

Hannu Rannanjärvi

## **JÄLKIHOIDON VAIKUTUS BETONIN OMINAISUUKSIIN**

# **JÄLKIHOIDON VAIKUTUS BETONIN OMINAISUUKSIIN**

Hannu Rannanjärvi  
Opinnäytetyö  
Syksy 2014  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan koulutusohjelma, Talonrakentaminen

---

Tekijä: Hannu Rannanjärvi  
Opinnäytetyön nimi: Jälkihoidon vaikutus betonin ominaisuuksiin  
Työn ohjaaja: Hannu Kääriäinen  
Syksy 2014 Sivumäärä: 42 + 6 liitettä

---

Opinnäytetyössä tutkitaan jälkihoitomenetelmien sekä –aineiden vaikutusta betonin ominaisuuksiin puristuslujuuden, kutistumien ja lämmönkehityksen osalta. Lisäksi pohditaan näiden todellista merkitystä nykyaikaisessa elementtiteollisuudessa. Tutkimuksessa täytetään myös standardissa SFS-EN 13369 kohdassa 4.2.1.3 annettu alkutestausvaatimus, kun käytetään jälkihoitoaineita.

Tutkimus suoritettiin Rajaville Oy:n Korvenkylän tehtaan ja Oamk Oy:n rakennuslaboratorioissa kevään 2014 aikana. Tutkimuksessa sovellettiin SFS-standardien määrittämiä testausmenetelmiä muun muassa koekappaleiden säilytyksen ja koekappaleiden muodon sekä valmistustavan osalta. Puristuslujuus määritettiin 1, 2, 7, 14 ja 30 päivän ikäisenä valetuista- sekä rakennekoekappaleista. Betonin kutistumaa mitattiin erillisistä kutistumakappaleista mittatappimenetelmällä 28 vuorokauden ikään saakka.

Jälkihoitomenetelmien vaikutusta pyrittiin korostamaan antamalla kappaleiden kuivua vain jälkihoidetun pinnan suuntaan sekä säilyttämällä kappaleita tuotantotiloissa. Koekappaleille annettiin näin samat kovettumisolosuhteet kuin normaalisti tuotannossa oleville betonielementeille.

Tutkimuksen tuloksista voidaan päätellä, että nykyaikaisessa elementtitehtaassa, jossa valettava betonimassa on laadukasta ja tuotantotilojen olosuhteet ovat kontrolloituja, jälkihoidon vaikutus betonin ominaisuuksiin on häviävän pieni.

---

Asiasanat: betoni, jälkihoito, jälkihoitoaine, jälkihoitomenetelmät, betonin ominaisuudet, puristuslujuus

# ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Civil engineering, House building

---

Author: Hannu Rannanjärvi

Title of thesis: Effects of Curing Methods on the Properties of Concrete

Supervisor(s): Hannu Kääriäinen

Autumn 2014

Pages: 42 + 6 appendices

---

This thesis was made to evaluate the effect of sheet curing and film forming curing compounds on the compressive strength, shrinkage and heat development properties of concrete. The secondary objective was to fill the demand for preliminary testing given by Finnish Standards Association (SFS), when the curing compounds are being used.

The research was made for Rajaville Ltd. Rajaville is a manufacturer of prefabricated elements and was founded in 1950. Rajaville's two production plants are located near Oulu. The company manufactures products from pre-stressed beams to hollow-core slabs and graphical wall elements.

The research was done during the spring of 2014 in the concrete laboratories of Rajaville Ltd and OUAS Ltd. Testing methods were defined by the standards of Finnish Standards Association (SFS), although the methods were adapted for the production method, form and for the preservation of the specimen. The compressive strength of the concrete was measured when the concrete had aged for 1, 2, 7, 14 and 30 days. The shrinkage was determined when the concrete was between 2 and 28 days old.

An attempt was made to emphasize the effect of the curing method used by allowing the specimen to dry only in the direction of the cured surface. The samples were stored in the production premises. This way the concrete was given the same hardening conditions as the elements in the production.

The results of the research indicate that the effects of the curing treatments on the properties of the concrete are negligible, if the production facilities are modern, the conditions are controlled and the concrete is of a high quality.

---

Keywords: concrete, curing, compressive strength, heat development, shrinkage

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 BETONIN OMINAISUUDET	7
2.1 Betoni	7
2.2 Sitoutuminen	7
2.3 Lujuuden- ja lämmönkehitys	8
2.4 Seosaineet	9
2.5 Lisäaineet	10
2.6 Muut lisäaineet	11
3 BETONIN KUTISTUMA	13
3.1 Kutistuman tyypit	13
3.2 Kutistuman vaiheet	14
4 BETONIN JÄLKIHOITO	16
5 JÄLKIHOIDON TUTKIMUSMENETELMÄT	19
5.1 Puristuslujuus	19
5.2 Kutistuma	22
5.3 Jälkihoitomenetelmät	24
5.4 Lämpö ja kosteus	25
6 TULOKSET	27
6.1 Puristuslujuus	27
6.2 Kutistuma	33
6.3 Lämpö ja olosuhteet	34
7 YHTEENVETO	38
LÄHTEET	41
LIITTEET	42

# 1 JOHDANTO

1.7.2013 astui voimaan rakennustuoteasetus, joka tekee CE-merkinnästä pakollisen lähes kaikille rakennustuotteille. Näihin tuotteisiin lukeutuvat sellaiset tuotteet, jotka toimivat rakennuksen kantavina osina tai jäävät pysyväksi osaksi rakennuskohdetta. CE-merkintä perustuu harmonisoituun tuotestandardiin (hEN) tai eurooppalaiseen tekniseen arviointiin (ETA).

Standardissa SFS-EN 13369 on maininta siitä, että käytettäessä jälkihoitoainetta olisi menetelmän tehokkuus arvioitava alkutestauksella. Alkutestauksella tulisi osoittaa, että jälkihoitoaineilla pystytään saavuttamaan samat betonin lujuudet kuin niin sanotuilla perinteisillä jälkihoitomenetelmillä.

Työn tavoitteena on suorittaa tutkimus, jossa voidaan arvioida jälkihoitoaineen merkitystä elementtiteollisuudessa. Tutkimus suoritetaan eri jälkihoitomenetelmien ja -aineiden välillä vertaamalla puristuslujuutta, kutistumia sekä lämmönkehitystä. Lisäksi tutkitaan tuotantotilojen olosuhteita ja pohditaan näiden perusteella tehtaan todellista jälkihoitotarvetta.

Työn tilaajana toiminut Rajaville Oy on vuonna 1950 perustettu betonielementti-valmistaja. Nykyisen Rajavillen kaksi tuotantolaitosta sijaitsevat Oulun Korvenkylässä sekä Annalankankaalla. Yritys valmistaa vaativien toimitila-, halli- ja teollisuusrakennusten runkoratkaisujen lisäksi elementtejä asunto-, julkiseen- sekä infrarakentamiseen. Tuoteperheisiin kuuluvat esimerkiksi jännitetyt rakenteet, kuten TT- ja TEK-laatat sekä jännebetonipalkit sekä graafiset seinäelementit ja ontelolaatat.

