



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Arhitektuuri ja urbanistika akadeemia

**ROHELISE BETOONI KASUTAMINE KAASAEGSES ARHITEKTUURIS TURU AJALOO- JA TULEVIKU MUUSEUMI NÄITEL**

**THE USE OF GREEN CONCRETE IN MODERN ARCHITECTURE ON THE EXAMPLE OF THE TURKU MUSEUM OF HISTORY AND THE FUTURE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Elis Rahuorg  
Üliõpilaskood: 224829EAUI  
Juhendaja: Üllar Ambos

Tallinn 2023

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

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

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## ANNOTATSIOON

Tänapäeval areneb ehitustööstus kiires tempos, mille tulemuseks on nii uhked ja tõeliselt erakordsed ehitised kui ka tohutu nõudlus ehitusmaterjalide järele. Betoon on arhitektuuriajaloo üks levinumaid, paindlikumaid ja dünaamilisemaid ehitusmaterjale. Sellel on tõsised eelised teiste materjalide ees ning see on väärtuslik materjal ka ajaloolisest ja arhitektuurilisest seisukohast. Betooni populaarsus tekitab aga negatiivseid keskkonnamõjusid, nagu CO<sub>2</sub> heitkogused ja looduslike materjalide kasutamist. Uuringud näitavad, et 8% kogu maailmas CO<sub>2</sub> heitkogustest pärineb betoonist. Samuti on betooni loomiseks vaja kasutada suurel hulgal loodusressursse, mille hulk väheneb kiiresti ja toob tulevikus kaasa nende komponentide kriisi. Betooni kasutamise lõpetamine ei lahenda probleemi, kuna see suurendab nõudlust muude materjalide järele ja suurendab seega keskkonnamoormust. Samuti kaotab arhitektuur ühe oma tugevaima omaduse, nimelt mitmekesisuse.

Süsinikdioksiidi tootmine ja loodusvarade nappus toovad juba praegu kaasa majanduskriisi, mille põhjuseks on materjalide kallinemine. Riigid püüavad liikuda uuele majandusmudelile, samuti leida uusi majanduslikke ja keskkonnamoormust vähendavaid alternatiive. Üks neist alternatiividest on roheline betoon.

See töö on pühendatud betooni- ja selle struktuuri ning komponentide uurimiseks, lisaks betooni populaarsuse välja selgitamiseks. Analüüsitakse betooni negatiivse keskkonnamõju põhjuseid ja kirjeldatakse alternatiivseid lahendusi, mida ühiskond on tänaseks jõudnud uurida ja välja töötada. Mõiste roheline betoon ja selle võimalik struktuur on esitatud selle kolme sordi näidete põhjal. Samuti kirjeldatakse tootmismeetodeid, mis vähendavad süsihappegaasi teket ja kasutatavate esmaste toorainete hulka. Esitatakse järgmised küsimused:

- Mis on betoonitootmise negatiivse keskkonnamõju põhjused?
- Mis on roheline betoon?
- Millist mõju avaldab roheline betooni tootmine ja kasutamine keskkonnale?
- Kas standardset betooni on võimalik tulevikus täielikult asendada roheline betooniga?

Rohelise betooni rolli kaasaegses arhitektuuris uuritakse Turu linna ajaloo- ja tulevikumuuseumi näitel. Objekti ja asukoha valik on tingitud ka sellest, et betoonitööstusel on minevik, olevik ja tulevik. Hoone arhitektuurne kontseptsioon ja sihtotstarve on tihedalt seotud lõputöö teoreetilise osaga, mille eesmärk on demonstreerida betooni kasutamise ilu ja potentsiaali. Betoonil on kõrge arhitektuurne väärtus ning see võib olla huvitav ja mitmekülgne materjal. Betoon pole 21. sajandil oma populaarsust kaotanud ja sellel on tuleviku jaoks kõrge arhitektuuriline väärtus. Lisaks võib betoon olla roheline, suure arengupotentsiaaliga, majanduslikult soodsam ja keskkonnasõbralikum kui tavaline betoon – need kolm viimast fakti on selle lõputöö hüpoteesid.

Today, the construction industry is developing at a rapid pace, resulting in both magnificent and truly extraordinary buildings, as well as a huge demand for building materials. Concrete is one of the most common, flexible and dynamic building materials in the history of architecture. It has serious advantages over other materials and is also a valuable material from a historical and architectural point of view. However, the popularity of concrete creates negative environmental impacts, such as CO<sub>2</sub> emissions and the use of natural materials. Studies show that 8% of global CO<sub>2</sub> emissions come from concrete. Also, to create concrete, it is necessary to use a large amount of natural resources, the amount of which is rapidly decreasing and will lead to a crisis of these components in the future. Stopping the use of concrete will not solve the problem, as it will increase the demand for other materials and thus increase the burden on the environment. Architecture also loses one of its strongest qualities, namely diversity.

The production of carbon dioxide and the scarcity of natural resources are already leading to an economic crisis, which is caused by the increase in the cost of materials. Countries are trying to move to a new economic model, as well as to find new economic and environmental alternatives. One of these alternatives is green concrete.

This work is devoted to the study of concrete, the reasons for its popularity, its structure, components. The causes of this negative environmental impact are analyzed and alternative solutions that society has been able to research and develop to date are described. The concept of green concrete and its possible structure are presented based on examples of its three varieties. It also describes production methods that reduce the production of carbon dioxide and the amount of primary raw materials used. The following questions are asked:

- What are the causes of the negative environmental impact of concrete production?
- What is green concrete?
- What impact does the production and use of green concrete have on the environment?
- Is it possible to completely replace standard concrete with green concrete in the future?

The role of green concrete in modern architecture is studied on the example of the Museum of History and Future of the City of Turku. The choice of object and location is also due to the fact that the concrete industry has a past, present and future. The architectural concept and purpose of the building is closely related to the theoretical part of the thesis, which aims to demonstrate the beauty and possibility of using concrete. Concrete has a high architectural value and can be an interesting and versatile material. Concrete has not outlived its popularity in the 21st century and has high architectural value for the future. In addition, concrete can be green, with high development potential, economically and environmentally friendly than conventional concrete - these last three facts are the hypotheses of this thesis.

## KOKKUVÕTE

Kaasaegsed linnad on tõestuseks inimkonna suurtest saavutustest. Areng ei peatu, lootes loodusvarade lõpmatuse ja tervisliku keskkonna kestvuse peale. Erinevad uuringud näitavad aga juba praegu, et ehitussektor põhjustab keskkonnale tõsist kahju. Tohtu hulk ehitusjätmeid, liiva- ja veepuudus ning süsihappegaasi heitkogused. Süüdi nendes tagajärgedes lasub ühiskond. Betooni tootmine on selle kahjuliku tegevuse üks elemente. Samuti on betooni tootmiseks vaja tohtul hulgal piiratud ressursse, nagu liiva ja vett. Sel põhjusel töötab ühiskond välja uusi alternatiivseid lahendusi, nagu näiteks roheline betoon. Kuid iga uuendusega, tekitab see teema küsimusi ja kahtlusi. Käesolevasse artiklisse kogutakse ehitussektori uurimis- ja arendustegevuse tulemused ja järeldused.

Näitena tuuakse kolme tüüpi rohelist betooni ning uusi keskkonda vähem kahjustavaid tootmismeetodeid. Selle materjali vastuargumendid ja negatiivsed omadused. Näiteks roheline betooni tardumine, mille tihedus on suurem, kui standardbetoon, võtab kauem aega. Samuti nõuab jätmete, näiteks taaskasutatud klaasi transportimine betooni tootvasse tehasesse ressursse ja tekitab süsihappegaasi. Vaatamata roheline betooni puudustele võib aga järeldada, et siin on tohtu potentsiaal. Selle tõestuseks on poliitikute, arhitektide ja ärimeeste arvamused ja väljaütlemised. Samuti on suur hulk ettevõtteid, mille tegevus on suunatud roheline betooni uurimisele ja tootmisele. Lisaks sellele püüdleb inimkond juba uue majandusmudeli poole, mille eesmärk on ressursse austada, neid töödelda ja taaskasutada.

See töö sisaldab teavet, mis on antud ajahetkel olemas. Siin kirjeldatud meetodid ja omadused võivad olla kasulikud selle valdkonna edasiseks uurimiseks. Samuti näitavad teoreetiline ja praktiline osa, et betoon on väärtuslik arhitektuurimaterjal, millel on suur potentsiaal edaspidiseks kasutamiseks, olles samal ajal roheline.

Modern cities serve as proof of the great achievements of mankind. Progress does not stop, counting on the infinity of natural resources and the durability of a healthy environment. However, various studies already show that the construction sector is causing serious harm to the environment. Huge amounts of construction waste, lack of sand and water, and carbon dioxide emissions. The blame for these consequences lies with society. Concrete production is one element of this harmful activity. Also, for the production of concrete, you need a huge amount of sand and water, limited resources. For this reason, society is developing new alternative solutions such as green concrete. However, like any innovation, this topic raises questions and doubts. This paper collects the results and conclusions of research and development that the construction sector currently has.

Three types of green concrete are given as an example, as well as new production methods that are less harmful to the environment. Provided counterarguments and negative properties of this material. For example, green concrete, which has a higher ash content than standard concrete, takes longer to set. Also, transporting waste, such as recycled glass, to a plant that produces concrete also requires resources and generates carbon dioxide. However, despite the shortcomings of green concrete, it can be concluded that there is a huge potential here. The proof of this is the opinions and statements of politicians, architects and businessmen. Also, there is a large number of enterprises whose activities are aimed at the study and production of green concrete. In addition, humanity is already striving for a new economic model, the purpose of which is to respect resources, recycle and reuse them.

This work contains information that exists at a given time. The methods and properties described here may be useful for further research in this area. Also, the theoretical and practical part show that concrete is a valuable architectural material with a high potential for further use in the future. Also, concrete can be green.

Käesoleva magistritöö teemavalik sai tõuke Tallinna arhitektuuriennaali visioonivõistluselt, mis aitas enda jaoks lahti mõtestada ringmajanduse ja arhitektuuri sümbioosi. Ma tahan südamest tänada oma juhendajat, Üllar Ambos, kes motiveeris ja oli toeks kogu töö perioodi vältel. Samuti tänan oma pere liikmeid toetava ja mõistva suhtumise eest, ilma kelleleta oleks antud teekond olnud üsna raske.

## SISUKORD

ANNOTATSIOON

KOKKUVÕTE

### OSA I. TEOORIA

1 SISSEJUHATUS

2 TAVALINE BETOON

2.1 Materjal

2.1.1 Definitsioon ja komponendid

2.1.2 Tsement

2.1.3 Tsementmört

2.1.4 Betoon

2.1.5 Struktuur

2.2 Populaarsuse põhjus

2.3 Betooni kasutamise mõju keskkonnale

2.3.1 CO2 heitkogused ja kliimamuutused

2.3.2 Loodusressursid

2.3.3 Vesi

2.3.4 Lammutustööd ja ehitusjätmed

2.3.5 Keemilised lisandid

2.4 Olemasolevad strateegiad heitkoguste vähendamiseks tsemendi tootmisel

3 ROHELINE BETOON

3.1 Roheline betoon tänapäeval

3.2 Sektori perspektiiv

3.3 Rohelise betooni tüübid

3.3.1 Lendtuhk (Fly Ash)

3.3.2 Post-consumer glass

3.3.3 Taaskasutatud betoon

3.3.4 Raudbetoon

3.4 Kriitika

3.4.1 Logistika

3.5 Rohelise betooni perspektiiv

3.5.1 Areng Soomes

4 ROHELISE BETOONI KASUTAMINE ARHITEKTUURIS

4.1 Ehitus tänapäeval

4.2 Rohelisest betoonist hoonete näited

4.2.1 Taani ridaelamud

4.2.2 SOS Lasteküla Lavezorio kogukonnakeskus

4.2.3 Powerhouse Brattørkaia

### OSA II. PROJEKT

5 ASUKOHT

6 KONTSEPTSIOON

7 ASENDIPLAAN

8 HOONE

8.1 Esimese korruse plaan

8.2 Teise korruse plaan

8.3 Lõiked

8.4 Renderid

9 KASUTATUD KIRJANDUS

**OSA 1.   TEORIA**

## **1 SISSEJUHATUS**

Arhitekt on inimene, kes valib ehituse liikumise vektori. See on lähtepunkt iga hoone loomisel, mis nõuab tohutuid loodusressursse ning majandus- ja ajakulusid. Loomulikult ei loo hoonet üks inimene, vaid suur meeskond inimesi ja vahel ka kogu riik, kuid arhitektil on põhivastutus, mis suunas projekt areneb. Sel põhjusel peab arhitekt olema teadlik mis tahes tehtud otsuse tagajärgedest.

See artikkel tõstatab ehitussektori negatiivse keskkonnamõju, nimelt betooni kasutamise teema. Teoreetilises osas vaadeldakse selle negatiivse mõju konkreetseid põhjuseid, kahju praegust ulatust ning lahendusi, nimelt alternatiivsete materjalide, muude tootmismeetodite ja ringmajanduse mudeli kasutamist. Selle töö eesmärk on meelde tuletada probleemi olemasolu, selgitada selle allikaid ja põhjuseid, samuti pühitseda lahendusi, mis suudavad seda probleemi lahendada.



## 2 TAVALINE BETOON

Selleks, et mõista, mis on roheline betoon, on vaja kõigepealt tutvuda tavalise betooni koostise, omaduste ja negatiivsete tagajärgedega. Selles peatükis kirjeldatakse lühidalt tavabetooni omadusi, selle komponente ning ka põhjust, miks tavabetooni kasutamine keskkonda kahjustab ning miks see teema on aktuaalne praegu ja oluline ka tulevikus.

### 2.1 Materjal

#### 2.1.1 Definitsioon ja komponendid

Betoon (prantsuse béton) on kunstlik ehitusmaterjal, mille standardkomponendid on:

- sideaine nagu tsement või lubi
- täitematerjal (liiv ja kruus) ja vesi
- võimalikud lisandid (nt lendtuhk või plastifikaatorid)

#### 2.1.2 Tsement

**Tsement** on betoonisegu peamine koostisosa. See toode on peamiselt valmistatud purustatud lubjakivist, mis on segatud kiltkiviga, purustatud peeneks pulbriks ja kuumutatud umbes 1450 °C-ni. Tsemendi liike on palju, millest populaarseim on 19. sajandi alguses Inglismaal välja töötatud portlandtsement. (Nick Gromicko kuupäev puudub) (The Screed Scientist 2014) (Shetty 2000)

#### 2.1.3 Tsementmört

**Tsementmört** on segu, mida kasutatakse nii kivide ja telliste liimimiseks kui ka pragude ja aukude täitmiseks. Lahuse komponendid on sideaine (lubi, tuhk või tsement), vesi ja peen lahusti.

Mört on üks vanemaid ja tähtsamaid ehitusmaterjale, mida on kasutatud tuhandeid aastaid kuni tänapäevani. Esialgu kasutati sideainena kustutatud lupja, savi või vulkaanilist tuhka, kuid

pärast portlandtsemendi leiutamist 19. sajandil asendati vanad sideained.

Need uuendused on toonud kaasa positiivseid kui ka negatiivseid tagajärgi, kuna võrreldes tsemendilobri kasutamisega vähendab tsemendivaba läga kasutamine oluliselt kasvuhoonegaaside heitkoguseid. Samuti võib selline lahus osaliselt neelata süsihappegaasi ja muutuda sel põhjusel veelgi tugevamaks. (Sung-Hoon Kang 2019)

Kahe materjali vahel valiku tegemisel said aga otsustavaks tsemendilobri positiivsed omadused, nagu kiirem kõvenemine, suurem veekindlus ja väiksem pragunemine.

#### 2.1.4 Betoon

Tsementeeriv osa vedeldatakse veega. Kui tsemendile lisatakse vett, vallandub keemiline reaktsioon ja algab kristalliseerumisprotsess. Järgmises etapis lisatakse mõned lisandid, näiteks kruus ja liiv. Neid täitematerjale hoitakse koos vedela tsemendiga. Kui kogu segu on tahkunud, lõpetab see protsess betooniks nimetatava toote tahkumise. (Gregory 2021) (L 2018)

#### 2.1.5 Struktuur

Seal on mitu betoonkonstruktsiooni. Struktuur erineb peamiselt tsemendi ja lisatud täitematerjalide erineva vahekorra poolest, mis omakorda sõltub betooni tulevases otstarbest. Näiteks kui on vaja betooni, mis peab vastu suuremale koormusele, siis on vaja suuremat tsemendi osa. (Negahbani 2018)

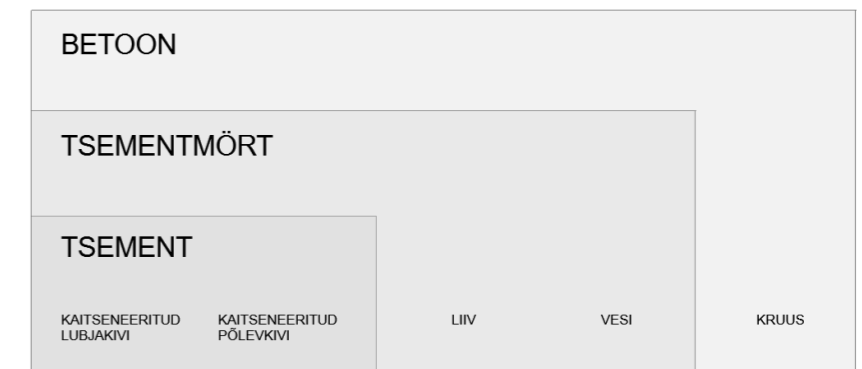
Klassikalisel betoonisegul on järgmine struktuur:

- 7,7% vett ( $\approx 1/13$  osa)
- 15,4% tsementi ( $\approx 2/13$  osa)
- 30,7% liiva ( $\approx 4/13$  osa)
- 46,1% kruusa ( $\approx 6/13$  osa)

Kui peate vundamendi või samba jaoks kasutama betooni, peaks see olema järgmiste suhetega:

- 11,1% vett ( $\approx 1/9$  osa)
- 22,2% tsementi ( $\approx 2/9$  osa)
- 22,2% liiva ( $\approx 2/9$  osa)
- 44,4% kruusa ( $\approx 4/9$  osa)

Lisaks sellele tuleb arvestada terase vahekorraga betoonkonstruktsioonis, kuna ca 70% ehitatavatest betoonkonstruktsioonidest on armeeritud terasega. (EU-Recycling 2019)



Joonis 1. Betooni struktuur. Autori skeem.

## 2.2 Populaarsuse põhjus

Enamik inimkonnast elab linnades, mis on saanud võimalikuks tänu betooni tulekule, kuna enamik hooneid, alates pilvelõhkujatest kuni eramajadeni, on ehitatud betoonist. Isegi hooned, mille põhimaterjaliks on tellis või puit, toetuvad betoonvundamendile või on betoonkarkassiga. Betoon on ehitusmaterjal, mida külmas kliimas täielikult välja vahetada ei saa. Nagu Sarah Nichols ütles: «**Concrete is everywhere**». (Marie Bruun Yde kuupäev puudub) (Zadeh 2022)

Sellise populaarsuse põhjustavad betooni järgmised omadused:

- Madal hind
- Betoonkomponentide saadavus

Betooni tooraine on saadaval suurtes kogustes peaaegu igas maailma nurgas, mistõttu on betooni tootmine taskukohane ja odav. Liiv, lubjakivi ja kruus on teiste ehitusmaterjalidega võrreldes üsna odavad komponendid. Peamised kulud betooni valmistamisel on seotud tsemendi tootmisega.

