

Saimaan ammattikorkeakoulu  
Tekniikka Lappeenranta  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus  
Rakennesuunnittelu

Putrolainen Andrei

## **Laattojen asennusmenetelmän vaikutus maako- tean betonin tiivistykseen**

Opinnäytetyö 2019

## Tiivistelmä

Putrolainen Andrei

Laattojen asennusmenetelmän vaikutus maakostean betonin tiivistykseen, 54 sivua, 2 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus

Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö 2019

Ohjaajat: Lehtori Heikki Vehmas, Saimaan ammattikorkeakoulu, Tilaaja, Yritys X (yrityksen nimi on jätetty pois salassapitosopimuksen vuoksi).

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia laattojen suomalaisen asennusmenetelmän vaikutusta maakostean betonin tiivistykseen ja sitä kautta puristuskestävyyteen. Tutkimustyö on tehty yritykselle X (yrityksen nimi on jätetty pois salassapitosopimuksen vuoksi).

Tutkimustyötä on tehty tekemällä koeasennuksia Saimaan ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Koeasennuksia varten rakennettiin yhdeksän kappaletta 1 m<sup>2</sup> laatikoita joihin koeasennuksia tehtiin. Osa asennuksista tehtiin suomalaisella menetelmällä ja osa saksalaisella. Asennustavan vaikutuksen arviointia varten valittiin 3 massaa, joista jokainen tehtiin kummallakin asennusmenetelmällä. Loput 3 massaa tehtiin saksalaisella menetelmällä massan kelpoisuuden arviointia varten. Laatikoista porattiin näytteet ja ne puristettiin 29 vrk ikäisenä. Näytteiden laskennallista tiheyttä, puristuslujuutta ja toteutunutta kerrospaksuutta on verrattu keskenään.

Työssä päädyttiin lopputulokseen, että saksalaisella menetelmällä on kerrospaksuuden perusteella noin 12,4 % ja tiheyden perusteella noin 6,9 % parempi tiivistys kuin suomalaisella menetelmällä. Testien perusteella todettiin myös, että suomalaisella asennusmenetelmällä saadaan myös hyvä ja kestävä rakenne riittävällä massan kehityksellä. Opinnäytetyössä on myös pyritty selvittämään, miksei tilaajan kohteista saatu näytteitä. Poranäytteiden epäonnistumisen syyksi on osoittautunut liian pieni vesi-sementtisuhte. Tutkimuksien perusteella todettiin 0,30 pienimmäksi vesi-sementtisuhteeksi, jolla suomalainen asennusmenetelmä tuottaa riittävää lujuutta. Opinnäytetyön tuloksena on syntynyt hyvä pohja tilaajan tulevia massakehityksiä ja testejä varten.

Asiasanat: maakostea, poranäytteet, keraaminen laatta, maakostea betoni, puristuslujuus, tiivistyminen, laattojen asennusmenetelmä

## **Abstract**

Putrolainen Andrei

Influence of the tile installation method on the semi-dry screed compactability,  
54 pages, 2 appendices

Saimaa University of Applied Sciences,

Lappeenranta Technology, Civil and Construction Engineering

Bachelor's Thesis 2019

Instructors: Lecturer Mr Heikki Vehmas, Saimaa University of Applied Sciences,  
Customer, Company X (The name of the company is hidden because of the  
nondisclosure agreement)

The purpose of this thesis was to study the effect of the ceramic tile installation method on the semi-dry screed and on compressive strength. The research work was done for the company X (the name of the company is hidden because of the nondisclosure agreement).

The research work was carried out with test installations in the Saimaa University of Applied Sciences laboratory. Nine boxes of 1 m<sup>2</sup> each were built for the test installations. Some of the units were made according to Finnish technology and others according to German technology. To assess the impact of the installation method 3 mixtures were selected, each of which was made on both methods of installation. The remaining mixtures were installed using the German method of installation to assess the quality of the mixture. Samples were drilled out of the crates and a compressive strength test was carried out at the sample age of 29 days. The estimated density, compressive strength and actual thickness of the sample layer were compared.

As the results of this thesis it was discovered that the German technology of installation on the basis of the real thickness of the layer got about 12.4% and on the basis of density about 6.9% better compactability during installation than on the Finnish technology of installation. On the basis of the tests it was also concluded that the Finnish method of installation can also be used to obtain a good and strong construction with sufficient improvement of the mixture. In this thesis we also tried to find out reason for the customer's facilities samples failing. Core samples failing is due to the low water-cement ratio. Based on the research, it was concluded that the water-cement ratio should be at least 0.30, in which the Finnish method of installation will bring sufficient strength. The result of this thesis is good initial data for future research and improvement of the mixture on the customer's side.

Keywords: semi-dry, drilled samples, ceramic tiles, semi-dry screed, compressive strength, compactability, tiles installation method

## Sisällys

Käsitteet .....	5
1 Johdanto .....	6
2 Maakostea betoni .....	7
3 Maakostea betoni Suomessa .....	12
4 Asennusohjeet .....	14
4.1 Saksalainen asennusmenetelmä .....	16
4.2 Suomessa kehitetty asennusmenetelmä .....	18
5 Ongelman kuvaus .....	20
6 Tutkimukset .....	21
6.1 Koeasennukset .....	21
6.2 Koemassat .....	23
6.3 Teoreettinen puristuslujuus .....	25
6.3.1 Nykäsen nomogrammi .....	26
6.3.2 Remi Feretin / de Larrardin kaava .....	28
6.3.3 Hydratoitumisasteella muunneltu de Larrardin kaava .....	30
6.4 Asennusvaiheen massojen työstettävyyden arviointi .....	32
6.5 Näytteiden poraus .....	32
6.6 Näytteiden ominaisuuksien määrittäminen ja valmistaminen testeihin .....	34
6.7 Näytteet ja niiden puristuslujuudet .....	34
6.8 Asennusmenetelmän vaikutus .....	37
6.9 Vesi-sementtisuhteen vaikutus .....	40
6.10 Lisäaineiden käyttö maakosteassa betonissa .....	43
6.11 Teoreettinen ja toteutunut lujuus .....	44
7 Yhteenveto ja päätelmät .....	46
Kuvat .....	51
Taulukot ja kaaviot .....	52
Lähteet .....	53

## **Käsitteet**

**Nimellismitta** - yleisesti käytetty kuvaus kappaleen koosta.

**Testauskohta** - mittauksia varten valittu rajattu alue.

**Testausalue** - tutkittava alue. Testausalue sisältää useita testauskohtia.

**Ohuthietutkimus** - noin 0,025 - 0,03 mm paksuinen näyteleike, jota tutkitaan polarisaatiomikroskoopilla.

**W/c** - Betonimassan vesi-sementtisuhte (eng. water/cement ratio)

**V/s** – w/c

**Helikopteri** - käsikäyttöinen hiertokone

**Filleri** - enimmäkseen alle 0,063 mm raekooltaan oleva, työstettävyyttä parantava seosaine

**$\alpha$**  - hydrataatioaste

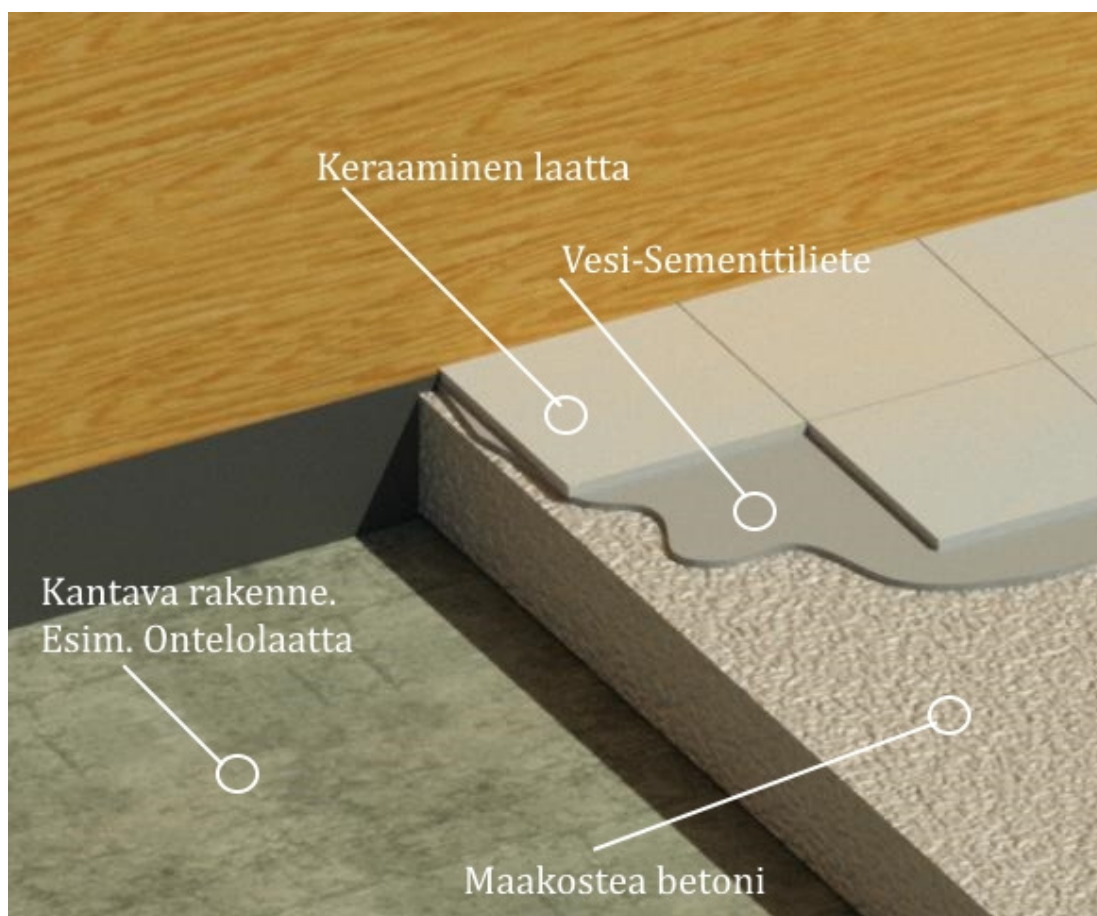
**$\alpha$  max** - suurin mahdollinen hydrataatioaste kyseisellä vedenmäärällä ja jälkihoitotavalla

## 1 Johdanto

Laatoitettuja lattioita, joiden alusrakenteena toimii maakostea betoni, on käytetty Suomessa ja Euroopassa vuosikymmeniä. Erityisesti isot lattiakohteet hyötyvät menetelmästä eniten, koska maakostean betonin käyttö vähentää työvaiheita ja nopeuttaa lattiarakenteen valmistumista.

Koska maakostea betoni on koostumukseltaan niin erilainen verrattuna tavalliseen betoniin, maakostealla lattian tekeminen edellyttää ammattitaitoisia työntekijöitä sekä paljon käytännön tietoa valmistuksesta ja työtavoista. Ongelmaksi muodostuu se, ettei virallisia tutkimuksia ole riittävästi saatavilla ja julkisia tutkimuksia on erittäin vähän. Tutkimukset ovat kalliita ja vievät yrityksiltä aikaa ja resursseja, jonka takia käytössä on paljon vanhentunutta ja puutteellista tietoa. On myös lattioita, jotka on tehty ”isoisän” ohjeilla eivätkä täytä nykypäivän vaatimuksia. Vaikka maakostealla betonilla lattioita on tehty Suomessa jo pidempään, on jossain kohteissa ollut laatuongelmia (BLY-18 2016, 3).

Opinnäytetyössä, joka on tehty tilauksesta toimeksiantajalle, on verrattu suomalaisen ja saksalaisen asennusmenetelmän vaikutusta maakostean betonin tiivistykseen sekä käytännön eroja lopputulosta ajatellen. Tilaajalla lattiarakenteeseen tulee paljon kuormaa pinnalta, mutta suurin osa kuormista jakautuu ke-raamisten laattojen avulla eikä suurta lujuutta aina tarvita. Luonnos tilaajan käyttämästä rakenteesta näkyy kuvassa 1. Asennusmenetelmissä suurin ero on massan levitystavassa, joka suomalaisessa tavassa saattaa vaikuttaa negatiivisesti massan tiivistykseen pintakerroksen alla ja sitä kautta puristuskestävyyteen. Tutkimuksessa on painotettu massan tiivistymistä ja puristuslujuuden tutkimista testejä varten valetuista massoista. Vertailut on tehty tekemällä koe-asennuksia molemmilla menetelmillä mutta samalla massalla, jolloin asennustavan vaikutus lopputulokseen jää määrääväksi. Samalla on tutkittu, saadaanko pienillä muutoksilla massa tiivistymään paremmin. Lähtöaineistona on käytetty tilaajalta saatua tutkimusaineistoa maakostealla betonilla aikaisemmin tehdyistä lattioista.



Kuva 1 Luonnos tilaajan käyttämästä rakenteesta

## 2 Maakostea betoni

Alun perin Saksassa kehitetty maakostea betoni on levinnyt nykypäivänä monen paikkaan ympäri maailmaa. Etenkin Keski-Euroopassa sen käyttö on aika yleistä. Viime vuosina sen suosio on kasvanut myös Venäjällä, etenkin kerrostalokohteissa. Venäjällä uudet kerrostaloasunnot, toisin kuin Suomessa, useimmiten luovutetaan ostajalle betonipinnoilla, johon asukas itse suunnittelee tulevan asuntonsa. Koska uudessa asunnossa joudutaan tekemään valuja oston jälkeen ja kerroksia on yleensä yli 10, on maakostealle betonille tehty peräkärryn kokoinen, pihalle tuotava mylly yli 100 metrin nostokyvyllään nostanut maakostean massan suosiota ja on helpottanut etenkin ylimmissä kerroksissa suoritettavia valutöitä.

Tämän opinnäytetyön massojen on tarkoitus olla alustana keraamisten laattojen asennukseen ja massat suhteutetaan siihen tarkoitukseen sopivaksi. Tarvittaessa suhteutusta muuttamalla ja hiertokoneella tasoittamalla maakostean betonin pinta saadaan sileäksi ja sen päälle voidaan asentaa esimerkiksi parketti tai muu tasaisuutta ja sileyttä vaativa pinta. Kuvassa 2 voidaan nähdä pinnan erot massalla ilman fillerihiekkaa ja fillerin kanssa.