## 2 BETONIN OMINAISUUDET

Betonin jälkihoidon tarkoituksena on luoda vasta valetulle betonipinnalle olosuhteet, joissa betonilla on edellytykset saavuttaa rakenteelta vaaditut ominaisuudet. Betonilta vaadittavia ominaisuuksia säädellään rasitus- ja lujuusluokilla sekä käyttöikämitoituksella, jotka määrittelevät betonin sisältämien osa-aineiden vähimmäis- ja enimmäismäärät. Betonin valmistusta Suomessa ohjaa Suomen Betoniyhdistyksen kirja Betoninormit 2012, jota ollaan tällä hetkellä päivittämässä eurokoodiaikaan.

Betonin jälkihoito yksittäisenä aiheena kuuluu aiheisiin, josta koottua tietoa löytyy hyvin vähän. Jälkihoitoaineista ja näiden todellisista vaikutuksista ei ole koe tuloksia, tai näitä ei ole julkaistu. Työn teoriapohja perustuu yleisesti hyväksytyihin ja luotettaviin lähteisiin, kuten Suomen Betoniyhdistyksen julkaisuihin sekä VTT:n suorittamiin tutkimuksiin. Teoriaosiossa keskitytään lähinnä betonin kuivumisominaisuuksiin ja niihin vaikuttaviin tekijöihin sekä pureudutaan jälkihoidon todelliseen merkitykseen.

### 2.1 Betoni

Betoni on keinotekoista kiveä, jossa kovettunut sementtiliima sitoo betonin runkoainekset yhteen. Pääraaka-aineena ovat sementti, vesi ja runkoaines. Lisäksi yleensä käytetään lisä ja seosaineita parantamaan esimerkiksi tuoreen betonin työstettävyyttä sekä kovettuneen betonin tiiveys-, lujuus- ja säilyvyysominaisuuksia. Betonin lisä- ja seosaineiden valinnalla sekä seossuhteiden määrittämisellä eli suhteutuksella on suuri vaikutus betonin kaikkiin ominaisuuksiin. (Betonitekniikan oppikirja. 2004, 18, 31, 69-70; Betoninormit. 2012, 197.)

### 2.2 Sitoutuminen

Sekoitettaessa sementtiä ja vettä keskenään saadaan seos, jossa tapahtuu kemiallinen reaktio. Tällöin sementin klinkkerimineraalien aluminaattiyhdisteet reagoivat ensimmäisenä veden kanssa ja sementtipartikkelit ketjuuntuvat. Sementin tärkein ominaisuus on kyky reagoida veden kanssa, veteen liukenemat-

tomaksi materiaaliksi, sementtiliimaksi. (Betoniteknii-  
kan Oppikirja. 2004, 18, 50.)

Veden ja sementin reagoiessa hydrataatioreaktiot alkavat välittömästi. Mikro-  
tasolla tämä tarkoittaa neulamaisten kiteiden kasvamista sementtahiukkasista.  
Sementtahiukkasista syntyy sauvamaisista ja levymaisistä kiteistä koostunutta  
massaa, sementtigelä. Kun betonimassan kiteet alkavat kasvaa yhteen, beto-  
ni menettää plastisuutensa eli sementti sitoutuu. Betonimassan kiinteys kasvaa  
tämän jälkeen ajan funktiona, joka johtaa massan kovettumiseen. (Betoniteknii-  
kan Oppikirja. 2004, 51; Betoninormit. 2012, 197.)

Betoni alkaa sitoutua noin 2-4 tunnin kuluttua sekoituksesta lämpötilan ollessa  
+20 °C. Tähän asti betonimassa on plastisessa tilassa ja massan työstö on  
mahdollista. Sitoutumisen jälkeen betoni alkaa tuottaa hydrataatioreaktion tu-  
loksena lämpöä sekä kovettua. Kemiallisen reaktion ollessa kyseessä ±10 °C:n  
muutos massan lämpötilassa tarkoittaa reaktioajan puoliintumista tai kaksinker-  
taistumista. (Betoniteknii-  
kan Oppikirja. 2004, 51, 69, 350.)

Sementtiin lisätään kipsiä, jotta hydrataatioreaktio ei käynnistyisi heti betoni-  
massan sekoituksen jälkeen. Kipsi hidastaa aluminaatin reaktioaikaa antaen  
massalle sopivan työstöajan. Sitoutumisajan lyhentämiseksi voidaan sementti  
jauhaa hienommaksi, jolloin sementin reaktiopinta kasvaa ja nopeuttaa semen-  
tin hydrataatiota, lujuudenkehitystä ja lämmöntuottoa. (Betoniteknii-  
kan Oppikirja. 2004, 18, 50-51, 56.)

### **2.3 Lujuuden- ja lämmönkehitys**

Betonin lujuudenkehitykseen voimakkaasti vaikuttava tekijä sementtimäärän  
lisäksi on betonin lämpötila. Lämpötilan laskiessa alle 0 °C:n lujuudenkehitys  
hidastuu voimakkaasti ja pysähtyy lopulta lämpötilan laskiessa -10 – -15  
°C:seen. (Betoniteknii-  
kan Oppikirja. 2004, 51.)

Betonin sitoutumisen päätyttyä alkaa kovettuminen eli lujuusreaktiot, jotka jat-  
kuvat niin kauan kuin hydratoitumiseen osallistuvaa vettä on käytettävissä. Be-



tonin lujuudenkehitys riippuu voimakkaasti betonin vesi-sementtisuhteesta. Sementin teoreettiseen täydelliseen hydratoitumiseen riittää vesi-sementtisuhte 0,25, mutta täydellisen hydrataation edellyttämä vesi-sementtisuhte on 0,4-0,45, koska massan geelihuokosiin imeytyy vettä noin 15 % sementin painosta. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 53, 79; ITB. 2004, 60.)

Betonimassan lämmönkehitykseen vaikuttavat käytetyn sementin kemiallinen koostumus ja hienous. Sementin hydrataatioreaktiot kehittävät lämpöä samassa suhteessa kuin lujuuden kehitys etenee. Hydrataatiolämpö vaihtelee käytettävän sementin nopeuden mukaan välillä 250–400 kJ/kg, riippuen siitä onko käytössä hidas sementti (plussementti), vai nopein sementti (pikasementti). (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 39, 56-57.)

## **2.4 Seosaineet**

Sementin sijasta voidaan betonin valmistuksessa käyttää side- ja runkoaineena mineraalisia seosaineita. Seosaineita käytetään parantamaan tai aikaansaaamaan tiettyjä betonin ominaisuuksia. Seosaineiden sallittu määrä riippuu käytetystä sementistä sekä rakenteen rasitusluokasta. Seosaineiden käyttö vaikuttaa betonin kovettumisreaktioihin, kuten lämmönkehitykseen sekä vedenerottumiseen. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 59, 61; Betoninormit. 2012, 202.)

Lentotuhka on hienoksi jauhetun kivihiilen poltossa voimalaitoksessa syntyvä pozzolaani, joka erotetaan savukaasuista. Tuhkan käytöllä voidaan parantaa betonimassan työstettävyyttä ja koossapysyvyyttä. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 59.)