- Iseloomulik "vedelik kivi", kuna betoonist saab valmistada peaaegu iga kuju.

Sarnast betooni omadust on ära kasutanud näiteks arhitekt Zaha Hadid, kes töötas koostöös ETH Zürichiga viietonnise betoonkonstruktsiooni projekteerimisel Mehhikos asuvas Museo Universitario Arte Contemporaneos. (Walsh 2018)

Raudbetoon pakub paindlikkust dramaatiliste, suure ulatusega arhitektuurivormide kujundamiseks, mis võivad luua avatud sisekujundusi.

- Tulekindlus

Kuigi tulepüsivust on võimalik saavutada peaaegu iga ehituskonstruktsiooni puhul, ei pea betoon olema tulekindel, sest see ei põle. See omadus pakub tulekahju korral palju paremat kaitset ning loob ka tugevama turvatunde. (Concrete Paving, Paving Techniques 2017) (ASBL, European Concrete Platform 2009)

- Sajanditepikkune kogemus

Betooni on ehituses kasutatud tuhandeid aastaid. Rooma impeerium revolutsioneeris betooni kasutust ja sellega nad ehtasid ühe suurima tsivilisatsiooni, mida maailm oli kunagi näinud. Muistsed egiptlased segasid liiva ja kruusa tsemendi sideaine ja veega, et luua betooni põhivorm, mida nad kasutasid paljude oma konstruktsioonide ehitamiseks. Betooni kasutamine nii pika aja jooksul arendab kindlustunnet materjali tugevuse ja vastupidavuse vsuhtes, mis on ka üks olulisemaid tegureid.

- Kasutuslihtsus

Tsementkonstruktsioonid võivad olla monoliitsed või monteeritud, mistõttu need sobivad suurte ehitusprojektide jaoks. Samuti kulub betooni töötlemisel vähem aega, mis kiirendab ehitusprotsessi ning sellest tulenevalt on see majanduslikult seisukohast kasulik.

- Pikaajaline kasutamine

Betoon talub peaaegu iga kliimat, kuna see on vastupidav erosioonile, roostele ja mädanemisele ning vajab minimaalset hooldust. (Contractors society of America 2022) (Chemistry World 2008)

- Tugevus, suudab taluda suuri koormusi.

19. sajandi lõpus lisati betoonkonstruktsioonile raudvardad ja hiljem tugevuse suurendamiseks terasarmatuur. Sarnase lahenduse töötas välja peamiselt Joseph Monnier (Bellis 2006) ja seda kasutatakse tänapäeval laialdaselt ehitustööstuses. Selline leiutus avaldas väga tugevat mõju arhitektuurile ja ühiskonnale, kuna betoon oli üks sobivaimaid materjale mitmepere- ja sotsiaalelamute ehitamisel. Betooni populaarsuse tingis asjaolu, et võrreldes teiste materjalidega olid betoonehitised vastupidavamad, kindlamad välismaailmale ja tulele. Lisaks oli betooni kiire ja mugav kasutada, mistõttu ehituskulud olid madalamad.

1950. aastate arhitektuuris mängis betoon olulist rolli brutalistliku arhitektuurstiili, sotsiaal-esteetilise arhitektuurilise

liikumise kujunemisel, mis esitles tooreid, silmapaistvaid struktuure, mida sageli kasutatakse suuremahuliste kodaniku- ja avalike projektide jaoks. Sarnane mõju oli domineeriv jõud järgmise kahe aastakümne jooksul. (Architecture news & editorial desk 2023)



Joonis 2 Zaha Hadid paviljon betoonist. (Walsh 2018)

## 2.3 Betooni kasutamise mõju keskkonnale

Huvitav fakt: viimase 60 aasta jooksul on toodetud 8 miljardit tonni plastikut, kuid betoonil kulub selle arvuni jõudmiseks vaid 2 aastat. Kuigi betooni tootmisest tulenev probleem on palju suurem, siis avalikkus seda tõsiseltvõetavana ei taju. Põhjuseks on selle probleemi vähene nähtavus igapäevaelus. Plasti leidub kajakate või vaalade maost, arstid leiavad selle jälgi meie verest või näeme oma maja juures tänaval plastprügi. Betooni valmistamise kahju on nähtav ainult põhjalikul uurimisel ja ehitussektoris töötavatele inimestele. (The Guardian 2019)

Tsemenditööstuse ja betoonehituse mõju meie keskkonnale on tohutu. Euroopa Komisjoni andmetel moodustavad 25-30 protsenti kõigist EL-is tekkivatest jäätmetest ehitus- ja lammutusjäätmed, millest paljusid saab taaskasutada. (Kürth 2019)

Jäätmete raamdirektiivi (2008/98/EÜ) üks eesmärgi 2008. aastal oli luua Euroopa alus kõrge ressursitõhususega jäätmeühiskonna suunas liikumiseks. Liikmesriikidele on seatud eesmärk, et 2020. aastaks oleks vähemalt 70 protsenti jäätmetest korduskasutamiseks, ringlussevõtuks või taaskasutamiseks. (Ecos, EEB, Recycling Network 2022) (Official Journal of the European Union 2019)

Sellel soovil on positiivne mõju nii keskkonnale kui ka riigi majanduskasvule. Hinnanguliselt võib korduskasutamine või korduskasutamiseks ettevalmistamine oluliselt vähendada CO<sub>2</sub> heitkoguseid, toetades samal ajal ligikaudu 200 000 töökohta. (European Commission, OECD 2022)

Taaskasutussektori sotsiaalsete ettevõtete andmed näitavad, et iga taaskasutuse eesmärgil kogutud 1000 tonni kohta saab luua keskmiselt 70 töökohta. (Rreuse 2021)

### 2.3.1 CO<sub>2</sub> heitkogused ja kliimamuutused

Nagu varem öeldud, kasutatakse betooni valmistamiseks tsementi, mis on segatud täitematerjaliga, mille koostiseks on kivi, liiv ning granuleeritud segu. Pärast segamist valatakse betoon vormi ja lastakse enne ehituses kasutamist taheneda. Selle protsessi tulemusena ei teki peaaegu üldse süsinikdioksiidi heitkoguseid, kuid sellegipoolest on tsement süsiniku jalajälje osas tõsine probleem.

Tsemendi valmistamise protsess on väga pikk ja energiamahukas, mis nõuab palju ressursse ja selget süsteemi.

Tsementi valmistatakse savi, lubjakivi ja muude materjalide põletamisel ahjus. Materjali põletamiseks kasutatud energiast eraldub CO<sub>2</sub>. Kuumus põhjustab keemilise reaktsiooni, mida nimetatakse ka kaltsineerimiseks. (Xiaochen Hao 2021) (Rand 2012)

See reaktsioon koos kuumutamisprotsessiga põhjustab suurel hulgal süsinikdioksiidi heitkoguseid, muutes tsemendi tootmise oluliseks kasvuhoonegaaside heitkoguste põhjustajaks. Kogu protsess toimub hiiglaslikus segistis, mida nimetatakse tsemendiahjaks.

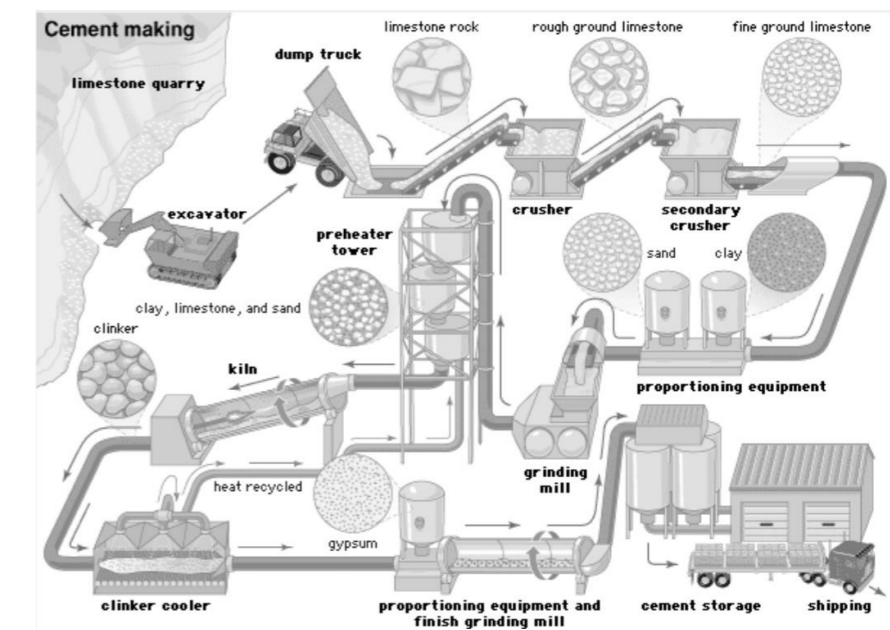
Kokkuvõttes aitab tsemendi tootmine kaasa kasvuhoonegaaside emissioonile läbi süsinikdioksiidi tootmise, mille põhjustab kaltsiumkarbonaadi termiline lagunemine lubjaks ja süsinikdioksiidiks kui ka energia kasutamise kaudu, eelkõige fossiilkütuste põletamisel. (Independent Statistics & Analysis 2009)

Riikliku valmissegatud betooni assotsiatsiooni andmetel eraldab iga betooni nael 0,93 naela süsinikdioksiidi. Tööstuse CO<sub>2</sub> heitkogused kasvavad jätkuvalt, kuna betoon on nii laialt levinud toode. (Ramsden 2020)

Uuringud näitavad, et 8% kogu globaalsest CO<sub>2</sub> heitkogusest tuleb betoonist, millest 50% tuleb keemilistest protsessidest ja

40% kütuse põletamisest. Arvestades seda tegurit, on võimatu ignoreerida selle probleemi olemasolu tänapäeva maailmas.

Lisaks on oodata tsemenditootmise kasvu. Kogu hoonestuspind maailmas oli 2016. aastal umbes 235 miljardit ruutmeetrit (m<sup>2</sup>). Prognooside kohaselt kahekordistub see arv järgmise 40 aasta jooksul. Põhjuseks on asjaolu, et kuigi arengumaades on betooni populaarsus saavutanud haripunkti, siis teistes nõrgema majanduse või majandusharuga riikides, nagu India ja Indoneesia, on huvi betooni vastu kasvamas. Mõnede hinnangute kohaselt kasvab 2050. aastaks Aasia arengumaade nõudlus kolm kuni neli korda. (Preston 2018)



Joonis 3 Tsemendi valmistamise protsess. (Frederick M. Lea kuupäev puudub)

### 2.3.2 Loodusressursid

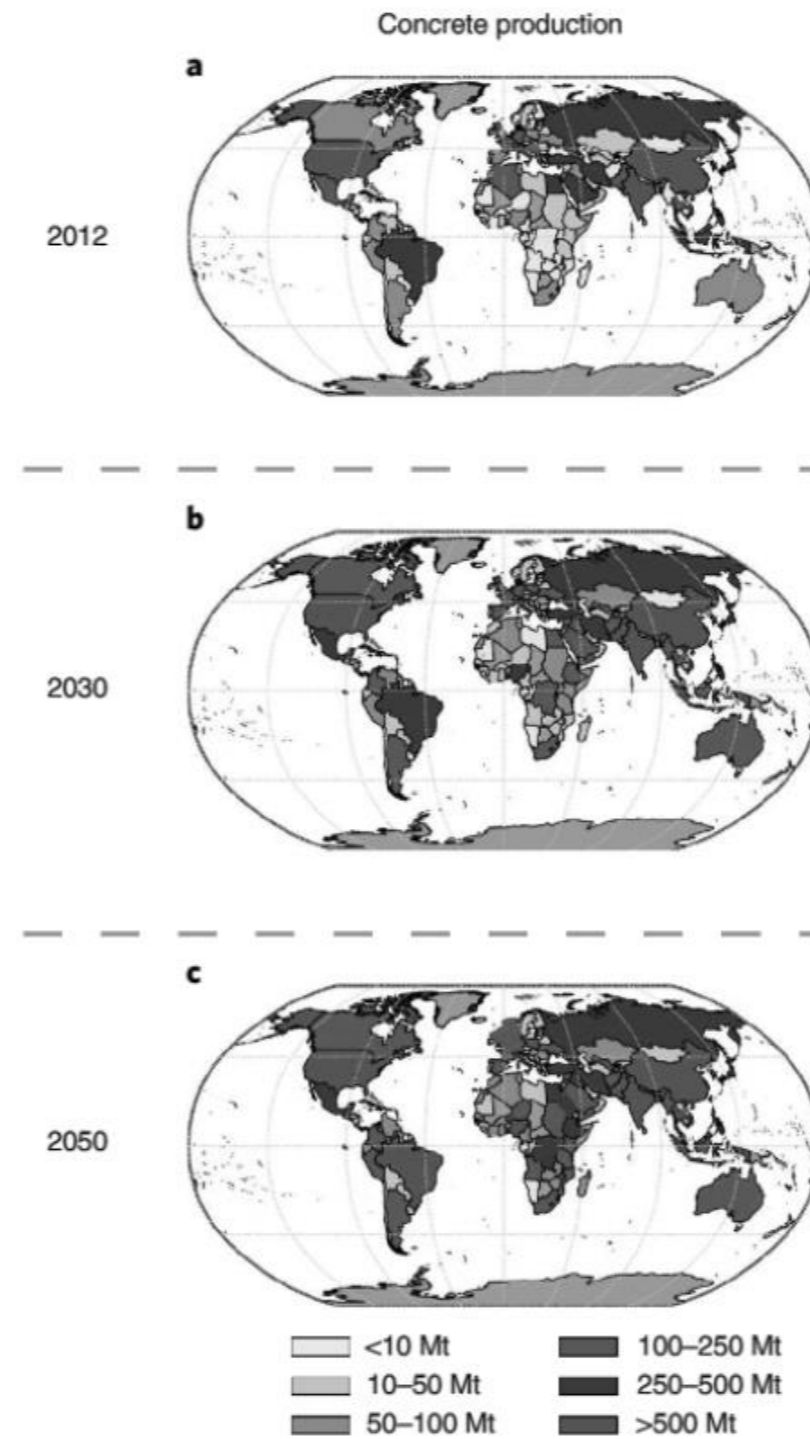
Tänaseks on vee järel teisel kohal olev betoon uuringute kohaselt enim tarbitud tehismaterjal maa peal. Seda materjali kasutatakse aastas umbes 4 miljardit tonni ja tsementi kulub umbes 4 miljardit tonni – rohkem, kui kogu 20. sajandi esimesel poolel ja üle miljardi tonni rohkem, kui igal aastal söödav toit. Ehituses kasutatakse betooni kaks korda rohkem, kui kõiki teisi ehitusmaterjale kokku. (Global Cement and Concrete Association 2023) (Zadeh 2022) (Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis 2014)

Lisaks sellele peaks Chatham House'i raporti kohaselt tsemendi tarbimine 2050. aastaks tõusma enam kui 5,5 miljardi tonnini, kuna vaesemad riigid kiiresti linnastuvad. (A. Miller 2018)

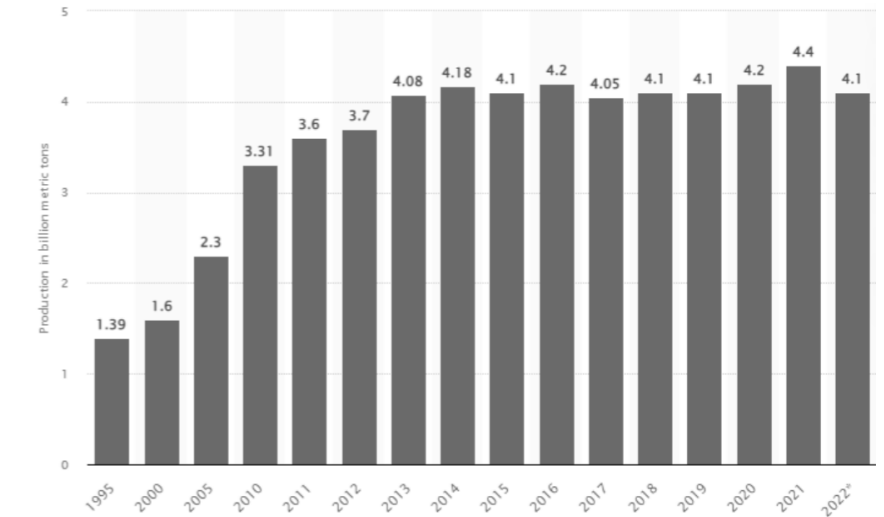
Sellega seoses on juba oht selle materjali nappuse tekkeks, kuna näiteks liiv, mis on betooni üks populaarsemaid komponente, on juba vee järel enim tarbitud esmane ressurss Maal. (Sarah Katz-Lavigne 2022) (Zaicev 2022)

Viimase 20 aasta jooksul on liivatoodang kasvanud 4 miljardilt tonnilt 12 miljardi tonnini aastas, millest 95% moodustab tsemendi tootmine. See suur nõudlus on soodustanud ka massilist ebaseaduslikku liivakaevandamist umbes 70 riigis.

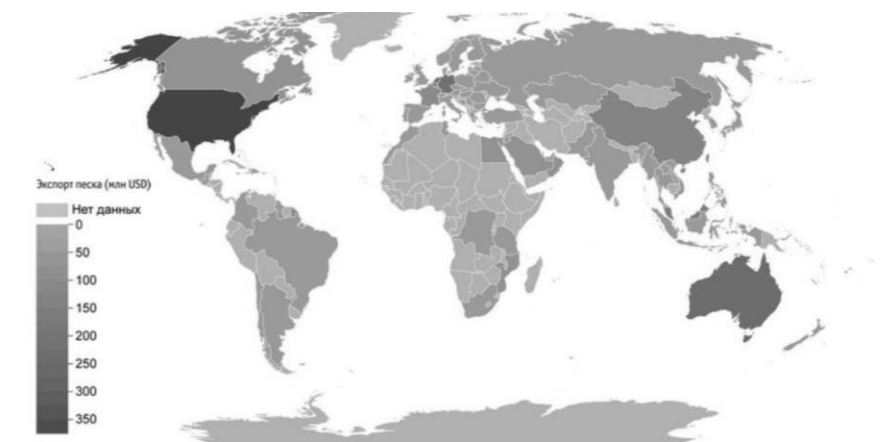
Kui aga keeldute betooni kasutamisest, suureneb koormus muude materjalide, näiteks puidu, kasutamisele. Ja puit on ka piiratud ressurss, sest nagu ütles Dominic DiCenzo (betoonimeister ja Concrete Promotion Councili tegevdirektor Connecticutis): „Kui me ehitaksime selle kõik puidust, kas te kujutate ette, et raiuksime metsi ja vajalikke monokultuure. kasvatada kogu see puu? Hävitatud bioloogilise mitmekesisuse hulk? (Zadeh 2022)



Joonis 4 Betooni tootmine. (A. Miller 2018)



Joonis 5. Tsemendi tootmine. (Garside 2023)



Joonis 6. Liiva tootmine. (Zaicev 2022)

### 2.3.3 Vesi

Vesi on meie biosfääri oluline element, mis ringleb atmosfääri, maa ja ookeanide vahel. Vesi on meie maakeral kõige nõutum töötlemata allikas.