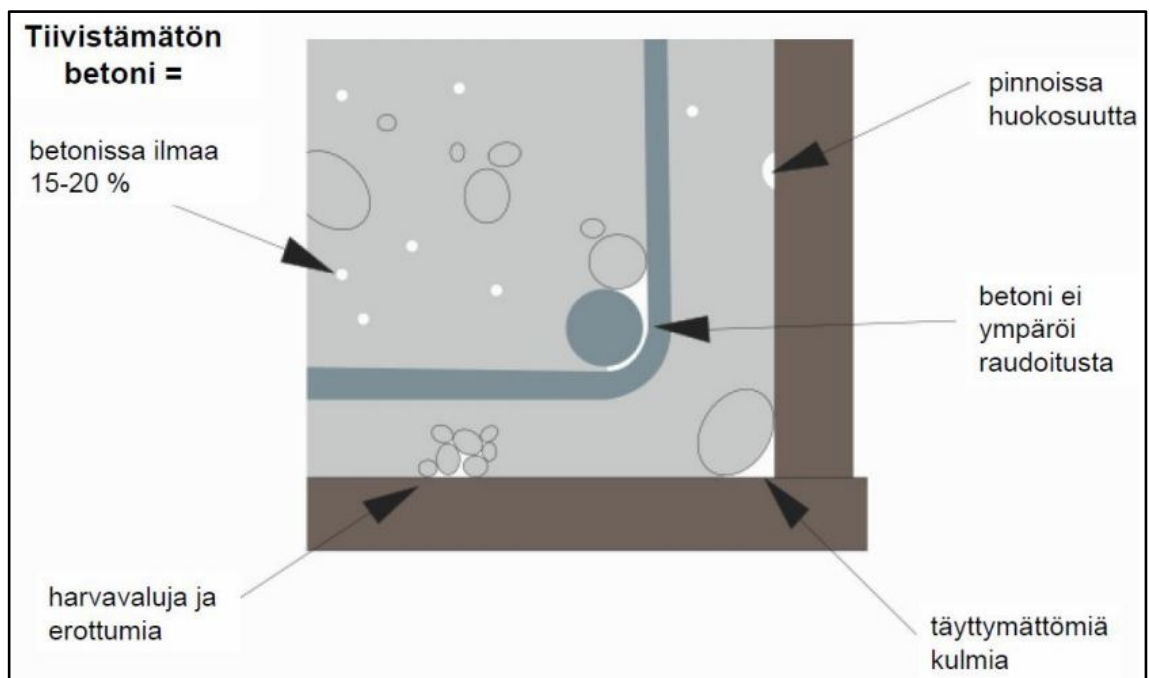
Kuva 2 Pinnan ero massalla ilman filleriä (vasemmalla) ja fillerin kanssa

Betonit jaetaan eurooppalaisissa standardeissa kolmeen ryhmään: lujuusluokiteltu betoni, koostumuksenmukainen betoni ja standardikoostumusbetoni (SFS-EN 206:2014 + A1:2016, 39–42). Maakosteabetoni kuuluu SFS-EN 206 standardin mukaan koostumuksenmukaiseen betoniin, jossa valmistuksessa seurataan määritetyn reseptin kilomäärien toteutumista annosten punnituksissa. Maakostean betonin erilaisilla osa-ainemäärillä voidaan saavuttaa erilainen työstettävyys ja kantavuus, joten suhteutusta pitää tutkia tarkoituksenmukaisesti ennen tilaamista valmisbetoniasemilta. Suurin vaikutus, heti reseptin suhteutuksen jälkeen, maakostean betonin loppulujuuteen tulee tiivistämisestä. Siitä johtuen tulee suunnittelijan ja työmaatyöntekijöiden tehdä yhteistyötä suunnitellussa asennusmenetelmää, koostumusta ja vesi-sementtisuhdetta hyvän työstettävyyden saavuttamiseksi menettämättä riittävää tiivistymistä ja lujuusominaisuuksia.



Maakosteaa betoni on betonia suurella ilmamäärällä ja pienellä vesi-sementtisuhteella, joten tavalliset tärylaitteet eivät sovi sen tiivistämiseen. Ilmamäärä normaalissa, sisäkäyttöön tarkoitetussa betonissa on 1–2 % tilavuusyksikköinä. Maakosteassa betonissa ilmaa on paljon enemmän, reilusti yli kymmenen prosenttia. Normaalin, lujuusluokitellun betonin, vesi-sementtisuhte on noin 0.4–0.6, mutta maakosteassa betonissa se on 0,3 tai sitä pienempi. Maakosteassa betonissa käytetty vesi-sementtisuhte on korkealujuusbetonin tasoa, mutta korkealujuusbetonin lujuutta ei saavuteta suuren ilmamäärän takia. (BLY-18 2016, 11; Virtanen, 2.)

Tavallisessa betonissa muodostuu valmistusvaiheessa 1–2 % ilmaa, ellei lisäaineita käytetä. Jos betonia ei tiivistetä valun aikana täryttimillä, voi sen ilmamäärä nousta yli 10 %, jolloin sen lujuudet pienenevät. Kuvassa 3 voidaan nähdä normaalin betonin riittämättömän tiivistämisen tuomat ongelmat.



Kuva 3 Tiivistämätön betoni (Kemppainen, 24)

Eräissä tutkimuksissa on saatu tuloksia, joiden mukaan 1 % ilmaa vähentää puristuslujuutta 3–6%. (Kemppainen, 3; Kemppainen, 24.) Tutkittavan maakosteaa betonin runkoaine on yli 75 % hiekkaa ja tiivistyminen tapahtuu melkein samalla tavalla hiekan kanssa. Kuvassa 4 voidaan nähdä sekä tiivistämätön hiekka tilavuudeltaan 1 litra että noin 30 sekunnin ajan tärytetty hiekka, jonka

lopputilavuus on sama, 1 litra. Vaikka hiekka on tiivistetty 15,3 % on sen rakeiden välissä yli 30 % ilmaa.



Kuva 4 Tiivistämätön ja tiivistetty hiekka

Perinteisen paikallavalubetonin kuivumisajat aiheuttavat ylimääräistä odottamista työmailla, jonka aikana ei välttämättä keretä tekemään toista urakkaa alusta loppuun. Tästä syntyy tilanne, jossa työntekijät tekevät muuta työtä vähän aikaa tai sitten saavat osan palkastaan odotusajalta. Tällainen työntekijöiden juoksuttaminen työmaalta toiselle vaatii paljon järjestelyjä, turhauttaa työntekijöitä eikä ole ajallisesti ja rahallisesti järkevää toimintaa.

Maakostean betonin suosion syynä on sen kuivumisnopeus ja kustannustehokkuus. Maakostealla betonilla on paljon hyviä ominaisuuksia, joista muodostuu

sen lopullinen kustannustehokkuus. Pinnalle ei erotu sementtiliimaa, eli sen hiominen jää pois. Kuivumiskutistuma on paljon pienempi, jolloin halkeamia on vähemmän ja pienempi muodonmuutos kuivuessa takaa, että se on paljon mitatarkempi verrattuna tavalliseen valubetoniin. Maakostean betonin koostumuksen ansiosta voi esimerkiksi märkätiloissa tehdä kaadot saman tien valuvaiheessa paljon helpommin, verratessa normaalin betoniin. Vaikka maakostealla betonilla on niin paljon hyviä ominaisuuksia, ei sen käyttö kantavissa rakenteissa ole mahdollista koska sitä ei ole lujuusluokiteltu.

Maakostea betoni on määriteltävä asemalle yksiselitteisesti käyttäen mm. seuraavia perusvaatimuksia:

- SFS-EN 206:2014 + A1:2016 Standardin noudattaminen
- sementtilaji ja sementin lujuusluokka
- sementtimäärän tavoitearvo
- vesi-sementtisuhde
- kiviaineksen laatu, luokka ja suurin kloridipitoisuus
- tarvittaessa kiviaineksen tiheys
- kiviaineksen suurin raekoko ja mahdolliset rakeisuusluokkaa koskevat rajoitukset
- mahdolliset lisäaineet, seosaineet, kuidut, niiden tyypit ja määrät.

Jos lisäaineella, seosaineella, kuidulla tai sementillä on sellaisia ominaisuuksia, joita ei voi määritellä, voidaan se tieto korvata niiden alkuperällä. (SFS-EN 206:2014 + A1:2016, 39 – 42.) Esimerkiksi trikalsiumsilikaattipitoisuus ei pysytä mittaamaan tavallisessa laboratoriossa, mutta sen pitoisuus voidaan korvata tuotemerkillä ja valmistajalla.

Koska tiivistys riippuu myös massasta, hyvä lopputulos edellyttää riittävää osaamista ja kokemusta. Massoille ei ole olemassa mitään standardia, niistä ei myöskään Suomessa tehdä normaaleja lujuuskoekappaleita, vaan oikea suhde haetaan kokeilemalla. Yli 50 mm paksuja valuja ei suositella tehtäväksi, koska riskiksi muodostuu suunnitellusta poikkeava lopputulos. (BLY-18 2016, 10; BLY-18 2016, 18–19).

### 3 Maakostea betoni Suomessa

Suomessa ei pidetä ”maakostea betoni” – nimikkeestä. Maakosteasta betonista käytetään useimmiten saksankielistä sanaa ”estrich”, mikä ei saksan kielessä tarkoita maakosteata betonia, vaan on yleisnimitys tasoitelaatalle/pintalaatalle. Maakosteasta betonista valetun pintalaatan oikea nimitys saksaksi on ”erdfeuchtes zementestrich” (SFS-EN 13318, 8).

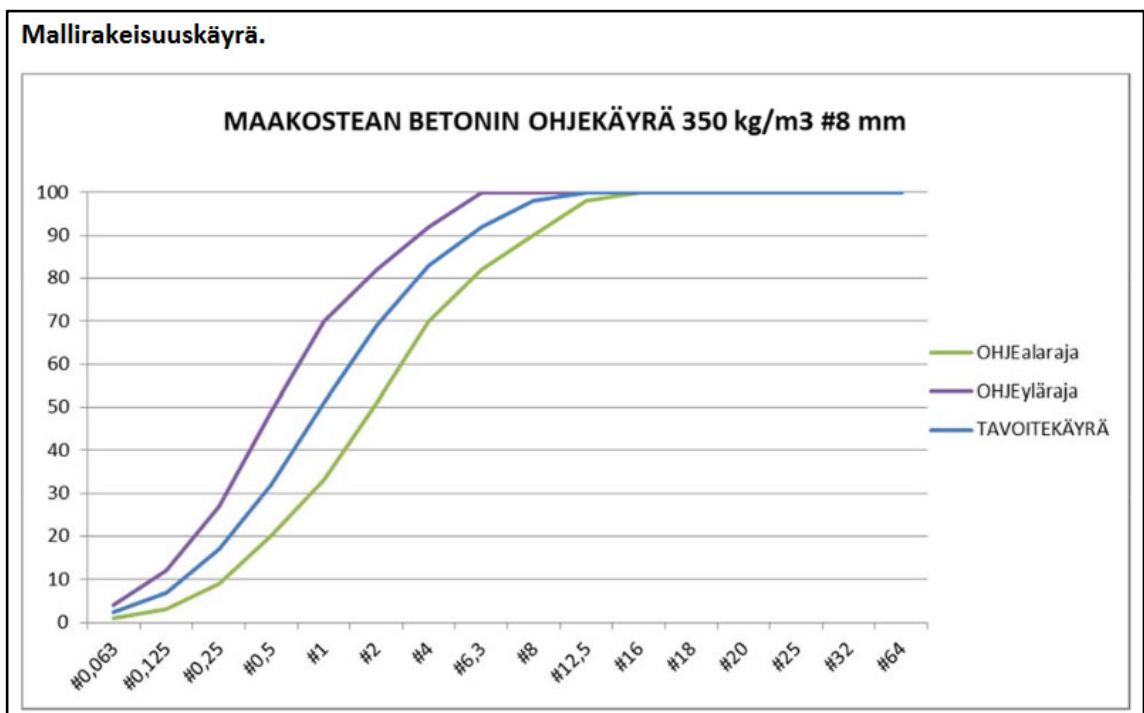
Talonrakentamisessa maakosteata betonia käytetään Suomessa suurimmaksi osaksi pintalattialaattoihin, jotka päällystetään joko mosaiikkilaatoilla tai keraamisilla laatoilla. Suhteutus perustuu kokemuksen kautta kerättyyn tietoon. Suomessa käytetään maakosteaan betoniin noin 200–400 kg/m<sup>3</sup> sementtiä. Loput massasta täytetään hiekalla, jonka maksimiraekoko on yleensä 8 mm ja tavoiteohjekäyrä sekä toleranssit on valittava aina tilanteen mukaan. Lisäaineita ei yleensä käytetä, ellei siihen ole erikseen tarvetta. Jos tarvitaan lisää työstöaikaa tai kuljetusmatkat ovat pitkiä, voidaan käyttää hidastinta. Hidastinta käyttäessä on varmistettava, ettei kosteus kulkeudu massasta haihtumalla tai imeytymällä toiseen rakenteeseen ennen riittävää hydrataatioreaktiota. Massan erilainen koostumus myös aiheuttaa sen, ettei kaikkien lisäaineiden vaikutusta voida ennakoida, joten testit on suoritettava ennen käyttöä. Aikaisemmin suurin osa massoista tehtiin työmailla, mutta nykypäivänä useimmilta valmisbetoniasemilta voidaan tilata myös maakosteaa betonia, mutta koostumus ja lisäaineet tilaajan on osattava kertoa.

Suomen Betonilattiyhdistys ry:n julkaisussa, BLY-18:ssa, on annettu esimerkkisuhteutus maakostealle betonille (kuva 5) ja ohjekäyrät (kaavio 1), joista löytyy suositeltavat maksimi- ja minimiarvot sekä tavoitekäyrä. Alkuperäinen, saksalainen resepti maakostealle betonille on käyttää yksi osa sementtiä ja neljä osaa hiekkaa. BLY-18-julkaisun esimerkkisuhteutus on lähempänä 1:6 suhdetta johtuen toisenlaisesta valutavasta, joka vaatii enemmän hienoja rakeita massaan kasvattamaan lopullista tiiveyttä.

### MAAKOSTEAN BETONIN ESIMERKKISUHTEUTUS

Hiekka 0...8 mm	1682 kg/m <sup>3</sup>
Filleri	320 kg/m <sup>3</sup>
Plussementti	350 kg/m <sup>3</sup>
Kokonaisvesi	120 kg/m <sup>3</sup>
(Ilma)	2,0 %

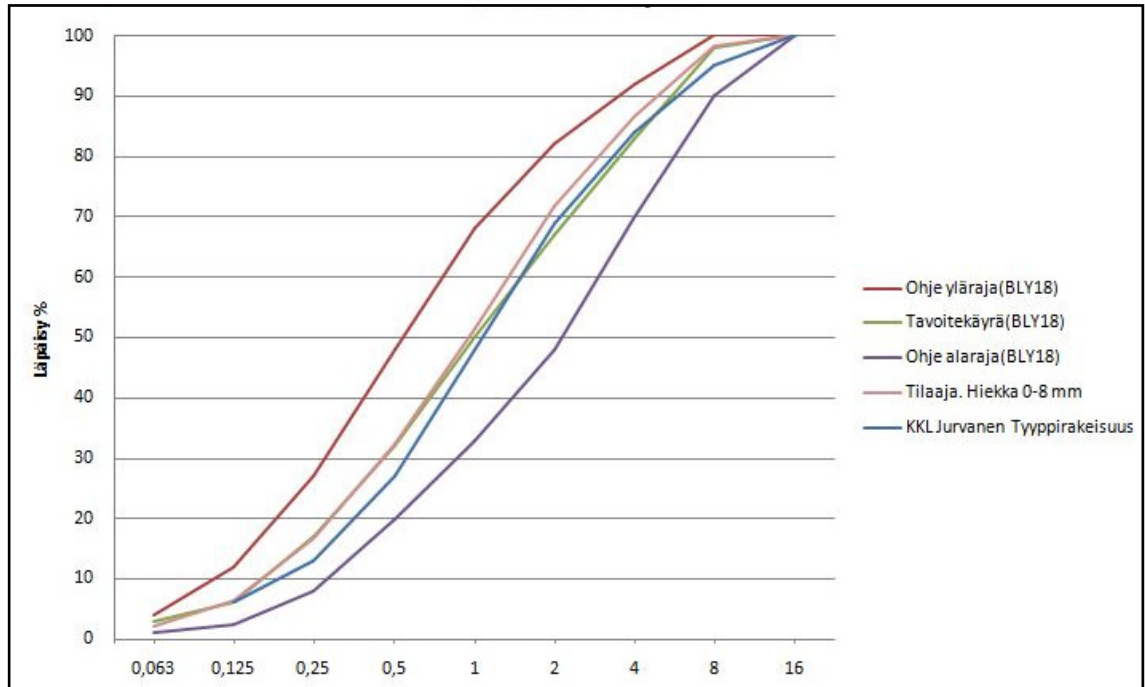
Kuva 5 BLY-18 Esimerkkisuhteutus (BLY-18 2016, 29)



Kaavio 1 BLY-18 Maakostean betonin ohjekäyrät (BLY-18 2016, 29)

Ohjekäyrien otsikko on harhaanjohtava eikä selitä tarkasti, mitä ainesta kyseinen rakeisuuskäyrä kuvaa. Vaikka otsikkona on "Maakostean betonin ohjekäyrä" sekä sementtimäärään viittaava maininta "350 kg/m<sup>3</sup>", niin omat seulon-tatestit osoittavat, että kuvaajassa nähdään pelkästään 0–8 mm hiekan rakeisuuskäyrä. Kaaviossa 2 nähdään sekä tilaajan että paikallisen KKL Jurvanen KY:n (tyyppirakeisuus) 0–8 mm hiekan rakeisuuskäyrät samassa kuvaajassa

BLY-18 julkaisussa olevien käyrien kanssa (Kapiainen 2013, 2). Jos kyseessä on joku muu, kuin valmiin kuivan seoksen käyrä, niin asian pitäisi olla yksiselitteisesti kerrottuna.



