



Juuso Lindgren

Rakennuksen elinkaaren hiilijalan- jäljen pienentäminen, rakennetekni- set keinot

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

10.03.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Juuso Lindgren
Otsikko:	Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentäminen, rakennetekniset keinot
Sivumäärä:	118 sivua + 1 liitettä
Aika:	10.03.2024
Tutkinto:	Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto
Tutkinto-ohjelma:	Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Rakennetekniikka
Ohjaaja:	Lehtori Anssi Knuutila

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin mitä keinoja rakennetekniikka antaa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen vähentämiseen sekä mitä esteitä hiilijalanjäljen vähentämiselle on rakennetekniikassa.

Raporttiin on koottu tietoa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä. Opinnäytetyön tarkoitus on esittää rakennetekniikan opiskelijoille rakennetekniikan keinoista vähentää rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä ja sen pullonkauloista. Opinnäytetyön päätavoitteena oli kerätä tietoa rakenneteknisistä keinoista vähentää hiilijalanjälkeä ja rakennetekniikan pullonkauloista. Tutkimus tehtiin kirjallisuustutkimuksena ja tuotoksena tehtiin oppimateriaalia rakennetekniikan opetuksen käyttöön

Kirjallisuudesta löytyi monia rakennetekniikan keinoja vähentää rakennuksen hiilijalanjälkeä kuten muotoon vaikuttaminen, fotokatalyyttiset pintamateriaalit tai energiatehokkuuteen vaikuttaminen eri rakennetekniikan keinoin. Pullonkauloina esiintyivät esim. monitavoitteinen optimointi.

Avainsanat: hiilijalanjälki, rakennetekniikka, vähentäminen, elinkaari, rakennus, pullonkaulat, keinot

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Juuso Lindgren
Title: Reducing Building Lifecycle Carbon Footprint, Structural Engineering Solutions
Number of Pages: 118 pages + 1 appendices
Date: 10 march 2024

Degree: Bachelor of engineering
Degree Programme: Degree programme in civil engineering
Professional Major: Structural engineering
Supervisor: Anssi Knuutila, Senior Lecturer

In this final year project it was studied which methods structural engineering provides to lower the carbon footprint of a building life cycle and which barriers structural engineering faces trying to achieve this goal.

The report of the thesis also contains information about the carbon footprint of a building lifecycle. The purpose of the thesis is to present structural engineers the ways through which they can lower the carbon footprint of a building by structural engineering methods. Also, bottlenecks to lower a building's carbon footprint was studied. The main aim of the study was to collect information. The study was conducted as a literature review and the output of the study was teaching material for structural engineering studies.

There are many ways to lower the carbon footprint of a building through methods of structural engineering such as affecting the form of a building, using photocatalytic surface materials, or affecting building energy efficiency by using various structural engineering methods. There were also bottlenecks such as multiple criteria optimizations of different solutions.

Keywords: carbon, footprint, structural, engineering, reduce, lifecycle, building, bottlenecks, methods, solutions

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	2
2	Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki	3
3	Rakentamisvaiheen, materiaalien ja kuljetusten hiilijalanjälki	5
3.1	Valmistusprosessien hiilijalanjälki	12
3.2	Teräs	12
3.3	Betoni (sementti tärkeimpänä, kiviaines ja muut lisäaineet tai korvikkeet)	21
3.4	Puu	22
3.5	Tiili	28
3.6	Lasi	30
3.7	Muovi	33
3.8	Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki; kuljetukset	39
4	Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki; käyttö ja ylläpito	41
4.1	Energia ylläpitoon ja käyttöön	41
4.2	Veden käyttö	44
4.3	Kunnossapito	47
4.4	Korjaukset ja osien vaihto	48
4.5	Muutokset ja uudistukset	49
4.6	Laajat korjaukset	51
5	Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki; rakennuksen purkaminen, kierrätys ja uusiokäyttö	54
5.1	Purkaminen	54
5.2	Purkujätteen kuljetus	55
5.3	Purkujätteen jatkokäsittely	55
5.4	Loppusijoitus	56
6	Rakennetekniset keinot laskea hiilijalanjälkeä ja pullonkaulat	59
6.1	Päätöksenteko	60
6.2	Materiaalitehokkuus	61
6.3	Energiatehokkuuden parantaminen	63

6.4	Vähähiiliset materiaalit	69
6.5	Helposti purettava ja uudelleenrakennettava rakennus sekä muuntaminen	75
6.6	Uudet ratkaisut	84
6.7	Muoto	85
6.8	Laskentatyökalujen esteet sisälletyn hiilen vähentämiseen	88
7	Ilmastovaikutuksen arviointi	91
7.1	Menetelmät	91
8	Opinnäytetyön tuotos	93
9	Pohdinta	93
10	Yhteenveto	95
	Lähteet	98
	Liitteet	
	Liite 1	

Lyhenteet

CCS: *Capture and collect*. Hiilen talteenotto teräksen valmistuksessa.

DfD: *Design for deconstruction*. Rakennuksen purkamisen suunnittelu niin , että rakennus voidaan purkaa suoraan hyödynnettäviin osiin.

GPC: *Geopolymer concrete*. Geopolymeeribetoni.

HISARNA: *High intensity smelting*. Teräksenvalmistusmenetelmä.

HYBRIT: *Hydrogen breakthrough ironmaking technology*. Vetytelkistetty teräskerähdysprojekti.

LCC: *Lifecycle costing*. Elinkaarikustannuslaskenta.

LCEA: *Lifecycle energy analysis*. Rakennuksen energia-analyysi.

LVIS: Lämpö, vesi, ilma, sähkö.

MOE: *Molten oxide electrolysis*. Teräksen valmistusmenetelmä.

Nm³: Kiintoaineiden tilavuus

ppm: *Parts per million*. Miljoonasosa jotakin

ULCOLYSIS: *High-temperature molten oxide electrolysis steelmaking*. Teräksenvalmistusmenetelmä.

ULCOS: *Ultra-low CO₂ steelmaking*. Euroopan teräsalan aloite.

1 Johdanto

Ilmastonmuutoksen hillitseminen ja siihen sopeutuminen ovat yhteiskunnan yksi suurimmista haasteista. Rakentamisella ja rakennuksilla on tähän merkittävä vaikutus. Suunnittelijat voivat vaikuttaa rakennusten hiilijalanjälkeen huomattavasti päätöksillään ja ammattitaidollaan. Ilmastovaikutuksien huomioiminen tulee olemaan pakollinen osa rakennusalaa, jos haluamme estää ilmastonmuutoksen vakavat seuraukset. Nyt ja tulevaisuudessa tulemme tarvitsemaan ympäristötietoisia toimijoita rakennusalalle, koska rakennusala vastaa tällä hetkellä noin 40% maailman hiilidioksidipäästöistä. Näillä päästöillä on huomattavasti säästöpotentiaalia, kun uusia ratkaisuja kehitetään ja vanhoja hiotaan paremmaksi. Ratkaisut ovat rakennetekniikassa monimuotoisia kuten materiaalivalinnat tai rakennusten purettavuuteen vaikuttaminen.

Metropolian rakennustekniikan syventäviä opintoja opettaessa on syntynyt tarve kehittää tarkempaa oppimateriaalia rakennuksen elinkaarenaikaisen hiilijalanjäljen pienentämisestä rakennetekniikan keinoin, tämän avuksi kartoitetaan elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen muodostuminen tuotevaiheesta elinkaaren loppuun. Hiilijalanjälki tarkoittaa tuotteen, toiminnan tai palvelun aikaansaamaa ilmastokuormaa eli kuinka paljon se aiheuttaa kasvihuonekaasuja. Elinkaaren vaiheet rakentamisessa ovat tuotevaihe, rakentaminen, käyttövaihe ja elinkaaren loppu. Työ tehdään oppimateriaalin ja opetuksen kehittämistä varten. Oppimateriaali tulee käyttöön rakennetekniikan opintoihin, tästä syystä keskitytään rakennetekniikan keinoihin ja esteisiin vähentää hiilijalanjälkeä. Hakujen perusteella ei ole löytynyt muita tutkimuksia, jotka ovat koonneet tietoa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä yleisellä tavalla, jossa on yhdessä myös rakennetekniikan näkökulmia vähähiiliseen rakentamiseen.

Ympäristöministeriö on julkaissut tiekartan vuonna 2017 vähähiilisellemme rakentamiselle. Tämän kartan mukaan 2025 mennessä vähähiilisyys liittyy osaksi rakennusmääräyksiä. Vähähiilisyys tulee myös saapumaan osaksi maankäyttö- ja rakennuslain kokonaisuudistusta. Hiilidioksidi aiheuttaa ilmastonmuutosta

torjumalla maapallon pinnasta heijastuvat auringonsäteet takaisin maapalloon näin lämmittäen ilmastoa.

Opinnäytetyön tarkoitus on antaa rakennetekniikan opiskelijoille kuvaa, mistä rakennuksen hiilijalanjälki koostuu, opettaa rakennetekniikan keinoista vähentää sitä ja auttaa tiedostamaan rakennetekniikan pullonkauloja hiilijalanjäljen pienentämiseen.

Tavoite on referoida lähteitä niin, että syntyy kokoelma rakennetekniikan keinoista ja rakennetekniikan pullonkauloista pienentää rakennuksen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä. Tämän jälkeen lisätavoitteena on luoda PowerPoint-esityksiä, noin viisi diaa raportin viidestä aiheesta hyvin tiivistetyillä avainsanoilla ja havainnollistavilla kuvilla. Oppilaat voivat hyödyntää oppimistehtävässä. PowerPoint tulee liitteeksi raporttiin.

Opinnäytetyössä käytetty tutkimusmenetelmä on kirjallisuustutkimus. Erilaisia lähdetyyppisiä ovat esim. tutkimusraportit, ammattilehdet ja kirjat.

Talotekniikan ratkaisuihin ja niiden vaikutukseen ei perehdytä tässä työssä, vaikka vaikutus on huomattava esim. käytön hiilijalanjälkeen, mutta se ei ole rakennetekniikan aihepiirissä ja siksi se on rajattu pois. Talotekniikkaa ajavia mekanismeja on kuitenkin käsitelty kuten lämmitystä ja talotekniikkaa lyhyesti niiden kautta. Myös positiiviset ilmastovaikutukset eli hiilikädenjälki on rajattu pois työstä.

2 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki

Rakennuksen elinkaaren vaiheisiin kuuluu tuotevaihe, rakentaminen, käyttövaihe ja elinkaaren loppuvaihe. Tällä hetkellä käyttövaihe aiheuttaa eniten hiilidioksidipäästöjä, tuotevaihe toiseksi eniten, loput vaiheet aiheuttavat hiilidioksidipäästöjä suhteessa vähän verrattuna näihin kahteen, noin 2,5-3% kokonaispäästöistä. Tulevaisuudessa käyttövaiheen osuus päästöistä laskee, kun rakennuksilta vaaditaan parempaa energiatehokkuutta. Tästä syystä muiden

vaiheiden merkitys kasvaa ja näin rakennesuunnittelijan rooli kasvaa vähähiilisyiden mahdollistajana. [63, s.17, 23.]

Tuotevaiheen hiilidioksidipäästöt syntyvät raaka-aineiden hankinnasta, kuljetuksista tuotantolaitokseen ja tuotantoprosesseista. Materiaaleja on runsaasti ja niiden raaka-aineiden hankinnan ja tuotantoprosessien päästöt vaihtelevat suuresti sekä niiden ominaisuudet ja käyttötavat ovat usein vaihtelevia. Teräksen ja sementin valmistus aiheuttaa eniten hiilidioksidipäästöjä materiaaleista. Huomattavia muutoksia näiden materiaalien hiilijalanjälkeen tutkitaan vetypelkistetyin teräksen ja ekobetonin kautta. [63, s.21.]

Rakentamisvaiheessa hiilidioksidipäästöt syntyvät rakennustuotteiden kuljetuksesta työmaalle ja työmaatoiminnoista kuten maarakennuksesta, rakentamisesta, lämmityksestä ja kuivauksesta. Rakentamisen hiilidioksidipäästöjä arvioitaessa otetaan yleensä huomioon vain työmaalla käytettyjen laitteiden polttoainekulutus. Työmaalla käytettyjen sähkölaitteiden hiilijalanjälki vaihtelee riippuen niiden sähkön alkuperästä ja siitä, miten paljon tehosta menee hyötyyn. [63, s.22-23.]

Käyttövaiheen hiilidioksidipäästöihin liittyy tuotteen käyttöä, kunnossapitoa, korjauksia, osien vaihtoa, laajoja korjauksia, energian ja veden käyttöä. Käyttövaiheessa suurimmat päästöt syntyvät energian kulutuksesta. Energiaa kuluu sisäilman lämmittämiseen, käyttöveden lämmittämiseen, talouden laitteiden ja muun sähkön kulutukseen ja ilmanvaihtoon voidaan tarvita myös sähköenergiaa. Käyttövaiheen aikana voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä parannuksilla ajan kuluessa toisin kuin rakennusvaiheessa, jossa kaikki haitat ja hyödyt tapahtuvat nykyisyydessä ja ovat peruuttamattomia. [63, s.23-24.]

Rakennuksen elinkaaren loppuvaiheeseen kuuluvat purkaminen, kuljetukset jatkokäsittelyyn, purkujätteen käsittely ja purkujätteen loppusijoitus. Elinkaaren loppuvaihe aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä samassa luokassa rakentamisen kanssa. Rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle rajataan usein uusiokäytön ja kierrätyksen hyödyt. [63, s.25-26.]

3 Rakentamisvaiheen, materiaalien ja kuljetusten hiilijalanjälki

Rakentamisen hiilijalanjäljen muodostumiseen vaikuttaa tuotteiden valmiusaste, materiaalien kuljetukset työmaalle ja työmaatoiminnot. Rakentaminen ja kuljetukset ovat usein suhteellisen pieni osa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä. Toisaalta, kun tarkastellaan väylien ja kunnallistekniikan käyttöä rakentamisen mahdollistamisessa ja niiden hiilijalanjälkeä rakentamisen ja kuljetusten tärkeys, tulee huomattavaksi. Suunnittelun lisäksi edellä mainittuihin päästöihin voi vaikuttaa suuresti rakentamisen hankintojen ja toteutuksen suunnittelulla. Suunnittelulla vaikutetaan eniten siihen, miten rakennus saatetaan rakennusvaiheen läpi. Merkitys kantautuu materiaalin käytön hyötysuhteeseen ajateltuna sama toiminto, mutta eri materiaalimäärä ja työmaan aikaiseen hiilijalanjälkeen. Eri suunnitteluratkaisulla voidaan saavuttaa yhtä suuri lattia-ala kuin toisella, mutta vähemmällä materiaalimäärällä. Esivalmistus voi vaikuttaa edullisesti hiilijalanjälkeen verrattuna paikallavalettuun kuten tilaelementtien ja muiden esivalmistettujen betoniosien kautta. Betonin esivalmistuksen hyöty on valmistajan tilat, joissa lämpötila on tasainen eli jos tehtäisiin paikallavalu talvella pitää betonia lämmittää lisäksi muotteihin, suojauksiin ja telineisiin kuluu aikaa ja energiaa. Tilaelementtien käyttö vähentää myös vesivahingon riskiä, mutta käyttää enemmän materiaalia. Päästöjen erot esivalmistetulla tuotteella rinnastettuna paikallatehtyyn on suhteessa koko rakennuksen elinkaareen pienet. [1, s.130-131.]

Suunnitteluratkaisuilla on myös vaikutus kuljetuksiin. Vaikka säästöt verrattuna rakennuksen elinkaareen ovat pienet, niin niiden vähentäminen on yhteiskunnallinen kysymys. [1, s.131.]

Kuittisen 2019 luoman arviointimenetelmän perusteella työmaatoimintojen CO₂-päästöjen tutkinnassa voidaan hyödyntää liitteissä olevaa taulukkoarvoa, joka on 27,30 kg CO₂-ekvivalenttia/m². Työmaatoimintojen hiilijalanjälki voidaan laskea myös tapauskohtaisesti työmaan ostoenergian ja polttoaineiden avulla.

Energiamuodot vaikuttavat oleellisesti päästöjen laskennassa. Arviointimenetelmän taulukossa uusiutuvat energianlähteet ovat saaneet arvon 0 g CO₂/kWh ja fossiiliset polttoaineet 260 g CO₂/kWh ja sähkö 2020 arvo saanut 121 g CO₂/kWh. Sähkön päästökerroin, jonka arviointimenetelmä on arvioinut, on vuonna 2120 0 g CO₂/kWh ja 2020 121 g CO₂/kWh. Arviointimenetelmä neuvoo myös ottamaan huomioon työmaan tuottaman jätteen määrän. [27, s.19.] [28, s.46.]

Ympäristöministeriön 2021 menetelmäluonnos viittaa kansalliseen päästötietokantaan rakennustoimintojen hiilijalanjäljen arvioinnissa. Tapauskohtaisesti voidaan laskea kulutetun energian ja polttoaineen kautta hyödyntäen kansallista päästötietokantaa tai muuta hyväksyttyä menetelmää. [27, s.19.]

Työmailla käytetään paljon erityyppistä kalustoa rakentamiseen ja siirtoihin ja niiden tyypit vaihtelevat työmaan mukaan. Tavallisimpia siirtoihin ja nostoihin käytettäviä työkoneita ovat ajoneuvonosturi, kurottaja ja torninosturi. Näiden laitteiden päästöjä voidaan arvioida rakentamisen päästötietokannan avulla. [30, s.34.]

Taulukko 1. Työkoneiden keskiarvoiset päästötiedot LIPASTO-tietokannasta [31 s. 7].

Drivable machines, diesel	Average power [kW]	Average load factor	CO2e [gCO2e/l]
Cranes	99	0,26	2673
Other lifts, diesel	33	0,30	2672
Forklifts, diesel	88	0,30	2672
Bulldozers	112	0,40	2674
Rollers	45	0,30	2672
Wheel loaders	94	0,33	2673
Backhoe loaders	74	0,33	2672
Miniexcavators	22	0,40	2672
Excavators, skid steer	104	0,31	2672
Excavators, rubber tire	88	0,32	2672
Tractors in industry	67	0,29	2675
Other tractors	58	0,27	2679
Harvesters	149	0,40	2674
Forwarders (forest tractors)	105	0,30	2673
Dumpers	153	0,30	2672
Sid steer loaders	50	0,25	2672
Telehandlers	78	0,28	2672
Lawn tractor, diesel	12	0,30	2672
Other drivable machines, diesel	89	0,36	2672
Average			2673

Hyvin järjestetty työmaan sisäinen logistiikka ja materiaalivirta antaa siirroille parhaat mahdolliset kulkureitit, nostopaikat, purku-, lastaus- ja varastointialueet sekä hyvän jätehuollon toteutuksen laskien näin laitteiden käyttöä ja määrää. Myös kuljetusten ajoitus vaikuttaa siirtojen onnistumiseen. [32, s.18-22].

Suomen ilmasto aiheuttaa tarvetta suojautua siltä eri tavoin eri puolella Suomea. Suojautuminen voi olla suojautumista lumisateilta, pakkasilta tai vesisateilta. Myös kesällä on hyvä suojata betoni niin ettei se kuivu liian nopeasti. Suojautumalla lumisateilta voidaan osittain välttyä energiaa vieviltä sulatus- ja puhdistustoimilta. Paikallavaletut betonirakenteet tarvitsevat lämmittämistä ja suojauksia talvella erityisesti valun alkuvaiheessa, jotta saadaan aikaan kohtuullinen muottikierto ja vältetään betonin jäätymiseltä. Betonin jäätyminen turmelee valun. Betonin tyyppillä voidaan myös vaikuttaa lämmityksen tarpeeseen. Betoni pitää lisäksi lämmittää niin, ettei siihen aiheudu 20 °C suurempia lämpötilaeroja. [26, s.21-23.]

Lämmitystehon valitseminen on tärkeää tehdä niin, että työmaan lämmityksen tarve täyttyy muttei ylitä. Seurauksena liian pienellä lämmitysteholla voi olla

esimerkiksi betonin vaurioituminen. liian suuri lämmitysteho menee hukkaan. [26, s.24.]

Rakentamisen aikainen lämmitys valitaan usein kokemusperusteisesti, mutta koska aina ei pystytä kopioimaan vanhaa kaavaa pitäisi siis ottaa avuksi laskennallisia menetelmiä. Myös rakentamisen eri vaiheiden lämmitysvaihtoehdot pitää harkita täsmällisesti. Runkovaiheen lämmityksen tarve on luultavasti vaikein määrittellä. Huomioon otettavia asioita ovat mm. eristys, lämmitettävä tilavuus ja lämpötilaerot lämmitettävän tilan ja ulkoilman välillä. [26, s.24.]

Lämmittäminen on tärkeä osa rakentamisvaiheen energiankäytöstä noin 70 % rakentamisen energiasta menee lämmitykseen. Eri olosuhteissa rakennettuja rakennuksia on hankalaa yhdistää täsmälleen toisiinsa. Oikein valittu lämmitystapa ja sen tehokkuus oikealle lämmityskohteelle on oleellista energian ja ajan säästön kannalta. Lämmitystä voidaan tehostaa tai sen tarvetta vähentää sääsuojauksella, eristämällä ja rakennuksen tiivydellä. Kohde, energian hinta ja laitteiden hankinnan mahdollisuudet voivat kaventaa mahdollisuuksia lämmittimien valinnassa. [26, s.66.]

Lämmitysmenetelmiä on useita ja niiden käyttötarkoitukset vaihtelevat. Sähkölämmitys on luotettava ja yksinkertainen tapa lämmittää se sopii hyvin pieniin lämmitettäviin tiloihin ja se on taloudellisesti kevyttä. Sähkökäyttöisten lämmityslaitteiden lämmityskyky on yleensä melko pieni riippuen kuinka paljon tehoa sähköverkko antaa. Sähköön perustuvien lämmittimien päästöt riippuvat vahvasti tuotetun sähkön alkuperästä. [26, s.29.]

Nestekaasulämmitystä sovelletaan pääasiassa runkovaiheessa. Nestekaasulämmittimien etu on niiden pienessä koossa ja painossa verrattuna niiden lämmitystehtoon. Kun kilo nestekaasua palaa vapautuu 1,5 kg vettä ja 4,5 kg hiilidioksidia. Nestekaasun käsittelyyn liittyy useita säännöksiä, jolloin päästöihin voi tulla lisäystä huonosti hoidetusta nestekaasun kuljetuksesta ja varastoinnista. [26, s.30–31.]

Polttoöljyn käyttö on kannattavinta suurissa ja jatkuvissa tiloissa esim. parkki-halleissa, teollisuus- ja kauppataloissa. Kun litra öljyä palaa, vapautuu 2,7 kg hiilidioksidia ja 10 kW energiaa. Siirrettävät 30–100 kW:n öljylämmittimet sopivat esim. asuinrakennuksiin tai halleihin, jotka ovat alle 1000 m² [26, s.35.]

Lämpökontit ja -keskukset soveltuvat parhaiten kookkaisiin jatkuviin tiloihin esim. halleihin, ostoskeskuksiin ja sääsuojiin. 400 kW kontti käyttää noin 20–45 litraa öljyä tunnilta. [26, s.36.]

Rakennusprojektin aikana voi tulla sellainen tilanne, että kaukolämpöä ei ole saatavilla. Tässä tilanteessa voidaan hyödyntää nestekiertoista lämmitysjärjestelmää ja siirrettävää lämmityskeskusta, joka käyttää energianlähteenä yleensä kevyttä polttoöljyä. Nämä laitteet tuottavat lämmitystehoa 200–800 kW riippuen niiden tyypistä. [26, s.37.]

Kaukolämpöpuhaltimet ovat käytössä työmaalla yleensä runkovaiheen loppupäässä ja sisätöiden alkaessa. Tämän laitteen käyttöteho on yleensä 7,5–40 kW. [26, s.38.]

Lämpömattoa käytetään eri maa-ainesten, viemäriputkien sulatukseen sekä sähkö- ja kuitujohtojen lämmittämiseen. Matot ovat kooltaan yleensä 1mx3m ja teholtaan 1 kW käyttäen sähköenergiaa. [26, s.39.]

Roudansulatuslämmitin lämmittää noin 400 neliometriä alaa. Se on järkevä tapa sulattaa laajoja aloja. Laite käyttää polttoöljyä energianlähteenä. [26, s.40.]

Sisällä tarvitaan yleisvalaistusta sisätöihin, runkovaiheessa työaluevalaistukseen, lisävalaistusta vaativiin runkoon liittyviin töihin ja täsmällisyyttä vaativiin sisätöihin. [29 s.19]

Taulukko 2. Työmaalla tarvittava valaistus sisätiloissa [29 s.24.]

Sisävalaistukset	Valaistusvoimakkuus (lx)		
	Työkohteessa	Välitön lähiympäristö	Tausta-alue
Yleisvalaistus alueille, joilla tehdään sisätöitä	50	50	25
kulkutiet, logistiikka, apu- ja varastointityöt, työmaasiivous, telinetyöt, purkutyöt, kaapelireittien teko ja kaapelien veto sekä vesi- ja lämpöeristeiden asentaminen			
Runkovaiheen erillinen työpistevalaistus	75	50	25
runkoelementtien asennus, raudoitukset, betonivalut, piikkaukset- ja poraukset, injektointi ja ruiskubetonointi, muut betonityöt, kuten pintojen puhdistus, muottityöt, kulkuteiden, suojakaiteiden ja -katteiden tekeminen, runkotyöt			
Paikallista lisävalaistusta vaativat runko- tai sisätyöt	100	75	50
elementtien saumaus, kevytbetoniharkkojen muuraus ja liimaus, erikoisraudoitukset, rappaus, pinnan hierto ja hionta, väliseinä- ja runkomuuraus			
Tarkkuutta vaativat sisätyöt	200	150	
loppusiivous, lattian pinnoitustyöt, LVI-laitteasennukset sekä putki- ja kanavaliitosten tekeminen, pinnoitusten esityöt, koneiden, laitteiden, työkalujen ja sähkölaitteiden huolto-, korjaus- ja puhdistustyöt			

Ulkotiloissa tarvitaan valaistusta yleisvalaistusta esim. vartioitaville alueille, työvalaistusta esim. nostoille, lisävalaistusta esim. julkisivutöihin. Ulkovalaistuksessa riittää paljon vähäisempi valaistus kuin sisätiloissa. [29, s.13.]

Taulukko 3. Työmaalla tarvittava valaistus ulkona [29 s.25]

Ulkovalaistukset	Valaistusvoimakkuus (lx)		
	Työkohteessa	Välitön lähiympäristö	Tausta-alue
Yleisvalaistavat ulkoalueet	5	-	-
purkutyöt, telinetyöt, logistiikka, apu- ja varastointityöt sekä työmaasuunnitelman mukaiset kulkutiet			
Ulkoalueen työvalaistus	50	20	-
nosto- ja purkupaikat, elementtien säilytys ja muut ulkotyöpisteet			
Paikallista lisävalaistusta vaativat ulkotyöt	200	100	
julkisivutyöt			

Nyky-aikana rakentamisessa hyödynnetään LED-valaisimia. Yleisvalaistukseen sopivia valaisimia ovat valonauhat, joiden valoteho voi olla luokkaa 1500 lm/m ja käyttöteho 12 W/m ja ympärisäteilevät työmaavalaisimet, joiden valoteho on yleensä luokkaa 3990 lm ja käyttöteho 25 W. Työpistevalaistukseen voidaan käyttää valonheittäimiä, joiden tehot vaihtelevat 50-200 W. Ulkona voidaan käyttää valomastoa, jonka valoteho voi olla luokkaa 4 x 385008 lm ja käyttöteho 4 x 350 W. [29 s.27-34.]

Lumen tarkoittaa valomäärää eli kun lumen jaetaan valaistavalla pinta-alalla, saadaan valon intensiteetti eli lux. Näin voidaan suunnitella tarvittava valaisinmäärä ja niiden tehojen kautta käytetty sähkötehon määrä koko hankkeen aikana ja arvioida hiilidioksidipäästöt esim. ympäristöministeriön julkaisussa olevan taulukon mukaan. [29 s.27.]

3.1 Valmistusprosessien hiilijalanjälki

Rakennuksia voidaan tehdä monella eri ratkaisulla, mutta samoilla ominaisuuksilla. Rakenteita, jotka muodostavat suurimman osan rakennuksen massasta voidaan vaihdella tai muuttaa tavoitteena vähentää hiilijalanjälkeä. Sama tuote voidaan saada eri valmistajalta eri hiilijalanjäljellä riippuen valmistusproesseista, energiamuodon käytöstä ja kuljetuksista. [1, s.122-123.]

3.2 Teräs

Teräsala käyttää teollisuussektoreista eniten energiaa maailmassa. Yleisesti ottaen energia ja päästöt ovat voimakkaasti kytköksissä. Teräksen tuotanto vaatii paljon energiaa ja sillä on huomattava ympäristövaikutus. Ilmastonmuutos on luonut painetta teräsalalle vähentämään negatiivisia ilmastovaikutuksia erityisesti liittyen veden käyttöön ja hiilijalanjälkeen. Teräksen tuotanto voi kuitenkin olla kestävä ja siis vihreä materiaali. Tähän pääseminen on käytännössä vaikeaa koko terästeollisuuden näkökulmasta, koska tarvitaan parhaita teknisiä ratkaisuja ja koska fossiiliset polttoaineet ovat vielä suurin energianlähde terästeollisuudessa. [3, s.1.]

Terästuotannon vaikeus on valmistaa mahdollisimman vähähiilistä ja vihreää terästä ilman ympäristöhaittoja. Nyt on aika, milloin terästuotanto saavuttaa pisteen missä pitää taata suuri terästuotanto, mutta noudattaa ympäristömääräyksiä ja pitää kiinni veden käytön vähentämisestä ja sen käsittelyn parantamisesta. Ilmastotekijät ovatkin luoneet painetta teräsalalle vedenkäytön ja energiankäytön suhteen, mutta suurin teräksen tuottajamaa Kiina käyttää noin kaksi kertaa enemmän vettä teräksen tuotannossaan syynä kenties vanhentunut vedenkäsittely ja rahan käyttö vedenkäsittelyn sijaan välineistöön ja käsittelylaitoksiin. Toisena syynä vanhentunut tuotantokanta. [3, s.1.]

Vedenkäytön lisäksi terästeollisuus saastuttaa vettä jäähdytysjärjestelmien kautta. Saastuneessa vedessä on mm. syanidia ja klorideja [3, s.2].

Teräksen osa teollisuuden tuotannon osuus energiasta oli 5% vuonna 2010 vaikka terästonniin käytetty energia on vähentynyt vuodesta 1970 50-75 GJ/tonnia vuoteen 2010 20-30 GJ/tonnia. Suuri osa teräksen tuotannon energiasta tulee fossiilisista polttoaineista, joten ensimmäinen ratkaisu hiilijalanjäljen pienentämiseksi olisi energiatehokkuuden parantaminen. [3, s.2.]

Tämänhetkiset teknologiat lähestyvät termodynaamista rajaansa energiatehokkuutensa kanssa, joten jos uusissa ratkaisuissa ei tehdä läpimurtoja niin EU:n päästötavoitteisiin vuoteen 2050 mennessä on vaikea päästä yksinään tämänhetkisten ratkaisujen energiatehokkuutta parantamalla. [3, s.2.]

Raudan ja teräksen valmistuksessa vaaditun energian määrä vaihtelee eri lähteiden välillä ja saman lähteen sisällä. International Energy Agencyn mukaan energian käyttö 2000-2017 välillä on pysynyt melkein vakaana 20 GJ/tonni. Kokonaisenergia laskettuna World Steel Association tietojen mukaan on 2000-luvulla 18,3 EJ ja 2017-luvulla 33,4 EJ. Energian käytön kasvua voidaan suoraan verrata tuotetun teräksen määrään edellä mainitun termodynaamisen rajan takia ja teknologian rajojen takia energiatehokkuus ei ole parantunut. Hiilidioksidipäästöt ovat myös kasvaneet kasvaneen tuotannon kautta. 2000-luvulla teräksen tuotanto maailmassa lähti huomattavaan kasvuun Kiinan nopean terästeollisuuden kasvun takia. Kiinan tuotanto käyttää ainakin 20% enemmän energiaa kehittyneisiin maihin verrattuna tämä johtuu vanhoista ja pienistä terästuotantolaitoksia, joita on paljon Kiinassa. [3, s.2.]

Rautamalmin louhinta voi tapahtua avoimen kaivoksen tai maanalaisen kaivoksen kautta. kaivostyyppin valintaan vaikuttaa monia tekijöitä kuten esiintymän luonto, sijainti, koko, syvyys ja laatu. Maanalainen kaivos käyttää enemmän energiaa, koska se vaatii erikoisjärjestelyjä kuljetuksissa, ilmanvaihdossa, veden poistossa ja muissa toiminnoissa. Avoimet kaivokset edustavat suurinta osaa kaivostoiminnasta. [4, s.267.]

Kaivostoimintaan ja rautamalmin prosessointiin liittyy porausta, räjäytyksiä, ilmanvaihdon käyttöä, vedenpoistoa, lastaamista ja kuljetuksia, murskausta ja

jauhamista, materiaalien erittelyä, kasausta ja kuljetusta. Yhden arvion mukaan edellä mainitut yhteenlaskettuna tuottavat hiilidioksidia 11.9 kg/tonnia rautamalmia ja energiaa 152,7 MJ/tonnia rautamalmia. [4, s.269.]