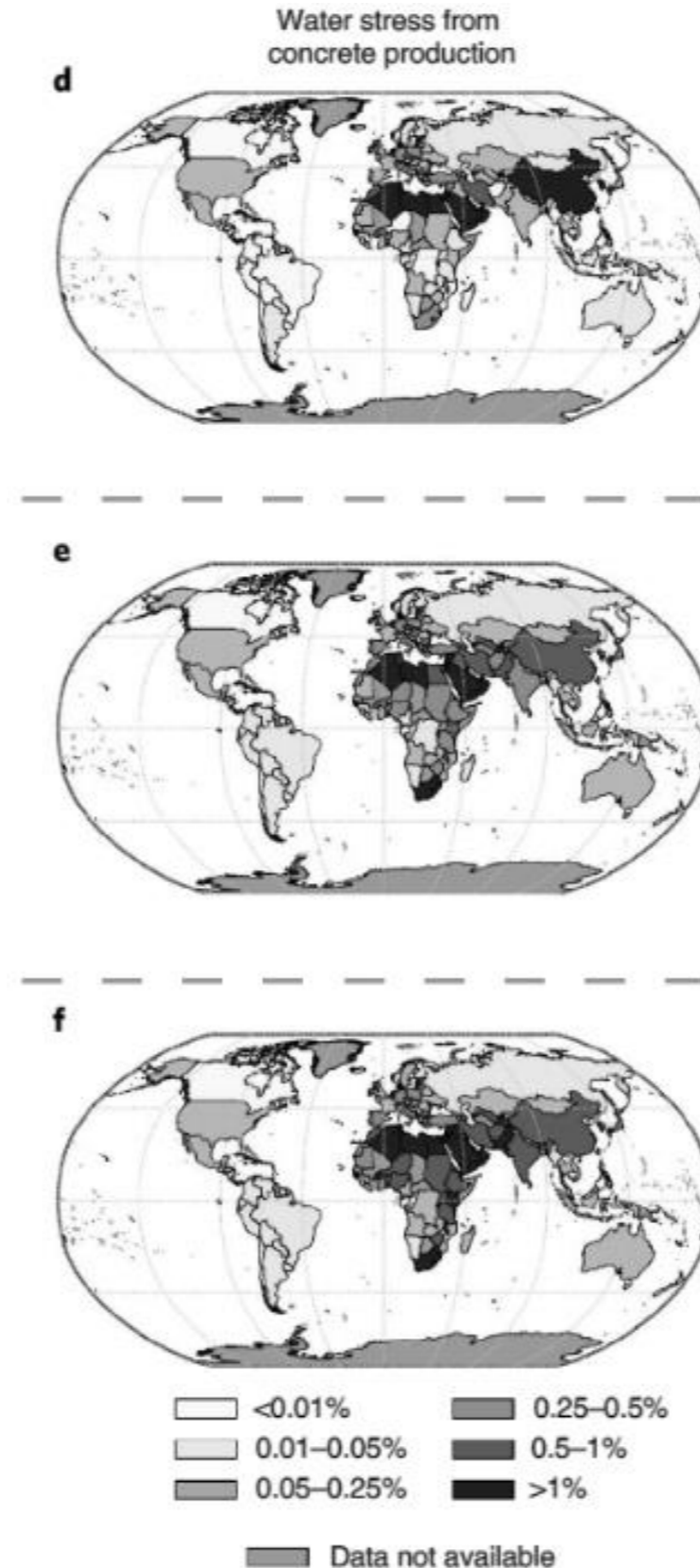
Tänapäeval on taastuvate mageveevarude kõige hõlpsamini kättesaadavad osad – jõgedes, järvedes ja põhjaveekihtides – juba ära kasutatud. Loomulikult ei muutu vee koguhulk meie maakeral selle ringluse tõttu, kuid kvaliteetsest puhtast veest aga napib.

Igal aastal suureneb veetarbimine, kuna tööstus kasvab, linnastumine intensiivistub, elustiilid muutuvad ja rahvaarv suureneb. (Atef Hamdy kuupäev puudub)

Veereostus on tänapäeval tõsine probleem, kuna suurem osa reoveest on puhastamata ning juhitakse otse oja- ja jõgadesse, niisutuskanalitesse ja kuivenduskraavidesse. See toob kaasa tõsise puhta vee puuduse. (Lewis kuupäev puudub)

Kui tootmismeetodid jäävad samaks, kulub betoonitootmise kaudu järgmise 35 aasta jooksul eeldatavasti 590–710 km<sup>3</sup> vett. Prognooside kohaselt tuleb 75% sellest veest piirkondadest, kus aastaks 2025 on oodata vähemalt 10% magevee puudujääki. (A. Miller 2018)

Võimalikud viisid veenõudluse vähendamiseks hõlmavad õiget kütusesegude valikut elektritootmiseks ja toorainete täiustatud ringlussevõttu; need strateegiad võivad aga olla vastuolus kasvahoonegaaside heitkoguste vähendamise eesmärkidega. See aga tähendab, et igal juhul tuleb otsida alternatiivseid lahendusi ja sellest probleemist oma ühiskonnas sagedamini rääkida.



Joonis 7. Betooni tootmisest tulenev veestress. (A. Miller 2018)

### 2.3.4 Lammutustööd ja ehitusjätmed

Ehitus- ja lammutusjätmed moodustavad umbes 35% kõigist maailmas tekkivatest jätmetest. (Llatas 2011)

Enamik neist saadetakse prügilatesse või visatakse välja kontrollimatutesse kohtadesse. Sellistel tegevustel on meie keskkonnale laastav mõju. Esiteks sisaldab ehitusprahht sageli ohtlikke aineid nagu õli, kütused ja lahustid, mis tungivad pinnavõi põhjavette ja põhjustavad seeläbi veereostust. (Lukman A. Akanbi 2017)

See toob kaasa nitraatide sisalduse suurenemise pinnases ja seeläbi köögi- või puuviljade kahjustamise, kui saasteallikas asub maa-alade läheduses. Samuti eraldub pika aja jooksul lagunevatest jätmetest atmosfääri märkimisväärne kogus metaani. Lisaks asjaolule, et need tegurid kahjustavad tõsiselt inimeste tervist, põhjustab metaani eraldumine globaalset soojenemist. Tuleb meeles pidada, et metaan on 21 korda kahjulikum kui süsihappegaas. (Kamyar Kabirifar 2020)

Kolmandaks raiskab lammutamine ressursse, suurendades uute materjalide tootmiseks ja transportimiseks vajalikku energiat, samuti tekib märkimisväärne kogus ehitusmaterjalide ülejääki. (Gui Ye 2012)

Ehitussektori jäätmete vale käitlemine ja kõrvaldamine viimastel aastakümnetel on toonud kaasa maahinna tõusu, ressursside nappuse, keskkonnareostuse ja negatiivse mõju inimeste elutingimustele. Selle taustal pälvib ehitus- ja lammutusjätmete käitlemine üha enam ülemaailmset tähelepanu.

Kuna ehitustempo kasvab, ei saa selliseid probleeme eirata ega vältida.

### 2.3.5 Keemilised lisandid

Nagu varem mainitud, saastab betooni ladustamine pinna- ja põhjavett. Sarnase efekti põhjustab teatud keemiliste lisandite lisamine betoonile. (Guanghong Lai 2023)

Keemilised lisandid on sideainete olulised komponendid ja neid kasutatakse laialdaselt hoonete, sildade, tammide ja muude valdkondade ehitamisel.

Keemiliste lisandite kasutamise peamised põhjused on järgmised:

1. Vähendada betoonehituse maksumust
2. Saavutada betoonis teatud omadused kui muul viisil.

Näiteks võivad keemilised lisandid vähendada tsemendi protsenti, suurendada keskkonnakindlust, pikendada kasutusiga ja vähendada betooni tootmisel tekkivat süsinikdioksiidi heitkogust.

3. Betooni kvaliteedi säilitamine segamise, transportimise, paigaldamise ja kõvenemise etapis ebasoodsates ilmastikutingimustes.

4. Ületada mõned eriolukorrad betoneerimisel.

Seal on väga lai valik keemilisi lisandeid, millest igaühel on erinevad positiivsed või negatiivsed omadused, samuti teatud kasutusnõuded. Kui liigitada need funktsionaalse otstarbe järgi, siis saame nimetada järgmised rühmad: õhku kaasavad (ingl.k. air-entraining), vett vähendavad ((ingl.k. water-reducing), aeglustavad (ingl.k. retarding), kiirendavad (ingl.k. accelerating) ja plastifikaatorid / superplastifikaatorid (ingl.k. plasticizers /superplasticizers). Muud tüüpi keemiliste lisandite ülesandeks on parandada töödeldavust, pidurdada korrosiooni, vähendada leelise ja ränidioksiidi reaktsioonivõimet, kaitsta niiskust, siduda ja värvida. (PCA America's Cement Manufacturers 2023)

Keemiliste lisandite tõhusus sõltub sellistest teguritest nagu sideainete tüüp, mark ja kogus; veesisaldus; koondvorm, gradatsioon ja proportsioonid; segamise aeg; majanduslangus;

ja betooni temperatuur. (America's Cement Manufacturers 2023)

Lisandite, lisandite ja muude betoonielementide suhe, transport, ladustamine - need tegurid nõuavad erilist kontrolli ja teatud teadmisi. Seetõttu on mõnikord raske täpselt kontrollida, milliseid keemilisi lisandeid on betoonile lisatud, kuna ehitusmehed võivad kohapeal lisada mõningaid lisandeid, et kiirendada betooni kõvenemist ja vähendada selle materjali lõpphinda. Sel juhul ei võta töötajad arvesse kahju, mida sellise tegevusega keskkond saab.

Selle tulemusena põhjustab betooni tootmisprotsess ja hiljem selle ladustamine prügilasse õhu, pinnase, pinna- ja põhjavee saastumist.

## 2.4 Olemasolevad strateegiad heitkoguste vähendamiseks tsemendi tootmisel

Tsemenditööstus on süsinikdioksiidi heitkoguste vähendamise strateegiaid järginud alates 1990. aastatest. Hetkel on 4 peamist lahendust, millega on võimalik vähendada betooni tootmisprotsessist tulenevaid keskkonnakahjusid. (Preston 2018)

### 1. Termiline ja elektriline kasutegur

Selline lahendus hõlmab tsemendi tootmiseks kasutatavate seadmete moderniseerimist. Muudatused seadmete disainis, uuendused tõhusamatele ahjudele, mootorite ja veskite uuendamine ning muutuva kiirusega ajamite kasutamine võivad oluliselt mõjutada energiatarbimist ja kulusid.

Selline lahendus on kasulik ka majanduslikust aspektist, kuna uuringute kohaselt vähendab moderniseeritud seadmete kasutamine tsemenditehaste tegevuskulusid 10-15%.

Kuigi seadmete uuendamine võib olla kulukas ja aeganõudev, tasub see end lõpuks ära. Tõhusamad jahvatusprotsessid võivad parandada üldist energiatarbimist ja pakkuda energiasäästu. (World Business Council for Sustainable Development 2009)

### 1. Alternatiivse kütuse kasutamine

Teine lahendus on asendada tsemendiahjude käitamiseks vajalikud fossiilkütused alternatiividega. Algselt oli põhikütuseks kivisüsi, kuid tsemendi tootmiseks saab kasutada ka muid materjale, nagu biomass ja jäätmed. Selline lahendus on ohutu, kuna kõrge töötlemistemperatuur ja lubjakivi olemasolu puhastavad eralduvad gaasid. Siiski tuleb mainida, et kasutatava alternatiivkütuse tüüp sõltub selle kättesaadavusest piirkonnas ja alternatiivi kvaliteedist, kuna kehtivad ka teatud standardid ja nõuded. Kahjuks ei võta kõik tsemenditootjad neid tegureid oma töös arvesse.

Samas areneb ka tööstus. Alternatiivsete kütuste kasutamine tsemendi tootmisel on kõige levinum Euroopas, kus see

moodustab umbes 43% kütusekulust, võrreldes 15% Põhja-Ameerikas, 8% Hiinas, Lõuna-Koreas ja Jaapanis ning umbes 3% Indias. (The Cement Sustainability Initiative (CSI) kuupäev puudub)

### 2. Klinkri vahetus

Kolmas lahendus on klinkri osaline või täielik asendamine mõne muu materjaliga nagu lendtuhk, lubjakivi jne. Selline lahendus aitab kaasa CO2 emissiooni keskmisele vähenemisele ühe tonni toodetud tsemendi kohta 20-30% võrreldes 1980. aastatega. (K. V. Schuldyakov 2016)

### 2. Süsiniku kogumine ja ladustamine

Neljas lahendus seisneb tsemendiahju heidete püüdmises ning seejärel nende kaitsmises ja säilitamises. Varasemad lahendused ei lahenda täielikult tsemenditootmise kahjude vähendamise probleemi. Nii või teisiti ei saa protsessiheitmeid vältida, kui lubjakivi kuumutatakse klinkri tootmiseks lihtsalt kütuse vahetamise ja energiatarbimise tõstmisega.

Sellel lahendusel on puudused: varustus ja geograafilise klastrite puudumine. Esiteks on enamik tehnoloogiaid alles alusuuringute või tutvustamisjärgus. Teiseks on enamik tsemenditehaseid liiga väikesed, et õigustada kogutud CO2 jaotamiseks ja ladustamiseks vajaliku infrastruktuuri ehitamist. Kuid selle trendi arenedes on sellel teemal potentsiaali. (Institute 2016)

«CEMBUREAU». (CEMBUREAU The European Cement Association 2020)

Tooraine kaevandamine - Asukoht looduslike materjalide lähedal.

Purustamine - Tooraine kaevandatakse ja transporditakse esmastesse/sekundaarsetesse purustitesse ning purustatakse 10 cm tükkideks.

Materjali jahvatamine - Lihvimine ja "tooreseguks" muutmine. Tsemendi kõrge kvaliteedi tagamiseks jälgitakse ja kontrollitakse väga hoolikalt tooraine keemilist koostist.

Eelsoojendus - ahjust väljuvad kuumad heitgaasid eelsoojendavad pulbrilist toor segu enne ahju suunamist. Eelsoojendi koosneb tsüklonite seeriast, milles soojusenergiat saadakse kuumadest suitsugaasidest, mille eeliseks on segu eelkuumutamine, protsessi efektiivsus suureneb ja kütust kulub vähem.

Ühistöötlemine - Euroopa tsemenditööstus kasutab nn ühistöötlemise teel pidevalt jäätmeid ressursina. Selline lahendus võimaldab asendada maavarad nagu kivisüsi ja nafta jäätmetega. Samuti ei jää ühistöötlemise tulemusena alles jääkmaterjale nagu tuhk.

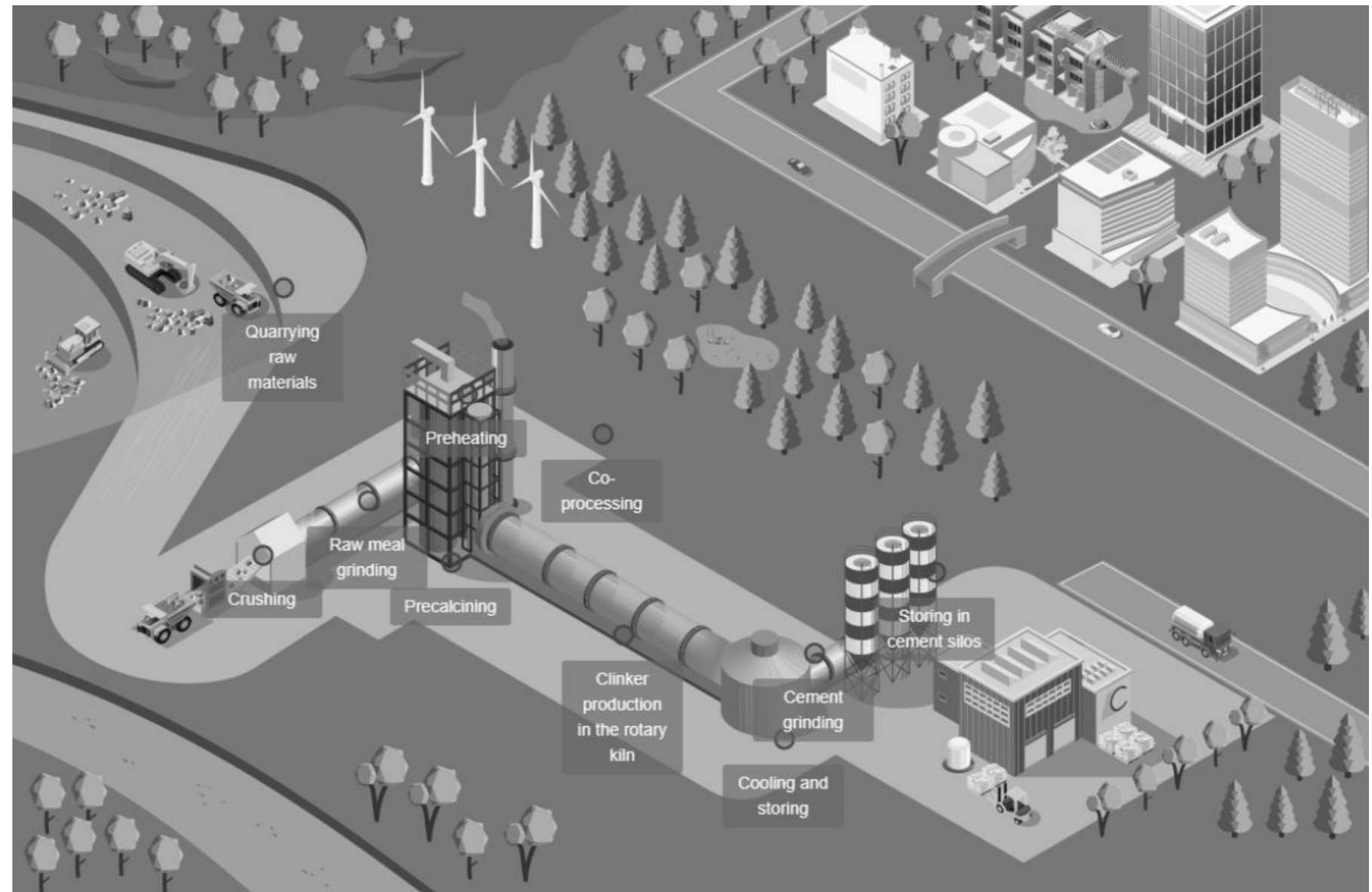
Klinkri tootmine - Temperatuuril 1450° muundatakse toor segu klinkriks.

Jahutamine ja ladustamine - ahjust jahutatakse kuuma klinkrit suure õhuhulgaga, millest osa võib toimida põlemisõhuna. Selle protsessi käigus soojendatakse põlemisõhku, minimeerides süsteemi üldist energiakadu.

Tsemendi lihvimine - lisage 4-5% kipsi. Segu jahvatatakse pulbriks, mida nimetatakse portlandtsemendiks.