Kaavio 2 BLY-18 ohjekäyrät sekä tilaajan ja KKL Jurvasen 0–8 mm hiekan ra-keisuuskäyrät

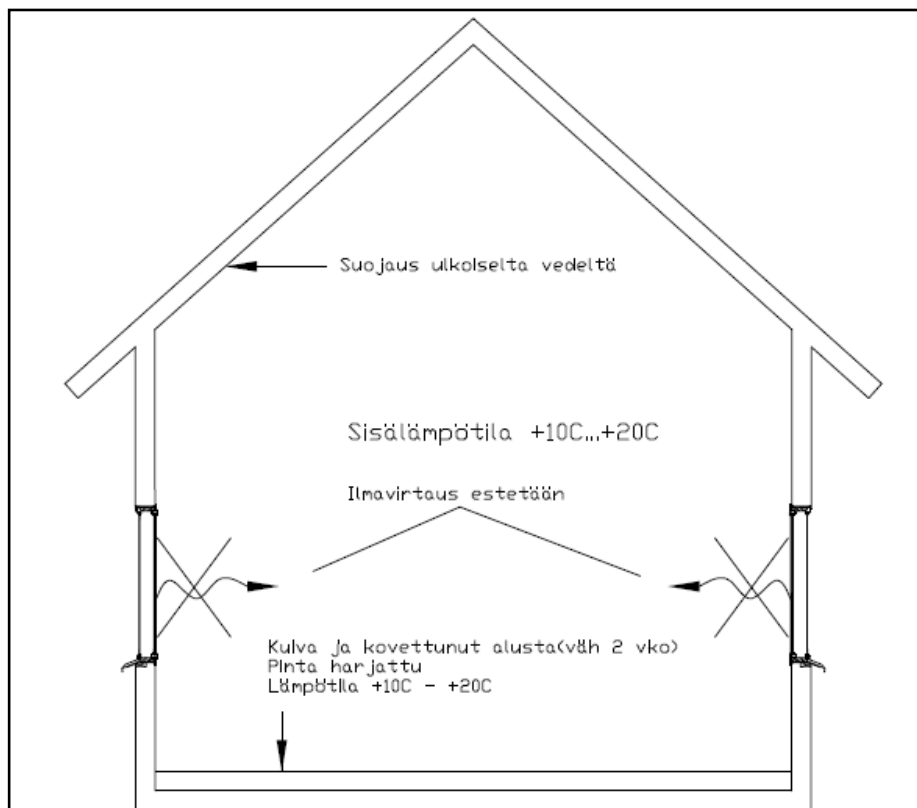
## 4 Asennusohjeet

Betonivaluissa, riippumatta siitä, onko se maakostea vai tavallinen betoni (ei koske erikoismassoja, kuten talvibetonointiin sopivaa betonia) on olemassa yleiset ohjeet hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi. Ohjeissa käydään läpi suurimmaksi osaksi ympäristön olosuhteet, pohjan ja pintamateriaalin ominaisuudet ja kunto. (BLY-18 2016, 18 – 19; Rakentajain kalenteri 2012, 134.)

Saman tilavuuden valu maakostealla betonilla ja tavallisella betonilla tuottaa erilaisen määrän lämpöenergiaa. Maakostean betonin lämmöntuotto ja lämmön varastointikapasiteetti ovat pienempi kuin tilavuudeltaan vastaavan tavallisen betonin, jonka takia alustan ja ympäristön lämpötila on oltava vähintään +10C° (BLY-18 2016, 18–19). Normaalin betonin talvibetonoinnin oletetaan alkavan, kun lämpötila laskee päivän aikana alle +5C° (Rakentajain kalenteri 2012, 134).

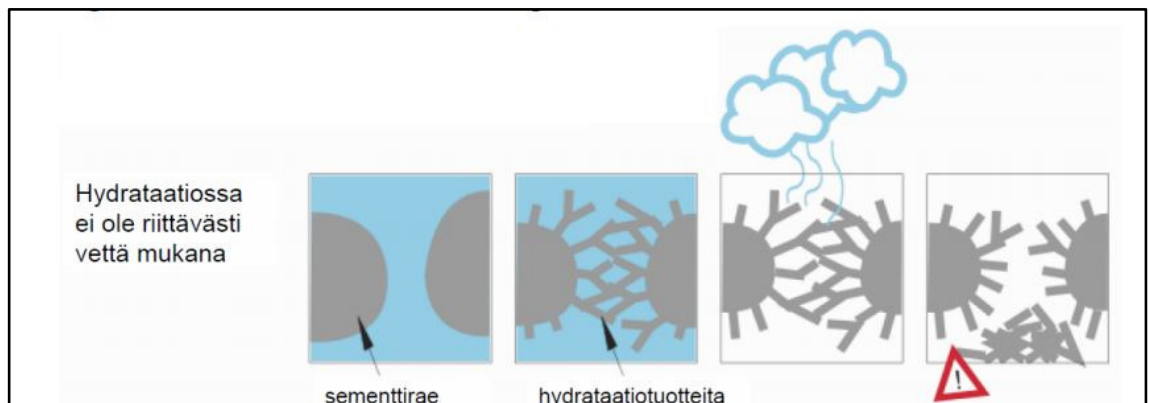
Muita vaatimuksia ovat mm.:

- alusta tai valmis lattia on suojattu ulkoiselta vedeltä, esim. sateelta,
- asennuksen alusbetoni on kuivunut ja kovettunut vähintään kaksi viikkoa,
- alusbetonin pinta on harjattu,
- mosaiikkibetonilaatan lämpötila on vähintään + 5 °C,
- laattojen saumauksessa lämpötilan on oltava vähintään +10 °C,
- laattojen suojakäsittelyn lämpötila on + 10 °C,
- ilmanvirtaus estetään aukkoja peittämällä ja lämmittimien suuntausta muuttamalla. (BLY18 2016, 18–19.) Mosaiikkibetonilaatan lämpötilavaatimus sopii myös keraamiselle laatalle. Vaatimuksen ympäristölle maakostean betonin vaaluun ovat esitetty myös kuvassa 6.



Kuva 6 Vaatimukset ympäristölle asentaessa maakostealle betonille

Liian korkea lämpötila taas nopeuttaa muutenkin pienen veden määrän haihtumisen massasta, eikä sementissä ehdi tapahtumaan hydrataatioreaktiota tai se on epätäydellinen (kuva 7). Tämän takia suositeltavat lämpötilat ovat +10C°–+20C°. Alustassa oleva sementtiliima pitää hioa pois tai karhentaa pintaa valun jälkeen sellaisessa vaiheessa, jolloin sementtiliimaa ei enää erotu pinnalle. Karhennettu pinta parantaa maakostean massan kiinnittymistä runkobetoniin. Saumauksesta on myös monta erilaista ohjetta, eikä tutkimuksia maakostean betonin kuivumisesta ole julkaistu, joten turvallisena ohjeena voidaan pitää, että lattia saa kuivua +15 C° lämpötilassa laattojen asennuksen jälkeen 1–2 viikkoa ennen saumausta (BLY-18 2016, 21). Runkobetoni kostutetaan vesi-sementtilietteellä, ettei se ime kosteutta maakosteasta massasta sekä parantaa maakostean massan kiinnittymistä alustaan.



Kuva 7 Epätäydellinen hydrataatio (Kemppainen, 29)

#### 4.1 Saksalainen asennusmenetelmä

Saksalaisessa asennusmenetelmässä massa tehdään hieman isommalla vesi-sementtisuhteella, mutta pienemmällä sementtimäärällä, jolloin kokonaisvesimäärä voi olla jopa pienempi suomalaiseseen massaan verrattuna.

Saksalainen asennusmenetelmä vaatii asentajaa tekemään tilaan muutaman korkoon asennetun ja tiivistetyn maakostean kasan, jota se sitten käyttää tasoittaessa ympärillä olevia pintoja linjarilla. Vaihtoehtona voidaan käyttää jotain muuta tapaa, jolla massa valetaan oikeaan korkoon. Opinnäytetyöhön liittyvissä asennuksissa on käytetty myös vesi-sementtilietettä massan ja runkobetonin välissä. Valupaikalle kasatut massat levitetään käsin noin puolet tulevan kerrok-

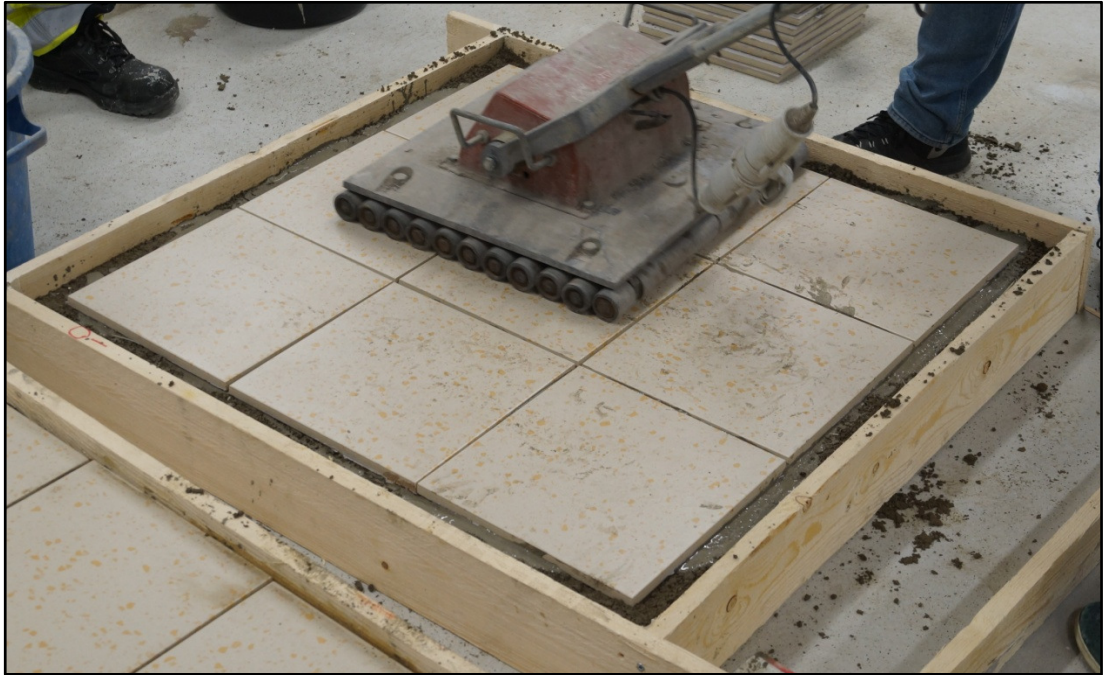


sen paksuudesta ja hieman taputetaan, jotta massa tiivistyy runkobetonia vasten. Käsillä levitetyn massan päälle tuodaan lisää massaa, joka hierretään ja suoristetaan linjarilla. Suoristaessa massaa linjarilla se samalla tiivistyy. Linjarilla tasoitettava pinta voidaan nähdä kuvasta 8. Opinnäytetyön testiasennuksissa massa on levitetty koko alueelle ja hierretty ainoastaan yläpinnasta.



Kuva 8 Linjarilla tasoitetaan maakostean betonin pinta

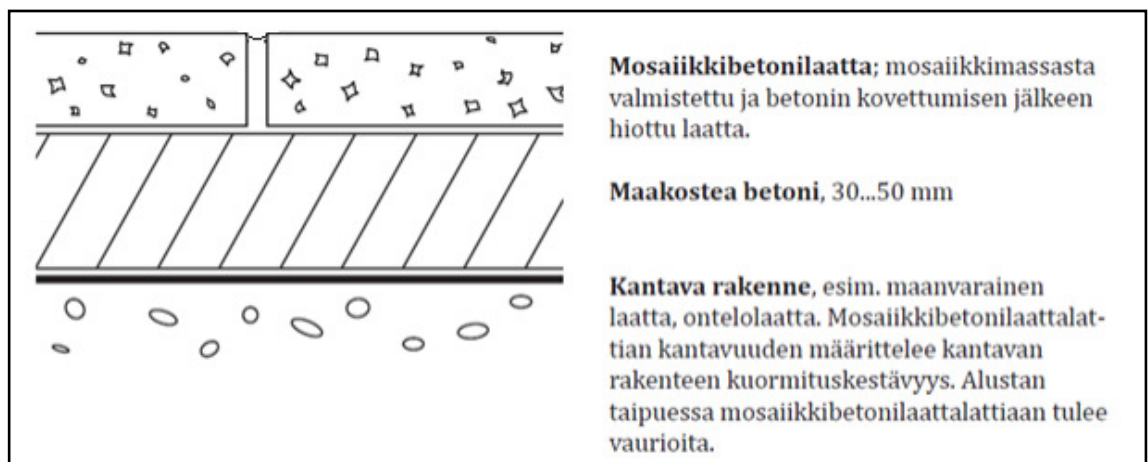
Seuraava vaihe riippuu käyttötarkoituksesta ja päällysmateriaalista. Pintaa voidaan vielä paremmin tasoittaa käsikäyttöisellä hiekkoneella ("helikopterilla") ja jättää kuivumaan myöhempää pintamateriaalin asennusta varten tai asentaa laatat käyttäen vesi-sementtiliuosta. Tässä opinnäytetyössä on jatkettu asentamalla laatat vesi-sementtiliuokselle, jonka jälkeen laatat tärytettiin rullajyrällä. Rullajyrän, joka näkyy kuvassa 9, tarkoituksena on täryttää laatat paremmin kiinni vesi-sementti liuokseen sekä vähentää laattojen välistä hammastusta. Rullajyrän vaikutusta tiivistykseen ei ole tutkittu.



Kuva 9 Rullajyrän käyttö

#### 4.2 Suomessa kehitetty asennusmenetelmä

Suomessa monella yrityksellä on käytössä BLY-18-julkaisussa kuvattu asennusmenetelmä. Julkaisussa käsiteltävä lopullinen rakenne on esitetty kuvassa 10. Tarkennuksena pitää kertoa, ettei BLY-18 anna mitään uusia ohjeita, vaan julkaisussa kerrotaan kootusti jo olemassa ja käytössä oleva tapa asentaa mosaiikkibetonilaatat maakostealle betonille.



Kuva 10 BLY-18 - julkaisussa käsiteltävä rakenne (BLY-18 2016, 5)

Runkobetoni kostutetaan vesi-sementtiliitteellä asennusalueelta. Kostuttamisella varmistetaan maakostean betonin kovettuminen ja kiinnittyminen alustaan. Laatan levyiselle kaistalle levitetään vesi-sementtiliete ja sen päälle lapioidaan noin 6 cm paksu "asennusmassapenkki". Penkki tasataan sabluunalaudalla siten, että massan tiivistämisvaraksi jää noin 10...15 mm. Tasatun asennusmassapenkin päälle levitetään vesi-sementtiliete alueelle, joka ehditään laatoittaa 10 minuutin kuluessa (kuva 11). Sementtiä lisätään veteen niin paljon, että vesi-sementtiliete on piimämäistä. Normaalisti käytetty sementin ja veden suhde on 1:1. Levitys voidaan tehdä esimerkiksi kastelukannulla. Paljussa olevaa vesi-sementtilietetä tulee sekoittaa ajoittain sementtipartikkelien laskeutumisen takia. Laatta asetetaan oikeaan kohtaan asennusmassapenkin päälle ja naputellaan oikeaan korkeusasemaan kumivasaralla. Laatan oikea korkeusasema tarkistetaan langalla tai pienissä kohteissa linjaarilla. Saumaleveys on normaalisti noin 2–3 mm. (BLY-18 2016, 20.)



Kuva 11 Keraamisten laattojen asennus vesi-sementtiliuokselle

Teoreettisesti 10...15 mm tiivistämisvaran pitäisi riittää maakostean massan riittävään tiivistykseen, mutta käytännössä asiasta ei ole mitään tutkimuksellista näyttöä. Myöskään koeasennuksia tehdessä ei ohjeiden mukaista tiivistystä ole valvottu.

