

Niklaus Lammi

**VAIHTOEHTOISIIN SIDEAINEISIIN PERUSTUVIEN BETONIEN JA PORT-  
LANDSEMENTTIPOHJAISEN BETONIN VEDENPITÄVYYS, PURISTUSLU-  
JUUS- JA KUTISTUMAEROT**

**VAIHTOEHTOISIIN SIDEAINEISIIN PERUSTUVIEN BETONIEN JA PORT-  
LANDSEMENTTIPOHJAISEN BETONIN VEDENPITÄVYYS, PURISTUSLU-  
JUUS- JA KUTISTUMAEROT**

Niklaus Lammi  
Opinnäytetyö  
Kevät 2015  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan koulutusohjelma, tuotantotekniikan suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä: Niklaus Lammi

Opinnäytetyön nimi: Vaihtoehtoisiin sideaineisiin perustuvien betonien ja portlandsementtipohjaisen betonin kutistuma, puristuslujuus- ja vedenpitävyyserot

Työn ohjaaja: Hannu Kääriäinen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2015

Sivumäärä: 35

---

Kun puhutaan vihreästä kaivosteollisuudesta, päästöistä sekä nollajätetasosta, merkittäväksi tutkimusalueeksi tulee nousemaan tulevaisuudessa geopolymeerien käyttäminen. Kaivannaisteollisuuden- ja prosessointijätteiden sekä muiden teollisuuden sivuvirtojen ohella valmistusprosessissa syntyviä jätteitä voidaan muuttaa hyödyllisiksi tuotteiksi, kuten betoniksi, putkiksi ja tulenkestäviksi paneeleiksi.

Opinnäytetyössä tutkittiin geopolymeeripohjaisen betonin kutistumaa, vedenpitävyyttä sekä puristuslujuutta ja verrattiin tuloksia portlandsementtipohjaiseen betoniin.

Tutkimuksen tilaaja Kajaanin ammattikorkeakoulu toimitti käytettävät lisäaineet, joita olivat alkaliliuos, biotuhka, masuunikuonajauhe, metakaoliini ja silika. Loput käytettävät aineet, kiviaines, notkistin, portlandsementti ja kalkkifilleri, saatiin Oulun ammattikorkeakoulun laboratorion tiloista.

Työ aloitettiin suhteuttamalla vertailumassa lujuusluokkaan C40. Muiden koemassojen osalta tilaaja toimitti valmiit reseptit. Työssä tehtiin neljä erilaista koemassaa, joista jokaiselle määriteltiin puristuslujuus 7 vrk:n ja 28 vrk:n iässä, vedenpitävyys 28 vrk:n iässä sekä kutistuma 7, 28 ja 56 vrk:n iässä. Kokeet suoritettiin standardien mukaisesti Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorion tiloissa ja välineillä kesällä 2014.

Puristuslujuuksia tutkittaessa jokaisen koemassan lujuus kasvoi 7 vrk:n testistä 28 vrk:n testiin. Selvästi eniten puristuslujuus kehittyi koemassa 3:ssa. Vedenpitävyyssarvot koemassoissa 1, 2 ja 4 olivat 10 - 24 mm. Koemassan 3 vedenpitävyyssarvo poikkesi selvästi muista massoista ollen keskiarvoltaan 49,3 mm.

Tutkimus osoitti, että puristuslujuuden, vedenpitävyyden sekä kutistuman puolesta vaihtoehtoisilla sideaineilla voidaan korvata sementin käyttö betonin valmistuksessa.

---

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree programme in Civil Engineering, Option of Production Engineering

---

Author: Niklaus Lammi

Title of the thesis: Shrinkage, compressive strength and water resistance differences in concrete based on Portland cement and alternative binders

Supervisor: Hannu Kääriäinen

Term and year the thesis was submitted: Spring 2015

Number of pages: 35

---

When talking about green mining industry, emissions and also zero-waste levels, a major future research area will be the use of geopolymers. Mining industry waste, processing waste, and other industrial effluents from manufacturing processes can be changed into useful products, such as concrete, tubes, fireproof panels.

This thesis studies shrinkage, water resistance and compressive strength of geopolymer-based concrete and compares these results to portland cement based concrete.

The client of the research Kajaani University of Applied Sciences provided the used additives alkali solution, bio ash, blast furnace slag, metakaolin and silica. The rest of the used materials aggregates, plasticizer, Portland cement, and limestone, were obtained from the laboratory of Oulu University of Applied Sciences.

The work began by proportioning the reference mass to strength class C40. The client delivered complete recipes of other test masses. Four different test masses were prepared in the work. A compressive strength of 7 and 28 days, water resistance of 28 days and shrinkage of 7, 28, and 56 days were determined for each one of the test masses. The tests were done by standard procedures in the facilities and with the equipment of Oulu University of Applied Sciences construction laboratory in the summer of 2014.

The compressive strengths of each test mass increased from the 7-day test to the 28-day test. The most remarkable increase in compressive strength was in test mass 3. In the water resistance test, test masses 1, 2, and 4 were 10 to 24 mm. Test mass 3 differed notably from the other masses by having an average value of 49.3 mm.

The research showed that due to the compressive strength, water resistance, and shrinkage results, the use of cement can be replaced with the use of alternative binders in the manufacturing of concrete.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 BETONI	7
2.1 Kiviaines ja vesi	8
3 BETONIN KUTISTUMINEN	10
3.1 Varhaisvaiheen kutistuma	10
3.2 Plastinen kutistuma	10
3.3 Plastinen painuma	11
3.4 Autogeeninen kutistuma	12
3.5 Myöhäisen vaiheen kutistuma	12
3.6 Lämpömuodonmuutos	13
3.7 Kuivumiskutistuminen	13
4 BETONIN VESITIIVIYS JA PURISTUSLUJUUS	15
4.1 Betonin vesitiiviys	15
4.2 Betonin puristuslujuus	16
5 KOEMASSOJEN RAAKA-AINEET JA VALMISTUS	17
5.1 Koemassojen raaka-aineet	17
5.2 Koemassojen valmistaminen	20
6 KOEMASSOJEN TESTAUSMENETELMÄT	23
6.1 Puristuslujuuden määrittäminen	23
6.2 Tiheyden määrittäminen	25
6.3 Vedenpitävyyden määrittäminen	25
6.4 Kutistuman määrittäminen	27
7 KOEMASSOJEN TULOKSET JA TULOSTEN KÄSITTELY	29
8 POHDINTA	32
LÄHTEET	33

# 1 JOHDANTO

Kaivannaisteollisuuden valmistusprosesseissa syntyy prosessointijätteitä. Tulevaisuudessa hyvin merkittäväksi tutkimusalueeksi tulee nousemaan geopolymeerien käyttäminen, jolla pyritään muuttamaan jätteet hyödyllisiksi tuotteiksi kuten betoniksi, putkiksi, tulenkestäviksi paneeleiksi, kaivostäyttöiksi, liikennealueiksi, penkereiksi, vedenpuhdistusmateriaaleiksi ja raskasmetallien kapseloinniksi. Lisäksi geopolymeereja voidaan hyödyntää maanstabiloinnissa. Tavoitteena ovat energiatehokkuus, päästöjen alentaminen sekä nollajätetaso.