Ladustamine tsemendihoidlates - lõpptoode homogeniseeritakse ja ladustatakse tsemendihoidlates ning saadetakse seejärel teise tehasesse. (CEMBUREAU The European Cement Association kuupäev puudub)

Seda peatükki kokku võttes saame nimetada roheline betooni esimese määratluse. Roheline betoon on betoon, mille protsess kahjustab keskkonda võrreldes tavaliste pungade valmistamisega vähem.



Joonis 8. Rohelise betooni võimalik tootmise protsess. (CEMBUREAU The European Cement Association 2020)



### 3 ROHELINE BETOON

#### 3.1 Roheline betoon tänapäeval

**„Globaalne soojenemine, kasvav ressursside nappus ja jäätmete kogunemine on tõstnud teadlikkust tõsiasjast, et me peame nüüd muutma viisi, kuidas me tooteid ja teenuseid kavandame, toodame ja levitame,“** selgitab Saint-Gobain ettevõtte jätkusuutlike toodete ja lahenduste juht Diane Maffre. **„Peame üle minema vastupidavamale mudelile, mis kasutab vähem energiat ja vähem ressursse ning mis peegeldab ühiskonna muutumist.“**

"Make, use and discard" ajastu on möödas, nüüd oleme sisenemas uude ajastusse "vähendada, anda uus otstarve, taaskasutada ja taastöödelda". (BsWei/Shutterstock, Construction: the virtuous circle of the circular economy 2019)

Peaaegu kõigil tasanditel, nagu Euroopa, riiklikul ja linnatasandil, kehtestab avalikkus ranged standardid nii jäätmetekke vältimiseks kui ka taaskasutamise kalduvuse suurendamiseks. Ühtlasi on kasvamas soov oluliselt vähendada energiatarbimist ning propageerida taastuvenergiat ja vähem süsihappegaasi emissiooniga ehituslahendusi.

#### 3.2 Sektori perspektiiv

**„Investorid ja arendajad eelistavad säästvat ehitust üha enam mitte ainult kui innovatsiooniallikat, mis vastab turu uutele vajadustele, vaid ka kui pikaajalisema investeringuna, mis toob keskmises ja pikas perspektiivis vähem riske,“** selgitab Pascal Eveillard. **„Arvestades hoonete eluiga, tuleb projekteerimisel ja ehitamisel vaadata kaugemale energiatarbimusest ja elanike mugavusest, et anda töhusaid vastuseid pikaajalistele väljakutsetele, nagu kliimamuutused, loodusvarade (eriti mõnes maailma piirkonnas vesi) ammendumine, elanike tervise ja bioloogilise mitmekesisuse kaitse.“** (Kürth 2019)

Ehk keskkonna- ja kliimamuutusena peame nende muutustega arvestama ka ehituses, sest meie vajadused ja ka piirangud muutuvad.

Selle teema asjakohasuse kinnitamiseks võime tuua näitena ettevõtte Saint-Gobain, mis on juba mitu aastat uurinud ja arendanud alternatiivseid ehitusmaterjale. Selle ettevõtte eesmärk on tuginedes ametlikul veebisaidil pakutavale teabele ja nende aktiivsele tööle (arvukad loengud ja seminarid), välja töötada selliseid ökomaterjale, mis oleksid kasulikud kogu ehitussektorile tarbijast kuni arendajani või disainerini.

Lõpptarbijale pakuvad need säästva ja kvaliteetse toote ostu, mis on ka tavalahendustega võrreldes palju keskkonnasõbralikum materjal. (BsWei/Shutterstock, Are there any materials that can be infinitely recycled? 2019)

Seega tähendab see trend ehitusprotsessi, kui terviku vaatlemist läbi tööfaasi alates materjalide tootmisest kuni demonteerimiseni. See on täiesti uus ökoloogiline ja sotsiaalne lähenemine tulevikulinnade ehitamisele.

Teadlikult või alateadlikult, kuid avalikkus peab püüdlema järgmise eesmärgi poole: ratsionaalse ja vastutustundliku linna loomine, mis on keskendunud loodusvarade ja elurikkuse säilitamisele.

**„Samuti oleme täielikult kaasatud ringmajanduse edendamisele. Näiteks ISOVERi klaasvill sisaldab kuni 90% taaskasutatud klaasi, uus formaldehüüddivaba sideaine on toodetud biomaterjalidest ning võtsime 2018. aastal kasutusele Prantsusmaal hoonete dekonstrueerimisel tekkiva klaasvilla ringlussevõtu protsessi ja 2021. aastal teise klaasimise protsessi.“** jätkab Pascal Eveillard. **„See lähenemisviis võimaldab meil piirata tooraine kaevandamist ja seega reageerida otseselt loodusvarade vähenemise väljakutsele.“** (Energy Use and Carbon Dioxide Emissions in Energy-Intensive Industries in Key Developing Countries 1999)

### 3.3 Rohelise betooni tüübid

Tegelikult ei ole roheline betoon täiesti uus, testimata leiutis. Nagu varem mainitud, on inimkond kasutanud rohelist betooni juba enne, kui tsement sai tema otsingute peamiseks koostisosaks. Kiirus ja kasum olid aga avalikkuse jaoks prioriteetsemad kui keskkonnakahjud. Markii de Pompadouri fraas "**Après moi le déluge**", mis tähendab "Pärast mind tulgu või veeuputus", sobib siinkohal enam kui hästi kirjeldama meie suhtumist ehitusse ja keskkonda.

Roheline betoon ei ole ka üks konkreetne materjal, mis võib standardbetooni täielikult asendada. Erinevates sektorites kasutatakse palju erinevaid tüüpe. Näiteks rohelist betooni on väga oluline kasutada teedehituses. Selles artiklis annan ettekujutuse konkreetselt ehituses kasutatavatest rohelse betooni tüüpidest. Need betoonitüübid, mis on arhitektuuri jaoks olulised.

Roheline betoon on ehitusmaterjal, milles:

- nagu varem mainitud, on tuletisprotsess keskkonda palju vähem hävitav
- võimalikult suure osa tsemendi asendamine täiendavate sideainetega, eriti nendega, mis on tööstusprotsesside kõrvalsaadused (klaas, lendtuhk jne)
- kasutab loodusvarade asemel taaskasutatud materjale (Anderson 2021)

Selles töös tuuakse välja ainult 3 tüüpi rohelist betooni, mille näitel saate aru, mis on roheline betoon ning kui praktiline ja realistlik on seda reaalses elus kasutada.

### 3.3.1 Lendtuhk (Fly Ash)

Lendtuhk on standardbetooni üks sideaine, mille valmistamisel kasutatakse tsementi.

Lendtuha kasutamise potentsiaal standardbetoonis on olnud teada juba eelmise sajandi algusest, kuid alles California Berkeley ülikooli teedrajavas uuringus (Davis 1937) alustati selle komponendi laialdast kasutamist. Samuti on see trend praegu kasvamas.

Teisisõnu oleme seda ainet kasutanud juba pikka aega, sest see tugevdab betooni omadusi. Küsimus on ainult selle komponendi seos teistega. Olenevalt komponentide vahekorrad muutub ka ulatus. Lendtuha hulka betoonis mõjutavad nii geograafiline asukoht kui ka kliima. (Michael Thomas 2007)

Tabel 1. Lendtuha doseerimistasemed. (Michael Thomas 2007)

Level of Fly Ash % by mass of total cementitious material	Classification
<15	Low
15-30	Moderate
30-50	High
>50	Very High

Lendtuhk on peen pulber, mis on elektrihaamades söetolmu põletamise kõrvalsaadus ja mida peab reguleerima valitsus.

Sellele tootele on juurdepääs ainult vastava väljaõppe ja lubadega ettevõtetal. Kuid see kvaliteet ei takista selle materjali populaarsust, kuna lendtuhatsement on üldiselt kergemini kättesaadav kui traditsiooniline tsement, mistõttu on see betoonitootjate jaoks atraktiivne valik.

Kui segate lendtuha alumiiniumoksiidi ja räni sisaldava vedelikuga, saate tsemendi. Tänu sellele on lendtuhk ideaalne segutsemendi, mosaiikplaatide, õõnestelliste ja paljude muude ehitusmaterjalide tooraineks. Betoonisegudes kasutatav lendtuhk suurendab betooni tugevust ja isolatsiooni ning muudab pumpamise sujuvamaks. (Dale 2023)

Lendtuhk sisaldab kaadmiumi, elavhõbedat ja arseeni. See materjal võib saastada veeteid, põhjavett, joogivett ja õhku, ohustades inimesi, elusloodust ja keskkonda, kui seda korralikult ei käidelda. Parim ja ohutum koht lendtuha jaoks on betoon. Betoonisegusse viimisel seostub lendtuhk keemiliselt portlandtsemendiga ja muutub osaks betooni kaltsiumsilikaathüdraadist (sideaine või liim). Nii et lisandid seotakse selles protsessis kokku. Lendtuha märgkõrvaldamisprotsess elektrihaamas hakkab kiiresti vananema ja kommunaalettevõtted kulutavad sadu miljoneid dollareid, et luua söe põlemisproduktide jaoks ohutuid ja vastupidavaid prügilaid, mida ei saa hästi kasutada. Betoonis sisalduv lendtuhk aitab vältida leelise-räni reaktsiooni, mis põhjustab sisemist paisumist, mis põhjustab betooni pragunemist; Lendtuhk parandab vastupidavust, hoides ära looduslike või kunstlike kloriidide, näiteks jääsulatussoolade, sulfaatide rünnaku; Lõpuks aitab lendtuhk parandada betooni tugevust, põhjustades portlandtsemendi täielikuma hüdratatsiooni (kõvenemise).

Sel põhjusel vähendab selle materjali kasutamine ehitusmaterjalides prügilasse saatmise või "metsas" ladustamise asemel keskkonda mõjutavate ohtlike jäätmete hulka. Veelgi enam, 1/4 või 1/3 tsemendi asendamine lendtuhaaga betoonis vähendab ka tsemendi tootmisel tekkivat CO2 heitkogust. Samuti vähendab see betoonitootmise keskkonnamõju. (Michael Thomas 2007)

Tabel 2. Lendtuha eeliste ja puuduste tabel. (Dale 2023)

Tasuvam kui tavaline portlandtsement.	Kõvenemine ja tardumine võtab kauem aega, eriti külmas kliimas.
Suurendab betooni tugevust.	Külm kliima nõuab õhku kaasahaaravaid lisandeid
Aitab vältida betooni pragunemist või paisumist, vähendab betooni läbilaskevõimet	Suurenenud nõuded ringlussevõtu protsessis.
Vastupidav sulfaatidele ja leelisagregaatide reaktsioonidele.	
Taaskasutab söepõletusjäätmeid ja vähendab CO2 heitkoguseid.	

### 3.3.2 Post-consumer glass

Klaas on teist tüüpi jäätmed, mida toodetakse suurtes kogustes ja mida on raske kõrvaldada. Teatavasti kogutakse kokku enamik klaasijäätmeid, eriti konteinerklaas, sulatatakse ja kasutatakse uue klaasi tootmiseks. Taaskasutusprotsess nõuab aga tõeliselt kolossaalseid jõude, aega ja raha. (Dr. Kaveh Afshinnia 2019)

Klaasid tuleb enne materjali taaskasutamist sorteerida värvi ja tüübi järgi, kuna teatud värvil on erinev struktuur ja seda saab kasutada ainult kindlas piirkonnas. Hiljem tuleb eemaldada metalloosad ja pudelikorgid. Lisaks tuleb hoolikalt eemaldada muud võõrkehade, vastasel juhul võib tekkiv klaas olla defektne. Purule jääv keraamika kogus ei tohi ületada 25 g tonni kohta ja metalliosakeste kogus alla 5 g tonni kohta. Alles pärast kõiki neid ettevalmistusi on võimalik klaasijäätmeid jahvatada väikesteks osakesteks ja muuta need seguks, mida nimetatakse puruks.

Teisisõnu, klaasi ringlussevõtt on väga raske ja kallis protsess. Selle tulemusena võetakse täna taaskasutusse vaid 30% kogu klaasijäätmete kogusest. (Hessam AzariJafari 2022)

USA Keskkonnakaitseagentuuri raporti kohaselt kasvas jäätmete koguhulk 88 miljonilt tonnilt 1960. aastal 262 miljoni tonnini 2015. aastal. 2015. aastal võeti ringlusse 26% ja kompostiti 9% jäätmetest. Lisaks põletati 13% energia taaskasutamiseks ja 52% ladestati prügilasse. (Dr. Kaveh Afshinnia 2019)

Vaatamata töötlemise keerukusele täiustatakse seda protsessi aga iga päev. Juba praegu leiutatakse seadmeid, mis kiirendavad ja hõlbustavad sorteerimisprotsessi. See suundumus annab avalikkusele võimaluse vähendada klaasijäätmeid ja kasutada seda muudes valdkondades, näiteks betoonis.

Varem mainiti, et meil on tõsised ressursiprobleemid. Taaskasutatud klaasi kasutamine betoonis vähendab jäätmete hulka ja vähendab ka nõudlust loodusvarade järele, mis meie maa peal järk-järgult otsa saavad. Seega saab portlandtsemendi asendamiseks kasutada klaaspulbrit, tavaliselt asendustasemel 10–30 massiprotsenti. Portlandtsemendi osalise asendamisega vähendame ka oma süsiniku jalajälge.

Klaasijäätmete pulbri kasutamine parandab oluliselt tsemendimördi ja betooni mehaanilisi ja tugevusomadusi, mille pulbriosakeste suurus on alla 45 mikroni ja tsemendi asendussuhe umbes 10-40%. Samuti on moes peen täitematerjal täielikult asendada mördis klaaspulbriga. Selline tegevus ei avalda negatiivset mõju betooni mehaanilistele ja tugevusomadustele, kui osakeste suurus on alla 1 mm. (Md. Nabi Newaz Khan 2019)

Kuid seda tüüpi betooni tootmisprotsessile kehtivad ka teatud nõuded, mida tuleb hoolikalt kontrollida. Klaasipulbriga segatud tsemendimördi või betooni omadused sõltuvad peamiselt osakeste suurusest, asendusastmest, värvist ja klaasi tüübist. Samuti on oluline tegur kõvenemiseks kuluv aeg ja kliima temperatuur. (Weihua Jin 2000)

### 3.3.3 Taaskasutatud betoon

Nagu varem mainitud, on betoon tänapäeval üks populaarsemaid ehitusmaterjale. Sel põhjusel seisame silmitsi ka suure hulga kasutatud betooni jäätmetega. Arvestades, et betooni populaarsus kasvab, võib julgelt väita, et tulevikus kasvab ka probleem prügiga. Sel juhul võib leida mitmeid võimalusi, kuidas prügi hulka vähendada. Näiteks saate selle taaskasutada. Selle tulemusena saame kolmandat tüüpi rohelist betooni, millel on eelmiste näidetega võrreldes mitmeid eeliseid.

Samuti, kui võrrelda selles töös toodud rohebetooni liike, on viimane tüüp tänapäevases elus paremini kättesaadav. Selle põhjust iseloomustab järgmine arhitekt Philipp Noger'i väide.

**"Uue ehituse jaoks linnajäätmete materjalide kaevandamine on mõttekas, kuid ainult siis, kui need on kohapeal saadaval,"** märkis Philipp Noger Zürichi ehitusbüroost. **"Ehitusmaterjalide taaskasutamine on eriti kasulik tihedas linnapiirkondades, kus tekib pidev ehitus- ja lammutusjäätmete voog. Taaskasutatud betooni kasutamine lähistel vahemaadel on sageli odavam kui uus betoon. Lõpuks,"** rõhutas arhitekt, **"ka meie järgnesime neile ja tekkis turg. Nii suudame vähendada prügilasse ladestamist ja kaitsta nappe loodusvarasid. Pikas perspektiivis säästab see strateegia ka Zürichi linna raha ja toob betooni ringlussevõtuga seotud ettevõtetele uusi võimalusi. Suurt mõju avaldas Letzigrundi staadioni ehitamine, kus ajasurve tõi kaasa ringlussevõetud kaevematerjalide otsese kasutamise kohapeal.** (Kürth 2019)

Esitatud kogemusi Saksamaal staadioni ehitamisel saab kasutada ka meie riigis, Eestis.

Punga saab taaskasutada, kasutades materjali väikesteks ja suurteks osakesteks jahvatamiseks sõela, terasosakeste eemaldamiseks magnetit ja muude võõrkehade eemaldamiseks

vee flotatsiooni. Pärast sarnaseid jõupingutusi saab tekkivat betoonitolmu kasutada täitematerjalina.

Loomulikult nõuab kirjeldatud protsess palju aega ja vaeva, kuna selline tolm sisaldab suures koguses saasteaineid, mis tuleb kõrvaldada. Kuid esiteks on inimkonnal praegu vähe valikut, kuna on võimatu keelduda betoonist ja jätkata ammendumas olevate ressursside kasutamist. Teiseks vähendab selline lahendus killustiku või liiva väljavõtmist tahke täitematerjalina ning säästab 6123 liitrit vett ja 900 kg süsihappegaasi.

Samuti tuleb märkida, et ainult 30% jämedat või keskmise suurusega ringlussevõetud täitematerjali saab asendada, kuna uue toote jõudlus võib suuremate vahetõrgete korral halveneda. Kui aga betoon purustada liiva suuruseks, siis sellise materjali kasutamine võimaldab toota veelgi kvaliteetsemat betooni. (Huixia Wu 2023)

### 3.3.4 Raudbetoon

Raudbetoon on betoonist ja terasest koosnev komposiitmaterjal. Sellisel kujul annab betoon materjalile survetugevuse, samas kui teras, mis on kinnitatud armatuurvarraste või võrgusilma kujul, siis annab see tõmbetugevuse. See lahendus tagab plastilisuse mis tahes mehaanilise teguri korral, näiteks maavärin. Sel põhjusel mängib terasarmatuur raudbetoonkonstruktsioonides väga olulist rolli. Armatuurvardad on tavaliselt valmistatud süsinikterasest ribidega, ribid annavad betooniga tingimusliku nakke. Armeeringu hulk raudbetoonis on suhteliselt väike ja sõltub otstarbest ja projekteerimistingimustest. Kõige sagedamini varieerub armatuuri kogus 1% väikeste talade ja plaatide puhul kuni 6% mõne samba puhul.

Kuna raudbetoon mängib tänapäeva elus tõsist rolli, ei saa selle olemasolu tähelepanuta jätta. Tänapäeval raudbetooni ehituses kasutatakse teras koosneb 100% taaskasutatud terasejäätmest. Peale selle saab kasutatud armatuuri kasutusaja lõpus taastada, ringluse võtta ja taaskasutada. Selline protsess kulutab ühe tonni terasarmatuuri töötlemiseks poole vähem energiat kui konstruktsiooniterase töötlemine.

Komposiitkonstruktsiooni saab kasutada mis tahes tüüpi konstruktsioonide, näiteks sildade, maanteed ja hoonete ehitamiseks. Kõige sagedamini kasutatakse komposiitbetooni aga kandelementide ehitamisel, mis peavad taluma suuri koormusi, nagu vundamendid, alusmüürid, kandesambad. Kokkupandav terasarmatuur ja betoon töötavad koos, et luua üks tugevamaid ja kulutõhusamaid komposiitmaterjale.

See tulemus saavutatakse järgmiste tegurite tõttu:

- Terasel ja pungil on samad soojuspaisumistegurid, mis toob kaasa minimaalse sisemise pinget kahe omavahel ühendatud materjali erinevast paisumisest või kokkutõmbumisest temperatuurimuutustest tulenevalt.