## 5 Ongelman kuvaus

Alun perin opinnäytetyön tilaaja on pyytänyt tutkimaan, että saavutetaanko BLY-18-julkaisussa kuvatulla, suomalaisella asennusmenetelmällä, yhtä hyvä tulos kuin saksalaisella menetelmällä. Tilaaja on myös tilannut tätä opinnäytetyötä ja omia tutkimuksia varten tutkimukset aikaisemmista kohteista, jotka on tehty maakostealla massalla. Tutkituista kohteista 2 on tehty saksalaisella menetelmällä, loput suomalaisella. Tilatut tutkimukset olivat pintalaattojen tartuntaveto-  
lujuusmittaus sekä puristuslujuusmittaus. Kahden kohteen näytteistä tehtiin ohuthietutkimus. Kun tutkimustulokset oli saatu, todettiin, etteivät suomalaisella menetelmällä tehdyt lattiat olekaan yhtä hyviä kuin saksalaisella menetelmällä tehdyt. Kaikki tutkitut, suomalaisella menetelmällä tehdyt lattiat olivat liian heikkoja poranäytteiden ottoon. Saksalaisella tekniikalla tehdyistä lattioista on saatu poranäytteet puristuslujuustestiä varten, eikä niissä ole ilmennyt suuria ongelmia. Opinnäytetyössä on sen perusteella lähdetty etsimään myös syitä poranäytteiden epäonnistumiseen.

Opinnäytetyön rajauksen ja tavoitteiden perusteella pintalaattojen tartuntaveto-  
lujuuksien tarkastelu tilaajan toimittamista tutkimusraporteista on jätetty pois tästä opinnäytetyöstä.

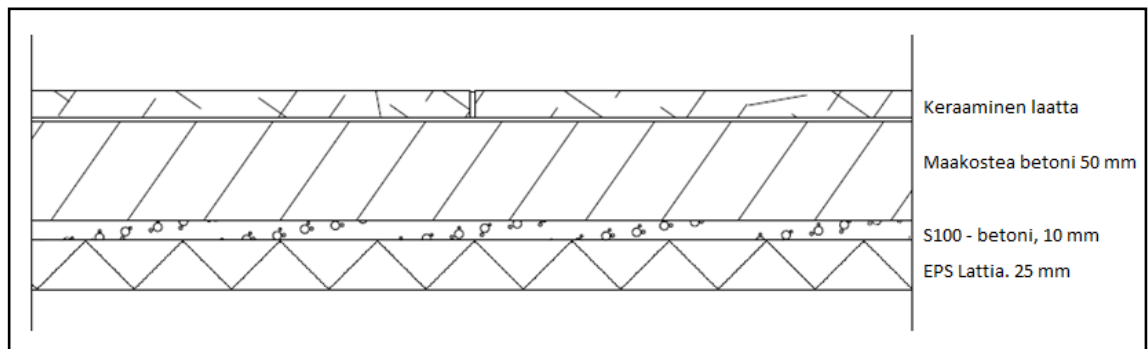
Saksalaisella menetelmällä tehtyjen lattioiden pienin mitattu puristuslujuus oli tutkimuksen mukaan 3,4 MPa ja sen tiheys oli 1886 kg/m<sup>3</sup>. Kyseinen näyte eroaa selkeästi muista heikon lujuutensa takia. Suhteellisen lähellä otettu näyte on näyttänyt noin 8 kertaa paremman tuloksen, joten heikkoa koekappaletta voidaan pitää poikkeuksellisen heikkona eikä se edusta koko rakennetta. Vahvemman näytteen tiheys on myös noin 12 % isompi. Betonin vetolujuus riippuu betonin lujuusluokasta, joka ilmoitetaan tänä päivänä puristuslujuutena. Betonin vetolujuus on 13–6 % betonin puristuslujuudesta C12–C90 betoneilla. Vaikka porauksen onnistuminen riippuukin huomattavasti enemmän vetolujuudesta kuin puristuslujuudesta, tutkimusselostuksessa ei ole näytteiden vetolujuuksia, joten näytteiden suoriutumista arvioidaan pelkästään puristuslujuudella. Suhteellisen pienelläkin puristuslujuuden arvolla (3,4 MPa) näyte saatiin porattua rakenteesta, joka oli tehty saksalaisella menetelmällä. Suomalaisella menetelmällä tehdyn rakenteen lujuus on pitänyt olla erittäin alhainen, jos poranäytteitä

ei siitä ole saatu. Valitettavasti tarkat massareseptit, valumenetelmät ja ympäristöolosuhteet valuvaiheessa eivät ole saatavilla. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, johtiko suomalainen asennusmenetelmä poranäytteiden epäonnistumiseen.

Kahdesta kohteesta, joista yksi oli tehty suomalaisella valutekniikalla ja toinen saksalaisella on tehty ohuthietutkimuksia. Ohuthietutkimusraporteista ei ole ilmennyt syitä suomalaisella menetelmällä tehdyn lattian heikkouteen.

## 6 Tutkimukset

Tutkimusselostuksien perusteella on päätetty tehdä yhdeksän koeasennusta Saimaan ammattikorkeakoulun laboratoriotiloissa. Koeasennuksista tutkittaisiin erilaisia massoja ja asennustyyliä sekä niiden vaikutusta maakostean betonikerroksen tiivistyvyyteen ja sitä kautta puristuslujuuteen. Testiasennuslaatikon lopullinen rakenne asennuksen jälkeen nähdään kuvassa 12.



Kuva 12 Testiasennuslaatikon rakenne

Kuivumisen jälkeen, 25 vuorokauden kohdalla, jokaisesta koeasennuslaatikosta porataan kolme poranäytettä opinnäytetyön tekoaikana voimassa olevien standardien mukaan. Näytteenoton jälkeen koekappaleet koekuormitetaan 29 vuorokauden kohdalla ja verrataan eri asennustyyliä tehtyjen koeasennusten puristuslujuuksia ja muita ominaisuuksia.

### 6.1 Koeasennukset

Opinnäytetyössä on lähdetty selvittämään, saadaanko saksalaisella menetelmällä parempi tiivistyminen kuin suomalaisella, sekä sivututkimuksena massan

vesi-sementtisuhteen vaikutusta. Luotettavan tuloksen saamiseksi kaikki mas-savariaatiot piti alkuperäisen suunnitelman perusteella tehdä sekä suomalaisel-la että saksalaisella asennusmenetelmällä, mutta valuvaiheessa yhdestä mas-sasta on luovuttu ja korvattu toisella.

Massoille on rakennettu yhdeksän kappaletta  $1\text{m}^2$  laatikoita, johon pohjalle on laitettu 25 mm EPS-eristettä suojaamaan Saimaan ammattikorkeakoulun labo-ratorion lattiaa. Eristeen päälle on asennettu muovi, joka oli estämässä runko-betonin läpivalumisen ja päälle valettu noin 10 mm kerros S100 betonia imitoi-maan runkobetonia ja imemään kosteutta maakosteasta betonista. S100:lla be-tonilla valetun laatikon voi nähdä kuvassa 14. Betonipinnassa olevat halkeamat tulivat hiontavaiheessa ja johtuvat pienestä kerrospaksuudesta ja joustavasta pohjasta, mutta eivät ole vaikuttamassa testin tuloksiin. Betonin pinnalta on hiot-tu melkein kokonaan sementtiliima pois käsihiomakivellä, jäljelle jäänyt sement-tiliima ei ole vaikuttamassa opinnäytetyössä testattavaan asiaan. Jokainen laa-tikko on numeroitu, jotta tiedetään, missä laatikossa on mikäkin massa ja millä asennustavalla se on tehty. Päälle valettavan maakostean betonin kerrospak-suudeksi on päätetty 50 mm ja massoina on käytetty tilaajan kanssa sovittu suhteutus, jossa melkein kaikkiin massoihin on käytetty 69 kg tilaajan toimitta-maa 0–8 mm hiekkaa, 20 kg sementtiä sekä massasta riippuen joko 4,4 tai 5,6 litraa vettä.

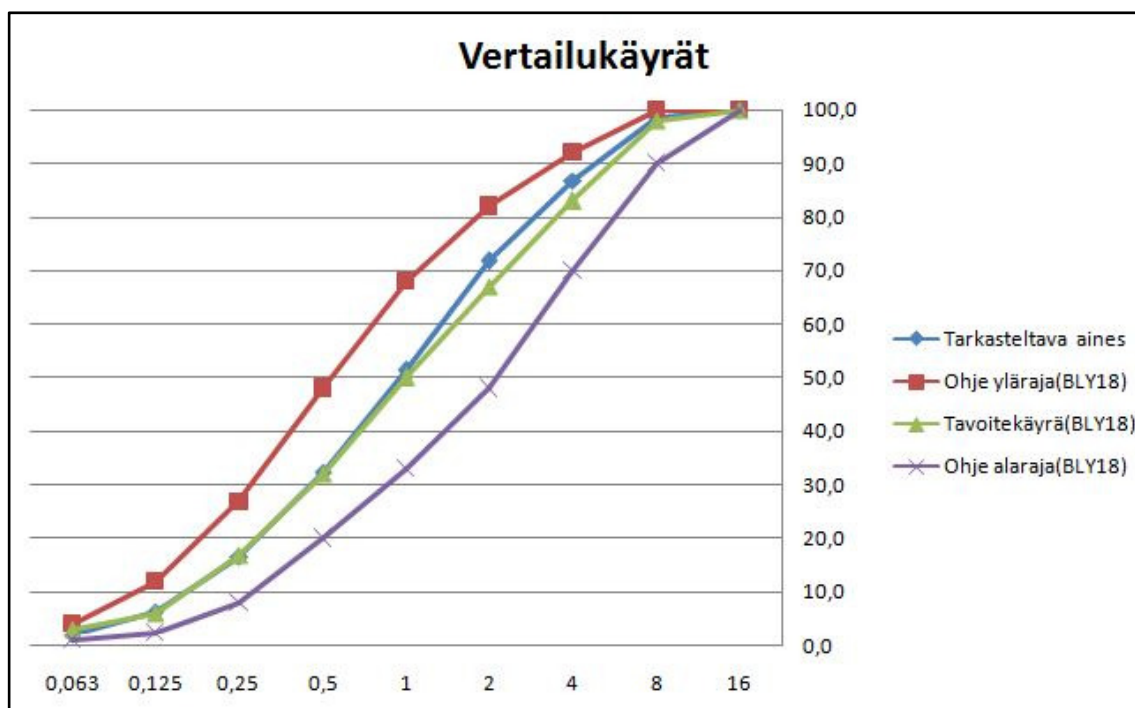


Kuva 13 Laatikko testimassoja varten

Kaikki asennukset on suorittanut tilaajan asentaja, jotta saadaan todellista vastaava lopputulos.

## 6.2 Koemassat

Tutkimuksissa on käytetty tilaajalta saatua 0–8 mm hiekkaa sekä normaalisti kovettuvaa portlandseossementtiä (Finnsementti, Plussementti) 46 – 52 MPa 28 vrk lujuudella (pakkausmerkintä PLUSSEMENTTI CEM II/B-M S-LL 42,5N). Hiekasta on tehty kuiva- ja pesuseulonta, joiden tulokset ovat liitteessä 1 ja 2. Kaaviossa 3 nähdään tilaajalta saadun hiekan ("Tarkasteltava aines") rakeisuuskäyrän vertailu BLY-18-julkaisussa esitettyihin käyriin. Kaaviosta voidaan huomata, että tilaajan käytössä oleva hiekka toistaa melkein täydellisesti tavoitekäyrää eivätkä poikkeukset ole merkittäviä.



Kaavio 3 Vertailukäyrät

Taulukossa 1 on lueteltu massojen suhteutukset sekä asennustapa(AT). Kirjaimella F on merkitty suomalainen asennusmenetelmä, kirjaimella S - saksalainen.

Massa(nro)	Laatikko(nro)	Hiekka(kg)	Sementti(kg)	Vesi(l)	Notkistin(kg)	Filleri(kg)	w/c	AT
1	2	69	20	4,4	0	0	0,22	F
2	3	69	20	5,6	0	0	0,28	F
3	4	69	20	4,4	0,2	0	0,22	F
4	5	69	20	5,6	0,2	0	0,28	F
5	8	55	18,5	4,4	0	14	0,24	S
6	9	69	20	4,4	0	0	0,22	S
7	10	69	20	5,6	0	0	0,28	S
8	6	69	20	4,4	0,2	0	0,22	S
9	7	72,3	12,5	5,6	0	0	0,45	S

Taulukko 1 Testimassojen suhteutukset

Notkistetuissa massoissa on käytetty Finnsementin valmistamaa Ontelo-Parmix-notkistinta. Massat on tehty Saimaan ammattikorkeakoulun tasosekoittimella, jonka takia ylimääräistä palloutumista on esiintynyt hieman. Palloutunut massa on yritetty poistaa tulevalta testausalueelta eikä sen vaikutusta lujuteen ole arvioitu. Laskennalliseksi ilmamääräksi massoissa (paitsi massat 5 ja 9) 0,22 w/c suhteella on saatu 26,8 % ja 0,28 w/c suhteella ilmamäärä on 24,4 %.

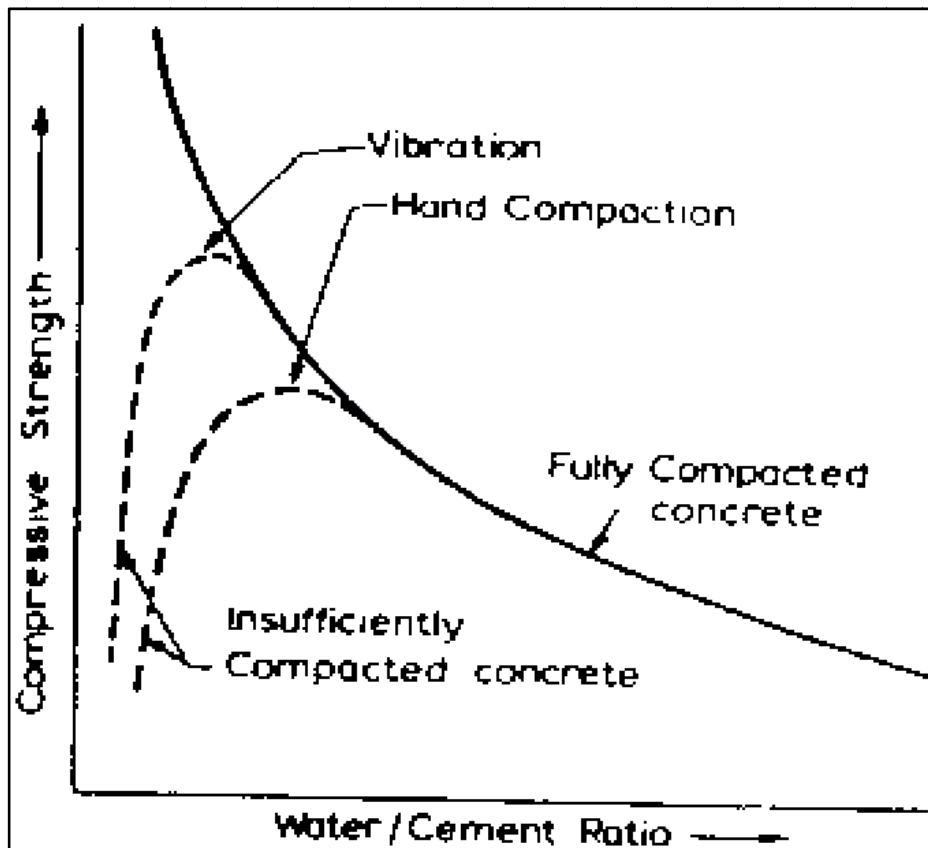


Toteutunut ilmamäärä lasketaan toteutuneen kerrospaksuuden ja suunnitellun kerrospaksuuden suhteella.

