



Betonitehtaan sivutuotevirtojen hyödyntäminen

Ylijäämäbetonin ja kivituhkan tuotteistaminen

Marko Viitala

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2024

Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma
Insinööri (ylempi AMK)

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma
Insinööri (ylempi AMK)

VIITALA, MARKO:

Betonitehtaan sivutuotevirtojen hyödyntäminen
Ylijäämäbetonin ja kivituhkan tuotteistaminen
Opinnäytetyö 58 sivua, joista liitteitä - sivua
Toukokuu 2024

Betonin tuotannossa on sivuainevirtoja, joiden hyödyntäminen on ollut hankalaa varsinkin silloin, kun kiviaineksen ottopaikat, tai tehtaat sijaitsevat kauempana suurista kaupungeista. Kiviaineksen tuotannossa syntyy kivituhkaa, jota on voitu jossakin määrin myydä piharakentajien tarpeisiin, polkujen pinnoitteiksi ja urheilualueiden rakentamiseen. Betonin tuotannossa syntyvää ylijäämäbetonia on pidetty ongelmajätteenä, jonka hyödyntäminen on ollut minimaalista. Opinnäytetyön tavoitteena on löytää ratkaisu näihin ongelmiin.

Tavoitteena on tuoda sivuainevirrat markkinoille ja samalla pienentää toimeksiantajana toimivan yhtiön hiilijalanjälkeä. Tärkeintä on saada tuotannossa aiemmin hyödyntämättä jääneet materiaalit hyötykäyttöön. Tutkimus on tarkoitettu laadullisena, eli kvalitatiivisena kirjallisuustutkimuksena siitä syystä, että asiaa on tutkittu kansainvälisesti melko paljon aiemmin, mutta tietoa ei ole toimeksiantajayrityksen käytettävissä kootusti. Tutkimus rajataan koskemaan ylijäämäbetonin ja kivituhkan hyödyntämistä. Tutkimuskysymyksenä on, miten betonitehtaiden sivutuotevirrat voitaisiin hyödyntää myytävänä tuotteena ja miten se vaikuttaisi tehtaiden hiilidioksidipäästöihin?

Tutkimuksen mukaan kivituhkaa ja uusiokiviainesta on mahdollista käyttää mo-
neen tarkoitukseen ja juuri voimaan tullut lainsäädännön muutos tulee hyvin tu-
kemaan ennen hankalasti hyödynnettävien sivutuotteiden käyttöä jatkossa. Tut-
kimustieto kiistattomasti osoittaa, että uusiokiviaines soveltuu maapohjan vahvis-
tamiseen.

Tutkimuksen pohjalta ehdotetaan, että tienrakennustyömaiden lisäksi tuotteita
voitaisiin markkinoida yksityisille asiakkaille pihojen kulkureittien ja polkujen pin-
noitteena kivituhkan ja portlandsementin sekoitusta, tai betonimurskeen, kivituh-
kan ja portland-sementin sekoitusta. Näitä voitaisiin markkinoida esimerkiksi
suursäkeissä, tai kuorma-autolla suoraan kohteeseen kuljetettuna.

Asiasanat: kivituhka, ylijäämäbetoni, betonijäte, betonimurske, pozzolaani, sta-
bilointi, betoniteollisuus, uusiokiviaines

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Master's Degree Programme in Construction Engineering
Master of Science

VIITALA, MARKO:

Utilization of Concrete Plant By-product Flows
Production of Surplus Concrete and Stone Ash
Master's Thesis, 58 pages, appendices - pages
May 2024

In the production of concrete, there are by-product flows, the utilization of which has been difficult. In the production of aggregates, stone ash is produced, which to some extent could be sold basically for the needs of yard builders. Surplus concrete generated in concrete production has been considered problematic waste, the utilization of which has been minimal. The aim of the thesis is to find a solution to these problems.

The goal is to bring the by-product streams to the market and at the same time reduce the carbon footprint of the company acting as a contractor. The most important thing is to get the previously unused materials in production into useful use. The research is intended to be carried out as a qualitative, i.e. a qualitative literature study, because the issue has been researched internationally quite a lot in the past.

The research is limited to the utilization of concrete waste and stone ash. The research question is how the by-product streams of concrete factories could be utilized as a product for sale and how would it affect the factories' carbon dioxide emissions? According to the study, it is possible to use stone ash and crushed concrete for many purposes, and the change in legislation will provide good support for the use of by-products to utilize in the future. The research data shows that recycled concrete rubble is suitable for strengthening the soil base.

It is suggested that in addition to road construction sites, products could be marketed to private customers as a mixture of stone ash and portland cement and crushed concrete, as a pin coating for paths and paths in yards. These could be marketed, for example, in large sacks, or transported by truck directly to the destination.

Key words: stone ash, concrete waste, concrete rubble, pozzolan, stabilization, concrete industry, surplus concrete

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
1.1	Taustaa	6
1.2	Toimeksiantajayritys.....	7
1.3	Tutkimuksen tavoite ja rajaus.....	7
1.4	Tutkimuksen toteutus	8
1.5	Kirjallisuuskatsaus.....	9
2	BETONITUOTANNON SIVUTUOTTEIDEN MAHDOLLISET HYÖDYNTÄMISKOHTEET.....	11
2.1	Kivituhka	12
2.1.1	Kivituhkan stabilointi	14
2.1.2	Stabilointiprosessi.....	15
2.1.3	Stabiloinnissa käytettävät ainekset tai materiaalit.....	18
2.2	Uusiokiviaineksen hyödyntäminen	21
2.2.1	Betonin kierrätysprosessi	22
2.2.2	Uusiokiviaineksen hiilensidontakyky.....	25
2.2.3	Betonimurskeen hyödyntäminen uusiokäytössä.....	28
2.2.4	Yhdyskuntajätteen polttolaitoksen kuona	30
2.2.5	Kivihiihenpolton lento- ja pohjatuhka	32
2.2.6	Kivihiihenpolton rikinpoistotuote	33
2.2.7	Sekoitusuhteet maaperän stabiloinnissa	33
2.2.8	Hiekan ja kivituhkan stabiloiminen pintasekoitusmenetelmällä.....	35
2.2.9	Uusiokiviaineksen avulla stabiloiminen.....	36
2.2.10	Pintastabilointi.....	38
3	VIRANOMAISTAUSTAA.....	40
4	YHTEENVETO	42
4.1	Ehdotukset.....	46
5	POHDINTA	50
5.1	Jatkotutkimusaiheet	51
5.2	Tutkimuksen luotettavuus	51
6	LÄHTEET.....	53

LYHENTEET JA TERMIT

Aggregaatti	Betonin valmistuksessa käytettävä kiviaines
Betonimurske	Uusiokiviaines
CC	Perinteinen betoni tai perinteinen betoni
CW	Betonijäte
CDW	Rakennus- ja purkujäte
RCA	Kierrätetty betonikiviaines
CRCA	Murskattu karkea betonikiviaines
FRCA	Murskattu hieno betonikiviaines
RAC	Kierrätetty kiviainesbetoni
CNA	Karkea luonnollinen aggregaatti
LCA	Elinkaariarviointi
LCI	Elinkaaren inventaario
LCIA	Elinkaarivaikutusten arviointi
VOIDA	Karkeat luonnolliset kiviainekset
Uuma	Uusiomateriaalit

1 JOHDANTO

1.1 Taustaa

Betonin sivuvirtojen hyödyntäminen ja uudet ratkaisut.

Betonin tuotannossa syntyy sivuvirtoja, joita on ollut haastavaa hyödyntää erityisesti silloin, kun kiviaineksen ottopaikat tai tehtaat sijaitsevat kauempana suurista kaupungeista. Kivituhkaa syntyy kiviaineksen tuotannossa, ja sitä on osittain voitu myydä piharakentajille, polkujen pinnoitteisiin ja urheilualueiden rakentamiseen. Kivituhkalla on kuitenkin ominaisuuksia, jotka rajoittavat sen käyttöä tietyissä kohteissa. Etäällä sijaitsevilla kiviaineksen ottopaikoilla kivituhka jää usein hyödyntämättä kuljetuskustannusten vuoksi. Lisäksi betonin tuotannossa syntyy ylijäämäbetonia, jota on pidetty ongelmajätteenä ja jonka hyödyntäminen on ollut vähäistä.

Opinnäytetyön tavoitteena on löytää ratkaisuja näihin ongelmiin. Suomessa vaihtelevat vuodenajat asettavat omat vaatimuksensa rakennusten pihojen edustojen päällystetyille ajo- ja kulkuväylille. Luonnonkiviaineksella päällystetyt pihatiet vaativat kunnollisen pohjatyön ja laadukkaan pinnoitusmateriaalin. Pinnoittaminen on kuitenkin kallista, erityisesti suuremmilla alueilla. Usein pihapihoilla tarvitaan kestäviä ja helppohoitoisia kulkureittejä esimerkiksi pihasta rannalle, metsään tai leikkipaikoille. Nämä reitit jäävät usein luonnonpolkumaisiksi, muuttuvat sadekeleillä kuraisiksi ja puiden juurien takia hankaliksi kulkea.

Yksi potentiaalinen ratkaisu voisi olla betoniteollisuuden ylijäämäkivituhkan ja luonnollisen stabilointiaineen sekoitus. Samalla voitaisiin hyödyntää tuotantoprosessissa syntyvää ylijäämäbetonia uudessa tuotteessa. Betoniylijäämää on vaikea hyödyntää korkealujuutta vaativissa tuotteissa, mutta sen puristuslujuuden ansiosta sille voisi löytää uuden elämän. Ehkä myös stabiloinnin ainesosana sitä voisi todennäköisesti hyödyntää. Betonituotannon suurten hiilidioksidimäärien vuoksi olisi tärkeää voida hyödyntää kaikki mahdollinen raaka-aine mahdollisimman tarkkaan. Sitä kautta voitaisiin parantaa yrityksen hiilijalanjälkeä ja alan imagoa ylipäätään.

1.2 Toimeksiantajayritys

Toimeksiantajayritys Betsset Oy on suuri vuonna 1950 perustettu betonialan yritys. Yhtiöllä on kymmenen tehdasta ja yli 600 työntekijää. Betsset on yksi suurimmista Suomessa toimivista betonisten valmisosien valmistajista. Yhtiön tuotteita käytetään kaikenlaisissa uudiskohteissa. Yhtiön tehtaiden valikoimassa on myös valmisbetonit. (Betsset.fi 2023.)

Yhtiö kehittää jatkuvasti toimintaansa ja pyrkii tarjoamaan monipuolisia mahdollisuuksia ja ratkaisuja rakentamiseen. Tähän asiaan liittyen kulkuväylien pinnoittamiseen soveltuvat tuotteet tukisivat olemassa olevaa tuotepalettia. Yhtiöllä on olemassa olevia tehtaita ja toimitusketjuja laajalti eri paikkakunnilla Suomessa, joten opinnäytetyön tavoitteena oleva valmis tuote olisi saatettavissa sujuvammin toimitukseen. Tutkimuksen tarkoituksena on löytää sopivat ainesosat, sekoitus- suhde, sekoitus- ja tiivistysmenetelmä valmiin tuotteen markkinoille saattamiseksi. Aivan kaikkia näistä ei kuitenkaan tämän opinnäytetyön puitteissa voida vielä muuten kuin teorian tasolla saavuttaa.

1.3 Tutkimuksen tavoite ja rajaus

Tutkimuksen kohteena on betonitehtaiden tuotannon yhteydessä syntyvien sivutuotteiden hyödyntäminen erilaisten kulkuväylien pinnoitteena ja tierungon lujituksessa. Tavoitteena on tuoda sivuainevirrat markkinoille ja samalla pienentää toimeksiantajana toimivan yhtiön hiilijalanjälkeä. Tärkeintä on saada tuotannossa aiemmin hyödyntämättä jääneet materiaalit hyötykäyttöön. Tutkittava menetelmä on ylijäämäisen betoniaineksen hyödyntäminen penkereiden täytöissä mahdollisesti stabiloituna ja voisiko kivituhkaa käyttää sen täyteaineksena. Tarkoitus on myös tutkia, voisiko kivituhkan paikallaan pysymistä kulkureiteillä parantaa stabiloinnin avulla. Stabiloinnissa voidaan hyödyntää erilaisia menetelmiä ja materiaaleja. Tavoitteena on löytää koostumus, joka on ympäristöystävällinen ja koostuu luonnonmukaisista ainesosista.

Kiviaineksen stabiloinnissa voidaan käyttää monenlaisia ainesosia, mutta niiden saatavuus ja hinta voivat vaihdella paljon. Tavoitteena on kehittää täysin luonnonmukaisista aineksista syntyvä tuote ja samalla pienentää yhtiön hiilidioksidipäästöjä, sekä päästä eroon aiemmin hyödyntämättä jääneistä ylijäämämateriaaleista. Tutkimus rajataan näistä syistä koskemaan betonijätteen ja kivituhkan hyödyntämistä.

Opinnäytetyössä selvitetään kuitenkin myös muita materiaalien ominaisuuksia ja mahdollisuuksia. Tutkimus on tarkoitus toteuttaa kirjallisuustutkimuksena siitä syystä, että asiaa on tutkittu kansainvälisesti melko paljon aiemmin, mutta tietoa ei ole toimeksiantajayrityksen käytettävissä kootusti. Tieto on pirstaloitunutta ja paikoin hankalasti löydettävissä. Käytännön tutkimuksia ja kokeita ei voida suorittaa opinnäytetyön ajoituksen sijoituessa talviseen aikaan ja hallitilan puutteen vuoksi. Ei ole mahdollista pyhittää suurta lämmitettyä tilaa pitkäksi kuivumisajaksi. Kokeita voidaan suorittaa opinnäytetyön jatkeeksi toimeksiantajayrityksen toimesta myöhemmin. Tutkimuksessa selvitetään oikean seoksen lisäksi lopputuotteen ympäristövaikutuksia. Tutkimuskysymyksenä on, miten betonitehtaiden sivutuotevirrat voitaisiin hyödyntää myytävänä tuotteena ja miten se vaikuttaisi tehtaiden hiilidioksidipäästöihin?

1.4 Tutkimuksen toteutus

Tämän opinnäytetyön tutkimusstrategia on kvalitatiivinen, eli laadullinen tutkimus, koska se toteutetaan olemassa olevan tiedon tutkimisena. Laadulliseksi tutkimuksen tekee varsinkin numeraalisen tiedon vähäisyys tai puuttuminen. Tutkimuksen tarkoitus on olla sekä kartoittava, että selittävä. Kun on tarkoitus kartoittaa, pyritään etsimään uusia näkökohtia ja sen avulla pyritään löytämään uusia ilmiöitä, sekä selvittämään aiemmin vähän tunnettuja ilmiöitä. Kartoitettaessa voidaan myös kehittää erilaisia hypoteeseja. Kun tarkoitus on etsiä selitystä johonkin ilmiöön tai ongelmaan, haetaan yleensä syyseuraussuhteita ja niiden muodostamia tai välisiä tapahtumaketjuja. Tutkitun tiedon perusteella voidaan myös ennustaa tulevia ilmiöitä, mutta se ei ole tämän tutkimuksen varsinainen tarkoitus. (Hirsjärvi, Remes & Sajavaara 2007, 134.)

Kvalitatiivisessa tutkimuksessa kuvataan lähtökohtaisesti todelliseen elämään liittyviä ongelmia (Hirsjärvi, Remes & Sajavaara 2007, 157). Tässä tapauksessa todelliseen elämään liittyvät ongelmat ovat hyödyntämättömät sivutuotevirrat, joiden käytölle etsitään tarkoitusta. Tutkimuksessa on myös tapaustutkimuksen piirteitä ja ilmiötä voitaisiin lähestyä myös toiminnallisen tutkimuksen menetelmiä, mutta vallitsevien olosuhteiden puitteissa tutkimus kuitenkin toteutetaan kirjallisuustutkimuksen menetelmin. Nämä kaikki tavat kuuluvat laadulliseen tutkimusstrategiaan.

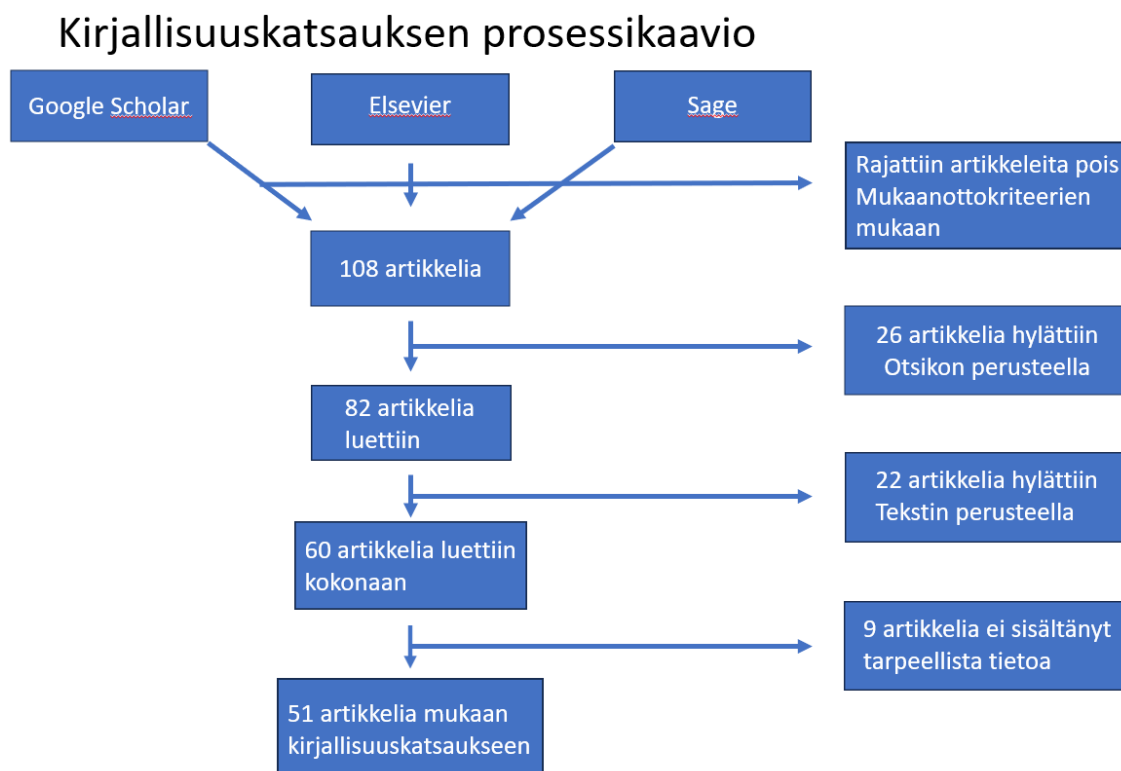
Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymys määrittävät tämän tutkimuksen tie-teenteoreettiset lähtökohdat. Tutkimusotteena käytetään teoreettista analyysia, jossa tarkoituksena ei ole testata teoriaa, tai hypoteeseja käytännössä vaan analysoida asioita valitaan olemassa olevasta aineistosta. Tässä tutkimusotteessa aikaisemmin hankittu tieto ohjaa tutkimusta enemmän kuin pelkkä teoria. Kokeemusperäisesti hankittu tieto ja teoria yhdistyvät tässä analyysimetodissa. (Tuomi & Sarajärvi 2002, 98–99.)