- Tänu betooni "vedel kivi" omadusele võtab betoon terasest pinnadetailide kuju ja võimaldab seega mistahes pinget erinevate materjalide vahel üle kanda.

- Leeliselise keemilise keskkonna tulemusena, mille annab kaltsiumkarbonaat (lubi), tekib terase pinnale teatud kile. See kile muudab terase korrosioonile palju vastupidavamaks kui happelises või neutraalses keskkonnas.

Ahvatlev alternatiiv tugevdatud terasele on kiudude kasutamine tugevdamiseks. Selline lahendus on jätkusuutlik ja konstruktsiooniliselt teostatav, kuna polümeerkiududega (FRP) tugevdatud klaas-, aramiid- ja süsinikkomposiitmaterjalid on viis korda kergemad kui teras, kuus korda tugevamad, mittemagnetilised ja mittesöövitavad. Seda lahendust ei kasutata enamasti hoonete ehitamisel, vaid seda kasutatakse infrastruktuuri lõikude tugevdamiseks, näiteks sildade jaoks, mis mõneks ajaks kuluvad, vajavad hooldust või korrodeeruvad. (ASBL, European Concrete Platform 2009)

### 3.4 Kriitika

On kriitiline arvamus, mis keskendub roheline betooni kasutamise puudustele ja mõnel juhul selle materjali kasutatusele üldiselt. Mõned artiklid või seltsi liikmed väidavad, et roheline betoon on "seebimull", mida teatud ettevõtted või tööstusettevõtted oma toodete paremaks reklaamimiseks üles puhuvad. Selles osas tuuakse välja peamised roheline betooni kasutamist kritiseerivad argumendid. (Ahsan Nawaz 2022)

Esimene argument on roheliste betoonkomponentide transport. Näide: roheline betoon koos komponendina taaskasutatud klaasiga. Teisisõnu töödeldakse klaasi ühes punktis ja transporditakse seejärel teise punkti, kus lõpptoode ehk betoon on juba toodetud. Selliste komponentide transportimine kulutab palju energiat ja kütust, mistõttu betoon ei ole piisavalt roheline. Seda probleemi saab aga vältida, kui transporditee on lühem. Arvestades kõiki keskkonnaprobleeme ja kasvavat huvi selle teema vastu, võib järeldada, et betooni selline populaarsus, aga ka vajadus muuta avalikkuse suhtumist ehitusse, tingib uute tehaste ja ettevõtete avamise, mis suudavad paremini koostööd teha.

Teine argument puudutab ehitusäri suhtumist rohelistesse betooni. Teatud tüüpi roheline betooni kõvenemine võtab kauem aega, eriti külmas kliimas. See mõjutab töövõtjate programme ja loomulikult on aeg raha. See omadus paneb ehitajad lisama näiteks rohkem purustatud granuleeritud kõrgahjuräbu, mis kiirendab tahkumisprotsessi. Selle tulemusena on betoonil purustatud granuleeritud kõrgahjuräbu ja tsemendi proportsioonid ebavõrdsed. See tähendab, et segus on suurenenud nii tsemendi kui ka jahvatatud granuleeritud kõrgahjuräbu kogus, mis ületab oluliselt tugevusnõuete täitmiseks, vaid programmi täiustamiseks. See toiming tühistab kogu roheline betooni kasutamise idee.

Viimane argument aga tähendab vaid seda, et ühiskond peaks muutma oma suhtumist sellesse teemasse. Esiteks peaks riik tagama parema kontrolli ehitusfirmade tegevuse üle. Teiseks

peaks avalikkus rohkem tõstatama ehituse kahjuliku mõju ja loodusvarade nappuse teemat. Seda teemat tuleks meie tegemistes ja igapäevaelus paremini kajastada. Sel juhul peavad ehitussektori inimesed olema teadlikud oma valiku tulemusest ja tegevusest. (Elliott 2023)

#### 3.4.1 Logistika

Transport on oluline ja otsustav samm betooni tootmisel ja kasutamisel. Selle protsessi käigus, kui nõutud tingimused ei ole täidetud, võib betoon kaotada osa oma omadustest. Esiteks on oluline betooni homogeensus, mis peab transportimisel kogu teekonna jooksul muutuma. Kui transportimisel kasutatakse betoonisegisti veoautot, siis see seade säilitab betooni vedela oleku, segades või pöörates trumlit kuni tarnimiseni. Valmisbetooni kasutamisel on ajaline piirang, kuna tegemist on värsket tootega, mis tuleb valada 30 minuti jooksul peale ehitusplatsile saabumist. Maksimaalne aeg, mis transpordile kulub, on poolteist tundi.

Samuti hõlmab betooni transport põhimõtteliselt nagu ka teiste ehitusmaterjalide, masinate ja veokite kasutamist kogu tootmis-, kasutus- ja utiliseerimisprotsessi vältel. Selle tulemusena seisab ühiskond silmitsi selliste negatiivsete mõjudega nagu mürasaaste, gaasiheitmed ja tolm. Kuid kuna planeet seisab juba täna silmitsi ressursside nappuse ja keskkonnasaaste tagajärgedega, on kiirenemas säästva arengu trend, mis püüab raskusi lahendada nii juhtimis-, strateegilise- kui ka operatiivsest aspektist. Nii või teisiti planeedi arenguprotsess ei peatu. (ASBL, European Concrete Platform 2009)

### 3.5 Rohelise betooni perspektiiv

Tsemenditööstus seisab silmitsi kasvava survega süsinikdioksiidi heitkoguste vähendamiseks, kuna mitmed jurisdiktsioonid, sealhulgas EL, Kanada ja Korea, on selle sektori oma heitkoguste hinnakujundussüsteemidesse kaasanud. ELis vaatavad nad praegu läbi oma hoonete energiatõhususe direktiivi, (Commission 2021) mille eesmärk on saavutada 2050. aastaks vähese süsinikdioksiidihetega ja energiatõhus hoonefond. Eeldatavasti peegeldavad muudatused suuremaid ambitsioone, pannes suurema vastutuse ehitussektorile tervikuna. Süsinikdioksiidi heitkogustele on kavas kehtestada hind, et julgustada olemasolevaid ettevõtteid arendama keskkonnasõbralikke ehitusmaterjalide tootmise meetodeid. (SG Voice 2022)

Juba praegu on suur hulk ettevõtteid, kes pakuvad uuringute põhjal alternatiivseid lahendusi betooni tootmiseks, millel on minimaalne keskkonnamõju. Samuti on olemas Euroopa Tsemendiasotsiatsioon "CEMBUREAU", mis annab olulise panuse selle valdkonna arengusse. Ühingu 5C tunnuslause (clinker, cement, concrete, construction, carbonation). (CEMBUREAU The European Cement Association 2020)



Joonis 9. CEMBUREAU 2050 tegevuskava. (Cementing the European Green Deal n.d.)

Nende uuringute kohaselt on võrreldes 1990. aastaga, mil iga tonni tsemendi tootmiseks toodeti 783 kg süsihappegaasi, aastal 2050 on võimalik saavutada süsinikdioksiidi eraldumine atmosfääri nulli piirile, kui võtta kõik ülaltoodud ettepanekud kasutusse. (Cementing the European Green Deal kuupäev puudub)

Kasvav ressursside nappus ja prügilate karmim reguleerimine sunnib tööstusettevõtteid otsima lahendusi, mis on seotud uute taaskasutusteenustega. Veelgi enam, mida keerulisem on töötlemisprotsess, seda kallim see on. Ja jäätmete sorteerimise, ringlussevõtu või kogumise võimalused võivad mõnikord olla keskkonnaprobleemide ees prioriteetsed. Võttes aga arvesse loodusvarade probleemi, mis toob kaasa tulevikus hinnatõusu, riigi suhtumist sellesse teemasse betoonitootjatele esitatavate nõuete tõstmise näol, võime järeldada, et tulevikus väga suure tõenäosusega kulud suurenevad. Mõned ettevõtted võivad tegevuse lõpetada, kui nad ei suuda kohaneda uute tingimustega ja konkureerida uute ettevõtetega, mille arv kasvab iga aastaga.

Lisaks võib tootmise ümberkorraldamine ettevõtetele positiivselt mõjuda. "**Selles liikumises osalemine võimaldab ettevõtetel saavutada ka majanduskasvu, eriti transpordi-, tootmis- ja hoolduskulude osas,**" ütleb Diane Maffre. „**Samuti sillutab see teed uutele ärivõimalustele, luues taaskasutuskeskusi ja vähese CO<sub>2</sub>-heitega rajatisi. Selle protsessi lõpptulemuseks on uued töökohad, lepingud ja palju kasulikku sünergiat, kuna jätkusuutlik innovatsioon hõlmab suurt hulka osalisi, kes kõik on pühendunud ressursside säästmisele ja keskkonna kaitsmisele.**“ (BsWei/Shutterstock, Construction: the virtuous circle of the circular economy 2019)

Seda fakti kinnitab ka Euroopa Tsemendiasotsiatsiooni CEMBUREAU koostatud kaart. See dokument kajastab erinevaid ettevõtteid, mis arendavad ja toodavad vähem keskkonda

kahjustavaid ehitusmaterjale. (CEMBUREAU The European Cement Association 2020)



Joonis 10. CEMBUREAU innovatsiooniprojektide kaart. (CEMBUREAU The European Cement Association 2020)

Kokkuvõttes võib öelda, et tootmise moderniseerimise protsess nõuab märkimisväärset aega, raha, pikki uuringuid, kuid see võib viia positiivse tulemuseni. Nii või teisiti, kui meie maailm ei areneks ega otsiks alternatiivseid lahendusi, oleks oht jääda keskaega. Ja nagu uuringud ja ka majandussuundumused näitavad, valib suur hulk ettevõtteid praegu innovatsiooni ja moderniseerimise tee.

### 3.5.1 Areng Soomes

Kuna käesolev töö tutvustab roheline betooni uurimist kaasaegses arhitektuuris Soomes Turu linnas asuva Ajaloo ja Tuleviku Muuseumi näitel, on käesolev peatükk pühendatud Soome ühiskonna suhtumisele sellesse teemasse. (Finland's Betolar develops green cement as construction races to decarbonise 2021)

Soome on üks neist Euroopa Liidu riikidest, mis on pikka aega pühendunud oma kliimamõjude vähendamisele, samuti süsinikuneutraalsuse saavutamisele 2050. aastaks. Nende eesmärkide saavutamiseks astunud samme on näha pealinnas Helsingi tegevuses. Linn ei kasuta ainult regulatsiooni, vaid ka koostööd, mis väljendub suhtluses ettevõtetega, nii globaalsete kui ka kohalikega. Näitena ütles Helsingi linnakeskkonna abilinnapea Annie Sinnemäki ehitusjätmete kohta: **"Kui me hoone lammutame, siis teeme nende ettevõtetega koostööd, et inspireerida jäätmete ringlussevõttu ehituses"**. (EUROCITIES 2023)

Helsingi julgustab ka ettevõtteid uurima ja arendama paremaid materjale, alates puidust kuni madala süsinikusisaldusega betoonini, ning ka uusi ehitusprojekte, mis võivad vähendada CO2 heitkoguseid.

Huvi keskkonnateemade vastu kasvab pidevalt nii avalikul kui ka seadusandlikul tasandil. **"Viis aastat tagasi leidus vaevalt sellest huvitatud ettevõtteid; nüüd hakkavad kõik nõustuma,"** rääkis Sinnemäki.

Linn toetab ka ettevõtjaid ja innovaatoreid, kes otsivad alternatiivseid ehitusviise ja keskkonnasõbralike materjalide kasutamist. Näitena võib tuua 28. märtsil 2023 ilmunud EU-Startupsi artikli, mis väidab, et Soome startup Carbonaide saab süsiniknegatiivse betooni tootmise võimaldamiseks 1,8 miljonit eurot. (Allen 2023)

Betooni- ja ehitussektor laiemalt – otsib võimalusi CO2 emissiooni vähendamiseks ja ringlussevõtu suurendamiseks, seda enam, et ELi roheline kokkuleppe üks peamisi eesmärke on laiendada "ringmajandust" ja leida uusi võimalusi tööstusjätmete kasutamiseks. Riigi tasandil väljendub see Soome parlamentide soovis võtta vastu seadusandlus hoonete olulusringi heitkoguste kohta, st nende üldist süsiniku jalajälge alates materjalide tootmisest kuni nende igapäevase kasutamiseni. (EUROCITIES 2023)

Soomes töötati aastatel 2021 ja 2022 välja betooni klassifitseerimise süsteem Soome Betooniliidu, Soome Betoonitööstuse Liidu (Betoniteollisuus ry) ja Aalto Ülikooli koostöös. See süsteem põhineb Norras kasutataval vastaval klassifikatsioonisüsteemil. Süsteem kategoriseerib betoonitüübid süsinikuheite alusel, võimaldades juba projekteerimisetapis valida madala süsinikusisaldusega betooni. (Jouni Punkki 2022)

Soomes on suur hulk ettevõtteid ja äriühinguid, kes töötavad välja uusi meetodeid vähema süsinikdioksiidiga roheline betooni tootmiseks. Näiteks firma Betolar. Ettevõtte toodab praegu madala süsinikusisaldusega tsementi, kasutades alternatiivseid tööstusjätmeid protsessis, mis võib vähendada süsinikdioksiidi heitkoguseid kuni 80%. (Betolar Plc 2023)

Rahvusvaheline ettevõtte "CONSLOS" on võtnud kasutusele Consolis Green Spine Line® - sertifitseeritud ja keskkonnasõbralikud betoondetailid, lahendused ja ehitusmeetodid. Ettevõtte terviklik ja uuenduslik lähenemine hõlmab retseptide optimeerimist, läbimõeldud disaini, tööstuslikku tootmist, elementide taaskasutamist, materjalide ringlussevõttu ja strateegilist partnerlust meie klientide, tööstuse ja akadeemiliste ringkondadega. (Consolis 2023)

Samuti on oluline rõhutada tõsiasja, et see ettevõtte ei tegutse ainult Soomes, vaid veel umbes 17 riigis, sealhulgas Eestis. (Consolis 2023)



Joonis 11. Consolis ettevõtete asukohtade kaart. (Consolis 2023)



## 4 ROHELISE BETOONI KASUTAMINE ARHITEKTUURIS

### 4.1 Ehitus tänapäeval

Nagu varem mainitud, on inimkonna eluks kasutatavad loodusressursid piiratud ning lähitulevikus ühiskonna tegevusest tulenevad keskkonnakahjud, kui lähenemist ei muudeta, võivad kaasa tuua pöördumatuid tagajärgi.

Seetõttu tõstatatakse juba rahvusvahelisel tasandil küsimus meie suhtumise muutmisest majandusse. Nagu varem mainitud, on praegu domineeriv lineaarne majandusmudel ehk "tootmise-tarbimise-utiliseerimise" ajastu lõppemas. Põhjus on selles, et lineaarne majandusmudel ei ole jätkusuutlik lahendus. See valik ei suuda tagada inimkonna ja keskkonna heaolu ega vasta kaasaegse ühiskonna pikaajalistele vajadustele. (Republic of Estonia, Ministry of the Environment 2021)

Kuna inimkond oma arengus ei peatu, siis on juba alternatiivne lahendus - Ringmajandus. Selle mudeli eesmärk on murda majanduskasvu sõltuvust esmaste toorainete saadavusest või kasutamisest, luues minimaalsete jäätmetega ringikujulise tootmise ja tarbimise süsteemi. Teisisõnu peab ühiskond Maa ressursse efektiivsemalt majandama kogu elutsükli jooksul, mis algab tootmise ja tarbimisega ning lõpeb jäätmete taastamise ja taaskasutamisega. Inimkond peaks väärtustama rohkem praegu omatavaid materjale ja tootma vähem jäätmeid.

See majandusmudel peaks aga lisaks positiivsele keskkonnamõjule vähendama ka materjalide tootmiskulusid, suurendama majanduskasvu potentsiaali ja parandama oma ajaloolist mainet. Sest kui me oma suhtumist sellesse teemasse ei muuda, võib järeltulevat põlvkonda oodata pöördumatu tulemus. Seetõttu on oluline saavutada jätkusuutlik majanduskasv ja liikuda ressursitõhusa ringmajanduse poole, mis keskendub:

Taaskasutamisele (ingl. k. Reusing)

Remondile (ingl. k. Repairing)

Ümbertöötlemisele(ingl. k. Recycling)

Sellele mudelile üleminek nõuab muudatusi kogu toote elutsükli ahelas, alates disainist ja uutest ärimudelitest kuni tarbijaharjumusteni. Uute ja olemasolevate toodete puhul keskendutakse kogu olelusringi kavandamisele, keskendudes järgmisele:

- jätkusuutlik materjalivalik
- materjali kvaliteet, kuna loodud toote pikk kasutusiga ja selle parandamise lihtsus pikendavad elutsükli
- väärtusahela optimeerimine
- korduskasutus ja taaskasutus, mis on võimalik tänu mitmekülgsusele, moodulosadele jms.

Lisaks nutikatele disainilahendustele on majanduskasvu ümbersuunamisel jätkusuutlikumale oma osa ökoinnovatsioonil ja tehnoloogilistel arengutel. (European Parliament 2023)

## 4.2 Rohelisest betoonist hoonete näited

Kuna roheline betoon on üks tänapäeval arendatava ja kasutatava ringmajanduse mudeli elemente, tasub tuua näiteid projektidest, mis näitavad, et see suund on võimalik, vajalik ja kasulik nii keskkonnale kui ka tarbijale ja tootjale.

### 4.2.1 Taani ridaelamud



Joonis 12. Taani ridaelamute render. (Architizer n.d.)

Esimene näide praeguses töös olevast rohelisest betoonist ehitatud hoonest on 2018. aastal valminud jätkusuutlik Skandinaavia linnamaja, mis asub Taanis Kopenhaageni äärelinnas Orestadis. Peamine erinevus selle hoone ja teiste "keskkonnasõbralike hoonete" vahel on asjaolu, et tegemist oli turutingimustel ehitatud äriprojektiga, millel olid teatud piirangud ja nõuded. See ei ole ühekordne "jätkusuutlik" projekt, mille lõpuleviimiseks on vähem vastuolulisi nõudeid. Lendager Group soovib rõhutada, et projekti eesmärk on "stimuleerida säästvaid eluviise" ja see hõlmab väljatöötatud meetodi laiaulatuslikku kasutamist teistes projektides. (Nrep kuupäev puudub)

Ringmajanduse projekt demonstreerib, kuidas saame ehitada jäätmetest jätkusuutlikke hooneid ilma kvaliteeti, esteetikat või

hinda ohverdama. Tooteid kogutakse ja taaskasutatakse kohapeal, luues töökohti ja ehitades tänastest jäätmetest homseid linnu.