### **6.3 Teoreettinen puristuslujuus**

Opinnäytetyössä on päätetty myös testata teoreettisen tiedon loppulujuuden laskennasta soveltuvuutta maakostean betoniin. Teoreettista lujuutta tarkastellaan kolmen eri menetelmän avulla. Ensimmäisenä menetelmänä testataan Nykäsen nomogrammia, joka ei BLY-18-julkaisun mukaan sovellu maakostean betonin suhteutukseen. Vaikkei suhteutusta sillä ei pystytä tekemään, niin opinnäytetyössä on päätetty tutkia, pystyykö sen avulla arvioimaan maakostean betonin loppulujuutta. Toinen menetelmä on Francois de Larrardin muunnelma vuoden 1892 Rene Feretin kaavasta. Rene Feretin menetelmä on yli 100 vuotta vanha ja on ollut perustana monelle betonin lujuuden laskentateorioille. de Larrard on vuoden 1999 julkaisussa kertonut tavastaan muuttaa Feretin kaavaa nykypäivään sopivammaksi käytännön tutkimustulosten avulla. Kolmantena menetelmänä on opinnäytetyön tekijän toimesta muunneltu Feretin teoria, jossa on pyritty huomioimaan betonin alhaisesta vedenmäärästä johtuvan pienemmän hydratoitumisasteen.

Kaikissa käytetyissä menetelmissä on yksi, erittäin suuri ongelma: eivät ne ota tiivistystä huomioon. Vaikka laskennallinen lujuus olisikin riittävä, niin maakostean betonin tiivistys tehdään käsin eikä se ole aina tiivistetty tasaisesti tai riittävästi. Pienellä vesi-sementtisuhteella rakeet eivät liuku niin helposti tiiviiseen kasaan, vaan se aina vaatii mekaanista tiivistämistä. Riittämätön betonin tiivistys aiheuttaa lujuuden heikkenemistä ja se on aina laskennallista pienempi. Ero voi olla moninkertainen. Kuvassa 14 on esitetty hahmotelma tiivistyksen vaikutuksesta lujuuteen pienellä vesi-sementtisuhteella.

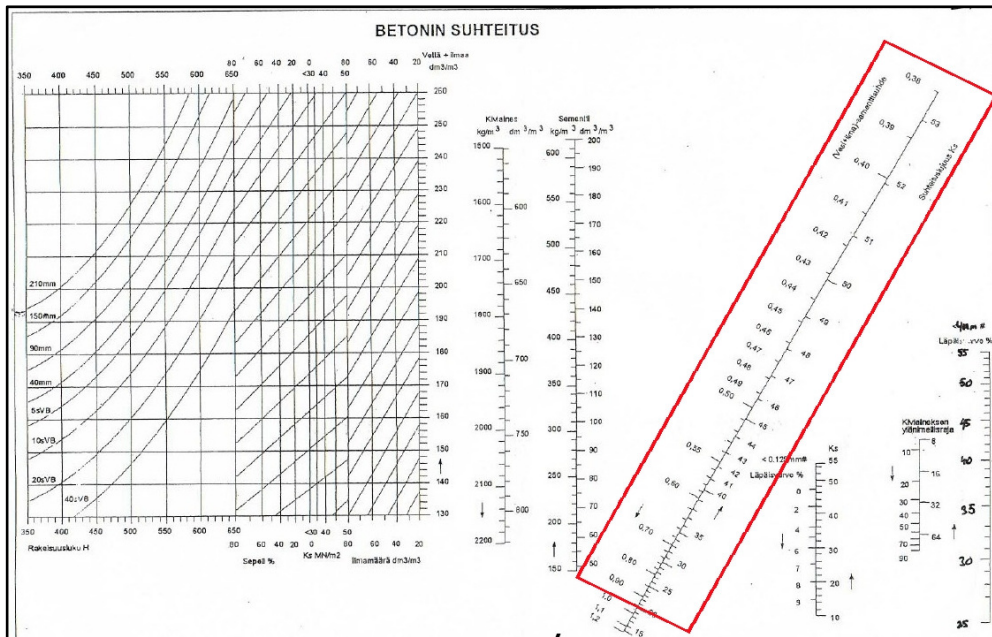


Kuva 14 Riittämätön betonin tiivistys pienellä vesi-sementtisuhteella (Asfar 2012)

Tietyn laskentatavan soveltuvuus pelkästään tiettyyn betoniin tai tietyissä olo-suhteissa osoittaa, ettei kaava tai laskentamenetelmä ota riittävästi muuttujia huomioon.

### 6.3.1 Nykäsen nomogrammi

Professori, DI Arvo Nykänen on Suomessa tunnettu myös suhteituksen isänä. Vuonna 1945 hän on saanut ensimmäisen version omasta suhteitusmenetelmästäan valmiiksi joka tunnetaan tänä päivänä "Nykäsen nomogrammi" nimeltään. Nykänen on uusinut menetelmänsä viimeisen kerran vuonna 1955 ja on siitä asti ollut muuttumaton. Nykyinen versio nomogrammista näkyy kuvassa 15.



Kuva 15 Nykäsen nomogrammi ja suhteituslujuus

Tässä opinnäytetyössä nomogrammista käytetään vain(vesi+ilma) - sementtisuhdetta ja sitä kautta saatavaa suhteituslujuutta Ks. Lujuudet lueteltu taulukossa 2.

Massa(nro)	Ilma(l/m <sup>3</sup> )	(V+I) Sem.Suhde	Lujuus. Nyk. Nom(Ks)
1	252,20	0,85	25
2	228,20	0,85	25
3	248,20	0,85	25
4	224,20	0,85	25
5	261,88	0,95	20,2
6	252,20	0,85	25
7	228,20	0,85	25
8	248,20	0,85	25
9	251,20	1,45	<15

Taulukko 2 Teorettinen lujuus Nykäsen nomogrammin mukaan

Suhteutuslujuus  $K_s$  muunnetaan nimellislujuudeksi käyttämällä kaavaa 1. Kaava on johdettu suhteutuslujuuden laskentakaavasta 2 (BY 201 2018, 170).

$$f_{ck} = \frac{K_s * N}{k_t * 42,5} \quad (1)$$

$$k_t * f_{ck} * \frac{42,5}{N} = K_s \quad (2)$$

, jossa

$k_t$  = tavoitelujuuskerroin. Yleensä 1.2

$f_{ck}$  = nimellislujuus

$N$  = 28 vrk:n sementin testauslujuus

$K_s$  = suhteutuslujuus.

### 6.3.2 Remi Feretin / de Larrardin kaava

Nykyisen kirjallisuuden mukaan, Remi Feret on ensimmäisenä vuoden 1892 julkaisussaan kertonut teoriansa veden ja sementin välisen suhteen vaikutuksesta betonin loppulujuuteen (Allbeton.ru 2008). Tutkimuksensa aikana hän on päätynyt kuuluisaksi tulleeseen kaavaan (kaava 3) (Aïtcin 2004, 91).

$$f'_c = k \left( \frac{c}{c + w + a} \right)^2 \quad (3)$$

, jossa

$c$  = sementin tilavuuden osuus  $1\text{m}^3$  määrästä

$w$  = veden tilavuuden osuus  $1\text{m}^3$  määrästä

$a$  = ilman tilavuuden osuus  $1\text{m}^3$  määrästä

$K$  = on sementistä ja lujuuden kehitykseen vaikuttavista aineista tuleva kerroin

Vaikka notkistin vaikuttaa lujuudenkehitykseen, on suurempi teoreettinen kaavan kehittäminen jätetty pois opinnäytetyön rajausten takia, joten  $K$  – kerroin tulee pelkästään käytetystä sementistä.

Francois de Larrard on omissa tutkimuksissaan käyttänyt Ranskan standardien mukaista CEM I 52,5 sementtiä jonka 28 vuorokauden lujuus on 64 MPa. Tutkimuksiensa aikana hän on suorittanut useamman puristuslujuuden määrittämisen tunnetuista massoista laboratorio-olosuhteissa. Niiden pohjalta hän on muokannut Feretin kaavaa ennustamaan tulevan betonin puristuslujuutta mahdollisimman pienellä hajonnalla juuri tätä sementtiä käyttäen. Tutkimusten tuloksena on syntynyt kaava 4. (de Larrard 1999, 139.)

$$f_{c_p} = 11.4 * R_{c_{28}} \left( \frac{v_c}{v_c + v_w + v_a} \right)^{2,85} \quad (4)$$

,jossa

$f_{c_p}$  = betonin puristuslujuus 28 vuorokauden kohdalla

$R_{c_{28}}$  = sementin 28 vuorokauden puristuslujuus.

Tämän opinnäytetyön tutkimuksia varten valetuissa massoissa on käytetty plussementtiä CEM II/B-M S-LL 42,5N (28 vuorokauden vähimmäislujuus 46 MPa). Koska mitään muuta tutkimustietoa K-kertoimen laskennasta ei ole saatavilla, käytetään puristuslujuuden ennustamiseen Feretin kaavan sijasta de Larrardin kaava johtuen tosi pienestä eroavaisuudesta sementin laaduissa. De Larrardin kaavan mukaan laskettu lujuus näkyy taulukossa 3.

Massa(nro)	Lujuus. Nyk. Nom(Ks)	de Larrard lujuus (MPa)
1	25	13,23
2	25	13,23
3	25	13,23
4	25	13,23
5	20,2	10,60
6	25	13,23
7	25	13,23
8	25	13,23
9	<15	4,06

Taulukko 3 Teoreettiset lujuudet Nykänen / de Larrard.

### 6.3.3 Hydratoitumisasteella muunneltu de Larrardin kaava

Sementin hydrataatioreaktiossa betoniin sitoutuu kemiallisesti vettä. Muu kuin kemiallisesti sitoutunut vesi on fysikaalisesti sitoutunutta vettä, joka haihtuu betonista ajan myötä. Kemiallisesti betoniin sitoutuvan veden maksimimäärä on noin 25 paino-%:a sementin massasta, jos sementin hydratoitumisaste on 1 tarkoittaa se, että sementti on hydratoitunut kokonaan. Käytännössä täydellisesti sementti ei hydratoi koskaan. (Lindberg & Wahlman & Suonketo & Paukku 2002, 5.) Hydratoitumisasteeseen vaikuttaa jälkihoitotapa. Ulkopuolisella vedellä ylläpidetään pidempää betonin vesi-sementtisuhdetta, jolloin hydrataatioreaktio tapahtuu täydellisimmin. Jälkihoitotapa otetaan huomioon kaavassa 6 kertoimella 1.2. Jos jälkihoitotapa olisi ilman ulkopuolista vettä, olisi kerroin 1.4 ja sitä kautta pienempi laskennallinen lujuus. Tässä opinnäytetyössä tutkittuja massoja on jälkihoidettu ulkopuolisella vedellä.

Hydratoitumisasteen laskentaa varten ensin lasketaan huokoisuus  $\theta$  kaavasta 5. Huokoisuuden avulla lasketaan suurin mahdollinen hydratoitumisaste kaavasta 6. (Hydrataatiotuotteiden tilavuusjakauma ja sementtikiven koostumus, 8.) Testimassoille lasketut huokoisuus ja hydrataatioaste ( $\alpha_{max}$ ) voidaan nähdä taulukossa 4.

$$\theta = \frac{\frac{w}{c}}{\frac{w}{c} + \frac{\rho w}{\rho c}} \quad (5)$$

, jossa

$w$  = vesi(kg)

$c$  = sementti(kg)

$\rho w$  = veden tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho c$  = sementin tiheys ( $\text{kg/m}^3$ ).

$$\alpha_{max} = \frac{\theta}{1,2 * (1 - \theta)} \leq 1 \quad (6)$$

Massa(nro)	Sementti(kg)	Vesi(l)	Notkistin(kg)	w/c	Huokoisuus $\theta$	Suurin hydrataatioaste ( $\alpha$ max)
1	20	4,4	0	0,22	0,41	0,57
2	20	5,6	0	0,28	0,46	0,72
3	20	4,4	0,2	0,22	0,42	0,59
4	20	5,6	0,2	0,28	0,47	0,75
5	18,5	4,4	0	0,24	0,42	0,61
6	20	4,4	0	0,22	0,41	0,57
7	20	5,6	0	0,28	0,46	0,72
8	20	4,4	0,2	0,22	0,42	0,59
9	12,5	5,6	0	0,45	0,58	1,00

Taulukko 4 Massojen huokoisuus ja suurin mahdollinen hydrataatioaste.

Taulukosta voidaan huomata, että ainoastaan yksi massa voi teoreettisesti saavuttaa hydrataatioasteen 1. Käytännössä kaavoissa ei oteta huomioon kantavan rakenteen vedenimua eikä haihtuvaa vettä. Betonissa oleva hydratoimaton sementti ei ole muodostanut sementtikiveä, koska sille ei riittänyt vettä kemialliseen reaktioon. Tällainen sementti betonissa ei lisää lujuutta, vaan käyttäytyy siellä melkein samalla tavalla kuin tavallinen filleri. Tämän teorian perusteella hydratoimattoman sementin ei pitäisi osallistua lujuuden laskentaan. Kolmesta esitetystä laskentamenetelmästä tämä on ainut, joka ottaa huomioon veden määrän. Nykäsen menetelmässä, Feretin kaavassa ja de Larrardin muunnellussa versiossa veden määrän ollessa nolla, ei teoreettinen lujuus muutu koska ilma korvaa veden tilavuuden laskennassa. Kaava 7 on muokattu ottamaan huomioon hydratoitumisasteen pienentämällä sillä kaavassa käytettyä sementin määrää.

$$f_{c_p} = 11.4 * Rc_{28} \left( \frac{\alpha_{max} * v_c}{\alpha_{max} * v_c + v_w + v_a} \right)^{2,85} \quad (7)$$

Puristuslujuusarviot muunnellulla de Larrardin kaavalla näkyvät taulukossa 5.

Massa(nro)	Lujuus. Nyk. Nom(Ks)	de Larrard lujuus (MPa)	Huokoisuus $\theta$	Suurin hydrataatioaste ( $\alpha$ max)	Muun. de Larrardin lujuus(MPa)
1	25	13,23	0,41	0,57	3,79
2	25	13,23	0,46	0,72	6,59
3	25	13,23	0,42	0,59	4,21
4	25	13,23	0,47	0,75	7,12
5	20,2	10,60	0,42	0,61	3,55
6	25	13,23	0,41	0,57	3,79
7	25	13,23	0,46	0,72	6,59
8	25	13,23	0,42	0,59	4,21
9	<15	4,06	0,58	1,00	4,06

Taulukko 5 Puristuslujuusarviot muunnellulla de Larrardin kaavalla

## 6.4 Asennusvaiheen massojen työstettävyyden arviointi

Asennusvaiheessa asentajalta on saatu kommentit massojen työstettävyydestä sekä asennusmenetelmään soveltuvuudesta. Asennustyötä ammatikseen suoritettavan henkilön mielestä veden määrän kasvu on vaikeuttanut massan työstettävyyttä. Notkistin on myös pahentanut asiaa tekemällä massasta jäykempää, jolloin sen levittäminen ja tasoittaminen olivat työläämpiä. Veden määrän kasvattaminen ja notkistimen käyttö ovat yhdessä tehneet massan melkein käyttökelvottomaksi, koska yläpinnan tasoittaminen on ollut melkein mahdotonta. Massassa käytettävällä fillerillä oli positiivinen vaikutus työstettävyyteen asentajan mielestä.

## 6.5 Näytteiden poraus

Näytteistä porattiin 25vrk kohdalla lieriöt SFS-EN 12504-1 (Testing concrete in structures. Part 1: Cored specimens. Taking, examining and testing in compression) standardia ja sen mukaisia ohjeita noudattaen.

Standardeissa otetaan kantaa nimellismittan  $d$  ja betonin kiviaineksen suurimman raekoon suhteeseen. Betonissa olevan runkoaineen maksimiraekoon ja porausnäytteiden halkaisijan välisellä suhteella on merkittävä vaikutus määritettyyn lujuuteen, kun suhde lähestyy suurempia kuin noin 1:3 olevia arvoja(SFS-EN 12504-1, 7). Jokaiselle koekappalemuodolle, kuutiolle, lieriölle ja prismalle, koekappaleen nimellismittan  $d$  tulee olla vähintään kolme ja puoli kertaa niin suuri kuin betonin kiviaineksen suurin raekoko ( $D_{max}$  standardin EN 206-1 mukaisesti)(SFS-EN 12390-1, 6). Pienin nimellismitta laskettiin tiukemman arvon mukaan, josta saatiin pienimmäksi poranäytteen halkaisijaksi 28 mm.