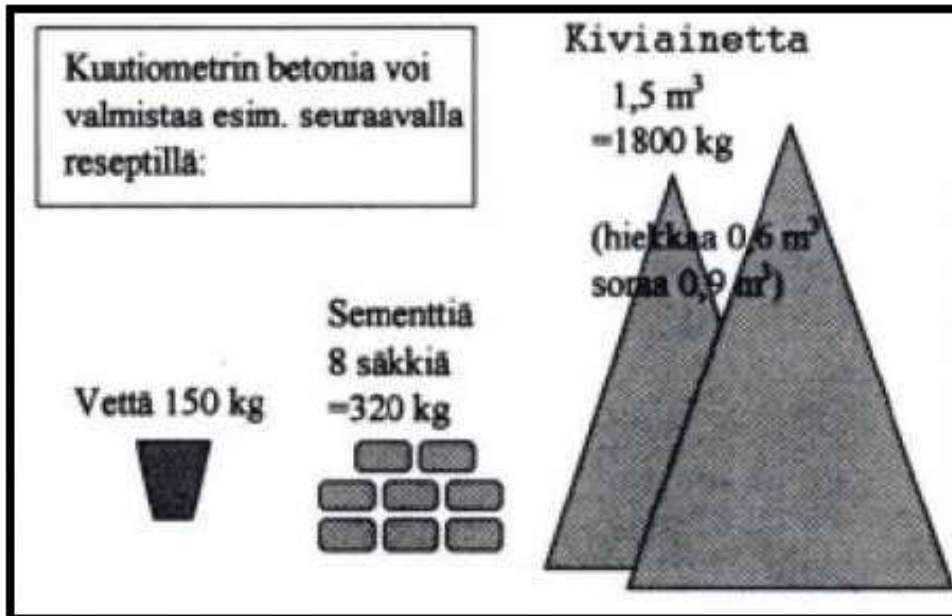
Tämä opinnäytetyö tehdään Kajaanin ammattikorkeakoululle. Lähtökohtana on tutkia Kainuussa olevien mineraalivarantojen ja teollisuuden sekä voimalaitosten yhteydessä syntyvien sivuvirtojen ja poisteiden hyötykäyttöä. Tavoitteena on kehittää tuotantomenetelmiä ja uusia tuotekonsepteja siten, että valmistavilla yrityksillä on parhaat mahdollisuudet tehokkaiden teknologisten ratkaisujen ja kustannustehokkaan tuotannon järjestämiseen. Hyötyjinä ovat myös ne teollisuuden yritykset, joiden sivu- ja jätevirroista tutkitaan ja valmistetaan tulevaisuuden geopolymeeripohjaisia tuotteita.

Opinnäytetyön tavoitteena on mitata geopolymeeripohjaisen betonin kutistumaa, vedenpitävyyttä ja puristuslujuutta. Tarkoituksena on verrata niitä portlandsementtipohjaisen betonin kutistumaan, vedenpitävyyteen ja puristuslujuuteen.

Opinnäytetyössä tehdään neljä erilaista betonimassaa, joista yksi on vertailubetonimassa. Lisäksi valmistetaan kolme erikoismassaa, joita verrataan vertailubetonimassaan. Valmistetuissa erikoismassoissa on hyötykäytetty teollisuudesta ja voimalaitoksista saatavia sivutuotteita. Betonimassakokeet suoritetaan standardien mukaisesti. Koekappaleet testataan 7, 28 ja 56 vuorokauden iässä valun suorittamisesta.

## 2 BETONI

Betoni on keinotekoinen kivi, jossa kovettunut sementtiliima eli sementtikivi sitoo kiviainesrakeet toisiinsa. Betonin tärkeimmät osa-aineet ovat sideaines, vesi ja kiviaines. Kuvassa 1 nähdään esimerkki betonin valmistusreseptistä. (1, s. 31.)



KUVA 1. Esimerkki betonin valmistusreseptistä (1, s. 31.)

Edellä mainittujen aineiden lisäksi betonissa käytetään usein lisä- ja seosaineita lisäämään betonin työstettävyyttä tai parantamaan kovettuneen betonin tiivyyttä, lujuutta ja säilyvyysominaisuuksia. Betonin osa-aineiden valinnalla sekä niiden seossuhteiden määrittämisellä eli suhteutuksella on iso merkitys betonin kaikkiin ominaisuuksiin. (1, s. 31.)

Betoni on eniten käytetty rakennusmateriaali maailmassa. Tämän mahdollistaa raaka-aineiden hyvä saatavuus sekä yksinkertainen valmistusteknologia. Siitä voidaan valmistaa rakennuksen runkoja, julkisivuja, patoja, siltoja, teitä ja muita infrarakenteita, pihakiviä, putkia, harkkoja sekä taideteoksia. Betoni on kestävä ja luja materiaali sekä vähän huoltoa vaativa. Tästä syystä sillä saadaan asun-

toihin hyvä ääneneristävyys ja paloturvallisuus. Betoniteollisuus pystyy käyttämään raaka-aineena muun teollisuuden muuten jätteeksi meneviä sivutuotteita, kuten lentotuhkaa, masuunikuonaa ja silikaa. (2.)

## **2.1 Kiviaines ja vesi**

Kiviaineksen tilavuusosuus betonin osa-aineista on 60 – 80 massaprosenttia. Kiviaineksena pystytään käyttämään mitä tahansa riittävän lujaa, tiivistä ja rakeista materiaalia, joka ei osallistu sementin reaktioihin eikä huononna betonin säilyvyyttä. Kiviainesta tarvitaan betonin valmistukseen paljon ja sitä tulee olla riittävästi, helposti saatavilla ja sen kustannukset eivät saa olla korkeat. Esimerkiksi betonin kiviaineksena voidaan käyttää luonnon kiviaineksia, jotka voivat olla tavanomaisia kiviaineksia, raskaita malmipitoisia tai kevyitä vulkaanisia kiviaineksia. Luonnon kiviaines voi olla luonnon muokkaamaa tai mekaanisesti murskattua. Kiviaineksena voidaan käyttää myös niin sanottuja keinotekoisia kiviaineksia kuten kevytsoraa, masuunikuonaa eri muodoissa, lentotuhkaa, tiilimurskaa tai betonimurskaa. Suomessa yleisimmin käytetään graniittipohjaista luonnonkiviainesta, joka yhä useammin on mekaanisesti murskattua. Lisäksi betonin uusiokäyttö, eli betonimurskeen käyttö kiviaineksena, on yleistymässä. (1, s. 31, 32.)

Betonin runkoaineena käytettävän kiviaineksen tulee olla kyseiseen käyttötarkoitukseen sopivaa, eli se ei saa sisältää haitallisia määriä aineita, jotka vaikuttavat tuoreen tai kovettuneen betonin tai raudoituksen ominaisuuksiin heikentävästi. Kiviainekset eivät saa olla rapautuneita. Ne eivät saa sisältää epäpuhtauksia, kuten kasvi- ja eläinkunnan lahoamisjätteitä ns. humusaineita, roskia, savikokkareita, öljyä tai jätteitä. Kiviainekset eivät myöskään saa sisältää lunta, jäätä tai jäätyneitä kivipaakkuja. (1, s. 31, 32.)

Betoninormien mukaan betonin valmistamiseen tulee käyttää standardin SFS-EN 12620 mukaista kiviainesta. Kiviaineksen tulee olla CE-merkittyä ja tarkastettua. (1, s. 31, 32.)

Vesi, jota käytetään betonin valmistuksessa voi olla vesijohtoverkosta otettua vettä tai juomakelpoista luonnonvettä. Ainoastaan humuspitoiset suovedet ja



teollisuuden tai asumajätteiden saastuttamat vedet eivät kelpaa betonin valmistuksen ilman tarkempaa tutkimusta. Humuksen lisäksi tuorebetoni ei kestä sokeria, koska jo pienikin määrä (0,1 %) sokeria vedessä tai yleensä tuoreessa betonissa saattaa estää betonin kovettumisen kokonaan. Betonin valmistukseen ja jälkihoitoon käytettävä vesi ei yleensä saa sisältää klorideja enempää kuin 0,03 painoprosenttia. (1, s. 62.)

## 2.2 Sideaines

Sideaines käynnistää sekoituessaan veden kanssa betonin kovettavan hydratoitumisreaktion. Yleisimmin betonin sideaineena käytetään pelkkää Portlandsementtiä. Lisäksi sideaine voi sisältää seos- ja lisäaineita. (1, s. 39.)

**Lisäaineet** vaikuttavat betonin erilaisiin ominaisuuksiin. Lisäaineet ovat kemikaaleja, joita lisätään pieniä määriä. Niiden tarkoituksena on parantaa ja muuttaa betonin ominaisuuksia. Lisäaineilla voidaan säätää betonin ominaisuuksia erilaisia käyttötarkoituksia varten. (3.)

Lisäaineiden tulee olla CE-merkittyjä tai niillä on ennen käyttöönottoa oltava hyväksytyssä koestuslaitoksessa tehtyihin kokeisiin perustuva selvitys lisäaineen yleisistä ominaisuuksista, vaikutuksesta sekä käyttökelpoisuudesta betonissa. (1, s. 64.)

**Seosaineilla** pystytään vaikuttamaan betonin ominaisuuksiin. Seosaineet ovat teollisuuden sivutuotteina syntyviä aineita, joita hyödyntämällä voidaan tuottaa vähemmän ympäristöä kuormittavaa betonia. Yleisempiä käytettäviä seosaineita ovat lentotuhka, masuunikuona sekä silika. (4.)