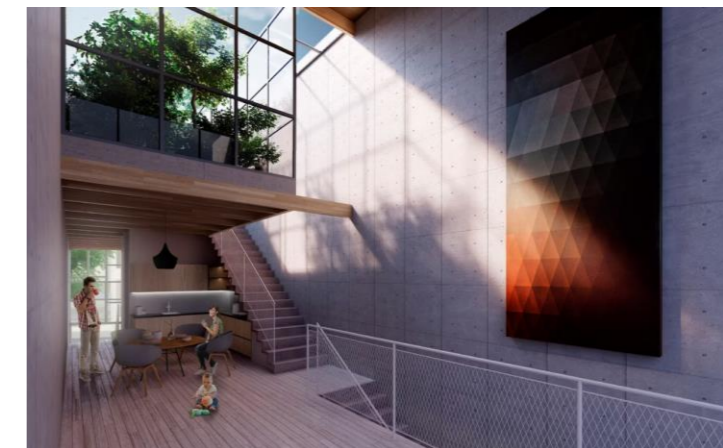
1400 tonni betooni, mida oli vaja 20 uue kolmekorruselise linnamaja ehitamiseks, „töödeldiümber“, kasutades Kopenhaageni metroo ehitamisel tekkinud betoonijäätmeid.

Põrandate, seinte ja fassaadide jaoks kasutatav puit on Taani põrandakattetootja Dineseni jäägid ja ülejäägid. See otsus võimaldas puidu "jäätmed" ära visata, mitte põletada, nagu see muidu oleks.

75 protsenti projekti akendest pärinevad mahajäetud hoonetest Taanis Põhja-Jüütimaal. Eelistati puitraamiga aknaid, mitte alumiiniumraamiga aknaid, kuna puitraamiga akende tootmine on palju vähem energiamahukas. Kaasaegsetele isolatsioonistandarditele vastamiseks on raamidele paigaldatud taaskasutatud topeltklaasid. Selle tulemusel säilitasid need taaskasutatud aknad "kuni 95%" akende tootmisel tavaliselt eralduvast CO<sub>2</sub>-st. (Global Design News kuupäev puudub)

Ridaelamud on projekteeritud keskkonna, toimimise, sisekliima ja elurikkuse poolest jätkusuutlikult. Lisaks lisab projekt füüsilisele ruumile väärtust, suurendades jagamismajanduse potentsiaali.

Tänu sellele projektile võeti kõik kasutatud ehitusmaterjalid prügilasse või põletusahjudesse suunamise asemel taaskasutusse ja kasutati uute hoonete ehitamisel. See projekt pakub julget arhitektuurilist esteetikat, mis eeldab vajalikku ja lõpuks paratamatut nihet tööstuses. (Benjamin Wells 2020) (Architizer kuupäev puudub)



Joonis 13. Taani ridaelamute sisearhitektuuri render. (Architizer n.d.)

#### 4.2.2 SOS Lasteküla Lavezorio kogukonnakeskus

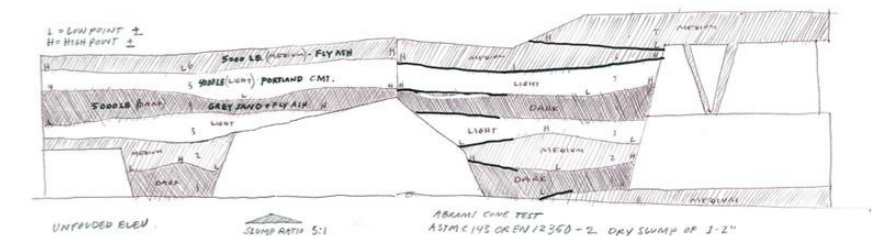
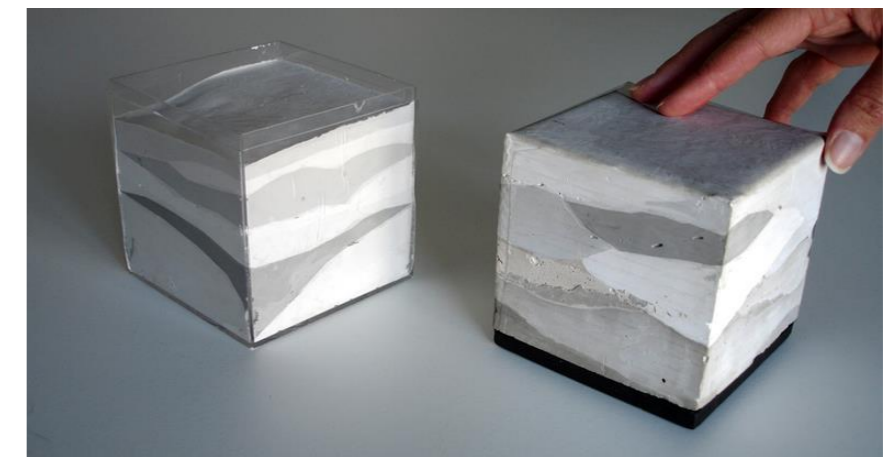
Selle kogukonnakeskuse kujundas Studio Gang Architects 2008. aastal SOS-lastekülade jaoks. SOS Children's Villages on rahvusvaheline mittetulundusühing, mis pakub haridust, eluaset ja tuge asendushooldusel olevatele lastele ja peredele. Lavezorio kogukonnakeskus asub Chicago lõunaosas Auburn Greshami naabruses. See naabruskond on pühendatud kasulastele kodude pakkumisele ja see keskus on selle pühendumise füüsiline sümbol. See keskus keskendub erilisel haridusele ja sotsiaalsele suhtlusele, pakkudes samal ajal teenuseid nii asendushooldus- kui ka naabruses asuvatele peredele (ArchDaily, 2009). (World-architects kuupäev puudub)

1500 m<sup>2</sup> suuruse hoone ehituse eelarvesse arvestati vaid 3,5 miljonit dollarit, ilma linna eraldatud maa maksumuseta. See asjaolu ajendas arhitekti otsima annetusi erinevatelt tarnijatelt ja tootjatelt. Selle tulemusena omandas see hoonele iseloomuliku välise tunnuse - betoonseinte geoloogilise kihistumise mitmevärviliste, hallide ja ebakorrapäraste horisontaalsete triipudega. Need rajad on annetatud materjalide kaart, mis annab projektile ajalise mõõtme. Nende kihtide erinevad värvid sõltuvad elementide proportsioonide ja betooni tiheduse suhtest. Betooniribad rõhutavad materjali voolavust ja viitavad sümboolselt mitmekesisuse integreerimisele keskuse kujundusse ja selle otstarbele naabruses.

Projekti kontseptsioon on "avatud ja kerge, kuid samas tugev ja kaitsev." Tugevuse ja läbipaistvuse kontrast on objekti SOS-funktsiooni visuaalne esitus; milleks on kasulaste kasvatamine külalislahkes kogukonnas. (Kolb 2009)



Joonis 14. SOS Lasteküla Lavezorio kogukonnakeskuse foto. (World-architects n.d.)



Joonis 15. SOS Lasteküla Lavezorio kogukonnakeskuse materjalide foto ja skeem. (World-architects n.d.)

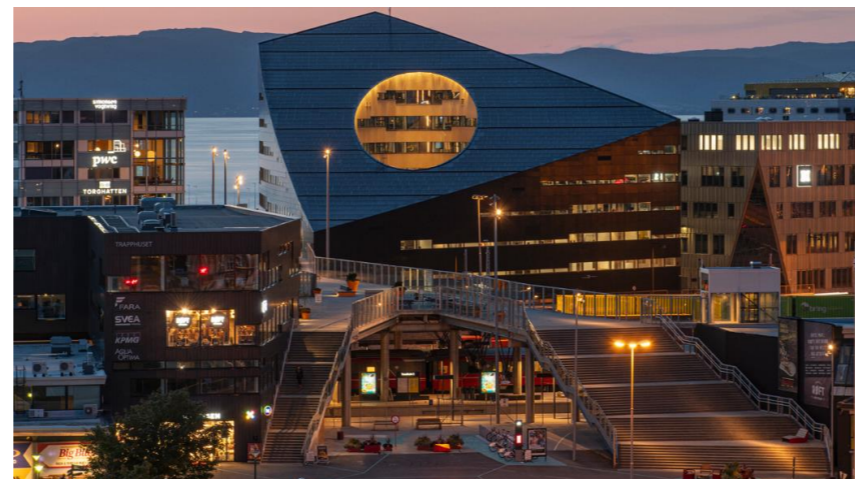
#### 4.2.3 Powerhouse Brattørkaia

Powerhouse Brattørkaia on ambitsioonikas projekt ühele maailma põhjapoolsemast energiatõhusamast hoonest. See büroohoone suudab oma 60-aastase eluea jooksul toota rohkem taastuvenergiat, kui ta tarbib. Samuti võtab see arvesse energiakulusid, mis olid vajalikud selle ehitamise, käitamise ja lammutamise ajal. Koht asub Trondheimi linna sadamas, 63. põhjalaiuskraadil – sellest ka külm kliima. See näide tõestab, et roheline betoon on asjakohane mitte ainult sooja kliimaga riikides, vaid ka maailma põhjapoolsemates osades. (CEMBUREAU The European Cement Association 2020)

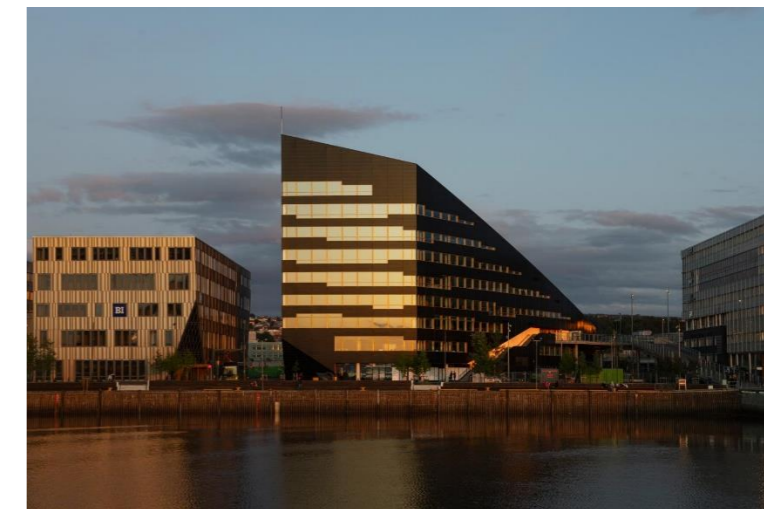
Hoone kontseptsiooni eesmärk on vähendada energiakulusid kõigi kasutusviiside ja komponentide tootmise osas, samuti luua häid ja hästitoimivad büroopindu. Hoone ehitamiseks, eksploateerimiseks ja lammutamiseks kuluvast energiakulust kokku moodustab materjalide maksumus ca 50%, millest vaid 12% arvestatakse betoonile.

Selles projektis kasutatakse rohelist betooni, mille konkreetne osakaal on 50% lendtuhk, 10% mikroränidioksiid ja 40% tsemendiklinker.

Üldse oli huvi Powerhouse Brattørkaia vastu Euroopast, Aasiast ja USAst tohtu. **"Loodetavasti inspireerib see projekt teisi sarnaseid projekte tegema väljaspool Norrat,"** lõpetab Rune Grasdal, Snøhetta vanemarhitekt ja projektijuht. **"Oleme tõestanud, et neid struktuure saab ehitada olemasoleva tehnoloogia abil, ja meie eesmärk on laiendada seda strateegiat ülejäänud meie portfelliga ja lõpuks ka ülejäänud ehitustööstusele."** (Mun-Delsalle 2021)



Joonis 16. Powerhouse Brattørkaia foto. (Mun-Delsalle 2021)



Joonis 17. Powerhouse Brattørkaia foto. (Mun-Delsalle 2021)

## **OSA II. PROJEKT**



## 5 ASUKOHT

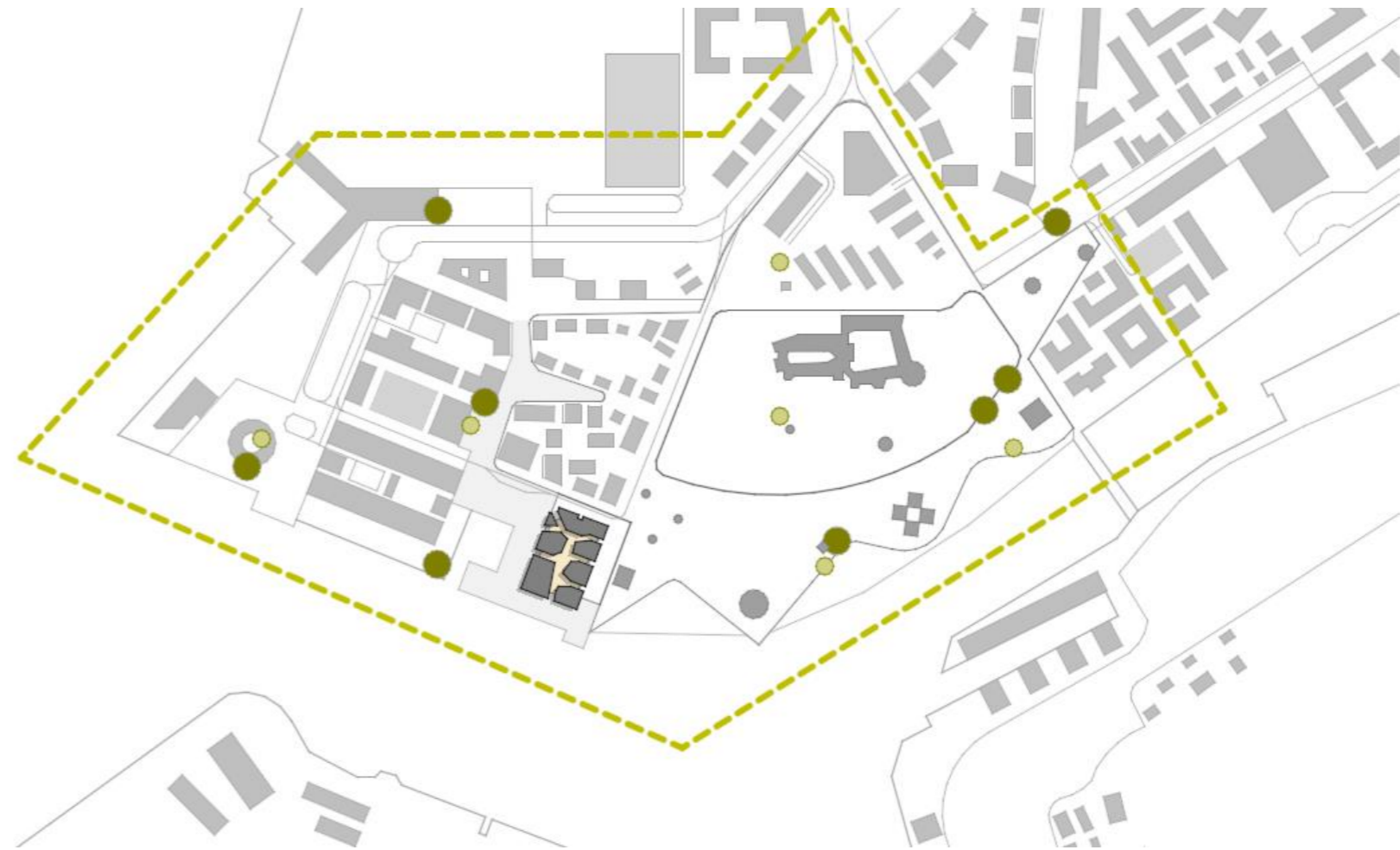
9. jaanuarist kuni 28. maini 2020 korraldati Aurajokisus Turu lossi ümbruse ja Lansiranta linnaosa rahvusvaheline ideekonkurss. Konkursi tulemused kuulutati välja 29.10.2020. Selle konkursi eesmärk oli pakkuda arhitektuurset lahendust kogu Linnanniemi piirkonnale.

Linnanniemi asub ainulaadses kesklinna, ajaloo, jõe ja mere ristumiskohas. Kehtiva skeemi kohaselt vabaneb 2025. aastaks laevaterminalide ümberkorraldamisega territoorium, sealhulgas Turu loss, selle ümbrus ning merd ja linna ühendava Aura jõe suudme läänekallas. Tulevikus võib see piirkond areneda laieneva uut tüüpi linnakeskuse mereäärse osana. Selle töö raames on kavas luua Turu linna esimene kunstikvartal, mille eesmärk on toetada Turu kultuuri ja kunsti. Kunsti eesmärk on muuta piirkond elavaks ja mugavaks ning tõsta esile linna miljööväärtusi.

Kultuuri ja kunsti plaanitakse ellu viia avatult ühiskonnale ning koostöös väga erinevate kunstnike, arhitektide ja teiste inimestega, kellel on selles valdkonnas tööalane suhe. See tulevane Linnanniemi kunstikvartal on paljude erinevate sündmuste platvorm, ajutiste kunstiprojektide kodu, muljetavaldavate püsikunstiteoste koht ja erinevate haridusasutuste koostööplatvorm.

See projekt on osa linna üldisest strateegilisest ja visioonilisest Turu kultuuriarengu visioonist ning plaanitakse valmis saada 2029. aastaks.

Sellesse piirkonda hoone projekteerimisel on vaja võtta arvesse ajaloolisi, sotsiaalseid ja kliimaatilisi aspekte. Näiteks tuleb arvestada lähedal asuva Turu lossiga, millel on arhitektuuriline ja ajalooline väärtus. Süsinikdioksiidi heitkoguste eesmärgid on seatud ka piirkonna kunstidele. (Turun kaupunki kuupäev puudub) (Turun kaupunki kuupäev puudub) (Turun kaupunki kuupäev puudub)



Joonis 18. Ümber projekteeritud piirkonna skeem. Autori joonis.

## 6 KONTSEPTSIOON

Hoone kontseptsioon on põimitud lähteülesannetesse endasse ja kõlab nagu «the world of tomorrow is built from fragments of yesterday». See tähendab, et iga meie sündmus minevikus mõjutab meie tulevikku. Selle muuseumi eesmärk on tuletada elanikele ja turistidele meelde Turu sündmusi, leiutisi, ajaloolisi fakte ning püüda nende põhjal ennustada tulevikku. Esimestes näitusesaalides saab külastaja näha koopaid, milles elasid eelajaloolised inimesed, viimases saalis aga võimalikku tulevikku aastal 2090.

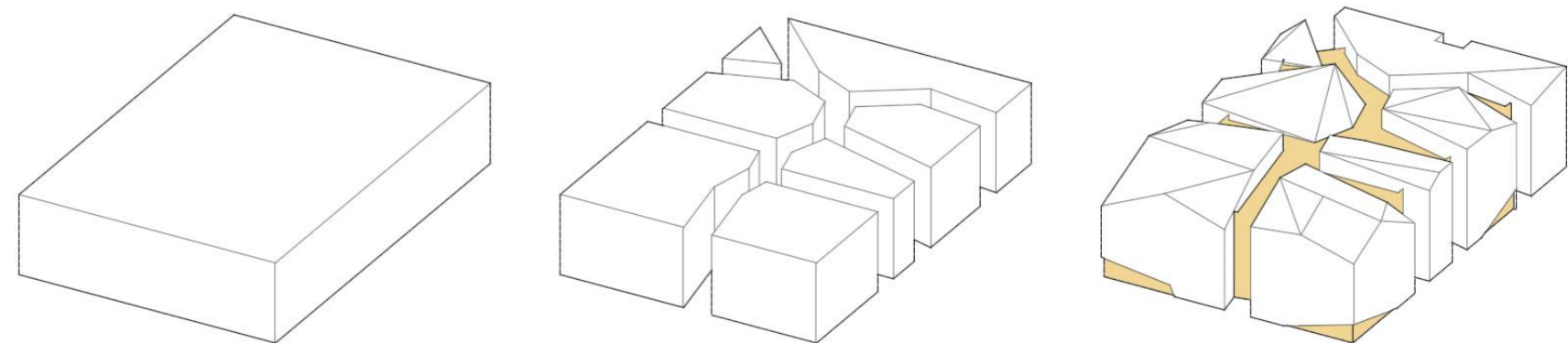
Samuti toetab seda kontseptsiooni tugevalt materjal - betoon. Erinevatel ajalooperioodidel kasutas ühiskond erineva koostisega betooni. Betooni või nende komponentide, proportsioonide valimisel näitas ühiskond väärtusi ja püüdlusi. Kui kuni viimase hetkeni valisime kiiruse ja soodsa hinna, siis edaspidi peaks meie perspektiiv muutuma lahendustele, mis mõjutavad eelkõige keskkonnakahju.