Jokainen näyte on merkittävä, jotta se voidaan sitten tunnistaa. Isommalla testausalueella standardin mukaan pitää myös merkitä näytteen sijainti muistiin(SFS-EN 12504-1, 7). Näytteisiin merkittiin kynällä laatikon numero, josta poraus on suoritettu sekä järjestysnumero 1–3.

Myös pituuden ja halkaisijan suhteeksi on suositeltu käytettäväksi 2.0 jos lujuutta verrataan lieriölujuuteen ja 1.0, jos lujuutta verrataan kuutiolujuuteen (SFS-



EN 12504-1, 8). Ilman keraamista laattaa paksuuden ollessa noin 60 mm päätettiin porata halkaisijaltaan 50 mm näytteet.

Valmiin rakenteen betonin puristuslujuuden arvioinnin tietyistä testausalueista tulee perustua vähintään kolmeen porakappaleeseen (SFS-EN 13791, 12). *Porrattujen koekappaleiden, joiden halkaisija on alle 100 mm ja  $l/d = 1$ , lujuuden vaihtelu on yleensä suurempaa. Tämän takia 50 mm poratuilla koekappaleilla saattaa olla tarkoituksenmukaista ottaa kolminkertainen lukumäärä koekappaleita verrattuna halkaisijaltaan 100 mm koekappaleisiin.* (SFS-EN 13791, 23.) Standardi on enemmän suunniteltu lujuusluokitellulle betonille, joissa suurin raekoko on moninkertainen verrattuna tarkasteltaviin massoihin. Testausalue on myös yleensä paljon  $1\text{m}^2$  isompi. Sen perusteella päätettiin olla noudattamatta suositusta ja pitää tarkoituksenmukaisena määränä kolmea testauskohtaa tarkasteltavana olevalta testausalueelta.

Näytteet porattiin Saimaan ammattikorkeakoulun käytössä olevalla timanttiporalla. Kuvassa 16 voidaan nähdä ensimmäinen näyte laatikosta 5, joka merkittiin numerolla 51.



Kuva 16 Näyte 5.1

## **6.6 Näytteiden ominaisuuksien määrittäminen ja valmistaminen testeihin**

Standardissa SFS-EN 12390-7 on annettu ohjeet tiheyden määrittämisestä poratusta kappaleesta, mutta näytteen vähimmäistilavuus on oltava 0,785 l, joka ei tässä tapauksessa toteudu. Näytteiden tiedoissa annetut tiheydet ovat arvioituja mittaamalla näytteen ulkomitat ja paino.

Hiomalla tasoitetuille koekappaleille on asetettu monta erilaista vaatimusta pintojen tasomaisuudesta, suorakulmaisuus- ja muista poikkeamista (SFS-EN 12390-1, 8). Esimerkiksi halkaisijaltaan 50 mm näytteellä suorakulmaisuuspoikkeama on enintään 0,007d mm tai 0,35 mm. Tämän opinnäytetyön poranäytteet on valmistettu puristuslujuustesteihin sahaamalla ja on pyritty noudattamaan mahdollisimman monta standardin vaatimuksista.

Puristuslujuuden ja tiivistyvyyden ollessa tutkimuksen tarkoituksena SFS-EN 12390-1 standardissa mainittuja tasoittamisvaihtoehtoja rikkilaastilla tai alumiinaattisementillä ei ole harkittu. Aluminaattisementti tai rikkilaasti voivat täyttää huonosti tiivistetyn pohjan tai yläpinnan huokokset ja sillä vääristää testituloksia. Näytteiden päät on tarvittaessa sahattu tasaiseksi. Standardien mukaan useampi näyte olisi pitänyt hylätä. Hylkäämisperusteet, esimerkiksi halkeamat ovat tavallisessa betonissa merkkejä siitä, että näyte tai näytteenottopaikka oli huono eikä kuvaa kyseistä rakennetta. Maakosteabetonin näytteen virheet taas voivat olla koko rakenteessa ja tässä opinnäytetyössä tietyt näytteet on päätetty käyttää, vaikka standardi tätä kieltää. Näytteen ollessa selvästi virheellinen, on porrattu sen tilalle uusi näyte.

## **6.7 Näytteet ja niiden puristuslujuudet**

Testaussuunnitelman tavoitteena oli porata jokaisesta laatikosta 3 poranäytettä. Jostain massoista näytteen poraaminen ei onnistunut. Massan lujuus ei ollut riittävä pitämään massan kasassa porausvaiheessa. Epäonnistuneet poranäytteet laatikosta 2 näkyvät kuvassa 17. Koska näytteet vastaavat tutkimustuloksissa esitettyjä näytteitä tilaajan aikaisemmista kohteista, pidettiin näytteen epäonnistumista normaalina.



Kuva 17 Epäonnistuneet poranäytteet. Laatikko 2. Näytteen yläpinta on merkitty punaisella viivalla.

Poraamisen jälkeen näytteet olivat huoneilmassa kuivumassa noin 84 tuntia, mikä on 12 tuntia standardin SFS-EN 13791 suositusta pidempää.

Kaikki poranäytteet on luetteloitu, kuvattu, mitattu ja punnittu. Mittojen, tilavuuden sekä näytteen painon perusteella on laskettu massan tiheys. Luettelo näytteiden ominaisuuksista ja puristuslujuuksista nähdään taulukossa 6. Taulukossa arvon kohdalla ollessa nolla, on sen ominaisuuden tutkiminen ollut mahdotonta tai näyte ei soveltunut siihen.

Laatikko		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Näytteiden määrä		3	3	4	4	3	3	3	3	3
Omnistuneet näytteet		0	3	3	4	3	3	1	1	3
Näyte 1	Halkaisija (mm)	0,0	50,0	50,0	51,0	50,0	50,0	50,0	0,0	50,0
	Pituus (mm)	0,0	47,0	46,0	42,0	49,0	37,0	38,0	0,0	46,0
	Paino (g)	0,0	141,0	201,0	189,0	208,0	148,0	128,0	0,0	179,0
Näyte 2	Lujuus (MPa)	0,0	2,6	22,9	16,5	20,3	11,0	3,7	0,0	10,8
	Halkaisija (mm)	0,0	50,0	50,0	51,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
	Pituus (mm)	0,0	51,0	48,0	40,0	39,0	36,0	41,0	45,0	44,0
Näyte 3	Paino (g)	0,0	174,0	206,0	165,0	166,0	149,0	125,0	164,0	176,0
	Lujuus (MPa)	0,0	3,7	17,2	13,0	23,0	14,0	0,0	8,0	15,0
	Halkaisija (mm)	0,0	50,0	50,0	51,0	50,0	50,0	50,0	0,0	50,0
Näyte 4	Pituus (mm)	0,0	53,0	48,0	40,0	40,0	40,0	42,0	0,0	41,0
	Paino (g)	0,0	189,0	197,0	172,0	189,0	169,0	105,0	0,0	150,0
	Lujuus (MPa)	0,0	6,7	21,7	21,4	15,0	13,6	0,0	0,0	10,2
Keskiarvo	Halkaisija (mm)				51					
	Pituus (mm)				43					
	Paino (g)				191					
Keskiarvo	Lujuus (MPa)				29,61					
	Halkaisija (mm)	0	50	50	51	50	50	50	50	50
	Pituus (mm)	0	50,3	47,3	41,3	42,7	37,7	38,0	45,0	43,7
Keskiarvo	Paino (g)	0	168,0	201,3	179,3	187,7	155,3	128,0	164,0	168,3
	Lujuus (MPa)	0	4,3	20,6	20,1	19,4	12,9	3,7	8,0	12,0
	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	0	1699,901273	2166,300521	2127,183609	2240,105824	2100,281868	1715,523	1856,100314	1963,315939

Taulukko 6 Näytteiden ominaisuudet ja puristuslujuudet

Puristuslujuuksien laskennassa ei ole huomioitu pituuden ja halkaisijan suhteen vaikutusta lujuteen. SFS-EN 13791 standardin mukaan puristuslujuus pienenee, kun pituuden ja halkaisijan suhde  $l/d > 1$ , ja kasvaa, kun  $l/d < 1$ .

## **6.8 Asennusmenetelmän vaikutus**

Vertailtaessa asennusmenetelmien vaikutusta betonimassan tiivistykseen on monta erilaista tapaa arvioida tietyn menetelmän paremmuutta tai huonoutta. Vaikka laskennallisesti massat olivat samoja, saattoi myllyyn jäänyt massa vaikuttaa tiheyteen, kerrospaksuuteen tai kosteuspitoisuuteen.

Ensimmäinen vertailuperuste oli tiheys. Tiheydellä katsottiin, tiivistyykö massa suomalaisella menetelmällä yhtä hyvin kuin saksalaisella, jos massa ja muut olosuhteet ovat samoja. Vertailtavat massat ovat taulukossa 7 ja ne on merkitty omilla väreillä. Valkoisella värillä merkityt massat eivät osallistu vertailuun.

	Massa(nro)	Laatikko(nro)	Hiekka(kg)	Sementti(kg)	Vesi(l)	Notkistin(kg)	Filleri(kg)	w/c	AT	Ilma(l/m <sup>3</sup> )
Suunnitelman mukaiset massat	1	2	69	20	4,4	0	0	0,220	F	252,20
	2	3	69	20	5,6	0	0	0,280	F	228,20
	3	4	69	20	4,4	0,2	0	0,230	F	248,20
	4	5	69	20	5,6	0,2	0	0,290	F	224,20
	5	8	55	18,5	4,4	0	14	0,238	S	261,88
	6	9	69	20	4,4	0	0	0,220	S	252,20
	7	10	69	20	5,6	0	0	0,280	S	228,20
	8	6	69	20	4,4	0,2	0	0,230	S	248,20
	9	7	72,3	12,5	5,6	0	0	0,448	S	251,20

Taulukko 7 Massat asennusmenetelmän vaikutuksen vertailuun

Asennusmenetelmän vaikutusta massan tiivistyvyyteen voidaan verrata myös kerrospaksuuden mukaan. Jos kerrospaksuus pienenee suhteutuksen ollessa sama, voidaan tehdä johtopäätös, että asennusmenetelmällä saadaan parempi massan tiivistys aikaiseksi.

Massan 1 poranäytteet epäonnistuivat. Vertailu suoritetaan kerrospaksuutta hyödyntäen. Laskennallinen kerrospaksuus on ollut 50 mm ja tiheys sillä kerrospaksuudella ilman sitoutunutta vettä oli  $1780 \text{ kg/m}^3$ . Kerrospaksuus on varmistettu laatikon 2 epäonnistuneista näytteenporauspaikoista (kuva 18).

Sementtiliiman ympäröidessä runkoainesta ovat niiden kosketuspinta-alat suoraan vaikuttamassa massan puristuslujuuteen. Massan tiivistyessä vähenee runkoaineksen välinen etäisyys ja massan ilmamäärä. Etäisyyden ja ilmamäärän ollessa pienempi, massan runkoaineksen partikkelit liimautuvat sementtiliiman ansiosta toisiinsa paremmin ja lujuus kasvaa.

Arvioidessa asennusmenetelmän etua on asia tarkasteltava tilannetta useammasta näkökulmasta ja muut, mahdollisesti lopputulokseen vaikuttavat asiat on suljettava pois. Kootusti vertailtavat tiedot massojen ominaisuuksista ovat taulukossa 8.

Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Vertailu 1	Vertailu 2	Vertailu 3
Suomalainen	1780	1699,9	2166,3
Saksalainen	1856,1	1963,3	2240,1
Ero %	4,1	13,4	3,3
<b>Kerrospaksuus (mm)</b>			
Suomalainen	50,0	50,3	47,3
Saksalainen	45,0	43,7	42,7
Ero %	-11,1	-15,3	-10,9
<b>Puristuslujuus (MPa)</b>			
Suomalainen	0	4,3	20,6
Saksalainen	8,0	12,0	19,4
Ero %	100	64,0	-6,1

Taulukko 8 Vertailumassojen ominaisuudet

Taulukosta 8 nähdään, että kaikilla massoilla tiheys on kasvanut käyttäessä saksalaista asennusmenetelmää. Vertailumassan 2 poikkeuksellisen suuri tiheysero saattaa johtua vain pienestä näytteiden määrästä. Näytteiden määrän kasvattaminen kolminkertaiseksi olisi tasoittanut vaihtelua, joka johtuu näytteenotto paikan valinnasta. Isompi vesi-sementtisuhte ja notkistin kasvattavat betonin omaa viskositeettia ja sitä myöten asennustavan vaikutus tiivistyvyyteen ja sitä kautta puristuslujuuteen pienenee. Vesi-sementtisuhteen ja notkistimen vaikutus huomataan vertailumassojen 1 ja 3 vertailussa.

## 6.9 Vesi-sementtisuhteen vaikutus

BLY-18-julkaisussa oleva esimerkkisuhteutus on esitetty kuvassa 5. Julkaisun suhteutusta on muutettu vastaamaan massan 5 ilmamäärää ja lopullinen suhteutus on esitetty taulukossa 9. Julkaisun käyttämän fillerin ja hiekan tiheydeksi on laskennallisesti saatu 2679,7 kg/m<sup>3</sup>. Seosaineet on vähennetty suhteessa alkuperäiseen jakaumaan.



Massa(nro)	Laatikko(nro)	Hiekka(kg)	Sementti(kg)	Vesi(l)	Filleri(kg)	w/c	MPa
5	8	55	18,5	4,4	14	0,24	3,7
9	7	72,3	12,5	5,6	0	0,45	12,9
vertailu	BLY-18	62,07	12,92	4,43	11,81	0,34	-

Taulukko 9 BLY-18 vertailumassa isommalla ilmamäärällä

Taulukosta 9 nähdään selvästi, että vesi-sementtisuhteella maakosteassa betonissa on paljon suurempi vaikutus kuin sementin määrällä. BLY-18 mukaan kovettuneen maakostean betonin tiheys jää yleensä tasolle 1500–1700 kg/m<sup>3</sup>. Opinnäytetyön tutkimukset taas osoittavat, että hyväksyttävän lujuuden suomalaisella menetelmällä (laatikot 2–5) opinnäytetyön tilaajan käyttämiin kohtiin saadaan vasta yli 1700 kg/m<sup>3</sup> massoilla. Näytteistä saadut laskennalliset tiheydet ja ilmamäärät näkyvät taulukossa 10.

	<b>Laatikko</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
	Näytteiden määrä	3	3	4	4	3	3	3	3	3
	Onnistuneet näytteet	0	3	3	4	3	3	1	1	3
<b>Keskiarvo</b>	Halkaisija (mm)	0	50	50	51	50	50	50	50	50
	Pituus (mm)	0	50,3	47,3	41,3	42,7	37,7	38,0	45,0	43,7
	Paino (g)	0	168,0	201,3	179,3	187,7	155,3	128,0	164,0	168,3
	Lujuus (MPa)	0	4,3	20,6	20,1	29,1	12,9	3,7	8,0	12,0
	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	1780	1699,9	2166,3	2127,2	2240,1	2100,3	1715,5	1856,1	1963,3
Laskennallinen	Ilmamäärä %	0,26	0,29	0,10	0,11	0,07	0,12	0,29	0,23	0,18

Taulukko 10 Laskennalliset ilmamäärät massoissa

Tutkimukset osoittavat myös, että tilaajan käyttämä  $400 \text{ kg/m}^3$  sementtiä on liian suuri määrä käytettävällä  $0,22$  vesi-sementtisuhteella. Sementti ei saa riittävästi vettä saavuttaakseen täydellisen hydrataatioreaktion ja hydrataatioaste koko massassa on alhainen. Alhainen hydrataatioaste aiheuttaa riittämättömän lujuuden poranäytteiden ottamiseen ja hienoaines peseytyy poran jäähdytysveden kanssa pinnalle. Karkearakeinen aines jää poranäyttereikään. Kuvassa 18 nähdään epäonnistunut poranäyttereikä laatikossa 2 ja sen ympärillä oleva peseytynyt hienoaines. Vesi-sementtisuhteen kasvattaminen myös parantaa massan tiivistyvyyttä, mikä nähdään vertailemalla laatikon 9 ja 10 massoja.