Lentotuhka voi toimia betonissa kiviaineksena tai sideaineena. Käytön edellytyksenä on, että vettä ja kalsiumhydroksidia on riittävästi. Lentotuhkan käyttö heikentää betonin varhaislujuutta, mutta parantaa hieman myöhäislujuuksia. Betonin hydratoitumislämpö pienenee, kun käytetään tuhkaa korvaamassa sementtiä. Hydratoitumislämmön pienentyminen tarkoittaa sitä, että hydratoitumisreaktiot hidastuvat ja täten lentotuhkan käyttö pidentää rakenteen jälkihoitoaika. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 59; Betoninormit. 2012, 171.)

Masuunikuonajauhe on hienoksi granulointua masuunikuonaa. Masuunikuona puolestaan on raakaraudan valmistuksessa masuunissa muodostuneesta emäksisestä silikaattisulatteesta nopeasti jäädyttämällä saatu tuote. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 60; Betoninormit. 2012, 171.)

Masuunikuonajauhe notkistaa betonia ja sen vedentarve on pieni. Jauhe pienentää huomattavasti betonin hydratoitumislämpöä, joten hydrataatioreaktiot ovat hitaampia. Kuonan käyttö vaatii pidempiä jälkihoitoaikoja verrattuna portlandsementistä valmistettuihin rakenteisiin. Hydratoitumislämpöä pienentävän ominaisuuden takia sitä käytetään paljon massiivisten rakenteiden valuissa. Masuunikuonajauheen käyttö kasvattaa myöhäislujuuksia, mutta yleensä alentaa varhaislujuuksia. Kuonajauhe parantaa betonin sulfaatinkestävyyttä. Jos kuonajauheen osuus on yli 70 % sideaineesta, sideaineyhdistelmä luokitellaan sulfaatinkestäväksi. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 60; Betoninormit. 2012, 128.)

Silika on piiraudan ja alkuaine piin valmistuksessa syntyvä savukaasuista erotettava, erittäin hienojakoinen pozzolaani. Silika lisää huomattavasti betonin lujuutta, parantaa betonin kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä, tiiviyyttä ja vedenpitävyyttä. Jos silikalla korvataan sementtiä vain sen verran, että lujuus pysyy samana, alenee hydratoitumislämpö hieman, mutta muuten sen lämmönkehitys on samaa luokkaa sementin kanssa. Silika vähentää voimakkaasti betonimassan vedenerottumista, ja tästä syystä silikabetonin jälkihoito on tehtävä huolellisesti. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 60-61; Betoninormit. 2012, 128, 172.)

## **2.5 Lisäaineet**

Lisäaineita käyttämällä voidaan säädellä betonimassan ominaisuuksia, betonin sitoutumista, kovettumista sekä kovettuneen betonin ominaisuuksia. Lisäaineiden vaikutus on fysikaalinen tai kemiallinen. Lisäaineiden määrät betonissa ovat hyvin pieniä verrattuna muihin betonin osa-aineisiin. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 63; Betoninormit. 2012, 200.)

Lisäaineiden käytöllä pyritään parantamaan betonin teknisiä ominaisuuksia sekä taloudellista kilpailukykyä. Erikoisbetonien kuten pakkasenkestävän tai korkealujuusbetonin valmistus ilman lisäaineita on erittäin vaikeaa. Lisäaineiden toiminta betonissa riippuu lisäainelajin ja määrän lisäksi sementtilaadusta ja määrästä, runkoaineen rakeisuudesta, muista lisäaineista, annostelujärjestyksestä, lämpötilasta sekä betonisekoittimen tehosta. (Betonijulkisivujen materiaali- ja valmistustekniikka. 1998, 18; Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 63.)

Notkistavat lisäaineet ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka toimivat sementin ja veden välillä ja parantavat betonin teknisiä ja taloudellisia ominaisuuksia. Työstettävyyden - esimerkiksi pumpattavuuden ja koossapysyvyyden parantamisen lisäksi - notkistavien lisäaineiden käyttö mahdollistaa pienempien vesi- ja sementtimäärien käytön sekä yleensäkin korkealujuus betonin valmistuksen. (Betonijulkisivujen materiaali- ja valmistustekniikka. 1998, 18; Leivo - Holt. 2001, 20-21.)

Normaalisti betonissa on ilmaa noin 1–2 %, tiiviissä ja korkealujuusbetonissa ilmaa voi olla alle prosentin. Niin sanottua pakkas- tai säänkestävää betonia valmistettaessa- massan ilmamäärä nostetaan 4–8 %:iin huokostavan lisäaineen avulla. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 66-67.)

Huokostimet muodostavat pieniä ilmakuplia, jotka leviävät tasaisesti betoniin. Suojahuokosten tehtävänä on vastaanottaa betonissa olevan veden jäätyessä aiheuttama paine, niin ettei betoni rikkoudu. Huokokset parantavat betonimassan muokkautuvuutta, lisäävät sen notkeutta ja koossapysyvyyttä sekä vähentävät osa-aineiden erottumista. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 66-67.)

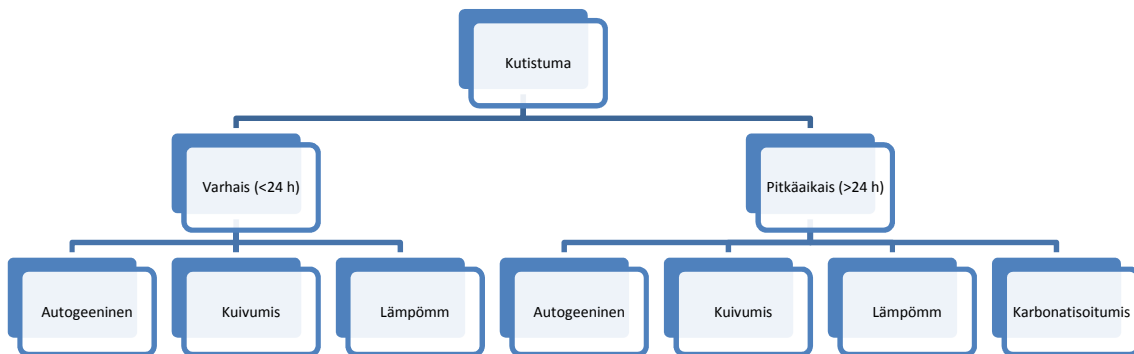
## **2.6 Muut lisäaineet**

Hidastimilla voidaan siirtää betonin sitoutumisaikaa myöhemmäksi. Hidastimia käytetään kun betonin kuljetusmatkat ovat pitkiä tai kohteissa, joissa halutaan välttää työsaumoja. Hidastinten käyttö ei pienennä rakenteen maksimihydraatiolämpötilaa, vaan siirtää sen ajankohtaa. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 67.)

Kiihdyttimiä käytetään nopeuttamaan betonin sitoutumista tai kovettumista esimerkiksi muottien purkamisen nopeuttamiseksi. Kiihdyttimien käyttö on vähentynyt huomattavasti, koska betonin sitoutumista ja lujuudenkehitystä saadaan hallitummin muokattua nopeampien betonin lujuutta kehittävien sementtien käytöllä, betonimassan alkulämmöllä tai alhaisella vesi-sementti suhteella. (Betoni-tekniikan Oppikirja. 2004, 68.)