Suurin osa kaivostoiminnan ja rautamalmin prosessoinnin CO₂-päästöistä tulee lastauksesta ja kuljetuksista, jotka aiheuttavat noin 50% päästöistä. Räjähdykset ovat vastuussa pienestä osaa kaivostoiminnan ja prosessoinnin CO₂ päästöistä noin 5,9% kokonaispäästöistä, poraus täyttää 0,8% kokonaispäästöistä, Murskaus ja erottelu 21%, kasaus 4,2%, rautatiesiirto 10,9% ja satamaoperaatiot 6,7%. Maailmanlaajuisesti rautamalmin tuottaminen synnyttää arviolta 17 Mt hiilidioksidia vuodessa. 70% maailman terästuotannosta tulee rautamalmin. Rautamalmin louhinta ei ole eri mineraaleista se suurin saastuttaja. [4, s.271.]

Rautamalmin hankinnan kasvihuonekaasuihin ja energian käyttöön vaikuttaa voimakkaasti tuotannon tekninen taso ja tulevaisuudessa kehitys ja tutkimus kaivostoiminnassa ja mineraalien prosessoinnissa. Tällä hetkellä arvioidaan, että energiansäästön teoreettisesta potentiaalista on hyödynnetty 2/3 mineraalien hankinnassa ja prosessoinnissa. Murskaus ja jauhaminen antaa näillä näkymin eniten potentiaalisia energiasäästöjä lastaus ja kuljetus seuraten. [4, s.272.]

Taulukko 4. Eri metallimalmien hankinnasta syntyvät hiilidioksidipäästöt ja energian kulutus liittyen malmien hankintaan tutkimuksessa. [4, s.269]

Metal ore	Energy (MJ/t ore ^a or conc. ^b)	GWP (kg CO _{2e} /t ore ^a or conc. ^b)
<i>Iron ore</i>	(%)	(%)
- Drilling	1.3 (0.9)	0.1 (0.8)
- Blasting	3.3 (2.2)	0.7 (5.9)
- Loading & hauling	92.1 (60.3)	6.0 (50.5)
- Crushing & screening	23.1 (15.1)	2.5 (21.0)
- Stacking & reclaiming	4.6 (3.0)	0.5 (4.2)
- Rail transport	20.9 (13.7)	1.3 (10.9)
- Port operations	7.4 (4.8)	0.8 (6.7)
- Total	152.7	11.9
<i>Bauxite</i>	(%)	(%)
- Drilling	1.2 (2.2)	0.1 (2.0)
- Blasting	2.0 (3.6)	0.4 (8.2)
- Loading & hauling	36.1 (65.8)	2.6 (53.1)
- Crushing & screening	14.7 (26.8)	1.7 (34.7)
- Beneficiation	0.9 (1.6)	0.1 (2.0)
- Total	54.9	4.9
<i>Copper concentrate</i>	(%)	(%)
- Drilling	720 (8.6)	30.8 (4.9)
- Blasting	43 (0.5)	9.1 (1.4)
- Loading & hauling	2059 (24.7)	88.1 (14.0)
- Ventilation	1417 (17.0)	127.0 (20.2)
- Dewatering	673 (8.1)	60.3 (9.6)
- Crushing & grinding	3277 (39.4)	293.7 (46.8)
- Concentrating	140 (1.7)	19.2 (3.1)
- Total	8329	628.2

^a Iron ore and bauxite.

^b Copper concentrate.

Ennen teräksen varsinaista valmistusprosessia rautamalmi pitää prosessoida rautaoksidipelleteiksi. Pelletointiin liittyy rautarikasteen jauhamista, lisäaineiden lisäämistä, kosteuspitoisuuden hallintaa, pelletiksi muodostamista, esilämmitystä ja sintrausta eli polttamista. [6, s.18.]

Pelletoinnin hiilijalanjälki arvioituna Kiinan tuotannossa aiheuttaa päästöjä 58,5 kg hiilidioksidia per tonnia rautapellettejä vahvasti liittyen käytettyyn energia-muotoon [5, s.1318].

Lisäksi pitää valmistaa koksia kuivatislaamalla jauhetusta kivihilestä 900-1200 °C:n lämpötilassa [6, s.30].

Teräksen tuotannossa on kaksi yleisintä reittiä tuottaa terästä, joita ovat integroitu terästehdas -reitti perustuen masuuniteknikkaan/happipuhallusmasuuniteknikkaan ja pienois-terästehdas-reittiin perustuva valokaariuuni. Pääenergiamuoto integroidussa terästehtaassa on kemiallinen energia ja valokaariuuneissa sähköinen energia. Energian kulutus happipuhallusmasuunissa on maailmanlaajuisesti noin 13-14 GJ/tonni terästä. 60% EU:n tuotannosta on perushappipuhallusmasuuneja. Valokaariuunin energiakulutus riippuu panoksesta. Teräksen tuottaminen suorapelkistetyn raudan tekniikalla valokaariuunissa kuluttaa energiaa 10,6-13,8 GJ/tonni terästä. 100% metalliromulla energiankulutus on 1,2-1,6 GJ/tonni näin valokaariuuni voi tuottaa terästä vähimmällä energialla, mutta normaalisti panokseen laitetaan 10% takkirautaa romun kanssa. Käytännön esimerkki kahden reitin välillä on korkeampi energian kulutus Kiinassa johdun pääasiassa siitä, että suuri osa tuotannosta tapahtuu masuunissa. [3, s.2.]

Masuunin käyttö on yleisin terästuotantomenetelmä. 70% teräksestä valmistetaan masuunissa ja 30% valokaariuuneissa. Masuunituotanto tarvitsee koksia ja ruiskutettua hiiltä energianlähteenä ja pelkistysaineena. Yhden koksitonni tuotanto vaatii 1,2-1,6 tonnia hiiltä. Hiilen esilämmitys ennen koksintuotantoa vähentää hiilen kulutusta ja lisää koksivuunin tehokkuutta. Koksen valmistuksessa tuotetaan myös pelkistyskaasua noin 300-360 m³/tonni koksia. Pelkistyskaasua voidaan käyttää masuunissa. Pelkistyskaasu sisältää vähän kalorista energiaa ja se sisältää raskaita hiilivetyjä kuten tervaa, jotka poistetaan, jotta ne eivät vaikuta masuuniuunin virtauksiin. Masuuni toimii vastavirtareaktorina, jossa yleisesti ottaen kiinteät materiaalit laskevat ja kaasut nousevat eli masuuni toimii lämmönvaihtajana. Masuuniprosessi tuottaa omat pelkistyskaasunsa hiilimonoksidin CO koksista ja hiilestä. Koksi on kuivatislattia hiiltä, joka toimii hiilen

kanssa myös polttoaineena masuunissa. Rautaoksidi pelkistyy hiilimonoksidikaasulla ja tuottaa hiilidioksidia CO_2 ja rautaa Fe. [3, s.2.]

Masuuniprosessi on vastuussa noin 70% tuotetusta hiilidioksidista integroiduissa terästehtaissa. Suurin osa hiilimonoksidista poltetaan hiilidioksidiksi. Masuuni jätekaasu sisältää 25% hiilidioksidia. Keskikokoinen masuuni, joka tuottaa 4500 tonnia terästä päivässä tuottaa myös jätekaasuja noin 1600 Nm^3 /tonni terästä. [3, s.2.]

Jos halutaan vähentää kemiallisen energian käyttöä masuunissa, pitää vähentää polttoaineen määrää. Koksen käytön vähentämiseksi hiilipelkistetyssä masuunissa on olemassa kaksi kestävä vaihtoehtoa jätekaasun kierrättäminen ja biomassan käyttö kivihiili-injektioiden sijasta. Koksia käytetään modernissa masuunissa 300-350 kg/tonni kuumaa terästä kohden ja jos injektoitu hiili laskeaan mukaan, niin lopputulema on 500 kg hiiltä per tonni kuumaa terästä. [3, s.2.]

2004 alkanut ULCOS-ohjelma on tuottanut useita päästöjä vähentäviä teknologioita kuten jätekaasukierrätysmasuunin, joka perustuu suorapelkistykseen, ULCOLYSIS eli elektrolyysiin perustuva menetelmä, joka toimii sulan teräksen lämpötilassa ja HISARNA yhteistyössä muiden järjestöjen kanssa. Näiden kaikkien paitsi elektrolyysimenetelmän on nähty olevan hyödyllisiä hiilen vangitsemiselle ja varastoinnille. Jätekaasun kierrätyksellä pelkistämistä varten ja puhtaan hapen syötöllä hormeista masuuniin palamisen voimistamiseksi voidaan laskea koksen käyttöä 190-200kg/tonnilta ja injektioiden tasoa 170-180 kg/tonnilta. Energiankäyttö voi lisäksi olla 20-30% alhaisempi jätekaasukierrätysmasuunissa verrattuna perinteiseen masuuniin. [3, s.2-3.]

Toinen innovaatio voisi olla biomassan, eritoten puuhiilen käyttö injektointiin hormien kautta. Raskaita öljyjä tai luonnonkaasua voitaisiin käyttää, mutta ne eivät laske syntyvää hiilidioksidia. Puuhiili saattaa tulla korvaamaan suurimman osan kivihiilen käytöstä tulevaisuudessa. Hyvälaatuista ja hiilipitoisuudeltaan kivihiiltä korkeampaa puuhiiltä osataan valmistaa puupohjaisena. Lisäksi

puuhiilessä on vähemmän rikkiä ja happamia oksideja, mutta enemmän emäksisiä oksideja. [3, s.3.]

Tulevaisuuden prosesseja ovat vetypelkistetty teräs hybrid-teknologialla ja korkealämpötilaelektrolyysi [3, s.3.]

Korkealämpötilaelektrolyysiprosessi (MOE) perustuu metallioksidin sulattamiseen ja sitten hapen ja metallin erottamiseen elektrolyysin avulla. Tämä menetelmä voi saavuttaa onnistumisen kasvihuonekaasujen suhteen, jos energian tuotanto siirtyy pois päin fossiilisista polttoaineista. [3, s.3.]

Japanissa on kehitelty menetelmää, jossa masuuniin lisätään vetyä vahvistamaan rautamalmin pelkistymistä [3, s.3].

Pelkistyssulatus sallii kahden prosessin poistamisen verrattuna masuuniin koksin valmistuksen ja rautamalmin pelletoinnin. Pelkistyssulatukseen perustuva HISARNA esi-pelkistää rautamalmi hienoaineksen ja sulattaa sen käyttämällä puhdasta happea ja hiilijauhetta, jota syötetään sulatusuuniin. Suurin osa pelkistyksestä tapahtuu sulatusuunissa. Pilottihanke väittää, että tällä menetelmällä saavutetaan 20 % vähennys hiilidioksidipäästöihin verrattuna masuuniin. Tämä menetelmä on esittelytasolla. Toinen toiminnassa oleva sulattamomenetelmä on COREX-menetelmä. COREX tuottaa enemmän hiilidioksidia kuin masuuni. Suora raudantekeminen rautamalmista aiheuttaa epäpuhtauksia metalliin ja voi näin lisätä käsittelyjen tarvetta ja kuonan hallitsemista metalliin tulee lisäksi suurempi hiilipitoisuus. Hiiltä pitää myös käyttää tehokkaammin, jotta hiilidioksidipäästöt pysyvät kohtuullisina. COREX käyttää 16 GJ/tonni terästä eli enemmän kuin tavallinen masuuni, mutta sen jätekaasun kierrätys muissa raudantekotekniikoissa tekee siitä relevantin kaupallisesti. COREX on tällä hetkellä ainoa kaupallinen sulattamotekniikka. [3, s.3.]

HISARNA-mallilaskelmat ovat osoittaneet sen energiankäytön olevan 20-25% vähemmän kuin tavallisessa masuunissa [3, s.3].

Teollisuuden päästöt mukaan lukien niiden käyttämä sähkö vastaavat 32% maailman päästöistä. Teräksen tuotanto tekee teollisuusalan suurimmat päästöt yhteensä 5% maailman kasvihuonekaasuista liittyen fossiilisiin polttoaineisiin. Tämä luku perustuu pelkistymisreaktioihin ja kuumennus operaatioihin. Maailman suurin hiilidioksidi saastuttaja on Kiina, joka omaa melkein kolmanneksen maailman hiilidioksidi päästöistä. Parhaan luokan terästehtaat tuottavat 1,8 tonnia CO₂, joka tonnia sulaa terästä kohden. Parhaat mahdolliset energiatehokkuuden parantamiset masuuneissa yltyvät 10-15% vähennykseen päästöissä. Tällä ei päästä EU-päästötavoitteisiin. Tämän takia on tarvetta läpimurtoteknologioille ja teräksen kierrätykselle valokaariuuneissa. Perushappirikaste-masuunit tuottavat yhteensä eniten CO₂-kaasua 1,8-2 tonnia CO₂ per tonnia terästä. Jätekaasunkierrätysmasuuni tuottaa 0,8-1,3 tonnia CO₂ per tonnia terästä, suorapelkistys valokaariuuni 1,1-1,8 tonnia CO₂ per tonni terästä ja kierrätysterästä käyttävä valokaariuuni 0,35-0,5 tonnia CO₂ per tonnia terästä. Sulatusmenetelmät tuottavat enemmän CO₂:a edellisiin menetelmiin verrattuna. Jätekaasukierätysmasuuniprosessi ilman CCS eli capture and collect -teknologiaa on laskettu vähentävän 35,7% CO₂-päästöjä, mutta tämä voi olla optimistinen arvio. [3, s.4.]

Suurin CO₂-tuottaja on hiilipohjainen suorapelkistetyn raudan tuottaminen, jota käytetään esimerkiksi Intiassa. Vähiten päästöjä tuottaa kierrätysterästä panoksenaan käyttävä valokaariuuni, mutta tämä riippuu paljon tuotetun energian lähteestä. Valokaariuunin päästöjä arvioidessa pitäisi siis ottaa huomioon käytetyn energian tuotantomenetelmä ero voi olla merkittävä, jos on käytetty fossiilisia polttoaineita. Yksi tapa vähentää hiilidioksidipäästöjä teräksen tuotannossa masuunissa on käyttää hiilen kaappaus ja varastointiteknologiaa. CCS-teknologia erottaa hiilidioksidin jätekaasusta erilaisilla tekniikoilla, jonka jälkeen se viedään varastointipaikalle putkella ja injektoidaan syvään suolaiseen pohjaveteen. Kaappausteknologia auttaa vähentämään energian kulutusta masuuneissa CO₂-keräyksen lisäksi. On myös toinen samantyylinen järjestelmä, CCU-hiilen kaappaus ja käyttö muunnettuna esim. polttoaineissa. Tässä menetelmässä pitää tarkkailla, ovatko lopun päästöt suurempia, kun esim. polttoaine käytetään.

CCS on kallis, mutta sillä on suurin vaikutus kasvihuonekaasujen torjunnassa. [3, s.4.]

Terästeollisuudessa käytetään runsaasti vettä noin 28,6 m³ terästönnea kohden ja sitä palautetaan 25,3 m³. Suurin osa vedestä käytetään jäähdytykseen ja loput muihin prosesseihin. [3, s.6.]

Teräksen kierrätys vaatii vähän energiaa ja siten säästää päästöjä. 2011 maailmassa kierrätettiin 630 Megatonnia terästä ja vältyttiin 945 Megatonnin CO₂ päästöiltä. Pääasiassa metalliromupanoksella toimiva valokaariuuni on vihreämpi kuin masuuni. Heikkous teräksen kierrätyksessä on kierrätysmateriaalin suhteellinen vähäisyys. Tämä johtuu siitä, että romu on peräisin 40 vuoden takaa, jolloin terästä ei valmistettu niin mittavasti eikä näin valokaariuuni täytä maailman teräksen tarvetta. Masuuni on siis tärkeä osa tämänhetkistä terästuotantoa. [3, s.7.]

Useimmat teräksen tuotannon prosessit käyttävät energian keräystä. Masuunissa vastavirrat siirtävät kaasusta lämpöä takaisin prosessiin. Jätekaasu sekoitettuna muihin terästehtaan kaasuihin jaetaan uudelleen tuotantoketjun prosesseihin ja poltetaan useimmissa terästehtaissa erityisesti kuumavalssatun teräksen kuumennuksessa. Uusissa valokaariuuneissa poistokaasu käytetään teräsromun esilämmityksessä tai vesihöyryn tuottamisessa. [3, s.7.]

Hyvälaatuista rautamalmista tehty teräs tuottaa vähän sivutuotteita. Huonolaatuinen voi tuottaa noin kuusi kertaa enemmän sivutuotteita. Terästuotanto synnyttää myös toissijaisia sivutuotteita kuten pölyä ja kuonaa. Pelkistävää kuonaa voidaan käyttää sementtiteollisuudessa. Kuonan kierrätys säästää 0,24 tonnia CO₂/tonni terästä päästöissä. Tätä kierrätystapaa käytetään harvemmin. Toinen yleisempi kierrätystapa kuonalle on teiden rakennuksessa. Myös muovia voidaan kierrättää hiilipohjaisten tuotteiden tilalle masuunissa. [3, s.7.]

Tulevaisuudessa vähähiilisyyden kannalta olisi käytetyn energian tyyppin lisäksi hyvä kiinnittää huomiota hiilidioksidin kaappaus ja varastointi teknologioihin. Lämpimurteknologioiden kehitys yhteistyötä pitäisi laajentaa, koska kehitystyön

hinta on valtava. Organisointi voisi tapahtua jopa globaalilla asteella. Muutkin teollisuusalat voivat hyötyä terästeollisuuden kehityksestä esim. jäähdytysteknologioihin liittyen. Kierrätyksen lisääminen romuteräksen ja sivutuotteiden osalta on tärkeä osa tulevaisuuden teräsvalmistusta. Materiaalivirtojen tarkkailu ja elinkaariarviointi voivat antaa lisää tapoja laskea hiilidioksidipäästöjä teräsektorilla. Tulevaisuuden konsepteja ovat myös antropologiset kaivokset, nanovahvistettu teräs ja vetytelkistetty teräs. Suuri muutos olisi myös saada kaikki tämänhetkiset terästehtaat tämän hetken parhaalle teknologiselle tasolle. [3, s.8.]

3.3 Betoni (sementti tärkeimpänä, kiviaines ja muut lisäaineet tai korvikkeet)

Betonin tuotannon hiilijalanjälkeen pyritään vaikuttamaan vähentämällä kasvihuonekaasupäästöjä, vähentämällä sementin tuotannon energiatarvetta, kehittämällä materiaalivirtoja ja suosimalla betonin kierrätystä. Ensimmäinen työkalu kestävän betonituotannon saavuttamiseen on materiaalin käytön vähentäminen rakennetekniikan keinoin, suunnittelemalla hyvin kestäviä betonirakenteita ja käyttämällä betonielementtejä. Toinen on vähentää sementin käyttöä korvaamalla superpehmittäjillä ja kiviaineksen kokojen optimoinnilla. Kolmas tapa on klinkkerin käytön vähentäminen eri seosaineilla. [8, s.1198.]

Betonin raaka-aineisiin kuuluu sementti, kiviaines, seosaineet ja lisäaineet. Pää-tapa välttää kasvihuonekaasuja betoniteollisuudessa on käyttää vähemmän energiaa ja vettä. Raaka-aineiden kuljetuksiin tulisi kiinnittää huomiota valitsemalla mahdollisimman lähellä oleva hankkija. [8, s.1198.]

Betonintuotannossa halutaan saavuttaa tietyt vaaditut ominaisuudet kuten lujuus ja vastus kemiallisille rasituksille samalla käyttäen kestävämpiä ratkaisuja ja seosaineiden lisäystä kuten lentotuhkaa tai masuunikuonaa. Sementti on olennainen osa betonia. 5-20% betonista on sementtiä. Sementin valmistus käyttää paljon energiaa ja tuottaa paljon hiilidioksidia. Sementin

valmistusprosessiin sisältyy raaka-aineiden valmistelu, klinkkerin tuotanto ja klinkkerin jauhaminen ja sekoitus. [8, s.1198.]

Sementin tuotannossa kalsiumia ja piioksidia sisältäviä materiaaleja sekoitetaan ja murskataan. Tässä vaiheessa seokseen voidaan lisätä teollisuus- ja kunnallisjätettä seosaineena, jotka korvaavat sementtiä ja voivat omata vähemmän energiaa vapauttavaa lujuusreaktioita. Tämän jälkeen sekoitus sintrataan noin 1500 Celsiusasteessa. Kuumuus luo hydrataatioon kykenevän materiaalin klinkkerin. Klinkkeri jäädytetään ja jauhetaan kipsin ja lisäaineiden kanssa. Tätä sekoitusta kutsutaan sementiksi. Sementin valmistus perustuu kemialliseen reaktioon, jossa kalkkikivi hajoaa kuumassa lämpötilassa. Reaktio on kemiallisilla merkeillä $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (1). Tässä askeleessa vapautuu puoli tonnia hiilidioksidia joka kalsiumoksiditonnia kohden. Sementin valmistuksessa syntyvistä kasvihuonekaasupäästöistä 50-55% johtuu edellä mainitusta reaktiosta, 40-50% polttoaineiden käytöstä ja 0-10% sähköenergian käytöstä [8, s.1198.]

Hiilidioksidipäästöjä on pyritty vähentämään vaihtoehtoisilla polttoaineilla, raaka-aineilla ja betonin lujittajilla eli seosaineilla, lämpö- ja sähköenergian tehokkuuden kasvattamisella sekä hiilidioksidin kaappausmenetelmillä. Helppo tapa näistä on vähentää klinkkerin käyttöä sementissä korvaavilla materiaaleilla, joita voidaan hankkia muilta teollisuusaloilta kuten terästeollisuuden masuunikuonaa. Korvaavien aineiden käyttöön vaikuttaa vahvasti niiden saatavuus eri puolilla maailmaa toisaalta on tutkittu, että lentotuhkan kohdalla pitkät kuljetusmatkat eivät kumoa niistä saatavia hyötyjä sementin korvaajana hiilidioksidipäästöjen osalta. Korvaavat materiaalit voivat mahdollistaa hyvinkin suuret kasvihuonekaasusäästöt. Monet tutkimukset ovat myös huomanneet korvausaineita käyttävän betonin tuottavan hyväksyttävät ominaisuudet. [8, s.1198-1199.]

3.4 Puu

Ennen teollista vallankumousta puu oli materiaali, josta voitiin rakentaa yhtenäisen rakenne. Puu on kevyttä, vahvaa ja kimmoisaa. Painoonsa nähden puu on 50% vahvempaa kuin teräs. Puuta voidaan hyödyntää erityisesti

pientalorakentamisessa noin 95% osista kuten rungossa, kalusteissa ja eristeissä. [11, s.157.]

Puusta voidaan eristää hartsia ja tervaa, joita voidaan käyttää maaliteollisuudessa. Männyn öljyä voidaan hyödyntää saippuan valmistuksessa. Puuta voidaan siis käyttää moniin muihin tuotteisiin rakentamisen tuotteiden lisäksi. [11, s.157.]

Metsätuotteiden erikoisominaisuus on sen kyky sitoa ja varastoida hiilidioksidia sen biomassaan [12, s.128].

Globaalin hiilibudjetin mukaan 2020 päästöt olivat 42,2 Gt hiilidioksidia. Puolet päästöistä päätyvät ilmakehään. Netto hiilinielut merestä ja maasta oli 21 Gt hiilidioksidia ekvivalenttia. Sademetsien metsäkato on vähentänyt globaaleja hiilinieluja ja se jatkaa niiden vähentämistä, mutta muiden alueiden metsittäminen ja metsien kasvu ovat tulleet vastapainona sademetsien metsäkadolle. [10, s.1.]

Suomen hiilinielu metsistä ylittää 10,3-18,9 Mt hiilidioksidia-ekvivalenttia vuodessa. Suomen hiilidioksidipäästöt olivat 53 Mt CO₂-ekvivalenttia. Kestävä metsien hallinta ja puiden hankinta antavat mahdollisuuden luoda kasvavan hiilinielun ja hiilivaraston sekä niiden avulla voidaan päästä hiilineutraaliin tavoitteen Suomen. [10, s.1.]

Puurakennukset ovat hyviä hiilivarastoja, koska ne hapettuvat viiveellä. Näin tuotteet voivat viivyttää niiden aiheuttamaa ilmastolämpenemisen potentiaalia lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä. Rakentaminen ja infrastruktuuri on suuri osa maailman kasvihuonepäästöistä, joten puulla on vähähiilisenä materiaalina mahdollisuus vaikuttaa näiden alojen päästöihin merkittävästi. [10, s.2.]

Hiilidioksidi voi myös sitoutua pysyvästi puuhun loppusijoituksen jälkeen. Tämä voi kompensoida tuotannon päästöjä tai kattaa ne kokonaan [12, s.128].

Sokeria muodostuu puun vihreissä osissa vedessä ja ilmassa olevan hiilidioksidin avulla, joka altistetaan auringonvalolle. Tässä reaktiossa vapautuu ilmaa.

Kasvi muuttaa sokerin myöhemmin tärkkelykseksi ja selluloosaksi. Selluloosa kasvattaa soluja ja tärkkelys varastoidaan. Kasvin kuollessa hiilidioksidi vapautuu. [11, s.158.]



Puu on uusiutuva resurssi, jota voidaan kasvattaa ja käyttää ennalta arvatuin väliajoin. Järkevällä metsänhoidolla puusta tulee materiaali, josta voidaan odottaa jatkuvaa materiaalivirtaa. [11, s.159.]

Maailman metsien tilanne on huolestuttava esim. Puolan ja Tsekin metsistä yli puolet ovat kuolleet tai kuolemassa. Tähän vaikuttaa päästöt kuten rikki, otsooni, oksidit ja typpi. Näitä päästöjä aiheuttaa raskas teollisuus ja autot. Typen oksidit voivat olla joissain määrin edullisia puille, mutta kun niitä on paljon hyödyt häviävät. Monessa maissa puita kaadetaan kestäättömästi ja sademetsää uhkaa saasteet ja hakkuut, vaikka puiden tärkeys ilmaston kannalta tiedetään. [11, s.159.]

Puumateriaalien tuotanto on usein paikallista tai alueellista. Puun prosessoinnin energiankäyttö ja kuljetukset ovat suhteellisen pieniä. Saasteita syntyy puun viljelystä, hakkuusta ja jalostuksesta. Puu palaa nopeasti ja helposti sen käytön jälkeen luontoon. Osa materiaaleista voidaan hyödyntää polttoaineena niiden käyttöään jälkeen. Esimerkiksi höylätty ilmakeivattu puutavara tarvitsee 1 MJ/kg energiaa. Kuivassa puutavarassa on noin 50% hiiltä, joka sitoo hiilidioksidia 1,8 kg per kilo puuta. [11, s.160.]

Monilla orgaanisilla materiaaleilla on hyvä ekologisuus, mutta on muutama poikkeus. Jotkin kasvit vaativat hyönteistorjunta-aineita, keinotekoisia lannoitteita ja hormoni lisäaineita ja sienentorjunta-aineita. Nämä aineet aiheuttavat eroosiota, pohjaveden saastumista ja paikallisen luonnon tuhoutumista. Ratkaisua on etsitty geenimanipulaatiosta, mutta niiden riskit ovat liian suuria. Vain pieni osa saatavilla olevista orgaanisista rakennusmateriaaleista on käytössä. [11, s.161.]

Lehtipuut ja havupuut, jotka on tarkoitettu rakentamiseen, pitäisi kaataa talvella, koska silloin puussa on vähiten mahlaa ja muut ominaisuudet kuten happamuus ja turpoaminen ovat parhaimmillaan. Toinen etu talvella kaadetussa puussa on sen hitaampi kuivumisaika, jolloin halkeamien riski alenee. [11, s.168.]

Juuri kaadettu puu kannattaisi käsitellä mahdollisimman pian, mutta usein näin ei pystytä toimimaan. Tässä tilanteessa puu olisi hyvä säilöä vedessä, ettei puu altistu hapelle. Suolavedessä voi olla riskinä kaivaja eliöt. Kesän aikana vedessä säilytetyt puut tulevat huokoisiksi, jolloin ne kestävät paremmin kosteutta [11, s.168.]

Hakkuiden aikana suurin fossiilisen polttoaineena käyttäjä on yleensä metsätraktori. Moottorisaha on myös pieni osa päästöjä. yhden tutkimuksen mukaan hakkuu vaatii lankuissa 31,2 kg CO₂ ekvivalenttia per 1 m³ kuivattua puutavaraa ja palkeissa 32,5 kg CO₂ ekvivalenttia per 1 m³ kuivattua puutavaraa. [12, s.131.]

Tukkien kuljetuksesta diesel-ajoneuvolla matkalla 58,75 km tulee päästöjä 59,7 kg CO₂-ekvivalenttia kohti 1 m³ kuivattua puutavaraa. Oletuksena on myös täysi lasti menomatalla ja tyhjä lasti tulomatalla. Käytetyt rekat käyttivät 0,40 l/km dieseliä. Tästä tulee suurin osa päästöistä ilmakuivatulle puulle. [12, s.131.]

Kuusi ja mänty ovat yleisimmät rakennuksissa käytetyt puut. Muiden puiden elintilaa varataan usein kuusille ja männyille. On myös tapana korvata mänty kuusella, koska se tuottaa vähemmän jätettä ja sitä voidaan muokata helpommin sahalaitoksessa. Toisaalta lehtensä pudottavat puut voivat olla kosteusteknisesti ja lujuudeltaan parempia kuin kuusi tai mänty esim. saarni. Jos käytettäisiin vain saatavilla olevia lehtensä pudottavia puita ja niiden käyttö vahvuksiensa mukaan voisi vähentää rakenteellisen puun tarvetta 25%. Rakentamiskelpoisia puulajeja on tutkittu Intiassa ja huomattu ennen polttopuiksi luokiteltu laji on kelpoinen rakentamiseen. [11, s.164.]

Metsänhallinta tehdään usein niin, että suositaan havupuita erityisesti kuusta. Tämä korostuu vielä, jos tuotetaan selluloosaa esim. paperin valmistukseen.

Tällainen yksitoikkoisuus puulajeissa aiheuttaa maaperän happamuutta ja laskee vesistöjen pH-tasoa. Monet paikalliset ekologiat eivät pysty toimimaan tällaisissa metsissä. Myös eroosion riski kasvaa. Pohjoismaissa nämä metsät uhkaavat monia lajeja sukupuutolla. [11, s.165-166.]

Metsänhoitoa voidaan tehdä ekologisesti, jos viljellään monia paikallisia puulajeja, joihin lukeutuu lehtipuita, jotka estävät happamuutta. Kun sato korjataan pitää se tehdä niin, että kasvusto ja nuoret puut säilyvät. On todisteita, jotka osoittavat, että näistä metsistä korjatut puut ovat laadultaan parempia verrattuna yksitoikkoiseen metsänhallintaan. Myös kaarnan ja neulasten jättö ravinteeksi metsään on hyvä koska silloin vältetään lannoitteilta. [11, s.166.]

30-40-vuotiaana männyn ja kuusen sydän puu alkaa kehittyä. Parhaat havupuut kasvavat maassa, jossa on vähän ravinteita ja orgaanista materiaalia. Sydänpuu kutistuu vähemmän ja se on kestävämpää. Puita saatettiin muokata aikoinaan menetelmillä, jotka antoivat puulle paremman laadun tai muodon, mutta nykyaikaisilla tuotantotekniikoilla ei ole etua valita puita käsin. Puun laadussa kiinnostaa nykyään vain suoruus, solmujen vähyyys ja keskitytään tuottamaan mahdollisimman paljon. Ruotsissa on kehitteillä menetelmä, jolla erotetaan hyvälaatuiset puut ja niitä hyödynnetään niille parhaiten sopivassa roolissa. [11, s.167.]

Puurunko kuljetetaan tehtaalle, jossa sitä työstetään. Halkominen kannattaa tehdä, kun puu on kostea. Männyn paras lujuus on sen keskiosassa ja kuusessa ympäröivä puu on lujuudeltaan parempaa. Nykyään puun halkomisessa käytetään pyörösahaa eri profiilien ja leikkausmuotojen saavuttamiseksi. Sahan pyörittämiseen voidaan käyttää verkkosähköä, vesi- tai tuuliturbiineja. Paikallisella energiantuotannolla voidaan puolittaa energiankäyttö, kun ei ole siirtohäviöitä. Huolellisesti kiilalla halkaistu kuusi voi olla yhtä lujaa kuin männyn sydänpuu, koska kiilan käytöllä puun solut jäävät ehjiksi. [11, s. 170.]

Joidenkin tutkijoiden mukaan kuivatus vaikuttaa puun kestävyys enemmän kuin kaatoajankohta. keväällä ja kesällä kaadetut puut pitäisi kuivattaa heti.

Puutavara kutistuu 15 kertaa enemmän leveydeltään kuin pituudeltaan, joten se muodostaa kaarimaisia halkeamia. Kiilan laittaminen näihin halkeamiin vähentää jatkossa tulevia halkeamia. Puun sahaustyö vaikuttaa kaareutumisiin. Kostean tavara kaareutuu ulospäin ja kuivana sisäänpäin. Ennen käyttöä puutavaran kosteus pitää laskea 70-90% riippuen käytöstä. [11, s. 170.]

Kuivausprosessissa laudat kasataan vaakaan niin, että ilma pääsee liikkumaan niiden ympärillä ja ne kuivataan paineen alla. Kuivuminen voi tapahtua ulkona tai sisätiloissa. Ulkona kuivattu puu on luotettavampaa talvella kaadettujen puiden kuivatuksessa. Keinotekoinen kuivatus voi aiheuttaa ongelmia kuten hometta ja epätoivottuja aineita. Ulkona kuivatus kannattaa tehdä keväällä ja se on energiatehokkaampaa kuin sisäkuivatus. Kuivatus kestää noin 3kk. [11, s. 170.]