1.5 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksen tai kirjallisuustutkimuksen tarkoituksena on koota yksittäisistä tutkimuksista muodostettava kokonaisuus (Flinkman & Salanterä 2007, 84–98). Ensimmäisessä vaiheessa vertaisarvioidut artikkelit tunnistetaan, valitaan ja haetaan. Avainsanoilla, jotka on kehitetty käyttämällä Feldvarin (2009) ja Knappin (2000) ohjeita, jotka koskevat hakusanojen käyttöä tietokoneavusteisissa tiedonhakuprosesseissa (Feldvar 2009, 4–6; Knapp 2000).

Tiedonhaussa käytetään Google Scholaria, Elsevieriä (ScienceDirect), Sagea, kirjastojen hakua ja muita saatavilla olevia tietokantoja. Kirjallisuudelta edellytetään, että ne olisivat pääasiassa vertaisarvioituja kaikissa tieteelliseen tutkimukseen liittyvissä asioissa. Muissa, kuten markkinoilla olevien tuotteiden kartoittamisessa voidaan käyttää myös lehtiartikkeleita ja yritysten nettisivustoja. Päällekkäiset, ei-saatavilla olevat ja soveltamisalan ulkopuoliset artikkelit suljettiin pois alustavasta luettelosta.

Toisessa vaiheessa toistuvat ja voimakkaat teemat tunnistetaan ja ryhmitellään kirjallisuuslähtöisen organisaatiokehityksen ja konseptikeskeisen kokonaiskäsityksen muodostamiseksi (Webster & Watson, 2002 3, 23). Kolmannessa vaiheessa löydöksistä luotiin myös selostus vastaamaan tämän tutkimuksen tutkimuskysymyksiin. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään systemaattisen kirjallisuuskatsauksen induktiivisesti syntyneitä havaintoja ja vastataan seuraavaan tutkimuskysymyksiin. Prosessia avataan seuraavassa prosessikaaviossa tarkemmin.



Kuvio 1: Kirjallisuuskatsauksen prosessikaavio (Viitala 2024)

2 BETONITUOTANNON SIVUTUOTTEIDEN MAHDOLLISET HYÖDYNTÄMISKOHTTEET

Uusiokiviainesta ja kivituhkaa voitaisiin käyttää esimerkiksi kulkuväylien ja piha-aiden pinnoituksessa luonnollisen eroosion, pölyämisen ja veden mukana pois kulkeutumisen estämiseksi. Kulkuväylien ja ajoteiden pinnoitusmenetelmiä on useita erilaisia, ja valinta riippuu usein taloudellisista resursseista, mieltymyksistä sekä polun käyttötarkoituksesta. On monia menetelmiä ja materiaaleja, joista voidaan tehdä ajotietä ja polkuja piha-alueille. Yleisimpiä materiaaleja ja menetelmiä ovat:

- Sorastus murskeella, soralla tai kivituhkalla on yksinkertainen, edullinen tapa ohjata jalkaliikennettä puutarhan läpi. Sorapolku kestää pidempään kuin pelkkä maa ja stabiloituna kyseiset materiaalit estävät kasveja valtaamasta kulkureittejä
- Pihalaatat ja tiilet ovat suosittu valinta puutarhapoluille, koska ne ovat kestäviä ja niitä on useita värejä ja muotoja. Ne on myös helppo asentaa ja huoltaa
- Valettu betoni on suosittu valinta ajotieltä, koska se on kestävä ja pitkäikäistä. Se voidaan leimata tai petsata erilaisten kuvioiden ja värien luomiseksi
- Luonnonkivet ovat vaihtoehto, jos haluaa luoda puutarhaan luonnollista ilmettä. Niitä on eri muotoisia ja kokoisia, ja ne voidaan valmistaa useista eri materiaaleista, mukaan lukien paasi, liuskekivi ja kalkkikivi
- Asfaltti on suosittu valinta ajoteille, koska se on kestävä ja pitkäikäistä. Se on myös suhteellisen edullinen ja helppo asentaa. Polkuihin se voi kuitenkin olla pohjien tekemisineen melko kallista
- Maa-aines on halpa ja helppo tapa luoda polku puutarhaan. Se ei kuitenkaan ole pitkäikäinen ratkaisu, ja se voi muuttua mutaiseksi ja liukkaaksi märkänä
- Puulaudat, tai pitkospuut voivat tulla kyseeseen, jos haluaa luoda maalaismaisen ilmeen puutarhaan. Isompien alueiden tekeminen puusta on kuitenkin työlästä ja kallista
- Liuskekivilaatat ovat laattojen ohella suosittuja. Niitä on eri värejä ja kokoja, ja niitä voidaan käyttää useiden eri kuvioiden luomiseen

- Kumilaatat ovat vaihtoehto, jos haluaa luoda pehmeän, pehmustetun pinnan puutarhaan. Ne ovat helppoja asentaa, ja niitä on saatavana useissa eri väreissä ja kuvioissa
- Valssatut matot voivat tulla kyseeseen, jos tavoitellaan puutarhaan luonnollisempaa ilmettä. Ne on valmistettu luonnonmateriaaleista, kuten bambusta, ja niitä on useita eri kokoja ja värejä
- Ruoho on melko yleinen, suhteellisen halpa ja helppo asentaa. Se vaatii kuitenkin säännöllistä huoltoa ja voi muuttua mutaiseksi ja liukkaaksi märkänä. (Shiffler 2023.)

Edellä mainittuja toteuttamistapoja voidaan käyttää pintakerrosten parantamiseen. Syvemmällä olevan rakennuspohjan vahvistuksessa käytetään paalutuksen ja massanvaihdon lisäksi stabilointia riippuen olosuhteista, kustannuksista ja siitä millainen rakentaminen on kyseessä. Kevyempien rakenteiden alla olevat ekspansiiviset savipohjamaat vaativat maaperän stabilointia erilaisilla lisäaineilla niiden kestävyysominaisuuksien parantamiseksi.

Maaperän stabilointi on tekniikka, jota käytetään parantamaan ja vahvistamaan maaperän teknisiä ominaisuuksia, kuten lujuutta, jäykkyyttä ja tilavuuden muutosta. Seuraavissa kappaleissa keskitytään siihen, miten betonintuotannon sivutuotteet kivituhka, ylijäämäbetoni ja uusiokiviaines soveltuvat olemassa olevan tutkimustiedon perusteella maan parantamiseen niin pinta-, kuin pohjarakenteissa.

2.1 Kivituhka

Kivituhka on kiviainesta, jota syntyy kivimurskaamossa sivutuotteena, kun luonnonkiviaineksesta tehdään mursketta. Kivituhkan raekoko on yleensä pieni, esimerkiksi 0–5 mm tai 0–8 mm. Kivituhkaa käytetään pihan pintojen rakentamisessa, sillä voidaan päällystää piha-alueita, polkuja, pihateitä ja reunustaa nurmikoita (Viestintämedia 2023). Kivituhka tiivistyy käytössä kovaksi kerrokseksi, jonka päällä voi jopa ajaa autolla ja josta rikkaruohot eivät helpolla kasva läpi. Kivituhkaa on saatavilla kaikissa kallon väreissä, kuten harmaan, mustan tai punertavan sävyisinä. (Haaviston Sora 2023.) Kuivalla kelillä se pölyää ja kulkeutuu

kenkien pohjassa sisätiloihin. Sateella etenkin huonosti tiivistynyt ja rinteessä oleva kivituhkakkerros voi lähteä valumaan veden mukana. (Viestintämedia 2023.)

Kivituhkan paikallaan pysymisen parantamiseen, on olemassa useita menetelmiä, kuten murskeen levittäminen kivituhkan alle. Menetelmässä kivituhkan alle kannattaa levittää mursketta, joka auttaa sitomaan maata ja estämään rikkaruohojen kasvua. Toinen vaihtoehto on suodatinkankaan käyttö, se voi myös auttaa sitomaan maata ja estämään rikkaruohojen kasvua. Suodatinkankaasta on erityisesti hyötyä silloin, jos maa on liejuinen ja on vaarana kivituhkan uppoaminen pehmeään maa-ainekseen ja sekoittuminen. Kivituhka tiivistyy hyvin myös kastelemalla, jolloin voi saada aikaan kestävän pinnan. Kivituhka myös tiivistyy itseksensä ajan oloon. (Puuilo.) Kivituhkalla on kuitenkin usein tapana pölytä, olla märkänä pehmeää ja kulkeutua sateiden mukana helposti pois paikaltaan. Kivituhkan paikallaan pysymistä voisi parantaa stabiloimalla. (RT 89-11002, 2010.)



Kuvio 1: Kivituhkaa sekoittuneena 3–8 sepeliin (Viitala 2024).

2.1.1 Kivituhkan stabilointi

Murskatun kivituhkan stabilointi on kriittinen prosessi rakennus- ja maarakennusprojekteissa. Tässä prosessissa käytetään erilaisia tekniikoita ja materiaaleja, joilla parannetaan kivituhkan lujuutta ja kestävyyttä, mikä tekee siitä sopivan monenlaisiin sovelluksiin. Kivituhka on kivenmurskausprosessien sivutuote ja sitä käytetään usein rakentamisessa sen erinomaisten tiivistymisominaisuuksiensa ansiosta. Se voi kuitenkin olla epävakaata altistuessaan ympäristötekijöille, kuten vedelle ja tuulelle. Siksi stabilointi on tarpeen sen suorituskyvyn ja pitkäikäisyyden parantamiseksi.

Stabilointiprosessi sisältää kolme eri vaiheita: Stabilointiprosessin **ensimmäinen vaihe** on stabilointiaineen ja sen optimaalisen sekoitussuhteen määrittäminen. Stabilointimekanismi voi vaihdella suuresti uusien yhdisteiden sitoutumisen muodostumisessa. Siksi tarvitaan perusymmärrys kunkin lisäaineen stabilointimekanismeista ennen tehokkaan stabilointiaineen valitsemista tiettyyn käyttötarkoitukseen. (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2009, 2.)

Toinen vaihe käsittää pohjakerrosten rakentamisen: Kipsi- tai kivipohjakerroksen asentaminen myös alempiin kerroksiin voi myös auttaa stabiloimaan materiaalia. Pohjakerros muodostaa vankan pohjan kivituhkalle ja estää sitä siirtymästä tai laskeutumasta ajan myötä.

Kolmas vaihe, eli kastelu ja tiivistys on ratkaiseva vaihe stabilointiprosessissa. Tiivistysprosessi lisää kivituhkan tiheyttä, mikä parantaa sen lujuutta ja vakautta, jolloin kiviaineksen särmit lukittuvat toisiaan vasten lujittaen rakennetta.

Stabilointia voidaan toteuttaa kemiallisesti tai mekaanisesti. Mekaaninen stabilointi voidaan toteuttaa esimerkiksi tekemällä kivituhka-alueen reunoille laudoitus, tai käyttämällä erilaisia geoverkkoja. Kemiallinen stabilointi käsittää maaperän sekoittamisen tai ruiskuttamisen kemiallisesti aktiivisilla yhdisteillä kuten portlandsementti, kalkki, lentotuhka, kalsium tai natriumkloridi tai viskoelastisilla materiaaleilla kuten bitumi. Kemialliset stabilointiaineet voidaan jakaa laajasti kolmeen ryhmään:

- Perinteiset stabilointiaineet, kuten hydratoitu kalkki, portlandsementti ja lentotuhka
- Ei-perinteiset stabilointiaineet koostuu sulfonoiduista öljyistä, ammoniumkloridista, entsyymeistä, polymeereistä ja kaliumista
- yhdisteet; ja sivutuotteiden stabilointiaineet, jotka sisältävät sementtiuunipölyä, kalkkiuunipölyä jne.

Näistä yleisimmin käytetyt kemialliset lisäaineet ovat kalkki, portlandsementti ja lentotuhka (Petry & Little 2002, 447–460.) Vaikka stabilointi lentotuhkalla voi olla taloudellisempaa verrattuna kahteen muuhun, lentotuhkan koostumus voi vaihdella suuresti. Yhdyskuntajätteen polttotuhka voisi myös tulla kyseeseen, mutta se voi sisältää vaarallisia aineita, riippuen poltettavasta jätteestä. Murskatun tuhkan stabilointi on monimutkainen prosessi, joka vaatii huolellista suunnittelua ja toteutusta. Oikeilla materiaaleilla ja tekniikoilla on kuitenkin mahdollista parantaa kivituhkan suorituskykyä ja pitkäikäisyyttä, mikä tekee siitä arvokkaan resurssin rakennus- ja maarakennusprojekteissa. Mattilan (2024) mukaan stabilointia varten myytävän sementtiseostettavan kivituhkan kuivaaminen säkitystä varten voi muodostua ongelmaksi, sillä se vaatii paljon energiaa, koska hienon kiviaineksen vesipitoisuus on usein hyvin korkea. Kuivaamiseen kulutettava energia lisää sekä ympäristö-, että kustannushaittoja. Säkitettävän materiaalin tulisi olla täysin kuivaa, ettei se ala reagoida jo säkissä ollessaan. (Mattila 2024.)

2.1.2 Stabilointiprosessi

Perinteiset stabilisaattorit perustuvat yleensä pozzolaanireaktioihin ja kationinvaihtoon modifioidakseen ja / tai stabiloidakseen (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2009, 2.) Pozzolaanireaktio viittaa prosessiin, jossa betonin kiviaineksia, kuten murskattua kiveä, sekoitetaan pozzolaanien kanssa. Pozzolaanit ovat luonnollisia tai synteettisiä materiaaleja, jotka sisältävät piidioksidia ja alumiinioksidia, ja ne voivat reagoida kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen sementtimäisiä yhdisteitä. (Grace 1999.)

Kationinvaihto (maaperän hiukkasten ympärillä olevan vesiliuoksen kationin ja savipintaan kiinnittyneen toisen kationin vaihto) perustuu maaperän hiukkasia ympäröivän vesiliuoksen kationien ja savipinnassa olevan toisen kationin vaihtoon. Kationinvaihto voi lisätä alkalisuutta aina, kun vetyionit liuoksessa vaihtavat pinoilla emäksisiä kationeja. Vaikutus on yleensä palautuva, joten prosessi ei välttämättä edistä pitkäaikaista alkaliteetin kasvua, kun kationinvaihtokohdat ovat ehtyneet. Itse asiassa kationinvaihto voi toimia päinvastoin, jos emäksisiä kationeja lisätään merisuolasta tai tiesuolasta maaliuokseen, mikä aiheuttaa tilapäistä happamoitumista ja emäksisyyden menetystä. Siitä huolimatta maaperät, joilla on suuri kationinvaihtokapasiteetti, voivat toimia suurena puskurointivarana suhteellisen lyhytaikaisia happamoitumistapahtumia vastaan. (Mattson 2014.)

Kaikista perinteisistä stabilointiaineista kalkki on todennäköisesti rutiininomaisesti käytetty. Sementtikalkki valmistetaan hajottamalla kalkkikiveä korotetuissa lämpötiloissa. Kalkkimaareaktiot ovat monimutkaisia ja sisältävät ensisijaisesti kaksivaiheisen prosessin. Ensisijainen reaktio sisältää kationinvaihdon ja flokkulaation (hiukkasten polymeerien kasaantuminen ja muodostuminen huokosiksi rakenteiksi) sekä agglomeraation (hiukkasten tiivistyminen toisiaan vasten, eli paakkuuntuminen), joka saa aikaan nopeita rakenne- ja plastisuusmuutoksia. (Little 1995.)

Savirakenteen muuttuminen kationinvaihdon ja lyhytaikaisen savihiukkasten kasaantumisen seurauksena suotuisaksi pohjamaaperän ja pohjamateriaalien stabilointiin liittyy flokkulaatioon. Flokkulaatiossa kolloidisten hiukkasten destabilointi tapahtuu suuremolekyylipainoisten synteettisten polymeerien, joita kutsutaan polyelektrolyyteiksi, avulla. Nämä polymeerit imeytyvät useisiin kohtiin, mutta eivät peitä koko kolloidisten hiukkasten aluetta. Koska polyelektrolyyttimolekyylit ovat suhteellisen pitkiä, ne voivat työntyä kaksoiskerroksen yli. Tämä mahdollistaa flokkulaation tapahtumisen hydrofobisten tai vetysidosten kautta. Lisäksi, kun ionivahvuus kasvaa ja kaksoiskerros puristuu, siltojen muodostuminen tehostuu, mikä mahdollistaa hiukkasten lähestymisen toisiaan kohti. (Baraniak & Waleńczyk 2003, 2531–2535.)