### 3 BETONIN KUTISTUMA

Betonin kutistuma (kuva 1) jaetaan yleisesti kahteen eri vaiheeseen, varhais- sekä pitkäaikaiskutistumaan. Varhaisvaiheen kutistumaksi kutsutaan yleisesti kutistumaa, joka esiintyy ensimmäisen 24 tunnin aikana. Tämän jälkeen tapahtuvaa kutistumaa kutsutaan pitkäaikaiskutistumaksi. Näiden lisäksi niin varhais- kuin pitkäaikaiskutistuma jaetaan vielä kahteen osaan, kuivumis- sekä auto-geeniseksi kutistumaksi. Betoniin muodonmuutoksia aiheuttavat myös lämpö sekä myöhemmässä vaiheessa karbonatisoitumiskutistuma. (Leivo - Holt. 2001, 9.)



KUVA 1. Kutistumatyyppit

#### 3.1 Kutistuman tyypit

Kuivumiskutistuma johtuu betonin tilavuuden pienentymisestä betonin menettäessä vettä kuivumalla. Tämä on suoraan riippuvaista betonin pieniin kapillaareihin absorboituneen veden poistumisesta. Betonin kuivuessa veden pintajännitys vetää kapillaareja kasaan kasvavalla voimalla. Kuivumiskutistumaan vaikuttaa merkittävästi betonista haihtuvan veden määrä sekä kuivumisnopeus. Osa pitkäaikaiskuivumiskutistumasta on palautuvaa, mikä tarkoittaa sitä, että betoni kastuessaan vastaavasti paisuu. Palautuva osa voi olla yli puolet alkuperäisestä kuivumiskutistumasta. (Leivo - Holt. 2001, 9-10.)

Autogeenisen kutistumaksi on määritelty kutistuminen, joka tapahtuu ilman ulkoista kuivumista. Sementti kuluttaa betonimassasta vettä hydrataatioreaktion polttoaineena ja aiheuttaa betonissa fysikaalisia ja kemiallisia muutoksia. (ITB. 2004, 60; Leivo - Holt. 2001, 10-11.)

### **3.2 Kutistuman vaiheet**

Plastiset muodonmuutokset tapahtuvat sinä aikana, kun betonimassa on vielä tuoretta ja plastista. Notkea betonimassa helpottaa betonointityötä, mutta massan plastiset ja pitkäaikaiset muodonmuutokset, erottumistaipumus ja halkeiluriski kasvavat. Ensimmäisten tuntien aikana massa menettää notkeuttaan ja kutistuu sekä pysty- että vaakasuunnassa. Pystysuuntaista kutistumista kutsutaan plastiseksi painumaksi ja vaakasuuntaista plastiseksi kutistumaksi. (Betonitekniikan oppikirja. 2004, 69-74; Leivo - Holt. 2001, 13-16.)

Suurin syy plastisten muodonmuutosten esiintymiseen on veden liian nopea haihtuminen tuoreesta betonipinnasta. Tämä johtuu yleensä liian myöhään aloitetusta jälkihoidosta tai sen laiminlyönnistä sekä betonimassan liiallisesta veden erottumisesta. (Betonitekniikan oppikirja. 2004, 69-74; Leivo - Holt. 2001, 13-16.)

Plastinen painuma johtuu betonin ja veden erottumisesta, jolloin kiviaines ja sementti vettä painavampina vajoavat alaspäin. Jos vajoaminen on estynyt esimerkiksi raudoituksen tai poikkileikkauksen muutoksen johdosta, syntyy tälle kohdalle plastisesta painumasta aiheutuva halkeama. Plastisen painuman suuruus riippuu siitä, kuinka pitkään betoni on plastisessa tilassa, eli kuinka kauan erottumiselle jää aikaa tapahtua. Toinen päätekijä on veden määrä betonissa: mitä enemmän vettä on, sitä enemmän sitä erottuu. Kylmissä olosuhteissa ilmiö korostuu, kun sementin sitoutumisaika pitenee ja vedelle jää enemmän aikaa erottua. (Betonitekniikan oppikirja. 2004, 69-74; Leivo - Holt. 2001, 13-16.)

Plastinen painuma voi olla jopa 1 % valettavan rakenteen valukorkeudesta sekä painuman aiheuttamat halkeamat useamman millimetrin levyisiä. Rakenteen sisälle mentäessä halkeamat kuitenkin sulkeutuvat yleensä nopeasti. (Betonitekniikan oppikirja. 2004, 72; Leivo - Holt. 2001, 13-16.)

Plastisella kutistumisella tarkoitetaan betonimassan kutistumista vaakatasossa. Kutistuma johtuu massan tilavuuden muutoksesta, jota tapahtuu, kun vesi haihtuu betonin pinnalta nopeammin kuin sitä erottuu massasta. (Betonitekniikan oppikirja. 2004, 73; Leivo - Holt. 2001, 13-16.)

Veden haihtuessa ja pinnan kuivuessa pinnan lähellä olevien pienten hiukkasten, lähinnä sementtahiukkasten, välille muodostuu kaarevia vesipintoja. Veden pintajännityksen ja veden sekä sementtahiukkasten välisen vetovoiman seurauksena betonimassa kutistuu. Samalla kapillaarihuokosista syntyy alipaine, joka pyrkii imemään syvemmältä vettä pintaan. (Betonitekniikan oppikirja. 2004, 73; Leivo - Holt. 2001, 13-16.)

Niin kauan kuin kiviainesrakeet ja sementtahiukkaset pystyvät liikkumaan alaspäin ja täyttämään haihtuvan veden tyhjäksi jättämän tilan, on betonin tilavuuden pieneneminen yhtä suuri kuin haihtuvan veden määrä, eikä halkeamia tällöin muodostu. Kun runkoainerakeet ja hiukkaset sisäisen kitkan kasvun johdosta eivät enää kykene liikkumaan, syntyy kalvovoimista aiheutuvien vetovoimien vaikutuksesta pintaan vetojännityksiä, jotka voivat aiheuttaa plastisen kutistuman aiheuttamia halkeamia. (Betonitekniikan oppikirja. 2004, 73; Leivo - Holt. 2001, 13-16.)

## 4 BETONIN JÄLKIHOITO

Jälkihoidon tarkoituksena on luoda vasta valetulle betonipinnalle olosuhteet, joissa valettu rakenne saavuttaa sille asetetut ominaisuudet ja loppulujuuden. Jälkihoidon laiminlyöminen tai liian myöhäinen aloittaminen saattaa aiheuttaa rakenteelle lujuuskatoa, plastista kutistumista ja -painumista sekä betonipinnan halkeilua. (Betoninormit. 2012, 127-128,198; Leivo - Holt. 2001, 22.)

Jälkihoito perustuu veden haihtumisen estämiseen betonipinnasta. Pinnan pitäminen kosteana on välttämätöntä, jotta betonin kovettumisreaktiot jatkuisivat riittävän kauan ja että betonipeite saavuttaisi sille asetetut lujuus- ja tiiveys vaatimukset. Jälkihoitamattoman pinnan seurauksena on pinnan halkeilu ja veden haihtuessa myös lujuuden kasvun pysähtyminen. (Betonitekniikan oppikirja. 2004, 331-332; Leivo - Holt. 2001, 20.)