Puuta voidaan kierrättää esim. sellaiseen ilman jätteitä uusissa rakenteissa, lattioissa tai kehyksissä [11, s. 172-173].

Yhden kehdosta portille arvion mukaan ilmakuivattu puutavara tuotti 95,2 kg CO₂-ekvivalenttia kohti yhtä kuutiota kuivattua puutavaraa ja keinotekoisesti kuivattu 383,7 kg CO₂-ekvivalenttia kohti yhtä kuutiota kuivattua puutavaraa. Ilmakuivatusta puutavarassa suurin kasvihuonekaasujen tuottaja oli kuljetukset. Keinotekoisesti kuivatusta sahatehtaan prosessit tuottivat eniten kasvihuonekaasuja. [12, s. 131.]

Saman arvion sahatehdasprosessin sisällä oleva uunikuivatusmenetelmä sai aikaan 97% ilmaston lämmityspotentialista. Lämpö tuotettiin kahdentyyppisistä lähteistä, joita olivat puupohjaiset materiaalit 40% ja maakaasu 60%. Muut prosessit kuten sahaus, kaarnanpoisto, höyläys, arvostus, luokittelu ja varastointi eivät vaikuttaneet vahvasti päästöihin. Saha käytti 9319 kWh energiaa. [12, s.131.]

3.5 Tiili

Keraamiset tuotteet koostuvat erilaisista raaka-ainemineraaleista ja lisäaineista. Nämä ainesosat annostellaan tarkasti ja ne käyvät läpi eri prosesseja kuten jauhamista, sekoitusta, muodostusta, lasitusta ja polttoa. [60, s.1.]

EU:n sisällä seinä- ja lattialaattojen, tiilien ja kattotiilien valmistus vapauttaa noin 19 Mt hiilidioksidia vuodessa. Globaalisti tiilen valmistus on vastuussa 2,7% hiilidioksidipäästöistä vuosittain. [61, s.2.]

Vaikka savitiilellä on monta hyvää ominaisuutta kuin lujuusominaisuudet tai säänkestävyys ne vaativat uusiutumattomia luonnonvaroja, korkeita lämpötiloja valmistukseen siksi myös paljon energiaa ja tätä kautta kasvihuonekaasupäästöjä. Lisäksi tiilijäte loppusijoitetaan yleensä kaatopaikalle, jossa se voi saastuttaa maaperää. [59, s.1.]

Betonitiiliä valmistetaan sekoittamalla sementtiä, hiekkaa, kiviainesta ja vettä ja kaatamalla seos muotteihin. Myöhemmin tiilet käytetään uunissa. Prosessi kestää noin 24 tuntia. [13, s.146.]

Kalsiumpiioksiditiiliä valmistetaan sekoittamalla piitä tai hiekkaa (5-8%) kalkkiveen ja veteen. massasta muodostetaan harkkoja ja harkot käytetään painekattilassa 3-8 tuntia. Tässä tapahtuu samantyyppinen reaktio kuin portland-sementin ja veden välillä eli massa lujittuu. [13, s.146.]

Suurin osa tiileistä on valmistettu savesta ja savikivestä. Savi on runsas raaka-aine, jolle on monia käyttötarkoituksia. Saven ominaisuudet voivat vaihdella ja sen käyttötarkoitus voi vaihdella. Tavalliset savet ovat helposti muovailtavia, joten ne istuvat muotteihin helposti ja kun savi poltetaan, se lasittuu 1100 °C:n lämmön alla. [13, s.146.]

Perinteiset tiilet on tehty sekoittamalla maasavea veteen ja sitten muovaamalla haluttuun muotoon ja kokoon ja lopuksi kuivataan ja poltetaan [13, s.147].

Liiallinen saven uuttaminen on saanut aikaan neitsytsaven kadon. Tästä syystä yritetään keksiä korviketta savelle erilaisista jätemateriaaleista. Näin lopetetaan liiallinen saven käyttö ja hankkiudutaan eroon jätteestä. Erilaisia yhdistelmiä on kokeiltu kuten jätemuovikuituja tai riisin kuoria. 2-5% lisäysmäärä huomattiin tuottavan hyväksyttävät ominaisuudet [13, s.147.]

Lisäksi monessa maassa pyritään korvaamaan polttamalla valmistetut tiilet stabiloituilla itse kovettuvilla tiilillä, joita voidaan valmistaa sementin ja kiviaineksen avulla [59, s.3-4].

Savitiilen valmistuksen joka vaiheessa vapautuu ilmakehään päästöjä kuten SO₂, CO₂, NOX, VOC, CH₄ kaasuja eniten kuitenkin kuljetuksissa, valmistusprosessissa erityisesti tiilen poltossa. Korkeat lämpötilat uunissa haitallisia yhdisteitä. Esimerkiksi kanadalainen tiilitehdas päästi fluoria 0,7-4 ppm poistokaasussa ja lisäksi SO₂ ja CO₂ -yhdisteitä. 500-600 °C:ssa syntyy vety- ja fluoridikaasuja. Fluori ja kloridi aiheuttavat maaperän happamoitumista ja pintaveden saastumista. [13, s.151.]

Energiankäyttö saven hankinnasta, kuljetuksista ja muovaamisesta lähestyi 4,5884 GJ/tonni tiiltä ja valmis tiili yhteensä 6,5382 GJ/tonni. Hiekka kalkki tiilillä 1,16498 GJ/tonni ja betonitiilellä 2,91483 GJ/tonni. [13, s.151.]

Taulukko 5. Keskiarvo tiilien valmistusprosessien energiankulutuksesta kanadalaisissa tiilitehtaissa [13 s.151]

Consumed energy (GJ/1000 brick)	Clay brick	Calcium silicate brick	Concrete brick
Raw material extraction	0.169	0.116	0.100
Raw material transportation	0.083	1.772	0.0603
Drying/ firing	8.630	0	0
Preparation/Forming	6.487	-	1.239
Conveyance in plant	0.0928	0.175	2.682
Brick processing	15.210	2.737	1.443
Natural gas	3.674	3.549	1.803
Diesel road	0.147	0.815	0.711
Electricity	2.761	0.437	0.323
Total	22.046	9.601	8.361

Yhdysvalloissa tuotettu yksi tavallinen tiili tuotettuna fossiilisilla polttoaineilla aiheuttaa 0,3 kg CO₂ päästöjä. Sudanin koko tiilialan päästöt arvioitiin olevan 378028 tonnia CO₂, 15554 tonnia CO, 1778 tonnia CH₄, 442 tonnia NO_x, 288 tonnia NO ja 12 tonnia N₂O vuodessa. [13, s.151-152.]

3.6 Lasi

Lasin tuotanto vaatii suuren määrän energiaa raaka-aineiden sulatukseen. Lasin valmistuksessa on korkea energiankäyttö suhteessa tuotetun lasin määrään. Lasiteollisuutta kutsutaan energia intensiiviseksi. Lasiala on monimuotoinen tuotteisiin ja käyttöön nähden. Joitakin tuotteita tehdään kuluttajalle valmiiksi ja toiset vaativat lisäjalostusta. Tämän takia energian tarve vaihtelee huomattavasti tuotteiden välillä. [14, s.142.]

Lasin tuotannosta syntyy huomattava määrä päästöjä noin 86 Mt hiilidioksidia maailmanlaajuisesti, joka on 0,3% maailman kokonaispäästöistä. Lasiteollisuuden päästöistä on vähän tietoa ja kasatut tiedot sisältävät epävarmuuksia. Päästöjä olisi hyvä tutkia, koska lasiteollisuuden odotetaan kasvavan ja tietojen avulla voitaisiin vaikuttaa alan energiakäyttöön ja päästöihin. [15, s.333.]

Yleisimmät raaka-aineet lasille ovat piioksidi, natriumkarbonaatti, kalkkikivi ja dolomiitti. Lasin tyyppi määrittää, mikä kokonaisuus vaaditaan ja muita aineita voidaan lisätä. [14, s.143.]

Hiekan hankinnassa suurimmat ympäristövaikutukset tulevat ilmanlaatuun, pintavesiin ja pohjaveteen. Esim. kristallisoitunut piioksidi voi vahingoittaa keuhkoja ja altistaa ne taudeille yleensä kaivoksessa työskentelyn yhteydessä. [17, s.5.]

Piioksidin kaivostoiminta aiheuttaa 21,6522 tonnia CO₂:a kohti tonnia piioksidia. Varastointi aiheuttaa 1,6631 tonnia CO₂:a kohti tonnia piioksidia. [18, s.16412.]

Raaka-aineet kuumennetaan uunissa noin 1500-1600 °C:ssa, jolloin muodostuu sulaa lasia. Tämä vaihe vaatii eniten energiaa lasin valmistuksessa. Seoksessa olevien karbonaattien sulaessa lasiksi ne hajoavat ja vapauttavat hiilidioksidia.

Sulattamisen jälkeen sulasta lasista tehdään tasalaaatuista eli poistetaan kuplia esiuunissa, muokataan haluttuun muotoon ja lämpökäsitellään, jotta sisäiset rasi-
 tukset vapautuvat. Lasityypistä riippuvia toimenpiteitä näiden jälkeen on lasin
 leikkaus tasolasilla, pintakäsittely säiliölasilla tai kuiduttaminen lasikuiduksi. Näi-
 den lisäksi lasille voidaan mahdollisesti tehdä laminointia tai peitteen laittoa.
 Yleisin lasityyppi on sooda-kalkkilasi, se koostuu silikonidioksidista (71-75%),
 natriumoksidista (12-16%) ja kalkkioksidista (10-15%). ”Muita yleisiä lasityyp-
 pejä ovat borosilikaatti, E-lasi ja lyijylasi”. [14, s.143.]

Sulatusuunin käyttö vastaa noin 62% CO₂ päästöistä lasin tuotannossa. 21%
 tulee muun energian käytöstä ja 16% prosessista eli karbonaattien hajoami-
 sesta. Energian käytön vähentämiseksi sulatusuunissa vaaditaan energiatehok-
 kuuden parantamista, vähähiilisiä polttoaineita, hukkalämmön talteenottoa ja
 kestäviä energianlähteitä. Prosessipäästöihin voidaan vaikuttaa käyttämällä hii-
 len kaappausmenetelmiä tai lasimursketta. Jos lasi tehtäisiin täysin kierrätetysti,
 niin päästöjä pystyttäisiin vähentämään vain alle puolella. Päästöjä voitaisiin
 myös alentaa materiaalitehokkuudella esim. muodolla tai pitkäikäisillä tuotteilla.
 [15, s.334.]

Sähköuuneja käytetään erikoislaseissa. Sähköuunien päästöt riippuvat paljon
 sähköverkosta. Sähkö maksaa myös enemmän kuin polttoaineet, joten suurin
 osa tuotannosta käyttää maakaasua.

Lasin valmistuksen energiakäyttö arvioidaan olevan 7-8 GJ/tonni [15, s.1].

Murskattua lasia kierrätetään joka lasiteollisuuden alalla uuden tavaran korvik-
 keena. Raaka-aineiden korvaamisen sijaan murskatun lasin käyttö korvikkeena
 alentaa energiankulutusta sen pienemmän sulamispisteen ansiosta ja kar-
 bonaatin hajoamisesta syntyvästä hiilidioksidista vältytään. Lasimursketta käy-
 tetään kuitenkin pääasiassa lasivillan ja astioiden valmistukseen. [14, s.143.]

Harderin arvion mukaan 27 Mt lasia kierrätetään vuodessa, joka on 21% maail-
 man lasituotannosta. Astioiden valmistuksessa kierrätetyn lasin osuus vaihtelee
 32-70%. Tasolasin kierrätyspanos saattaa olla alhainen noin 11% johtuen

tarkasta vaatimuksesta raaka-aineiden yhdistelmälle, mutta tämän rajan yli voidaan mennä teknisesti. Käytännössä kierrätetty lasi rakennuksista käytetään yleensä täyte aineena. [15, s.334-337.]

Suurin osuus lasituotannosta maailmassa kuuluu astioille ja tasolasille. Tasolasilla tarkoitetaan levylasituotteita, joita käytetään rakentamis-, auto- ja aurinkopaneelialalla. Rakennusala käyttää tasolasia 83% tuotannosta. Vuonna 2014 maailmassa tuotettiin noin 71 Mt tasolasia. Yleisin tapa valmistaa tätä tuotetta on kellutusmenetelmällä. Kellutusmenetelmässä sulaa lasia kellutetaan hallitusti tyypillisesti sulan tinan päällä. Tämä menetelmä antaa lasille hyvän pinnan laadun. Tasolasin tuotannossa tulee 10% viallisia tuotteita, jotka kierrätetään tuotantoketjuun. Lasin käyttöikä jatkuu, kunnes rakennus puretaan, yleensä arvioksi annetaan 75 vuotta. [14, s.143.] [15, s.334,336.]

Tasolasituotteet tehdään melkein aina sooda-kalkkilasista. EU:ssa valmistettiin vuonna 2007 9,3 miljoonaa tonnia tasolasia. Teräskannan avulla on arvioitu, että rakennuksissa oleva lasimäärä on maailmassa 1620 Mt. Saksassa päästöt per tonnia tasolasia olivat keskimäärin 0,6 tonnia CO₂. [14, s.144.] [15, s.337.] [16, s.3.]

Lasivilla on kuituista materiaalia, jota käytetään eristämiseen. Lasivilla tehdään sulatusuunissa. Vuonna 2007 Euroopassa valmistettiin 1,2 tonnia lasivillaa. [14, s.144.]

Tulevaisuudessa rakentamisen ja ajoneuvojen lasikannan oletetaan kasvavan kaksinkertaiseksi vuoteen 2050 mennessä. Rakennuksen ikä verrattuna autojen ikään on korkea ja se vaikuttaa lasin sisä- ja ulosvirtauksiin. Kantojen kasvun takia rakentamisen lasi pitää tehdä tavallisista raaka-aineista ainakin lähitulevaisuudessa. Ulosvirtausten hyödyntäminen voi olla haastavaa tasolasin kannalta. Tällä hetkellä lasia käsitellään jätteenä ja usein lasi on laminoitu eli siitä pitää poistaa polymeeri keskikerros. Rakennuslasissa voi olla myös muita epäpuhtauksia, jotka voivat tehdä lasista kierrätyskelvottoman. [15, s.339-400.]

3.7 Muovi

Plastic European arvion mukaan noin 70 vuoden aikana lähtien 1950-luvulta on tuotettu 4000 miljoonaa tonnia muovia. Material economics ennustaa muovin tuotannon kasvavan 10 miljoonalla tonnilla joka vuosi. Pitkän tähtäimen arvion mukaan vuonna 2050 tuotetaan 800 miljoonaa tonnia muovia vuodessa. Muovinkäyttö kategorioittain on seuraavanlainen globaalin arvion mukaan ”45 % muovista käytetään pakkaamiseen, 19 % rakentamiseen, 12 % kulutustuotteisiin, 7 % kuljetuksiin, 4 % elektroniikkaan ja 12 % muihin sovelluksiin.” [20, s.7.]

Muovien uusiokäyttö ja kierrättäminen on maailmanlaajuisesti melko alhaista Geyerin arvion mukaan muovin kierrätysaste on noin 10%. Suurin osa käytetystä muovista saapuu kaatopaikalle ja osa käytetään energianlähteenä. Suomen ympäristöministeriö on laatinut suomen muovitiekartan vuonna 2018. Kartassa käsitellään tapoja vähentää ja kierrättää muovin käyttöä. [20, s.7.]

Rakentamisessa käytetään muovia niiden hyvien erikoisominaisuuksien kuten kosteusteknisten ominaisuuksien ja eristävyytensä takia. Muovia käytetään monessa eri rakennusosassa, pakkausmateriaalina ja työnaikaisiin suojuksiin. Yleisimpiä muoveja rakentamisessa lyhenteitä käyttäen on HDPE-, LDPE-, PP-, PS-, PET-, EPS-, PVC- ja PC-muovi [20, s.8.]

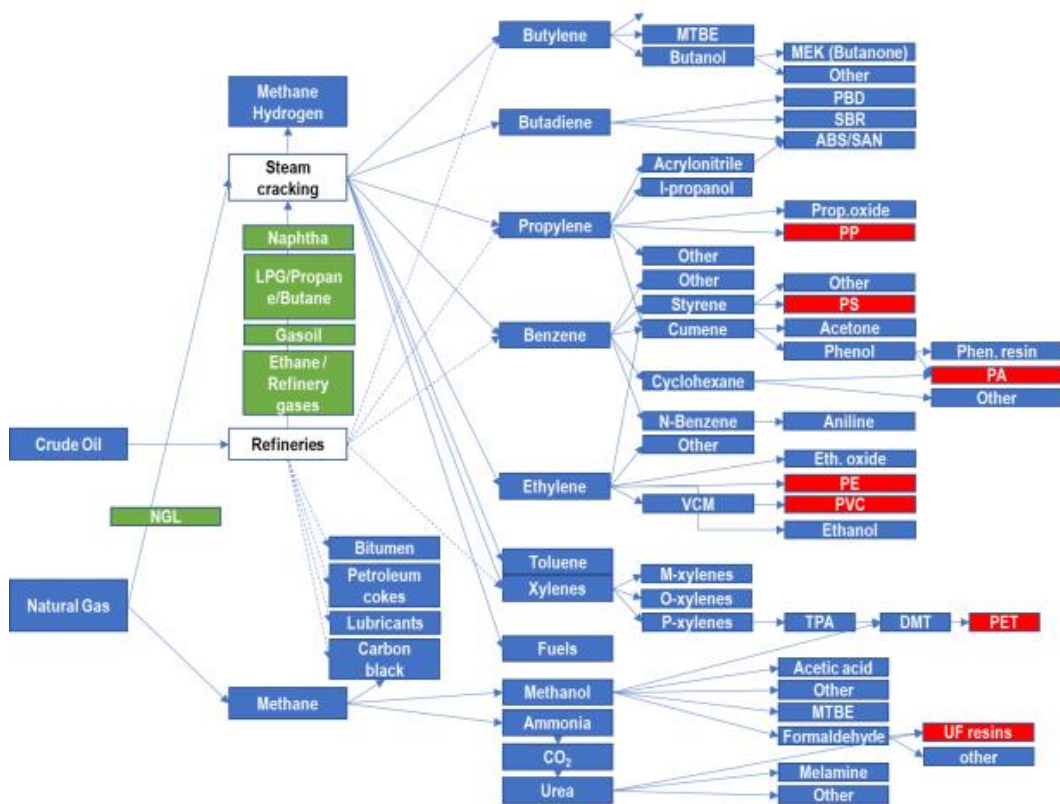
Yhden arvion mukaan betoni- ja puurakenteisissa kerrostaloissa ja päiväkodeissa oli 6-28 kg/m² muovia [20, s.8].

Raaka-aine höyrykrakkausta varten valmistetaan raakaöljystä tai luonnonkaasusta. Molempien aineiden hankkiminen vaatii energiaa ja aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. [19, s.106.]

Vaikka 90% fossiilisten polttoaineiden kasvihuonekaasuista vapautuu niiden käytöstä poltossa myös niiden hankinta vaikuttaa niiden elinkaaren päästöihin. Esimerkiksi Kanadassa tai Venäjällä öljyn ja kaasun tuotanto vastaa 20% näiden maiden kasvihuonekaasupäästöistä. Maailman keskiarvo hiilidioksidipäästöissä öljyn ja kaasun tuotannossa on 130 kg CO₂:a kohti tonnia öljy-

ekvivalenttia. Joissakin maissa tämä voi olla huomattavasti alhaisempi kuten Norjassa keskiarvo oli noin 55 kg CO₂ kohti tonnia öljy-ekvivalenttia. [21, s.1957.]

Ennen höyrykrakkausta raaka öljy pitää jalostaa poistamalla siitä epäpuhtaudet ja muodostaa öljystä fraktioita riippuen niiden kiehumispisteestä. Pääasiassa muovin tuotanto tapahtuu fraktiolla nimeltä nafta. Jalostamisen päästöt riippuvat paljon raakaöljyn tyypistä ja eri fraktioiden kysynnästä. Fraktioiden päästöjen keskiarvo 40,7 kg CO₂-ekvivalenttia per tynnyriä tai 7,3 CO₂-ekvivalenttia/MJ. Käyttäen öljyn lämpöarvoa 42-47 MJ/kg tilavuuspaino on 0,307-0,343 kg CO₂-ekvivalenttia/kg raakaöljyä. Arviolta 40% päästöistä öljyn ja kaasun tuotantoketjusta syntyy jalostamisesta. Naftan tuotannon päästöt ovat arviolta 0,340 kg CO₂-ekvivalenttia/kg naftaa. [22, s.15-16.]



Note: Main cracker feedstock components are indicated in green. Main polymers are indicated in red
Source: Gielen (1998)

Kuva 1. polymeerien valmistuksen vaiheet [22, s.17.]

Hiilidioksidin ja fossiilisten polttoaineiden vähentämiseen muovien tuotannossa voidaan käyttää biomassaa raaka-aineena, mekaanista kierrätystä, valikoivaa liuottamista ja jätemuovin käyttö masuuniin injektioina. [19, s.127.]

Muovien tuottamiseen tarvitaan myös monia lisämateriaaleja kuten klooria, happea, typpihappea, ammoniakkia, hiilimonoksidia, formaldehydiä, metanolia ja vetyä [19, s.107].

Höyrykrakkaus on menetelmä, jossa muovin raaka-aineet kuumennetaan 800-900 celsiusasteeseen höyryn kanssa. Tämän prosessin kautta pitkät molekyylit hajoavat ja muodostuu yhdistelmä lyhyempiä molekyylejä. Yhdistelmä karkaistaan öljyssä, jotta reaktio saadaan pysäytettyä. Seuraavaksi yhdistelmä puristetaan kasaan, kuivataan ja viilennetään tislausta varten. Tällä prosessilla saadaan valmistettua muovin tuotannon kannalta tärkeitä aineita kuten eteeniä, propeenä, C4 fraktio, joka sisältää butyleeniä ja butadieeniä sekä pyrolyysi bensiniä. C4 fraktiosta voidaan tuottaa betseeniä, tolueeniä ja ksyleeniä. Läntisessä Euroopassa käytetään yleensä naftaa höyrykrakkauksessa muita aineita krakkauksessa ovat etaani ja kaasuöljyt. [19, s.72.]

Eri polymeerien kasviuonekaasupäästöt raaka-aineiden hankinnasta, jalostuksesta, krakkauksesta ja polymeerin tuotantovaiheesta vaihtelee välillä 1,91-5,70 kg CO₂-ekvivalenttia/kg polymeeriä. Nämä arvot sisältävät Euroopan energiankäytön krakkauksessa ja maailman yläjuoksun prosessien kuten raakaöljyn jalostuksen energiankäytön. Polymeerien tuotannon hiilijalanjälki Euroopassa vuonna 2019 oli yhteensä 132 Mt CO₂-ekvivalenttia. [22, s.17-18.]

Taulukko 6. polymeerien tuotannon kasvihuonekaasupäästöt [22, s.18]

Polymer	Polymer production and key upstream contributing processes	Greenhouse gas emissions (kg CO ₂ eq/kg polymer)
PP	Polypropylene, granulate production (Europe)	1.91
LD PE	Polyethylene, low density, granulate production (Europe)	1.98
HD PE	Polyethylene, high density, granulate (RER) production (Europe)	1.93
PVC	Polyvinylchloride bulk polymerised production (Europe)	2.51
PUR	Polyurethane, rigid foam production (Europe)	5.70
PET	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous production (Europe)	2.94
PS	Polystyrene, general purpose production (Europe)	3.68

Source: Ecoinvent database, version 3.6 (7)

Osa krakkauksen tuotteista voidaan käyttää suoraan polymeerien valmistukseen. C4 ja BTX fraktiot pitää vielä erotella pidemmälle ennen niiden valmistamista polymeereiksi. Näitä väliaineita ovat esimerkiksi butadieeni ja bentseeni, ja niillä valmistetaan polyuretaania ja ABS muovia. Butadieeni valmistetaan tislaamalla ja sen valmistus vaati läntisessä Euroopassa vuonna 1994 7,6 GJ per tonni butadieeniä. Bentseeniä voidaan valmistaa kahdella tavalla tislaamalla ja liuotin uuttamisella. Bentseenin valmistus vaatii 2,1-3,9 GJ per tonni bentseeniä riippuen valmistustavasta ja raaka-aineen laadusta. Muita väliaineita on tolueni, p-ksyleeni, styreeni ja VCM. [19, s.75-77.]

Polymeerien valmistukseen on kuusi prosessia, jotka ovat massapolymerointi, liuospolymerointi, saostuspolymerointi, emulsiopolymerointi, suspensiopolymerisaatio ja kaasufaasipolymerointi. Massapolymerointiprosessissa polymerisaatio tapahtuu nestefaasissa korkeassa tai matalassa paineessa alle 100 °C:ssa. Kaasufaasiprosessin polymerisaatio tehdään matalan paineen alaisena 70-100 °C:ssa. Nämä prosessit eivät tarvitse liuotinta. liuospolymerisaatio menetelmä tarvitsee liuotinta ja tapahtuu 30-100 baarin paineessa 150-250 °C:n lämpötilassa. Suspensiopolymerisaatio käyttää myös liuotinta tällä tavalla tuotettu polymeeri ei ole liukoinen liuottimeen, joten tämä johtaa suspensioon, josta polymeeri saostuu. Tämä prosessi tapahtuu 110 °C:ssa ja alle 40 baarin paineessa. Emulsiomenetelmä on samantyyppinen kuin suspensiomenetelmä, mutta se käyttää vettä liuottimena emulgaattorin ja muiden lisäaineiden kanssa

saavuttaakseen monomerin ja polymeerin suspension. Saostusprosessi tapahtuu 230-285 °C:ssa ja on endoterminen reaktio poiketen muista menetelmistä. [19, s.83.]

Energiantarve vaihtelee menetelmien mukaan. Massapolymerisaatio ja kaasufaasipolymerisaatiossa tarvitaan vain yksinkertaistettu vähäenergisempi tuotantolaite, koska ei käytetä liuotinta eikä tarvita monimutkaisempia suspensio tai emulsioprosesseja. Toisaalta on monia muovituotteita ja niitä kaikkia ei voi valmistaa yhdellä menetelmällä. [19, s.83.]

Taulukko 7. polymerisaatiotavat polymeerityypeittäin [19, s.84]

Plastic type	Polymerisation method				
	Liquid phase	Gas phase	Solution	Suspension / Emulsion ^a	Polycondensation
PE					
HDPE		x	x	♦	
LDPE	♦			x	
LLDPE	x	♦	x	x	
PP	♦	♦	x	♦	
PS	♦		x	♦	
PVC	x			♦	
PET					♦
ABS	x			♦	
PUR					♦

^aAlternative process for PVC, PS and ABS polymerisation.

Muovi konvertterit käyttävät polymeerejä sekoitettuna lisäaineisiin valmistaaakseen muovituotteita and osia. On useita muuntotekniikkaa riippuen polymeeristä ja halutusta tuotteesta. Muuntotekniikkoja ovat esim. ruiskupuristus tai puhallusmuovaus. Muuntoprosessien päästöt vaihtelevat välillä 0,294-1,14 kg CO₂-ekvivalenttia/kg muovituotetta [22, s.18-19.]

EU:ssa polymeerien muodostaminen muovituotteiksi aiheuttaa noin 46Mt CO₂-ekvivalenttia [22, s.20].

Taulukko 8. Vuosittaiset kasvihuonekaasupäästöt polymeerien konvertoinnista EU:ssa arvio [22, s.20]

Polymer	Annual EU converters demand (Mt) (Plastics Europe, 2019)	Assumptions regarding conversion (adapted from Zheng and Suh, 2019)	GHG emissions (kg CO ₂ -eq/kg polymer)	Annual GHG emissions (Mt CO ₂ -eq)
PP	9.9	74 % injection moulding; 24 % blow moulding; 2 % extrusion (pipes)	0.94	9.31
LD PE	9.0	67 % injection moulding; 24 % blow moulding; 9 % extrusion (pipes)	1.13	10.17
HD PE	6.2	67 % injection moulding; 24 % blow moulding; 9 % extrusion (pipes)	1.13	7.01
PVC	5.1	51 % extrusion (pipes); 18 % calendering (sheets); 29 % injection moulding; 2 % blow moulding	0.51	2.60
PUR	4.0	100 % polymer foaming	0.51	2.04
PET	3.9	50 % injection moulding; 50 % blow moulding	0.94	3.67
PS/EPS	3.3	100 % polymer foaming	0.51	1.68
Others	9.7		0.94*	9.12
TOTAL				45.60

Note: *Median value

Source: Plastics Europe (2019); Zheng and Suh (2019); Keoleian et al. (2012)

Taulukko 9. Kasvihuonekaasupäästöt muovien konverteriteknologioista EU:n keskiarvo [22, s.19]

Conversion technology and key contributing processes	Greenhouse gas emissions (kg CO ₂ -eq/kg product)
Injection mould processing (Europe)	0,962
Electricity, medium voltage (Europe)	0,62 (64%)
Heat, district or industrial, natural gas (Europe excluding Switzerland)	0,22 (23%)
Blow mould processing (Europe)	0,917
Electricity, medium voltage (Europe)	0,72 (78%)
Solid bleached board	0,12 (13%)
Stretch blow moulding (Europe)	1,14
Electricity, medium voltage (Europe)	1,06 (93%)
Calendering, rigid sheets (Europe)	0,322
Electricity, medium voltage (Europe)	0,21 (66%)
Steam, in chemical industry (Europe)	0,07 (21%)
Extrusion of plastic film (Europe)	0,416
Electricity, medium voltage (Europe)	0,28 (67%)
Heat, district or industrial, natural gas (Europe excluding Switzerland)	0,03 (8%)
Waste plastic, mixture (Europe)	0,03 (8%)
Extrusion of plastic pipes (Europe)	0,294
Electricity, medium voltage (Europe)	0,21
Heat, district or industrial, other than natural gas (Europe)	0,05
Polymer foaming processing (RER)	0,513
Electricity, medium voltage (RER)	0,33 (64%)
Heat, district or industrial, other than natural gas (Europe)	0,18 (36%)
Thermoforming with calendering (Europe)	0,642
Electricity, medium voltage (Europe)	0,42 (66%)

Source: Eco-invent database, version 3.6 (7)

3.8 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki; kuljetukset

Kuljetusten hiilijalanjälki syntyy useasta tekijästä. Näitä ovat kuljetusetäisyys, reitin valinta, mitä ajoneuvoa käytetään ja mikä on sen energiatehokkuus, polttoaine, lastin massa ja täyttöaste. Työmaalta kuljetetaan myös pois materiaalia kuten maa-ainesta, louhintajätettä tai purkujätettä, joten näidenkin kuljetusten hiilijalanjälki on huomioitava. Erityistä huomiota kuljetusten hiilijalanjälkeä tarkasteltaessa on käytettävä raskaimpien rakennusosien kuljetuksissa näihin kuuluvat maa- ja kiviaines, täyttöaine ja kantavan rungon materiaalit. Tällaisten osien kuljetusten pituutta tai massaa vähentämällä voidaan tehdä vähennys kustannuksiin ja hiilijalanjälkeen. [1, s.131.]

Rakentamisessa ja muussa tuotannossa kuljetukset ovat elintärkeä osa niiden toimintaa. Kuljetuksilla on suora sekä epäsuora vaikutus rakentamisen päästöihin. Kuljetusten matkat lisäävät päästöjä. Jakelukeskuksia lähempänä olevat kohteet säästävät kuljetuksista syntyvää energiaa. Toimiva ja laaja infrastruktuuri luo kuljetuksille mahdollisuuden vähentää niiden energiantarvetta. Jos halutaan, että työmaa toimii oikein, materiaalit täytyy toimittaa sovitun aikataulun mukaan. Tavaravirran rytmin virheet voi häiritä työmaata, koska työmaalla on hyvin rajallisesti varastointialaa, joten tuotteet pitää saada paikalle niin, että ne käytetään mahdollisimman pian. Pienellä varastointiajalla vältetään myös materiaalien pilaantumiselta. Eri materiaalien kuljetusten yhdistämistä on hyvä harvita, jos se on sopivaa rakentamisen kannalta. Kuljetuksiin vaikuttaa myös jälleenmyyjän ja toimittajan käytön valinta. Rakennustuotteen valmistus-, osto- ja käyttöpaikan etäisyydet määräävät kuljetusten päästöt. [23, s.1.]

Työmaalla on kolme suurinta sisään tulevaa kuljetusvirtaa, jotka ovat materiaali, kalusto ja työvoima. Ulos tulevia virtoja ovat jätteet ja kaivuumateriaali. Erityyppiset projektit käyttävät erityyppisiä materiaaleja ja nämä materiaalit vaativat erityyppisiä kuljetusvälineitä. Suurimassa osassa rakennuksissa on tietyt vaiheet, joita seuraa tietty materiaalivirta. Rakentamisen alussa maa-aineksen poisto luo suurimman osan kuljetetusta materiaalista. Vaikka nämä kuljetukset ovat lyhyitä niiden suuri määrä antaa niille suuren vaikutuksen. Myöhemmin projektissa

pienemmät kuljetukset ovat yleisiä. Jätteiden kuljetukset ovat myös varteen otettavia, kun projektissa saattaa olla useita jätekuljetuksia viikossa. Jätteiden erittely kasvattaa tilantarvetta ja aiheuttaa pienemmät täyttöasteet kuljetuksille. Kaikilla edellä mainituilla kuljetusvirroilla on usein heikko käyttöaste, liian suuri kulu tai tyhjä kuorma. Alhainen kuljetusten tehokkuus johtaa turhiin päästöihin ja vaikuttaa myös työmaan toimintaan haitallisesti. Hyvällä materiaalivirtojen hallinnalla voidaan saavuttaa jopa 30% hiilidioksidipäästöjen vähennykset kuljetuksiin käyttämällä esim. CLS-konseptia ja ottamalla käyttöön rakentamisen logistiikkakeskukset, jotka mahdollistavat JIT-toimitukset. [24, s.1-2.]