Pozzolaaniset reaktiot johtavat suurempiin hiukkasagglomeraatteihin ja hauraampaan ja työstetympään maaperään. Pozzolaanireaktio on prosessi, jossa

pozzolaani, luonnollinen tai keinotekoinen materiaali, reagoi kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen sementtimäisiä yhdisteitä (Betonitieto.fi. Nd). Vaikka pozzolaanireaktioprosessit ovat hitaita, jonkin verran pozzolaanien lujittumisen kiihtymistä voi tapahtua primaaristen reaktioiden, kationinvaihdon ja flokkuloinnin / agglomeraation aikana. Lujuuden kehittyminen voi vaihdella maaperän mukaan, riippuen sen mineralogisista eroista. Siksi pehmenemisjakso, yleensä noin yhden päivän pituiset, mutta vaihtelevat jopa noin neljään päivään, voidaan määrätä lyhytaikaisten reaktioiden vähentämisvaikutuksen maksimoimiseksi plastisuuden, työstettävyyden ja alkulujuuden parantamiseksi ennen lopullista tiivistystä. (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2009, 2–3.) Tiivistyksen suorittamisella ei siis ole varsinaista kiirettä.

Toisessa vaiheessa toteutetaan pitempiaikainen pozzolaanipohjainen sementointiprosessi, jossa hiukkasten flokkuloituminen ja agglomeraatit, johtavat lujuuden kasvuun. Lujuuden kasvu voi olla huomattavaa riippuen kehittyvän pozzolaanisen tuotteen määrästä, ja tämä puolestaan riippuu maaperän mineraalien reaktiivisuudesta stabiloinnissa käytetyn kalkin tai muiden lisäaineiden kanssa. Pozzolaaninen reaktioprosessi voi olla joko vaatimaton tai melko merkittävä riippuen maaperän mineralogiasta. (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2009, 3.)

Tämä johtuu siitä, että prosessi voi jatkua niin kauan kuin ylläpidetään riittävän korkeaa pH-arvoa silikaattien ja aluminaattien liuottamiseksi savesta, matriisista ja joissakin tapauksissa hienosta lietemaaperästä. Nämä liuenneet silikaatit ja aluminaatit sitten reagoivat vapaan kalkin ja veden kalsiumin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraatteja ja kalsiumaluminaattihydraatteja, jotka ovat samantyyppisiä yhdisteitä kuin ne, jotka tuottavat lujutta portlandsementin hydraatiossa. Pozzolaaninen reaktioprosessi ei kuitenkaan rajoitu pitkiin termisiin vaikutuksiin. (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2009, 3.)

Pozzolaaninen reaktio etenee joissakin maaperässä suhteellisen nopeasti riippuen liukenemisnopeudesta maaperässä. Fysiokemialliset muutokset maan pinnalla johtavat plastisuuden muutoksiin, jotka heijastuvat rakennemuutoksiin, joita voidaan havaita suhteellisen nopeasti, aivan kuten kationinvaihtoreaktiot ovat.

portlandsementti koostuu kalsiumsilikaateista ja kalsiumaluminaateista, jotka hydratoituvat muodostaen sementtipohjaiset tuotteet. Sementin hydratoituminen on suhteellisen nopeaa ja saa aikaan välittömän voimanlisäyksen stabiloiduissa kerroksissa. (Little, Males, Prusinski ja Stewart 2000, 5–6.) Siksi Portlandsementin tapauksessa pehmenemisjaksoa ei tyypillisesti sallita sekoittamisten välillä.

Silloin kun komponentteina on maa, sementti ja vesi, on ihan mahdollista sekoittaa massa uudelleen pehmenemisjaksojen jälkeen, jotta saadaan homogeeninen seos ennen tiivistämistä. Vaikka pidennetyin pehmenemisajan omaavan maasementtituotteen lopullinen lujuus saattaa olla pienempi kuin sellaisen, jossa tiivistys saavutetaan ennen ensimmäistä kovettumista, se voidaan pidennetyllä pehmentämisellä parantaa lopullista tuotetta saavuttamalla parempi tasaisuus. Tästä huolimatta tavanomainen käytäntö on tiivistää maasementti 2 tunnin sisällä alkusekoituksesta (American Concrete Institute 1990, 23.)

Hydraatioprosessissa syntyy vapaata kalkkia, $\text{Ca}(\text{OH})_2$:ta. Itse asiassa jopa noin 25 prosenttia sementtimassasta (sementin ja veden sekoitus) on painon perusteella kalkkia. Tällä vapaalla kalkilla on kyky reagoida korkeassa pH:ssa pozzolaanisesti maan kanssa ja tämä reaktio jatkuu niin kauan kuin pH on riittävän korkea, yleensä yli noin 10,5 pH saakka. (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2009, 3.) Näiden lisäksi stabiloinnissa voidaan käyttää bitumia ja hartseja. Niiden stabiloiva vaikutus perustuu liimaaviin ominaisuuksiin, joten ne soveltuvat lähinnä pelkän kiviaineksen stabiloimiseen pintarakenteissa.

2.1.3 Stabiloinnissa käytettävät ainekset tai materiaalit

Kivituhkaa voidaan stabiloida sekä mekaanisesti, että kemiallisesti useilla eri aineksilla. Yleisimpiä stabiloinnissa käytettäviä materiaaleja ovat erilaiset hartsit, portlandsementti, uusiokiviaines, yhdyskuntajätteen polttolaitoksen kuona, kivihiilenpolton lentotuhka ja kivihiilenpolton rikinpoistotuote. Seuraavissa kappaleissa kerrotaan hieman tarkemmin eri materiaaleista.

Hartsi on kiinteä tai erittäin viskoosi kasvi- tai synteettistä alkuperää oleva aine, joka tyypillisesti muuttuu polymeereiksi. Se on yleensä orgaanisten yhdisteiden

seos. Kasvit erittävät hartseja suojakseen vammojen seurauksena, ja nämä aineet suojaavat kasveja hyönteisiltä ja taudinaiheuttajilta. Yleinen hartsin raaka-aine on havupuiden erittämä pihka. Useimmat kasvihartsit koostuvat terpeenistä, kuten alfa-pineeni, beeta-pineeni ja muut. Hartseja käytetään eri teollisuudenaloilla niiden monipuolisuuden ja kestävyuden vuoksi. Esimerkiksi meripihka on eräänlainen fossiilinen hartsi, jota käytetään koruissa. Jähmettynyttä hartsia käytetään liimoissa ja lakoissa. Joitakin esimerkkejä kasvihartseista ovat meripihkan lisäksi Balm of Gilead, balsami, Kanadan balsami, kopaali, dammarkumi, lohikäärmeen veri, elemi, suitsuke, galbanum, guajakum, kaurikumi, hasis, labdanum, mastiksi, mirha, sandarakkihartsi, styraksi, ja spinifex-hartsi. (Britannica.com 2023.)

Synteettiset hartsit ovat kemiallisesti erilaisia, ja niillä on joitain luonnonhartsien fysikaalisia ominaisuuksia. Niitä käytetään monenlaisissa sovelluksissa, kuten lakoissa, painomusteissa, muoveissa ja kokoluokissa, sekä lääketieteessä. Joillakin synteettisillä hartseilla on samanlaisia ominaisuuksia kuin luonnollisilla kasvihartseilla, mutta monilla ei. Epoksihartsi on yksi synteettisistä hartseista, joita käytetään yleisesti liimoissa ja komposiiteissa. On tärkeää huomata, että vaikka kaikki epoksit ovat hartseja, kaikki hartsit eivät ole epoksia. (ksresin.com 2024.)

On tärkeää tietää, että kivituhkan stabilointiin käytetty hartsi on erilainen kuin hartsisidoksessa sorassa käytettävä hartsi. Hartsisidottu sora on läpäisemätön pinta, joka syntyy liimaamalla irtonaisia kiviä kirkkaalla hartsilla. Se ei sovellu kivituhkan stabilointiin, sen hienojakoisemman rakenteen vuoksi. (Resin Bonded against Loose Gravel – Making the Smarter Choice 2014.)

Tieteen ja tekniikan kehittyessä viime vuosikymmeninä on avautunut mahdollisuuksia uudentlaisille maaperän stabilointimenetelmille. Erityisesti polykondensaatiopolymeerit ovat osoittautuneet hyödyllisiksi verrattuna polyadditiopolymeereihin. Polykondensaatiopolymeerit toimivat laajempien polymeeriketjujen kanssa. Niiden polymeroituminen harvoin pysähtyy ja käynnistyy uudelleen, ja lisäksi ne ovat edullisia ja helppoja valmistaa. Synteettiset polymeerit, kuten vinyylit ja akryyliamidit, voivat peittää maaraakeita, vähentää läpäisevyyttä ja parantaa hienojakoisen materiaalin kuivalujuutta, mikä auttaa pitämään karkeamman kiviaineksen yhdessä (Ikeagwuani & Nwonu, 2019, s. 423–440).

Polymeerejä voidaan sekoittaa nestemäisessä muodossa maaperään huokosten täyttämiseksi ja maaperän rakenteen kovettamiseksi. Polymeeristabiloinnin edellytyksiin kuuluvat:

- Polymeerin on tartuttava maapartikkeleihin veden läsnä ollessa
- Polymeerin sisäinen koheesio (aineen sisäinen vetovoima, joka pitää ainetta koossa) on avainasemassa
- Työstettävyyys korkeassa kosteudessa ja matalissa ympäristön lämpötiloissa
- Sekoittuu veteen alhaisen viskositeetin nesteen tuottamiseksi. (Ikeagwuani & Nwonu 2019, 423-440.)

Useimmat tähän mennessä kehitetyistä uusista löydöistä ja tekniikoista ovat luonteeltaan polymeeripohjaisia. Näillä uusilla polymeereillä ja aineilla on useita merkittäviä etuja perinteisiin mekaanisiin ja kemiallisiin ratkaisuihin verrattuna; ne ovat yleisesti ottaen halvempia ja tehokkaampia kuin mekaaniset ratkaisut ja huomattavasti vähemmän vaarallisia ympäristölle kuin monet kemialliset ratkaisut yleensä ovat. (Ikeagwuani & Nwonu 2019, 423–440.)

Savipitoisten maiden stabiloinnissa Onyejekwe ja Ghataora (2015) korostavat, että sulfonoitujen öljyjen ja polymeerien käyttöön liittyvä mekanismi sisältää savihuukkasten kohdistamisen ja saven pinnan varauspolariteetin muutoksia, mikä lisää hiukkasten välistä koheesiovoimaa, modifioi savihilaa ja pinnoittaa hajanaisen kaksikerroksisen vaikutusalueen. Tämä johtaa lopulta maaperähiukkasten sitoutumisen paranemiseen kosteusherkkyyden vähentämiseksi. (Onyejekwe & Ghataora 2015, 651–665.)

Sulfonoitujen öljyjen on myös tunnistettu reagoivan samalla tavalla kuin anioniset polymeerit, joissa negatiivisesti varautunut hydrofiilinen pää vetää puoleensa kationeja savihuukoissa nestemäisessä väliaineessa, mikä vähentää negatiivisesti varautuneen savipinnan emäs-ioninvaihtokykyä ja tekee näin maaperän hydrofobiseksi. (Soltani, Taheri & Khatibi 2017, 1717–1744.) Tämä varmistaa, että herkkyyks kosteuden vaihteluille vähenee (Ikeagwuani & Nwonu 2019, 428).

Kemiallisten stabilointiaineiden toimivuutta ohjaavat monet eri tekijät, jotka ohjaavat sitä, valitaanko tietty stabilointimenetelmä geoteknisten tutkimusten ja testausohjelmien jälkeen. Vaikuttavat tekijät ovat kohteen maa-aineksen laajennuspotentiaali, maaperän murtumisaste, maaperän heterogeenisuus tai yhtenäisyys paikan päällä, maaperän reaktiivisuus, ei-toivottujen kemiallisten yhdisteiden esiintyminen, veden heterogeenisyys ja maaperän vedenjohtavuus, sekä vaadittu maaperän lujuus (Nelson, Chao, Overton & Nelson 2015, 258–294.)

2.2 Uusiokiviaineksen hyödyntäminen

Portlandsementti on betonin olennainen ainesosa, ja sen valmistus tuottaa merkittävästi hiilidioksidia (CO_2). Sanotaan että yhden tonnin portlandsementin valmistus tuottaa noin yhden tonnin hiilidioksidia (Naik & Moriconi 2005, 485–585). Noin puolet sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöistä johtuu kalsinoinnista kalkkikivestä eli prosessista, jossa kalkkikiveä poltetaan ja CO_2 -kaasua vapautuu ilmakehään. Teoreettisesti, kovettunut betoni sitoo suunnilleen saman määrän CO_2 :ta karbonointiprosessissa (Engelsen, Dag, Mehus & Pade 2005, 3.) Betonin karbonoituminen on hyvin tunnettu prosessi, jossa betonin sementtihydraatit reagoivat ilmakehän CO_2 :n kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia (CaCO_3). Se on prosessi, joka tapahtuu betonin pinnassa.

Karbonoituvan betonin määrä liittyy altistumisaikaan, sekä pinta-alaan. Kun betonirakenteet puretaan ja murskataan, betonin pinta-ala painoyksikköä kohden kasvaa merkittävästi. Siksi, CO_2 :n ottonopeus betonin massayksikköä kohti ja sitten CO_2 :n kokonaismäärä lisääntyy poistovaiheen jälkeen. Viime aikoina aiheesta on tehty paljon tutkimuksia betonin hiilidioksidin imemisestä. (Kikuchi & Kuroda 2011, 115–124.) Murskausprosessi lisää merkittävästi materiaalin pinta-alaa, jolloin CO_2 imeytyy helpommin. Vaikka purku- ja murskausprosessi käyttöönsä lopussa voi olla suhteellisen lyhyt, tuloksena oleva karbonoituminen on tässä vaiheessa merkittävää. (Concretcentre.com 2024.)



Kuvio 2: Kierrätettyä uusiokiviainesta (ArtisticOperations 2017).

2.2.1 Betonin kierrätysprosessi

Betonin kierrättämisessä on mahdollista saavuttaa luonnon kiviainesten säästämisen lisäksi myös ympäristön pienempää kuormitusta valmistusvaiheessa. Kun otetaan huomioon, kuinka luonnon kiviainekset tuotetaan, ei betonin kierrättäminen vaikuta niin työläältä prosessilta. Luonnossa esiintyy yhä vähemmän betonteollisuuteen soveltuvia luonnonsoraesiintymiä ja usein esiintymät sijaitsevat yhä kauempana tehtailta. Luonnonsorakin tarvitsee jalostamista, eli yleensä vähintään seulomista, jossa pyöräkuormaajalla syötetään kiviaines seulontalaitteistoon ja erikokoisia kiviainesmateriaaleja saadaan kuljetettavaksi tehtaalle. Usein kiviaines vaatii seulonnan lisäksi murskaamista, jossa seulan eteen sijoitetaan kivenmurskauslaitteisto. Tämän jälkeen kiviaines välivarastoidaan yleensä kiviaineksen ottopaikalle, josta se kuljetetaan betonitehtaalle varastokasoihin odottamaan pyöräkuormaajasyöttöä silloihin.

Kalliosta louhittavassa betonikiviaineksessa prosessi on paljon pidempi. Ensin kiviaines täytyy irrottaa kalliosta räjäyttämällä, eli louhimalla. Ensin poravaunulla porataan kallioon reikiä ottosyvyyteen saakka, jonka jälkeen reiät täytetään lähes pintaan saakka räjäytysaineella ja loppuosa reiästä täytetään esimerkiksi sepeillä, jolloin tällä ”täkkäämiseksi” kutsutulla toimenpiteellä varmistetaan voiman

suuntautuminen sivuttaissuuntaan. Täkkäämisestä johtuen räjäytetyn kallion pintaan jää usein isompia kivilohkareita, jotka pienitään kaivinkoneeseen kiinnitetyllä iskuvasaralla murskauskaluston murskaimeen sopivan kokoisiksi kiviksi. Sitten vasta päästään suorittamaan samaa murskaus- ja seulomisprosessia kuin luonnollisen sora-aineksen jalostamisessa.

Kierrätysbetonin kierrättämisessä kaikki lähtee olemassa olevan ja elinkaarensa päähän tulleen rakennuksen purkamisesta. Betonikiviaines kuljetetaan purkamista suorittavan yrityksen ympäristöluvanvaraiselle alueelle, jossa se murskaataan karkeasti kaivinkoneeseen kiinnitetyn pulverioijan avulla. Tässä yhteydessä siitä erotellaan isommat raudoitteet erikseen omaan kasaansa odottamaan sulattoon kuljettamista. Sitten pulveroitu betonikiviaines syötetään murskaimeen kuljetinta pitkin, joka erottelee loput raudoitteet voimakkaan sähkömagneetin avulla. Uusiokiviainekset voidaan myös seuloa erikokoisiksi lajikkeiksi murskausprosessissa. Sen jälkeen materiaalit voidaan kuljettaa käyttökohteisiin, tai varastoidaan purkuyrityksen alueelle odottamaan tulevaa käyttötarkoitusta.

Nazar, Mahmood ja Al-Obaidin (2002) mukaan rakennus- ja purkumateriaalien kierrätys vähentää saastuttavien kaasujen liiallista tuotantoa ja CO₂-päästöjä, joilla on suora vaikutus maapallon lämpenemiseen. Se minimoi jatkuvan raaka-aineen louhinnan ja pitkän matkan kuljetuksen tarvetta. Se myös vähentää uusien kaatopaikkojen tarvetta. (Nazar, R. S., Ahmed, M. D. & Al-Obaidi 2022, 782.) Seuraavassa kuvassa kaivukone syöttää kierrätysbetonia telamurskaimeen.



Kuvio 3: Liikkuva betoni- ja teräsbetonirakennusjätteiden murskauskone toiminnassa (Dizgalvis 2022).