Minevikku, monumentaalsust sümboliseeriv betoon on lõhestatud mitmeks killuks. Iga fragment sümboliseerib ajaloolisi perioode või teatud ajaloolisi hetki ning kuna kõik need sündmused on ainulaadsed, on iga fragment ka erineva kujuga. Klaas on valgus, areng ja tulevik. Klaas ühendab kõik killud ja moodustab tervikliku hoone, mis sümboliseerib ajaloo ja tuleviku ehitamist.

Interjööris mängitakse läbi ka erinevad kaldtasandid, et pakkuda valguse ja varjude mängu, mis on loodud atmosfääri saavutamiseks. Betoon selleks oluline materjal, sest seda materjali kasutades on võimalik saavutada eraldatud, emotsioonideta maailm. Kunsti või näitust imetlev külastaja peaks täielikult keskenduma nendele teostele ja sel juhul on betoon parim valik.

Igal materjalil on oma keel ja iseloom, mis võimaldab omavahel ja avalikkusega suhelda. Erinevat tüüpi betooni kasutamise

kaudu jutustab fassaad hoone lugu, kuna see püüab fassaadide erinevate tekstuuride kaudu väljendada kogukonna- ja integratsioonitunnet, sisemist ja välist dialoogi.



Joonis 19. Kontseptsiooni skeem. Autori skeem.



## 7 ASENDIPLAAN

2020. aastal võidetud projekti kohaselt on kavandatavas kunstikvartalis avatud ja turvaline ruum jalakäijatele ja jalgratturitele. Uus kvartal peaks olema koht, kus inimesed saavad linnakärast puhata ning nautida näitusi ja kunsti. Sel põhjusel pakub kvartali projekt mugavat lahendust ühistranspordiks, nagu trammid, bussid ja meretransport. Kvartal ei tähenda autojuhtide aktiivset liikumist. Pakutakse mitmeid parkimiskohti, milles arvestatakse parkimiskohti kõikidele selle kvartali külastajatele. Sellega seoses ei paku praegune projekt täiendavaid parkimiskohti, et mitte stimuleerida liikluse kasvu.

Peasissepääs on lääne-ida suunalt, kuna just sinna on projekteeritud ühistranspordipeatused. Eeldatavasti tuleb suur hulk inimesi bussi, trammi või laevaga. Samuti asub just lääne-ida poolel selle kvartali suurim parkimismaja.

Kuna kavandatava hoone põhjaküljel on suur avalik park, lõunaküljel aga promenaad ja parkimiskohad erapaatide jaoks, siis on hoonesse sissepääs ette nähtud mõlemalt poolt. Seega on hoonete juurdepääsud kooskõlas selle projekti põhikontseptsiooniga. Veokite lattu on ligipääs idapoolsest küljest, kuna seal asub lähim sõidutee.

Hoone idaküljele kujundati Ajaloo- ja Tulevikumuuseumi avalik park. See annab ruumi vabaõhumuuseumi välinäitusteks.



Joonis 20. Asendiplaan. Autori skeem.

## 8 HOONE

### 8.1 Esimese korruse plaan

Selle projekti raames projekteeritud hoone on arhitektuurivõistluse kohaselt multifunktsionaalne ajaloo- ja tulevikumuuseum. Lisaks galeriile ja näitustele on majas ka muuseumitöötajate ja teadlaste kontor, loengute või seminaride auditoorium, avatud tööruum raamatukoguga ja restoran.

Esimese korruse planeering kavandati maapealset asukohta ja külastajate eeldatavaid trajektoore arvestades. Nagu varem mainitud, oodatakse rohkem inimesi lääne-ida poolelt, mis aitab kaasa peasissekäigu paigutusele hoone nurgal. See lahendus võimaldab näha sissepääsu tänava alguses. Peasissekäigu lähedal on külastajatele suveniiripoed, tualetid ja garderoob. Nii saavad inimesed hoonesse sisenedes katta oma esimesed vajadused pärast või enne muuseumikülastust.

Infopunkti kõrval on peatrepp, mis viib ülemistel korrustel asuvasse muuseumi. Kuna muuseum on selle hoone kasutamise peamine põhjus, asub see trepp hoone põhjapoolse fragmendi keskel. Seega on trepp atriumis peaaegu kõikjalt näha.

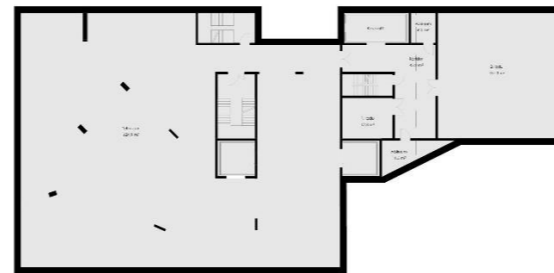
Infopunkti taga asub muuseumi töötajate ja teadlaste büroo. Sellise korralduse tingib hommikune päikese liikumine, aga ka nõutav privaatsus. Olenemata asukohast ei tunne töötajad ruumide paigutuse tõttu ebamugavust otsese päikesevalguse eest. Akna kõrval on istumisnurk, mida hakatakse kasutama ajal, mil päike enam nii intensiivne ei ole. Tööalad on varustatud minimaalse loomuliku valgusega.

Restoran asub maja läänenurgas, sest vastavalt päikese trajektooriga saab õhtusel ajal selles hoone punktis imetleda kaunist päikeseloojangut, merd ja peatänavat. Restorani kõrval asub köök, mis toimib iseseisva elemendina. Ehk siis ruumide kompleksis on ette nähtud vajalikud tööruumid, töötajate

rietusruumid, prügiruum ja ladu toodetega. Lisaks on seal 2 isiklikku sissepääsu ja üks väljapääs prügi utiliseerimiseks.

Restorani vastas on ida-lõuna suunalises nurgas avatud tööruum. See tsoon tähistab töökohti, mida iga külastaja saab kasutada. Mõnda privaatruumi saab ette broneerida rühmatöök. Teisel korrusel asub väike raamatukogu, kus on spetsiaalselt ajaloo ja uute tehnoloogiatega seotud teosed, samuti asub lugemissaal vaatega maja pea aatriumile.

Avatud ja suletud tööala vahele jääb auditoorium, mida saab kasutada nii avatud loengute kui ka kinniste seminaride läbiviimiseks.



Joonis 21. Keldri korruse plaan. Autori joonis.

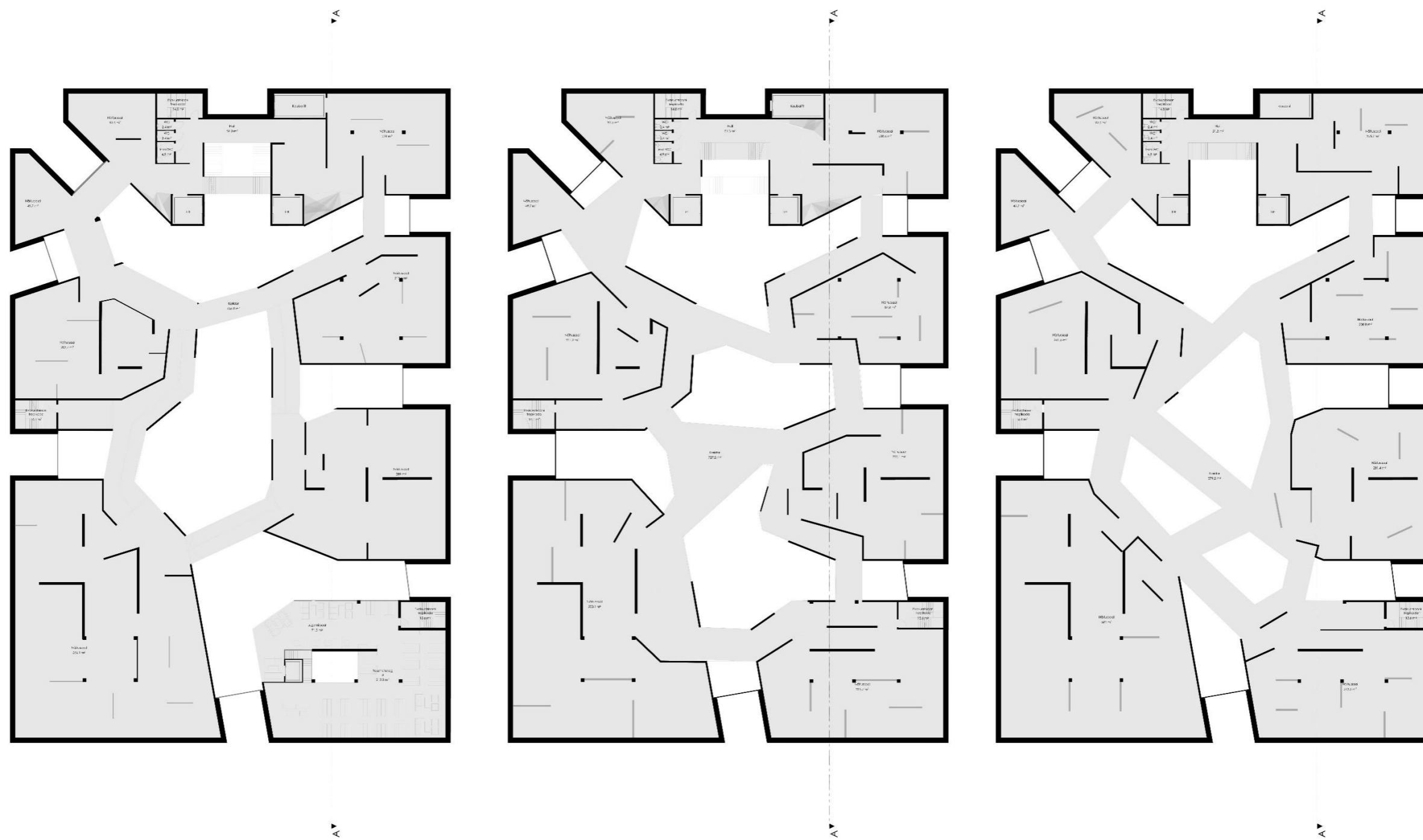
### 8.2 Teise korruse plaan

Teisel kuni neljandal korrusel paiknevad muuseumi erinevad näitusepinnad. Teisele korrusele pääseb trepist, mis asub hoone idapoolse fragmendi keskosas. Samas kohas toimuvad üleminekud järgmistele korrustele tänu treppidele ja liftidele.

Muuseumi külastus on üles ehitatud ringtrajektooriga. Külastajad pääsevad ühest paviljonist teise silla või avatud koridori kaudu. Igal fragmendil on vähemalt 2 ühendust teiste hooneosadega, mis annab külastajale valikuvabaduse.



Joonis 22. Esimese korruse plaan. Autori joonis.



Joonis 23. Teise ... Neljanda korruse plaan, Autori joonis.



### 8.3 Lõiked

Tulenevalt 1. korruse planeeringust, mis hõlmab kõrgeid lagesid auditoriumis ja restoranis, samuti raamatukogu avatud tööalal, on muuseumi teisel korrusel tasapinna kõrguste erinevus. Killud on omavahel ühendatud kaldteedega, mille maksimaalne kalle on 5°.

#### VUNDAMENT

Hoone projekteeritud vaivundamendile. Betooni keskkonnaklass on XC2 ja vaiade minimaalne betooniklass on C25/30. Vaiadele valatakse monoliitbetoonist põrandaplaat koos roostvärgipaksendustega.

#### PÕRAND PINNASEL

Keldrikorruse kandvaks põrandakonstruktsiooniks on monoliitraudbetoonist plaat, mis toetub läbi roostvärgipaksenduste vaiadele. Kandev betoonplaat on paksusega 400...500 mm, millele paigaldatakse killustikust 300 mm paksune drenikiht, mille peale valatakse monoliitbetoonist pealisplaat.

#### KELDRIKORRUSE KANDEKONSTRUKTSIOONID

Muuseumi keldrikorruse kandvad seinad on projekteeritud perimeetril 300mm paksused monoliitraudbetoonist seinad, mis on kaetud väljast poolt SBS hüdroisolatsiooni materjaliga. Siseseinad on monteeritavad 200 mm paksused raudbetoonseinad, mis on ühendatud omavahel monolitiseerimise teel. Kandvad postid on monteeritavad raudbetoonpostid.

#### KANDESEINAD JA POSTID

Muuseumi vertikaalsed kandekonstruktsioonid on projekteeritud kolme kihilise monteeritava paneelina. Hoone välisseinad on projekteeritud erinevatest rohelist betooni tüüpidest.

Inspiratsioon sellisele lahendusele on võetud SOS Lasteküla Lavezorio kogukonnakeskuse projektist, kus erinevad betooni tüübid näitavad nende materjalide ajalugu.

#### TALAD

Muuseumi monoliitse raudbetoonist vahelae sees paiknevad raudbetootalad, mis kannavad erinevate muuseumi osade monteeritavaid raudbetoonist seinapaneele ja ülemiste korruste koormuseid. Talade maksimaalne sille on ca 12 m.

#### VAHELAED

Muuseumi korruste vahelagede kandekonstruktsioon on 265 mm paksusega õõnespaneelid.

#### KATUSED

Hoone lamekatuste kandekonstruktsioon on monoliitplaat paksusega 220mm. Kaldkatuse kandvaks osaks on projekteeritud terastalad, mis paiknevad soojustuse tasapinnas. Katusekattematerjalina on valdavalt kasutatud kahekordset SBS katet.

#### TREPID

Muuseumi trepid on projekteeritud monteeritavatest raudbetoonelementidest.

## 8.4 Renderid









## 9 KASUTATUD KIRJANDUS

- A. Miller, Arpad Horvath and Paulo J. M. Monteiro. *Impacts of booming concrete production on water resources worldwide*. Nature sustainability. jaanuar 2018. a. [https://www.nature.com/articles/s41893-017-0009-5.epdf?referrer\\_access\\_token=4yCQjka-0SJmHhk-jLve69RgN0jAjWel9jnR3ZoTv0PuvpdDpxAbQ2Qk2-\\_3bf3U4eCuvR\\_tlcqwwcaRGHU8APJr9cZj61ivYNBpFNxgLAJU0YnZ49AR076BcdinJMIRRZsOFuQNQyjoXC5zN9ZKR3dqBXZvSHLp4nodyjzdQ7tGARR3O](https://www.nature.com/articles/s41893-017-0009-5.epdf?referrer_access_token=4yCQjka-0SJmHhk-jLve69RgN0jAjWel9jnR3ZoTv0PuvpdDpxAbQ2Qk2-_3bf3U4eCuvR_tlcqwwcaRGHU8APJr9cZj61ivYNBpFNxgLAJU0YnZ49AR076BcdinJMIRRZsOFuQNQyjoXC5zN9ZKR3dqBXZvSHLp4nodyjzdQ7tGARR3O) (kasutatud 11.. märts 2023. a.).
- Ahsan Nawaz, Jian Chen, Xing Su. *Exploring the trends in construction and demolition waste (C&DW) research: A scientometric analysis approach*. Elsevier. 31.. detsember 2022. a. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138822010013> (kasutatud 19.. aprill 2023. a.).
- Allen, Patricia. *Finnish startup Carbonaide lands €1.8 million to make carbon-negative concrete manufacturing possible*. EU-Startups. 28.. märts 2023. a. <https://www.eu-startups.com/2023/03/finnish-startup-carbonaide-lands-e1-8-million-to-make-carbon-negative-concrete-manufacturing-possible/> (kasutatud 17.. märts 2023. a.).
- America's Cement Manufacturers. *Admixtures for Concrete*. 2023. [http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA\\_manual/Chap06.pdf](http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA_manual/Chap06.pdf) (kasutatud 12.. aprill 2023. a.).
- Anderson, Mike. *Topics in sustainable construction: green concrete and concrete alternatives*. One-key. 19.. juuli 2021. a.

<https://onekeyresources.milwaukeeetool.com/en/green-concrete> (kasutatud 25.. aprill 2023. a.).

Architecture news & editorial desk. *Brutalist architecture - a retrospective*. 18.. veebruar 2023. a. <https://www.architectureanddesign.com.au/features/list/a-look-at-brutalist-architecture> (kasutatud 9.. mai 2019. a.).

Architizer. *Upcycle Studios*. kuupäev puudub. <https://architizer.com/projects/upcycle-studios/> (kasutatud 6.. mai 2023. a.).

ASBL, European Concrete Platform. *Sustainable benefits of concrete structures*. veebruar 2009. a. <https://www.scribd.com/document/374423027/Sustainable-Benefits-of-Concrete-Structures-pdf> (kasutatud 13.. mai 2023. a.).

Atef Hamdy, Cosimo Lacirignola. *Environment and water resources*. kuupäev puudub. [https://newmedit.iamb.it/share/img\\_new\\_medit\\_articoli/716\\_06hamdy.pdf](https://newmedit.iamb.it/share/img_new_medit_articoli/716_06hamdy.pdf) (kasutatud 3.. aprill 2023. a.).

Bellis, Mary. *The History of Concrete and Cement*. The New York Times Company. 2006. <http://theinventors.org/library/inventors/blconcrete.htm> (kasutatud 17.. aprill 2023. a.).

Benjamin Wells. *Urcycle Studios*. 14.. juuli 2020. a. <https://benjaminwells.eu/upcycle-studios> (kasutatud 10.. mai 2023. a.).

Betolar Plc. *Sustainable competitive edge*. 2023. <https://www.betolar.com/home> (kasutatud 24.. aprill 2023. a.).

BsWei/Shutterstock, Paolo Rosselli/Studio Boeri, Antonio Leao de Sousa. *Are there any materials that can be infinitely recycled?* Saint-Gobain. 18.. oktober 2019. a. <https://www.saint-gobain.com/en/news/are-there-any-materials-can-be-infinitely-recycled> (kasutatud 17.. aprill 2023. a.).

—. *Construction: the virtuous circle of the circular economy*. Saint-Gobain. 14.. oktoober 2019. a. <https://www.saint-gobain.com/en/magazine/construction-virtuous-circle-circular-economy> (kasutatud 15.. aprill 2023. a.).

CEMBUREAU The European Cement Association. *Built in concrete, made with cement*. 2020. <https://www.cembureau.eu/> (kasutatud 23.. aprill 2023. a.).

—. *Project Examples*. 2020. <https://cembureau.eu/policy-focus/sustainable-construction/project-examples/> (kasutatud 6.. mai 2023. a.).

—. *The Manufacturing Process*. 2020. <https://cembureau.eu/about-our-industry/the-manufacturing-process/> (kasutatud 15.. aprill 2023. a.).