### **3 BETONIN KUTISTUMINEN**

Betonin kutistuminen on luonnollinen ominaisuus, joka on seurausta betonin tilavuuden pienentymisestä. Kutistumisen syynä pidetään betonin kuivumista sekä sementin hydrataatiota. Betonissa tapahtuva kutistuminen aiheuttaa tilavuuden pienentymisen vuoksi vetojännityksen, mikä johtaa hallitsemattomana betonipinnan halkeiluun. Halkeilun riskit ja suuruus riippuvat kutistuman suuruudesta ja betonin vetolujuuden kehittymisnopeudesta. Betonilla on useita eri kutistumatyyppejä, minkä takia tulee aina ajatella kokonaisuutta, kun yritetään estää betonin halkeilua. Käytännössä kutistumat voidaan jakaa joko varhaisvaiheen (<24 h) tai myöhäisvaiheen kutistumaan (>24 h). (5, s. 1.)

Kutistumalle herkimpiä ovat ne rakenteet, joissa on suuria pinta-aloja, kuten lattiapinnat. Myös massiiviset betonirakenteet ja paksuseinäiset, korkeat rakenteet ovat alttiimpia kutistumalle. Edellä mainituissa rakenteissa olosuhteiden hallinta on usein hankalampaa ja kutistuman vaikutukset suurempia. (5, s. 4.)

#### **3.1 Varhaisvaiheen kutistuma**

Varhaisvaiheen kutistuma alkaa jo valuhetkellä ja kestää ensimmäisen vuorokauden loppuun saakka. Se voi olla suuruudeltaan jopa kymmenkertainen myöhäisvaiheen kutistumaan verrattuna. Varhaisvaiheen kutistuma on voimakkaimmillaan ennen betonin sitoutumista. Tätä vaihetta kutsutaan myös plastiseksi kutistumaksi. Varhaisvaiheen kutistuma vaihtelee välillä 0–7 mm/m ja riippuu veden haihtumisnopeudesta betonin pinnalta ja betonin sitoutumisajasta. Kutistuma aiheuttaa yleisesti ongelmia lähes kaikissa rakenteissa, joissa vettä haihtuu varhaisvaiheessa. Varhaisvaiheen kutistumista on mahdollista pienentää tai estää merkittävästi heti valun jälkeen aloitettavalla oikealla jälkihoidolla, jolloin estetään liian nopea veden haihtuminen betonipinnalta. (6, s. 2.)

#### **3.2 Plastinen kutistuma**

Plastisella kutistumisella tarkoitetaan sitä betonimassan kutistumista vaakatasossa, jonka veden haihtuminen betonipinnasta aiheuttaa. Kutistumisen syy-

nä on betonipinnan liian nopea kuivuminen ennen massan sitoutumista. (1, s. 73.)

Plastinen kutistuma on suurin, joten sen hallitsemiseen tulee panostaa. Plastinen kutistuma tapahtuu ensimmäisen vuorokauden aikana betonin ollessa vielä tuoreessa vaiheessa. Kutistuma on yleensä syynä halkeamiin, jotka muodostuvat, kun betonin pinnalta haihtuva vesi ei korvaudu betonipinnan alta tulevalla vedellä. Betonin sitoutuessa betonipinta sulkeutuu ja veden haihtuminen loppuu. (5, s. 2.)

Plastinen kutistuma on erityinen ongelma betoneilla, joilla on alhainen vesi-sementtisuhte tai jotka ovat voimakkaasti notkistettuja työstettävyyden helpottamiseksi. Mitä enemmän betonissa on käytetty sementtiä tai mitä pienempi vesi-sementtisuhte on, sitä suurempi on plastisen kutistuman vaikutus. (7, s. 21.)

Plastiselle kutistumalle suurin riski on olosuhteissa, joissa on

- voimakas tuuli ja kylmä sää
- voimakas tuuli ja kuuma sää
- reilusti notkistettu betoni tai huono vesi-sementtisuhte. (5, s. 2.)

Käytännössä plastista kutistumaa voidaan vähentää merkittävästi tai jopa estää työmaatekniikoiden avulla. Veden haihtumista betonipinnalta on vähennettävä tai estettävä suojaamalla pinta vettä läpäisemättömällä materiaalilla heti valun jälkeen. Tuuli- ja aurinkosuojat on otettava käyttöön sään niin vaatiessa ja varsinaista jälkihoitoa on jatkettava vähintään viisi vuorokautta. Kylmissä olosuhteissa on käytettävä nopeasti sitoutuvia betonilaatuja ja sitoutumista hidastavien lisäaineiden käyttöä vältettävä. (6, s. 3.)

### **3.3 Plastinen painuma**

Plastisella painumalla tarkoitetaan painumaa, joka syntyy, kun vesi nousee betonin pintaan ja samalla betonimassa painuu kohti pohjaa. Tämä saattaa aiheuttaa muun muassa terästen kohdalla halkeilua. Plastiseen painumaan voidaan varautua massavalinnalla ja käyttämällä jälkitärytystä. Plastista painumaa voi-

daan estää käyttämällä kohtuullista notkeustasoa (S2-S3) sekä sopivaa rakeisuuskäyrää ja kohtuullista vesimäärää. (5, s. 2.)

Sementin sitoutumisajan piteneminen suurentaa plastista painumaa, koska veden erottuminen lisääntyy. Mitä pidempään betoni on plastisessa tilassa, sitä enemmän jää aikaa veden erottumiselle. Myös betonin vesimäärä on merkittävä tekijä plastisen kutistuman synnyssä, koska vesimäärän kasvattaminen lisää erottuvan veden määrää. (1, s. 72.)

### **3.4 Autogeeninen kutistuma**

Autogeenisellä kutistumalla tarkoitetaan sementin hydrataation aiheuttamaa kutistumaa ja sitä kutsutaan myös hydrataatio- tai kemialliseksi kutistumaksi. Kun vesi ja sementti reagoivat keskenään, syntyy sementtikiveä, jonka tilavuusosuus on pienempi kuin alkuperäinen veden ja sementin yhteenlaskettu tilavuus. Tämän vuoksi betoni kuivuu sisäänpäin. (5, s. 2.)

Koska autogeeninen kutistuma johtuu sementin hydrataatiosta, sitä ei voida kokonaan poistaa. Autogeenista kutistumaa voidaan kuitenkin vähentää pitämällä veden ja sementin määrä kohtuullisena ja kiviaineksen määrä suurena. Autogeenisen kutistuman suuruus on 0 – 0,6 ‰. (7, s. 25.)

### **3.5 Myöhäisen vaiheen kutistuma**

Myöhäisvaiheen kutistuma eli pitkäaikaiskutistuma jatkuu yhdestä vuorokaudesta jopa useisiin vuosiin. Kutistuman alkamisajankohtaa voidaan siirtää myöhemmäksi oikealla jälkihoidolla, joka voi pienentää halkeamia, taipumia ja käyristymiä. Pitkäaikaiskutistuma tapahtuu 80-prosenttisesti muutaman kuu-kauden aikana ja on sitä hitaampi ja pienempi, mitä massiivisempi betonirakenne on kyseessä. Kutistuman suuruus on tavallisesti 0,4 – 0,6 mm/m, joten kutistuma aiheuttaa ongelmia vain osalle rakenteita. Ongelmia pystytään vähentämään liikuntasaumoilla, kutistumaraudoituksilla ja muilla suunnitteluratkaisuilla. Myöhäisvaiheen kutistuma on yleensä se kutistumatyyppi, jota käsitellään normeissa ja alan kirjallisuudessa. Myöhäisvaiheen kutistuma tulee ottaa huomioon suunnitellessa rakenteita. (6, s. 1.)

### 3.6 Lämpömuodonmuutos

Sementin sitoutuessa betonimassa tuottaa lämpöä, rakenne lämpenee enemmän ja nopeammin, koska massiivisissa betonirakenteissa on käytetty enemmän sementtiä. Lämmön tuottaminen loppuu ja betoni alkaa jäähtyä nopeammin ulkopinnoilta. Tällöin syntyy kutistuma, jossa betonin tilavuus pienenee ensin rakenteen pinnoilta. Massiivisten rakenteiden ydin jäähtyy hitaammin kuin betonin ulkopinnat. Tämä kutistuma voi olla suuri ja aiheuttaa halkeamia rakenteille. (5, s. 3.)