Kasvihuonekaasujen arviointia varten tarvitaan tietoa kuljetusten määrästä, käytetyistä ajoneuvoista, kuljetuksien materiaalien ja resurssien tilavuudesta, kuljetusta matkasta ja tonnikilometreistä. Usein nämä tiedot eivät ole digitaalisesti saatavilla vaan tehty tieto kerätään, merkitään ja välitetään manuaalisesti. Myös ympäristöluokitusjärjestelmissä keskitytään vähän kuljetuksiin. [24, s.2-3.]

Yhden selvityksen mukaan, jossa on 40 kohdetta Ruotsissa 2021, saatiin kuljetusten keskiarvoksi 0,49 kuljetusta/m². Eniten kuljetuksia per neliö oli uudisrakennetuissa sairaalakohteissa 0,88 ja 1,02. Kompleksi projekti luokassa oli vähiten kuljetuksia enintään 0,295 ja vähiten 0,044. Kohteisiin liittyi myös ympäristöluokituksia kulta, hopea ja ei luokiteltu, joiden keskimääräiset kuljetusmäärät olivat 0,45, 0,49, 0,52 kuljetusta/m². [24, s.5.]

Kuljetusten keskimääräiset CO₂ päästöt eri kohteissa 16,6kg/m². Asuntoprojekti tuotti eniten CO₂ päästöjä 59,1 kg/m² ja rakennuskompleksiprojekti vähiten 1,61 kg/m². Hopea luokitetut projektit aiheuttivat keskimäärin 17 kg/m² CO₂ päästöt, kultaluokitetut 15,2 kg/m² ja luokattomat 17,6 kg/m². Luokattomien projektien päästöt vaihtelivat eniten, kulta vähiten. Luokitukset tulevat miljöbyggnad:in kautta. Nämä luvut ovat suuntaa antavia, koska niitä on vaikea vahvistaa, kun ottaa huomioon eri projektinjohdon, käytännön kontekstin, rakennustavan ja rajallisen tutkimusryhmän. Keskiarvoihin voi vaikuttaa myös, että joistain kohteista ei ole dataa koko rakentamisen ajalta. [24, s.5-6.]

Taulukko 10. Eri kuljetusmuotojen päästöt/tonnikilometrit [25, s.74].

Table 6

Example of DEFRA factors for transport after [87].

Transportation Mode	Factor	Unit
AirFreight: Short-haul international	2.31277	kg _{CO2e} /tkm
AirFreight: Long-haul international	1.27944	kg _{CO2e} /tkm
RailFreight: Diesel/Electric	0.02601	kg _{CO2e} /tkm
RoadFreight: Rigid – >3.5–7.5t	0.55731	kg _{CO2e} /tkm
RoadFreight: Rigid – >7.5–17t	0.36024	kg _{CO2e} /tkm
RoadFreight: Rigid – >17t	0.17398	kg _{CO2e} /tkm
ShipFreight: General cargo	0.013155	kg _{CO2e} /tkm

Table 7

Example of WRAP Net Waste Tool factors for construction after [88].

Construction Area Factor	50	kg _{CO2e} /m ²
Construction Cost Factor	1400	kg _{CO2e} /£100k spent

4 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki; käyttö ja ylläpito

4.1 Energia ylläpitoon ja käyttöön

Rakennus tarvitsee lämmitystä, lämmintä vettä, sähköä ilmanvaihtoon rakennuksiin, joissa ei ole luonnollista ilmanvaihtoa ja sähköä taloudelle sekä välineisiin. Nämä tarpeet voidaan täyttää eriävillä tai yhtenevillä järjestelmillä esim. kaukolämpö, josta saadaan lämmitys ja lämmin vesi. [35, s.213.]

Energiatohokkuus vaikuttaa siihen kuinka paljon energiaa rakennuksessa tarvitaan. Ostoenergia, kaukolämmön ja kaukokylmän tuotanto sekä polttoaineiden valmistus aiheuttavat päästöjä, jotka lisäävät rakennuksen hiilijalanjälkeä. Uusiutuville energiamuodoilla voidaan vähentää rakennuksen hiilijalanjälkeä ilman energiatohokkuuden parantamista. [1, s.104.]

Energiatehokkuus on monelle suunnittelijalle mahdollisesti tunnetuin tapa vaikuttaa rakennuksen elinkaaren aikaiseen hiilijalanjälkeen. Rakentamismääräykset asettavat yleensä rakennusten vähimmäisenergiatehokkuuden. Voidaan kuitenkin tavoitella erilaisia energiatehokkuuden luokkia kuten passiivitaloa tai nollaenergiataloa. [1, s.104.]

Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan uudisrakennukset tulisi suunnitella ja toteuttaa lähelle nollaenergiataloa. Säännösten mukaiset lähes nollaenergiatalot kuluttavat vieläkin suuren osan energiastaan lämmitykseen. Tästä syystä lämmitystarpeen pienentäminen pohjoismaiden ilmastossa on tärkeä energiatehokkuuden kannalta. [1, s.104.]

Energiatehokkuuden suunnittelua varten voidaan käyttää uusiin rakennuksiin kohdistuvaa asetusta (YMa 1010/2017), joka antaa kaksi työkalua E-luvun ja rakenteellisen energiatehokkuuden. E-luku on laskennallinen energiatehokkuuden vertailuluku, joka havainnollistaa energian käyttöä riippuen ostoenergian tyypistä ja tämä ostoenergia jaetaan rakennuksen lämmitetyllä pinta-alalla, jolloin saadaan E-luku. [1, s.105.]

Rakenteellisen energiatehokkuuden ohjaus toimii tutkimalla olemassa olevia vakio suunnitteluratkaisuja, jotka täyttävät energiatehokkuuden vähimmäisarvot. Näiden ratkaisujen näkökulmasta voidaan ohjata rakenteiden suunnittelua energiatehokkuuden parantamiseksi. Rakenteellinen energiatehokkuus toimii, kun lämpöhäviön vertailuarvoja ei ylitetä. [1, s.107.]

Rakennuksen käytön hiilijalanjälkeen vaikuttaa siis merkittävästi energiatehokkuus, rakennuksen käyttötarkoitus ja energiamuoto. Näistä suurimpana pohjoismaissa lämmityksen energiatehokkuus eli sää ja eristävyys vaikuttavat vahvasti energiankulutukseen. Käyttötarkoitukseen liittyviä asioita ovat käyttöaika, valaistuksen, kuluttajalaitteiden, ihmisten läsnäolon aste, käyttäjäprofiilit sekä sisäiset lämpökuormat. [1, s.105.] Vahvat lämmöneristeet voivat toisaalta johtaa jäähdystarpeeseen, mutta rakennukset jäähtyvät yleensä hyvällä auringonsuojauksella [1, s.110].

Eristävyyden lisäksi ulkovaipan kylmäsilat ja ilmanpitävyys vaikuttaa energiatehokkuuteen erityisesti ilmanpitävyyden kannalta, jos ulko- ja sisäilmalla on suuri paine ero. Ilmavuodot siirtävät lämmitettyä ilmaa konvektiolla lisäten lämmitystekon tarvetta ja näin laskee energiatehokkuutta. Myös Ilmanvaihdon lämmönkeräys heikkenee ilmavuotojen takia. Kylmäsiltojen osuus lämpöhäviöistä voi myös olla huomattava. [1, s.111.]

Energiatehokkuus ottaa suuren roolin tulevaisuudessa vähähiilisyudessa, vaikka energialähteet muuttuvat uusiutuviksi. Hyvin lämpöeristetyt rakennukset voidaan suunnitella pienemälle tehontarpeelle. Hyvä lämpöeristäminen antaa myös mahdollisuuden parempaan tulevien LVIS-järjestelmien yhteensopivuuteen niiden uudistuksissa. [1, s.108.]

Lämmöneristävyys ja energiatehokkuus vaihtelee ulkovaipan, LVIS-järjestelmien, sisäisten lämpökuormien hyödyntämisen, ulkoilman ja maan kylmyyden hyödyntämisen, rakennusautomaation, vedenkulutuksen hallinnan, sähkölaitteiden tehokkuuden, rakentamistavan esim. tuulenpitävä tai kylmäsilattoman rakenteen, yksinkertaistamisen hyödyntämisen, talotekniikan hajautuksen ja varhaisten energiatehokkuussuunnitelmien mukaan. [1, s.112.]

Ikkunoiden ala on asuinrakennuksissa yleensä 10-15% huoneiston alasta ja vanhoissa asuinrakennuksissa ikkunoiden kulutus lämmitysenergiasta on noin 15-20%, tämä johtuu vanhoista kaksilasisista ikkunoista. Vaihtamalla ikkunoita nykyaikaisemmiksi voidaan ikkunoiden energiankulutus puolittaa. Ikkunoiden tyyppillä on merkittävä vaikutus energiatehokkuuteen ja näin hiilijalanjälkeen. [1, s.114.]

2015 luvulla keskimääräinen sähkönkulutus EU:ssa henkilöä kohti oli 0,46 öljy-ekvivalenttitonnia tarkoittaen sähkötehona 5,395 kWh henkilö kohden. Palvelu- ja asuinrakennukset käyttävät suuren määrän energiaa, joka EU-maassa keskimäärin vuonna 2015 38,9% käytettiin näissä rakennuksissa. Vuonna 2014 Euroopan asuinsektori aiheutti 16,8% kaikista kasvihuonekaasuista. [39, s.1-2.]

Ilmanvaihto ja muut talotekniikan laitteet vaikuttavat vahvasti energiankulutukseen ja tehokkuuteen [1, s.112].

Lämmön takaisinsaamista käyttävät poistoilmalämpöpumppujärjestelmät voivat vähentää kaukolämmön kulutusta 40-70% [1, s.113].

4.2 Veden käyttö

Muiden ilmastohaasteiden lisäksi kaupungeilla on lisääntynyt veden käyttö, joka ei liity vain kuivuuteen vaan myös kestävämpään veden hankintaan erityisesti kaupunkialueella. Liiallinen veden käyttö on suurin uhka vesiresurssien katoamiselle Euroopassa. 2012 lähtien Euroopan komissio on tehnyt säädöksiä, joiden tehtävä on suojella vesivarantoja. Ennen 1900-vuosisataa globaalit vaatimukset vedelle olivat pieniä verrattuna veden kiertoon. Veden kysynnän kasvaessa veden tarjonta laskee makean veden saastumisen, pohjaveden käytön ja tyhjenemisen takia. Vesi on myös tärkeä kestävä kehityksen tavoitteiden kannalta ja sitä tarvitaan monessa siirtymä järjestelmäkehityksissä, joita tarvitaan ilmaston kestävyuden parantamiseksi. Tällä hetkellä noin 4 miljardia ihmistä maailmassa kokee veden vähyyttä ainakin osan vuodesta liittyen ilmastoon ja ihmistekijöihin. [36, s.1-2.]

Ilmastomuutos vaikuttaa veden saatavuuteen, laatuun ja määrään, jota tarvitaan perus-ihmistarpeisiin. Ilmastomuutos siis uhkaa ihmisoikeutta veteen ja puhtaana pysymiseen biljoonille ihmisille. Veteen liittyvät ääri ilmiöt ovat myös pahentuneet ilmastomuutoksen takia ja ne vaikuttavat vesijärjestelmien toimivuuteen. Euroopan vesi infrastruktuuri on vanhenemassa ja vaatii suuria investointeja, jotta vältetään suuremmilta vahingoilta. Yritykset, jotka hallitsevat vesipalveluja kaupunkialueella tuottavat hiilidioksidia toiminnan joka vaiheessa, jos halutaan päätyä nollapäästötavoitteisiin pitää sisältää osapuolia, jotka ovat mukana koko tuotantoketjussa. Ilmastohaasteisiin pitäisi varautua kestävillä vesijärjestelmillä, jotka sopeutuvat, vastustavat ja muuttuvat ilmaston mukana. Tästä syystä on hyvä harkita vaihtoehtoisia vedenlähteitä tulevaisuuden suunnitelmiin, sillä ilman vettä säästäviä keinoja EU odottaa 16% kasvua veden

nostolle Euroopassa vuoteen 2030 mennessä. Kiertotaloudella on mahdollisuus laskea pääasiallisten vedenlähteiden käyttöä 53% vuoteen 2050 mennessä. Pelkkä veden käsittely ei saa aikaan kiertotaloutta vaan pitää myös keskittyä yläjuoksun toimintoihin. [36, s.1-2.]

Kasvihuonekaasujen vähentäminen vähentää päästöjen ehkäisyä veden käsittelylaitoksissa ja parantaa mikro saasteiden poistoa näin saadaan parempaa vettä käytettäväksi. Veden palauttaminen luontoon auttaa luonnon elvyttämistä. Veden kiertotalous lisää sen käytön tehokkuutta, antaa vähennyksen turhaan veden kulutukseen ja näin veden säästöt vaikuttavat energian kulutuksen vähenemiseen ja edelleen kasvihuonekaasujen vähenemiseen. [36, s.2-3.]

Energiasektori Euroopassa ja maailmalla käyttää paljon vettä. Energiasektori on samaa kokoluokkaa kuin viljely ja teollisuus veden käytössä. Toisaalta vesisektori käyttää 4% koko maailman sähköstä. Pumpkauksen, putkiston tarve ja veden käsittely tekee energiasta ja vedestä kietoutuneita. Veden ja energian kietoutumisen uskotaan vahvistuvan ilmasto vaikutuksien takia muuttaen kulutusta ja väestön kasvua. Tulevaisuudessa lämpöön perustuvien energiatuotantomenetelmien vähentymisen takia veden käyttö näissä menetelmissä vähenee ja energian käyttö veteen vähenee näillä menetelmillä kehittyneissä talouksissa. [36, s.3.]

Jotkin vähähiiliset energiateknologiat voivat vaikuttaa veden ja energian suhteeseen positiivisesti tai negatiivisesti [36, s.4].

Lämpöpohjaiset energiantuotantomenetelmät kuluttavat enemmän vettä kuin aurinkopaneelit tai tuulivoima kohti tuotettua energiayksikköä. Samalla veden käyttö energiaan käytettävään biomassaan ja kohdistettu aurinkovoima voivat käyttää enemmän vettä kuin fossiilisia polttoaineita käyttävät energiantuotantomenetelmät. [36, s.4.]

Biokaasu- tai energiatalteenottojärjestelmät vedenkäsittelylaitoksissa voivat tuottaa enemmän energiaa kuin ne käyttävät näin sillä on positiivinen vaikutus [36, s.4].

Energia on olennainen osa vedentarjontaa moneen eri tarkoitukseen, jotka ovat elintärkeitä ihmisten hyvinvointiin kuten puhtaaseen ja turvalliseen veden saantiin, veden suolanpoistoon, jäteveden käsittelyyn ja veden pumppaukseen sekä jakamiseen kaikkeen käyttöön [36, s.4].

Maailman ympäristö ja vesiresurssikongressin tutkimus arvioi, että 7% maailman energiankäytöstä 2000-luvulla tuli veden pumppauksesta ja veden käsitte-lystä rakennuskäyttöön. Hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi energian käytön vähentäminen on olennaista ja palveluiden pitää jossain vaiheessa käyttää pu- dasta energiaa, jotta päästään nollopäästötasolle. Vesi ja jätevesipalveluilla on monta vaihtoehtoa tuottaa puhdasta energiaa ja mahdollisuus vaikuttaa kau- punkien päästöihin muuttamalla niitä vihreämmiksi. [36, s.4.]

Useat tutkimukset esittävät uusia näkökulmia ja tulkintoja veden ja energian riip- puvuudesta kuten uusiutuvien energiantuotantomenetelmien ja juomaveden ja- kamisen ja jäteveden keräyksen liittäminen yhteen niin, että ne voivat varas- toida ja vapauttaa energiaa vastauksena hetkellisiin muutoksiin lämmityksen ky- synnässä [36, s.4].

Älykäs harmaa ja vihreä hybridi infrastruktuuri on avain ilmastoneutraaleihin ja älykkäisiin kaupunkialueisiin, jotka voivat taata veden tarjonnan kaupunkien toi- mintoihin ja muihin palveluihin kuten energiaan. Tietokoneratkaisuja tarvitaan eri vesilaatujen hallitsemiseen käyttäen kannustusjärjestelmiä hallinnon ja käyt- täjä osallistumisen kautta ja opettamalla vastuullista käyttäytymistä tulevaisuu- den vesiälykkäissä kaupungeissa yhdessä veden kierron innovaatioiden kautta. [36, s.4.]

Investoinnit veden käsittelyyn ja infrastruktuuriin, jotka tavoittelevat kiertota- loutta ja vihreitä ratkaisuja voivat johtaa säästöihin lyhyillä takaisinmaksuajoilla. lisäksi veden käyttö luonnon monimuotoisuuden vaalimiseen kaupunkialueilla lisäävät asukkaiden elämänlaatua ja mielenterveyttä. [36, s.4.]

Luontopohjaiset ratkaisut ovat parhaiten toimivia kahdelta näkökannalta. Ne tar- joavat veden lähteen ihmisten toiminnalle ja takaavat veden kierron toimivuuden.

Säännöksien puute, jotka pyrkivät vihreään ja siniseen infrastruktuuriin on suurin este julkisten investointien tekemiseen. [36, s.4.]

Kotitalouksien vedenkäyttö koostuu pesuhuoneen käytöstä ja hygieniäkätöstä keittiössä ja astianpesukoneissa, ilmastointilaitteista, vessan käyttämisestä, kasvien kastelusta ja ulkotilojen puhdistuksesta [36, s.5].

Veden käytön hiilidioksidipäästöt voidaan laskea määrittämällä veden kulutus ja sen jälkeen veden kiertoan liittyvällä energiankäytöllä voidaan arvioida hiilidioksidipäästöt [36, s.7].

4.3 Kunnossapito

Jos halutaan parantaa olemassa olevien rakennusten kestävyyttä ilmaston kannalta niitä pitää huoltaa perustuen kestäviin ja tehokkaisiin ratkaisuihin, jotka vaikuttavat halutulla tavalla kolmeen kestävyuden ulottuvuuteen. Kestävän ja tehokkaiden keinojen sisältäminen lähestymistapoihin vähentää ei-toivottavia vaikutuksia ympäröivään luontoon, vastaa ilmaston haasteisiin, parantaa huoltajien ja käyttäjien turvallisuutta ja mahdollistavat tehokkaat huoltotavat, jotka vastaavat vaatimukseen kuten toimivuuteen ja laatuun. Kestävät ja tehokkaat huoltotoimenpiteet tekevät ympäristöstä puhtaampaa ja turvallisempaa esimerkiksi huono huolto voi johtaa LVI-laitteiden tehokkuuden huonontumiseen, mikä nostaa hiilidioksidipäästöjä lisääntyneen energiankäytön kautta. [37, s.1.]

Lisäksi huoltotavat kuten tarkastuksien menettelytavat vaikuttavat huoltomateriaalien valintaan ja niiden hävittämiseen. Jos materiaalit ja niiden hävittäminen ei ole johdonmukaista kestävä kehityksen kannalta tulee negatiivinen vaikutus ympäristöön. [37, s.1.]

Nykyään rakennusten huoltamisen vaikeus on kasvanut tämänhetkisten kestävyysvaatimusten ja monimutkaisten rakennusjärjestelmien takia, jotka tuottavat monimutkaisia ja vaihtelevia huolto-ongelmia. Rakennuksen kunnossapidon menettelyihin liittyy monta prosessia kuten suunnittelu, toteutus, varmistus ja

rakennuksen hyväksyntä. Lisäksi tuotteiden ja energian käyttö on olennainen osa huoltotoimenpiteitä. Huono huoltaminen voi tarkoittaa energian käytön kasvua, huoltokustannuksien nousua ja rakennuksen toimivuuden heikentymistä eli vaikutus on kaikille kestävä kehityksen alueille. [37, s.2.]

Monen tutkimuksen mukaan rakennukset käyttävät 40% kaikesta energiasta ja ovat vastuussa 30% maailman hiilidioksidipäästöistä. Rakennuksen käytöllä ja huoltovaiheella on suurin vaikutus ilmastoon, kun käyttö vastaa elinkaaren päästöistä noin 68%. Rakennuksilla on kuitenkin huomattu olevan paras potentiaalinen säästö energiankäytössä. Rakennuskannan huoltaminen kestäväällä ja tehokkaalla tavalla tarjoaa keinon parantaa energiatehokkuutta. Rakennuksen energiatehokkuudella on myös taloudellinen vaikutus, joka voi luoda kannustinta investoimaan huoltoon. [37, s.2.]

Nykyään rakennuksen huoltoon liittyy monta tahoja ja tämä voi monimutkaistaa huoltotyöprosesseja johtaen epätasapainoon ja edelleen huonoihin huoltokäytäntöihin. Tarvitaan siis systemaattisia lähestymistapoja. [37, s.2.]

Ympäristöystävällisiä työtapoja huollossa on esimerkiksi rakenteita hajottamisen tarkastus, kestävät materiaalivalinnat huoltoihin ja jätteen vähennys, uusiokäyttö ja kierrätys. Ilmastonmuutos tuo myös epävarmuutta ja kustannuksia huoltoon, kun ilmasto lämpenee vaihteittain ja sään ääri-ilmiöt lisääntyvät. Myös rakennuksen huollon suunnittelu vaikenee ilmasto-olosuhteiden muutoksen mukana. Ilmastonmuutos pitää siis ottaa tulevaisuudessa huomioon kunnossapidossa niin kuin rakentamisessa. [37, s.5.]

4.4 Korjaukset ja osien vaihto

Korjauksien ja osien vaihdon hiilidioksidipäästöt voidaan arvioida mittaamalla niiden vaihdon määrän. Korjaus- ja vaihtotarpeet aiheutuvat rapautumisesta, vaurioista tai materiaalin häviämisestä elinkaaren aikana. Materiaalin käyttöä käyttövaiheen korjauksissa voidaan arvioida rakennusosien korjauskierrosta ja korjausten toteutusasteesta. Pitää myös muistaa, että korjauksissa ja osien

vaihdossa syntyy jätteitä kuten purkujätettä, joiden käsittely pitää ottaa huomioon. [38, s.1463.]

4.5 Muutokset ja uudistukset

Suurin osa tämänhetkisistä asuinrakennuksista Euroopassa on rakennettu 1940-1970-luvuilla ja ne ovat nykyaikaisten standardien mukaan heikkoja erityisesti energiatehokkuudeltaan. Rakennusten korvausaste vuosittain on noin 1-3%, joten nykyinen haaste on vaikuttaa nykyiseen rakennuskantaan, joka on seurausta viime vuosisadan puolivälin korkeasta kysynnästä Euroopassa. Tähän aikaan oli vähän teollista tuotantoa ja ei ollut olemassa rakennuksen käyttökävyyden standardeja. On tiedossa, että kehittyneissä maissa on tärkeää tehdä jälkikäteisasennuksia. [40, s.88.]

Vaikka arviointikriteerit vaihtelevat jälkikäteisasennusstrategiat ovat yleisesti samanlaisia. Rakennusten energiatehokkuus erityisesti lämmityksessä voi tuoda huomattavia säästöjä. Lisäämällä rakennuksen eristävyttä ulkokuoreen voidaan saavuttaa suurimalle osalle rakennuksista 20% säästöt ympäristövaikutuksiin verrattuna perustapaukseen. Italiassa kehitetyn arviomenetelmän mukaan parhaassa tapauksessa voidaan säästää 24,8% energiankulutuksessa. Irlannissa lämpöteknisten ominaisuuksien parantamisesta jälkikäteisasennuksella tehdyn tutkimuksen mukaan ennen vuotta 1979 rakennettujen rakennuksien CO₂-päästöjä ja lämmityskustannuksia voidaan vähentää melkein 65% ja uudempia 26%. [40, s.88-89.]

Ruotsissa tehdyn arvion mukaan ratkaisulla kuten ulkokuoren eristyksellä, ikkunoiden vaihtamisella, sisälämpötilan pienentämisellä, lämmönkaappausratkaisulla, jne. voidaan vähentää Ruotsin asuinsektorin energiankysyntää 53%. Suurimmat säästöt tulivat lämmönkaappauksesta (22%) ja sisäilman lämpötilan pudotuksesta (14%). Ulkokuoren ja ikkunoiden parannukset vaikuttivat vähiten energiasäästöihin, tämä johtuu Euroopan Pohjoismaiden jo hyvistä ulkokuorista. [40, s.89.]

Rakennusala on tärkeä osa globaalia kestävästä kehityksestä. Strategiat tehdä rakennuksista kestävämpiä perustuvat pääasiassa elinkaari lähestymistapoihin kattaen kolme kestävyiden pääominaisuutta ekologisuus, taloudellisuus, sosiaalisuus ja kulttuurisuus. Kestävyiden lähestymistapaa noudattaen suunnittelun alkuvaiheessa on tunnistettu olevan ratkaiseva työkalu kestävä rakentamisen tavoittelussa. Elinkaaren toimivuuteen voidaan vaikuttaa eniten suunnittelun alkuvaiheessa. [40, s.89.]

Rakennuksen elinkaarta on vaikea arvioida, johtuen monesta syystä kuten rakennusten pitkästä iästä, monista eri omistajista ja jokaisen rakennuksen yksilöllisyydestä. Kun rakennuksen energiatehokkuus paranee jälkikäteisasennuksien kautta sen saavuttamiseen, käytetään lisämateriaaleja tai -osia, joista syntyy lisäpäästöjä niiden valmistukseen liittyvistä toiminnoista. Joten arvioidessa ympäristövaikutuksia elinkaaren aikana on tärkeää arvioida ja vertailla jälkikäteisasennusmenetelmiä ja jälkiasennuksen jälkeen rakennuksen energiankulutusta. Rakennuksen koko elinkaaren energiankulutuksen on huomattu olevan vahvasti yhteydessä käytön energiankulutukseen. On tärkeää arvioida muutoksien energiahäviöt ja niiden saavuttamiseen tarvittavaa energiaa. [40, s.94.]

Jälkiasennukset ovat tällä hetkellä yksi tehokkaimmista tavoista vähentää rakennuksen käytön energiankulutusta Euroopassa. Nykyaikaiset vähäenergiatalot ja nollaenergiatalot alkavat painottaa muita rakennuksen elinkaaren vaihteita. [41, s.1.]

Yleisimmät kohteet uudistuksissa ovat ulkokuoren lisälämmöneristys, ikkunoiden vaihtaminen ja lämmitysmuodon päivittäminen. Näiden toimintojen toteuttamisen hiilijalanjäljessä on hyvä huomioida lisäeristäminen sen mukaan millä materiaalilla on mahdollista eristää ja mitä paksuuksia ja tiheyksiä kyseisessä kohteessa tarvitaan halutun tason saavuttamiseen. Ikkunoita vaihdettaessa arvioidaan niiden hiilijalanjälki ikkuna pinta-alasta. Muutosten ja uudistuksien hiilijalanjälki vaihtelee huomattavasti rakennuksen tyypistä ja valmistusvuodesta. Vanhassa rakennuksessa voidaan tarvita huomattavasti enemmän lisäeristystä verrattuna uuteen rakennukseen. Lisäeristyksellä on suurin vaikutus

rakennuksen energiatehokkuuteen. Kuljetuksia voi arvioida tämän työn kolmannen luvun mukaan [41, s.5-6.]

4.6 Laajat korjaukset

Peruskorjaus kattaa yleensä vanhan julkisivun purkamisen ja ulkoseinien uusimisen lämmöneristeestä ulospäin. Julkisivua voidaan myös lisälämmöneristää ilman purkutoimenpiteitä. Lisälämmöneristuksen kautta pitää yleisesti siirtää ikkunoiden asemaa tai vaihtaa ne tämän lisäksi vielä rakenneosien liittymät pitää tehdä uudelleen näitä ovat ikkunoiden, ovien, katosten ja parvekkeiden liittymät. [1, s.113.]

Korjaushanke käynnistetään yleensä, kun tekninen käyttöikä on saavutettu, vaurioiden tai vikaantumisen jälkeen. Korjaus voidaan myös tehdä, jos käyttäjien tarpeet vaativat parannuksia ominaisuuksiin. Energiatehokkuuden olisi hyvä olla keskeinen näkökulma korjauksia tehtäessä, koska tämä vaikuttaa oleellisesti käytön hiilijalanjälkeen energiatehokkuuden näkökulmasta. Kunnossapitosuunnitelma ohjaa korjaustavan valintaan yhdessä julkisivun ja teknisten järjestelmien kuntotutkimusten kanssa. Kuntotutkimukseen olisi hyvä sisällyttää keinot energiatehokkuuden parantamiseksi, jotka voidaan suorittaa korjauksen kanssa. [1, s.111.]

Eristävyyden kasvatusten kautta korjauksissa avautuu tie paremmin tulevien taloteknisten järjestelmien pohjaksi. Eristävyys vaikuttaa myös lämmitys ja jäähdytystehon alenemisen ja sen kautta voidaan vähentää laitekapasiteettia ja voidaan käyttää suurempana osana uusiutuvaa energiaa eli tarve täyttyy vähemmällä. [1, s.113.]

Energiatehokkuutta lisäävässä korjauksessa on tärkeää huomioida lisäeristys, energiatehokkaat ikkunat, ilmantiiveys, koneellinen ilmastointi lämmönkierrolla eli lämmön talteenotolla ja uusiutuvien energiamuotojen mahdollisuudet. Energiakorjaukset mahdollistavat suuret energiasäästöt ja täten rakennuksen käytön

päästöt laskevat. Korjauksilla voidaan jopa tähdätä nollaenergiarakennukseen, jolloin päästöt ja energiankulutus voivat laskea välillä 60-90%. [1, s.114.]

Usein kohtuullisiin ostoenergian käyttölukemiin päästään vaihtamalla vanhentunut talotekniikka uuteen, jossa on parempi tehokkuus ja lämmön talteenotto. Muita kustannustehokkaita tapoja vähentää energiankulutusta on valaistuksen ja ikkunoiden kunnostaminen. Ikkunoiden kunnostaminen parantaa lämmöneristävyyttä ja estää ilmanvuotoja. [1, s.115.]

Rakennukselle olisi hyvä luoda pitkän aikavälin korjaussuunnitelma, jota noudattamalla talo korjataan ajan saatossa lähes nollaenergiataloksi ja nollaenergiataloa energiatehokkaammaksi. Kustannuskysymykset usein määräävät milloin rakennus korjataan nollaenergiataloksi eli nollaenergiatalon ominaisuudet asennetaan usein pitkän ajan saatossa eri korjausprojekteissa. [1, s.115.]

Täyssaneerauksissa parannellaan energiatehokkuuden kannalta vaippaa, ikkunoita, lämmitysjärjestelmiä ja ilmanvaihtoa. [1, s.112].

Muuntojoustavuudella voidaan vastata rakennuksen korkeasta käyttöiästä johtuviin käytön ja kestävyiden epävarmuuksiin sekä olosuhteiden muutoksiin. Varautuminen rakennuksen mahdollisiin muutoksiin tuo tullessaan tehokkaan rakennuksen käytön, jolloin saavutetaan käyttövaiheen muutokset käyttäjien vaatimusten mukaan ja pidetään rakennus haluttavana markkinoilla. Näin vältetään myös rakennusten tyhjäksi jäämiseltä ja ikääntymiseltä. Myös turha purkaminen vähentyy, kun näiltä vältetään. Muuntojoustavuus ja materiaalien kierrätyksen suunnittelu tekee mahdolliseksi jätteen vähentämisen ja tehokkaan voimavarojen käytön. [42, s.30.]

Muuntojoustavuus voi liittyä rakennuksen käytön rasituksen muuttumiseen kuten ihmismäärän muutoksiin rakennuksissa, käyttäjien tarpeisiin liittyviin muutoksiin tai varautumista elinkaaren aikana syntyviin ennalta arvaamattomiin käytön tai tarpeiden muutoksiin. Muutoksia voidaan tehdä rakenteiden muutoksilla tai vaihtamalla tilojen varustelua. [42, s.31.]

Muuntojoustavuus tarjoaa mahdollisuuden rakennuksen korkean eliniän ja sen muokattavuuden saavuttamisen. Muuntojoustavuus on olennainen osa kestävästä rakentamisesta. Muuntojoustavuus auttaa myös tilojen käytön maksimointia, materiaalien ja muiden resurssien käytön vähentämistä. Monikäyttöisyys kertoo tilojen kyvyn muovautua ilman rakenteellisia muutoksia. Muunneltavuus vaatii laajempia muutoksia rakenteisiin. Muunneltavuutta hyödynnetään suurissa käyttötarpeen muutoksissa. Muunneltavuutta parantavat pitkät jännevälit ja pilarirakenteet. [42, s.31.]

Muuntojoustavuus luo kyvyn rakennukselle ottaa vastaan tulevaisuuden epävarmoja muutoksia ja sopeutua niihin. Vanhentuneet rakennukset eivät houkuttele taloudellisesti, joten uudistuksien mahdollistaminen muuntamalla rakennuksia on tärkeää niiden elinkaaren pidentämiseen ja täyden käytön mahdollistamiseen. Tästä syystä on hyvä suunnitella muuntojoustavuutta ja tarkastella elinkaariajattelua. [42, s.32.]