Nykyinen politiikka ei tällä hetkellä edistä hienojakoisen betoniaineksen sisällyttämistä kantavien rakennusosien sementtiseoksiin, mikä johtuu pääasiassa siitä, että sen vaikutuksesta seoksen suorituskyvystä ei ole yksimielisyyttä (Villagrán-Zaccardi, Marsh, Sosa, Zega, De Belie & Bernal 2022). Kierrättämisprosessissa on äärimmäisen tärkeää kyetä pitämään uusiokiviainekset mahdollisimman puhtaana kaikesta muusta maa-aineksesta, mikäli sitä halutaan käyttää betonin tuotannossa. Betonteollisuus ry:n toimitusjohtaja Mattilan (2024) mukaan uusiokiviaineksen käyttökohde ratkaisee sen, kuinka paljon ympäristön kuormittavuuteen voidaan uusiokäytöllä vaikuttaa. Uusiokiviaineksen käyttö edellyttää sementtimäärän kasvattamista, jotta sen ominaisuudet säilyisivät ennallaan. Kierätysbetonista voidaan hyödyntää pelkästään murskeen karkea fraktio, jolloin jäljelle jää runsaasti vaikeasti hyödynnettävää hienoa ainesta. Hieno aines olisi hyödynnettävissä esimerkiksi maarakennuskäytössä, jossa betonimurske korvaa itseään suuremman määrän kalliomursketta. Betoni kannattaa tehdä uudesta laadukkaasta kiviaineksesta, joka muuten menisi tienpenkkaan ja tienpenkka puolestaan kannattaa tehdä betonimurskeesta, jossa se korvaa itseään suuremman määrän kiviainesta. (Mattila 2024.)

Villagrán-Zaccardi et. al. (2022) tutkimuksen mukaan erityisesti maankäytön vaikutusluokkaan vaikutti eniten luonnon kiviaineksen korvaaminen uusiokiviaineksella. Erityisesti kun otetaan huomioon ilmastonmuutoksen vaikutus kuutiometriä kohti sekoituksessa, jossa oli 50 %:n kierrätysbetonikorvaus, osoitti huomattavaa 36.0%:n vähennystä perinteiseen betoniin verrattuna. Nämä havainnot ovat linjassa aiemman tutkimuksen kanssa, joka osoitti, että luonnon kiviaineksen korvaaminen kaivetulla maaperällä ja uusiokiviaineksella tehtävällä täytöllä, voi vähentää kokonaisenergiankulutusta 5 % koko elinkaaren aikana. On kuitenkin syytä huomata, että kaikissa tutkimuksissa ei ole havaittu niin merkittäviä parannuksia ympäristövaikutusluokissa, kun kierrätysbetoni sisällytetään betonituotantoon. (Villagrán-Zaccardi et. al. 2022.)

Esimerkiksi toinen tutkimus, joka keskittyi betonilohkojen tuotannon alusta loppuun (betonin elinkaari) kierrätysbetonilla, ei paljastanut merkittäviä parannuksia useimmissa vaikutusluokissa (Zhao, Courard, Gros Lambert, Jehin, Léonard & Xiao 2020). Kierrätetyn betonin käyttö vaikuttaisi tutkimustiedon perusteella olevan järkevämpää toteuttaa tienrakentamisessa penkereiden täyttömateriaalina, tai savimaiden kantavuuden parantamisessa stabilointitekniikan avulla.

2.2.2 Uusiokiviaineksen hiilensidontakyky

LCCO₂ tarkoittaa elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä, joka on yksi hiililaskennan menetelmistä. LCCO₂:n laskennassa varastoanalyysi sisältää seuraavat prosessit: materiaali, betonin valmistus ja rakentaminen, purku, kierrätys ja kuljetus. Ensinnäkin CO₂-päästöjen määrä kunkin aikana prosessi laskettiin ja laskettiin yhteen. Määrät seuraavien laskutoimitusten hiilidioksidipäästöistä materiaali-, betoni- ja rakentamis-, purku- ja kuljetusprosessien aikana, on lainattu Japan Society of Civil Engineersin tiedoista. Hiilidioksidin sitoutumisen määrä yhdessä tonnissa kierrätettyä murskauskiveä voidaan laskea käyttämällä seuraavaa yhtälöä:

$$x a b c d = x - x x () 1 \text{ (kg)}$$

Jossa,

x: CO₂:n nielun määrä yhdessä tonnissa kierrätettyä murskattua kiveä (kg),

a: raekoko pienempi tai yhtä suuri kuin 5 millimetriä,

b: liukenemattoman jäännöksen suhde,

c: CaCO_3 -pitoisuus,

d: CO_2 :n ja CaCO_3 :n molekyylipainojen suhde.

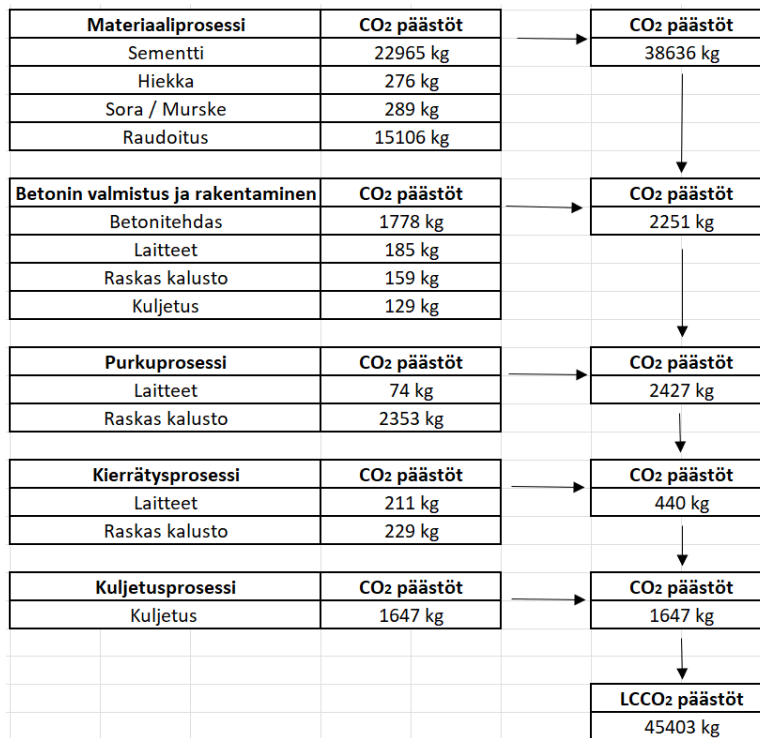
Laskennassa käytetyt molekyylipainot ovat: $\text{CaCO}_3 = 100,1$, $\text{CO}_2 = 44,0$

Hiililaskennassa otetaan huomioon koko betonin elinkaari. Seuraavassa esimerkissä lasketaan betonin tuotantomäärä 100 m³ betonia, joka vastaa pienehkön kierrätyslaitoksen yhden tunnin työsaavutusta betonin murskaamisessa. Kuviossa 1. näkyy betonin sekoitussuhde, joka tässä esimerkissä on veden ja sementin suhde oli 55 % ja hiekkapitoisuus 44 %.

		Yksikkömäärä (kg/m ³)	Kokonaismäärä (t/100 m ³)
Materiaali	Vesi	165	16,50
	Sementti	300	30
	Hiekka	800	80
	Sora / Murske	1050	105
	Rauditus	(-)	20

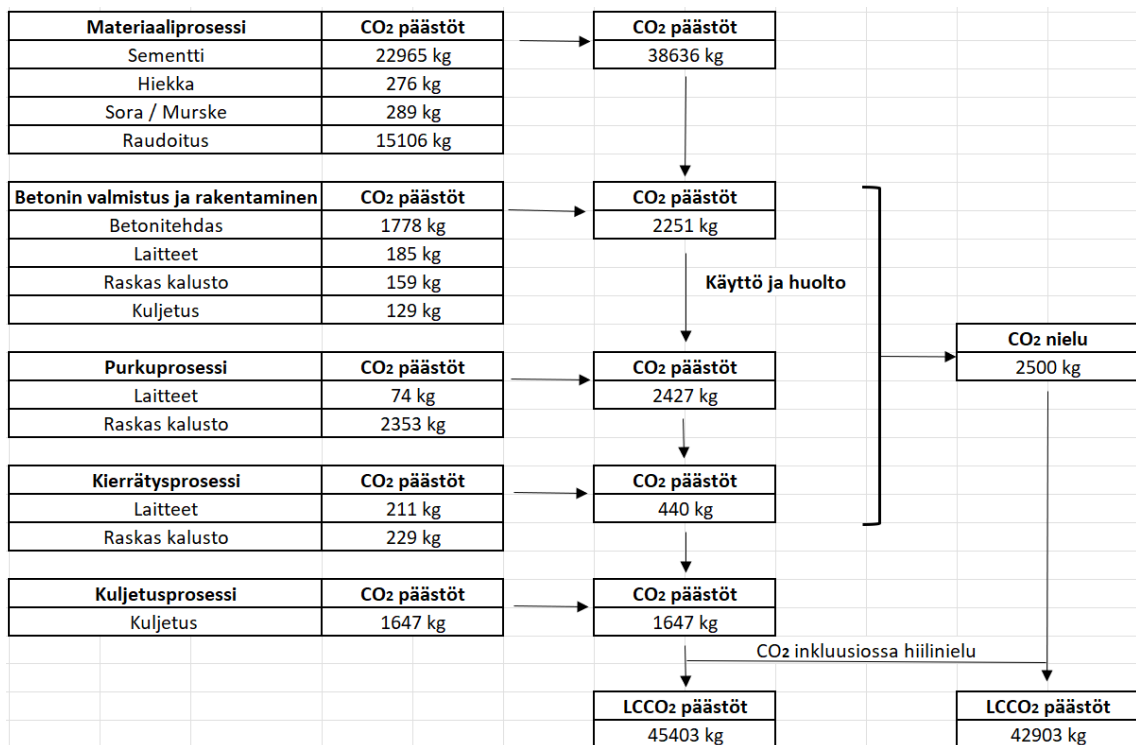
Kuvio 1: Sekoitussuhde ja materiaalit (Kikuchi & Kuroda 2011, 115–124.)

Betonin elinkaaren hiilidioksidin tuoton laskentaesimerkki 100 m³ määrästä betonia on laskettu kuviossa 2.



Kuvio 2: LCCO₂ laskenta (Kikuchi & Kuroda 2011, 115–124.)

Karbonisaation aiheuttaman hiilensidonnan laskennallinen vaikutus betonin elinkaaren hiilidioksidipäästöihin esitetään kuviossa 3.



Kuvio 3: LCCO₂-laskennan tulokset, mukaan lukien CO₂:n otto. (Kikuchi & Kuroda 2011, 115–124.)

Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on tärkeää ilmaston lämpenemisen torjumiseksi. Betoni on yksi yleisimmin käytetyistä rakennusmateriaaleista ja sen valmistus tuottaa paljon hiilidioksidia. Edellisessä taulukossa nähtävä käytön ja huollon, sekä purku ja kierrätysprosessin aikainen hiilinielu (2500 kg) on noin 5,5 % betonin elinkaaren hiililaskennan tuloksesta (45403 kg).

Kikuchin ja Kurodan (2011) tekemästä tutkimuksesta voi tehdä seuraavat johtopäätökset:

- Hiilidioksidin nielun määrä kasvaa merkittävästi kun uusiokiviaineksen raekoko on pieni ja murskattuna materiaalia vuorotellen kostutetaan ja kuivataan.
- Purettu hiilidioksidin ottoa koskeva tutkimus Kierrätyslaitoksista saatu betoni johti hiilidioksidin nielun määrä yhdessä tonnissa kierrätettyä murskattua betonia (0–40 millimetriä), arvioidaan olevan noin 11 kiloa.
- LCCO₂-laskennan tuloksia tarkasteltaessa hiilinielu purkamisen ja kierrätyksen aikana todettiin olevan noin 5,5 % pienempi, jos karbonatisoitumisen aiheuttamaa hiilinielua ei otettaisi huomioon.
- (4) LCCO₂:ta laskettaessa otetaan huomioon vain hiilinielu purku- ja kierrätysprosessien aikana. Jos mukaan laskettaisiin hiilinielu ajalta ennen purkamista ja kierrätystä, voitaisiin päästä vielä parempiin tuloksiin. (Kikuchi & Kuroda 2011, 115–124.)

Edellä mainitut tulokset perustuvat kuitenkin rajalliseen määrään, eli kahdeksaa kierrätyslaitosta koskevaan kyselyyn.

2.2.3 Betonimurskeen hyödyntäminen uusiokäytössä

Vanhoista puretuista rakenteista murskatun betonin kierrätys karkeaksi kiviaineksi uudisrakentamisessa voi edistää kestävämpää suunnittelua, suunnittelua ja rakentamista infrastruktuuritarpeissamme. Viimeaikaiset tutkimukset Knaack ja Kurama (2013, 2015) ovat osoittaneet, että RCA (kierrätysbetonikiviaines) voi olla sopiva materiaali käytettäväksi rakenneosissa, jotka joutuvat pitkäaikaiseen käyttökuormitukseen sekä äärimmäisiin kuormitusolosuhteisiin. Vaikka RCA:lla

on merkittävä vaikutus betonin jäykkyyteen (Youngin moduuli), vaikutus puristuslujuuteen on suhteellisen pieni. Suurentuneet RCA-määrät johtavat teräsbetoni-palkkien lisääntyneeseen halkeamiseen RCA-betonin alentuneen murtumiskertoimen seurauksena. Virumis- ja kutistumisjännitykset johtavat teräsbetoni-palkeissa neutraaliakselin (nollakokonaisvenymän sijainti) merkittävään siirtymiseen alaspäin. (Knaack & Kurama 2013, 483–493.; 2015, 565–577.)

Brandes ja Kurama (2016) ovat tutkineet uusiokiviaineksen käyttämistä perinteisen luonnonkiviaineksen korvaajana. Kokeessa kiviaines korvausosuudet olivat 50 % ja 100 %, eli jälkimmäisessä kiviaines korvattiin kokonaisuudessaan uusiokiviaineksella. Testissä kuvatut tulokset perustuivat ulosvetotesteihin, jotka on adaptoitu ASTM A1081:stä (2015), joka on standarditestimenetelmä seitsenlankaisen teräksen esijännitysnauhan sidoslujuuden arvioimiseksi. ASTM-testi vaatii laastia, joka on valmistettu tyyppin III sementistä ja hiekasta (ilman karkeaa kiviainesta). Tutkimus osoitti, että RCA:n käyttö ei vaikuttanut merkittävästi sidoslujuusindeksiin. Käytöstä poistettujen betonielementtien RCA toimi paremmin, eli johti pienempiin säikeiden sidoslujuuden ja epäbetonin lujuuden laskuun kuin uudelleenkierrätettävän valmisbetonin RCA. (Brandes & Kurama 2016, 1343.)

Matarin ja El Dalatin (2012) tutkimuksessa selvitettiin kierrätettyjen kiviainesten käytön vaikutusta betonielementteihin ontoissa lohkoissa niiden puristuslujuuteen. Testeillä määritettiin betoniharkkojen valmistuksessa käytettävän kierrätetyn kiviaineksen pitoisuuden määrä sopivan puristuslujuuden omaavien lohkojen saamiseksi. Testit suoritettiin useille lohkojen sarjoille, joiden koostumus sisältää kierrätettyjä kiviaineksia, ja yhdelle vertailulohkosarjalle, jonka koostumus koostui yksinomaan luonnollisista kiviaineksista. (Matar & El Dalat 2012, 388–391.)

Tutkijoiden mukaan aiemmin on osoitettu, että uusiokiviainesten käyttö betoniharkkojen valmistuksessa ilman luonnollisia kiviaineksia ei ole lainkaan taloudellista, koska tarvitaan suhteellisen suuri määrä sementtiä, joka tarvitaan vaaditun puristuslujuuden saavuttamiseksi. Verrattaessa testituloksia kierrätetyn betonin ja luonnollisten kiviainesten (NA) välillä, havaittiin, että kierrätetyt kiviainekset eivät vaikuta lujuuteen ollenkaan. Lujuus jopa kasvaa verrattuna niiden lohkojen lujuuteen, jotka eivät sisällä kierrätettyjä kiviaineksia. Tämä lujuuden lisäys on 8,5

% RA30:lle ja 5,9 % RA50:lle. Tutkimus osoittaa, että betoniharkkojen puristuslujuus riippuu kierrätettyjen kiviainesten prosenttiosuudesta, sementin lisäyksestä, veden lisäyksestä ja superpehmittimen käytöstä. Uusiokiviainesta sisältävien betonilohkareiden valmistuksessa 30 % kierrätettyä kiviainesta sisältävien lohkojen puristuslujuus on suurempi kuin 50 % kierrätettyä kiviainesta sisältävien lohkojen puristuslujuus. (Matar & El Dalat 2012, 390–391.)

Uusiokiviainesta valmistetaan pääasiassa puretuista betonirakenteista, jotka murskataan hienojakoiseksi. Uusiokiviaines koostuu kovettuneesta sementtipastasta, sekä kiviaineksestä. Murskeessa betonipasta on hienojakoisempaa pölyävää ainesta, joka sisältää samanlaisia ainesosia kuin sementtikin. Se tosin on jo reagoinut veden kanssa, joten sen kalsiumhydroksidi ja kalsiumsilikaattihydraatti ovat reagoituneet kalsiumkarbonaatiksi. Seassa on myös reagoimatonta sementtiä, jota joidenkin lähteiden mukaan voi olla mukana jopa lähes kolmasosa alkuperäisestä sementistä. Koostumukset vaihtelevat kuitenkin riippuen raaka-ainelähteistä. Uusiokiviaineksessa kiinnostus on kalsiumhydroksidissa ja reagoimattomassa sementissä. Kalsiumhydroksidin ominaisuus reagoida pozzolaanien kanssa, tekee siitä kiinnostavan yhdistettäessä uusiokiviainesta yhdyskuntajätteen-, tai kivihiilen polttotuhkan kanssa. (Vehmas & Kronlöf 2015, 32.) Uusiokiviaineksen hyödyntämistä stabilointiaineena ei vielä Suomessa ole paljon tutkittu, mutta ulkomaisissa tutkimuksissa sitä on tutkittu hyvällä menestyksellä. Uusiokiviaineksen soveltuvuudesta stabilointiaineeksi kerrotaan myöhemmin tässä raportissa.