Lämpömuodonmuutoksen riskiä voidaan pienentää, kun käytetään alhaislämpösementtejä tai sementin ja kuonan sekoitusta. Betonin lämpötilan laskeminen tehtaalla (+10 °C) riittää usein estämään ongelmat. Tarvittaessa rakenteet suojataan eristeillä, jotta lämpötilan vaihtelut ytimessä ja pinnalla ovat tasaisempia ja halkeilua tapahtuu huomattavasti vähemmän. (5, s. 3.)

### 3.7 Kuivumiskutistuminen

Kuivumiskutistuma on yleisin tunnettu kuivumistyyppi ja se johtuu betonissa olevan veden haihtumisesta. Työstettävyyden parantamiseksi betoniin lisättävä vesi ei kokonaan reagoi sementin kanssa, vaan osa vedestä jää vapaasti haihtumaan pois rakenteesta. Kuivumiskutistuma on suuruusluokkaa 0,5 – 1,3 ‰ ja sen merkitys on suuri. (5, s. 3.)

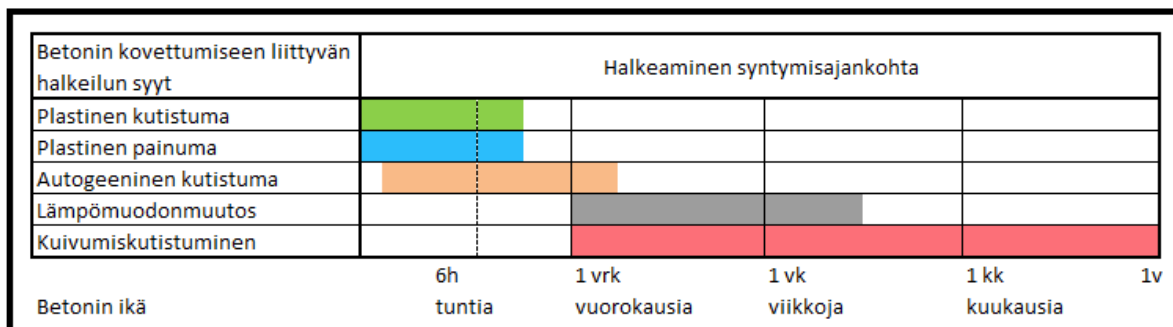
Kuivumiskutistuman suuruuteen vaikuttavat betonin koostumus ja ympäristöolosuhteet. Lisättäessä vettä ja sementtiliimaa betonimassaan kutistuma suurenee. Myös sementin korvaaminen masuunikuonalla lisää kutistumaa.

Betonin kutistumista lisäävät

- betonin määrän lisääminen
- hienoainemäärän eli sementin ja fillerin määrän lisääminen
- betonin huokostaminen
- ympäristön kuivuus
- kevytsoran käyttö
- joidenkin notkistimien käyttö. (1. s. 91.)

Taulukossa 1 nähdään eri kutistumatyyppien ajoittuminen betonin valmistuksen jälkeen.

TAULUKKO 1. Kutistumatyyppien ajoittuminen betonin valmistuksen jälkeen (5, s.1)



## 4 BETONIN VESITIIVIYS JA PURISTUSLUJUUS

### 4.1 Betonin vesitiiviys

Betonia käytetään yleensä sellaisissa rakenteissa, joilta vaaditaan hyvää säänkestävyyttä. Betoni ei ole täysin tiivistä ainetta, vaikka ensi silmäyksellä saattaa näyttää. Betoni sisältää aina huokosia, joiden kautta vesi pääsee tunkeutumaan betonin sisälle ja mahdollisesti myös sen lävitse. Huokosten määrä ja koko sekä erityisesti niiden keskinäinen yhteys vaikuttavat ratkaisevasti vesitiiviyteen. Suoritetuissa tutkimuksissa on todettu, että vesitiiviys paranee puristuslujuuden kasvaessa - toisin sanoen vesi-sementtisuhteen pienetessä. Tämä johtuu siitä, että tällöin huokosten määrä ja koko pienenee eli sementtiliima tulee tiheämmäksi. On havaittu, että vedenläpäisevyys suurenee kiviaineksen maksimiraekoon kasvaessa ja että koekappaleen ääripinnat vastustavat veden tunkeutumista niin voimakkaasti, että niiden vastus vastaa eräiden tietojen mukaan 15 cm:n betonikerrosta. (8, s. 14.)

Vesitiivistä betonia valmistettaessa on pyrittävä käyttämään mahdollisimman vähän vettä, koska on vältettävä kutistumista. Kiviaineksen on oltava laadultaan ja rakeisuudeltaan hyvää - varsinkin hienoa ainesta, filleriä, tulee olla riittävästi. Lisäksi betonimassan työskenneltävyyteen sekä tiivistämistyön huolellisuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Työsaumoja on vältettävä. Mikäli työsaumoja joudutaan tekemään, tulee käyttää erillisiä tiivistysnauhoja ja jopa injektointiputkia jälkitiivistämistä varten. Vesitiiviiksi tarkoitettujen rakenteiden jälkihoito tulee suorittaa erityisen huolellisesti ja hoitoa on jatkettava riittävän kauan. (8, s. 14.)

Vauriot syntyvät vesirakenteisiin yleensä siten, että läpi tunkeutuva vesi irroittaa betonin vapaata kalkkia, jolloin betonin läpäisevä vesimäärä vähitellen kasvaa ja voi ajan myötä aiheuttaa betonin rapautumisen. Betonista, joka on vähemmän huokoista, ei liennut kalkki pääse poistumaan vaan täyttää huokokset tehden betonin vähitellen vesitiiviiksi. Erikoistöissä, joissa vesipaineet saattavat nousta tavallista suuremmiksi, betonin vesitiiviys on tutkittava kokeellisesti. Tutkimuslaitos käyttää betonin vesitiivystutkimuksissa tavallisesti 150 mm standardikuutiota tai 150 mm halkaisijaltaan olevaa lieriötä. Kokeissa käytetään ta-

vallisesti suurempia paineita kuin mitkä esiintyvät käytännössä. Vesitiiviysko-keista saatuja tuloksia arvosteltaessa on pantava merkille, että ne vaihtelevat huomattavasti enemmän kuin esimerkiksi puristuslujusarvot. (8, s. 15.)

## **4.2 Betonin puristuslujuus**

Betonin tärkein ominaisuus on puristuslujuus. Betonilla on hyvä puristuslujuus, kun taas vetolujuus on vain noin 1/10 puristuslujuudesta. Rakenteissa onkin pakko parantaa betonin vetolujuutta, jotta erityisesti taivutetut rakenteet voisivat toimia tarkoitetulla tavalla. Vetolujuuden parantaminen tapahtuu sijoittamalla raudoitustankoja rakenteiden poikkileikkauksen vedettyihin osiin. Betonin ja tankojen välinen tartunta huolehtii sitten vetojännityksen siirtymisestä betonista tangoille. Edellä mainituin tavoin toimii esimerkiksi teräsbetonipalkki. (1, s. 79.)

Puristuslujuus on siitä hyvä betonin ominaisuuksien tulkitsija, että se on yksinkertainen määrittää ja useat betonin ominaisuudet ovat verrannollisia siihen. Betoninormeissa puristuslujuuden luokitus perustuu kuutiolujuuteen, joka testataan käyttäen sivumitaltaan 150 mm:n koekuutiota. Rakenteen kelpoisuuden toteamista varten, tehtyjen koekappaleiden tulosten perusteella lasketun vertailulujuuden tulee olla vähintään vaatimukseksi asetetun lujuusluokan suuruisen, kun betonin puristuslujuus todetaan normikokein. (1, s. 79.)



## 5 KOEMASSOJEN RAAKA-AINEET JA VALMISTUS

### 5.1 Koemassojen raaka-aineet

Tutkimuksen tilaaja Kajaanin ammattikorkeakoulu toimitti koemassoissa käytettävät lisäaineet, joita olivat alkaliliuos, biotuhka, masuunikuonajauhe, metakaoliini ja silika. Loput käytettävät aineet, kiviaines, notkistin, portlandsementti ja kalkkifilleri, saatiin Oulun ammattikorkeakoulun laboratoriosta.

Koemassat tehtiin taulukossa 2 esitetyillä resepteillä.