Rakennusta purettaessa on keskeistä tehdä purku niin, että se edistää rakennosien kierrätystä, korjaamista ja uudelleenkäyttöä kasvihuonekaasujen vähentämistä varten. Muuntojoustavuus voi olla myös edullista energiatehokkuuden parantamisessa kuten energiankäytön tarkentaminen täydelliseksi rakennuksen käyttöänsä aikana. Hyvin muunnettava rakennus mahdollistaa ympäristöhyödyt materiaalien, rakennusaineiden ja käytön energiankulutuksen ja materiaalien käytön vähentymisen kautta. Tehokkaasti käytetty rakennus pienentää tarvetta saada tila jostain muualta. [42, s.32.]

Ympäristövaikutuksiin vaikuttaa myös kiertotalouden mahdollisuudet markkinoilla eli voidaanko jotain tuotteita kierrättää, uusiokäyttää jne. Dokumentointi auttaa kohteen käytön onnistumista [42, s.32].

Häkkisen ja Ala-Kotilan (2019) tutkimuksen mukaan heidän tutkiman toimitilarakennuksen on arvioitu aiheuttavan päästöjä 50 vuoden aikana 960 kgCO_{2e}/m². Tilatehokkuutta muuttamalla saatiin 3,2 miljoonan kilon vähennys päästöihin 50 vuoden aikana. [42, s.33.]

5 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki; rakennuksen purkaminen, kierrätys ja uusiokäyttö

Rakennuksen poiskäytön yhteydessä kulutetaan energiaa ja siitä aiheutuu päästöjä. Poiskäytön toimintoihin sisältyy jätteenkäsittelyä, purkamista ja kierrätystä. Rakennuksen purkaminen koko elinkaaren hiilijalanjäljestä on rakentamisen kanssa melko pieni osa kokonaisuutta. Elinkaaren loppuun liittyvät toiminnot pystyvät käyttämään hyvin paljon vähemmän energiaa kuin mitä kierrätystä materiaalista tai rakennusosista hyödytään. Elinkaaren vaiheen suhteellisen vaikutuksen hiilijalanjälkeen määrästä huolimatta pystytään madaltamaan päästöjä sen sisällä, pitämällä rakennukset helppomuuntoisina ja helposti purettavina. [1, s.131.] Muuntojoustavuuden avulla voidaan pitää rakennus mahdollisesti käytössä pidempään hyödyntäen näin sen pitkäikäisiä osia ja laskemalla hiilijalanjälkeä välttämällä uuden rakennuksen hankkimista [1, s.134].

Yhden arvion mukaan purkuvaiheessa jätettä syntyy 1,3 tonnia per neliometri [45, s.1].

Rakennusala on yksi suurin jätteen tuottaja maailmassa ja se tuottaa eniten kiinteitä jätteitä kaupunkialueilla. Kiina tuottaa vuosittain arviolta 1,13 biljoonaa tonnia jätettä vuodessa ja Euroopan mantere arviolta 890 miljoonaa tonnia jätettä. [49, s.3].

5.1 Purkaminen

Purkutöiden hiilidioksidipäästöjä arvioidessa voidaan saada karkea tulos käytetyn polttoaineen määrästä purkutyövälineissä eri polttoaineiden hiilidioksidipäästökertoimien avulla [43, s.458].

Erityyppisiin materiaaleihin menee eri määrä aikaa purkaa, esim. yhden korealaisen tutkimuksen mukaan betonityyppisten materiaalien purkamiseen menee aikaa 27,5 m³/tunti ja puu, muovi, sekalainen jäte ja muu jäte voidaan purkaa 52,08 m³/tunti samalla laitteistolla [43, s.458].

Saman tutkimuksen mukaan purkamisen välineet vastaavat noin 10% purkamisen päästöistä, mutta suhde vaihtelee materiaaleittain. Elinkaaren loppuvaiheen päästöistä loput tulevat jätteen hävittämisestä noin 70% ja kuljetuksista noin 16-25%. Suurin osa hiilidioksidipäästöistä tulee siis jätteen käsittelystä ja kuljetuksista tämän tutkimuksen mukaan ja näihin kannattaa keskittyä Elinkaaren loppuvaiheessa. [43, s.461].

Toisen tutkimuksen mukaan jätteen keräys ja työmaalla tapahtuva käsittely työvälineillä ottavat isoimman roolin hiilidioksidipäästöistä. [44, s.3164.]

Työkoneita tarvitaan rakennuksen purkamiseen, jätteen keräykseen ja lajitteluun ja työmaalla tapahtuvaan käsittelyyn. Koneiden päästöt voidaan arvioida neljän mittarin kautta, jotka ovat kuljetetun materiaalin määrä, kuljetusmatka, energiankulutuksen tahti ja hiilidioksidin päästökerroin. Kokonaiskulutus voidaan laskea summaamalla koneiden suorat päästöt joka toimintaan liittyen. [44, s.3158.]

5.2 Purkujätteen kuljetus

Eri materiaalityypit kuljetetaan yleensä niitä vastaaviin kierrätyslaitoksiin. Kuljetusten hiilidioksidikaasupäästöjen arviointiin vaikuttaa matkat purkupaikalta käsittelylaitokselle tai kaatopaikalle ja mahdollisesti eteenpäin markkinoille [44, s.3156].

5.3 Purkujätteen jatkokäsittely

Tieto siitä kuinka paljon purettavaa materiaalia on tärkeää elinkaaren lopun toiminnan arvioinnissa. Tämä tieto on olennainen jätteen käsittelyssä, koska se antaa arvion purkujätteen määrästä ja sen ympäristövaikutuksista. Tällä tiedolla voidaan myös määrittää purun hiilidioksidipäästöjä. [43, s.458.]

Yksi jatkokäsittelyn haasteista on jätteen lajittelu tiettyihin materiaaliryhmiin. Työmaalla tapahtuvan käsittelyn puute heikentää kunnollista materiaalin uusiokäyttöä. [49, s.3].

Nykyään on käytetty apuna tietomallisovelluksia arvioitaessa purkujätteen määrää ja edelleen ympäristövaikutuksia [45, s.3].

Purkujätteen elinkaareen sisältyy neljä vaihetta. Ensimmäinen vaihe on purkuvaihe, toinen työmaalla tapahtuva käsittely eli lajittelu yleensä kolmeen jäteryhmään esim. yksi ryhmä sisältää terästä, alumiinia, muovia, puuta ja lasia nämä kuljetetaan niitä vastaaviin kierrätyslaitoksiin kolmannessa vaiheessa. Viimeinen vaihe on jätteen loppukäsittely. Esimerkiksi kivimateriaalien loppukäsittelyyn on kolme vaihtoehtoa. kierrättäminen työmaalla, kierrätyslaitoksissa tai kuljetus kaatopaikalle. Sekalainen jäte kuljetetaan usein kaatopaikalle [44, s.3156.]

Hyvä kierrätysaste johtaa yleensä negatiivisen hiilidioksiditulokseen rakennuksen elinkaaren lopun toiminnoista johtuen kierrättämisestä saaduista hyödyistä [44, s.3162].

Elinkaaren lopussa on hyvä mahdollisuus vähentää negatiivisia ympäristövaikutuksia kierrättämällä jätettä, jolloin uusien materiaalien tarve vähenee ja kun otetaan huomioon kasvavan purkujätteen määrä vanhasta rakennuskannasta säästöt hiilidioksidipäästöissä voivat olla merkittäviä rakennusalalle. Jotta voidaan arvioida jätteen käsittelyn ympäristövaikutuksia ja valita vähähiilinen menetelmä pitää määrittää jätteen elinkaaren vaiheet. [44, s.3155.]

5.4 Loppusijoitus

Uusiokäyttö, kierrätys ja kaatopaikat ovat yleisimpiä tapoja loppu käsitellä jätettä. Näihin tapoihin liittyy jätteen keräystä, lajittelua, kuljetuksia, kierrätystä ja loppusijoitusta kaatopaikalle. Prosessi jätteentuotannosta loppukäsittelyyn voidaan määrittää purkujätteen elinkaareksi. [44, s.3155.]

Kierrätys ja uusiokäyttö ovat yleisimpiä tapoja rakennusjätteen hallinnassa. esim. betonisepelillä on 50 Teratonnin vuosittainen kysyntä. Purkujätteen kierrätysaste joissakin kehittyneissä maissa ylittää jopa 70%-95%. [45, s.1.]

Loppusijoitus tehdään usein materiaaleille, joita ei voi kierrättää kuten haitalliset materiaalit. Suurin osa haitallisesta jätteestä käsitellään ja loppusijoitetaan kaatopaikalle, usein ne myös poltetaan. [50, s.1.]

Toinen syy loppusijoitukseen kaatopaikalle voi olla myös, ettei jätteelle ole kohdetta ja sen varastointi pitkiä aikoja ei ole järkevää [51, s.24].

Loppusijoituksella kaatopaikalle on haitallisia vaikutuksia ympäristölle kuten ilman laadun huonontumista, maaperän saastumista, tulipalon riskin kasvamista, veden saastumista, hiilidioksidipäästöt ja näköhaitat [49, s.2].

Nämä haitat liittyvät fyysisistä, kemiallisista ja biologisista reaktioista, jota jäte kokee kaatopaikalla. Kasviuonekaasuja voi syntyä kaatopaikalla esim. puurakennusjätteen hajoamisesta, jolloin vapautuu pääasiassa metaania ja hiilidioksidia. [52, s.446.]

Nykyiset kestävän kehityksen mittarijärjestelmät arvioivat liian vähän rakennuksen suoriutumista ja epäonnistuvat käsittelemään kokonaisuutta ja vaihteluja ajan kuluessa. Rakennukset ovat suhteellisen pitkäikäisiä, sisältävät monimutkaisia rakenteita, suuren määrän erilaisia materiaaleja ja on monia elinkaariarviointityökalua tämä johtaa elinkaaren arvioinnin kehityksen pullonkauloihin. Kun tarkoitus on rakentaa ympäristön kannalta kestäviä rakennuksia, olisi tärkeää arvioida kehdosta haetaan ympäristövaikutuksia. Epävarmuusanalyysien puuttuminen on suuri haaste rakennuksen elinkaaren arvioinnille. Ilman niitä tulokset voivat olla epäluotettavia ja niiden uskottavuus kärsii. Epävarmuusanalyysejä on tehty mm. materiaaleille, mutta niiden menetelmien ja vaikutuksien selvitys puuttuvat. Myös elinkaariarviomenetelmiin sisältyy epävarmuuksia, joita varten ollaan tehty epävarmuusanalyysejä rajallisesti. [46, s.1-3, s.11.]

Monen alueen kaupungistumisen takia on tärkeää kiinnittää huomiota rakennusten elinkaaren lopun toimintoihin ja tulevaisuuden ympäristöhaittojen vähennyksiin. Ennen purkujätteen käsittelymenetelmien kehittämistä täytyy ymmärtää jätteen koostumus, määrä ja sen virrat. Näitä tietoja tulisi kerätä olemassa olevasta rakennuskannasta eri menetelmin kuten esim. maatieteellistä dataa hyödyntäen. [47, s.54-55.]

Epävarmuuteen liittyy myös elinkaaren lopun skenaarioita, joissa ennustetaan materiaaleille ja rakennuksen osille/elementeille purkamisprosessi, jätteen käsittely, kuljetukset ja matka jätteenkäsittelylaitoksille. Nämä skenaariot tapahtuvat tulevaisuudessa elinkaaren lopulla ja ovat siksi epävarmoja ja vaikuttavat vaihtelevasti hiilijalanjälkeen. [47, s.56.]

Jokainen rakennus on erilainen iältään, materiaaleiltaan, mitoiltaan, olinpaikaltaan lisäksi jätteenkäsittelymahdollisuudet ja näin ympäristövaikutukset riippuvat purkamistyylistä. Näiden asioiden takia on mahdotonta luoda yleisiä sääntöjä, jotka sopisivat joka rakennusskenaarioihin. [48, s1.]

Materiaalien taitavalla valinalla on mahdollisuus vaikuttaa elinkaaren aikaiseen hiilijalanjälkeen. Toinen tapa vaikuttaa ympäristöön suhteessa materiaaleihin on lisätä eloperäisiä materiaaleja tai muita materiaaleja, jotka sitovat päästöjä. Suurimmat hyödyt hiilivarastoista rakennuksessa löytyy kantavista rakenteista ja lämmöneristeistä. Eloperäisten materiaalien lisäksi betonissa oleva sementti sitoo itseensä hitaasti ajan saatossa hiilidioksidia ilmasta. Sitoutuminen perustuu karbonatisoitumisreaktioon. [1, s.124.]

Karbonatisoituminen on kuitenkin epäedullinen, koska se johtaa betonin emäksisyyden menetykseen. Emäksisyys suojaa raudotteita korroosiolta, joten karbonatisoituminen pienentää teräsbetonin käyttöikä. Kun betoninen rakenne puretaan betonin karbonatisoituminen nopeutuu, koska reaktiolle löytyy enemmän pinta-alaa näin sementin avulla syntyy kemiallisen reaktion kautta hiilinieluja rakennuksen elinkaaren jälkeen. [1, s.124.]

Vähähiilistä rakennusta tavoiteltaessa on suunnittelun kannalta tärkeää miettiä ei vain mitä yksittäistä materiaalia käytetään vaan pitää harkita miten materiaalit toimivat yhdessä, jotta rakennukselle saataisiin mahdollisimman pitkä käyttöikä, helppo huolto, purku ja kierrätys. Esimerkiksi materiaalin käyttö, joka on hiilijalanjäljeltään suuri painoa kohti, mutta jonka ominaisuudet parantavat merkittävästi rakenteen käyttökelpoisuutta. [1, s.124.]

6 Rakennetekniset keinot laskea hiilijalanjälkeä ja pullonkaulat

Tietokanta on luotu rakennusprojekteista johtavien rakennesuunnittelu yhtiöiden yhteistyönä. Tulokset näyttävät, että tyypillisen rakennuksen valmistamisesta syntyy 200-550 kgCO₂-ekvivalenttia/m². Yleensä nämä arvot vaihtelevat huomattavasti riippuen rakennuksen koosta, korkeudesta, rakennejärjestelmästä, jne. Viitatussa tutkimuksessa on huomattu, että uudenlainen lähestymistapa suunnittelussa voi johtaa jopa rakennuksiin, joiden upotetut päästöt saattavat olla luokkaa 30 kgCO₂-ekvivalenttia/m². Tämä on huomattavasti vähemmän kuin tavallisissa tämän päivän rakennuksissa. Tutkimuksessa keskityttiin kahden upotetun hiilen suunnittelun vähentämistekniikkaan vähähiilisten materiaalien valintaan ja materiaalitehokkuuteen. [58, s.5.]

Innovatiivinen rakennesuunnittelu on ratkaisevan tärkeä rakentamisen ilmastonmuutoksen vaikutuksien torjumiseksi materiaalitehokkuuden ja elinkaariajatteluun pohjautuvan suunnittelun kautta. Vuonna 2040 kolme neljästä ihmisestä asuu kaupunkialueella. Tällä hetkellä noin joka toinen asuu kaupunkialueella. 2030 kolme miljardia ihmistä tarvitsee uuden kodin. Tulevaisuuden haaste rakennesuunnittelijoille on luoda rakennuksia, jotka täyttävät asumisen tarpeet vähentäen kasvihuonekaasupäästöjä. [58, s.17.]

Uudet innovaatiot ovat auttaneet vähentämään rakennuksen käytön hiilijalanjälkeä. Tiedon puute kuitenkin vaikeuttaa upotettujen päästöjen vähentämistä

johtuen loppuista elinkaaren vaiheista kuten raaka-aineiden hankinnasta, kuljetuksista työmaille, rakentamisesta, huollosta ja purusta. Käytön hiilijalanjälkeä voidaan vähentää energiatehokkuudella ajan kuluessa toisin kuin upotettua hiilijalanjälkeä, jota ei voida vähentää samalla tavalla. Upotetut hiilidioksidipäästöt tapahtuvat nykyisyydessä ja vaikutukset ovat palautumattomia. [58, s.17.]

Arkkitehtuurin, rakenneteknillisen ja ympäristötekniillisen insinööritaidon yhdistäminen on suuri haaste rakennusten suunnittelulle. [58, s.18.]

6.1 Päätöksenteko

Yleisesti vihreillä rakennuksilla on alhaisemmat päästöt, mutta korkeammat alkupään kustannukset verrattuna tavallisiin rakennuksiin. Tästä syystä vihreitä rakennuksia rakennetaan yleensä vähemmän, joten rakennuksen CO₂ päästöjä pitäisi tutkia samalla taloudellisten kustannuksien kautta. Monet tutkimukset ovat yrittäneet löytää optimaalisen suunnitteluratkaisun ottaen huomioon taloudelliset vaikutukset ja ympäristövaikutukset. Nämä tutkimukset ovat esittäneet päätöksentekoon tapoja, joilla voidaan integroida kulut ja hiilidioksidipäästöt. Jotkin näistä tutkimuksista toivovat määrittävänsä vaihtoehdoisen suunnitteluratkaisujen tärkeysjärjestyksen käyttäen eko-tehokkuusmenetelmiä päätöksenteossa, jotta voidaan määrittää optimaalinen tuotteen suunnitteluratkaisu. Ekotehokkuus mittaa kestävyyttä huomioiden taloudelliset ja ympäristönäkökulmat samaan aikaan. Toinen tapa on CO₂-päästöjen muuntaminen rahalliseksi arvoksi ja arvioida sen avulla optimaalinen ratkaisu. Kumpi menetelmästä on järkevämpi, kiistellään. [56, s.186.]

Kun näitä menetelmiä käytetään päätöksenteossa, on hyvä huomioida niiden erot ja ominaisuudet sekä se, että niiden tulokset voivat vaihdella. Näitä menetelmiä voidaan käyttää erilaisten rakenneratkaisujen vertailuun samalla kustannuksien ja ympäristövaikutuksien näkökulmasta. [56, s.187.]

6.2 Materiaalitehokkuus

Materiaalitehokkuudella on nouseva tärkeys energiatehokkuuden kasvamisen ja vähäpäästöisen energian lisääntymisen takia. Materiaalitehokkuuteen liittyvä vähähiilisyys tapahtuu kahden reitin kautta, jotka ovat materiaalin tarpeen vähentäminen ja vähähiilisten materiaalien käyttö. Rakentamisessa näitä keinoja on tarkasteltava materiaalin toiminallisten, taloudellisten ja teknisten ominaisuuksien kautta. Nämä ominaisuudet on hyvä tutkia ainakin rakenteiden ja rakennusosien tasolla. Materiaalitehokkuus voi vaikuttaa edullisesti tai haitallisesti energiatehokkuuteen suunnittelussa. Esimerkiksi paras muotokerroin rakennuksessa auttaa molemmista näkökulmista edullisen ratkaisun. Epäedullisia yhtymäkohtia voi olla paksujen eristekerroksien ja rakenteiden käyttö. Nämä eivät ole ainoastaan materiaalin kulutuksen kannalta edullisia ratkaisuja. Jos rakenteeseen tarvittavan materiaalin valmistus, huolto ja kierrätys aiheuttavat vähemmän päästöjä kuin siitä saatu energiatehokkuus säästää päästöjä on rakenne hyödyllinen. [1, s.122.]

Rakenneteknisessä suunnittelussa nähdään rakenteiden turvallisuus syrjäyttävänä tekijänä ja materiaalitehokkuus usein vain jälkiajatuksena. Materiaalitehokkuus on tärkeä tapa, jolla voidaan välttää maailman hiilibudjetin ylitys. Kun käytön hiilineutraalisuus saavutetaan, paino siirtyy muihin rakennuksen elinkaaren vaiheisiin, joten tuotteisiin liittyviin päästöihin olisi hyvä keskittyä tulevaisuudessa. Suurin osa näistä päästöistä liittyy sementin, raudoitustankojen, teräspalkkien valmistukseen noin puolet tuotannon päästöistä syntyy näistä. [57, s.343.]

Suunnitteluprosessi on yleensä rajoittunut taloudellisten huomion takia ja niin sanottu tehokkain ratkaisu rakennesuunnittelijalle on usein halvin ratkaisu. Suunnitteluprosessin pitäisi siis sisältää vaihtokaupan harkintaa kustannusten ja tuotteiden hiilijalanjäljen kanssa. Alkuvaiheessa tehdyt päätökset arkkitehdin tai rakennesuunnittelijan toimesta voivat johtaa hyvin erilaisiin suunnitteluratkaisujen tehokkuuksiin. Rakennusmateriaalit vastaavat kuitenkin huomattavaa osaa rungon kustannuksista, joten raskaammat rakenteet ovat kalliimpia ja tekevät

silloin materiaalitehokkuudesta taloudellisesti houkuttelevaa osassa tapauksista. [57, s.343.]

Jos halutaan saavuttaa kevyt rakenneratkaisu pitää ymmärtää avaintekijät, jotka ajavat tuotteisiin sisällytettyä hiiltä. Rungoissa tasot, pilarit ja perustukset edustavat suurinta osaa käytetystä materiaalista. Rungon tehokkuutta voidaan mitata kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa on tarkastella rakenteiden käyttöasteita. Toinen tapa vertailee ratkaisun kokonaisuutta kaikkiin mahdollisiin koko rakennuksen vaihtoehtojen toteutumisiin. On periaatteessa mahdollista tietää nämä vaihtoehdot, koska rakennesuunnittelu on hyvin säänneltyä ja on normit, jotka kuvaavat tehokkaasti kaikki askeleet, joita tarvitaan raudoitteiden määrän ja niiden sijainnin, poikkileikkauksien kokojen, pilarien ja palkkien, jäykistysten ja perustuksien suunnitteluun. [57, s.343-344.]

Jotta voidaan luoda kaikki mahdolliset rakennuksen toteutumiset kaikki valintojen yhdistelmät tasoratkaisuista, materiaaleista, detaljeista ja pohjapiirustuksista, jotka täyttävät asiakkaan, rakennesuunnittelijan tai arkkitehdin laatuvaatimukset pitää harkita. Laatuvaatimuksia ovat mm. kerroksien vaadittu määrä ja arkkitehtoniset piirteet. Vaikka voidaan rakentaa loputon määrä rakennuksia, jotka vastaavat näitä vaatimuksia kuitenkin taloudelliset- ja päästötekijät rajaavat ratkaisujen aluetta. Parhaan rakennuksen tehokkuuden löytäminen tämän alueen rajoissa ja sen vertaaminen todelliseen ratkaisuun on yhtäläinen koko rakennuksen käyttöasteeseen. [57, s.344.]

Ongelma asetelma-avaruuden luomisesta eli kaikki mahdolliset yhdistelmät rakennusten kustannuksista ja hiilijalanjäljestä ei ole viitatun lähteen mukaan ratkaistu. Osittaisratkaisuja on kuitenkin esitetty. Esimerkiksi yhdessä tutkimuksessa esitetään ratkaisu varhaisen rungon kustannusten arviointiin käyttäen varsin yksityiskohtaista tietoa pohjapiirustuksesta. [57, s.344.]

6.3 Energiatehokkuuden parantaminen

Rakennuksessa olevat rakenteet vaikuttavat olennaisesti rakennuksen energiatehokkuuteen. Ulkovaippa ja sen osat täytyy suunnitella läpikotaisin ajatellen niiden suoriutumiskykyä kaikissa mahdollisissa säätiloissa, millä tavalla ne tuuletuvat ja miten liitokset tehdään niin, että rakennus säilyttää tiiveytensä. Suomen kohdalla talvet ovat kylmiä ja kesät kuumia tästä syystä lämmöneristys pitää ajaa läpi kunnollisesti, mutta myös niin, että kesällä rakennus saadaan viilentyämään käyttömukavuuden ylläpitämiseksi. Suomessa ilmasto on hyvin vaihtelevaa ja siksi on haastavaa löytää ratkaisu, joka toimisi joka olosuhteessa optimaalisesti. [71, s.19.]

Rakennusten energiatehokkuuteen vaikuttavat käytetyt rakenteet ja materiaalit, josta ne koostuvat. Energiatehokkaat rakenteet vähentävät lämmöntarvetta valittujen rakenteiden kautta. Rakenteellinen energiatehokkuus on pysyvä siihen ei voi vaikuttaa käyttäjä eikä käyttö, lisäksi sitä ei voi säätää. Tästä syystä rakenteita kannattaa harkita perusteellisesti, koska muutokset myöhemmin ovat haastavia ja kustannuksiltaan korkeita. [72, s.13.]

Jos halutaan vähentää rakennuksen lämmitysenergian tarvetta, on tärkeää olla hyvä vaipan lämmöneristys ja ilmanpitävyys. Rakenteilla kuten liitosten tiivistyksillä, rakenteiden nurkka- ja saumakohtien ratkaisuilla voidaan vaikuttaa huomattavasti energiatehokkuuteen estämällä lämpövuotoja. [72, s.13.]

Rakenteiden tiiveys on tärkein osa rakennusta, kun käsitellään rakennuksen energiatehokkuutta. Tavoite ilman siirtymiselle on tulla rakenteista sisälle päin eikä sisältä ulos. Tilanteessa, jossa lämmin ja kosteuspitoinen sisäilma siirtyy rakenteiden läpi siitä, kondensoituu vettä rakenteiden sisälle. Edellä mainittu tilanne luo olosuhteet rakenteisiin syntyvään homeeseen ja lahoon, jolloin rakennuksen hyvinvointi vaarantuu. [71, s.19.]

Tiiveyttä kuvataan yleisesti ilmavuotoluvulla. Pieni ilmavuotoluku tarkoittaa, että rakennuksessa on vähemmän ilmavuotoja. Nykyisten määräyksien asettama

vähimmäisvaatimus ei riitä hyvin energiatehokkaaseen rakentamiseen. [71, s.19.]

Eristeiden käyttö on kasvanut ajan saatossa ja tulee kasvamaan, kun noudatetaan määräyksiä ja pyritään parempaan energiatehokkuuteen, seinistä tulee huomattavasti paksumpia. Eristeiden paksuuden kasvattamisen mukana syntyy kasvava riski ilmapuodoille, joten tästä syystä tiivistyksen tärkeys nousee merkittäväksi. Paksut eristerrokset aiheuttavat ulkokuoreen lämmön alenemisen tästä syystä voi seurata ongelmia rakenteille jopa heikosta vuodosta. Ulkokuoren alentuneet lämpötilat syntyvät siitä, että paksu eriste ei päästä ilmaa lämmitämään seinän ulommaista osaa. [71, s.19-20.]

Tiiveys tekee rakennuksen energiatehokkaaksi, kun se ei päästä lämmintä ilmaa pois mahdollisista vuotokohdista ja alentaa lämmityksen tarpeen tunnetta, kun rakennuksessa ei tunneta vetoa. Hyvän ilman ja höyrynsulkumuovin käytön avulla estetään kondensoituminen rakenteen sisälle. [71, s.20.]

Ilmanvuotokohdat löytyvät usein liitoksista tai suurten pintojen epäjatkuuskohdista. Tiiveyden voi saavuttaa tarkalla suunnittelutyöllä ja taidokkaalla sekä tarkalla rakennustyöllä. [72, s.14-15.]

Kaikkien rakennukseen kohdistuvien energiasyöttöjen arviointi sen elinkaaren aikana toiselta nimeltään elinkaaren energia analyysi on ensimmäinen askel energiatehokkaan rakennuksen saavuttamiseen. Rakennuksen elinkaaren energia analyysi (LCEA) kattaa kolme vaihetta rakennusvaiheen ja tuotevaiheen, jotka käsittelevät mukaan laskettua energiaa, joka on sidoksissa rakennukseen ja syntyy esim. materiaalien valmistuksesta, kuljetuksista tai rakentamisesta jne., käyttövaiheen energiankäyttöä, joka syntyy kaikesta käyttöön liittyvistä asioista rakennuksessa kuten lämmityksestä, jäädytyksestä tai kodinkoneiden käytöstä ja elinkaaren lopun energiankäyttöä, joka syntyy esim. purkamisesta, mutta elinkaaren lopussa voi tulla myös energiasäästöjä kierrätyksen ja uudelleenkäytön kautta. Suurin osa energiasta kuluu käyttövaiheessa. Tästä syystä käytön energiankulutus on tärkein näkökulma energiatehokkaiden rakennusten

suunnittelussa ja sitä seuraa mukaan laskettu energia rakennukseen rakennuksen valmistuksesta, josta suurin osa tulee materiaaleista. [70, s.1.]

Käytön energiaan liittyvät suunnittelustrategiat voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin rakennuksen energiatrategioihin. Parannukset lämmityksessä, ilmanvaihdossa, ilmastoinnissa, valaistuksessa ja muut mekaaniset ja sähköiset järjestelmät voidaan mukaan lukea aktiivisiksi strategioiksi. Parannukset rakennuksen ulkokuoren osiin voidaan luokitella passiivisiksi strategioiksi. Yksi passiivinen strategia, jota mainitaan usein, on lämpöä varaavat osat rakennuksen ulkokuorella. Lämpöä varaavilla osilla voi olla huomattava vaikutus vaikkei aina positiivinen sisätilan lämpötiloihin, energian tarpeeseen ja käyttömukavuuteen. Toisaalta varaavan materiaalin lisääminen ulkokuoreen voi nostaa mukaan lasketun energian määrää eli on tärkeää arvioida, kompensoiko käyttöenergian lasku mukaan lasketun energian kasvun. Lisäksi positiivisiin käyttövaiheen vaikutuksiin, jotka syntyvät osan termisestä massasta vaikuttaa osan lämmönsiirto- ja -varausominaisuudet. Jää kysymys mihin pisteeseen asti ja missä olosuhteissa lämmön siirtymistä voidaan vähentää tehokkaammin lisäämällä eristemateriaalia termisen massan lisäämisen sijaan. [70, s.1-2.]

Vaikka tietoisuus on kasvanut energiatehokkuuden parantamisen tärkeydestä suunnittelijoiden kesken, on kuitenkin menetelmien vähäisyyttä, jotka tukevat LCEA-suunnittelua suunnittelun varhaisessa vaiheessa. Tämä on harmillista, koska usein vaikuttavimmat päätökset tehdään projektin alkuvaiheessa ja oikea menetelmä voisi johtaa huomattaviin energiatehokkuuden parannuksiin. Viitattu lähde kehittää tätä menetelmää, joka ottaa huomioon suunnitteluratkaisujen vaikutuksen rakennuksen energiankulutukseen ja rakenteelliseen suorituskykyyn suunnittelun alkuvaiheessa. Menetelmä ottaa huomioon yhtäaikaisesti rakennuksen rakenteen vaikutuksen mukaan laskettuun energiaan ja käytön energiaan LCEA:n kautta yhtäaikaisesti. Menetelmän toimivuutta tutkittiin tyypillisen toimistorakennuksen malliesimerkin kautta. [70, s.2.]

Alkuvaiheen energiatehokkuuden suunnitteluun työkalujen tai mallien avulla on tehty joitakin tutkimuksia. Nämä työkalut perustuvat parametriseen analyysiin

rakennuksen suunnitteluratkaisuista. Rakennuksen energiankulutukseen elinkaaren aikana vaikuttaa erilaiset suunnitteluparametrit liittyen mukaan laskettuun energiaan ja käyttövaiheeseen. Arvio odotetusta energiankulutuksesta käyttäen simulaatioita tai analyyttisiä työkaluja voidaan hankkia antamalla eri arvoja noille parametreille. Monipuolisten parametrien vaikutusten läpikäynti energiankulutukseen voi antaa kuvaa näiden parametrien suhteellisesta vaikutuksesta. [70, s.2.]

Granadeiro et al. esitti menetelmän, joka tukee alkuvaiheen päätöksentekoa liittyen rakennuksen ulkokuoreen tuottamalla vaihtoehtoisia ulkokuoren muodon ratkaisuja parametrisellä suunnittelujärjestelmällä ja laskemalla jokaisen vaihtoehdon energiankulutuksen simulaatio pohjaisesti. Picco et al. sovelsi energiaanalyysia suunnittelun varhaisessa vaiheessa suurissa kaupallisissa rakennuksissa. Heidän menetelmänsä tunnistaa kaikkein vaikuttavimmat rakennuksen parametrit yksinkertaistamalla ratkaisua takautuvasti ja etenevästi säilyttäen hyväksyttävän tarkkuuden tason energiaanalyysissä. Elbeltagi et al. ehdotti ratkaisua parametriseen energiaanalyysin tulosten visualisointiin suunnittelun alkuvaiheessa keskittyen rakennuksen ulkokuoreen ja suuntautumiseen egyptiläisessä yhteydessä. Samoin Cicelsky ja Meir suorittivat parametriseen analyysin ympäristöystävällisistä strategioista rakennusten ulkokuorille nimenomaisesti kuumille kuiville alueille vertaillen ulkokuoren termisen massan, eristävyden ja varjostuksen, jne. suhteellista tärkeyttä. Lisäksi eri ratkaisujen alkuvaiheen suunnittelun epävarmuuksiin Rezaei et al. ehdottivat epävarmuuden hallintaan todennäköisyysfunktioiden käyttöä jokaiselle materiaalille mallissa. [70, s.2.]