—. *The story of cement manufacture*. kuupäev puudub. [https://cembureau.eu/media/drylkjo0/manufacturing-process-factsheet\\_update-jan2021.pdf](https://cembureau.eu/media/drylkjo0/manufacturing-process-factsheet_update-jan2021.pdf) (kasutatud 15.. aprill 2023. a.).

—. *WELCOME TO CEMBUREAU'S MAP OF INNOVATION PROJECTS*. 2020. <https://cembureau.eu/about-our-industry/innovation/map-of-innovation-projects/> (kasutatud 22.. aprill 2023. a.).

- Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis.* Elsevier, The open University, United Kingdom. 28.. veebruar 2014. a. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630714000387> (kasutatud 24.. märts 2023. a.).
- Cementing the European Green Deal.* CEMBUREAU - The European Cement Association. kuupäev puudub. [https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap\\_final-version\\_web.pdf](https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf) (kasutatud 24.. aprill 2023. a.).
- Chemistry World. *The concrete conundrum.* märts 2008. a. [https://www.rsc.org/images/Construction\\_tcm18-114530.pdf](https://www.rsc.org/images/Construction_tcm18-114530.pdf) (kasutatud 23.. jaanuar 2023. a.).
- Commission, European. *Directive of the European parliament and of the council.* 15.. detsember 2021. a. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0802&qid=1641802763889> (kasutatud 22.. aprill 2023. a.).
- Concrete Paving, Paving Techniques. *Why is Concrete so Widely used?* 13.. november 2017. a. <https://westyorkpaving.com/concrete-widely-used/> (kasutatud 17.. jaanuar 2023. a.).
- Consolis. *Green Spine Line.* 2023. <https://www.consolis.com/sustainability/green-spine-line/?playlist=b08e57c&video=17b94f5> (kasutatud 24.. aprill 2023. a.).
- . *Our locations.* 2023. <https://www.consolis.com/about-us/our-locations/> (kasutatud 25.. aprill 2023. a.).
- Contractors society of America. *Why Concrete is The Most Popular Building Material.* 16. september 2022. a. <https://www.contractorsoa.com/concrete-most-popular-building-material/> (kasutatud 13.. mai 2023. a.).
- Dale, Timothy. *What Is Fly Ash and How Is It Used in Concrete?* 4.. märts 2023. a. <https://www.thespruce.com/fly-ash-applications-844761> (kasutatud 17.. aprill 2023. a.).
- Dr. Kaveh Afshinnia, P.E. LEED GA. *Waste Glass in Concrete has Advantages and Disadvantages.* Concrete Decor. 8.. detsember 2019. a. <https://www.concretedecor.net/departments/concrete-placing/waste-glass-in-concrete-has-advantages-and-disadvantages/> (kasutatud 17.. aprill 2023. a.).
- Ecos, EEB, Recycling Netwerk. *Waste Framework Directive review.* 19.. juuli 2022. a. <https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2022/07/Joint-paper-Recommendations-on-Waste-prevention-targets-July-2022.pdf> (kasutatud 27.. veebruar 2023. a.).
- Elliott, Gary. *'Green' Cement: The Uncomfortable Truth.* Linkedid. 17.. veebruar 2023. a. <https://www.linkedin.com/pulse/green-cement-uncomfortable-truth-gary-elliott/?trackingId=WAg%2FcZl%2BQGuZ711AN4DIYg%3D%3D> (kasutatud 17.. aprill 2023. a.).
- Energy Use and Carbon Dioxide Emissions in Energy-Intensive Industries in Key Developing Countries.* Ernest Orlando Lawrence Berkely National Laboratory. september 1999. a. <https://escholarship.org/content/qt0tx6v19t/qt0tx6v19t.pdf> (kasutatud 22.. aprill 2023. a.).
- Esimesed keskkonnadeklaratsioonid Eesti betoonelementitööstuses.* Bioneer. 29.. oktoober 2020. a. <https://bioneer.ee/esimesed-keskkonnadeklaratsioonid-eesi-betoonelementit%C3%B6C3%B6stuses> (kasutatud 22.. aprill 2023. a.).
- EU-Recycling. *Recyclingbeton noch ohne Marktdurchdringung.* jaanuar 2019. a. <https://eu-recycling.com/Archive/22163> (kasutatud 14.. aprill 2023. a.).
- EUROCITIES. *Building a green and just future in Helsinki.* 13.. veebruar 2023. a. <https://eurocities.eu/stories/building-a-green-and-just-future-in-helsinki/> (kasutatud 9.. märts 2023. a.).
- European Commission, OECD. *Policy brief on making the most of the social economy's contribution to the circular economy.* 2022. [https://www.oecd-ilibrary.org/industry-and-services/policy-brief-on-making-the-most-of-the-social-economy-s-contribution-to-the-circular-economy\\_e9eea313-en](https://www.oecd-ilibrary.org/industry-and-services/policy-brief-on-making-the-most-of-the-social-economy-s-contribution-to-the-circular-economy_e9eea313-en) (kasutatud 2.. märts 2023. a.).
- European Parliament. *Circular economy: definition, importance and benefits.* 22.. veebruar 2023. a. [https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits?&at\\_campaign=20234-Economy&at\\_medium=Google\\_Ads&at\\_platform=Search&at\\_creation=RSA&at\\_goal=TR\\_G&at\\_audience=circular%20economy&at](https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits?&at_campaign=20234-Economy&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=circular%20economy&at) (kasutatud 25.. aprill 2023. a.).
- Finland's Betolar develops green cement as construction races to decarbonise.* International flame research foundation. 27.. septembr 2021. a. <https://ifrf.net/ifrf-blog/finlands-betolar->

- develops-green-cement-as-construction-races-to-decarbonise/ (kasutatud 22.. aprill 2023. a.).
- Global Cement and Concrete Association. *Cement and Concrete around the world.* 2023. <https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world/> (kasutatud 13.. märts 2023. a.).
- Global Design News. *Anders Lendager creates a sustainable Scandinavian townhouse using waste such as residual wood, crushed concrete, discarded windows, and waste from the Copenhagen Metro.* kuupäev puudub. <https://globaldesignnews.com/anders-lendager-creates-a-sustainable-scandinavian-townhouse-using-waste/> (kasutatud 25.. aprill 2023. a.).
- Gregory, Jeremy. *Concrete.* Climate Portal. 8.. jaanuar 2021. a. <https://climate.mit.edu/explainers/concrete> (kasutatud 7.. märts 2023. a.).
- Guanghong Lai, Xiao Liu, Shiyu Li, Yurui Xu, Yunsheng Zheng, Jianan Guan, Ruijun Gao, Zhongyuan Wei, Ziming Wang, Suping Cui. *Development of chemical admixtures for green and environmentally friendly concrete: A review.* Elsevier. 19.. jaanuar 2023. a. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623002743> (kasutatud 11.. aprill 2023. a.).
- Gui Ye, Hongping Yuan, Liyin Shen, Hongxia Wang. *Simulating effects of management measures on the improvement of the environmental performance of construction waste management.* Elsevier. 19.. jaanuar 2012. a. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344912000122?via%3Dihub> (kasutatud 12.. aprill 2023. a.).
- Hessam AzariJafari, Yiwei Lyu, Ipek Bensus Manav. *Open-loop Recycling of Glass in Concrete Provides Upcycling Opportunities.* CSHub Research Brief. november 2022. a. <https://cshub.mit.edu/sites/default/files/images/glassbrief.pdf> (kasutatud 18.. aprill 2023. a.).
- Huixia Wu, Dingyi Yang, Changqing Wang, Zhiming Ma. *Effects of construction waste powder on micro–macro properties of green high-strength cement paste with low water-to-binder ratio.* Elsevier. 26.. aprill 2023. a. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823012060> (kasutatud 19.. aprill 2023. a.).
- Independent Statistics & Analysis. *Emissions of Greenhouse Gases Report.* 8.. detsember 2009. a. <https://web.archive.org/web/20110523061426/http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/ggprpt/carbon.html> (kasutatud 17.. märts 2023. a.).
- Institute, Global CCS. *Understanding industrial CCS Hubs and clusters.* juuni 2016. a. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf> (kasutatud 15.. aprill 2023. a.).
- Jouni Punkki, Mirva Vuori. *Low-carbon classification of concrete in Finland.* Vähähiilisyysluokitus. 15.. märts 2022. a. <https://vahahiilinenbetoni.fi/in-english/> (kasutatud 24.. aprill 2023. a.).
- K. V. Schuldyakov, L. Ya. Kramar, B. Ya. Trofimov. *The Properties of Slag Cement and Its Influence on the Structure of the Hardened Cement Paste.* Elsevier. 2016. <https://core.ac.uk/download/pdf/82134746.pdf> (kasutatud 16.. aprill 2023. a.).
- Kamyar Kabirifar, Mohammad Mojtahedi, Changxin Wang, Vivian W. Y. Tam. *Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review.* Elsevier. 9.. aprill 2020. a. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620313123?fr=RR-2&ref=pdf\\_download&rr=7c2a3b66faa5c7ef](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620313123?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=7c2a3b66faa5c7ef) (kasutatud 13.. aprill 2023. a.).
- Kolb, Jaffer. *Lavezzorio Community Center by Studio Gang Architects, Chicago, USA.* Architectural Review. 1., juuli 2009. a. <https://www.architectural-review.com/today/lavezzorio-community-center-by-studio-gang-architects-chicago-usa> (kasutatud 6.. mai 2023. a.).
- Kürth, Oliver. *Global recycling.* The Magazine for Business Opportunities & International Markets. veebruar 2019. a. [https://global-recycling.info/pdf/GLOBAL-RECYCLING\\_2-2019](https://global-recycling.info/pdf/GLOBAL-RECYCLING_2-2019) (kasutatud 23.. märts 2023. a.).
- L, Anantha Lekshmi M. *Green Concrete-for the Future-A Review.* International Journal of Engineering Research & Technology. 30.. juuli 2018. a. <https://www.ijert.org/green-concrete-for-the-future-a-review> (kasutatud 16.. veebruar 2023. a.).
- Lewis, Jennifer A. *Scientific Principles.* Materials Science and Technology . kuupäev puudub. <http://matse1.matse.illinois.edu/concrete/prin.html#:~:text=>

- =Water%20is%20the%20key%20ingredient,through%20a%20process%20called%20hydration (kasutatud 5.. aprill 2023. a.).
- Llatas, C. *A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list*. Elsevier. 24.. veebruar 2011. a. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11000559?via%3Dihub> (kasutatud 8.. aprill 2023. a.).
- Lukman A. Akanbi, Lukumon O. Oyedele, Olugbenga O. Akinade, Anuluwapo O. Ajayi, Manuel Davila Delgado, Muhammad Billal, Sururah A. Bello. *Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator*. Elsevier. 6.. november 2017. a. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917303609?fr=RR-9&ref=pdf\\_download&rr=7c29d72dacecc7de](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917303609?fr=RR-9&ref=pdf_download&rr=7c29d72dacecc7de) (kasutatud 12.. aprill 2023. a.).
- Marie Bruun Yde, Sarah Nichols. *Concrete is everywhere*. plan Magazin. kuupäev puudub. <https://www.plan-magazin.de/plan-magazin-ausgabe-18/beton-ist-ueberall/concrete-is-everywhere> (kasutatud 5.. märts 2023. a.).
- Md. Nabi Newaz Khan, Ashish Kumer Saha, Prabir Kumar Sarker. *Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: A review*. Elsevier. 6.. november 2019. a. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219309751> (kasutatud 17.. aprill 2023. a.).
- Michael Thomas, Ph.D., P.Eng., Professor of Civil Engineering. *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*. University of New Brunswick. 2007. [https://www.cement.org/docs/default-source/fc\\_concrete\\_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf](https://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf) (kasutatud 18.. aprill 2023. a.).
- Mun-Delsalle, Y-Jean. *Powerhouse Brattørkaia: The World's Northernmost Energy-Positive Building*. FuturArc. 7.. juuli 2021. a. <https://www.futurarc.com/project/powerhouse-brattorkaia-by-snohetta/> (kasutatud 6.. mai 2023. a.).
- Negahbani, Darius. *How to Mix Cement to Make Mortar of Concrete*. Marshalls. 25.. oktoober 2018. a. <https://www.marshalls.co.uk/gardens-and-driveways/blog/how-to-mix-cement-to-make-mortar-or-concrete> (kasutatud 21. jaanuar 2023. a.).
- Nick Gromicko, CMI and KentonShepard. *The History of Concrete*. International Association of Certified Home Inspectors. kuupäev puudub. <https://www.nachi.org/history-of-concrete.htm> (kasutatud 13.. mai 2023. a.).
- Nrep. *Urcycle studios*. kuupäev puudub. <https://nrep.com/project/upcycle-studios/> (kasutatud 25.. aprill 2023. a.).
- Official Journal of the European Union. *Commission implementing decision (EU) 2019/1004*. 7.. juuni 2019. a. [https://eur-lex.europa.eu/eli/dec\\_impl/2019/1004/oj#:~:text=Commission%20Implementing%20Decision%20\(EU\)%202019,2384%20\(notified%20under%20document%20C](https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2019/1004/oj#:~:text=Commission%20Implementing%20Decision%20(EU)%202019,2384%20(notified%20under%20document%20C) (kasutatud 23.. veebruar 2023. a.).
- PCA America's Cement Manufacturers. *Chemical Admixtures*. 2023. <https://www.cement.org/cement-concrete/concrete-materials/chemical-admixtures> (kasutatud 11.. aprill 2023. a.).
- Preston, Johanna Lehne and Felix. *Making concrete change, innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. Energy, Environment and Resources Department. juuni 2018. a. <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston.pdf> (kasutatud 8.. veebruar 2023. a.).
- Ramsden, Keegan. *Cement and concrete: the environmental impact*. 3.. november 2020. a. <https://psi.princeton.edu/tips/2020/11/3/cement-and-concrete-the-environmental-impact> (kasutatud 18.. veebruar 2023. a.).
- Rand, B. *Calcination*. 2.. detsember 2012. a. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978008034720250023X> (kasutatud 18.. märts 2023. a.).
- Republic of Estonia, Ministry of the Environment. *Waste, emissions, Circular economy*. 13.. juuli 2021. a. <https://envir.ee/en/circular-economy> (kasutatud 25.. aprill 2023. a.).
- Rreuse. *Job creation in the re-use sector: data insights from social enterprises*. aprill 2021. a. <https://www.rreuse.org/wp-content/uploads/04-2021-job-creation-briefing.pdf> (kasutatud 12.. märts 2023. a.).
- Sarah Katz-Lavigne, Saumya Pandey & Bert Suykens. *Mapping Global Sand*. mai 2022. a. <https://www.gicnetwork.be/wp->

- content/uploads/2022/05/02\_Mapping-Global-Sand\_WEB-3.pdf (kasutatud 20.. märts 2023. a.).
- SG Voice. *Saint-Gobain to develop low carbon cement with Ecocem*. 7.. oktoober 2022. a. <https://sgvoice.energyvoice.com/reporting/companies/12214/saint-gobain-ecocem-low-carbon-cement/> (kasutatud 22.. aprill 2023. a.).
- Shetty, M. S. *Concrete technology, theory and practice*. S. Chand & Company LTD. 2000. <https://old.amu.ac.in/emp/studym/1821.pdf> (kasutatud 15.. märts 2023. a.).
- Sung-Hoon Kang, Yang-Hee Kwon and Juhyuk Moon. *Quantitative Analysis of CO2 Uptake and Mechanical Properties of Air Lime-Based Materials*. MDPI Energies. 28.. juuli 2019. a. [https://www.researchgate.net/publication/334744893\\_Quantitative\\_Analysis\\_of\\_CO2\\_Uptake\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Air\\_Lime-Based\\_Materials](https://www.researchgate.net/publication/334744893_Quantitative_Analysis_of_CO2_Uptake_and_Mechanical_Properties_of_Air_Lime-Based_Materials) (kasutatud 13.. mai 2023. a.).
- The Cement Sustainability Initiative (CSI). *Cement Industry Energy and CO2 Performance*. kuupäev puudub. <https://docs.wbcsd.org/2016/12/GNR.pdf> (kasutatud 15.. aprill 2023. a.).
- The Guardian. *Concrete: the most destructive material on Earth*. 25.. veebruar 2019. a. <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth> (kasutatud 19.. veebruar 2023. a.).
- The Screed Scientist. *Portland Cement : A Brief History*. 20.. juuni 2014. a. <https://www.screedscientist.com/portland-cement-a-brief-history/> (kasutatud 10.. jaanuar 2023. a.).
- Turun kaupunki. *Arkkitehtuurikilpailu*. kuupäev puudub. <https://www.turku.fi/arkkitehtuurikilpailu> (kasutatud 19.. aprill 2023. a.).
- . *Linnanniemen ideakilpailu*. kuupäev puudub. <https://www.turku.fi/linnanniemen-ideakilpailu> (kasutatud 18.. aprill 2023. a.).
- . *LINNANNIEMEN TAIDEOHJELMA*. kuupäev puudub. <https://kerrokantasi-api.turku.fi/v1/download/sectionfile/127/> (kasutatud 18.. aprill 2023. a.).
- Walsh, Niall Patrick. *Zaha Hadid Architects and ETH Zurich Create 3D Knitted Concrete Pavilion Transportable via Suitcase*. ArchDaily. 5.. november 2018. a. [https://www.archdaily.com/905231/zaha-hadid-architects-and-eth-zurich-create-3d-knitted-concrete-pavilion-transportable-via-suitcase?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com/905231/zaha-hadid-architects-and-eth-zurich-create-3d-knitted-concrete-pavilion-transportable-via-suitcase?ad_medium=gallery) (kasutatud 11.. märts 2023. a.).
- Weihua Jin, Christian Meyer and Stephen Baxter. *"Clascrete" - Concrete with Glass Aggregate*. Aci materials journal. aprill 2000. a. <http://www.columbia.edu/cu/civileng/meyer/publications/publications/56.pdf> (kasutatud 17.. aprill 2023. a.).
- World Business Council for Susyainable Development. *Cement Technology Roadmap 2009*. 2009. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/897b7ad9-200a-4314-b870-394dc8e6861a/CementTechnologyRoadmap-CarbonEmissionsReductionsupto2050.pdf> (kasutatud 11.. aprill 2023. a.).
- World-architects. *Studio Gang*. kuupäev puudub. <https://www.world-architects.com/en/studio-gang-chicago/project/sos-children-s-villages-lavezzorio-community-center> (kasutatud 6.. mai 2023. a.).
- Xiaochen Hao, Yong Gao, Xunian Yang, Junwei Wang. *Multi-objective collaborative optimization in cement calcination process: A time domain rolling optimization method based on Jaya algorithm*. Elsevier. 6.. august 2021. a. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152421001219> (kasutatud 13.. märts 2023. a.).
- Zadeh, Joe. *Concrete Built The Modern World. Now It's destroying it*. Berggruen Institute. 6.. detsember 2022. a. <https://www.noemamag.com/concrete-built-the-modern-world-now-its-destroying-it/> (kasutatud 21.. veebruar 2023. a.).
- Zaicev, Vadim. *Бетон в дефиците: 7 фактов и инфографика о добыче песка*. 19.. november 2022. a. <https://www.vokrugsveta.ru/articles/beton-v-deficite-7-faktov-i-infografika-o-dobyche-peska-id848633/> (kasutatud 22.. märts 2023. a.).