TAULUKKO 2. Koemassojen reseptit

Koemassa 1	Koemassa 3
Kiviaines	Kiviaines
Portlandsementti	Biotuhka
Notkistin	Masuunikuonajauhe
Vesi	Metakaoliini
	Alkaliliuos Kaliumsilikaatti, Kaliumhydroksidi
	Notkistin
	Silika
Koemassa 2	Koemassa 4
Kiviaines	Kiviaines
Masuunikuonajauhe	Metakaoliini
Metakaoliini	Kalkkifilleri
Alkaliliuos Kaliumsilikaatti, Kaliumhydroksidi	Notkistin
Notkistin	Silika
	Alkaliliuos Kaliumsilikaatti, Kaliumhydroksidi

**Rapidsementti**, jota käytettiin vertailumassassa, oli Finnsementin Rapidsementtiä, joka on nopeasti kovettava portlandseossementti. Kyseisen sementin erityisominaisuus on nopea alkulujuuden kehitys. Rapidsementti soveltuu valmisbetoniin, erilaisten betonituotteiden valmistukseen sekä nopean lujuudenkehityksen ansiosta erityisesti elementtituotantoon ja talvibetonointiin. Sementti valittiin tähän testiin, koska se kerää alkulujuuden nopeasti. (9, s. 1.)

**Notkistin**, jota käytettiin koemassoissa, oli Finnsementin VB-Parmix-notkistinta, joka on polykarboksylaattipohjainen nesteytin. Se on tarkoitettu kaikkeen valmisbetoniin. Notkistinta voidaan käyttää sekä normaalin että korkean lujuusluokan ja itsestään tiivistyvässä valmisbetonissa. Se sopii myös huokostettuun valmisbetoniin. (10, s. 1.)

**Vettä** käytettiin ainoastaan vertailumassassa. Koemassoissa (2-4) käytettiin veden sijaan alkaliliuosta.

**Käytetty** runkoaine oli OAMK:n laboratoriosta löytyvää 0-8 mm:n ja 8-16 mm:n kiviainesta. Kiviaines kuivatettiin mahdollisen kosteuden poistamiseksi.

**Masuunikuonajauhe**, jota käytettiin koemassoissa 2 ja 3, on hienoksi jauhettua granuloitua masuunikuonaa, jolla on piilevät hydrauliset ominaisuudet. Masuunikuonaa saadaan raakaraudan valmistuksessa masuunissa muodostuneesta emäksisestä silikaattisulatteesta nopeasti jäähdyttämällä. Masuunikuonajauheen kiintotiheys on  $2\ 900-3\ 100\ \text{kg/m}^3$ . Sen raekoko on lähes sama mutta hieman karkeampaa kuin sementillä. Kuona on väriltään hieman sementtejä vaaleampaa, mistä syystä sen käyttö betonissa vaalentaa betonin sävyä. Betoninormien mukaan masuunikuonajauheen aktiivisuus verrattuna sementtiin on 0,80. (1, s. 60.)

Masuunikuonajauheen vedentarve on vähäinen ja se notkistaa betonia. Masuunikuonajauhe kasvattaa myöhäislujuutta ja yleensä alentaa varhaislujuutta sekä lisää betonin virumaa ja karbonatisoitumisnopeutta lievästi. (1, s. 60.)

**Silika**, jota käytettiin koemassoissa 3 ja 4, on piiraudan ja alkuainepiin valmistuksessa syntyvä savukaasuista erotettava, erittäin hienojakoinen pozzolaani. Silikan kiintotiheys on noin  $2\ 200\ \text{kg/m}^3$ . Silika lisää betonin vedentarvetta. Sitä käytettäessä tulee käyttää vedentarvetta vähentäviä lisäaineita. Silikalla on betonin lujuutta lisäävä ominaisuus ja se myös parantaa betonin kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä, tiiviyyttä ja vedenpitävyyttä. Silika vaikuttaa betonin värisävyyn tummentavasti (sinertävämpää). Betoninormien mukaan silikan aktiivisuus verrattuna sementtiin on 2,0, kun betonin vesi-sementtisuhde on  $\leq 0,45$  ja 1,0, kun vesi-sementtisuhde on  $> 0,45$ . (1, s. 60.)

**Metakaoliini**, jota käytettiin koemassoissa 2, 3 ja 4, on kaoliniitista polttamalla valmistettu pozzolaaninen aine. Kaoliniitti on kaoliniittiryhmän yleisin mineraali. Muita ryhmään kuuluvia mineraaleja ovat vähemmän yleinen halloysiitti sekä harvinaisiksi lukeutuvat dicktiitti ja nakriitti. Nämä mineraalit muodostavat yhdessä kaoliinisaven. Lukuun ottamatta halloysiittia, jonka rakenne sisältää muihin verrattuna enemmän vettä, kaikilla kaoliniittiryhmän mineraaleilla on samanlainen kemiallinen koostumus. (11, s. 5-7.)

Metakaoliinin käytöllä pystytään saavuttamaan lujempaa ja kestävämpää betonia. Metakaoliini parantaa betonin työstettävyyttä sekä kutistumia. Sen avulla voidaan myös vähentää kalkin kulkeutumista betonin pintaan sekä betonin karbonatisoitumista. (11, s. 8.)

**Biotuhkaksi** voidaan kutsua biomassan eli metsä- ja peltobiomassan, turpeen sekä niiden seosten poltossa ja biokaasutuksessa syntyviä tuhkia (12, s. 2).

Polttotekniikka vaikuttaa suuresti syntyvän biotuhkan ominaisuuksiin. Puupellettejä poltettaessa sidonta-aineet voivat jonkin verran vaikuttaa tuhkan koostumukseen. Esim. lignosulfonaatti nostaa tuhkassa rikin määrää. Puubiomassaa pidetään kuitenkin puhtaana bioenergiana ja sillä on lähitulevaisuudessa paljon käyttöä. Rakeiset tuhkatuotteet vaikuttavat omaavan potentiaalia. Myös tuhkasta voidaan tehdä pellettejä, mutta se ei ole taloudellisesti kannattavaa, toisin kuin on asianlaita rakeisten tuhkatuotteiden kohdalla. Tuhkan käyttötarkoituksia ovat lannoitteet, kalkitseminen, maaperän hoito, tien- ja maisemanrakennus, poltto, käyttö adsorbettina jätehuollossa ja betoniteollisuus. Yksi uusista käyttökohteista on polymeerinen geotuhka, josta voidaan valmistaa erilaisia geopolymeerejä. (13, s. 82.)

Tällä hetkellä muiden kuin kivihiilituhkien käyttö vaativien betonirakenteiden seosaineena ei ole vielä mahdollista tiukkojen betoninormien takia. Puu- ja turveperäisten tuhkien käyttöä betonin valmistuksessa on kuitenkin tutkittu jonkin verran ja hyvälaatuisten tuhkien on todettu soveltuvan betonin valmistukseen. (14, s. 9.)

**Kalkkifilleri**, jota käytettiin koemassassa 4, pystytään korvaamaan osa sementistä. Kalkkifillerillä saadaan vaaleampaa ja tasavärisempää betonia eikä kiivain kutistu kuten sementti. Lisäksi kalkkifillerin valmistuksessa vapautuu huomattavasti vähemmän hiilidioksidia kuin sementin valmistuksessa. Koska kalkkifillerit voivat korvata osan sementistä, vähennetään näin ympäristökuormitusta. Kalkkifilleriä käytettäessä saadaan tasalaatuisempaa betonia, mikä vähentää hukkaa ja parantaa betonin säilyvyysominaisuuksia lisäten rakenteiden kestoikää. (15.)

**Kaliumsilikaatti** eli kalivesilasi, jota käytettiin koemassoissa 2, 3 ja 4, soveltuu hyvin hiottujen mutta sellaisekseen jätettävien betonipintojen käsittelyyn. Kalivesilasia käytetään myös rikottujen ja esimerkiksi laastista purettujen vanhojen tiiliseinien irtopölyn sitomiseen. Kaliumsilikaatin avulla pinnasta saa vettä hylkivän mutta ei täysin vedenpitävää. (16, s. 1.)