Vaikka yllä olevat tutkimukset ovat osoittaneet, että energiaanalyysiä voi tukea antamalla erilaisia arvoja tärkeille suunnittelu parametreille kysymys kuuluu, mitkä parametrit pitäisi valita tällaiseen analyysiin ja mitä arvoja niille annetaan, kun käsitellään rakennuksen suunnittelun alkuvaiheen rakenteiden ratkaisuja. Osa tutkimuksista ratkaisee tämän ongelman analysoimalla ja vertaamalla tiettyjen vaihtoehtoisten suunnitteluratkaisujen tehokkuutta. Esimerkiksi Goggins et al. vertasivat kahden betonilaadun sisään laskettua energiaa tai Ji et al. vertasi yhdeksää eri vaihtoehtoa rakennuksen rakenteelliseen ratkaisuun

tunnistaakseen vaihtoehdon, jolla oli pienin sisään laskettu energia ja hinta oletuksella, että ratkaisu ei vaikuta käytön energiaan. Edellä mainitut tutkimukset käsittelevät joko sisään lasketun energian tai käytön energian suunnitteluratkaisuja, mutta eivät näitä kahta yhdessä. On siis tarvetta menetelmille, jotka edustavat yhtenäisempää ratkaisua ja käsittelevät elinkaaren kaikkia vaiheita yhdessä. Muutama tutkimus on käsitellyt tätä tarvetta, mutta ne ovat käyttäneet lineaarista menetelmää, joka tukee käyttövaiheen analyysiä kahdesta vaihtoehdosta ensimmäisessä vaiheessa, käsittelevät mukaan laskettua energiaa toisessa vaiheessa ja tukee rakenteellisen suorituskyvyn arviointia kolmannessa vaiheessa. [70, s.3.]

Tutkimukset eivät kuitenkaan ole vastanneet tärkeimpään kysymykseen siihen mikä on optimaalisin ratkaisu kaikista mahdollisista ratkaisuista sen sijaan, että valitaan satunnaisesti muutama vaihtoehto, joista mikään ei ole välttämättä optimaalisin. Tähän kysymykseen voidaan vastata ainoastaan, jos arvojen vaihteluväliä analysoidaan jokaiselle kriittiselle suunnittelumuuttujalle sen sijaan, että valitaan etukäteen tietyt arvot, jotka eivät saata johtaa optimaalisimpaan ratkaisuun. Tällaista analyysiä voidaan tukea käyttämällä optimointi työkaluilla. Kun tavoite on käsitellä monia eri tavoitteita samanaikaisesti esim. mukaan laskettu energia ja käytön energia voidaan hyödyntää monitavoitteisia optimointi menetelmiä. Monitavoitteinen optimointi on yleinen lähestymistapa yhteensovittamisen ongelmiin rakennuksen suunnittelussa, koska on usein ristiriitaisia tavoitteita, jotka estävät yhden ratkaisun tunnistamisen, joka on yhtäaikaaisesti optimaalisin kaikille tavoitteille. Useita ratkaisuja voidaan sen sijaan tunnistaa, jotka ovat kaikki Pareto-optimaalisia ja täten muodostavat Pareto-rintaman. [70, s.3.]

Useat aikaisemmat tutkimukset ovat käyttäneet monitavoitteista optimointia tukeakseen energiatehokkaiden rakennuksien julkisivujen suunnittelua. Esimerkiksi Rapone ja Saro käyttivät monitavoitteista optimointia löytääkseen parhaan toimistorakennuksen julkisivu asetelman, joka tuottaa vähiten hiilidioksidipäästöjä ja samanaikaisesti takaa halutut sisätilan olosuhteet. Monitavoitteisen optimoinnin käyttö rakennuksen rakenteen optimointiin Brown ja Mueller tarjoavat hyvin ajankohtaisen metodologisen ennakkotapauksen nykyiselle

tutkimustyölle. He käyttivät monitavoitteista optimointi algoritmia varhaisessa suunnitteluvaiheessa tunnistaakseen Pareto-rintaman parhaiten toimivia ratkaisuja pitkän jännevälän rakenteen tyypeille. Tämä menetelmä voi siis käsitellä mukaan lasketun energian ja käytön energian tasapainoa ottaen huomioon rajoitteet liittyen rakenteelliseen suorituskykyyn rakennuksessa. [70, s.3.]

Shadram ja Mukkavaara soveltavat myös monitavoitteista optimointia analysoidakseen mukaan lasketun energian ja käytön energian kompromisseja suunnittelun varhaisessa vaiheessa, mutta jättävät ulos rakennetyypin analyysistä väittäen sen vaikuttavan vain huomattavasti sisään laskettuun energiaan ja ei käytön energiaan. Gan et al. kehittivät simulaatiopohjaisen lähestymistavan optimoidakseen rakennuksen ulkoasun ja rakenteen ratkaisut. He kuitenkin tekevät nämä erikseen mukaan lasketulle energialle ja käytön energialle lineaarisen prosessin kautta optimoiden rakennuksen ulkoasun ratkaisun ensin minimoidakseen käytön energian ja sitten rakenteen ratkaisun parantaakseen sisään laskettua energiaa. Braulio-Gonzalo ja Bovea arvioivat erilaisten eristemateriaalien ja niiden paksuuksien vaikutusta käytön energiasäästöihin yhdessä vertailevien laskelmien kanssa niiden ympäristö ja taloudellisista näkökulmista käyttäen LCA ja LCC -metodologiaa. [70, s.3.]

Tutkimukset toteavat, että termisen massan käytön hyödyntäminen käytön energian vähentämisessä toimii parhaiten lämpimissä ilmastoissa, mutta myös kylmissä jos eristettä on ulkokuoren ulkopuolella. Kuczyn'ski ja Staszczuk huomasivat, että termisen massan lisääminen talon rakenteessa vähensi sen jäädytysenergian tarvetta. [70, s.3.]

Viitattu lähde esitti metodologian, joka pystyy ottamaan huomioon samanaikaisesti sisään lasketun energian ja käytön energian mahdollistaen vaihtoehtojen suuren määrän analysoinnin suunnitteluprosessin alkuvaiheessa. Metodologian tärkeys on sen kyvyssä mahdollistaa rakennejärjestelmien ja komponenttien optimoinnin. Tämän optimoinnin ennusteet ovat monilukuisia kuten sisään lasketun energian ja käytön energian vähentäminen, lämpömukavuuden parantaminen ja paremman sopeutumisen mahdollistaminen eri ilmastoissa liittyen

ilmasto- ja rakentamiskäytäntöihin. Menetelmän käyttö voi johtaa positiivisiin vaikutuksiin mahdollistaen monen vaihtoehdon arvioinnin johtaen parhaan vaihtoehdon tunnistamiseen rakenteellisten rajoitteiden ja huomioiden, ympäristövaikutuksien ja käyttäjän hyvinvoinnin suhteen. Jotta esitetty menetelmä voidaan ottaa käyttöön laajasti, se tarvitsee helppoa toteuttamiskelpoisuutta. Rakenne- ja energiasuunnittelun integrointi yhdelle käyttöalustalle mahdollistaa erilaisten ominaisuuksien tarkastelun yhtäaikaisesti. Koodiskriptauksen käyttö osana alustaa tekee mahdolliseksi tarkastella useiden muutosten vaikutuksen rakenteen elementtien muutokseen välttämättä tavanomaisten ja aikaa syövän manuaalisen tavan käytön. Alusta voisi täten kannustaa suorituskyky-suuntaista suunnittelua lähestymistapaa ohjailevan ratkaisun sijaan. Tämä mahdollistaa tietyn rakennuksen suunnitteluratkaisun sopeuttamisen paikallisiin rajoitteisiin ja sen komponenttien optimointiin sen vastaisesti, että määritellään ennalta arvoja kuten termistä massaa, eristeitä ja ikkuna ja lattia suhdetta. [70, s.9.]

6.4 Vähähiiliset materiaalit

Rakenteet aiheuttavat päästöjä ennen kuin rakennus valmistuu. Suunnitteluvaiheessa näitä päästöjä on mahdollista ohjata vaivattomasti, koska rakenteen vaatiman toiminnallisen ja teknisen suorituskyvyn voi toteuttaa monella eri tavalla. Kerrostaloissa rakenteet, joiden vaikutus materiaalitehokkuuden kannalta on merkittävien ovat usein ulkoseinät, välipohjat ja väliseinät. Näiden rakenteiden toteutustapoja ja materiaaleja vertailemalla voidaan tehdä päätelmä vähähiilisestä ratkaisusta ja näin laskea hiilijalanjälkeä ja suurentaa rakenteiden hiilivaroja. Tämä ajatus perustuu siihen, että samaa toiminnallisuutta omaavat rakenteet voivat aiheuttaa eri hiilijalanjäljen. Erilaisia runkomateriaaleja, eristeitä yms. käyttämällä voidaan saavuttaa samat toiminnalliset tulokset kuten lämmöneristävyys tai paloluokka, mutta eri hiilijalanjälki. Rakenteiden vähähiilisyyden arvioinnissa voidaan käyttää jotakin toimivuusominaisuutta kuten lämmönläpäisyä. Lähtökohta on hyvä etenkin rakennusosissa, jotka määräävät suurimman osan rakennuksen hiilijalanjäljestä. Jos rakennuksen kantavaksi rakenteeksi on valittu vaikkapa massiivipuu voi rakenteen vähähiilisyyttä optimoida omaksumalla vähähiilisin vaihtoehto tuoteryhmästä toisaalta pitäen mielessä,

että tuotteella pitää olla vaaditut toiminnalliset ja tekniset vaatimukset. Vaikka lopputuote on sama voi valmistajien toiminnassa olla eroja, jotka vaikuttavat hiilijalanjälkeen. Ympäristöselosteet ovat hyödyllinen työkalu vertailla hiilijalanjälkeä samoja ominaisuuksia omaavien tuotteiden kesken. [1, s.122-123.]

Rakennussektorin tärkeä tavoite on tuottaa rakennuksia mahdollisimman vähin päästöin. Huomattava määrä energiaa kuluu rakennusten rakentamisesta. Tästä syystä on tärkeää harkita materiaaleja, joiden sisään laskettu energia on alhainen. Sisään laskettu hiilidioksidi tai energia ottaa huomioon kaikki tuotteen valmistukseen liittyvät prosessit, jotka kuluttavat energiaa tai aiheuttavat hiilidioksidipäästöjä kuten kaivostoiminta tai valmistusprosessit. Rakennusmateriaaleihin sisään laskettu energia on välillä 15-20% rakennuksen käytön kulutuksesta 50 vuoden aikavälillä. Rakennusteollisuus on yksi suurimmista materiaalien kuluttajista ja materiaalien kysyntä kasvaa jatkuvasti. Tavanomaisten materiaalien kulutuksen vähentäminen käyttämällä vaihtoehtoisia materiaaleja, menetelmiä ja tekniikoita voi vähentää huomattavasti energian kulutusta ja hiilidioksidipäästöjä. Energiaintensiivisten materiaalien kuten teräksen tai alumiinin käyttöä tulisi pitää minimissä. Monia eri materiaaleja käytetään muurattuihin rakenteisiin tai betonissa voidaan korvata runkoainetta esim. kierrätetyllä materiaalilla tai sementtiä esim. teollisuusjätteellä. On siis tärkeää etsiä vaihtoehtoja, joilla on pienempi sisään laskettu hiilidioksidi. [67, s.660-661.]

Betoni on maailman käytetyin materiaali. Betonin osien hankinnan helppous, kestävyys ja kustannustehokkuus ajavat betonin käyttöä. Betoni aiheuttaa huomattavan määrän hiilidioksidipäästöjä pääasiassa sementin valmistuksen kautta. Vaikka betoni aiheuttaa vähemmän päästöjä kuin muut materiaalit yksi tonni portland-sementtiä aiheuttaa saman verran hiilidioksidipäästöjä. Betonin käyttö on ollut kasvussa pitkään ja sen odotetaan kasvavan myös jatkossa kaupungistumisen myötä siksi ratkaisujen keksiminen, on erityisen tärkeää. [62, s.1-2.]

Tutkijat ovat esittäneet tapoja vähentää hiilidioksidipäästöjä klinkkerin korvaamisella betonissa ja valmistamalla sementtiä jätemateriaaleilla. Käyttämällä

kalsinoituneen saven ja täyteaineiden yhdistelmää ollaan saatu korvattua klinkkerin käyttöä, jota käytetään sementin ja edelleen betonin valmistuksessa. Monia sementin korvikkeita on tutkittu ja kokeiltu kuten betonia (GPC), jossa sementti on korvattu suurimmin osin tai kokonaan erilaisilla teollisuusjätteillä kuten kuonalla ja lentotuhkalla. Nämä kokeilut ovat olleet lupaavia ja ne voivat mahdollistaa nollahiilisen betonin valmistuksen tulevaisuudessa, kun tällainen betoni täyttää rakenteelliset ja muut vaatimukset. Lisätutkimuksia tarvitaan vielä ennen kuin voidaan valmistaa nollahiilistä betonia geopolymeeri tai muulla betoniteknologialla. [62, s.2.]

Muita yrityksiä vähentää sementin käyttöä on biojätteen kuten maissintähkien tai oliivijätteiden tuhkien käyttö tai masuunituhkan käyttö. Tietyillä käyttösuhteilla osalla korvaavilla materiaaleilla on huomattu olevan jopa positiivinen vaikutus lujuus- ja kestävyysominaisuuksiin toisaalta usein pienillä suhteilla 5-10%. Masuunituhkan käyttö lisäsi tilavuuspainoa ja huokoisuutta 28 päivän kohdalla, mutta huokoisuus laski sen jälkeen. Puristuslujuus parani ja samalla taivutuslujuus laski masuunituhkan lisäyksellä 90 ja 180 päivän kohdalla. Biomassatuhkan käyttö osoittautui lupaavaksi taivutus- ja puristuslujuuden osalta verrattuna tavalliseen betoniin. Esimerkiksi banaanilehtituhkan käyttö korvaamaan 10% sementtiä huomattiin betonin olevan kelvollista ja ominaisuudet hyväksyttäviä. Korvaavat aineet kuten riisinolki- ja puuvillavarsituhka voivat myös vaikuttaa betonin koostumukseen ja huokoisuuteen. Vehnän olkituhkan käyttöä on tutkittu lähiaikoina 8, 16 ja 24 prosentin suhteilla ja huomattu parantavan puristuslujuutta 180 päivän kohdalla, taivutuslujuutta 28 päivän kohdalla ja sulfaatinkestävyyttä. Lisäksi synteettisten kuitujen käyttö geopolymeeribetonissa on huomattu vahvistavan betonin lujuusominaisuuksia. [62, s.5-6.]

Nollahiilisen betonin käyttöä rakenteellisissa ratkaisuissa on tutkittu rajallisesti. Tällä hetkellä on suuri tarve lisätutkimukselle. Esimerkiksi kantavia nollahiilisiä betoniseiniä ei ole testattu tai käytetty rakennusprojekteja varten niiden tehokkuuden mukaan. Lasikuituvahvisteisia betoneja on käytetty julkisivuissa, kumimurusia ja muoveja sisältäviä betoneja ei ole testattu rakennuksissa. Myös esivalmisteiset nollahiiliset betoniosat tarvitsevat lisäselvitystä. Nollahiilinen betoni

ei ole vielä vakiintunut rakenteellisiin ratkaisuihin. Lisäksi sidoksien lujuuksia ja iskunkestävyyttä pitäisi selvittää. Analyysiä olisi hyvä myös tehdä nollahiilisen betonin ominaisuuksista liittyen esimerkiksi palonkestävyyteen, ajalliseen kestävyyteen tai muuttuvien kuormien vaikutuksiin. [62, s.9-15.]

Euroopan aggregaatti yhdistyksen mukaan vuonna 2018 rakennusalan vuosittainen aggregaattikysyntä oli 3×10^9 tonnia. Yli 84% tästä kaivettiin luonnon louhoksista tai sorakuopista. 45% kokonaismäärästä käytettiin erilaisiin betonituotteisiin. betonin ympäristöystävällisyyttä voitaisiin parantaa vähentämällä raaka-aineiden käyttöä ja hiilidioksidipäästöjä. Tämä tarkoittaa tosisijaisten materiaalien käyttöä rakentamisesta ja purkujätteestä joko kierrätettynä runkoaineena tai osina sementissä. [55, s.1-2.]

Karkeasta kierrätetystä aggregaatista on tehty monta tutkimusta, jotka keskittyvät arvioimaan sen ominaisuuksia ja mitä vaikutuksia sen korvaamisella verrattuna luonnonmateriaaleihin on betonin valmistuksessa. Tämä aggregaatti valmistetaan murskaamalla betonia. [55, s.2.]

Kierrätetyn aggregaatin mekaaniset ominaisuudet eritoten veto ja puristuslujuus riippuvat kierrätetyn aggregaatin sisällöstä, betonin valmistusprosesseista, kierrätetyn aggregaatin tyypistä esim. betoni tai kivimateriaali. Puristuslujuuteen ei vaikuta huomattavasti kierrätettyjen aggregaattien käyttö, kun käytetään 30% karkeaa ja 20% hienojakoista aggregaattia. Puristuslujuus laskee 10% tavallisesta betonista ja vetolujuus vielä huomattavasti vähemmän 5-15%, kun 50% karkeasta aggregaatista on korvattu. Sekalaiset ja kivipohjaiset kierrätetyt aggregaatit toimivat huomattavasti huonommin betonin runkoaineena. Kivipohjaisen betonin mekaaninen lujuus laskee 40%, kun 50% runkoaineesta oli karkeaa kivipohjaista aggregaattia ja sekalaisilla aggregaateilla 30%. Yleinen ymmärrys on, että lisäämällä sementtiä voidaan vähentää lujuuden menetystä, kun tehdään kierrätettyä betonia. Tämä ei ole ideaalia, koska kustannukset ja ympäristövaikutukset kasvavat sementin valmistuksesta. Tästä syystä joissain maissa on tehty säännöksiä rajoittamaan kierrätetyn aggregaatin käyttöä, jotta sementin käyttö ei kasva ja lujuusominaisuudet säilyvät. Eri lujuusluokilla on määritetty

suurimmat luonnonaggregaatin korvausasteet. Jotkin maat sallivat luonnonaggregaattien korvaamisen kokonaan, mutta usein rajoittaen ne tiettyyn lujuusluokkaan asti. Viidellä maalla on tällä hetkellä säännöksiä miten paljon korkealaatuisella betoniaggregaatilla saa korvata luonnonaggregaattia ja mihin lujuusluokkiin asti. [55, s.2.]

Karkeasti sanottuna monet maat rajoittavat kierrätetyn aggregaatin roolin karkean runkoaineen korvaamiseen 20-30% suhteella. Hienojakoisen runkoaineen korvaukseen kierrätetyillä aggregaateilla tarvitaan tällä hetkellä lisää tutkimusta ja sitä tarvitaan, koska huomattava osa kierrätetystä betoniaggregaatista on hienojakoista. Tutkimusten mukaan, kun korvataan hienojakoista aggregaattia hienojakoisella betoniaggregaatilla lujuus voi kasvaa, pysyä samana tai laskea verrattuna tavalliseen betoneilla. [55, s.2.]

Hienojakoisia sekalaisia aggregaatteja on tutkittu vielä vähemmän. Yhden tutkimuksen mukaan betonin puristuslujuus ei laske huomattavasti hienojakoisten sekalaisen aggregaattien käytöstä 50% korvausasteeseen saakka. Toinen tutkimus saavutti 7% lujuuden laskun 10% korvausasteella ja 45% lujuuden laskun 100% korvausasteella. [55, s.2.]

Sim ja Park arvioivat kierrätetyn betonin ominaisuuksia. He tutkivat betonia jossa oli 100% karkeasta ja 30-100% hienojakoisesta runkoaineesta kierrätettyä betoni aggregaattia. Betoni, jossa alle 60% hienojakoisesta runkoaineesta oli korvattu, sai enintään 14% puristuslujuuden laskun verrattuna normaaliin betoniin. Berredjem korvasi molemmat osuudet runkoaineesta ja sai 28 päivän jälkeen puristuslujuudeksi 25 MPa 11% vähemmän kuin ei kierrätetyllä betonilla. Myös tiettyjen raekokojen vaikutusta lujuuteen on tutkittu. [55, s.3.]

Hossain arvioi, että runkoaine, joka valmistetaan jokihiekasta aiheuttaa 23 kg CO_{2eq} päästöjä tonnia kohti ja murskatusta kivistä 33 kg CO_{2eq} tonnia kohti. Kierrätetty hienojakoinen runkoaine aiheuttaa 12 kg CO_{2eq} tonnia kohti ja karkea 11kg CO_{2eq}. Alle 45 MPa nimellislujuuden omaaville betoneille kierrätetyn runkoaineen käyttö ei aiheuta mekaanisen vahvuuden tai kestävyuden laskua.

Kierrätetty runkoaine voi laskea betonin valmistuksen hiilidioksidipäästöjä 5,84-14,3%. [55, s.4.]

Tutkimuksen loppupäätelmissä kerrottiin, miten kierrätetyn betonin 28 päivän puristuslujuus ja taivutuslujuus oli heikompi kierrätetyssä betonissa kuin tavallisessa betonissa. Vetolujuus vähenee, kun käytetään hienojakoista runkoainetta ja kasvaa karkean runkoaineen käytöstä. Kierrätetyn betonin käyttö sopii parhaiten 30 MPa nimellispuristuslujuuden omaaville betoneille. Vetolujuuden ja taivutuslujuuden laskennalle 28 päivän puristuslujuuden kautta vaaditaan matemaattisille malleille muutoksia. Muuten eko-betoni huomattiin olevan eko-tehokas, joka tarkoittaa lujuusominaisuuksien suhdetta hiilidioksidipäästöihin. [55, s.17.]

Energia intensiivisten teollisuusalueiden hiilijalanjälkeen voidaan vaikuttaa materiaalin käytön vähentämisellä tai kierrätyksellä/uusiokäytöllä, tekemällä muutoksia olemassa oleviin prosesseihin tai käyttämällä olemassa olevia prosesseja yhdessä hiilidioksidin talteenotolla tai käyttämällä vaihtoehtoista lämmönlähdettä. [64, s.1-2.]

Tällä hetkellä teräksen potentiaalisia vähähiilisiä tuotantoprosesseja ovat masuunin käyttö yhdessä hiilen talteenotolla ja varastoinnilla, vetypelkistetty teräs ja rautamalmin suora elektrolyysi. Biomassa on myös päästöjä vähentävä vaihtoehtoinen polttoaine masuuniprosessissa. On osoitettu, että hyödyntämällä hiilen talteenottoa biopolttoaineen kanssa voidaan saavuttaa puolet EU:n päästötavoitteista tai 20% pelkästään biomassalla. [64, s.2.]

EU:n asettamaan 80% päästöjen vähentämiseen rauta ja teräsalalle voidaan saksalaisen tutkimuksen mukaan saavuttaa vain ottamalla käyttöön vaihtoehtoisia teknologioita kuten vetypelkistetty teräs ja rautamalmin suora elektrolyysi yhdessä vahvan ilmastolinjauksen ja materiaalin tehokkaan käytön kautta. Toinen tutkimus vahvistaa näitä näkemyksiä. Vaikka tutkimuksilla on erilainen aikaperspektiivi ne ovat samaa mieltä siitä, että tarvitaan lyhytaikaisia ratkaisuja ja

myöhemmin laajempia uudistuksia valmistusprosesseihin, jotta saadaan teräksen tuotannon hiilijalanjälki lähelle nollaa. [64, s.2.]

6.5 Helposti purettava ja uudelleenrakennettava rakennus sekä muuntaminen

Rakennuksen käyttöikä on oleellinen siinä mielessä, että kun rakennus kestää mahdollisimman pitkään niin ei tarvitse rakentaa samaa käyttötarkoitusta omaavaa rakennusta eikä näin täydy kertaamaan rakennuksen elinkaarta käyttöönottoon asti. Tähän tulokseen päädytään käyttöikäsuunnittelulla, joka määrittää tuotteiden valinnan olosuhteiden mukaan, ohjeistuksen ja kunnossapidon. Käyttöikäsuunnittelulla haetaan sitä, että käyttöikä on pitempi kuin suunniteltu ikä. [1, s.132.]

Käyttöikä vaikuttaa suuresti rakennuksen hiilijalanjälkeen ja se voidaan ottaa mukaan suunnittelussa laskennallisesti. Suunniteltu 100-vuotias rakennus omaa todennäköisesti pienemmän vuosikohtaisen hiilijalanjäljen kuin 50-vuotias rakennus. Tämä pätee siitä huolimatta, että suuri osa rakennustuotteista vaihdettaisiin sadan vuoden aikana, koska rakennuksessa säilyy pitkäikäiset rakenteet kuten perustukset ja runko eli nämä saavat pidentettyä käyttöä ja edustavat rakennuksen massasta mittavan osan. Pidemmällä käyttöiällä voidaan myös säästää tulevaisuuden hyödyt hiilijalanjälkeen liittyen energiantuotantoon, josta tulee vähähiilisempää tämän voi ottaa huomioon arvioidessa päästöjä. [1, s.132.]

Käyttöikäsuunnittelua otetaan toisinaan vähän mukaan suunnitteluun, koska sen merkittävyys on vallitseva eli se voi rajoittaa ratkaisujen vaihtoehtoja ja koska rakennuksen tulevan iän määrittäminen on hankalaa. Käyttöikäsuunnittelu on varmasti tärkeä suunnitteluala hiilijalanjäljen kannalta ja se auttaa korkean iän saavuttamisessa rakennukselle. [1, s.133.]

Tuotteen käyttöikään vaikuttaa toiseksi eniten suunnittelu rakennusosan laadun jälkeen [1, s.133].

”Käyttöikäsuunnittelun ja -arvioinnin laskennallisia menetelmiä on tarjolla vain säärasitukselle altistuville tuotteille ja kantaville rakenteille.” [1, s.134.]

Isosta osaa rakennustuotteista ei tiedetä tutkittua vauriomekanismia niiden normaaleissa ja hyväksyttävissä käyttöolosuhteissa, jolla voitaisiin perustaa käyttöiän arviointia mallintamalla ja laskemalla [1, s.131].

Yleisin suunnitteluikä tällä hetkellä on 50 vuotta. Betonirakenteiden käyttöikää arvioitaessa otetaan huomioon niihin vaikuttavat ympäristörasitukset. Näitä rasituksia ovat

- karbonatisoituminen
- pakkasrasitukset
- kloridien rasitukset
- kemialliset rasitukset.

Betonirakenteille on olemassa suosituksia eri rasituksissa liittyen betonin ominaisuuksiin ja peitteen paksuuteen [1, s.134.]

Rakennusalan kestävyuden parantamiseen täytyy ottaa huomioon ala kokonaisuutena. Kestävää kehitystä edustava projekti täytyy toteuttaa yhtenäisesti, hyvin suunnitellusti ja johdetusti. Dekonstruktio on prosessi, jossa rakennus puretaan niin, että sen materiaaleja voidaan kierrättää tai uusiokäyttää. Dekonstruktio prosessi vaatii muutoksia rakennustapojen, prosessien ja suunnittelun kulkuun. Dekonstruktio tunnetaan myös nimellä takaperin rakentaminen ja se on konseptina hyvin vanha. Monet tutkimukset ovat arvioineet ja kirjanneet dekonstruktion hyötyjä ja mahdollisuuksia. Augenbroe ja Pearce vuonna 1998 näkivät dekonstruktion haasteena lähitulevaisuudessa suurilta osin suunnitteluprosessien ja materiaalimarkkinoiden sopeutumistarpeen takia. [68, s.1297.]

Rakentamisen ja purkamisen jätteet ovat suuri osa maailman jätevirrasta, esimerkiksi Ruotsissa lukuun ottamatta kaivosjätettä 30% jätteestä on rakennus tai purkujätettä. Tätä materiaalilähdettä käytetään harvoin uudestaan rakennuksissa. Rakennuksen suunnitteluprosessin alkuvaiheessa materiaalityypit ja

määrät valitaan suorasti tai epäsuorasti ja nämä valinnat vaikuttavat rakennuksen toimivuuteen, ulkonäköön, huoltoon ja näiden materiaalien ympäristövaikutuksiin. Mitä suunnitteluvaiheessa ei paljon harkita on miten rakennuksen loppuvaiheessa rakennus ja sen materiaalit voidaan dekonstruoida tai purkaa osiin, jotta voidaan suunnitella pois jätettä tai vähentää jätteen määrää. [69, s.1-2.]

Suunniteltu purkamiseen on menetelmä, jossa suunnittelija suunnittelee rakennuksen, joka mahdollistaa muutokset ja kunnostukset, mutta myös materiaalien ja osien uudelleenkäytön. Ympäristöhyödyt ovat sisään lasketun energian säilyttäminen, hiilidioksidipäästöjen vähentyminen ja saastumisen vähentyminen. Densley Tingley arvioi, että 49% sisään lasketun hiilen säästöistä saavutetaan suunnittelulla purkamisella. Muita hyötyjä ovat sosiaaliset ja taloudelliset hyödyt, historiallinen säilyvyys ja pisteiden saaminen arviointimenetelmiin. Suunniteltu purkaminen on saanut suosiota kiertotalouteen liittyvän kiinnostuksen takia. Kiertotaloudessa estäminen ja uudelleenkäyttö ovat korkealla hierarkiassa ja ovat myös ydinosa suunnittelua purkamiseen menetelmässä. Vuonna 2018 vähemmän kuin 1% rakennuksista oli täysin osiin purettava ja purkamiseen suunnittelu ei ole hyvin yleistä. Ongelmana purkamisen suunnitteluun ja kiertotalousuunnitteluun voi olla rakennusprojektien luonne, koska niillä on yleensä alku ja loppu. Muita esteitä purkamisen suunnittelulle on esim. arkkitehtien näkemykset rakennuksista eli rakennuksia ei pitäisi ajatella liikkumattomina rakenteina vaan muuttuvina ja avoimina ja jotka pystyvät helposti sopeutumaan, rakennusten ja järjestelmien pystyvyyttä muuttumaan täytyy harkita koko elinkaaren pohjalta, materiaaleja täytyisi pitää pitkän ajan arvokkaana varallisuutena, pitää purkamista ja jätettä suunnitteluvirheenä, irrottaa materiaali ja toimintoriippuvuus uudelleenjärjesteltävien järjestelmien suunnittelulla, ottamalla rakennusala mukaan koko rakennuksen ja rakennusjärjestelmien elinkaareen. [69, s.2.]

Vaikka DfD (design for deconstruction) suunnittelusta on kirjallisuutta se ei ole kuitenkaan valtavirtaa rakennusalalla [69, s.2].

Monien ammattilaisten artikkelien ja suositusten perusteella voidaan sanoa, että DfD-suunnittelun osa-alueet, jotka vaikuttavat eniten ympäristöhyötyihin ovat:

- Yleissuunnittelu ja rakentamisperiaatteet
- Tiedyt materiaalit, joilla on mahdollisuuksia DfD-suunnittelussa
- DfD koko suunnitteluprosessin aikana
- Työkalut DfD suunnitteluun
- Olemassa olevan rakennuskannan mahdollisuudet
- DfD-suunnittelun esteet ja ajurit [69, s.3].

Suurin osa Jouri Kantersin katselmuksessa arvioiduista artikkeleista mainitsi joukon yleisiä suunnittelu ja rakentamisen periaatteita. DfD:llä ei ole kansainvälisesti hyväksyttyä määritelmää eikä kirjoittajan tiedon mukaan mitään vaatimuksia DfD-periaatteiden käyttöön missään rakennusmääräyksissä missään maassa. Jouri kirjoittaa, että monissa asiakirjoissa käsiteltiin seuraavia teemoja

- Kokonaisvaltainen rakennussuunnittelu
- Materiaalit ja liitokset
- Rakennus- ja dekonstruktiovaihe
- Kommunikaatio, pätevyys ja tieto suunnitteluprosessissa [69, s.4].

Seuraavat suunnittelu pääperiaatteet rakennusten suunnitteluun liittyen DfD-suunnitteluun tunnistettiin

- Käytä yksinkertaista ja modulaarista ratkaisua
- Käytä avointa, muuntojoustavaa rakennejärjestelmää, joka mahdollistaa muutokset tulevaisuudessa
- Käytä modulaarista rakenneruudukkoa
- Suunnittele rakennus niin, että rakenteet on kerrostettu järjestyksessä niiden elinajanodotteen kanssa
- Varmista, että stabiilisuus säilyy dekonstruktion aikana
- Erotta mekaaniset, sähköiset ja putkisto järjestelmät [69, s. 4].

Näillä periaatteilla mahdollistetaan dekonstruktio ja mukautuva rakennuksen muuttaminen toiseen käyttöön, joka mahdollistaa korkeamman leiniän rakennukselle. [69, s.4].

komponenttien, materiaalien ja liitosten oikea valinta DfD-suunnittelua varten on todennäköisesti kaikkein tärkein suunnitteluominaisuus, jotta saavutetaan korkea DfD-taso. Seuraavat pääperiaatteet liittyen materiaaleihin ja liitoksiin mainittiin kirjallisuudessa.

- Vähennä erilaisten materiaalien, liitosten ja osien määrää
- Suunnittele liitokset niin, että ne ovat saavutettavissa ja ovat kestäviä
- Käytä mekaanisia liitoksia kuten pultteja ja muttereja muiden liitosten sijaan
- Käytä myrkyttömiä, kestäviä, korkealaatuisia ja ei-komposiittisia materiaaleja, joita voidaan käyttää uudelleen
- Vältä sitoja, liimoja, hartseja ja toissijaisia viimeistelyjä
- Käytä kierrätettyjä ja kierrätettäviä materiaaleja
- Käytä kevyitä rakenteita.

DfD-periaatteiden noudattamiseen tarvitaan lisäpätevyyttä tekemään liitokset niin, että ne voidaan perua [69, s.4-5].