Kuva 18 Epäonnistunut näytteenotto laatikosta 2

### **6.10 Lisäaineiden käyttö maakosteassa betonissa**

Erilaiset lisäaineet voivat vaikuttaa maakostean betonin tiivistykseen ja puristuslujuuteen. Opinnäytetyössä on tutkittu, minkälaisia vaikutuksia notkistimella on maakosteaan betoniin. Koeasennuksista kolme on tehty notkistetuilla massoilla. Notkistettujen massojen poranäytteiden ominaisuudet on lueteltu taulukossa 11.

Notkistetut massat ovat näyttäneet vähintään 35,8 % puristuslujuuden kasvua verrattuna notkistamattomaan massaan (verrattu laatikkoja 5 ja 7). Laatikoissa 6 ja 9 on muuten sama massa, paitsi että laatikon 6 massassa käytettiin notkistinta. Puristuslujuuden kasvu on ollut 58,8 %. Laatikon 9 kolmesta näytteestä kaksi ovat epäonnistuneet ja laatikon 6 kaikki kolme näytettä olivat hyvät.

Laatikko		4	5	6
Näytteiden määrä		4	4	3
Onnistuneet näytteet		3	4	3
Näyte 1	Halkaisija (mm)	50,0	51,0	50,0
	Pituus (mm)	46,0	42,0	49,0
	Paino (g)	201,0	189,0	208,0
	Lujuus (MPa)	22,9	16,5	20,3
Näyte 2	Halkaisija (mm)	50,0	51,0	50,0
	Pituus (mm)	48,0	40,0	39,0
	Paino (g)	206,0	165,0	166,0
	Lujuus (MPa)	17,2	13,0	23,0
Näyte 3	Halkaisija (mm)	50,0	51,0	50,0
	Pituus (mm)	48,0	40,0	40,0
	Paino (g)	197,0	172,0	189,0
	Lujuus (MPa)	21,7	21,4	15,0
Näyte 4	Halkaisija (mm)		51	
	Pituus (mm)		43	
	Paino (g)		191	
	Lujuus (MPa)		29,61	
Keskiarvo	Halkaisija (mm)	50	51	50
	Pituus (mm)	47,3	41,3	42,7
	Paino (g)	201,3	179,3	187,7
	Lujuus (MPa)	20,6	20,1	19,4
	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2166,3	2127,2	2240,1
Laskennallinen	Ilmamäärä %	0,10	0,11	0,07

Taulukko 11 Notkistettujen massojen näytteet

### 6.11 Teoreettinen ja toteutunut lujuus

Erilaisten betonin lujuuslaskenta menetelmien soveltuvuutta on arvioitu tässä opinnäytetyössä sivutyönä. Vertailussa on Nykäsen nomogrammi, de Larrardin kaava sekä hydratoitumisasteella muunneltu de Larrardin kaava.

Porattujen näytteiden tiheyden perusteella on laskettu uudet runko- ja sideaine suhteet. Uusilla suhteilla laskettiin teoreettinen lujuus kolmella menetelmällä. Teoreettiset lujuudet on esitetty taulukossa 12. Taulukosta on poistettu sellaiset

näytteet, jolle ei ole mitattua puristuslujuutta. Myös selvästi virheelliset arvot on poistettu.

Näyte	Lujuus. Nyk. Mon.	Nykänen. Fck (MPa)	de Larrard (MPa)	Muunn. de Larrard (MPa)	MPa Tod.	Nyk. Ero	de Larrard. Ero	Muunn.de Larrard Ero
3,1	13,0	11,7	5,6	2,6	2,6	0,78	0,54	0,01
3,2	22,5	20,3	11,5	5,6	3,67	0,82	0,68	0,35
3,3	27,5	24,8	15,0	7,5	6,68	0,73	0,55	0,11
4,1	52,0	46,9	64,6	27,1	22,94	0,51	0,64	0,15
4,2	52,0	46,9	55,6	22,6	17,15	0,63	0,69	0,24
4,3	45,5	41,0	39,1	14,7	21,65	0,47	0,45	0,47
5,1	52,0	46,9	59,3	37,1	16,49	0,65	0,72	0,56
5,2	39,0	35,2	30,3	17,6	13,04	0,63	0,57	0,26
5,3	45,5	41,0	41,3	24,7	21,36	0,48	0,48	0,13
5,4	52,0	46,9	53,3	32,9	29,61	0,37	0,44	0,10
6,1	52,0	46,9	50,9	20,2	20,27	0,57	0,60	0,00
6,2	52,0	46,9	52,0	20,8	22,95	0,51	0,56	0,10
7,1	27,5	24,8	15,7	15,7	10,95	0,56	0,30	0,30
7,2	33,0	29,8	21,2	21,2	14,04	0,53	0,34	0,34
7,3	39,0	35,2	25,8	25,8	13,6	0,61	0,47	0,47
8,1	19,0	17,1	9,4	3,1	3,68	0,79	0,61	0,18
9,2	33,0	29,8	17,2	5,1	8	0,73	0,53	0,57
10,1	39,0	35,2	26,6	14,1	10,76	0,69	0,60	0,24
10,2	45,5	41,0	32,3	17,6	15,02	0,63	0,54	0,15
10,3	33,0	29,8	17,6	9,0	10,2	0,66	0,42	0,14
<b>Keskiarvo</b>						<b>0,62</b>	<b>0,54</b>	<b>0,24</b>

#### Taulukko 12 Teoreettiset puristuslujuudet

Taulukosta nähdään, että Nykäsen menetelmän mukaisen teoreettisen puristuslujuuden ero todelliseen oli keskimäärin 62 %. de Larrardin kaavalla saadut arvot olivat keskimäärin 54 % todellisia korkeammat. Hydrataatioasteen huomioon ottava kaava on ainut, joka on joskus antanut todellista alhaisemman puristuslujuuden. Negatiiviset arvot on taulukossa muutettu positiiviseksi oikean keskiarvon laskentaa varten. Vaikka sen tarkkuus on yli puolet parempi olemassa olevia menetelmiä, vaatii paremman laskentakaavan tekeminen monen muun parametrien lisäämistä.

Arvioidessa kaavojen soveltuvuutta ja osion 6.11 luotettavuutta on otettava huomioon, että ainoat muutetut arvot ovat Nykäsen suhteutuslujuuden muuttaminen nimellislujuudeksi. Kaikissa muissa arvoissa ei ole tehty muutoksia johdettujen suuresta työmäärästä aiheesta, joka ei ole sisällytetty opinnäytetyössä tutkittaviin aiheisiin.

## 7 Yhteenveto ja päätelmät

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia asennusmenetelmän vaikutusta maakostean betonin tiivistykseen ja puristuskestävyyteen. Tutkimukset tehtiin useammalla koeasennuksella käyttäen samoja massoja mutta erilaista asennusmenetelmää. Asennusmenetelmiksi valittiin perinteinen saksalainen menetelmä sekä suomalainen asennusmenetelmä.

Ennen massojen suhteutusta on tutustuttu olemassa oleviin julkaisuihin ja tutkimuksiin. Asiaan tutustuesssa on todettu, että käytännön tutkimuksia maakosteasta betonista ei löydy. Löytynyt teoreettinen tieto on aika suppeata ja usein kyseenalaista tai ristiriitaista. Esimerkiksi BLY-18 julkaisussa annettu esimerkiksiuhteutus on ristiriidassa julkaisussa oleviin ohjeisiin ja julkaisussa olevaan tietoon. Maakostean betonin ollessa standardin mukaan koostumuksenmukainen betoni, ei se vaadi kuin kokemuseräistä suhteutusta. Standardissa ei oteta kantaa mihinkään, ei edes vähimmäismentin määrään, joten massat on suhteutettu osittain tilaajan ohjeilla osittain opinnäytetyön tekijän teoreettisen tiedon perusteella.

Nykypäivänä maakosteata betonia saa valmisbetoniasemilta, mutta edes opinnäytetyön tilaajan tiedossa ei ollut tarkkaa suhteutusta käyttämistään massoista, mikä omalta osaltaan on vaikeuttanut tutkimuksia. Maakostean betonin massoille ei tehdä Suomessa lujuuskoekappaleita. Tästä voidaan päätellä, että tilatessa massaa valmisbetoniasemalta ovat sen omat laadunvarmistusmenetelmät tärkeässä roolissa, koska mitään helppoa testiä ei voida tehdä työmaalla vastaanottaessa maakostean betonin kuormaa. Tosin valmisbetoniasemienkin laadunvarmistus on vain osa-aineiden punnitusta, koska standardien mukaan se on vaan koostumuksenmukainen betoni. Omaan, sisäiseen valvontaan yritykset voisivat kehittää omia menetelmiä, jotka perustelisivat käytössä olevaan asennusmenetelmään. Vaikka on erittäin positiivinen asia, että maakosteata betonia tarjotaan tänä päivänä valmisbetoniasemilla, tuo se mukanaan uusia haasteita. Pitkät kuljetusmatkat voivat johtaa siihen, että massan sementti on hydratoinut matkan aikana, eikä työmaalla asiaa välttämättä huomata. Porattaessa näytteitä maakosteasta betonista on huomattu, että jo hydratoinut märkä maakosteabtoni saatetaan sekoittaa tuoreeseen massaan. Pitkät asennusajat myös omalta

osaltaan heikentävät tulevan rakenteen lujuutta samasta syystä. Ongelman voisi varmaankin korjata hidastimella, mutta senkään käytöstä ei ole tutkimustietoa. Rakennusteollisuuden selvityksessä on todettu, että ammattiosaaminen on häviämässä rakennustyömailta (Mäkikyrö 2017, 10–15). Vaikka tutkimus on koskenut tavallista betonia, niin maakostean betonin olleen kyseessä on asia vielä huonompi. Osittain siihen on vaikuttamassa normaalin betonin saatavuus valmisbetoniasemilta. Riittää vaan, että ilmoitetaan käyttötarkoitus ja saadaan oikeata massaa eikä osaamista työmaalla enää tarvita. Suomessa todennäköisin syy ongelmiin lienee johtuvan juuri siitä, että maakostea betoni on hankalampaa sovittaa tarpeeseen. Johtuen suuresta ilmamäärästä, vaihtelevasta vesi-sementtisuhteesta, erilaisesta runkoaineksesta (rakeisuuskäyrät), hieman erilaisista valutavoista ja ympäristöolosuhteista lopputulos voi olla ihan erilainen pienilläkin muutoksilla. Tavallisen, lujuusluokitellun betonin valutilanteessa tekijän ammattiosaaminen on vaikuttamassa paljon pienemmässä määrässä, koska valu, tiivistys ja jälkihoito-ohjeita on kirjoitettu paljon ja koko prosessi tunnetaan aika hyvin. Esimerkiksi paksuuden korottaminen 50 mm -> 100 mm ei tavallisessa betonissa aiheuta ongelmia, mutta maakostean betonin paksuutta ei voida noin vaan tuplata, vaan on varmistettava riittävä tiivistys.

Opinnäytetyön tutkimuksia varten tehtiin yhteensä yhdeksän koeasennusta yhden neliömetrin laatikoihin Saimaan ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Vertailumassoista tehtiin aina kaksi asennusta eri asennusmenetelmällä mutta samalla massalla, jolloin asennusmenetelmä jää määrääväksi rakenteen kuormituskestävyyttä arvioitaessa. Tällaisia asennuksia on tehty yhteensä 6. Samassa yhteydessä on tutkittu massojen erilaisten ominaisuuksien vaikutusta tiivistykseen. Sitä varten on tehty 3 asennusta lisää.

Massoja valmistessa on myös todettu, että perinteiset menetelmät betonin ominaisuuksien muuttamiseen eivät välttämättä täysin sovi maakostealle betonille. Suhteutukset on hoidettava kokeilemalla työmaahenkilöstön kanssa yhteistyössä, mikä vaatii kyseisten henkilöiden suhteutuksen perusosaamisen. Työnjohdonkin on osattava ottaa kantaa suhteutukseen ja kyettävä valvoa riittävästi tiivistystä, hyvää jälkihoitoa sekä massan käyttöä tietyssä ajassa saapumisesta työmaalle. Mutta lopullisen suhteutuksen yhteistyössä saadun tiedon poh-

jalla on tehtävä betoniin erikoistuneen suunnittelijan tai laborantin korkeamman teoreettisen osaamisen pohjalla.

Massoista porattiin 25 vuorokauden kohdalla poranäytteet, jotka puristettiin Saimaan ammattikorkeakoulun laboratoriossa neljän päivän kuluttua. Näytteistä arvioitiin puristuslujuus, tiheys ja kerrospaksuus (pituus). Tuloksia arvioidessa on todettu, että maakostean betonin vesi-sementtisuhteen on oltava juuri tilaajan käyttämällä asennustavalla vähintään 0,3, koska 0,22 ei ollut vielä riittävä ja 0,28 saatiin vielä heikkoja puristuslujuuden arvoja. Vähentämällä yhdessä massassa sementin määrää yli 30 % mutta pitämällä veden määrää samalla tasolla on saatu paremmat puristuslujuustulokset (vrt. laatikko 7 ja laatikko 10). Suuresta määrästä hydratoitumattomia sementtipartikkeleita suhteutettuna sideaineen määrään on maininta myös opinnäytetyötä varten tilatuista tutkimuksista.

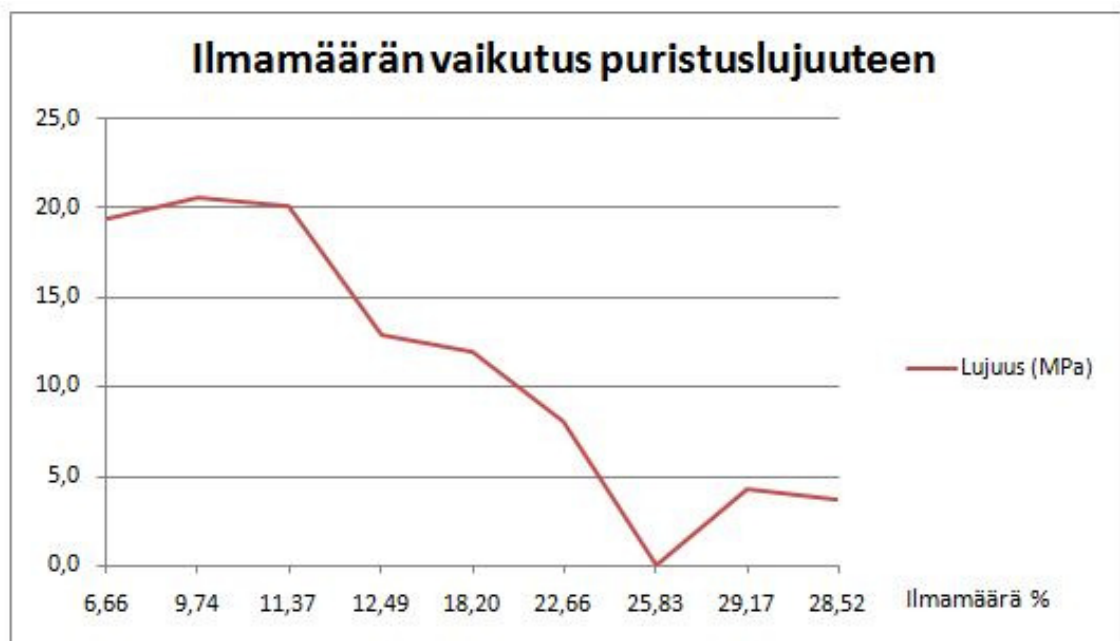
Kerrospaksuus on ollut keskimäärin 12,4 % pienempi saksalaisella asennusmenetelmällä, joka viittaa joko suomalaisen asennusmenetelmän negatiiviseen vaikutuksen tiivistykseen tai ettei menetelmän tiivistämisohjeita noudateta. Massan laskennallinen tiheys on kasvanut noin 6,3 %, mutta johtuen epätarkkuudesta tiheyttä laskiessa arvoja ei voida pitää luotettavina. Puristuslujuudessa on ollut paljon suurempaa vaihtelua vertailumassojen välillä, joka pienei, jos käytössä oli isompi vesi-sementtisuhte tai notkistin. Tutkimusten perusteella todettiin, että suomalaisella menetelmällä saadaan hyvä rakenne käyttämällä 250 kg/m<sup>3</sup> sementtiä 0,3 tai korkeammalla vesi-sementtisuhteella. Siitä seurauksena sementti reagoi täydellisimmin massassa ja lujuus kasvaa. Teoreettisesti massan pitäisi kuivua yhtä nopeasti, koska enemmän vettä sitoutuu betonissa kemiallisen hydrataatioreaktion seurauksena, mutta tässä opinnäytetyössä ei ole asiaa tutkittu.