**Kaliumhydroksidi**, jota käytettiin koemassoissa 2, 3 ja 4, on hajuton, vaalea, kiinteä aine, joka liukenee hyvin veteen ja alkoholeihin. Kaliumhydroksidin liuotessa veteen vapautuu lämpöä. Aineen vesiliuos on väritön ja vahvasti emäksinen. Myös hapot reagoivat kaliumhydroksidin kanssa kiivaasti ja lämpöä vapauttaen. Aine absorboi ilmasta hiilidioksidia ja vettä. Kaliumhydroksidi syövyttää metalleja, kuten alumiinia, lyijyä, sinkkiä ja tinaa muodostaen syttyvää vetykaasua. Kaliumhydroksidi reagoi ammoniumsuolojen kanssa muodostaen ammoniakkia ja aiheuttaen palovaaran. Kaliumhydroksidi ja sen vesiliuokset eivät ole syttyviä eivätkä ylläpidä palamista. Kaliumhydroksidin reaktiossa tiettyjen materiaalien kanssa voi kuitenkin vapautua riittävästi lämpöä sytyttämään palavia materiaaleja. Kuumentuessaan kaliumhydroksidi voi tuottaa syövyttäviä ja myrkyllisiä kaasuja. (17, s. 2-8.)

## **5.2 Koemassojen valmistaminen**

Opinnäytetyössä tutkittiin geopolymeeripohjaisen betonin kutistumaa, vedenpitävyyttä ja puristuslujuutta. Tarkoituksena on verrata niitä portlandsementtipohjaisen betonin kutistumaan, vedenpitävyyteen ja puristuslujuuteen. Betonikoemassoja tehtiin yhteensä neljä. Jokainen koemassa sekoitettiin samaa sekoitusohjetta noudattaen.

Sekoitusohje oli seuraava :

1. Kiinteää sideainetta (masuunikuona, metakaoliini, biotuhka ja kalkkifilleri) sekoitettiin 2 min.
2. Lisättiin alkaliaktivaattori ja sekoitettiin 3 min.
3. Lisättiin kiviaines ja sekoitettiin tasaiseksi 2 min.
4. Lisättiin notkistin ja sekoitettiin tasaiseksi noin. 1-2 min riippuen notkistimen reaktionopeudesta.
5. Betonimassa oli valmis.

## **Valutyö**

Koemassat valettiin Oulun ammattikorkeakoulun tekniikan yksikön rakennuslaboratorion tiloissa. Kokeissa käytettiin kolmea erilaista muottia. Puristuslujuustesteissä käytettävät muotit olivat kooltaan 100 mm x 100 mm, vedenpitävyystesteissä käytettävät muotit 150 mm x 150 mm sekä kutistumatesteissä käytettävät muotit 100 mm x 100 mm x 500 mm. Muotit kasattiin ja öljyttiin, minkä jälkeen ne täytettiin tehdyillä betonimassoilla. Betonimassat olivat työstettävyydeltään notkeita.

Ensiksi muotit täytettiin puoliväliin asti ja tärytettiin 10 kertaa. Tämän jälkeen muotit täytettiin täyteen ja tärytettiin 10 kertaa uudelleen. Sitten ylimääräinen betonimassa poistettiin ja valetun alueen pinta viimeisteltiin tasaiseksi. Valetut muotit nostettiin vuorokaudeksi kuivumaan pöydälle ja niiden pinta suojattiin muovilla. Kun valut olivat saavuttaneet vuorokauden purkulujuuden, irrotettiin koekappaleet muoteista. Jokainen koekappale merkittiin valupäivämäärällä sekä koekappaleetunnuksella. Koemassojen 1, 2 ja 3 koekappaleet vietiin säilytykseen vesiastiaan, jossa veden lämpötila oli  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . Koemassan 4 koekappaleet käärittiin muoviin ja vietiin säilytykseen lämpökaappiin, koska koemassassa ei käytetty masuunikuonajauhetta. Masuunikuonajauhe muodostaa osin portlandsementin kaltaisia sitoutumistuotteita toisin kuin pelkkä metakaoliini. Tämän vuoksi kosteudella on säilytyksen aikana merkitystä. Myös vedellä on merkitystä kutistumisen ja halkeilun estämisessä. Lämpökaapin lämpötila oli  $20\text{ °C}$ . Kuvassa 2 nähdään koekappaleiden 1, 2 ja 3 vesisäilytys. Kuvassa 3 nähdään koekappaleen 4 koemassat käärittynä muoviin.



*KUVA 2. Koemassat vesisäilytyksessä*



*KUVA 3. Koemassan 4 koekappaleet käärittynä muoviin*

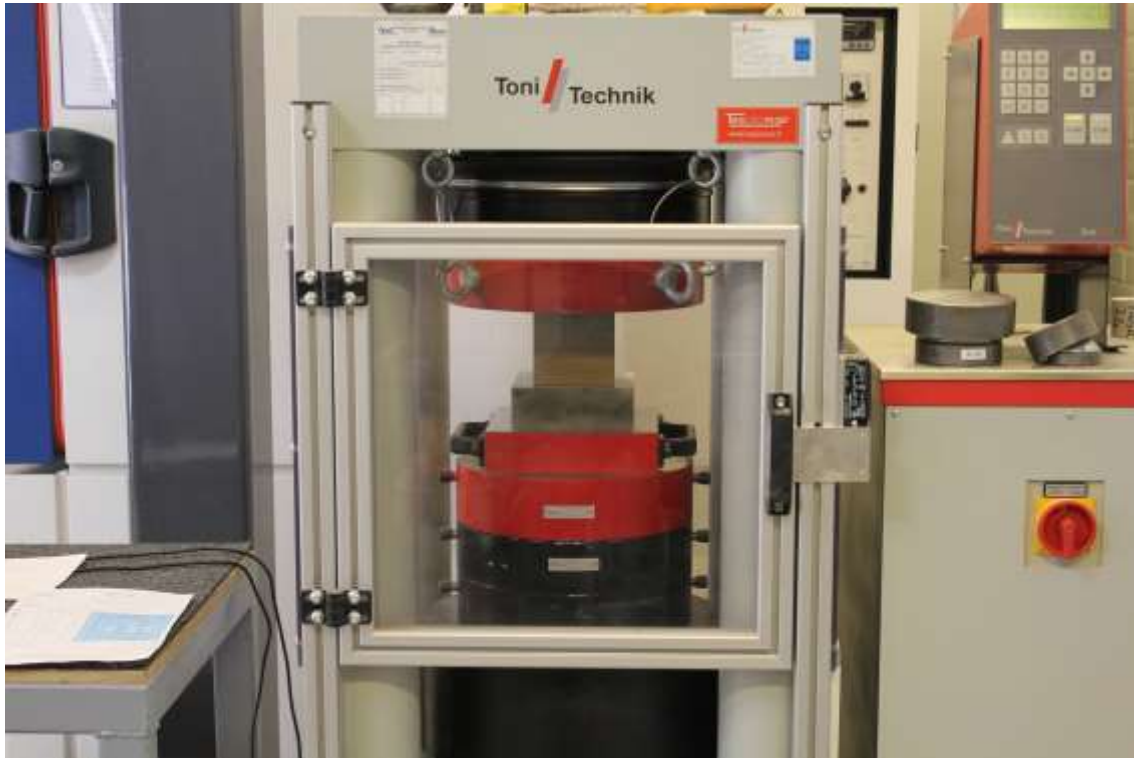
## 6 KOEMASSOJEN TESTAUSMENETELMÄT

Koemassat testattiin Oulun ammattikorkeakoulun tekniikan yksikön rakennuslaboratorion tiloissa. Koemassojen valmistuksessa sekä puristuslujuuden, vedenpitävyyden sekä kutistuman testauksessa käytettiin standardien mukaisia ja kalibroituja laitteita.

### 6.1 Puristuslujuuden määrittäminen

Puristuslujuus määriteltiin standardin SFS-EN 12390-3 (koekappaleiden puristuslujuus) mukaisesti. Koekappaleet testattiin 7 ja 28 vuorokauden iässä. Kumpaakin ikää kohden suoritettiin kolme puristuslujuuden määrittystä. Testattavat koekappaleet olivat sivunpituudeltaan 100 mm:n kuutiota.