Lujuuden kasvu pysähtyy aluksi rakenteen pintaosissa. Pinnan kuivuessa riittävästi betonin suojahuokosissa esiintyy kapillaari-ilmiö, joka alipaineen avulla nostaa veden rakenteen alemmista osista pintaa kohti, jolloin betonin sitoutumisreaktiot hidastuvat ja loppujen lopuksi pysähtyvät. Erityisesti paksuihin rakenteisiin syntyy tällöin helposti halkeamia, koska betonilla on lujuudenkehityksen alkuvaiheessa heikko vetolujuus. Kutistumisen alkua tulee siten siirtää betonin jälkihoidolla siihen asti, kunnes betoni on saavuttanut riittävän lujuuden halkeilua vastaan. (Betonitekniikan oppikirja. 2004, 332, 429, 433.)

Betonipinnan jälkihoito tulee aloittaa heti pinnan työstön jälkeen, kunhan tuore betoni kestää jälkihoitotoimenpiteet. Vasta valetun betonipinnan suojaaminen tarkoitukseen sopivalla peitteellä tai muulla vastaavalla estää myös ulkoiset haittavaikutukset. Varsinkin ulkona tapahtuva valutyö on alttiina sateelle ja auringon paisteelle. Peite estää sateen ja veden huuhtomasta sementtiä kovettuvasta massasta sekä estää veden haihtumisen auringon ja tuulen vaikutuksesta. (Betoninormit. 2012, 127; Betonitekniikan oppikirja. 2004, 201, 431; Leivo - Holt. 2001, 24, 26-27.)



Tehdasolosuhteissa tai muussa vastaavassa, missä riskitekijänä ei ole sateelle tai auringolle altistuminen, voidaan betonipinta käsitellä jälkihoitoaineella. Jälkihoitoaine levitetään ruiskuttamalla tasainen ohut kerros vasta valetun pinnan päälle, jolloin se muodostaa vesihöyryä (lähes) läpäisemättömän kalvon ja estää täten veden liiallisen haihtumisen rakenteesta ja luo olosuhteet, missä betonin kovettumisreaktiot tapahtuvat niille suotuisissa olosuhteissa. Ennen jälkihoitoaineiden käytön aloittamista tulisi suorittaa alkutestaukset, joilla voidaan osoittaa, että jälkihoitoaineella päästään samoihin lujuusluokkiin kuin esimerkiksi vesihöyryä läpäisemättömällä peitteellä tai jollain muulla hyväksytyllä jälkihoitotavalla. (Taulukko 1.) (Betonitekniikan oppikirja. 2004, 430, 434; Leivo - Holt. 2001, 24, 26.)

*TAULUKKO 1. Suojaaminen kuivumiselta (SFS-EN 13369 4.2.1.3)*

Menetelmä	Tyypillinen toteutustapa
A Ei lisätä vettä	<ul style="list-style-type: none"> <li>— betoni pidetään ympäristössä, jonka suhteellinen kosteus on yli 75 %</li> <li>— muotti pidetään paikallaan</li> <li>— betonin pinta peitetään höyryä läpäisemättömillä peitteillä, joiden reunat ja jatkokset on varmistettu siten, että ei ole läpivetoa</li> </ul>
B Betoni pidetään kosteana lisäämällä vettä	<ul style="list-style-type: none"> <li>— betonin pinnalla pidetään kostea peite</li> <li>— betonin pinta pidetään näkyvästi kosteana vettä ruiskuttamalla</li> <li>— lammikoidaan vesi betonin pintaan</li> </ul>
C Käytetään jälkihoitoaineita	HUOM. Tämän menetelmän tehokkuus tulisi arvioida alkutestauksella osoittamalla, että jälkihoitoaineilla saavutettu lujuus on samaa luokkaa kuin jollakin yllä mainitulla hyväksytyllä jälkihoitomenetelmällä.

Standardissa SFS-EN 13369: Betonivalmisteiden yleiset säännöt määrittävät rakenteen rasitusluokkaan perustuva betonin vähimmäislujuus, jolloin rakenteen jälkihoito voidaan lopettaa. (Taulukko 2.)

*TAULUKKO 2. Betonin vähimmäislujuus kuivumiselta suojaamisen päättyessä (SFS-EN 13369 4.2.1.3)*

Käyttöpaikan ympäristöolosuhteet (EN 206-1:n rasitusluokat)	Betonin vähimmäislujuus kuivumiselta suojaamisen päättyessä		
	Kovettumisaste prosentteina vaaditusta 28 vrk:n lujuudesta		Lieriö/kuutiolujuus N/mm <sup>2</sup>
Raudoittamaton tai metalliosia sisältämätön betoni: X0 Kaikkiin ympäristöihin lukuun ottamatta jäädytys- sulatusrasitusta, kulutusta tai kemiallista rasitusta.		Vain lieriö/ kuutiolujuutta koskeva vaatimus	12/15
Raudoitettu tai metalliosia sisältävä betoni: Kuiva tai pysyvästi märkä XC1			
Märkä, harvoin kuiva XC2, XD2	40	tai	16/20
Kohtalaisen kostea XC3			
Kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita XF1			
Muut ympäristöolosuhteet (märkä ja kuiva vaihtelevat)	60	tai	25/30

Betoninormien mukaan jälkihoito voidaan lopettaa rasitusluokissa X0 ja XC1, kun betoni on saavuttanut 60 % nimellislujuudestaan. Muissa rasitusluokissa kuin XF2 ja XF4 tai rakenteilta, joilta edellytetään erityistä kulutuskestävyyttä, tulee jälkihoitaa niin, että betoni on saavuttanut 80 % nimellislujuudestaan. Betonin jälkihoitoon kuuluu olennaisesti myös lämpötilojen hallinta. Rakenteen lämpötilaerot eivät saa kasvaa haitallisen suuriksi. Tämä korostuu lähinnä talvella. Tuoreen elementin lämpötilaerojen tulee tasaantua ennen siirtoa ulkoilmaan. (Betoninormit. 2012, 128.)

Betonielementtitehtailla pyritään nopeaan muottikiertoon. Tällöin on olennaisen tärkeää, että jälkihoito on tehokasta ja toimivaa. Edellisenä päivänä valetun elementin tulee saavuttaa sille asetettu vähimmäislujuus jopa ensimmäisen 16 tunnin aikana, jotta muottipaikka voitaisiin hyödyntää heti valmistuksen jälkeisenä päivänä. Elementtitehtailla tulisi olla kullekin tuoteperheelle parhaiten soveltuva jälkihoitomenetelmä selvillä, jotta päästäisiin mahdollisimman laadukkaaseen lopputulokseen, niin tuotannon tehokkuuden, laadun, kustannusten kuin toteutettavuudenkin osalta. (Betonitekniikan Oppikirja. 2004, 356-357, 360.)

## 5 JÄLKIHOIDON TUTKIMUSMENETELMÄT

Jälkihoitotutkimukseen valittiin kolme ainesosiltaan tai koostumukseltaan erilaisista jälkihoitoainetta ja kolme eri jälkihoitomenetelmää sekä vertailulähtökohdaksi jälkihoitamaton vapaasti kuivuva laatta. Betonimassaksi päädyttiin valitsemaan tehtaalla yleisimmin käytössä oleva IT-betoni sen parhaiten tiedossa olevien ominaisuuksien ja käyttäytymisen perusteella.

