäikus  $10 \text{ MN/m}^3$ ) 50 mm  
 Õõnes raudbetoonpaneel (HCE265) 265 mm  
 Siseviimistlus

	<b>Tallinna Tehnikaülikool</b> Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086		Joonise nimetus: <b>Välisseina-akna-vahelae sõlm (Sõlm 4)</b>	Lehe nr: 10
	Autor: <b>Annemari Tatra</b>	Kuupäev: <b>09.05.2023</b>	Mõõtkava: <b>M 1:10</b>	



VS-1<sub>RB</sub>

Krohv 3 mm

Krohviausplaat 12.5 mm

Õhkvahe/terasroovid kübarprofiilina 1x25mm 25 mm

Jäik vill ( $\lambda=0.034$  W/m<sup>3</sup>K) 200 mm


Raudbetoon elementsein (C30/37;  $\lambda=2.3$  W/m<sup>3</sup>K) 200 mm

Krohv 5 mm

SS-1<sub>RB</sub>

Raudbetoon elementsein (C30/37) 200 mm

SS-1<sub>RB</sub>

	<p><b>Tallinna Tehnikaülikool</b> Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086</p>	<p>Joonise nimetus: <b>Välisseina (VS) ja siseseina (SS) sõlm</b> (Sõlm 5)</p>		<p>Lehe nr: 11</p>
<p>Autor:</p>	<p>Annemari Tatra</p>	<p>Kuupäev: 09.05.2023</p>	<p>Möötkava: M 1:10</p>	