Testausmenetelmässä koekappaleesta poistetaan ylimääräinen kosteus ja punnitaan sekä tarkistetaan pintojen suoruus hiusviivaimella ja suorakulmalla. Mikäli mitat tai muodot eivät täytä standardin EN 12390-1 vaatimuksia, ne tulee hioa tasaisiksi tai pinnoittaa ennen puristamista. Tämän jälkeen valitaan puristettava pinta. Puristettavaksi pinnaksi pyritään valitsemaan edustavimmat pinnat kuutiosta. Koekappale asetetaan testauskoneeseen siten, että kuorma kohdistetaan kohtisuoraan valusuuntaa vastaan. Tämän jälkeen koekappale kuormitetaan murtoon puristustestauskoneella, joka täyttää standardin EN 12390-4 vaatimukset. Puristustestauskone ilmoittaa suurimman voiman K100-luokassa. (18, s. 3-7.) Kuvassa 4 nähdään koekappale puristustestauslaitteistossa.



*KUVA 4. Koekappale puristustestauslaitteistossa*

Betoninormeissa puristuslujuuden luokitus perustuu kuutiolujuuteen, joka testataan käyttäen sivumitaltaan 150 mm:n koekuutiota. Testattavat koekappaleet olivat sivunpituudeltaan 100 mm (K100 kuutiolujuus). Voima tulee muuttaa vastaamaan K150:n kuutiolujuutta, mikä tapahtuu jakamalla K100-arvo 1,03:lla. (1, s. 79.)

Puristuslujuus voidaan selvittää kaavalla 1.

$$F_c = F/A_c$$

KAAVA 1

$F_c$  = puristuslujuus, Mpa ( $N/mm^2$ )

$F$  = suurin kuorma murtohetkellä, N

$A_c$  on kuormituksen alaisen koekappaleen poikkileikkauspinta-ala  $mm^2$  lasketuna koekappaleen nimetyistä mitoista.

Puristuslujuus tulee ilmoittaa pyöristettynä lähimpään 0,1 MPa:iin.



## 6.2 Tiheyden määrittäminen

Koekappaleista määriteltiin myös betonin tiheys standardin SFS-EN 12390-7 mukaisesti. Tiheys määritetään  $10 \text{ kg/m}^3$ :n tarkkuudella. Koekappaleiden tiheys määriteltiin 28 vuorokauden ikäisistä koekappaleista. (19, s. 3-6.)

Tiheys voidaan selvittää kaavalla 2.

$$D = m/v$$

KAAVA 2

$D$  = kappaleen kosteustilaan ja tilavuuden määrittämenetelmään suhteessa oleva tilavuus ( $\text{kg/m}^3$ )

$m$  = kappaleen massa testaushetken kosteustilassa (kg)

$V$  = koekappaleen tilavuus ( $\text{m}^3$ )

## 6.3 Vedenpitävyyden määrittäminen

Vedenpitävyys määriteltiin standardin SFS-EN 12390-8 mukaisesti. Testattavat koekappaleet olivat sivunpituudeltaan 150 mm:n kuutioita. Koekappaleita testattiin kolme kappaletta koemassaa kohden 28 vuorokauden iässä. Testausmenetelmässä koekappaleen vedenpaineelle altistettava pinta karhennetaan teräsharjalla, minkä jälkeen kappale asetetaan koelaitteeseen ja siihen kohdistetaan 5 Mpa vedenpaine 72 h  $\pm$  2 h ajan. Kuvassa 5 nähdään koekappale vedenpitävyyslaitteistossa.



*KUVA 5. Vedenpitävyytestauslaitteisto*

Testissä käytettiin standardista poikkeavaa 10 Mpa:n vedenpainetta selvempien erojen saamiseksi. Kun vedenpaine oli vaikuttanut määrätyn ajan, koekappale poistettiin laitteesta. Vedenpaineen vaikutuksen alaisena ollut pinta pyyhittiin ylimääräisen veden poistamiseksi. Tämän jälkeen koekappale halkaistiin kahtia kohtisuoraan vedenpaineen vaikutuksen alaisena ollutta pintaa vastaan, merkittiin vesirintaman maksimikohta koekappaleeseen ja kirjattiin se muistiin millimetrin tarkkuudella. (20, s. 3-7.) Kuvassa 6 nähdään veden tunkeumasyyvyys koekappaleessa.



*KUVA 6. Veden tunkeumasyyvyys koekappaleessa*

#### **6.4 Kutistuman määrittäminen**

Kutistuminen määriteltiin ohjeen By22 mukaisesti. Testattavat koekappaleet olivat mitoiltaan 100 mm x 100 mm x 500 mm:n palkkeja, joiden päätypintojen keskikohtaan valettiin korroosionkestävästä materiaalista olevat mittatapit. Koekappaleisiin laitettiin merkinnät, joiden avulla varmistettiin, että koekappale mitattiin aina samansuuntaisesti. Jokaisesta koemassasta tehtiin kolme kutistumapalkkia, jotta saataisiin mahdollisimman luotettavat lukemat. Jokainen kutistumapalkki mitattiin kolme kertaa, millä varmistettiin mittaustulosten oikeellisuus.

Testausmenetelmässä koekappaleita pidettiin vesisäilytyksessä  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  lämpötilassa 7 vuorokauden ajan, minkä jälkeen koekappaleet siirrettiin ilmasäilytykseen  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ , jonka suhteellinen kosteus oli  $40\% \pm 5\%$ . Koekappale asetettiin mittauslaitteistoon. Tämän jälkeen mitattiin pituudenmuutos 0,005 mm:n tarkkuudella. 7 ja 56 vuorokauden mittaustulosten erotusten keskiarvo laskettuna mm/m:nä ilmaisee kutistuman. Koekappaleiden pituudenmittaukset

suoritettiin 7, 28 ja 56 vuorokauden iässä. (21, s. 29.) Kuvassa 7 nähdään kutistumapalkki mittauslaitteistossa.



*KUVA 7. Kutistumapalkki mittauslaitteistossa*

## 7 KOEMASSOJEN TULOKSET JA TULOSTEN KÄSITTELY

Opinnäytetyön tulokset on esitetty taulukoissa 2, 3 ja 4. Tulokset on jaettu puristuslujuus-, vedenpitävyys- ja kutistumatestien tuloksiin. Vaihtoehtoisten sideainesten toimivuutta sementin korvaajana testataan koemassoissa 2, 3 ja 4. Tuloksia on selvitetty vertaamalla koemassaan 1, joka on vertailukoemassa.

TAULUKKO 3. Puristuslujuustestien tulokset

Koemassa	Tes- tausikä [d]	Puristuslujuus K150 [N/mm <sup>2</sup> ]	Keskiarvo pu- ristuslujuus K150 [N/mm <sup>2</sup> ]	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Keskiarvo tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
	7	45,3		2402	
	7	46,7	<b>46</b>	2386	<b>2398</b>
<b>1</b>	7	46,7		2406	
	28	55,2		2414	
	28	55,2	<b>55</b>	2417	<b>2416</b>
	28	54,9		2416	
	7	58,1		2375	
	7	61,2	<b>60</b>	2399	<b>2388</b>
<b>2</b>	7	60,8		2391	
	28	70,3		2389	
	28	70,8	<b>71</b>	2402	<b>2393</b>
	28	72,1		2389	
	7	55,6		2400	
	7	53,6	<b>55</b>	2413	<b>2416</b>
<b>3</b>	7	55,6		2435	
	28	74,7		2394	
	28	78,7	<b>76</b>	2425	<b>2409</b>
	28	75,1		2408	
	7	42,5		2333	
	7	42,9	<b>43</b>	2329	<b>2336</b>
<b>4</b>	7	44,3		2345	
	28	45,5		2344	
	28	47,9	<b>47</b>	2324	<b>2326</b>
	28	47,1		2311	

TAULUKKO 4. Vedenpitävyytestien tulokset

Koemassa	Veden tunkeuma (mm)	Keskiarvo
	20	
<b>1</b>	17	18,6
	19	
	17	
<b>2</b>	23	23,6
	31	
	53	
<b>3</b>	20	49,3
	75	
	10	
<b>4</b>	12	10,3
	9	

TAULUKKO 5. Kutistumatestien tulokset

Koemassa	Tunnus	Testausikä [d]				$\Delta$	$\epsilon$ mm/m
		7	28	56			
<b>1</b>	NL95	3,257	3,135	3,085	0,172	0,344	
	NL96	2,978	2,86	2,812	0,166	0,332	
	NL97	1,499	1,385	1,333	0,166	0,332	
<b>2</b>	NL56	3,86	3,36	3,201	0,659	1,318	
	NL57	2,049	1,541	1,468	0,581	1,162	
	NL58	3,484	2,968	2,893	0,591	1,182	
<b>3</b>	NL77	3,836	3,382	3,2	0,636	1,272	
	NL78	3,454	3,135	3,047	0,407	0,814	
	NL79	3,877	3,355	3,276	0,601	1,202	
<b>4</b>	NL50	3,778	3,665	3,664	0,114	0,228	
	NL51	2,62	2,479	2,479	0,141	0,282	
	NL52	4,429	4,289	4,291	0,138	0,276	

Koekappaleiden puristuslujuudet olivat koemassoissa 2 ja 3 suurempia kuin koemassoissa 1 ja 4. Selvästi eniten erottui koemassa 3 28 vuorokauden kohdalla. Tämä johtui siitä, että koemassoissa oleva masuunikuonajauhe kasvatti myöhäislujuutta. Lisäksi silikan käyttäminen koemassassa 3 lisäsi sen lujuutta entisestään. Koemassassa 4 silikan käyttäminen lisäsi jonkin verran betonin lujuutta.