Lattiarakenteiden teko maakostealla betonilla vaatii myös päteviä tekijöitä sekä riittävää valvontaa. Jotakin BLY-18-julkaisussa esitettyä teoriaa tukevat aikaisemmassa vaiheessa tutkitut asiat, kuten kuvassa 4 tiivistetty hiekka. Tavoitepaksuuden ollessa 50 mm noin 10 mm tiivistämisvara aiheuttaa 20 % maakostean betonin tilavuuspainon kasvun. Löyhän hiekan irtotilavuuspainon ollessa 1379 kg/m<sup>3</sup> 20 % tiivistys kasvattaa tilavuuspainoa noin 275 kg. Sillä hiekka saavuttaa melkein saman tilavuuspainon kuin täryttämällä tiivistetty hiekka. Mut-



ta jos tiivistämistä ei seurata työmailla, partikkelit eivät saa riittävästi kosketuspintaa toistensa kanssa ja niiden välietäisyydet ovat pitkiä. Tästä seuraa, että runkoainesten välille ei synny yhtenäistä rakennetta. Toisaalta samassa julkaisussa on esimerkkisuhteutus, jolla on aika vaikeata saavuttaa julkaisussa kuvattulla menetelmällä massan tiivistys 1000 litraan. Epäselväksi jää, miksi julkaisun maakostean betonin esimerkkisuhteutus on tehty 2 % ilmaa, vaikka massan muuttaminen esimerkiksi 10 % ilmaa sisältäväksi massaksi olisi ollut erittäin helppo. Samalla helpottuisi massojen vertailu.

Luvussa 5 mainittu heikko näyte on tiheydeltään ( $n.1886 \text{ kg/m}^3$ ) muita näytteitä kevyempi ( $1930\text{--}2100 \text{ kg/m}^3$ ). Omissa testeissäni olen päätenyt tulokseen, että hyvän (3 näytettä, josta jokainen vähintään 10 MPa) massan tiheys oltava vähintään noin  $1930 \text{ kg/m}^3$ . Suhteuttaessa maakostean betonin massaa on otettava huomioon ilman vaikutus massan kestävyteen. Kaaviossa 4 on esitetty kaikkien näytteiden puristuslujuudet ja niitä vastaavat ilmamäärät. Sen perusteella suhteutuksessa käytettävän ilmamäärän ei tule ylittää 20 %, jos vaatimukseksi asetetaan noin 10 MPa:n puristuslujuus. Työmaalla on valvottava myös riittävä tiivistys tavoiteilmamäärän saavuttamiseksi esimerkiksi menekillä tai muulla luotettavalla tavalla.



Kaavio 4 Ilmamäärän vaikutus puristuslujuuteen

Arvioitaessa menetelmien paremmuutta voidaan todeta, että alkuperäinen, saksalainen asennusmenetelmä vie enemmän aikaa kuin Suomessa kehitetty, mutta lopputulos on parempi. Saksalaisessa menetelmässä ei tarvita vaikeita laadunvarmistusmenetelmiä. Suomalaisessa menetelmässä on pyritty vähentämään kalliin työvoiman työtunteja, mutta samalla on menetetty osittain tasalaa-tuisuutta, aiheuttaen jossain kohteessa riittämättömän lujuuden kuormien kan-tamiseksi. Myös massojen riittävää vedenmäärää sementin hydrataatioreakti-oon on tarkasteltava valmiista rakenteesta taikka laboratorio-olosuhteissa ra-kentamalla lopullisia rakenteita vastaava ympäristö, jossa imitoidaan nopeam-paa massan kuivumista.

Tutkimukset on tehty mahdollisimman suurella tarkkuudella, jonka tämän opin-näytetyön tavoitteen saavuttaminen on vaatinut. Esimerkiksi tiheyden määrittä-mys ei ole suoritettu standardin mukaan, vaan mittaamalla ulkomitat. Näin pienessä näytteessä pienetkin virheet voivat aiheuttaa suuren heiton lopputuloksessa. Tarkempi mittausmenetelmä olisi vaatinut uudet poranäytteet.

Käytännön tutkimuksista tämä on todennäköisesti ensimmäinen laatuaan ja seuraavat tutkimukset voidaan toteuttaa jo tämän opinnäytetyön perusteella. Vaikka testiasennuksista saatiin erittäin paljon tietoa maakostean betonin käyt-täytymisestä, oli testauksen suorittaminen vaativaa. Tulevia testejä varten on suunniteltava testimenetelmä, jossa käytetään vähemmän aikaa testin valmis-tamiseen ja enemmän tutkimiseen. Tämän opinnäytetyön pohjalla tilaaja pystyy parantamaan käytössään olevan massan ja suunnittelemaan tulevia tutkimuk-sia. Ulkopuoliselle lukijalle tämä on hyvä lähtökohta suunniteltaessa maakoste-aa betonia omiin käyttötarkoituksiin.

## Kuvat

- Kuva 1 Luonnos tilaajan käyttämästä rakenteesta, s. 7  
Kuva 2 Pinnan ero massalla ilman filleriä ja fillerin kanssa, s. 8  
Kuva 3 Tiivistämätön betoni (Kemppainen, 24), s. 9  
Kuva 4 Tiivistämätön ja tiivistetty hiekka, s. 10  
Kuva 5 BLY-18 Esimerkkisuhteutus (BLY-18 2016, 29), s. 13  
Kuva 6 Vaatimukset ympäristölle asentaessa maakostealle betonille, s. 15  
Kuva 7 Epätäydellinen hydrataatio (Kemppainen, 29), s. 16  
Kuva 8 Linjarilla tasoitetaan maakostean betonin pinta, s. 17  
Kuva 9 Rullajyrän käyttö, s. 18  
Kuva 10 BLY-18 - julkaisussa käsiteltävä rakenne(BLY-18 2016, 5), s. 18  
Kuva 11 Keraamisten laattojen asennus vesi-sementti liuokselle, s. 19  
Kuva 12 Testiasennuslaatikon rakenne, s. 21  
Kuva 13 Laatikko testimassoja varten, s. 23  
Kuva 14 Riittämätön betonin tiivistys pienellä vesi-sementtisuhteella (Asfar 2012), s. 26  
Kuva 15 Nykäsen nomogrammi ja suhteituslujuus, s. 27  
Kuva 16 Näyte 5.1, s. 33  
Kuva 17 Epäonnistuneet poranäytteet. Laatikko 2. Näytteen yläpinta on merkitty punaisella viivalla, s. 35  
Kuva 18 Epäonnistunut näytteenotto laatikosta 2, s. 43

## **Taulukot ja kaaviot**

Taulukko 1 Testimassojen suhteutukset, s. 24

Taulukko 2 Teoreettinen lujuus Nykäsen nomogrammin mukaan, s. 27

Taulukko 3 Teoreettiset lujuudet Nykänen / de Larrard, s. 29

Taulukko 4 Massojen huokoisuus ja suurin mahdollinen hydrataatioaste, s. 31

Taulukko 5 Puristuslujuusarviot muunnellulla de Larrardin kaavalla, s. 31

Taulukko 6 Näytteiden ominaisuudet ja puristuslujuudet, s. 36

Taulukko 7 Massat asennusmenetelmän vaikutuksen vertailuun, s. 38

Taulukko 8 Vertailumassojen ominaisuudet, s. 39

Taulukko 9 BLY-18 vertailumassa isommalla ilmamäärällä, s. 40

Taulukko 10 Laskennalliset ilmamäärät massoissa, s. 41

Taulukko 11 Notkistettujen massojen näytteet, s. 44

Taulukko 12 Teoreettiset puristuslujuudet, s. 45

Kaavio 1 BLY-18 Maakostean betonin ohjekäyrät (BLY-18 2016, 29), s. 13

Kaavio 2 BLY-18 ohjekäyrät sekä tilaajan ja KKL Jurvasen 0-8 mm hiekan ra-  
keisuuskäyrät, s. 14

Kaavio 3 Vertailukäyrät, s. 24

Kaavio 4 Ilmamäärän vaikutus puristuslujuuteen, s. 49

## Lähteet

Aïtcin P.-C. 2004. High Performance Concrete. London: E & FN Spon.

Allbeton.ru 2008. Pravilo V/C – osnovnaja zavisimost', opredelyajushaya svoistva betona. [V/S sääntö — tärkein suhde betonin ominaisuuksia määrittessä] Alkuperäisjulkaisu: Правило В/Ц — основная зависимость, определяющая свойства. <https://allbeton.ru/article/357.html>. Luettu 21.04.2019

Asfar J. 2012. Water to cement ratio.

<http://www.engineeringintro.com/concrete/concrete-strength/water-to-cement-ratio/>

BLY-18. 2016. Maakostean betonin käyttö mosaiikkibetonilattioissa. Suomen betonilattiyhdistys Ry. <http://www.bly.fi/File/BLY-18.pdf?878036>. Luettu 2.2.2019.

BY 201. 2018. Betonitekniikan oppikirja. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

de Larrard F. 1999. Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach. London: E & FN Spon. 137-142.

Hydrataatiotuotteiden tilavuusjakauma ja sementtikiven koostumus. Aalto yliopisto.

[https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/130833/mod\\_label/intro/Bet2%20harj4.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/130833/mod_label/intro/Bet2%20harj4.pdf) Luettu 4.3.2019

Kapiainen T. 2013. Suoritustasoilmoitus. <https://www.kkljurvanen.fi/wp-content/uploads/2019/02/CE-merkki-ja-Dop-Hiekka-0-8.pdf>

Kemppainen J. Miten toimitaan oikein betonin kanssa?

<https://docplayer.fi/68324130-Miten-toimitaan-oikein-betonin-kanssa-rakentamisen-ajankohtaiskiirtue-asiamies-jani-kemppainen.html>

Lindberg, R, Wahlman, J, Suonketo, J & Paukku, E. 2003. Kosteusvirratutkimus. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka, Julkaisu, Vuosikerta. 119, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikka.

Mäkikyrö T. 2017. Betonirakentamisen laatuketju kuntoon, taustalla vuoden 2016 lujjuuskadot. <http://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/laatu/2017-betoniselvitys/betoniselvitys-loppuraportti-tapani-makikyro-14-11-2017-liitteet2.pdf>. Luettu 20.04.2019

Pyörny J. 2018. Betonin ominaisuudet betonirakenteen valmistusketjun eri vaiheissa.

[https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/35561/master\\_Py%C3%B6rny\\_Juho\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/35561/master_Py%C3%B6rny_Juho_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Luettu 19.04.2019

Rakentajain kalenteri. 2012. Betonointi kylmissä olosuhteissa.

<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK120603.pdf>. Luettu 6.04.2019

SFS-EN 12504-1. 2009. Testing concrete in structures. Part 1: Cored specimens. Taking, examining and testing in compression. Suomen Standardoimisliitto SFS. Standardi.

SFS-EN 13318. 2000. Screed material and floor screeds. Definitions . Suomen Standardoimisliitto SFS. Standardi.

SFS-EN 206:2014 + A1:2016. Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus. Suomen Standardoimisliitto SFS. Standardi.

# Liite 1

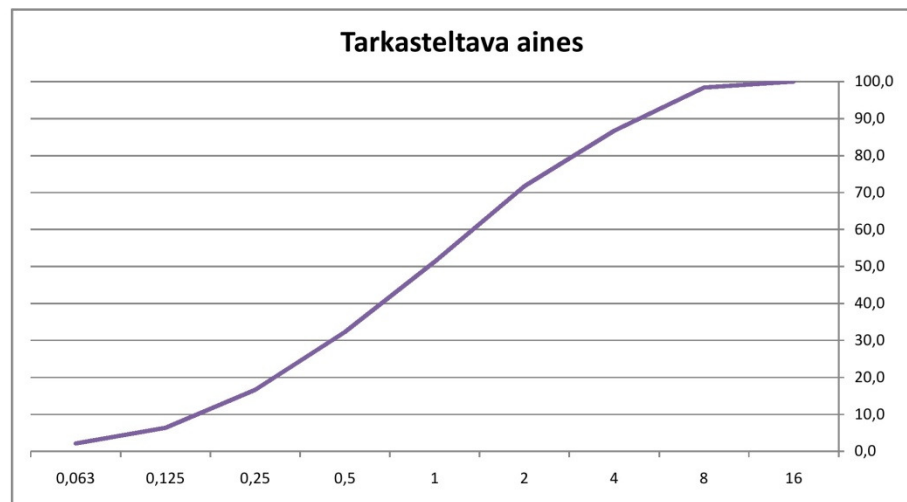
RAKEISUUS, SEULONTAMENETELMÄ: EN 933-1	Laboratorio: Saimaan Ammattikorkeakoulu
Näytteen tiedot:	Näytteen vastaanottopäivämäärä: 26.3.2019
Tilaaaja. Maakostean betonin hiekka. 0-8 mm	Suorittaja: Putrolainen Andrei
Käytetty menetelmä: Kuivaseulonta	

Kuiva kokonaismassa M<sub>1</sub>: 1,316 kg

Seulan aukkokoko mm	Seulalle jääneen materiaalin massa R <sub>i</sub> kg	Seulalle jäänyt materiaali prosentteissa 100xR <sub>i</sub> /M <sub>1</sub> (massaprosenttia)	Yhteenlaskettu läpäisy-% 100-Σ(100xR <sub>i</sub> /M <sub>1</sub> ) (massaprosenttia)
16	0	0	100 %
8	0,021	1,6	98 %
4	0,154	11,7	87 %
2	0,197	15,0	72 %
1	0,269	20,4	51 %
0,5	0,25	19,0	32 %
0,25	0,206	15,7	17 %
0,125	0,135	10,3	6 %
0,063	0,056	4,3	2 %
Materiaali pohja-astiassa P	0,025		

Hienoaineksen läpäisy-% f = 1,9
------------------------------------

ΣR <sub>i</sub> +P = 1,313 kg	Huomautuksia:
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} \times 100 = < 1 \% \quad \text{OK}$	*Koska tehty kuivaseulonta - M <sub>2</sub> sijasta käytettiin M <sub>1</sub>



## Liite 2

RAKEISUUS, SEULONTAMENETELMÄ: EN 933-1	Laboratorio: Saimaan Ammattikorkeakoulu
Näytteen tiedot:	Näytteen vastaanottopäivämäärä: 26.3.2019
Tilaaaja: 0-8 mm Pesu	Suorittaja: Putrolainen Andrei
Käytetty menetelmä: Pesuseulonta	

Kuiva kokonaismassa M<sub>1</sub>: 1,39 kg Pesussa poistuneen hieno aineksen kuiva massa:  
 Kuiva massa pesun jälkeen M<sub>2</sub>: 1,342 kg M<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>: 0,048 kg

Seulan aukkokoko mm	Seulalle jääneen materiaalin massa R <sub>i</sub> kg	Seulalle jäänyt materiaali prosentteissa 100xR <sub>i</sub> /M <sub>1</sub> (massaprosenttia)	Yhteenlaskettu läpäisy-% 100-Σ(100xR <sub>i</sub> /M <sub>1</sub> ) (massaprosenttia)
16	0	0,00	100 %
8	0,035	2,5	97 %
4	0,194	14,0	84 %
2	0,197	14,2	69 %
1	0,271	19,5	50 %
0,5	0,251	18,1	32 %
0,25	0,197	14,2	18 %
0,125	0,127	9,1	8 %
0,063	0,057	4,1	4 %
Materiaali pohja-astiassa P	0,006		

Hieno aineksen läpäisy-% f = 3,9
-------------------------------------

ΣR <sub>i</sub> +P = 1,335 kg 3,956835	Huomautuksia:
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} \times 100 = < 1\% \quad \text{OK}$	