Seuraavat pääperiaatteet liittyen rakentamiseen ja dekonstruktioon mainittiin kirjallisuudessa.

- Kehitä ja suunnittele dekonstruktiosuunnitelma suunnitteluprosessin varhaisessa vaiheessa
- Käytä esivalmistettuja osia ja materiaaleja
- Varmista, että osat ovat sopivan kokoisia käsittelyä varten
- Dekonstruktio pitäisi olla mahdollista tavallisilla työkaluilla ja laitteistolla
- Mahdollista rinnakkaispurkaminen
- Varmista pääsy rakennusosille.

Nämä pääperiaatteet vaikuttavat siihen miten fyysinen dekonstruktio tapahtuu käyttäen tavallisia työkaluja ja osien kanssa, jotka ovat järkevän kokoisia. Esivalmistus helpottaa kuivaliitosten tekemistä. [69, s.5.]

DfD:llä on vaikutus suunnitteluprosessiin, avainhenkilöiden kommunikaatioon, tarvittuun pätevyyteen ja tietoon. Seuraavat pääperiaatteet liittyen edellä mainittuihin kirjallisuudessa.

- Informaatio, dokumentaatio käytetyistä materiaaleista ja dekonstruktion menetelmästä täytyy säilyttää
- Osat pitäisi olla tunnistettavissa
- Materiaalityypit pitäisi olla tunnistettavissa
- Suunnittelutiimin pitäisi olla tarpeeksi pätevä, koulutettu ja halukas työskentelemään dekonstruktion parissa [69, s.5].

DfD-liittyvä konsepti on suunnittelu umpisilmukkamateriaaleille. Sanchez:in ja Haas:in mukaan on tärkeää harkita umpisilmukka-periaatteita; rakentamista, johon liittyy rakennusmateriaalien ja osien kierrätys tai uudelleenkäyttö vanhoista rakennuksista joko luonnon- tai teollisuusprosessien kautta loputtomasti. Umpisilmukkamateriaalien käytön edistäminen maksimoi resurssien käyttöä. Jotkin materiaalit ovat enemmän hyödyllisiä tähän kuten teräs. He huomasivat myös, että kun uusiokäytetään materiaaleja kustannukset siirtyvät eli materiaalikustannukset laskevat ja työkustannukset nousevat. [69, s.5.]

Materiaalin uusiokäyttö pidentää normaalisti materiaalin elinaikaa. Tässä tilanteessa materiaalisilmukka pysyy suoraviivaisena jaksottaisen silmukan sijaan. Puutavaraa ja terästä pidetään umpisilmukkaisina materiaaleina, koska niitä voi prosessoida loputtomassa kierrossa. Huomattiin, että perustuksia oli vaikea rakentaa umpisilmukkamateriaaleilla samoin kipsilevyä, jolla on arvioitu olevan heikko kierrätettävyyden ja usein ongelmia irrotettavuudessa. Lisäksi muuraus elementtejä, kattotiiliä ja kuumassa kovettuvia eristemateriaaleja on vaikea pitää umpisilmukkamateriaaleina. [69, s.6.]

Densley Tingley tutki tiettyjen materiaalien teräksen, puutavaran, muuraustuotteiden ja betonin dekonstruktion mahdollisuuksia. Hän huomasi, että kantaviin rakenteisiin käytettyä puutavaraa ei aina uudelleen käytetä samaan tarkoitukseen vaan käytetään muihin tarkoituksiin. Vanhoja puutavararakenteita pidetään hyvät dekonstruktio mahdollisuudet omaavina, koska niissä käytetään

yksinkertaisia rakennustekniikoita ja niillä on standardikoot. Tärkeä asia koskien puurakenteiden purkamista on liitosten tyyppi. Paras tapaus on sellainen, jossa käytetään metallilevy- tai pultiliitoksia. Muuraustuotteet kuten tiilet tai harkot on tehty standardikoista. Tämä ominaisuus tekee muuraustuotteiden uudelleenkäytöstä helpompaa. Tiilien tai harkkojen uudelleenkäyttöä arvioitaessa on tärkeää huomioida niiden sidosaine, koska esimerkiksi sementtilaastilla muurattuja rakenteita on vaikea erottaa. [69, s.6.]

Betoni on materiaali, joka on vaikea dekonstruktion kannalta, ellei sitä ole erityisesti suunniteltu sitä varten. Erityisesti raudoitettut betonirakenteet ovat epäedullisia dekonstruktion näkökulmasta. Liitokset muihin materiaaleihin tapahtuvat usein sementillä tehden siitä vaikean uudelleen käyttä. Terästä ei uudelleen käytetä usein, mutta sen kierrätysaste on korkea. Teräksen uudelleen käyttö riippuu käytetyn teräksen ominaisuuksista ja liitosratkaisusta. Lisäksi paloeristeet teräksen ympärillä voi vaikeuttaa dekonstruktiota. [69, s.6.]

- DfD koko suunnitteluprosessin aikana

DfD tarvitsee huomiota jokaisessa suunnitteluprosessin vaiheessa. Guy ja Ciarimboli tunnistivat seuraavia huomioita

- tarveselvitysvaiheessa asiat kuten rakenne tai sisätilat pitää suunnitella niin, että tulevat muutokset ovat mahdollisia. On myös tärkeää, että osapuolet ovat joustavia. Skenaarioita joustavasti tarkastellessa voi ilmetä ratkaisu, joka pidentää rakennuksen ikää
- hankesuunnitteluvaiheessa suunnittelijan olisi hyvä tavata urakoitsijan kanssa tavarantoimittajia, jotta voidaan tunnistaa materiaalit, jotka tukevat DfD-suunnittelua
- ehdotussuunnitteluvaiheessa luodaan yksityiskohtainen suunnitelma rakennuksen dekonstruktion kulusta
- Yleissuunnitteluvaiheessa laaditaan yksityiskohtainen suunnitelma rakennuksen dekonstruktiosta
- On tärkeää huomioida, että yksityiskohdat suunnitelmissa eivät vaaranna rakennuksen DfD-toimivuutta.
- Työnjohdolle pitää luoda lopulliset piirustukset
- Ylläpidon olisi hyvä tietää rakennuksen DfD-strategia [69, s.6].

dekonstruktiosuunnitelmat pitäisi sisältää seuraavat asiat:

- Maininta valitusta DfD-strategiasta rakennukselle
- Lista rakennuselementeistä, jotka löytyvät yleensä lopullisista piirustuksista.
- Ohjeet, miten suorittaa elementtien dekonstruktio
- DfD-suunnitelmien jakaminen [69, s.6-7].

Tällä hetkellä ei ole paljon työkaluja, jotka tukevat suunnittelutiimiä DfD-suunnittelussa. BIM on hyödyllinen DfD-suunnittelussa, koska se antaa tiedot osien geometriasta ja paikasta rakennuksessa. Lisäksi tietomallinnus voi antaa lisätietoa käytetyistä materiaaleista. Erityisesti BIM 7D:llä on hyötyjä DfD-suunnittelulle, koska siinä on yksityiskohtaista tietoa esimerkiksi materiaaliominaisuuksista, seuraavan huollon ajankohta, upotettujen rakennusosien tarkka sijainti, jne. Tietomallinnuksella voi olla tärkeä rooli DfD-suunnittelutyökalujen kehittämisessä. Akinade ym. kehittivät ja esittivät tietomallinnuspohjaisen työkalun dekonstruktiota varten. Työkalu kuvailee matemaattisesti esim. ryhmän materiaaleja, komponentteja, liitoksia ja miten ne ovat tai jos ne ovat uudelleenkäytettäviä, jne. Antamalla tietyn dekonstruktio arviointituloksen he kuvasivat mallin selvittääkseen mihin suuruuteen rakennus voitaisiin dekonstruoida heti suunnittelu- vaiheesta lähtien.

Akinade et al. arvioi olemassa olevia DfD-työkaluja ja tunnisti seitsemän olennaista toimintoa BIM-pohjaisissa DfD-työkaluissa. Paranneltu osakkaiden yhteistyö, dekonstruktioprosessin visualisointi, talteen otettavien materiaalien tunnistaminen, dekonstruktiosuunnitelman kehitys, suorituskyvyn analyysi ja simulaatio elinkaaren loppupään vaihtoehtoista, paranneltu koko elinkaaren hallinta ja yhteensopivuus olemassa olevien BIM-sovelluksien kanssa. [69, s.7.]

Uusien rakennusten DfD suunnittelun puutteen lisäksi sama puute kantautuu myös olemassa olevalle rakennuskannalle, josta vähemmän kuin 1% on täysin osiin purettava tällä hetkellä. Rakennuskantaan sisältyvien rakennusten materiaalien sisään laskettua energiaa on huomattava määrä ja vaikka niiden dekonstruktiota ei suunnitella niiden hyödyntäminen uusiokäyttömateriaaleina DfD-

suunnittelussa on mahdollista. Rakennuskannan materiaaleihin sisään laskettua energiaa on yritetty arvioida mallintamalla rakennuksen geometria ja sen pohjalta päätellään määrällistä. Tätä menetelmää kokeiltiin Melbournessa Australiassa. [69, s.7.]

On tärkeää ymmärtää mihin pisteeseen asti tätä sisään laskettua energiaa sisältävää materiaalia voidaan hyödyntää. Tämän määrittää monet parametrit esim. materiaalin laatu, miten se on liitetty rakennukseen, mikä on sen arvioitu elinikä, jne. [69, s.8.]

Julkaisun tekohetkellä (2018) vain kaksi tutkimusta katsoi mahdollisia esteitä ja ajureita DfD-suunnittelulle. Akinade et al. määrittä seuraavat mahdolliset esteet DfD-suunnittelulle

- Teknisen tiedon ja tukevien työkalujen puute
- Uskomus siitä, että elinkaaren loppuvaihe ei saata tapahtua pitkän ajan kuluessa
- Rakennusmateriaalien ja osien arvostus elinkaaren lopussa ei ole taattua. [69, s.8.]

Rios, Chong ja Grau määrittivät seuraavat esteet

- Epävarmuus käytetyn materiaalin määrästä ja laadusta
- Sääntöjen ja standardien puute liittyen rakentamiseen kyseisillä materiaaleilla
- Osat saattavat vaurioitua työmaalla dekonstruktion aikana
- Yleinen negatiivinen näkemys uudelleen käytettävistä materiaaleista loppukäyttäjän puolesta
- Suunnittelija ja rakentaja kuvittelevat heidän tekeleensä pysyviksi
- Aikarajoitteet johtuen siitä, että osiin purkaminen saattaa kestää huomattavasti pidempään kuin mekaaninen purku
- Kustannusrajoitteet johtuen näkemyksestä, että dekonstruktio maksaa enemmän kuin purkaminen ja hävitys, mikä ei ole aina totta
- Sopimukset, jotka voivat tehdä uudelleenkäytöstä vähemmän toteutettavan
- Osallistumisen puute jätteen vähentämiseen valmistajien kesken

- kirjaustapojen puute DfD-suunnittelun hyötyjen mittaamiseen.

Molemmat tutkimukset tunnistivat tiukemman lainsäädännön ja menettelytapojen avainajureiksi DfD-suunnittelua varten. Lisäksi Akinade et al. tunnisti tietomallintamisen käytön, parannetun koulutuksen arkkitehdeille ja suunnitteluinsinööreille, ja myös kestävyysarvioiden pisteiden muina avainajureina DfD-suunnittelulle. [69, s.8.]

Joidenkin materiaalien uusiokäyttöä voi rajoittaa uudet tiukemmat rakentamismääräykset, koska uudelleenkäytettyjen materiaalien kuten eristeiden energiatehokkuuden suorituskyky on heikompi kuin samanlaisten uudempien tuotteiden suorituskyky. Uusiokäyttö ei siis saa mennä siihen pisteeseen, että käytön kulu kumoaa uudelleenkäytön hyödyt. Kun otetaan koko rakennuksen elinkaari huomioon materiaalien ja osien mukaan laskettu energia on ratkaiseva. Tiedon kerääminen eri materiaalien hyvistä ja huonoista puolista on avainasia suunnittelutiimille. Uusien uudelleenkäytön tapojen löytäminen voi olla haastavaa, mutta niiden löytäminen avaa uusia mahdollisuuksia, kun DfD-suunnitellaan. Olemassa olevan rakennuskannan potentiaalin hyödyntäminen rakennusmateriaalin lähteenä DfD-suunnittelulle on melko ei hyödynnetty. On jotain menetelmiä rakennuksissa olevien materiaalien määrän määrittämiseen, mutta ei laadun määrittämiseen. DfD-suunnittelusta ja sen talous ja ympäristöhyödyistä tiedottaminen on tärkeää, jotta saadaan tukea tälle suunnittelualalle. [69, s.8-12.]

6.6 Uudet ratkaisut

Tällä hetkellä tehdään tutkimuksia fotokatalyyttisestä hiilidioksidin pelkistämisestä. Tässä reaktiossa syntyy kemiallista energiaa ja muodostuu arvokkaita yhdisteitä kuten metaania, metanolia ja etanolia. Nyt yritetään löytää materiaalia, jolla olisi fotokatalyyttisiä ominaisuuksia ja soveltuvuutta rakentamiseen. Ongelmina tällä hetkellä on hiilidioksidimolekyylin vakaa luonne ja sen pelkistämiseen tarvitaan paljon energiaa. Vain tällä hetkellä pieni osa kehitetyistä fotokatalysaattoreista pystyy vastaamaan tähän energiavaatimukseen. Toinen ongelmista on hiilidioksidi, joka on pääasiassa kaasumuodossa. Tämä tarkoittaa,

että sen reagoiminen fotokatalysaattorin kanssa on vaikeaa johtaen huonoon tehokkuuteen. Muilla materiaaleilla on kyky sitoa hiilidioksidia, mutta usein ei kykyä fotokatalyyttiseen toimintaan. Kolmas ongelma liittyy hiilidioksidin pelkistämisen monimutkaisuuteen. [53, s.1-2.]

Titaanidioksidi on yleisin fotokatalyysimateriaali rakentamisessa ja se on tyyppillinen puolijohde. Titaanidioksidia hyödynnetään ulkokuoren materiaaleissa ja sisäverhoilumateriaaleissa kuten laasteissa, ulkokuoren tiilirakenteissa, katukivetyksissä, lasissa ja PVC kankaissa. [54, s.1899.]

6.7 Muoto

Ulkovaipan pinta-ala määrää pitkälti rakennuksen lämpöhäviöitä, joten sillä on suuri vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen. Myös ulkovaippaan käytetty materiaali vaikuttaa hiilijalanjälkeen. Aikaisessa suunnitteluvaiheessa on hyvä mahdollisuus vaikuttaa rakennuksen muotoon siten, että ulkovaipan kautta häviävää lämpöä pienennetään. Muodon tarkastelusta on hyötyä suunnittelun varhaisessa vaiheessa, kun energiasimulointia ei voi suorittaa puutteellisten tietojen takia. Muoto siis määrää osaltaan hiilidioksidipäästöjä. [1, s.109.]

Muoto antaa mahdollisuudet tuottaa tilankäytölle tehokkuuden näkökulmasta hyviä ratkaisuja [1, s.109]. Rakenteita voidaan yrittää tehdä sellaisiksi, että ne tuottavat rakennukselle lisää tilaa eli hyötyalaa ja tilavuutta tämä tehdään yleensä mittasuhteita muuttamalla. Tilan optimointi on hyödyllinen korjausrakentamisessa, kun voidaan tilan kasvatuksella lisätä rakennukselle käyttömahdollisuuksia. Tilan optimointi mittasuhteiden avulla säästää myös rakennusmateriaaleja ja täten energiaa. Tilanteessa, missä rakenteen päämateriaali ja lämmönjohtavuus on määritelty, voidaan kokeilla eri kerroksilla toimivia ratkaisuja, näin tavoitellaan lämpöteknisesti toimivaa ja paksuudeltaan ohutta ratkaisua. [1, s.124.]

Rakenteita valitessa on tärkeää ottaa huomioon rakenteen käyttöikä. Parhaat ominaisuudet omaava rakenne ei siis välttämättä ole kannattava, jos ottaa

huomioon sen käyttöiän. Tällainen tilanne voi aiheutua, jos jokin tietty osa vaatii paljon huoltoa, korjauksia tai vaihtoa näin lyhentäen rakenteen käyttöikä. Niin sanotusti heikko rakenneosaa mahdollisesti täytyy vaihtaa moneen kertaan elinkaaren aikana. Rakenneosaa aiheuttaa päästöjä, kun sen tilalle tuodaan uusi osa ja puretut rakenteet pitää kierrättää tai laittaa jätteenkäsittelyyn. [1, s.124.]

Yleisesti ottaen energiatehokas ulkokuoren osien suunnittelu ja rakennuksen geometria voi mahdollisesti vähentää ei uusiutuvan energian osuutta koko rakennuksen energiankäytössä hyödyntäen uusiutuvia energianlähteitä kuten auringonvaloa, tuulta, jne. Lämpöä varaavat seinät rakennuksen ulkokuoressa voivat olla tärkeässä roolissa vaikuttamassa rakennuksen energiankäytön kuvioon ja huippulukemiin. Lisäksi valo voi vaikuttaa rakennuksen päivän aikaiseen suorituskykyyn ja hyvittää valokuormia ja myös suoraan jäähdytys ja lämmityskuormiin valon antaman energian kautta. [65, s. 898.]

Energiatehokkuuden käsite rakennuksissa liittyy energian käytön tarpeeseen saavuttaa jotkin halutut olosuhteet, jotka vähentävät energiankulutusta. Hyvin suunniteltu lämmitys ja jäähdytys ovat yksi parhaista tavoista vähentää energiankulutusta rakennuksissa. Jotta voidaan rakentaa energiatehokas rakennus suunnittelun muuttujat ja rakentamisen parametrit pitää optimoida. Lisäksi on tärkeää tunnistaa suunnittelun muuttujat, jotka ovat suorassa yhteydessä lämmönsiirtoprosesseihin. [66, s. 3560.]

Rakennuksen muoto vaikuttaa siihen kuinka paljon auringon energiaa se saa. Auringonvalo voi lisätä jäähdytyksen tarvetta jopa 25%. Eli rakennuksen muoto määrittää ulkokuoren ja katon kokonaispinta-alan, jotka saavat auringonvaloa, mutta myös pinta-alan, joka on alttiina lämmön siirtymiselle. Kun rakennusta suunnitellaan ulkokuoren pinta-alan ja rakennuksen tilavuuden suhteen olisi hyvä olla mahdollisimman pieni nojaten pallonpuoliskon muotoon, joka on tämän suhteen ideaali. Usein tällainen muoto ei ole käytännöllinen. Monet tutkijat ovatkin alkaneet selvittämään esimerkiksi suuntaissärmiön muotoisia rakennuksia muuttaen muotokerrointa tavoitteena löytää paras malli. [66, s. 3560.]

Muuttujat, jotka liittyvät rakennuksen muotoon ja mitkä vaikuttavat lämmityksen ja jäähdytyksen tarpeeseen ovat tiivisyindeksi, muotokerroin, ilmasto ja muodon vaikutus rakennuksen elinkaareen. [66, s. 3560.]

Tiivisyindeksi on tilavuuden ja ulkokuoren pinta-alan suhde. Se liittyy rakennuksen kapasiteettiin varastoida lämpöä ja välttää lämpöhäviöitä ulkokuoren läpi. Hyvin tiivis rakennus on sellainen jonka tilavuus/pinta-ala suhde on korkea, jolloin on mahdollisimman vähän pintaa, josta lämpö voi siirtyä. Rakennuksen suhteellinen tiiveys on tiiveysohjelman ja referenssikohteen tiiveysohjelman suhde. Tiiveysohjelma antaa kuvaa siitä, miten rakennusta voidaan jäähdyttää ja lämmittää ja kumpi vaikuttaa energiankulutukseen. Korkeasta tiiveysohjelmasta johtuvaa ylikuumentumista voidaan hallita asentamalla passiivisia jäähdytysjärjestelmiä. [66, s. 3560.]

Muotokerroin on rakennuksen pituuden ja syvyyden suhde. Tämä kerroin määrittää orientaation kanssa prosentiosuuden rakennuksen julkisivusta, joka on esillä joka pääilmansuunnassa. Näitä tekijöitä tutkitaan usein yhdessä. Kun yhdistetään muodon ja suunnan optimointi voidaan saavuttaa huomattavia lämmityksen energiansäästöjä. Yksi tutkimus totesi, että pisimmän rakennuksen seinän tulisi kohdistua etelään. [66, s. 3561.]

Kylmissä olosuhteissa enemmän lämpöä karkaa ulkokuoren läpi kuin voidaan saada pinnasta auringonsäteilyn kautta, joten muotokertoimen kasvattaminen on suoraan suhteellinen energiantarpeeseen lämmityksessä toisin kuin lämpimässä ilmastossa. [66, s. 3561.]

Marks laski rakennus ja lämmityskustannuksia riippuen rakennuksen muodosta. Hän tutki kaarevia tai monikulmioisia rakennuksia. Parhaaseen rakennuksen muodon ratkaisemiseen täytyy ottaa huomioon käyttövaihe pitkältä ajalta. Esimerkiksi lyhyillä lämmityskausilla monikulmioisista rakennuksista kahdeksankulmioinen rakennus oli otollisin. On tärkeää luoda standardiset kriteerit vuosien rakennuksen käytöstä, joita pitää harkita, kun energiankäytön taloudellista hintaa arvioidaan. [66, s. 3561.]

Wang et al. tutki rakennuksen muodon vaikutusta energian käyttöön. Hän käytti matemaattisia kaavoja tutkimaan erimuotoisten rakennuksien elinkaaren kustannuksia ja ympäristövaikutuksia. $LCC(X) = IC(X) + OC(X)$ (3) $LCEI(X) = EE(X) + OE(X)$ (4). LCC=elinkaaren kustannukset; LCEI=elinkaaren ympäristövaikutukset; IC=rakentamisen kustannukset; OC=nykyisyyden elinkaaren käyttökustannukset; EE=rakentamisen ympäristövaikutukset megajouleina; OE=käytön ympäristövaikutukset megajouleina sisältäen lämmityksen, jäähdytyksen ja valaistuksen. Malli, jolla olivat pienimmät elinkaaren kustannukset, oli karskisti säännöllinen monikulmio. Kun rakennuksessa minimoidaan ympäristövaikutukset ja edelleen energiankäyttö pienimmät ympäristövaikutukset saa rakennus, jonka pisin julkisivu on etelään päin. [66, s. 3561.]

6.8 Laskentatyökalujen esteet sisälletyn hiilen vähentämiseen

Avain sidosryhmänä rakennesuunnittelijat voivat vaikuttaa sisälletyn hiilen määrään suunnitteluratkaisuillaan. Päätapoina tähän on materiaalivalinnat ja materiaalitehokkuus. Monet tutkijat ovat esittäneet moninaisia tapoja vähentää rakenteiden sisällettyä hiiltä. Monet näistä tavoista liittyvät laskentatyökaluihin. Parametrisiä malleja voidaan käyttää esimerkiksi antamaan käsitystä rakennusten muuttujien kuten pilareiden välistysten vaikutuksesta sisällettyyn hiileen. Malleja voidaan käyttää myös optimointiin löytämään kaikkein materiaalitehokas ratkaisu, joka täyttää rakenteelliset ja projektikohtaiset rajoitteet. Useat julkaisut ovat tunnistaneet tarpeen ottaa käyttöön näitä työkaluja rakenteiden sisälletyn hiilen vähentämistarkoitukseen. On ollut kuitenkin haastavaa ottaa käyttöön näitä ratkaisuja käytännössä osittain, koska suunnittelijoilla on taipumuksena käyttää tavanomaisia menetelmiä ja materiaaleja. Lisäksi tutkijat, jotka kehittävät ratkaisuja sisälletyn hiilen vähentämiseen eivät saata olla tietoisia kaikista tekijöistä ja sidosryhmistä, jotka ovat osallisia suunnittelussa esimerkiksi toteuttamiskelpoisuudesta tai minimi pylväsväleistä, joita asiakas vaatii. Ammatinharjoittajilla saattaa olla myös puute tarvittavasta koulutuksesta tai ohjelmistosta, joilla voidaan panna toimeen näitä ratkaisuja. [74, s.8.]

Suunnittelijoiden keskittyminen hintaan ja rakennettavuuteen materiaalitehokkuuden sijaan voi yhdysvaltalaisen tutkimuksen mukaan aiheuttaa perustavanlaatuisen esteen sisään lasketun hiilen vähentämiseen ja laskennallisten työkalujen käyttöön, jotka tähtäävät materiaalitehokkuuden parantamiseen. Nämä tulokset osoittavat tarvetta lisäkoulutukseen materiaalitehokkuuden tärkeydestä, mutta ei vain kestävyiden kannalta. Materiaalitehokkuuden käyttäminen sisään lasketun hiilen vähentämisessä kulkee käsi kädessä tehokkaiden ja rakenteellisesti hienostuneiden muotojen tekemisessä. [74, s.61.]

Kyselytutkimuksen [74] mukaan kustannukset olivat tärkeä tekijä, kun yritetään vähentää sisään laskettua hiiltä tai käyttää laskennallisia työkaluja suunnittelussa. Tutkimuksen kyselyn mukaan kestävätkin ratkaisut koetaan kalliimpina, vaikka tämä ei ole aina totta. Voi olla mahdollista, että hahmotus korkeammista hinnoista sen sijaan, että ne olisivat oikeasti korkeampia saavat insinöörit luopumaan strategioista, jotka vähentävät sisään laskettua hiiltä. Eli ympäristöllisesti kestävien teknologioiden hinta ei ole ainoastaan este vaan myös niiden koettu korkeampi hinta. Tämä luo tarvetta esitys projekteille, joissa testataan järjestelmien toimivuus ja saadaan kuvaa kustannuksista. [74, s.62.]

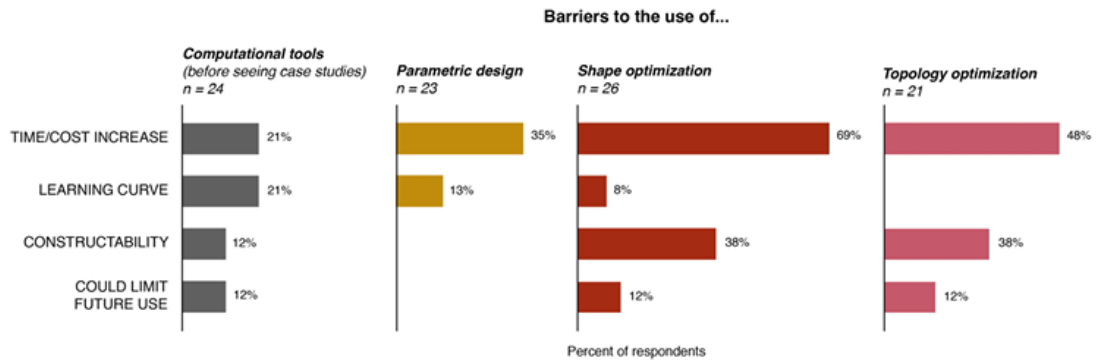
Päätösvallan puute on myös yksi suuri este sisään lasketun hiilen pienentämiseen. Yksi vastaajista kuvaili, että rakennesuunnittelijoilla on lupa valita tarkentaen vähähiilisiä materiaaleja esim. sementin korvikkeita, mutta suurin vaikutus rakennuksen rakenteen hiileen tulee pääasiassa arkkitehdin valinnoista. Rakennesuunnittelijoilla ei ole aina myöskään valtaa vaikuttaa materiaalivalintoihin tai pylväsvälien suuruuteen. Pienempien välien on huomattu johtavan vähentyneeseen hiileen. Arkkitehti, asiakas tai urakoitsija valitsevat monet rakenteelliset muuttujat kuten materiaalin. Yksi tapa välttää tämä este on kannustaa arkkitehtejä ja asiakkaita ottamaan rakennesuunnittelijoita mukaan suunnittelun alkuvaiheeseen. [74, s.62.]

Lähteen tutkimuksen tulokset näyttivät, että suunnitteluun käytetyn ajan vähentäminen on tärkeä tekijä, kun valitaan laskentatyökaluja erityisesti parametrisessä mallinnuksessa. Monet kyselyyn vastanneet mainitsivat, että ei ole aina

vaivan arvoista käyttää laskennallista työkalua esimerkiksi pienissä projekteissa. Vastaajat käyttivät myös joskus mieluummin edellisen projektin kokemusta tai suunnittelevat käsin. Laskentaohjelmien vaara on siinä, että niihin saatetaan luottaa sokeasti ilman käsitystä ja arviointia. [74, s.63.]

Yksi este topologiselle ja muoto optimoinnille on se, että ne voivat rajoittaa rakenteen tulevaa käyttöä. Kolme kyselyyn vastanneista tunnistivat tämän esteen. Yksi vastaaja kuvaili, että täysin optimoitu rakenne saattaa olla vain hyödyllinen sen alkuperäistarkoitukseen ja voi vaikeuttaa mahdollista uusiokäyttöä. Rakennus voi säästää mukaan laskettua hiiltä elinkaaren alussa materiaalin käytön vähentämisen ansiosta, mutta jos sen käyttöä halutaan muuttaa voi sen hyödyt peruuntua tai vähentyä. Tämä on aktiivinen tutkimuksen ala topologisessa optimoinnissa. [74, s.66.]

Muoto ja topologiselle optimoinnille rakennettavuus oli suurin este. Monet vastaajat olivat epävarmoja siitä löytävätkö urakoitsijaa tai valmistajaa erikoislaatuosille. Huolena on myös vastarinta urakoitsijoilta tai valmistajilta. Yksi vastaaja sanoi muoto optimointi kyselyosassa, että betoni aliuurakoitsijat Yhdysvalloissa estäisivät muoto optimoinnin, koska heidän täytyisi tehdä mittatilausmuotit, joka projektia varten. Muodon pitäisi olla toistettavissa lähes kaikissa töissä ennen kuin se otetaan käyttöön. Neljä vastaajaa sanoi, että toistettavuutta tarvitaan jos halutaan tehdä optimoituja osia joko yhdessä projektissa tai monien projektien kautta. Yksi vastaaja kertoi, että isoin haaste on löytää tapoja esittää näiden ratkaisujen kustannustehokkuus. Jotta voitaisiin valita optimoitu muoto projektin typologialle, jolla olisi paljon toistettavuutta voitaisiin myös useammin puhua sen kustannustehokkuuden puolesta. Vain yksi vastaajista, jotka mainitsivat toistettavuuden, sanoi, että he käyttäisivät muoto optimoituja osia, jos niitä tarjotaan standardi muotona. Nämä vastaukset kertovat, että optimoitujen muotojen toistettavuus tai standardointi voisi olla avaintekijä niiden käyttöönotossa. Lisäksi osien suunnittelu monille kuormitustapauksille voisi tehdä osat joustaviksi tulevaisuuden kuormitusmuutoksille. [74, s.67.]



Kuva 2. laskentatyökalujen esteet kysely [74, s.63]

7 Ilmastovaikutuksen arviointi

Rakennuksen elinkaarella on yleisesti hyväksytty olevan neljä vaihetta, jotka ovat järjestyksessä tuotantovaihe, rakennusvaihe, käyttövaihe ja purkuvaihe. On myös niin sanottuja järjestelmärajojen eli elinkaaren ulkopuolisia ympäristökuormia ja -hyötyjä. Rakennuksen elinkaaren vaiheiden sisällä keskitytään raaka-aineiden hankintaan, rakennusmateriaalien valmistukseen, kuljetuksiin, rakentamiseen, käyttöön, ylläpitoon, korjauksiin, purkamiseen ja jätteen loppukäsittelyyn. Tuotevaihe ja rakennusvaihe ovat selkeitä arvioinnin kannalta, koska niiden ympäristövaikutukset kasaantuvat heti. Lopuissa vaiheissa pitää ottaa skenaarioita avuksi siitä, miten ne tapahtuvat tulevaisuudessa eli arviointiin liittyy paljon epävarmuutta luonnollisesti tulevaisuuden tapahtumia ennakoimassa. Rakennuksen elinkaaren arvioinnissa käytetään usein vain hiilidioksidia kertomaan rakentamisen haitat ilmastoon lämpenemiseen. Muita ympäristövaikutusten osoittimia on esim. otsonikatopotentiaali ja rehevöitymispotentiaali. Näillä osoittimilla siis voidaan kuvata luonnonvarojen kulutusta ja päästöjä [33, s.38.]

7.1 Menetelmät

Ympäristövaikutusten osoittimet vaihtelevat sen mukaan, mitä arviointimenetelmää käytetään ja mitä halutaan arvioida kyseisellä arviointimenetelmällä. Menetelmät voivat keskittyä tietyille osa-alueelle tai olla kattavia. Suomen

ympäristöministeriön menetelmä käyttää hiilidioksidia osoittimena se sopii, kun halutaan mitata maailman lämpenemispotentiaalia. Tanskan vapaaehtoisessa kestäväen kehityksen luokitusjärjestelmässä taas käytetään hyvin montaa osoitinta. [33, s.38-39.]

Pohjoismaiset kansalliset arviointimenetelmät perustuvat EU:n standardiin EN 15978 [33, s.39]. Tämä standardi antaa laskentasäännöt ilmastovaikutusten arviointiin uusissa ja olemassa olevissa rakennuksissa. Standardin tarkoitus on tukea päätöksentekoprosessia ja dokumentaatiota rakennuksen ilmastovaikutuksen arvioinnissa. Standardin rakennuksien ilmastovaikutusten määrällinen arviointimenetelmä perustuu elinkaariajatteluun. [34, s.5-7.]