2.2.4 Yhdyskuntajätteen polttolaitoksen kuona

Yhdyskuntajätteen polttotuhkaa syntyy poltettaessa kiinteää yhdyskuntajätettä. Sitä voidaan hyödyntää myös betonin valmistuksessa, koska poltossa syntyvällä pohjatuhkalla, on pozzolaanisia ominaisuuksia. Pozzolaanit ovat materiaaleja, jotka reagoivat kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kanssa veden läsnä ollessa ja muodostavat lisää sementtimäisiä yhdisteitä. Betoniin lisätynä pozzolaanit lisäävät sen lujuutta, kestävyyttä ja kestävyyttä kemikaaleja vastaan. (Kumar & Singh 2021, 201.)

Yhdyskuntajätteen polttotuhkaa käytön etuja betonissa ovat esimerkiksi pienempi ympäristövaikutus, koska tuhkan käyttäminen betonin valmistuksessa vähentäisi kaatopaikoille lähetettävän jätteen määrää. Luonnonmateriaaleja voidaan säästää käytettäessä yhdyskuntajätteen polttotuhkaa sementtipohjaisena lisäaineena ja sen avulla voidaan parantaa betonin työstettävyyttä, vähentää hydraatiolämpöä ja parantaa pitkän aikavälin kestävyyttä. (Kumar & Singh 2021, 201.)

Yhdyskuntajätteen polttotuhka sisältää kuitenkin haasteita, koska sen koostumus voi vaihdella merkittävästi jätteen raaka-aineen ja polttoprosessin mukaan. Siksi tiukka laadunvalvonta on välttämätöntä. Jotkut yhdyskuntajätteen polttotuhkat voivat sisältää raskasmetalleja (esim. lyijyä ja kadmiumia) jätekoostumuksen vuoksi. Asianmukainen testaus ja käsittely ovat tarpeen ympäristömääräysten noudattamisen varmistamiseksi. (Fabricius, Renner, Voss, Funk, Perfull, Gehring, Graf, Fromm & Duester 2020, 6–7.) Suunnittelijoiden olisi mukautettava betoniseossuunnitelmia yhdyskuntajätteen polttotuhkan ominaisuuksien mukaisiksi sen erityisominaisuudet huomioon ottaen.

Yhdyskuntajätteen polttotuhkaa voidaan käyttää osittaisena sementin korvaajana betoniseoksissa. Sitä käytetään maailmalla jo yleisesti tienrakennuksessa, päällysteissä ja muissa kuin rakenteellisissa betonielementeissä. Yhdyskuntajätteen polttotuhkan sisällyttämisessä betoniin on lupaavia ominaisuuksia kestävään rakentamiseen, mutta se vaatii huolellista arviointia, testausta ja ohjeiden noudattamista.

Vehmas ja Kronlöf (2015), ovat tutkineet yhdyskuntajätteen polttotuhkan käyttämistä betonivalmistuksessa laajassa VTT:lle tehdyssä tutkimusraportissa no. VTT-R-04051–15, jätemateriaaleista valmistettu hydraulisesti sitoutuva muurirakenne. Raportissa todettiin materiaalien soveltuvan sullomismenetelmällä, joskin veden määrän optimointi oli haasteellista. Paras puristuslujuus saavutettiin uusiokiviaineksen ja yhdyskuntajätteen polttotuhkalla. Negatiivinen asia on se, että yhdyskuntajätteen polttotuhka sisältää klorideja, raskasmetalleja ja sulfaatteja, jotka ovat ympäristölle haitallisia aineita. Lainsäädännön puitteissa sen käyttö kuitenkin sallitaan joissakin kohteissa. (Vehmas & Kronlöf 2015, 33.)

2.2.5 Kivihiilenpolton lento- ja pohjatuhka

Kivihiilen polttojäännökset tuotetaan pääasiassa polttamalla hiiltä hiilivoimaloissa. Poltettaessa kivihiiltä, syntyy pääasiassa kolmea sivutuotetta, eli lentotuhkaa, pohjatuhkaa ja rikinpoistotuotetta (jälkimmäinen käsitellään omassa luvussaan). Lentotuhka on erittäin hienoa, jauhemaista materiaalia, joka koostuu pääasiassa piidioksidista. Se syntyy polttamalla hienoksi jauhettua hiiltä kattilassa. Lentotuhka muodostaa merkittävän osan kivihiilen tuhkasta. Aiemmin lentotuhka päästettiin ilmakehään, jossa se vaikutti negatiivisesti ilmanlaatuun, joten otettiin käyttöön määräyksiä sen hävittämisen valvomiseksi. Nyt lentotuhka kerätään esimerkiksi piippuihin sijoitettujen vesisumupesurien avulla ja varastoidaan hiilivoimaloissa tai lähetetään kaatopaikoille. (Dale 2023.)

Toinen tuote on pohjatuhka. Toisin kuin lentotuhka, se koostuu karkeista ja kulmikkaista hiukkasista, jotka ovat liian suuria kulkeutuakseen savun mukana. Polttoprosessissa se asettuu hiiliuunin pohjalle. Pohjatuhkasta erottuu vielä niin sanottu kattilakuona. Se on sulaa pohjatuhkaa, joka syntyy masuunissa tai jauhettun polttoaineen uunissa, jonka pohjassa on hana-aukko, tai syklonityyppisissä uuneissa. Vesijähdytyksen jälkeen kattilakuona muodostaa sileitä, lasimaisia pellettejä. (Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2018.)

Kivihiilen tuhkan uudelleenkäyttö voi vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, minimoida kaatopaikalle sijoittamista ja vähentää muiden materiaalien käyttöä. Hiilen tuhkan asianmukaisella hallinnalla voidaan saavuttaa kustannussäästöjä, lisää myyntituloja ja taloudellisia etuja muihin materiaaleihin verrattuna. Kivihiilen polttotuhka parantaa materiaalien, kuten betonin ja seinälevyjen lujuutta, kestävyyttä ja työstettävyyttä. Kivihiilen tuhka sisältää epäpuhtauksia, kuten elohopeaa, kadmiumia ja arseenia. Ilman asianmukaista hallintaa nämä aineet voivat saastuttaa vesistöjä, pohjavettä, juomavettä ja ilmaa (Coal ash basis 2023.) Kivihiilen poltto on Suomessa vähentynyt viime vuosina huomattavasti johtuen Venäjän vastaisista pakotteista, joten sen polttotuotteiden saatavuus on hankaloitunut.

2.2.6 Kivihiihenpolton rikinpoistotuote

Savukaasujen rikinpoistomateriaali jää jäljelle hiilikäyttöisen kattilan rikkidioksidipäästöjen vähentämisprosessin jälkeen. Se voi olla joko märkää lietettä, joka koostuu kalsiumsulfidista tai kalsiumsulfaattista, tai kuivajauhemainen sulfidien ja sulfaattien seos. Rikinpoistotuote on synteettistä kipsiä. Vaikka tämä materiaali ei ole teknisesti tuhkaa, koska sitä ei ole hiilessä, sitä käsitellään ja säännellään hiilen palamistuotteena (Ozbayoglu 1998.)

Synteettistä kipsiä voidaan käyttää sementin lisäaineena betonin valmistuksessa. Se parantaa betonin ominaisuuksia, kuten kovettumisaikaa, lujuutta ja kestävyttä. Synteettistä kipsiä lisäämällä betoniteollisuus voi vähentää riippuvuuttaan luonnonkipsivarjoista. Rikinpoistotuotteiden käyttö betonissa vähentää kaatopaikalle sijoittamisen tarvetta. Se vähentää myös hiilen käyttöä korvaamalla energiaintensiivisen sementin tuotannon kestävämmällä vaihtoehdolla. (Galos, Szlugaj, Lewicka & Kamyk 2007.)

Leijupetipolttoprosessissa syntyy sekoitus heikosti sintrattua tuhkaa poltetusta hiilestä, anhydriitista ja muista sulfaateista, sekä aktiivisesta kalsiumoksidista. Sille on ominaista hyvät pozzolaaniset ominaisuudet ja huomattava määrä kalsiumsulfaattia, jota voitaisiin käyttää sementtiteollisuudessa sekä pozzolaanisenä lisäaineena, että asetusajan säätelijänä. Näiden tarkastelu paljasti, että ne parantavat sementtien perusominaisuuksia paremmin kuin puhdas kalsiumsulfaattimateriaalit ja lentotuhka. (Galos, Szlugaj, Lewicka & Kamyk 2007.) Myös savukaasujen rikinpoistomateriaalin saatavuus on heikentynyt Venäjän vastaisien pakotteiden ansiosta.

2.2.7 Sekoitussuhteet maaperän stabiloinnissa

Stabiloidessa neutseellistä maaperää, sementtiä voidaan levittää minkä tahansa maaperän stabiloimiseksi, paitsi maaperät, joiden orgaaninen pitoisuus on yli 2 % tai joiden pH on alle 5,3 (ACI 230.1R-90, 1990). Sementin käyttö rakeisissa maaperissä on osoittautunut taloudelliseksi ja tehokkaaksi, koska tarvitaan pienempiä määriä sementtiä. Lisäksi maaperää, jonka PI-arvo on yli 30, on vaikea

sekoittaa sementtiin. Tämän ongelman voi torjua sekoittamalla siihen kalkkia ennen stabilointia. Jos käytetään poltettua kalkkia, se hydratoituu välittömästi (eli yhdistyy kemiallisesti veteen) ja vapauttaa lämpöä.

Näiden ensireaktioiden tuottama hydratoitu kalkki reagoi myöhemmin savihiukasten kanssa. Nämä myöhemmät reaktiot tuottavat hitaasti lisäkuivumista, koska ne vähentävät maaperän kosteudenpidätyskykyä. Jos poltetun kalkin sijasta käytetään hydratoitua kalkkia tai hydratoitua kalkkiliettä, kuivuminen tapahtuu vain maaperän kemiallistenmuutosten kautta, jotka vähentävät sen vedenpidätyskykyä ja lisäävät sen stabiilisuutta. (Firoozi, Guney Olgun & Firoozi 2017, 2.)

Maaperän stabilointiin tarvittava sementin määrä riippuu maaperän tyypistä ja sen ominaisuuksista. Tässä on joitain yleisiä ohjeita:

- Hyvälaatuinen maaperä: Hyvälaatuiseen maaperään suositellaan noin 5 % sementtipitoisuutta
- Huonosti kantavat hiesumaat: Jos kyseessä on huonolaatuinen hiesumaa, tarvitaan noin 9 % sementtiä
- Ei-plastiset lietteet: Ei-plastiset lietteet vaativat tyypillisesti noin 10 % sementtiä tehokkaaseen stabilointiin
- Plastiset savet: Plastiset savet, joita on vaikeampi stabiloida, saattavat tarvita noin 13 % sementtiä. (Soil cement stabilization 2018.)

Täytyy muistaa, että edellä mainitut luvut ovat vain likimääräisiä. Kivituhka sijoituu laadullisesti lähelle hiesumaan ja hyvälaatuisen maan välimaastoon.

Maaperän stabilointiin tarvittavat sementti- ja vesimäärät voidaan myös laskea maaperäsementtiseosten kosteus-tiheysuhteiden testausmenetelmällä. Tämä testimenetelmä on yleinen ja edullinen toimenpide, jonka useimmat voivat suorittaa ilman monimutkaisia laboratorioita. Tämän testin suorittamiseksi tarvittava määrä sementtiä pitää ensin punnita. Sementtipitoisuus perustuu maan ja / tai

kiviaineksen uunikuivapainoon (sementti ei sisälly) ja ilmaistaan seuraavassa yhtälössä:

$$\text{cement content, } c(\%) = \frac{\text{weight of cement}}{\text{oven-dry weight of soil/aggregate (excluding cement)}} \times 100$$

Voidaan laskea, että 90 kg sementtiä / kuivapainoltaan 1500 kg kivituhkaa, on sementtipitoisuus 6 %. Eli $90 / 1500 \times 100 = 6 \%$.

Seoksessa olevaa vesimäärää kutsutaan vesipitoisuudeksi ja se määritellään veden painona kokonaisseoksessa sementti mukaan lukien. Vesipitoisuus ilmaistaan prosentteina tuotteen kuivapainosta materiaalina, kuten seuraavassa yhtälössä näkyy:

$$\text{water content, } w(\%) = \frac{\text{weight of water in mixture}}{\text{oven-dry weight of soil/aggregate/cement}} \times 100$$

Sementti tulee lisätä käsittelemättömään, stabiloimattomaan materiaaliin ja sekoittaa huolellisesti ennen veden lisäämistä. Näyte on asetettava muottiin yhdestä kahteen tunnin kuluttua siitä, kun sementti lisätään seokseen. Sekoittamisessa olisi hyvä käyttää lähelle samankaltaista sekoitusmenetelmää kuin stabiloimisessakin. (Gross & Adaska 2020, 26–27.)

2.2.8 Hiekan ja kivituhkan stabiloiminen pintasekoitusmenetelmällä

Yksi tapa tehdä kantava pengeri, on stabiloida olemassa oleva hiekkakerros, tai paikalle tuotu kerros kivituhkaa. Portlandsementti voidaan levittää rakenteiden päälle kuivana, tai valmiiksi sekoitettuna vellinä. Seuraavassa vaiheessa pinnassa oleva sementti ja stabiloitava materiaali sekoitetaan suunnitellulta syvyydeltä niin pian kuin mahdollista. Prosessi olisi tärkeä pitää mahdollisimman hyvin organisoituna ja sujuvana, sillä veden kanssa kosketuksiin joutunut sementti alkaa nopeasti reagoimaan. Lisäksi prosessia voi haitata liialliset sateet prosessin aikana. (Gross & Adaska 2020, 29–30.) Oikeilla välineillä voidaan stabiloida suuria alueita nopeasti ja tehokkaasti. Sementin määrän selvittämiseen voidaan

käyttää edellisellä sivulla mainitun sementin prosenttimääräkaavan avulla saatua tulosta ja sen jälkeen seuraavaa kaavaa:

$$Rate \left(\frac{kg}{m^2} \right) = \frac{Percent\ Cement}{100} \times Dry\ Unit\ Weight \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times \left(\frac{Depth\ (mm)}{1,000} \right)$$

Sementin määrä neliometriä kohden saadaan syöttämällä kaavaan kyseiseen materiaaliin tarvittava prosenttimäärä sementtiä, materiaalin (hiekkatai kivituhka) kuivapaino ja pintastabiloinnin syvyys millimetreinä. Esimerkiksi kyseisellä yksinkertaistetulla kaavalla voidaan laskea, että 3 % betonimäärällä 1500 kilogrammaa / m³ kuivapainoltaan olevaa kivituhkaa stabiloitaessa 300 millimetrin syvyydeltä vaatii 13,5 kilogrammaa sementtiä neliometrille: 0,03 x 1500 x (300 / 1000) = 13,5 kg. (Gross & Adaska 2020, 30.)

2.2.9 Uusiokiviaineksen avulla stabiloiminen

Uusiokiviaineksen avulla stabiloitaessa on hyvä muistaa, että uusiokiviaineksen hienojakoisessa kuivuneessa sementtipastassa on yleensä noin 30 % reagoimattomaa sementtiä, joten se voi stabiloitua yllättävän hyvin jopa itsestäänkin. Yleisesti kuitenkin voidaan laskea, että pelkkä uusiokiviaines vaatii lisäsementtiä stabiloituaan. Lisäsementin tarpeen voi perustellusti arvioida olevan noin 30 % pienempi kuin muiden vastaavien luonnonkiviainesten stabiloimiseen vaadittaisiin. Uusiokiviaineksen kanssa voisi stabiloitua vielä menestyksekkäämmin kiinteän yhdyskuntajätteen poltossa syntyneitä tuhkaa.

Savisten maiden stabiloimisessa uusiokiviaines on tutkimusten mukaan yllättävän toimivaa. Kianimehr ym. (2019) suoritti tutkimuksia saven ja hiekkakokoisen uusiokiviaineksen seoksesta. He keskittyivät geoteknisiin ominaisuuksiin, kuten savi-RCA-seosten yksiakseliseen puristuslujuuteen, leikkauslujuuteen ja laskeutumisparametreihin. Heidän tuloksensa osoittivat, että 15 % kierrätysbetonin lisääminen savimaahan voi täyttää suositellut suunnittelukriteerit pohjakerroksille. (Kianimehr, Shourijeh, Binesh, Mohammadinia & Arulrajah 2019, 5.) Tavakol, Kulesza, Jones & Hossain (2020) tutki saven ja RCA-seosten teknisiä ominaisuuksia kalkin, lentotuhkan ja lentotuhkan ja sementin kemiallisten lisäaineiden

kanssa. Testit sisälsivät yksiakselisen puristuslujuuden, CBR:n (California Bearing Ratio) ja lineaarisen kutistumisen ja tulokset osoittivat, että uusiokiviaineksen lisääminen savimaahan parantaa lujuutta ja jäykkyyttä. (Tavakol, Kulesza, Jones & Hossain 2020.)

Sosahab, Ardakani ja Hassanlourad (2023) tutkivat uusiokiviaineksen toimimista stabilointiaineena savisessa maassa 0, 10, 20 ja 30 % uusiokiviainespitoisuuksilla. Tulokset osoittivat, että sekä nesteraja että plastisuusraja laskivat uusiokiviaineksen määrän kasvaessa, minkä seurauksena savi-uusiokiviaines-seoksen plastisuusindeksi (PI) pieneni. Uusiokiviainespitoisuuden kasvaessa MDD:n (suurimman kuivatiheyden) arvo nousi ja OWC:n (optimikosteus) arvo pieneni. Kun uusiokiviainespitoisuus saavutti 30 %, seoksen MDD-arvo nousi 1,65 g/cm³:sta 1,80 g/cm³:iin ja OWC-pitoisuus laski 22,50 %:sta 13,7 %:iin. (Sosahab, Ardakani ja Hassanlourad 2023, 4.)