Kovettuneelle betonimassalle tehtiin puristuslujuus- ja kutistumamittauksia 1–30 vuorokauden ikäisenä sekä tutkittiin elementtimassojen todellisia prosessilämpötiloja elementtituotannossa. Tutkimuksen aikana kaikista koekappaleista pyrittiin korostamaan jälkihoitomenetelmien välisiä eroja estämällä koekappaleiden kuivuminen muihin kuin jälkihoidettuun suuntaan.

### 5.1 Puristuslujuus

Puristuslujuustestejä varten valmistettiin testisarja (sarja A), jossa simuloitiin 100 mm vahvan laattaelementin valu- ja kuivumisolosuhteita. Sarja koostui seitsemästä 700 X 500 X 103 mm<sup>3</sup> laatasta, joiden pohjaan liimattiin 12 kappaletta nimellishalkaisijaltaan 110 mm:stä putkea (kuva 2). Nämä toimivat koekappalemuotteina puristuslujuustestejä varten, koekappaleita valmistettiin yhteensä 84 kappaletta. Lisäksi kustakin kutistuma laatasta porattiin ja testattiin kolme rakennekoekappaletta 30 vuorokauden ikäisenä.



*KUVA 2. Sarjan A koekappalemuotit*

Betonimassa valettiin suoraan valuastiasta, massa levitettiin tasaiseksi ja pinnat teräshierrettiin. Koekappalemuottien tiivistymisen varmistamiseksi laattoja tärytettiin tärypöydällä noin 2 – 3 sekuntia. Tuoreet betonipinnat jälkihoidettiin ennalta määrätyillä jälkihoitomenetelmillä. (Kuva 3.) Menetelmäkuvaukset esitellään luvussa 5.3 Jälkihoitomenetelmät.



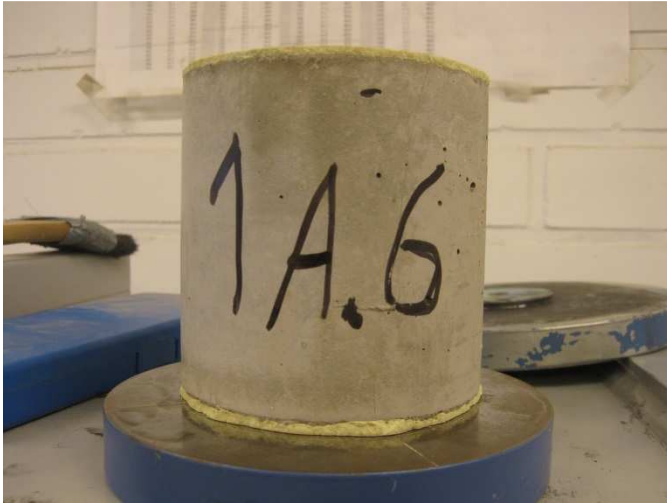
*KUVA 3. Sarjat A ja B jälkihoidettuna*

Seuraavana aamuna muotit purettiin ja koekappaleet irrotettiin laatoista. Koekappaleet käärittiin heti irrotuksen jälkeen muovikelmuun siten, että kappale pääsi kuivumaan vain jälkihoidetun pinnan suuntaan. SFS-EN 12390-2 mukaisesta standardisäilytyksestä poiketen, koekappaleita säilytettiin tehdasolosuhteissa vesisäilytyksen sijaan. (Kuva 4.) Koekappaleille annettiin näin samat kuivumisolosuhteet kuin tuotannossa oleville elementeille. Tällä pyrittiin korostamaan jälkihoitomenetelmien eroja.



*KUVA 4. Koekappaleet kelmutettuina odottamassa testausta*

Puristuslujuus testattiin kappaleista 1, 2, 7 ja 14 vuorokauden ikäisenä. Ennen testausta koekappaleet mitattiin ja punnittiin. Lisäksi puristuspinnat suoristettiin sekä tasoitettiin rikkiseosmenetelmällä. (Kuva 5.)



*KUVA 5. Koekappale 1A.6 valmiina puristusta varten*

Puristuslujuus testattiin Rajavillen Oy:n Korvenkylän tehtaan betonilaboratoriossa. Testaus laitteistona toimi ADR-betonintestauslaite (kuva 6) jonka puristus-kapasiteetti on 2000 kN.

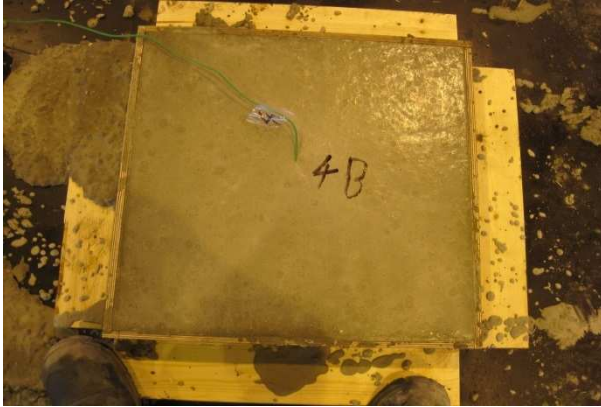


*KUVA 6. ADR-betonintestauslaite*

## **5.2 Kutistuma**

Kutistumamittauksia varten valmistettiin neljä 500 x 500 x 100 mm<sup>3</sup>:n (kuva 7) laattoja (sarja B). Laatat valettiin samassa yhteydessä sarjan A kanssa. Pinto-

jen jälkihoidossa käytettiin neljää eri menetelmää, yhtä ainetta ja kahta peitettä. Kontrollilaatta 1B jätettiin jälkihoitamatta. Lisäksi laatoista mitattiin vertailua varten massan lämmönkehitys valuajankohdasta laattojen purkuun saakka.



*KUVA 7. Kutistumalaatta 4B peitteiden purun jälkeen*

Valun jälkeisenä aamuna laatat purettiin muotista ja käärittiin muovikelmuun siten, että laatat pääsivät kuivumaan vain jälkihoidetun pinnan suuntaan. Laatat siirrettiin Oamk Oy:n rakennuslaboratorioon kutistumamittauksia varten.

Kutistumamittaukset suoritettiin mittatappimenetelmällä. Menetelmässä laatan pintaan kiinnitetään epoksiliimalla mittatapit, joiden etäisyyden muutosta mitataan siihen soveltuvalla mittakellolla. (Kuva 8.) Jokaiseen laattaan kiinnitettiin mittatapit siten, että kuhunkin laattaan muodostui kaksi mittauspistettä. Menetelmän mittatarkkuus on 0,001 mm (kuva 9).



*KUVA 8. Kutistumalaatta 4B, kutistumanastat asennettu*

Kutistumamittaukset päästiin aloittamaan laattojen ollessa kahden vuorokauden ikäisiä. Ensimmäisenä mittauspäivänä mitattiin alkumitat, joihin seuraavien päivien tuloksia verrattiin (kuva 9).