Lähestymistapa arviointiin kattaa kaikki rakennuksen elinkaaren vaiheet ja perustuu tietoon, joka on hankittu ympäristöselosteista, niiden "tieto moduuleista" ja muusta tarvittavasta ja oleellisesta tiedosta, joiden avulla arvio voidaan toteuttaa. Arvio sisältää kaikki rakennukseen liittyvät rakennustuotteet, prosessit ja palvelut, joita käytetään rakennuksen elinkaaren aikana. [34, s.7.]

Standardissa lukee, jotta voidaan suorittaa ja saada päätökseen laskelmat, joita tarvitaan rakennuksen ilmastovaikutusten arvioinnissa pitää käydä läpi standardin luettelemat yhdeksän kohtaa. Näin varmistetaan, että oleellinen tieto on kerätty ja käsitelty standardin mukaisesti. [34, s.14.]

Standardin vaatimat kohdat ovat

- Arvion tarkoituksen tunnistaminen
- Arvion kohteen määrittäminen
- Skenaariot rakennuksen elinkaarelle
- Rakennuksen ja sen elinkaaren kvantifiointi
- Ympäristötiedon ja muun tiedon valinta
- Ympäristövaikutuksien osoittimien laskenta
- Raportointi ja tiedonanto
- Arvioinnin vahvistus
- Valmis arviointi [34, s.15.]

Näihin kohtiin löytyy kuvaus EN 15978 standardista.

8 Opinnäytetyön tuotos

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda Powerpoint-esitysdiat. Diat tulevat Metropolia AMK:n käyttöön rakennetekniikan opintoihin ja niiden tarkoitus on opettaa rakennetekniikan keinoista laskea rakennuksen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä ja sen pullonkauloista. Dia-setissä on kahdeksan diaa, joissa on otsikoita, avainsanoja ja kuvia. Esitysdiat käyttävät Metropolian Powerpoint-pohjaa. Diat 1-6 käsittelevät rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä. Nämä diat on tarkoitus käydä läpi melko nopeasti. Dia 7 käsittelee rakenneteknisiä keinoja ja pullonkauloja tämä dia on esityksen pääasiaa ja aiheeseen mennään syvemmin. Dioiden rakenne seuraa pitkälti opinnäytetyön rakennetta ilman ilmastovaikutusten arviointia.

9 Pohdinta

Rakennusala on tällä hetkellä murrosvaiheessa, jossa vähähiilinen rakentaminen tulee olennaiseksi ja myös pakolliseksi osaksi rakentamista. Tämän liikkeen vaikutukset tunnetaan koko rakennusosalalla myös opintopuolella. Tästä syystä mielestäni vähähiilisyys ja sen tavoittelu on tärkeä aihe jokaiselle osapuolelle rakentamisen suunnittelussa. Tähän pääsemiseen rakennetekniikan keinoin löytyi hyvin monta lähestymistapaa, joista paras mielestäni on monitavoitteinen optimoinnin hyödyntäminen rakennuksen suunnittelun varhaisessa vaiheessa. Monitavoite optimoinnissa tavoitteina voivat olla mm. rakennuksen energiatehokkuus, rakennusmateriaalien hiilijalanjälki, investointikustannukset. Näille tavoitteille voidaan löytää simuloimalla iteratiivisesti pareto-rintama, jossa voidaan nähdä vaihtoehtoisia ratkaisuja, joihin ei voi tehdä parantavia muutoksia yhteen tavoitteeseen ilman, että toinen tavoite huononee. Pareto-rintaman vaikuttajina voi olla esimerkiksi terminen massa ja eristepaksuus, joiden mukaan pisteet määräytyvät pareto-rintamalle tai sen läheisyyteen. Pareto-rintama on hyvä tapa tutkia tavoitteiden välistä vaihtokauppaa.

Yleisesti varhaista päätöksentekoa tukevat työkalut ovat avainroolissa, jotta voidaan valita vähähiilisiä ratkaisuja eikä lukittauduta hiilijalanjäljen näkökulmasta huonoon ratkaisuun, joka lukitsee myöhemmin pois parempia ratkaisuja tiedon ja alkuvaiheen suunnittelua tukevien työkalujen puutteen takia.

Vetypelkistetyn teräksen tuotantoa kokeillaan tällä hetkellä ja luulen sen olevan monen toimijan tähtäimessä, kunhan sen ominaisuudet ovat ainakin tavallisen masuuniteräksen tasolla ja sen hinta ei ole huomattavasti korkeampi. Näen vetypelkistetyn teräksen huomattavana uutena teknologiana, koska teräs on yksi saastuttavimmista rakennusmateriaaleista ja vetypelkistettyä terästä on mahdollista tuottaa teoriassa päästöttömästi. Photokatalyyttiset materiaalit kuulostavat mielenkiintoisilta käytettynä julkisivuissa, mutta niiden vaikuttavuus suuressa mittakaavassa mietityttää niiden hinnan lisäksi. Olisiko siis järkevämpää investoida muihin järjestelmiin, jotka toimivat todistetusti. Toisaalta teknologia on uutta ja siten on vaikea arvioida sen taloudellisia rajoituksia ja sen vaikutusta rakentamisen hiilijalanjälkeen tulevaisuudessa etenkin, kun soveltuvia materiaaleja vielä etsitään ja kehitetään. Suurimpana haasteena photokatalyyttisille materiaaleille näen hiilidioksidimolekyylin vakaan luonteen eli sen pelkistämiseen tarvitaan paljon energiaa.

Materiaalien uusiokäyttöön liittyvä rakennuksen purkamisen suunnittelu niin, että suurin osa materiaaleista voidaan uusiokäyttää, on kiinnostava konsepti ja luulen sen merkityksen korostuvan, kun käytön hiilidioksidipäästöt vähenevät energiatehokkuuden parantuessa ja päästöjen paino siirtyy rakennusten mukaan laskettuun energiaan, joka syntyy pääasiassa materiaalien valmistamisesta.

Vähähiiliset materiaalit, jotka poikkeavat tavanomaisista koostumukseltaan ovat myös varteenotettava keino rakennusten hiilijalanjäljen pienentämisen mahdollistamisessa kuten eko-betoni ja on mielenkiintoista nähdä voidaanko jonain päivänä betonin tavanomaiset materiaalit korvata kokonaan niin, että sellainen betoni säilyttää toivottavat ominaisuudet rakentamista varten.

10 Yhteenveto

Maankäyttö- ja rakennuslaki uudistuu ja vähähiilisyys tulee osaksi sitä ja rakennusmääräyksiä. Suomen tavoite on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Vähähiilisen rakentamisen onnistumiseksi tarvitaan erityisesti suunnittelijoiden panosta ja taitoa suunnitella vähähiilisiä rakennuksia yhdessä muiden rakennusalan toimijoiden kanssa. 40% maailman hiilidioksidipäästöistä aiheutuu rakentamisesta ja tästä seuraava ilmastonmuutos uhkaa planeettamme hyvinvointia. Vähähiiliseen rakentamiseen tarvitaan tietoa siitä mitkä asiat vaikuttavat rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen ja miten sitä voidaan vähentää. Tässä työssä päätarkoitus oli kerätä rakennetekniikan opetusta varten materiaalia keinoista pienentää hiilijalanjälkeä ja tietoa pullonkauloista hiilijalanjäljen pienentämisessä.

Tutkimusmenetelmä työssä käytettiin kirjallisuuskatsausta. Aiheesta löytyi hyvin paljon tietoa ja tästä syystä työn rajaus oli haastava etenkin seitsemännessä luvussa.

Tutkimuksessa selvitettiin tietoa mistä rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki koostuu. Luvuissa 3-5 näihin sisältyi tietoa rakentamisvaiheen, materiaalien, kuljetusten, käytön ja ylläpidon sekä rakennuksen elinkaaren lopun hiilijalanjäljestä. Materiaalit rajattiin kuuteen yleisimpiin rakennusmateriaaleihin ja niiden tavanomaisimpiin valmistusmenetelmiin. Rakentamisvaihe luvussa käsiteltiin asioita kuten maarakennuksen, siirtojen ja sähkönkulutuksen hiilijalanjälkeä. Käyttö ja ylläpito luvussa käsiteltiin asioita kuten veden käyttö tai energian käyttö ylläpitoon. Elinkaaren loppu luvussa käsiteltiin asioita kuten purkaminen tai purkujätteen loppukäsittely. Lisäksi työssä on luku, joka käsittelee rakennusten ilmastovaikutuksien arviointia.

Opinnäytetyön päätavoitteena oli kerätä tietoa rakenneteknisistä keinoista vähentää hiilijalanjälkeä ja rakennetekniikan pullonkauloista. Keinoja olivat photokatalyyttiset materiaalit ja niiden käyttö julkisivujen pintamateriaaleissa, rakenteellisen energiatehokkuuden parantaminen kuten termisen massan ja

eristeiden yhteistoimivuus ja monitavoitteisen optimoinnin käyttäminen varhaisessa päätöksenteossa, yleinen asia rakenteellisesta energiatehokkuudesta, vähähiiliset materiaalit, rakennuksen muodon ja suunnan vaikutus hiilijalanjälkeen ja purkamiseen suunnittelu

Photokatalyyttiset materiaalit sitovat hiilidioksidia itseensä kemiallisten reaktioiden ja auringonvalon kautta. Rakenteelliseen energiatehokkuuteen liittyviä asioita ovat esimerkiksi lämpöä varaavan massan ja eristeiden yhteistoiminta tai rakenteiden toteuttaminen niin ettei niissä ilmene kylmäsiltoja tai ilmavuotoja esim. epäjatkuvuuskohdissa kuten liitoksissa. Monitavoitteinen optimointi tarkoittaa keinoa tutkia tavoitteita kuten energiatehokkuutta ja materiaaleihin sisään laskettua hiiltä samanaikaisesti ja yhdisteltyinä, jotta voidaan löytää paras yhteistoiminnan ratkaisu esim. eristeille ja termiselle massalle. Muoto ja rakennuksen suunta voivat vaikuttaa huomattavasti rakennuksen tarvitsemaan energiaan. Rakennuksen ulkokuoren pinta-ala määräytyy muodon mukaan ja mitä enemmän ulkokuoren pinta-alaa sitä enemmän on pintaa josta lämpö voi siirtyä ulkoilmaan. Rakennusten suuntautuminen vaikuttaa luonnonilmiöiden kuten tuulen ja auringonvalon kautta rakennuksen energiantarpeeseen. Suomessa esimerkiksi otollisin suunta on rakennuksen pisin sivu etelään suunnattuna. Energiatehokkuuteen vaikuttavat keinot ovat tärkeimpiä, koska suurin osa rakennusten hiilidioksidipäästöistä aiheutuu rakennusten käytöstä. Vähähiilisiä materiaaleja ovat esimerkiksi vetypelkistetty teräs tai eko-betoni. Vetypelkistetyssä teräksessä korvataan hiili teräksen pelkistäjänä ja polttoaineena ja se voi olla teoriassa päästötöntä. eko-betoni käyttää korvaavia aineita kuten biotuhkaa korvaamaan tavanomaiset raaka-aineet. Design for deconstruction tarkoittaa rakenteiden suunnittelua siten, että rakennuksen elinkaaren lopussa rakenteita voidaan hyödyntää purkamisen jälkeen suoraan toisissa projekteissa.

Työn päätuotos on kirjallisuustutkimus ja siinä esitetty tieto. Työn toisena lopputuotoksena luotiin Powerpoint diat opetuskäyttöön Metropolia AMK:lle kirjallisuustyön pohjalta. Esityksessä on seitsemän diaa, joissa on avainsanoja, kuvia ja se on tehty Metropolia AMK:n Powerpoint pohjaan. Diojen rakenne seuraa

pääosin opinnäytetyötä. Opettajalla on myös mahdollisuus muokata tai jatkaa esitystä. Kirjallisuustutkimukseen käytettiin suurin osa työajasta.

Lähteet

[1] Häkkinen, Tarja, Kuittinen, Matti Kohti 2020. Kohti vähähiillistä rakentamista. Helsinki: Rakennustieto Oy.

[2] EPD documents S-P-00307. Celsa Steel Service OY. 28.05.2012. Finland <<https://www.environdec.com/library/epd307>> (luettu 7.9.2023).

[3] Alberto N. Conejo, Jean-Pierre Birat, Abhishek Dutta. 14.02.2020. A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. Online-tietokanta tutkimusartikkeli. Journal of Environmental Management, osa 259. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719315002>> (luettu 7.9.2023)

[4] T. Norgate, N. Haque. 01.02.2010. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. Online tietokanta artikkeli. Journal of Cleaner Production, osa 18, julkaisu 3, sivut 266-274. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652609003199>> (luettu 21.09.2023)

[5] Wei Lv, Zengqing Sun, Zijian Su. 22.06.2019. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of iron pelletizing process in China, a case study. Online-tietokanta artikkeli. Journal of Cleaner Production, osa 233. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619321420>> (luettu 21.09.2023)

[6] Teräskirja 9. painos. 2014. Verkkoaineisto. Metallijalostajat ry. Suomi Helsinki. <https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/teraskirja_flip/mobile/index.html#p=32> (luettu 21.09.2023)

[7] Alberto N. Conejo, Jean-Pierre Birat, Abhishek Dutta. 14.02.2020. A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. Online-tietokanta tutkimusartikkeli. Journal of Environmental Management, osa

259. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719315002>> (luettu 21.09.2023)

[8] Mahmure Övül Arioğlu Akan, Dileep G. Dhavale, Joseph Sarkis. 20.09.2017. Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain. Online-tietokanta artikkeli. Journal of Cleaner Production, osa 167, sivut 1195-1207. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617316815>> (luettu 22.09.2023)

[9] Salminen, Esa. 2021. Suomalaisen betonin hiilijalanjälki. Verkkoaineisto. Betoni verkkolehti. <https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2021/03/BET2101_86-91.pdf> (luettu 22.09.2023)

[10] Juudit Ottelin, Ali Amiri, Bernhard Steubing, Seppo Junnila. 2021. Comparative carbon footprint analysis of residents of wooden and non-wooden houses in Finland. Online-tietokanta artikkeli. Environmental Research Letters 16 074006. <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac06f9/pdf>> (luettu 25.09.2023)

[11] Bjorn Berge, (käännös Filip Henley). 2000. The ecology of building materials. The ecology of building materials. Oxford: Architectural Press.

[12] Celia Martínez-Alonso, Lorena Berdasco. 02.06.2015. Carbon footprint of sawn timber products of *Castanea sativa* Mill. in the north of Spain. Online-tietokanta artikkeli. Journal of Cleaner Production, osa 102, sivut 127-135. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615005375>> (luettu 26.09.2023)

[13] Alaa Shakir, Ali Ahmed Mohammed. 01.09.2013. Manufacturing of Bricks in the Past, in the Present and in the Future: A state of the art review. Online-tietokanta artikkeli. International Journal of Advances in Applied Sciences. <https://www.researchgate.net/publication/270751259_Manufacturing_of_Bricks_in_the_Past_in_the_Present_and_in_the_Future_A_state_of_the_Art_Review> (luettu 26.09.2023)

- [14] Andreas Schmitz, Jacek Kamiński, Bianca Maria Scalet, Antonio Soria. 01.01.2011. Energy consumption and CO₂ emissions of the European glass industry. Online-tietokanta artikkeli. Energy Policy, osa 39, julkaisu 1, sivut 142-155. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510007081>> (luettu 26.09.2023)
- [15] Coenraad D. Westbroek, Jennifer Bitting, Matteo Craglia, Jose M.C Azevedo, Jonathan M. Cullen. 02.03.2021. Global material flow analysis of glass: From raw materials to end of life. Online-tietokanta artikkeli. Journal of Industrial Ecology, osa 25, julkaisu 2, sivut 333-343. <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.13112>> (luettu 28.09.2023)
- [16] Michael Zier, Noah Pflugradt, Peter Stenzel, Leander Kotzur, Detlef Stolten. 02.12.2022. Industrial decarbonization pathways: The example of the German glass industry. Online-tietokanta artikkeli. Energy Conversion and Management: X, osa 17. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174522001593>> (luettu 28.09.2023)
- [17] Isaac Orr, Mark Krumenacher. 01.05.2015. Environmental Impacts of Industrial Silica Sand (Frac Sand) Mining. Verkkoaineisto. The Heartland Institute. <https://wisconsinsand.org/wp-content/uploads/sites/77/2015/10/Environmental-Impacts-of-Industrial-Silica-Sand-Frac-Sand-Mining_Final-May-2015.pdf> (luettu 28.09.2023)
- [18] Jozef Mitterpach, Emilia Hroncova, Juraj Ladomersky, Karol Balco. 11.12.2015. Identification of Significant Impact of Silicon Foundry Sands Mining on LCIA. Online-tietokanta artikkeli. Sustainability, osa 7, julkaisu 12. <<https://www.mdpi.com/2071-1050/7/12/15822>> (luettu 02.10.2023)
- [19] Joosten, Ludovicus Antonius Josephus. 2001. The industrial metabolism of plastics: analysis of material flows, energy consumption and CO₂ emissions in the lifecycle of plastics. Online-tietokanta Väitöskirja. Utrecht University Repository. <<https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/751>> (luettu 02.10.2023)

[20] Peltokorpi, Antti, Chauhan, Krishna. 01.09.2022. Kalvomuovijätteen määrä ja sen laatu asuinkerrostalohankkeissa. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<https://ym.fi/documents/1410903/42733297/Kalvomuo-vija%CC%88tteen+m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4+ja+laatu+asuinkerrostalohankkeissa.pdf/f66b089c-4792-00f1-7cd2-c32727f4cfc0/Kalvomuo-vija%CC%88tteen+m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4+ja+laatu+asuinkerrostalohankkeissa.pdf?t=1681811333222>> (luettu 02.10.2023)

[21] Ekaterina Gavenas, Knut Einar Rosendahl, Terje Skjerpen. 19.10.2015. CO2-emissions from Norwegian oil and gas extraction. Online-tietokanta artikkeli. Energy, volyymi 90, osa 2, sivut 1956-1966. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215009202>> (luettu 03.10.2023)

[22] Dils, Evelien. 06.05.2021. Greenhouse gas emissions and natural capital implications of plastics. Verkkoaineisto. Eionet Portal. <<https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/greenhouse-gas-emissions-and-natural-capital-implications-of-plastics-including-biobased-plastics>> (luettu 03.10.2023)

[23] Lindgren, Sanna. 05.07.2018. Kuljetukset vaikuttavat rakentamisen hiilijalanjälkeen. Verkkoaineisto. samk. <<https://tulevaisuudenrakentaminen.samk.fi/2018/07/05/kuljetukset-vaikuttavat-rakentamisen-hiilijalanjalkeen>> (luettu 04.10.2023)

[24] Ahmet Anil Sezer, Anna Fredriksson. 01.06.2021. Environmental impact of construction transport and the effects of building certification schemes. Online-tietokanta artikkeli. Resources, Conservation and Recycling, osa 172. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921002974>> (luettu 05.10.2023)

[25] Catherine De Wolf, Francesco Pomponi, Alice Moncaster. 07.02.2017. Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. Online-tietokanta artikkeli. Energy and

Buildings, osa 140, sivut 68-80. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817302815>> (luettu 05.10.2023)

[26] Hämäläinen, Jari. 01.10.2012. Rakennustyömaan energiatutkimus. Online diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. <<https://docplayer.fi/3656091-Jari-hamalainen-rakennustyomaan-energiatutkimus-diplomityo.html>> (luettu 05.10.2023)

[27] Partanen, Mimmi. 2022. Tavoitteena päästötön työmaa -Rakennusaikaisen hiilijalanjäljen hallinta. Online-tietokanta opinnäytetyö. LAB University of Applied Sciences. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/782531/Partanen_Mimmi.pdf?sequence=2> (luettu 10.10.2023)

[28] Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. 2019. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (luettu 10.10.2023)

[29] Lukkarinen, Aki. 2019. Työmaavalaistusopas. Online-tietokanta opinnäytetyö. Tampereen AMK. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/168296/Lukkarinen_Aki_Tyomaavalaistusopas.pdf?sequence> (luettu 10.10.2023)

[30] Tikkanen, Juho. 02.05.2021. Rakennustyömaan logistiikka. Online tietokanta opinnäytetyö. Metropolia AMK. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/500261/Tikkanen_Juho.pdf?sequence=2> (luettu 10.10.2023)

[31] Report – Process – Construction site (A5). 11.01.2021. Verkkoaineisto raportti. CO2data. <<https://co2data.fi/rakentaminen/reports/Construction%20process%20R01.00.pdf>> (luettu 10.10.2023)

[32] Pönniö, Santtu. 10.11.2022. Työmaan materiaalien siirto- ja nostosuunnitelma. Online-tietokanta opinnäytetyö. Metropolia AMK.

<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/781720/Pönniö_Santtu.pdf?sequence=2> (luettu 10.10.2023)

[33] Saanio, Piia. 2022. Rakennuksen ilmastovaikutusten arviointimenetelmät ja säädösohjaus Pohjoismaissa. Online-tietokanta opinnäytetyö. Turku YAMK. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/788756/Saanio_Piia.pdf?sequence=2> (luettu 10.10.2023)

[34] SFS-EN 15978 Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. 04.05.2012. Online-tietokanta standardi. SFS online. <<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/184359.html.stx>> (luettu 10.10.2023)

[35] Leif Gustavsson, Anna Joelsson. 04.09.2009. Life cycle primary energy analysis of residential buildings. Online-tietokanta artikkeli. Energy and Buildings, osa 42, julkaisu 2, sivut 210-220. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809002102>> (luettu 12.10.2023)

[36] Giada Romano, Serena Baiani, Francesco Mancini, Fabrizio Tucci. 30.08.2023. Reducing CO₂ Emissions and Improving Water Resource Circularity by Optimizing Energy Efficiency in Buildings. Online-tietokanta artikkeli. Sustainability, osa 15, julkaisu 17. <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/17/13050>> (luettu 12.10.2023)

[37] Ali Hauashdh, Junaidah Jailani, Ismail Abdul Rahman, Najib AL-fadhali. 25.10.2021. Strategic approaches towards achieving sustainable and effective building maintenance practices in maintenance-managed buildings: A combination of expert interviews and a literature review. Online-tietokanta artikkeli. Journal of Building Engineering, osa 45. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221013486>> (luettu 16.10.2023)

[38] Sungho Tae, Sungwoo Shin, Jeehwan Woo, Seungjun Roh. 10.10.2010. The development of apartment house life cycle CO₂ simple assessment system using standard apartment houses of South Korea. Online-tietokanta artikkeli.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, osa 15, julkaisu 3, sivut 1454-1467. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110003400>> (luettu 17.10.2023)

[39] Athina G. Gaglia, Evangelos N. Dialynas, Athanassios A. Argiriou, Effie Kostopoulou, Dimitris Tsiamitros, Dimitris Stimoniaris, Konstantinos M. Laskos. 10.11.2018. Energy performance of European residential buildings: Energy use, technical and environmental characteristics of the Greek residential sector – energy conservation and CO₂ reduction. Online-tietokanta artikkeli. Energy and Buildings, osa 183, sivut 86-104. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818310697?via%3Dihub>> (luettu 17.10.2023)

[40] Olatz Pombo, Beatriz Rivela, Javier Neila. 13.04.2016. The challenge of sustainable building renovation: assessment of current criteria and future outlook. Online-tietokanta artikkeli. Journal of Cleaner Production, osa 123, sivut 88-100. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615008707>> (luettu 24.10.2023)

[41] Alessio Mastrucci, Antonino Marvuglia, Enrico Benetto, Ulrich Leopold. 04.04.2020. A spatio-temporal life cycle assessment framework for building renovation scenarios at the urban scale. Online-tietokanta artikkeli. Renewable and Sustainable Energy Reviews, osa 126 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120301283>> (luettu 25.10.2023)

[42] Tuominen, Tiia-Lotta. 01.10.2021. Purkavan uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaren aikaiset CO₂-päästöt toimistorakennuksessa. Online-tietokanta opin- näytetyö. Trepo Tampereen yliopisto. <<https://trepo.tuni.fi/handle/10024/134828>> (luettu 27.10.2023)

[43] Cha, Gi Wook, Won Hwa Hong, Jin Ho Kim. 2017. A study on CO₂ emissions in end-of-life phase of residential buildings in Korea: demolition, transportation and disposal of building materials. Online-tietokanta artikkeli. Key engineering materials 730.

<<https://www.proquest.com/docview/1873874949?parentSessionId=jwfQq-hhiamQu8LRcXJonRApVEIB7wHmn%2FO07KYuemus%3D>> (luettu 01.11.2023)

[44] Jiayuan Wang, Huanyu Wu, Huabo Duan, George Zillante, Jian Zuo, Hongping Yuan. 20.12.2017. Combining life cycle assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: A case study. Online-tietokanta artikkeli. Journal of Cleaner Production, osa 172, sivut 3154-3166. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617327476>> (luettu 01.11.2023)

[45] Jingjing Wang, Jiajia Wei, Zhansheng Liu, Chun Huang, Xiuli Du. 08.12.2021. Life cycle assessment of building demolition waste based on building information modeling. Online-tietokanta. Resources, Conservation and Recycling, osa 178. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921007035>> (luettu 02.11.2023)

[46] Haibo Feng, Jianfeng Zhao, Haonan Zhang, Shiyao Zhu, Dezhi Li, Niraj Thuraiajah. 12.02.2022. Uncertainties in whole-building life cycle assessment: A systematic review. Online-tietokanta artikkeli. Journal of Building Engineering, osa 50. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222002042>> (luettu 02.11.2023)

[47] Alessio Mastrucci, Antonino Marvuglia, Emil Popovici, Ulrich Leopold, Enrico Benetto. 12.06.2017. Geospatial characterization of building material stocks for the life cycle assessment of end-of-life scenarios at the urban scale. Online-tietokanta artikkeli. Resources, Conservation and Recycling, osa 123, sivut 54-66. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916301665>> (luettu 06.11.2023)

[48] Eva Quéheille, Anne Ventura, Nadia Saiyouri, Franck Taillandier. 02.02.2022. A Life Cycle Assessment model of End-of-life scenarios for building deconstruction and waste management. Online-tietokanta artikkeli. Journal of

Cleaner Production, osa 339. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262200333X>> (luettu 06.11.2023)

[49] Maues LM, Beltrao N, Silva I. 18.05.2021. GHG emissions assessment of civil construction waste disposal and transportation process in the eastern amazon. Online-tietokanta artikkeli. Sustainability, osa 13, julkaisu 10. <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/10/5666>> (luettu 07.11.2023)

[50] Hudson, Olivia. 18.11.2021. Non-recyclable building waste: where does it go? Online artikkeli. Azo build. <<https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8444>> (luettu 07.11.2023)

[51] Lindgren, Sanna. 2020. Pientalon hiilijalanjälki ja rakennusjäte. Online-tietokanta opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu. <<https://www.theseus.fi/handle/10024/344082>> (luettu 07.11.2023)

[52] Chai Xiaoli, Lou Ziyang, Takayuki Shimaoka, Hirofumi Nakayama, Zhu Ying, Cao Xiaoyan, Teppei Komiya, Toshio Ishizaki, Zhao Youcai. 31.10.2009. Characteristics of environmental factors and their effects on CH₄ and CO₂ emissions from a closed landfill: An ecological case study of Shanghai. Online-tietokanta artikkeli. Waste Management, osa 30, julkaisu 3. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09004279>> (luettu 07.11.2023)

[53] Vu, Nhu-Nang, Kaliaguine, Serge, Do, Trong-On. 08.2019. Critical Aspects and Recent Advances in Structural Engineering of Photocatalysts for Sunlight-Driven Photocatalytic Reduction of CO₂ into Fuels. Online-tietokanta artikkeli. Advanced functional materials, osa 29, julkaisu 31. <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adfm.201901825>> (luettu 09.11.2023)

[54] Jun Chen, Chi-sun Poon. 24.01.2009. Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. Online-tietokanta artikkeli. Building and Environment, osa 44, julkaisu 9, sivut 1899-1906. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132309000134>> (luettu 09.11.2023)

[55] P. Plaza, I.F. Sáez del Bosque, M. Frías, M.I. Sánchez de Rojas, C. Medina. 13.03.2021.

Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO₂ emissions. Online-tietokanta artikkeli. Construction and Building Materials, osa 285. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821006863?via%3Dihub>> (luettu 13.11.2023)

[56] Changyoon Ji, Taehoon Hong, Hyo Seon Park. 04.01.2014. Comparative analysis of decision-making methods for integrating cost and CO₂ emission – focus on building structural design –. Online-tietokanta artikkeli. Energy and Buildings, osa 72, sivut 186-194. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813008621>> (luettu 20.11.2023)

[57] Cyrille F. Dunant, Michał P. Drewniok, John J. Orr, Julian M. Allwood. 03.05.2021. Good early stage design decisions can halve embodied CO₂ and lower structural frames' cost. Online-tietokanta artikkeli. Structures, osa 33, sivut 343-354. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012421003325>> (luettu 20.11.2023)

[58] De wolf, Catherine. 2017. Low carbon pathways for structural design : embodied life cycle impacts of building structures. Online-tietokanta väitöskirja. DSpace@MIT. <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/111491>> (luettu 23.11.2023)

[59] Diego Alexis Ramos Huarachi, Giovanna Gonçalves, Antonio Carlos de Francisco, Maria Helene Giovanetti Canteri, Cassiano Moro Piekarski. 12.11.2019. Life cycle assessment of traditional and alternative bricks: A review. Online-tietokanta artikkeli. Environmental Impact Assessment Review, osa 80. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925519301374>> (luettu 01.12.2023)

- [60] Jianing, Liu, Yu Liu, Yan Zheng, Xiaoqing Li. 2023. Progress in green and low-carbon technologies development of building ceramics industry. Online-tietokanta artikkeli. Journal of physics: conference series. <<https://iop-science.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2639/1/012008/meta>> (luettu 01.12.2023)
- [61] Dylan D. Furszyfer Del Rio, Benjamin K. Sovacool, Aoife M. Foley, Steve Griffiths, Morgan Bazilian, Jinsoo Kim, David Rooney. 02.02.2022. Decarbonizing the ceramics industry: A systematic and critical review of policy options, developments and sociotechnical systems. Online-tietokanta artikkeli. Renewable and Sustainable Energy Reviews, osa 157. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122000119>> (luettu 01.12.2023)
- [62] Muhammad Wasim, Aref Abadel, B.H Abu Bakar, Ibrahim M.H. Alshaikh. 06.08.2022. Future directions for the application of zero carbon concrete in civil engineering – A review. Online-tietokanta artikkeli. Case Studies in Construction Materials, osa 17. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522004508>> (luettu 04.12.2023)
- [63] Kivinen, Lauri. 2020. Rakennusten elinkaaren hiilijalanjälkilaskenta. Online-tietokanta opinnäytetyö. Vaasan ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/340525/Lauri_Kivinen.pdf?sequence=2> (luettu 08.12.2023)
- [64] Farshad Kheiri. 17.05.2018. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. Online-tietokanta artikkeli. Renewable and Sustainable Energy Reviews, osa 92, sivut 897-920. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118302624>> (luettu 08.12.2023)
- [66] R. Pacheco, J. Ordóñez, G. Martínez. 28.04.2012. Energy efficient design of building: A review. Online-tietokanta artikkeli. Renewable and Sustainable Energy Reviews, osa 16, julkaisu 6, sivut 3559-3573.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112002286?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=832603b8b9fcd93b> Luettu 08.12.2023

[67] Arvind Chel, Geetanjali Kaushik. 31.10.2018. Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. Online-tietokanta artikkeli. Alexandria Engineering Journal, osa 57, julkaisu 2, sivut 655-669. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016817300911>> (luettu 12.12.2023)

[68] Fernanda Cruz Rios, Wai K. Chong, David Grau. 14.09.2015. Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities. Online-tietokanta. Procedia Engineering, osa 118, sivut 1296-1304. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815021402>> (luettu 12.12.2023)

[69] Kanters, Jouri. 2018. Design for deconstruction in the design process: state of the art. Online-tietokanta artikkeli. Buildings, osa 8, julkaisu 11. <<https://www.mdpi.com/2075-5309/8/11/150>> (luettu 12.12.2023)

[70] E. Zilberberg, P. Trapper, I.A. Meir, S. Isaac. 02.04.2021. The impact of thermal mass and insulation of building structure on energy efficiency. Online-tietokanta artikkeli. Energy and Buildings, osa 241. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821002383>> (luettu 20.12.2023)

[71] Asunta, Viljami. 2015. Energiätehokas rakentaminen. Online-tietokanta opinnäytetyö. Vaasan ammattikorkeakoulu. <<https://www.theseus.fi/handle/10024/90571>> (luettu 03.01.2024)

[72] Kinnunen, Lotta. 2019. Energiätehokkaat rakennukset. Online-tietokanta kandidaatintyö. Oulun yliopisto. <<https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/14042/nbnfioulu-201911163092.pdf?sequence=1>> (luettu 03.01.2024)

[73] Kokko, Mika. 04.11.2010. Asuinrakennusten ilmantiiveyden ja energiatehokkuuden tutkiminen. Online-tietokanta opinnäytetyö. Savonia ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/22237/Kokko_Mika.pdf?sequence=1> (luettu 03.01.2024)

[74] Smith, Margaret. 06.2023. Barriers to the use of computational tools for embodied carbon reduction in structural engineering practice. Online tietokanta opinnäytetyö. MIT libraries. <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/151946>> (luettu 09.02.2024)

Liite 1

1 (1)