OWC-pitoisuuden lasku johtuu todennäköisesti uusiokiviaineksen pienemmästä ominaispinta-alasta savimaahan verrattuna. MDD-arvon kasvu voi liittyä myös rakeiden välisen tyhjiön suhteen käsitteeseen. CBR-arvo nousi 2,9 %:sta puhtaalle savelle 10,3 %:iin stabiloidulle savelle, jossa oli 30 % uusiokiviainesta. Puhtaan saven turpoamisprosentti on 7,6 %, kun taas 30 % uusiokiviainespitoisuudella stabiloidun maan turpoamisprosentti on vain 2,2 %. Se osoittaa, että uusiokiviaineksen lisääminen voi parantaa paisuvan saven huonoa vesistabiilisuutta. Yksiakselinen puristusvoimakkuus ei kuitenkaan parantunut tarpeeksi käytettäväksi pohjakerroksissa, mutta se saatiin kokeessa nousemaan tavoitearvoihin lisäämällä sekaan masuunikuonaa. (Sosahab, Ardakani ja Hassanlourad 2023, 4.) Myös muissa tutkimuksissa on löydettävissä saman suuntaisia tuloksia.

Suomessa on käytetty stabiloinnissa yhdyskuntajätteen poltossa syntynyttä lentotuhkaa seoksessa, jossa on sementtiä 25 painoprosenttia ja lentotuhkaa 75 painoprosenttia ja näiden yhteisestä kuiva-aineiden painosta seokseen lisätään vettä 25 prosenttia. (Vehmas & Kronlöf 2015, 32.) Sopivassa määrin käytettäessä uusiokiviainesta, yhdyskuntajätteen tuhkaa, portlandsementtiä, voisi saada hyvän stabiloidun rakennekerroksen aikaiseksi esimerkiksi pehmeälle maapohjalle rakennettavaan tiehen. Kun uusiokiviainesrakenne tiivistetään optimikosteuden vallitessa, sementin sitoutumisreaktioiden ansiosta uusiokiviaines lukittuu hyvin,

mutta se ei koskaan tule silti vastaamaan betonilaatan ominaisuuksia (Betonimurskeiden tekninen soveltuvuus ja käyttö tierakenteissa 2021, 7).

2.2.10 Pintastabilointi

Kun stabiloidaan pintarakenteita, voidaan sementti levittää suoraan stabiloitavan maa-aineksen päälle. Oikea sementin määrä voidaan laskea edellä mainitulla kaavalla. Kun sementti on levitetty pohjamaan pinnalle, seuraava vaihe on sekoittaa sementti ja stabiloitava maa-aines. Sekoitus pitäisi aloittaa 30 minuutin kuluessa sementin levittämisestä. On tärkeää jauhaa maaperä riittävään syvyyteen ja -leveyteen, erityisesti yhtenäisillä mailla. (Gross & Adaska 2020, 31.)

Sekoittaminen voidaan toteuttaa kaivinkoneeseen kiinnitettävällä sekoituskauhalla, jossa voi olla myös murskaustoiminto. Pienemmillä poluilla voidaan käyttää puutarhajyrsimen tyyppisiä ratkaisuja. Ulkomailla käytetään erityistä Reclaimer -nimellä kutsuttuja maan sekoitukseen käytettäviä suuria laitteita, mutta Suomessa sellaiset ovat todella harvinaisia, mikäli niitä on lainkaan. Reclaimeerissa on etuna se, että sen avulla voidaan lisätä optimimäärä vettä suoraan sekoitusvaiheessa maa-ainekseen. Maa-ainesten, sementin ja veden sekoittaminen voitaisiin tehdä myös betonisekoittimella, mutta se on työlästä ja hidasta, varsinkin isommilla alueilla. Mitä paremmin sekoittaminen voidaan toteuttaa, sitä parempi lopputulos stabiloinnissa voidaan saavuttaa. Sekoittamisen jälkeen materiaali lanataan ja voidaan kastella optimikosteuteen. Optimaalisen kosteuspitoisuuden saavuttaminen on erittäin tärkeää.

Kun vesi, sementti ja olemassa olevat pohjamateriaalit on sekoitettu, seuraava vaihe on tiivistys. Sekoituksen ja tiivistämisen välinen aika ei ole kovin tiukka, mutta se on suoritettava samana päivänä (Halsted, Adaska & McConnell. 2008). Jos stabilointi tehdään kerroksittain, jokaisen kerroksen tulee täyttää tiheysvaatimukset ja optimaaliset kosteusvaatimukset, koska stabiloinnin ensisijainen tarkoitus on taata maan vakaus ja puristuslujuuden vaatimukset. Jos riittävää tiivistystä ei saada aikaan yhdellä kerroksella, voi usean kerroksen rakenne olla tarpeen. (Gross & Adaska 2020, 32.) Prosessin jälkeen alue jätetään kovettumaan.

Kovettuminen vaihtelee maa-aineslajeittain, mutta noudattaa melko lähelle yleistä maakostean betonin kuivumisaikoja.

Sosahabin, Ardakanin ja Hassanlouradin (2023) tutkimuksessa kokeiltiin päällysteenä uusiokiviaineksen ja saven sekoitusta. Hyvän lukituksen ja uusiokiviaineksen ja savimaahiukkasten välisen kitkan lisääntymisen sekä saviuusiokiviaineksen jäykkyyden parantamisen vuoksi CBR:ää parannettiin lisäämällä uusiokiviainesta, mikä johti suoraan päällysteen paksuuden pienenemiseen ja säästöihin rakennuskustannuksissa ja ajassa. (Sosahab, Ardakani ja Hassanlourad 2023, 15.)

Lähes vastaava asia on luonnonsoran ja saven käyttö tien pinnoitteena, eli savisoraa. Se on suomalaisille vanhastaan hyvinkin tuttu asia. Myös savisoraa voi yhtä hyvin ja todennäköisesti vielä menestyksekkäämmin toteuttaa uusiokiviaineksesta ja savesta sekoitetulla savisoralla. Sen ominaisuuksia voidaan vielä enemmän parantaa, jos sekaan lisätään masuunikuonaa.

Tiesuunnittelijat ja urakoitsijat suosivat yleensä perinteisiä rakennusmenetelmiä, koska vuosikymmeniä on kokemusta perinteisistä maaperän stabilointiaineista (kuten kalkki ja sementti). Epäperinteisten menetelmien toimivuuteen liittyvien epäselvyyksien ja epävarmuustekijöiden ratkaiseminen tiukan kokeellisen tutkimustyön avulla voi lisätä tienrakennusteollisuuden luottamusta tällaisiin kestäviin lähestymistapoihin. (Sosahab, Ardakani ja Hassanlourad 2023, 15.)

3 VIRANOMAISTAUSTAA

Betonin hyödyntäminen uusiokäytössä on ollut useita vuosia lainsäädännöllisesti varsin hankalaa ja vaikeaselkoista. Betonijäte on ollut paljon uutisissa, kun aika ajoin on löydetty luvattomia betonijätteen kaatopaikkoja, tai betonia on luvatta käytetty maatyöissä. Taustalla on usein ollut tarkoitus kiertää laittomasti korkeita kaatopaikkamaksuja ja rikoshyöty on ollut paikoin hyvin huomattavaa. Kaikki tämä uutisointi on johtanut osittain siihen, että betonijätettä on alettu osittain ansioitta suorastaan vieroksumaan, sen ongelmajätetestatuksen ansiosta. Betonijäte on kuitenkin kohtuullisen vaaratonta, mutta se ei sovellu pohjavesialueille.

Toimintaa on ohjailnut Mara-asetus, jonka nojalla on voitu hyödyntää joitakin jätteenksi luokiteltuja materiaaleja jopa ilman ympäristölupia. Asetus on määritellyt, mikä on Mara-betonimursketta ja mihin sitä voi käyttää. Asetus on asettanut tiukat ehdot betonin uusiokäytölle. Asetuksessa sanotaan, että *”Valmis MARA-betonimurske on aina jätettä ja sen käytöstä on tehtävä ilmoitus valvontaviranomaiselle. Mikäli MARA-betonimurske on markkinoilla, on sillä oltava suoritustasoilmoitus ja CE-merkintä”*. (Kunnas 2023.)

Voidaan kuitenkin tietyissä tapauksissa päätyä lopputulemaan, että betonijäte ei enää olekaan jätettä. Siihen tulokseen voidaan tulla kolmella eri tavalla, eli EU-säädöksellä, valtioneuvoston asetuksella, tai tapauskohtaisella päätöksellä. Valtioneuvoston asetus *”betonimurskeen jätteenksi luokittelun päättymisen arviointiperusteista (466/2022)”*, eli EEJ-asetus (Ei Enää Jätettä -asetus). Tämän asetuksen myötä ei enää tarvitse tehdä ilmoitusta viranomaisille uusiokiviaineksen käytöstä, eikä siinä ole entisen Mara-asetuksen kaltaisia rajoituksia. EEJ-Betonimurskeen valmistajalla täytyy olla *”ympäristölupa betonijätteen murskaustoimintaan, tai jonka toiminnassa murskataan betonijätettä kiinteän betoniaseman ja betonituotetehtaan ympäristönsuojeluvaatimuksista annetun valtioneuvoston asetuksen (858/2018) nojalla”*. Tämä tarkoittaa sitä, että rakennuksen purkupai- kalla ei voi valmistaa asetuksen tarkoittamaa uusiokiviainesta, vaan se on kuljettava luvassa osoitettuun paikkaan ja tuotettava siellä. (Kunnas 2023.)

Betoni, josta mursketta valmistetaan, voi siis olla joko käytettyä (purkubetoni), tai käyttämätöntä (betonin valmistuksessa ylijäänyttä). Sitä voidaan käyttää talonrakentamisessa ja maarakentamisessa sitomattomana kiviaineksena ja myös betonin kiviaineksena. EEJ-betonimurske vaatii CE-merkinnän, jonka kolmas osapuoli varmistaa. CE-merkinnän suoritustasoilmoituksen merkintänä on tällöin AVCP 2+. Uusiokiviaineksen valmistajan tehtävä on huolehtia asetuksen edellyttämien testaustoimien noudattamisesta. Näin toimien uusiokiviaines voidaan rinnastaa luonnonkiviainekseen. Uusiokiviaineksen on silti täytettävä samat rakennustekniset vaatimukset kuin luonnonkiviaineksen. Uusiokiviaineksen läpi suodattuvan veden pH-arvo on 11, joten sen käyttö aiheuttaa rajoituksia pohjavesialueella ja sillä on alumiinirakenteille korroosiota aiheuttava vaikutus. Valmistaja toimittaa näiltä osin käyttöohjeet murskeen toimittamisen ohessa. (Kunnas 2023.)

4 YHTEENVETO

Kivituhka

Kuten kirjallisuuskatsauksesta ilmeni, kivituhkaa ja uusiokiviainesta voidaan käyttää pihateiden ja polkujen pinnoitteena sellaisenaan. Sepelin tuotannon sivutuotteena syntyvä kivituhka onkin melko yleisesti käytetty materiaali edellä mainituissa käyttötarkoituksissa. Kivituhkaa käytetään usein myös urheilukenttien pintamateriaalina. Kivituhka on ollut suosittu materiaali vähemmän asutuilla paikkakunnilla edullisuutensa vuoksi, koska sille ei usein ole ollut kovin paljon kysyntää. Se on monesti jäänyt ylijäämäkasoihin murskausalueille.

Kivituhkan väri vaihtelee kivilaadun mukaan ja se tekee siitä mielenkiintoisen materiaalin piharakentamiseen. Kivituhkaa voidaan käyttää maanalaisten kaapeleiden suojarahian sijasta. Kivituhka ehkäisee myös melko hyvin rikkaruohojen kasvamista, jos siinä ei ole maata seassa. Kivituhka soveltuu myös pihalaattojen alle luonnonhiekan korvaajana ja sitä voidaan hyödyntää myös laattojen saumojen täyteaineena.

Sillä on kuitenkin myös puutteensa pinnoitusmateriaalina. Kivituhka on sellaisenaan altis eroosiolle. Kivitukalle on ominaista pölytä herkästi kuivana aikana ja huuhtoutua runsaiden sateiden muodostamien purojen mukana pois tieltä muodostaen uria kulkureiteille. Samoin kivituhkasta muodostuu helposti vellimäistä, jos vettä pääsee kerääntymään lammikoiksi kulkureitille. Parhaimmillaan kivituhka on hyvä pinnoite, sillä se on teräväsärmäistä ja kivet lukkiutuvat hyvin toisiaan vasten muodostaen yhtenäisen pinnan. Kivituhkan paikallaan pysyvyyttä voidaan parantaa stabiloimalla sitä erilaisin menetelmin. Stabiloitaessa perinteisin ainein suurta osaa näyttelee monimutkaiset kemialliset reaktiot, kuten hydraatio, pozzolaanireaktio ja kationien vaihto ja niin edelleen. Ei-perinteisissä menetelmissä stabilointi suoritetaan käytännössä liimaamalla kemiallisin ainein materiaali toisiinsa.

Stabiloinnissa on kaksi tapaa, mekaaninen ja kemiallinen sidonta. Mekaanisesti kivituhkan paikallaan pysyvyyttä voidaan parantaa esimerkiksi geoverkkojen avulla, tai rakentamalla kulkureitin ympärille reunakiveys, tai reunalaudoitus. Ke-

miallisia tapoja on esimerkiksi sekoittaa siihen stabilointiainetta, joka sitoo hiukasten särmät tiiviimmin toisiaan vasten. Stabilointiaineina voidaan käyttää perinteisiä aineita, kuten portlandsementtiä, hydratoitua kalkkia, tai pozzolaanisia ominaisuuksia sisältävää lentotuhkaa, pohjatuhkaa, tai rikinpoistotuotetta, joka on liejumaista mutta kivituhkan kanssa reagoidessaan muodostaa tiiviin pinnan. Stabilointiaineena voidaan käyttää myös ei-perinteisiä aineita, kuten sulfonoituja öljyjä, ammoniumkloridia, entsyymejä, polymeerejä ja kaliumia. Kivituhka stabiloituu myös betoniteollisuuden sivutuotteilla, kuten sementtiuunipölyllä ja kalkkiuunipölyllä. Kivituhkaa voidaan tutkimusten mukaan stabiloida myös uusiokiviaineksella.

Sivulla 14–17 esitettyjen National Academies of Sciences, Engineering and Medicinessä (2009), American Concrete Institutessa (1990) ja Betonitieto.fi:ssä (Nd.), julkaistujen tutkimusten, Gracen (1999), Mattsonin (2014), Littlen (1995), Baraniak & Walerianczykkin (2003) ja Little ym:n (2000) tutkimusten mukaisten tietojen perusteella vallitsee konsensus stabiloitumisessa tapahtuvien reaktioiden osalta. Reaktioiden mekanismia on em. sivuilla avattu lyhyehkösti kirjallisuuskatsauksessa. Myös ei-perinteisten ainesten käyttöä on avattu kirjallisuuskatsauksessa, mutta esille nousseen tutkimustiedon myötä on selvää, että niiden käytölle ei ole opinnäytetyön toimeksiantajalla tarvetta. Niiden saatavuus ja hinta ovat omiaan sulkemaan ne pois vaihtoehdoista. Synteettiset polymeerit ovat mielenkiintoinen aihe tulevaisuuden kannalta, mutta niiden soveltuvuus varsinkin pohjavesialueiden läheisyydessä kaipaa lisää tutkimista.

Uusiokiviaines

Betoni valmistetaan kiviaineksesta ja portlandsementistä ja vedestä. Kemiallinen reaktio betonin kovettumisessa on nimeltään hydraatio. Betonin tuotannossa syntyy suuret määrät hiilidioksidia portlandsementin valmistuksessa. Myös betoniraudoituksen teräksen tuotanto on suuri hiilidioksidin tuottaja. Hiilidioksidi on ilmastokaasu, joka aiheuttaa ilmastonmuutosta. Elinkaarensa aikana betonissa käynnistyy kuitenkin karbonatisoitumisprosessi, jossa betoni alkaa absorboida, eli imeä hiilidioksidia itseensä. Tämä hiilinielu imee itseensä suurin piirtein saman määrän hiilidioksidia kuin hydraatioprosessissa syntyy.

Karbonatisoituminen on hidas prosessi, joka alkaa betonin pinnalta jatkuen sisäänpäin. Karbonatisoitumista voidaan kuitenkin tehostaa elinkaarensa päähän rakennuksessa tulevan betonin kierrätyksen yhteydessä suoritettavan betonin murskaamisen avulla. Siinä betonin ulkoilmaa vasten olevan pinnan määrä kasvaa valtavasti mitä pienemmäksi betoni hajotetaan. Karbonatisoituva pinta-ala kasvaa ja prosessi kiihtyy aina kun uusiokiviaines kastuu ja kuivuu vuorotellen. Uusiokiviaineksen hiilinielun hyödyntämistä hiilen sidonnassa on alettu vasta viime vuosina pohtimaan laajemmin. Yksi mietinnässä ollut ajatus on sijoittaa moottoriteiden varsille suuret määrät uusiokiviainesta imemään liikenteessä syntyviä hiilidioksidipäästöjä.

Uusiokiviaineksen käyttö on ollut pitkään vaikeaa lainsäädännöllisistä syistä. Sitä on pidetty ongelmajätteenä aivan viime vuosiin saakka. Nyt tilanne on kuitenkin muuttunut vuonna 2022 voimaan astuneen EEJ-säädöksen ansiosta. EEJ (Ei Enää Jätettä), tarkoittaa siis sitä, että ympäristöluvan omaava betonin tuotantolaitos, tai purku ja kierrätystoimintaa harjoittava yritys voi tuottaa uusiokiviainesta myyntiin oman ympäristöluvan mukaisella paikalla, kunhan se täyttää vaatimukset ja sille hankitaan CE-merkintä. Sen jälkeen uusiokiviaines voidaan rinnastaa luonnon kiviainekseen. Tuotteen myyjä toimittaa sen mukana käyttöohjeet, joissa kerrotaan minimietäisyydet pohjaveteen ja varoitetaan sen alumiinirakenteille korroosiota aiheuttavasta ominaisuudesta pH:n ollessa niinkin korkea kuin 11.