*KUVA 9. Controls mittakello*

### **5.3 Jälkihoitomenetelmät**

Koelaattojen jälkihoito aloitettiin välittömästi pinnan viimeistelyn jälkeen. Jälkihoitoaineet levitettiin valmistajien ohjeiden mukaisesti joko tuoreelle betonipinnalle tai vapaanveden imeytyttyä. Laatat nimettiin jälkihoitomenetelmän numeroinnin 1-7 sekä näille suoritettavien kokeiden perusteella, jossa A tarkoittaa puristuslujuutta ja B kutistumaa.

#### **Menetelmä 1: Jälkihoitamaton**

Jälkihoitamattomat laatat 1A ja 1B pääsivät vapaasti kuivumaan avopintansa kautta. Nämä laatat toimivat vertailu- ja kontrollilähtökohtina tutkimuksessa. Lähtökohtaisesti jälkihoidettujen laattojen tulisi osoittaa parempia tuloksia.

#### **Menetelmä 2: Muovipeite**

Laatat 2A sekä 2B peitettiin vesihöyryä läpäisemättömällä muovipeitteellä heti valun jälkeen. Laatat peiteltiin siten, ettei vallitseva ilmavirta päässyt vaikuttamaan betonin pintaan.



### **Menetelmä 3: Jälkihoitoaine parafiinidispersio**

Jälkihoitoaine levitettiin valmistajan ohjeen mukaan laattoihin 3A sekä 3B. Valmistajan ohjeen mukaan jälkihoitoaine levitetään tuoreelle betonipinnalle 0,15–0,21 l/m<sup>2</sup>. Tarvittava määrä jälkihoitoainetta mitattiin sumutepulloon ja ruiskutettiin ohut tasainen kerros laattojen pinnalle. Laatan 3A pinnalle ruiskutettiin noin 62 ml (0,18 l/m<sup>2</sup>) ja laatan 3B pinnalle noin 45 ml (0,18 l/m<sup>2</sup>) jälkihoitoainetta.

### **Menetelmä 4: Tiilirasteripeite**

Laatat 4A ja 4B peitettiin tiilirasteripeitteellä. Peitteen reunat taiteltiin niin, etteivät ilmavirtaukset päässeet vaikuttamaan betonipinnalle.

### **Menetelmä 5: Jälkihoitoaine akrylidispersio**

Jälkihoitoaine levitettiin valmistajan ohjeen mukaisesti 0,125-0,166 l/m<sup>2</sup> välittömästi pinnan viimeistelyn jälkeen. Laatan 5A pinnalle ruiskutettiin sumutepullolla noin 50 ml jälkihoitoainetta (0,143 l/m<sup>2</sup>).

### **Menetelmä 6: Jälkihoitoaine akryyliemulsio**

Jälkihoitoaine levitettiin valmistajan ohjeiden mukaisesti 0,15–0,2l/m<sup>2</sup> vapaan veden imeytyttyä. Laatan 6A pinnalle ruiskutettiin sumutepullolla noin 60 ml jälkihoitoainetta (0,17 l/m<sup>2</sup>).

### **Menetelmä 7: Pinnan pitäminen näkyvästi kosteana**

Laatan 7A pinta pidettiin näkyvästi kosteana suihkuttamalla sumutepullolla vettä, valuhetkestä noin kuuden tunnin ajan. Kuuden tunnin jälkeen pinta oli tarpeeksi kova, jotta laatan pinnalle voitiin lammikoida vesikerros.

## **5.4 Lämpö ja kosteus**

Tuotantotilojen olosuhteita tutkittiin tuotantoprosessin aikana elementtimassoista. Lisäksi tehtiin ulko- ja sisäilma tarkastelua lämpötilojen ja suhteellisen kosteuden osalta.

Tutkimuksessa käytetyn betonimassan lämmönkehitystä mitattiin elementti tuotannossa erikokoisista ja -tyyppisistä elementeistä. Lämmönkehitys mitattiin käyttämällä K-tyypin termoparia (NiCr) ja 4-paikkaista Testo 177-T4 datalogge-

ria (kuva 10). Lämpötilamittauksilla pyrittiin kartoittamaan tehtaan betonimassojen todellisia prosessilämpöjä ja tätä kautta määrittelemään todellinen jälkihoiton tarve.



*KUVA 10. Testo 177-T4 logger*

Ennen mittauksen aloittamista termoparit kalibroitiin mineraalivillassa. Todettiin, ettei merkittäviä eroja antureiden välillä ollut. Samanlaisissa termopareissa voi esiintyä eroja, riippuen anturin pituudesta ja liitosten laadusta. Ilmastotutkimusta tehtiin tuulen osalta aistinvaraisin menetelmin. Suhteellisen kosteuden sekä lämpötilojen tarkastelu tehtiin ALMEMO 2096-1 lämpö- ja RH-mittarilla (kuva 11).



*KUVA 11. ALMEMO 2096-1 RH% ja lämpömittari*

## 6 TULOKSET

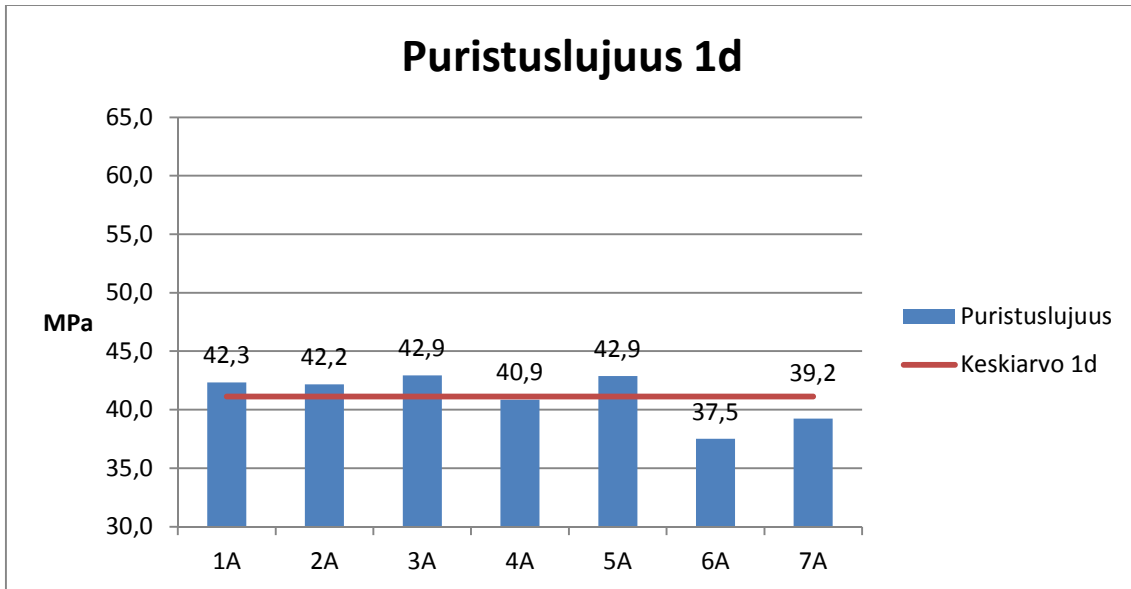
Opinnäytetyössä tutkittiin betonin varhaisvaiheen kovettumista ja siihen vaikuttavia ominaisuuksia sekä olosuhteita. Mittaukset suoritettiin 7.4–5.5.2014 Rajaville Oy:n Korvenkylän tehtaalla sekä Oamk Oy:n rakennuslaboratoriossa. Tässä luvussa esitetään tutkimuksessa saadut mittausravot sekä analysoidaan tuloksia ja niiden luotettavuutta. Suoritettaviin tutkimuksiin kuuluivat kovettuneen betonin puristuslujuus, kutistuma-arvot sekä lämpötilamittaukset tuotannosta ja koelaatoista.