Vedenpitävyytsteissä koemassat 1, 2 ja 4 olivat välillä 10 - 24 mm. Koemassa 3 poikkesi selvästi muista massoista ollen keskiarvoltaan 49,3 mm. Jokainen koemassa läpäisi standardin SFS-EN 12390-8 mukaisen testin vaatimuksen (<100 mm). Yhteenvetona todettiin, että koemassa 4 oli vedenläpäisevyydeltään muihin massoihin verrattuna kaikista vesitiivein.

Kutistumista tutkittaessa havaittiin, että koemassat 2 ja 4 kutistuivat koemassoja 1 ja 3 huomattavasti enemmän. Tämä johtuu siitä, että sementti on korvattu masuunikuonajauheella, joka kasvattaa kutistumaa. (1, s. 90.)

## 8 POHDINTA

Opinnäytetyössä tutkittiin vaihtoehtoisiin sideaineisiin perustuvien betonien ja portlandsementtipohjaisen betonin puristuslujuus, vedenpitävyys- ja kutistumaeroja. Tavoitteena ovat energiatehokkuus, päästöjen alentaminen sekä nollajätetaso.

Puristuslujuuksia tutkittaessa jokaisen koemassan lujuus kasvoi 7 vuorokauden testistä 28 vuorokauden testiin. Selvästi eniten puristuslujuus kehittyi koemassassa 3. Vedenpitävyyttesteissä koemassat 1, 2 ja 4 olivat välillä 10 - 24 mm, joka alittaa standardin mukaisen vaatimuksen (<100 mm). Koemassa 3 poikkesi selvästi muista massoista ollessa keskiarvoltaan 49,3 mm, mutta läpäisi myös standardin mukaisen vaatimuksen. Testissä käytettiin normaalista 5 Mpa:sta poikkeavaa painetta (10 Mpa). Mikäli käytettävä paine olisi ollut 5 Mpa, vedenpitävyysarvot olisivat olleet huomattavasti pienempiä.

Tämä tutkimus osoitti, että puristuslujuuden, vedenpitävyyden sekä kutistuman puolesta vaihtoehtoisia sideaineita voidaan käyttää korvaamaan sementtiä. Suurena hyötytekijänä nähdään geopolymeerien käyttö sementtiteollisuudessa, koska sementti pystytään korvaamaan geopolymeerisementillä. Tällöin saadaan CO<sub>2</sub>-päästöt laskemaan sementin valmistukseen verrattuna suhteessa 1:10.

Matti Kuokkanen toteaa väitöskirjassaan ”Development of an eco and material - efficient pellet production chain - a chemical study” (2013), että yksi uusista käyttökohteista on juuri geopolymeerinen tuhka, josta voidaan valmistaa erilaisia geopolymeerejä.

Verrattaessa vaihtoehtoisiin sideaineisiin perustuvien betonien ja portlandsementtipohjaisen betonin puristuslujuus- vedenpitävyys- ja kutistumaeroja nähdään, että on erittäin hyödyllistä, taloudellista ja ympäristöystävällistä käyttää teollisuuden sivutuotteita, esimerkiksi biotuhkaa, betonin valmistukseen. Sitä käyttämällä nimittäin saadaan puristuslujuudeltaan, vedenpitävyydeltään sekä kutistuman puolesta tuloksia, jotka ovat verrattavissa valmisbetoniin.



## LÄHTEET

1. BY 201: Betonitekniikan oppikirja. 2004. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y.
2. Betoni rakennusmateriaalina. 2015. Betoni. Saatavissa: <http://www.betoni.com/tietoa-betonista/betoni-ja-kestava-kehitys/betoni-rakennusmateriaalina>. Hakupäivä 20.3.2015.
3. Betonin lisäaineet. 2015. Semtu. Saatavissa: <http://www.semtu.fi/fi/tuotteet/betonin-lisa-aineet/>. Hakupäivä 22.3.2015.
4. Mitä betoni on. 2015. Rakentaja. Saatavissa: [http://www.rakentaja.fi/artikkelit/8989/mita\\_betoni\\_on.htm](http://www.rakentaja.fi/artikkelit/8989/mita_betoni_on.htm). Hakupäivä 25.3.2015.
5. Anttila, Vesa 2010. Betonin kutistuma ja sen huomioiminen. Rudus Oy:n asiakastiedote 1/2010.
6. Leivo, Markku - Holt, Erika - Kronlöf, Anna - Söderlund, Klaus - Vuorinen, Pekka 2000. Betonin kutistuma. Saatavissa: [www.betoni.com](http://www.betoni.com). Hakupäivä 18.2.2015.
7. Hietala, Jasmiina 2011. Betonilattioiden kutistuman hallinta. Diplomityö. Aalto yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu.
8. Nykänen, Arvo 1951. Betonin ominaisuudet. Helsinki: Valtion teknillinen tutkimuslaitos.

9. Rapidsementti. 2015. Finnsementti Oy. Saatavissa:  
<http://www.finnsementti.fi/tuotteet/sementit/rapidsementti>. Hakupäivä 10.1.2015.
  
10. VB-Parmix. 2015. Finnsementti Oy. Saatavissa:  
<http://www.finnsementti.fi/tuotteet/lisaaineet/notkistimet/vb-parmix>.  
Hakupäivä 10.1.2015.
  
11. Eijärvi, Erkki - Gehör, Seppo 2009. Valikoitujen teollisuusmineraalien etsintä ja teollinen hyödyntäminen Kainuussa.
  
12. Biotuhkien hyötykäyttömahdollisuudet. 2011. Oulun yliopisto. Saatavissa:  
<http://www.metla.fi/hanke/7464/pdf/HighBio-Kokkola-2011.pdf>. Hakupäivä 15.2.2015.
  
13. Kuokkanen, Matti 2013. Development of an eco and material-efficient pellet production chain-a chemical study
  
14. Pesonen, J 2012. Oulun biotuhkien fraktitointi, kemialliset ominaisuudet ja hyötykäyttöpotentiaali. Pro gradu - tutkielma. Oulun yliopisto. Oulu 2012.  
Saatavissa:<http://www.metla.fi/hanke/7464/pdf/Janne-Pesonen-pro-gradu.pdf>. Hakupäivä 26.4.2015.
  
15. Kalkkifilleri. 2015. Nordkalk Oy. Saatavissa:  
<http://www.nordkalk.fi/default.asp?viewID=1985>. Hakupäivä 15.2.2015.

16. Kaliumsilikaatti. 2015. Domusclassica. Saatavissa:  
<http://www.domusclassica.com/tuote/kaliumsilikaatti-eli-vesilasi/860-075-1/>.  
Hakupäivä 22.2.2015.
17. Kaliumhydroksidi. 2015. Työterveyslaitos. Saatavissa:  
<http://www.ttl.fi/ova/koh.pdf>. Hakupäivä 22.2.2015.
18. SFS-EN 12390-3. 2009. Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. Suomen standardisoimisliitto SFS.
19. SFS-EN 12390-7. 2009. Kovettuneen betonin testaus. Osa 7: Kovettuneen betonin tiheys. Suomen standardisoimisliitto SFS.
20. SFS-EN 12390-8. 2009. Kovettuneen betonin testaus. Osa 8: Paineellisen veden tunkeutumasyvyys. Suomen standardisoimisliitto SFS.
21. BY 22: Betoninormien edellyttämiä käyttöselosteita koskevat ohjeet. 1985.  
Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y.