Tämä uusi asetus avaa uusiokiviainekselle aivan uusia käyttömahdollisuuksia esimerkiksi tienrakennuksessa. Uusiokiviaines toimii hyvin pengermateriaalina, sillä se stabiloituu hyvin jopa itsessään, koska sen reagoimattoman sementin määrä voi olla tutkimusten mukaan jopa 30 %. Uusiokiviainesta voidaan käyttää melkein missä penkereen osassa tahansa. Se soveltuu muun muassa Kianimehrin ym. (2019), Tavakolin ym. (2020) ja Sohabin ym. (2023) mukaan hyvin pohjakerrosten saven stabilointiainekseksi. Tutkimuksissa 30 % uusiokiviainesmäärällä täytyivät kaikki muut tienrakennuksen pohjanvahvistuksen vaatimukset paitsi yksiakselinen puristusvoimakkuus, joka saatiin kohoamaan arvoihin lisäämällä sekaan masuunikuonaa. Tutkimuksista ei selvinnyt, kuinka suuri vaikutus on esimerkiksi reagoimattomalla kalkilla ja pozzolaanireaktiolla ym. Onhan kuitenkin selvää, että mikä tahansa savi jäykkenee tietyn verran, kun siihen

lisätään karkeampaa kiviainesta 30 %. Joka tapauksessa uusiokiviaines on yllättävän hyvä syvästabilointiaines, kunhan sitä ei käytetä pohjavesialueella.

Uusiokiviaineksen käyttämisen hyvä puoli on myös se, että sen käytön myötä ei tarvitse käyttää niin paljon luonnon kiviainesta. Sen käyttämisen myötä on mahdollista päästä kahdesta ongelmasta kerralla ainakin osittain eroon. Nämä ongelmat ovat kallion louhimalla otettavan luonnon kiviaineksen korkeat kustannukset ja purkubetonin suuri määrä. Luonnon soraesiintymien vähäisyys on paikoin myös ongelma ja kierrätysbetonin käyttö säästää myös tätä vähenevää resurssia.

Pintakerrosten stabiloinnissa uusiokiviaineksella on saavutettu hyviä tuloksia. Uusiokiviaines sitoutuu hyvin saven kanssa ja niistä voidaan valmistaa entisäikoina paljon käytettyä savisoraa tai ennemminkin savibetonia. Sosahabin ym. (2023) mukaan betonin hyvä lukitus ja savihiukkasten ja uusiokiviaineksen välinen kitka parantaa tienpinnan jäykkyyttä ja vähentää kerroksen vaatimaa paksuutta. Pintakerroksen stabiloinnissa voidaan käyttää yhtä hyvin myös uusiokiviaineksen ja kivituhkan sekoitusta. Tiesuunnittelijoiden täytyy vain omaksua betonin mahdollisuudet ja ryhtyä käyttämään sitä suunnitelmissaan enemmän kuin ennen.

Uusiokiviaineksen käyttö kantavissa rakennusosissa on edelleen harvinaista. Se voi soveltua sullomismenetelmällä valmistettaviin harkkoihin, tai pihalaattoihin hyvän puristuslujuutensa vuoksi, jos murskatun betonin puhtaus, rakeisuus ja määrä on normien mukainen ja lujuusluokka C30/37 tai alle, sitä voidaan käyttää betonin runkoaineksena. Tällöin murskatun kiviaineksen prosenttimäärä täytyy varmistaa normeista. Käytännössä murskatulla kiviaineksella ei saavuteta hyvää puristuslujuutta, vaan kuutioiden murto on erilainen, eli mureneva, mutta käyttö pehmeämmissä betonilaaduissa onnistuu. (Saarenpää 2024.) Kysymysmerkki on myös se, voidaanko kierrätysbetonin käytössä hyödyntää erilaisia seosaineita, kuten lentotuhkaa. Maailman vanhin betonirakennus Pantheonin temppeli on rakennettu todennäköisesti tulivuoren tuhkan pozzolaanisia ominaisuuksia hyödyntäen ja sen ominaisuuksien selvitystä varten on hiljattain käynnistetty uusi tutkimushanke. Perinteisten betonituotteiden valmistusta kiviainesten osalta koskevat SFS-EN206 standardin mukaiset vaatimukset. Valmisbetonin tuotannossa voidaan hyödyntää vain uusiokiviaineksen karkea fraktio, jossa hienoin ainesosa on

seulottu, tai pesty pois. Uusiokiviaineksesta on rakennettu kokeeksi vuosien 1996–1998 aikana Diepmannsbach K44 -niminen silta Saksassa.

4.1 Ehdotukset

Kivituhka soveltuu monenlaiseen käyttöön. Kivituhka käy varsinkin kaupungeissa piharakentajien käyttöön, mutta se kannattaisi tuotteistaa entistä paremmin. Tarjontaa voisi lisätä erilaisten portlandsementti – kivituhkasekoitusten avulla esimerkiksi polkujen pinnoitteeksi. Yksi mahdollinen tuote olisi kivituhkan ja uusiokiviaineksen sekoitus, jossa tarvittaessa olisi lisäaineena pieni osuus portlandsementtiä. Tuotekehittäminen ja erilaisten koostumusten tutkiminen olisi hyvä jatkotutkimusaihe, jolloin erilaisiin tarkoituksiin olisi tarjolla toimiva resepti. Samoin kivituhkapinnoitteiden soveltumista Suomen talvien jälkeisiin routaisiin olosuhteisiin olisi hyvä tutkia. Ei ole tiedossa tutkimuksia siitä, kuinka stabiloitu pintamateriaali käyttäytyy pihojen pintarakenteena suurille lämpötilavaihteluille altistuvassa routivassa maaperässä. Kokeiden myötä voisi nähdä, tuleeko pinnoitteeseen halkeamia, tai ”eläviä mannerlaattoja”.

Oikeiden reseptien löytyttyä ja tutkimustulosten vaikuttaessa hyviltä, valmiita tuotteita olisi saatettava tarjolle sekä pienemmissä, että suuremmissa säkeissä. Komponentit, eli sideaine ja kiviaines olisi todennäköisesti järkevää myydä eri pakkauksissa ennen aikaisen reagoinnin välttämiseksi. Yhtiön tehtaiden sijainnit strategisesti hyvillä paikoilla tuovat logistiikan kannalta selvää kilpailuetua. Syrjäisemmällä sijainnilla olevilla kiviaineksen ottopaikoilla kivituhkaa kannattaisi markkinoida esimerkiksi kaapelikaivantojen esitäyttömateriaaliksi. Kivituhkan ominaisuudet eivät eroa tässäkään käyttötarkoituksessa suuresti verrattaessa luonnonhiekkään.

Toimeksiantajan kannattaisi harkita radikaalia ehdotusta ottaa kierrätysbetonia vastaan tehtaidensa yhteydessä. Tämä olisi mahdollista, mikäli tilaa suinkin löytyy. Lisäksi toimeksiantaja voisi ryhtyä omalla ympäristöluvanmukaisella alueellaan valmistamaan uusiokiviaineksia sekä myyntiin että omaan käyttöön. Samalla sekaan voitaisiin murskata myös tehtaan omat ylijäämäbetonit. Tämä toisi monia etuja:

- Vastaanottomaksu: Toimeksiantaja saisi vastaanottamastaan betonista vastaanottomaksun, mikä voisi tuoda lisätuloja
- Luonnonkiviaineksen tarpeen väheneminen: Valmisbetonin luonnonkiviaineksesta voidaan korvata jopa 15 % uusiokiviaineksella, josta on poistettu hieno pölyinen aines. Tämä vähentäisi luonnonkiviaineksen tarvetta ja olisi ympäristöystävällinen vaihtoehto
- Stabilointikäyttö: Pölyisempi osa uusiokiviaineksista soveltuu paremmin stabilointikäyttöön.

Tämä ehdotus edistäisi kierrätystä, vähentäisi ympäristövaikutuksia ja voisi olla sekä imagollisesti, että taloudellisesti kannattavaa toimeksiantajalle. Kaiken lisäksi yhtiö voisi tuntuvasti vähentää hiilijalanjälkeään.

Uusiokiviainesta on mahdollista käyttää moneen tarkoitukseen ja juuri voimaan tullut lainsäädännön muutos tulee hyvin tukemaan ennen hankalasti hyödynnettävien sivutuotteiden käyttöä jatkossa. Tutkimustieto kiistattomasti osoittaa, että uusiokiviaines soveltuu maapohjan vahvistamiseen. Lainsäädännön muuttumisen lisäksi tarvitaan vielä vaikuttamista tiesuunnittelijoihin siten, että uusiokiviaineksen hyödyntäminen otettaisiin laajemmin käyttöön tienrakennussuunnitelmissa. Ilman tätä on vaikeaa markkinoida ja valmistaa tuotteita isommalla volyyymilla tienpohjien vahvistamiseen, vaikka uusiokiviaines voidaankin EEJ-asetuksen myötä CE-merkittynä rinnastaa tietyin reunaehdoin luonnon kiviaineksiin.

Uusiokiviaines soveltuu tienrakentamisessa oikeastaan minkä rakennekerroksen korvaajaksi. Kulutuskerroksessa sitä voidaan hyvällä menestyksellä hyödyntää soratien saviorapinnoitteen komponenttina. Sähköautojen lisääntymisen myötä ongelmaksi on muodostunut kulkuneuvojen suurempien painojen aiheuttamat vauriot tieverkostossa. Betonin ja saven sekoitus kantavana kerroksena auttaisi sorateitä pysymään paremmassa kunnossa pidempään. Lisäksi betonisavi voidaan tarvittaessa lanata uudelleen muotoonsa.

Pelloille rakennettavat aurinkopaneelipuistot ovat tehneet tuloaan Suomeen. Niiden rakentamisessa on törmätty hyvin perinteiseen ongelmaan, eli maan huonoon kantavuuteen. Aurinkopaneelit painavat jo itsessään paljon ja talvisin ne keräävät vielä lunta lisäpainoksi. Suurten alueiden maamassojen korvaaminen

luonnonkiviaineksella on työlästä ja kallista, joten uusiokiviaineksella toteutettava stabilointi voisi olla ratkaisu tähänkin pulmaan.

Tierakentamisessa alimpien kerrosten pehmeän maa-aineksen stabiloinnissa murskatun uusiokiviaineksen avulla voidaan saavuttaa materiaalisäästöjä ja välikerroksessa sitkeysominaisuuksien ansiosta rakennetta tukevoittavana. Tierakennuksessa voitaisiin uusiokiviainesta käyttää niin sanotun penkereen ”voileipä-rakenteen” osana. Uusiokiviainesta voidaan markkinoida pihojen ja polkujen parantamiseen yksityisille asiakkaille jo nyt. Suurempien asutuskeskusten läheisyydessä markkinoita varmasti olisi ja sen ominaisuuksien tuleminen yleisempään tietoon lisäisi kysyntää.

Hyvin monella on toden näköisesti edelleen käsitys, että uusiokiviaines on ongelmajätettä. Pihojen kulkureittien ja polkujen pinnoitteena voitaisiin myös markkinoida kivituhkan ja portlandsementin sekoitusta, tai uusiokiviaineksen, kivituhkan ja portlandsementin sekoitusta. Näitä voitaisiin markkinoida esimerkiksi suursäkeissä, tai kuorma-autolla kuljetettuna. Molemmista näistä on olennaista voida toimittaa materiaali kuivana asiakkaalle. Lisäksi kyseisten tuotteiden asentaminen piha- ja polkurakenteiksi voisi olla osa jonkin yhteistyössä toimivan maarakennusyrityksen liiketoimintaa, erityisesti synergiassa materiaalin toimittajan kanssa. Tämä yhteistyö voisi tuoda etua molemmille osapuolille, kun materiaalin toimittaja voi tarjota laadukasta materiaalia ja maarakennusyritys voi tarjota asennuspalveluita. Näin voitaisiin tarjota asiakkaille kokonaisvaltaista ratkaisua, joka kattaa sekä materiaalin että asennuksen.

Asiakas voisi valita, millaisen sekoitteen hän pihansa tarpeisiin haluaa. Valikoimassa voisi olla myös pelkkä kivituhka, tai pelkkä uusiokiviaines. Kivituhkan ja / tai uusiokiviaineksen ja portlandsementin käyttö pintastabilointimenetelmällä onnistuu myös omatoimirakentajalta. Eri sekoituksia olisi hyvä testata ennen myyntiin saattamista, jolloin tuotteiden ominaisuuksista eri käyttötilanteissa olisi riittävän hyvä tieto. Myös hyvät käyttöohjeet tulisi olla mukana. CE-merkitty EEJ-betoni vaatii jo lainkin puolesta materiaalin mukana asiakkaalle toimitettavat käyttöohjeet. Suunnitellessa uusiokiviaineksen käyttöä, on otettava huomioon sen korkean pH:n emäksisyyden vaikutus mahdollisiin alumiinirakenteisiin. Emäksisyys aiheuttaa alumiinin syöpymistä, kun taas rautarakenteiden ruostumista se jopa

pienentää tai peräti ehkäisee. Muoviputket eivät reagoi uusiokiviainekseen, mutta polyesteriset geoverkot, tai muut lujitteet eivät sitä kestä.

Uusiokiviaineksen hiilinielu karbonatisoitumisen yhteydessä on huomion arvoista. Sitä voisi hyödyntää liikenteen hiilensidonnassa esimerkiksi moottoriteiden varsille sijoitetuissa kivikoreissa, jotka voisivat toimia meluesteinä, meluvalleina, tai suoja-aitoina ja samalla imeä liikenteen hiilidioksidia. Yhtiön on erittäin tärkeätä pyrkiä vaikuttamaan suunnittelijatahoihin, kuten Rambolliin, kaupunkeihin ja kuntiin, saadakseen suunnittelijat ottamaan uusiokiviainekset valikoimaansa laajalla rintamalla. Yksi suuri vaikuttamiskanava on rakennusteollisuus rt ry, infra ry ja betoniteollisuus ry, jossa yhtiöllä on entuudestaan vahva edustus.

5 POHDINTA

Opinnäytetyö on hyvin ajankohtainen muuttuneen EEJ-asetuksen myötä. Se avaa uusia markkinoita betonin tuotannossa ja kiviaineksen valmistuksessa syntyvien sivutuotteiden hyödyntämisessä. Betonitehtailla on selkeä etulyöntiasema olemassa olevien ympäristölupien myötä. Kyseinen etulyöntiasema kannattaa hyödyntää markkinoilla niin pian kuin mahdollista. Ensimmäisinä markkinoille tulevat usein vakiinnuttavat paikkansa helpoimmin. Markkinoille on mahdollista saattaa monenlaisia tuotteita, mutta ne vaativat vielä lisää testausta.

Tutkimuskysymyksenä oli, miten betonitehtaiden sivutuotevirrat voitaisiin hyödyntää myytävänä tuotteena ja miten se vaikuttaisi tehtaiden hiilidioksidipäästöihin? Tutkimuskysymykseen löydettiin vastaukset ja erilaisten tuotteiden valmistamista ehdotettiin opinnäytetyön kappaleessa 4.1, sivuilla 46–49. Vastaukset hiilidioksidin sitoutumiseen vaikuttavan karbonatisoitumisen kautta tapahtuvan hiilinielun laskentaesimerkki löytyy opinnäytetyön sivuilla 25–28.

Uusiokiviaineksen käyttö kantavien rakenteiden, kuten betonipalkkien valmistamisessa ei vielä ole saavuttanut sellaisia tuloksia, että sitä kannattaisi lähteä tässä vaiheessa toimeksiantajan taholta tutkimaan. Toki tiedossa on, että betonin valmistamisessa kierrätysmateriaaleista on vielä paljon tutkittavaa. Yksi mielenkiintoinen tutkimusaihe on pozzolaaninen reaktio, jossa erilaisten tuhkien hyödyntäminen betonin valmistuksessa tuo aika ajoin uutta tietoa. Tietoa betonirakentamisesta on ollut jo kauan, mutta osa tiedosta on saattanut historian saatossa kadota. Yksi esimerkki on Pantheonin temppeli Rooma, joka on maailman vanhin betonirakennus. Siinä pozzolaanibetonilla, eli tulivuoren tuhkaa sideaineena käyttäen on saatu aikaan rakennus, joka edelleen on pystyssä. Uusin tutkimus tästä aiheesta on käynnistetty ja siitä on viime aikoina uutisoitu laajasti mediassa. Lentotuhkan käyttö Suomessa on muuttumassa mahdolliseksi kotimaisten hiilivoimaloiden sulkeuduttua ja vanhat lentotuhkaerät eivät ole betoniin käyttöön useinkaan riittävän puhtaita.

Uusiokiviaineksen käyttö on yhä varsin kallista verrattaessa luonnonkiviaineksen käyttämiseen valmisbetonin tuotannossa. Ongelmaksi muodostuukin helposti se, kuinka uusiokiviaineksen käytöstä saadaan taloudellisesti kannattavaa. Valtion

verotuet, tai jokin muu vastaava kannustin olisi tällä hetkellä välttämätöntä, jotta uusiokiviaineksen käyttö lisääntyisi. Tulevaisuudessa tilanne voi olla aivan toinen, kun luonnon kiviaineksen saanti kaupunkien lähellä hankaloituu.

5.1 Jatkotutkimusaiheet

Jatkotutkimusaiheena ovat käytännön kokeiden tekeminen erilaisilla sekoituksilla, eli tuotteiden reseptiikan kokoaminen. Ne jäivät tämän opinnäytetyön talvi- seen vuodenaikaan sijoittumisen takia pois materiaalien stabiloitumisen edellyttäessä sulan maan olosuhteita. Erilaisten seoksien ominaisuuksien, kuten sitkeyden, kantavuuden parantumisen ja tutkiminen käytännössä olisi tärkeää. Toinen jatkotutkimusaihe voisi olla muiden pozzolaanisten ainesosien vaikutus perusainesosien lujittumiseen. Myös täysin uusien ainesosien käyttöä olisi hyödyllistä tutkia. On hyvin oletettavaa, että yllättäviäkin tuloksia olisi vielä löydettävissä.

5.2 Tutkimuksen luotettavuus

Kirjallisuuskatsauksessa on aina haastavaa olla kriittinen tutkittavan tiedon äärellä. Kananen (2009) toteaaakin aikaisempien tutkimusten hyödyntämisen tie- teenteossa olevan kaksiteräinen miekka. Tutkijasta tulee helposti tutkimansa tie- don vanki ja hän ohjautuu väistämättä samoille linjoille luetun kirjallisuuden kanssa. Toisaalta kirjallisuuteen tutustuminen on aina välttämätöntä tutkimuksen tekemisessä. Toinen seikka on se, että miksi pyörä pitäisi keksiä uudelleen, jos asiaa on jo paljon tutkittu. (Kananen 2009, 74.)

Yksi merkittävä asia on esiymmärrys aiheesta. Tässä tapauksessa tekijällä on ollut etukäteen jonkin verran tietoa tutkittavasta aiheesta. Tällöin on aina se vaara, että tutkija edustaa jotakin koulukuntaa suhteessa tutkittavaan aiheeseen ja mielipiteet tai ennakkoasenteet vaikuttavat tutkimuksen lopputulokseen. (Kananen 2009, 75–76.) Tässä tapauksessa deduktio, eli ennakkoasenne ole kuitenkaan päässyt juurikaan vaikuttamaan tutkimukseen, vaan on pyritty tietoisesti induktioon, eli innokkaasti tutkimaan mitä uutta aiheesta löytyy, niin sanotusti

pöytä puhtaana. Tutkimustietoa löytyikin hyvien tiedonetsimiskanavien avulla hyvin lähes kaikilta mantereilta. Tutkimuksiin tutustuesssa ei löytynyt kovin helposti keskenään ristiriitaista tietoa ja reaktioiden vaikutuksista oli tehty samansuuntaisia havaintoja laajasti eri tutkimuksissa.

Luotettavuusmittareilla, eli validiteetilla ja reliabiliteetilla mitattuna validiteetti tarkoittaa sitä, onko tutkittu oikeita asioita ja reliabiliteetti tutkii sitä, voidaanko tutkimus toistaa luotettavasti. Nämä mittarit soveltuvat melko kehnosti kirjallisuuskatsaukseen, mutta voidaan todeta, että tässä tutkimuksessa on tutkittu oikeita asioita ja tutkimus on milloin tahansa toistettavissa. Toistaminen on varsin helppoa tutustumalla lähdeluettelossa olevaan kirjallisuuteen. Tutkimusta varten on myös luettu paljon kirjallisuutta, joita ei ole katsottu tarpeelliseksi referoida, tai niistä ei ole saatu uutta relevanttia tietoa. Nämä eivät tästä syystä ole myöskään mukana lähdeluettelossa.

6 LÄHTEET

ACI 230.1R-90 (Reapproved 1997) State-of-the-Art Report on Soil Cement reported by ACI Committee 230 Wayne S. Adaska, C. Viitattu: 8.2.2024. [ACI 230.1R-1990 State-of-the-Art Report on Soil Cement - Reap PDF | PDF | Road Surface | Concrete \(scribd.com\)](https://www.scribd.com/document/481046596/ACI-230-1R-1990-State-of-the-Art-Report-on-Soil-Cement-Reap-pdf)

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2018. Coal Ash. Myrkyllisten aineiden ja tautien rekisteriviraston verkkosivusto. Viitattu: 8.2.2024. <https://www.atsdr.cdc.gov/about/index.html>

American Concrete Institute. 1990. State-of-the-Art Report on Soil Cement. ACI 230.1R-90, ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 4, pp. 23. Viitattu: 4.1.2024. <https://www.scribd.com/document/481046596/ACI-230-1R-1990-State-of-the-Art-Report-on-Soil-Cement-Reap-pdf>

ArtisticOperations. 2017. Pixabay kuvituskuva-pankki. Viitattu: 31.3.2024. <https://pixabay.com/fi/photos/kivi%C3%A4-sora-rusketus-kivi-2731097/>

Baraniak, B. M. & Waleriańczyk, E. 2003. Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition. Second edition. Baltimore: Elsevier Science

Betonimurskeiden tekninen soveltuvuus ja käyttö tierakenteissa. 2021. Infra Ry:n ohje Väyläviraston sivustolla. Viitattu: 28.2.2024. https://ava.vayla-pilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/Betonimurske%20teknisen%20soveltuvuuden%20arviointi_web.pdf

Betonitieto.fi. Nd. Betoniyhdistyksen verkkosivuston betonisanasto. Viitattu: 4.1.2024. <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/pozzo-laani.html>

Betset Oy. 2023. Betset Oy:n verkkosivusto. Viitattu: 20.12.2023. <https://betset.fi/>

Brandes, M. R. & Kurama Y. C. 2016. Use of Recycled Concrete Aggregates in Precast / Prestressed Concrete. International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction. University of Notre Dame. Procedia Engineering 145 (2016) 1338–1345. Viitattu: 4.2.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816301795>

Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "resin". Encyclopedia Britannica, 22 Aug. 2023. Viitattu: 14.1.2024. <https://www.britannica.com/science/resin>

Coal ash basis. 2023. EPA – United States Environmental Protection Agency. Ympäristöviraston verkkosivusto. Viitattu: 8.2.2024. <https://www.epa.gov/coalash/coal-ash-basics>

Concretecentre.com. 2024. Concrete carbonation. Betonialan asiantuntijaorganisaation kotisivut. Viitattu: 28.1.2024. <https://www.concretecentre.com/Performance-Sustainability-%281%29/Circular-economy/Whole-life/Carbonation-of-concrete.aspx>

Dale. 2023. The Spruce. What Is Fly Ash and How Is It Used in Concrete? - Discover how reusing this coal byproduct can improve concrete durability. Yrityksen blogisivusto. Viitattu: 8.2.2024. <https://www.thespruce.com/fly-ash-applications-844761>

Dizgalvis, Z. 2022. Liikkuva betoni- ja teräsbetonirakennusjätteiden murskauskone toiminnassa. Pixabay kuvituskuva. Viitattu: 31.3.2024. <https://www.istockphoto.com/fi/valokuva/liikkuva-betoni-ja-ter%C3%A4sbetonirakennusj%C3%A4tteiden-murskauskone-toiminnassa-gm1443608091-482533006>

Engelsen, C., Dag, H.S., Mehus, J. & Pade, C. 2005. CO₂ uptake during the concrete life cycle: Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete. Oslo: Nordic Innovation Centre

Fabricius, A., Renner, M., Voss, M., Funk, M., Perfol, A., Gehring, F., Graf, R., Fromm, S. & Duester, L. 2020. Municipal waste incineration fly ashes: from a multi-element approach to market potential evaluation. Environ Sci Eur 32, 88. Viitattu: 8.2.2024. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00365-y>

Feldvari, K. 2009. Thesauri usage in information retrieval systems: Example of LISTA and ERIC database thesaurus. In In Future of Information Sciences 2nd International Conference INFUTURE. Viitattu: 18.2.2024. <https://infoz.ffzg.hr/infuture/2009/papers/4-09%20Feldvari,%20Thesauri%20usage%20in%20information%20retrieval%20systems.pdf>

Firoozi, A.A., Guney Olgun, C., Firoozi, A.A. et al. Fundamentals of soil stabilization. Geo-Engineering 8, 26 (2017). Viitattu: 8.2.2024. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>

Flinkman, M. & Salanterä, S. 2007. Integroitu katsaus – eri metodeilla tehdyn tutkimuksen yhdistäminen katsauksessa. Turun yliopisto, Hoitotieteen laitoksen julkaisuja, Tutkimuksia ja raportteja A 51. Turku: Turun yliopisto

Galos, K., Szlugaj, J., Lewicka, E. & Kamyk, J. 2007. Sources and utilization of coal combustion products in Poland. Viitattu: 8.2.2024. https://www.researchgate.net/publication/350091008_Sources_and_utilization_of_coal_combustion_products_in_Poland/citation/download

Grace, W. R. 1999. Menetelmä betonin ominaisuuksien modifioimiseksi. Patentti- ja Rekisterihallituksen patenttijulkaisu FI 104164 B. Viitattu: 22.12.2023. <https://patents.google.com/patent/FI104164B/fi>

Gross & Adaska. 2020. Guide to Cement Stabilized Subgrade Soils. Portland Cement Association, Washington, DC, and National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, Ames, IA. Viitattu: 8.2.2024. https://www.cement.org/docs/default-source/cement-concrete-applications/sr1007p-guide-to-cement-stabilized-subgrade-soils.pdf?sfvrsn=8656fdbf_2

Haaviston Sora. 2023. Kivituhka soveltuu useisiin eri käyttötarkoituksiin. Yrityksen verkkosivusto. Viitattu: 20.12.2023. <https://www.haavistonsora.fi/tuote-osasto/kivituhkat>

Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. 2007. Tutki ja kirjoita. 13. painos. Helsinki: Tammi

Ikeagwuani, C.C. and Nwonu, D.C. 2019. Emerging trends in expansive soil stabilization: A review. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 11. Nsukka: University of Nigeria

Kananen, J. 2009. Toimintatutkimus yritysten kehittämisessä. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 101. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu

Kianimehr, M., Shourijeh, P. T., Binesh, S. M., Mohammadinia, A. & Arulrajah, A. 2019. Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils, Construction and Building Materials, Volume 227. Viitattu: 20.2.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819322226>

Kikuchi, T., & Kuroda, Y. (2011). Carbon Dioxide Uptake in Demolished and Crushed Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 9, 115-124. Japan Concrete Institute. Viitattu: 21.1.2024. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/9/1/9_1_115/pdf

Knaack, A. & Kurama, Y. 2013. Design of Normal Strength Concrete Mixtures with Recycled Concrete Aggregates Vol. 110, No. 5. ACI Materials Journal. Viitattu: 4.2.2024. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/41171%28401%29267>

Knaack, A. & Kurama, Y. 2015. Sustained Service-Load Behavior of Concrete Beams with Recycled Concrete Aggregates, ACI Structural J., Vol. 112, No. 5, American Concrete Institute. Viitattu: 4.2.2024. https://www.researchgate.net/publication/281304351_Sustained_Service_Load_Behavior_of_Concrete_Beams_with_Recycled_Concrete_Aggregates

Knapp, S. D. 2000. The contemporary thesaurus of search terms and synonyms: A guide for natural language computer searching. Greenwood Publishing Group. Viitattu: 18.2.2024. <https://eric.ed.gov/?id=ED352068>

KSResin.com. 2024. What is the difference between epoxy and resin? Yrityksen internetsivusto. Viitattu: 14.1.2024. <https://www.ksresin.com/blogs/information/what-is-the-difference-between-epoxy-and-resin>

Kumar, S.& Singh, D. 2021. Municipal solid waste incineration bottom ash: a competent raw material with new possibilities. Innov. Infrastruct. Solut. 6, 201. Viitattu: 8.2.2024. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00567-0>

Kunnas, T. 2023. Betonimurske – jätettä vai ei? Ja mitä väliä sillä on? Betoniverkkolehden julkaisu: Kiertotalous Nro. 1/2023. Viitattu: 12.2.2024. <https://betoni.com/lehti/2023/03/03/betonimurske-jatetta-vai-ei-ja-mita-valia-silla-on/>

Little, D. N. 1995. Stabilization of Pavement Subgrades & Base Courses with Lime. Kendall/Hunt Publishing Company, Iowa. Viitattu: 22.12.2023. <https://search.worldcat.org/en/title/32415139>

Little, D. N., E. H. Males, J. R. Prusinski, and Stewart, B. 2000. "Cementitious Stabilization." 79th Millennium Rep. Series, Transportation Research Board, Washington, D. C: Louisiana State University. Viitattu: 4.1.2024. <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/millennium/00016.pdf>

Matar, P. & El Dalati, R. 2012. Using recycled concrete aggregates in precast concrete hollow blocks. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 43. 388–391. Viitattu: 4.2.2024. https://www.researchgate.net/publication/273119442_Using_recycled_concrete_aggregates_in_precast_concrete_hollow_blocks

Mattila, J. Toimitusjohtaja Betoniteollisuus ry. 2024. Puhelin ja sähköpostihaastattelu 3–8.4.2024. Helsinki.

Mattson, M.D. 2014. Alkalinity of Freshwater - Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier. Worcester. Viitattu: 22.12.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780124095489093970?via%3Dihub>

Naik, Tarun & Moriconi, Giacomo. 2005. Environmental-friendly durable concrete made with recycled materials for sustainable concrete construction. Toronto: Proceedings of CANMET/ACI/JCI three-day international symposium

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2009. Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials. Washington, DC: The National Academies Press. Viitattu: 22.12.2023. <https://doi.org/10.17226/22999>.

Nazar, R. S., Ahmed, M. D. & Al-Obaidi, A. L. 2022. Assessment of bearing capacity and settlement characteristics of soft soils reinforced by crushed concrete and sodium silicate columns, *Materials Today: Proceedings*, Volume 61, Part 3, 2022. Viitattu: 20.2.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321058338>

Nelson, J.D., Chao, K.C., Overton, D.D. and Nelson, E.J. (2015). Soil Treatment and Moisture Control. In *Foundation Engineering for Expansive Soils* (eds J.D. Nelson, K.C. Chao, D.D. Overton and E.J. Nelson). <https://doi.org/10.1002/9781118996096.ch10>

Onyejekwe, S., Ghataora, G.S. Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer. *Bull Eng Geol Environ* 74, 651–665 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0667-8>

Ozbayoglu, G. (1998). Desulphurization of Coal to Protect the Environment. In: Gallios, G.P., Matis, K.A. (eds) *Mineral Processing and the Environment*. NATO ASI Series, vol 43. Springer, Dordrecht. Viitattu: 8.2.2024. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2284-1_10

Petry, T. M., and D. N. Little. 2002. Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavement and Lightly Loaded Structures-History, Practice and Future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 6. Viitattu: 22.12.2023. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:6\(447\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(447))

Puulo. Nd. Kivituhkat ja asennushiekat puutarhaan. Yrityksen verkkosivusto. Viitattu: 20.12.2023. <https://www.puulo.fi/piha-ja-puutarha/istutus-ja-kasvatus/mullat-ja-katteet/kivituhkat-ja-asennushiekat>

Rakennustutkimus RTS. Nd. Suomi rakentaa. Neuvontaa rakentajille ja remontoijille. Rakennustutkimus RTS:n verkkosivusto. Viitattu: 20.12.2023. [Kulkuväylien pinnoitteet \(suomirakentaa.fi\)](https://www.rakennustutkimus.fi/kulkuväylien-pinnoitteet)

Resin Bonded against Loose Gravel – Making the Smarter Choice. 2014. Stone Set. Smithfield, Australia. Yrityksen internetblogin. Viitattu: 18.1.2024. <https://pouros.com.au/2014/10/13/resin-bonded-against-loose-gravel-making-the-smarter-choice/>

RT 89-11002. Pihojen pohja- ja päällysrakenteet 5.8.2010. Viitattu: 1.4.2024. <https://ai-rakennustieto-fi.libproxy.tuni.fi/>

Saarenpää, H. Lehtori, Tampereen ammattikorkeakoulu. 2024. Sähköposti-haastattelu 7.5.2024. Tampere

Shiffler, A. 2023. Lawnstarter. 12 Materials to Consider for Your Garden Path. Yrityksen internetblogin. Viitattu: 17.1.2024. <https://www.lawnstarter.com/blog/home-improvement/garden-path-materials/>

Soil cement stabilization. Better concrete conference. 2008. Updated guide to cement modified soil – PCA Publication 2008. Viitattu: 8.2.2024. https://cdn-wordpress.webspec.cloud/intrans.iastate.edu/uploads/sites/7/2018/12/2018_BCC_Ferrier_Soil-Cement_Stabilization.pdf

Soltani, A., Taheri, A., Khatibi, M. et al. Swelling Potential of a Stabilized Expansive Soil: A Comparative Experimental Study. Geotech Geol Eng 35, 1717–1744 (2017). Viitattu: 4.2.2024. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0204-1>

Sosahab, J. S., Ardakani, A. & Hassanlourad, M. 2023. Resilient response and strength of highly expansive clay subgrade stabilized with recycled concrete aggregate and granulated blast furnace slag, Construction and Building Materials, Volume 408. Viitattu: 20.2.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823035341>

Tavakol, Kulesza, Jones & Hossain. 2020. Effect of low-quality recycled concrete aggregate on stabilized clay properties, J. Mater. Civ. Eng. 32 (8). Viitattu: 20.2.2024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003263](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003263)

Valtioneuvoston asetus betonimurskeen jätteeksi luokittelun päättymisen arviointiperusteista 466/2022. Viitattu: 12.2.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2022/20220466>

Valtioneuvoston asetus kiinteän betoniaseman ja betonituotetehtaan ympäristönsuojeluvaatimuksista 858/2018. Viitattu: 12.2.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20180858>

Viestimedia. 2023. Kivituhka – monta tapaa käyttää pihalla ja kasvimaalla. Suomela.fi. Viestintämedian verkkosivusto. Viitattu: 20.12.2023. <https://www.suomela.fi/kivituhka/>

Viitala, M. 2024. Kivituhkaa sekoittuneena 3–8 sepeliin. Itse otettu kuvituskuva. Jyväskylä

Viitala, M. 2024. Kirjallisuuskatsauksen prosessikaavio. Jyväskylä

Villagrán-Zaccardi, Y. A., Marsh, A. T. M., Sosa, M. E., Zega, C. J., De Belie, N. & Bernal, S. A. 2022. Jätebetonin täydellinen uudelleenkäyttö – valorisointireitit ja tutkimustarpeet. Resour Conserv Recycl 177:105955. Viitattu: 4.2.2024. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105955>

Webster, J., & Watson, R. T. 2002. Analyzing the past to prepare the future: Writing a literature review. MIS Quarterly, 26, 3–23. Viitattu: 18.2.2024. [http://refhub.elsevier.com/S0148-2963\(23\)00843-3/h0660](http://refhub.elsevier.com/S0148-2963(23)00843-3/h0660)

Zhao, Z., Courard, L., Gros Lambert, S., Jehin, T., Léonard, A. & Xiao, J. 2020. Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: an industrial scale study. Resour Conserv. Recycl 157:104786. Viitattu: 4.2.2024. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104786>