### 6.1 Puristuslujuus

Puristuslujuustestien tarkoitus oli saada selville jälkihoitomenetelmien erot toisiinsa nähden. Tämän vuoksi mittasuureeksi valittiin suora puristuslujuus (MPa). Koekappaleet valettiin nimellishalkaisijaltaan 110 mm:n putken sisään niin, että kappaleiden pituuden ja halkaisijan suhteeksi saatiin 1:1 ±1 %.

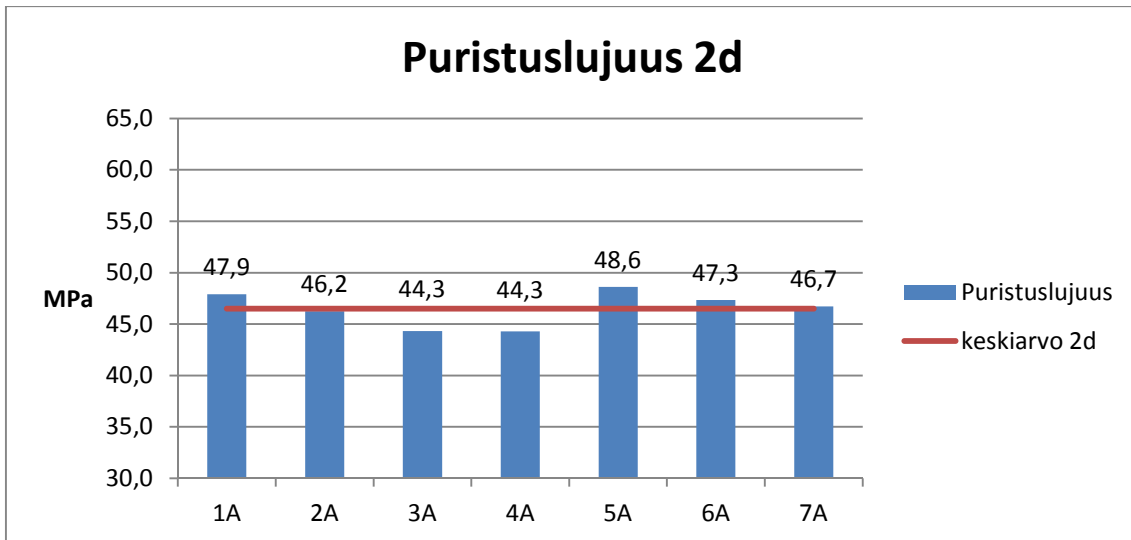
Koekappaleita valmistettiin yhteensä 84 kappaletta. Kappaleet puristettiin 1, 2, 7 ja 14 vuorokauden ikäisenä. Yhdelle testausvuorokaudelle kertyi 21 puristettavaa kappaletta. Muottien purun yhteydessä koekappaleet nimettiin laattatunnuksen perusteella sekä yksilöitiin järjestysnumerolla 1-12. Järjestysnumeron perusteella koekappaleelle määräytyi testausajankohta. Kappaleet 1-3 testattiin vuorokauden ikäisenä, kappaleet 4-6 kahden vuorokauden ikäisenä, kappaleet 7-9 viikon ikäisenä sekä kappaleet 10-12 kahden viikon ikäisenä. Lisäksi kustakin kutistumalaatasta 1B–4B testattiin 30 vuorokauden ikäisenä kolme rakennekoekappaletta, yhteensä 12 kappaletta. Puristuslujuustulokset on esitetty sarja- ja vuorokausikohtaisina keskiarvoina.

Ensimmäisen testausvuorokauden (kuva 12) puristuslujuustuloksien keskiarvo oli 41,4 MPa. Suurin ero keskiarvoon saatiin sarjasta 6A (-3,9 MPa). Jälkihoitamaton sarja 1A kehitti lujuutta jälkihoitettujen sarjojen tapaan. Kappalekohtaiset puristuslujuustulokset on esitetty liitteessä 1.



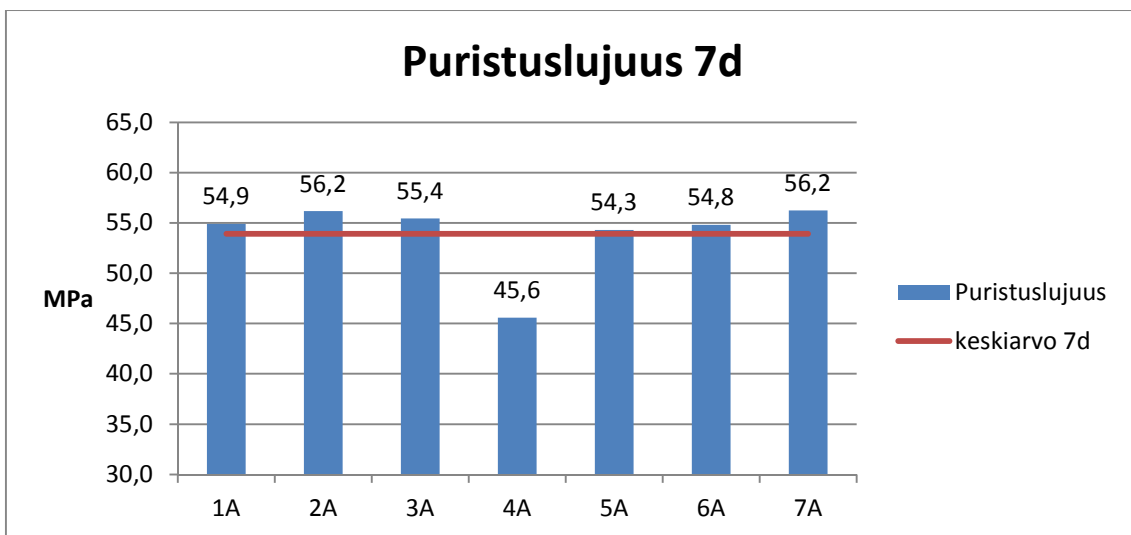
KUVA 12. Puristuslujuuksien keskiarvot sarjoittain 1d (N/mm<sup>2</sup>), sarja A

Toisen testausvuorokauden koekappaleiden (kuva 13) keskiarvo oli 46,5 MPa. Suurimmat erot ovat sarjoissa 3A ja 4A (-2,2 MPa) sekä sarjalla 5A (+2,1 MPa). Jälkihoitamaton sarja 1A kehitti lujuutta keskiarvoon nähden +1,4 MPa. Toisen vuorokauden kappalekohtaiset puristuslujuustulokset on esitetty liitteessä 2.



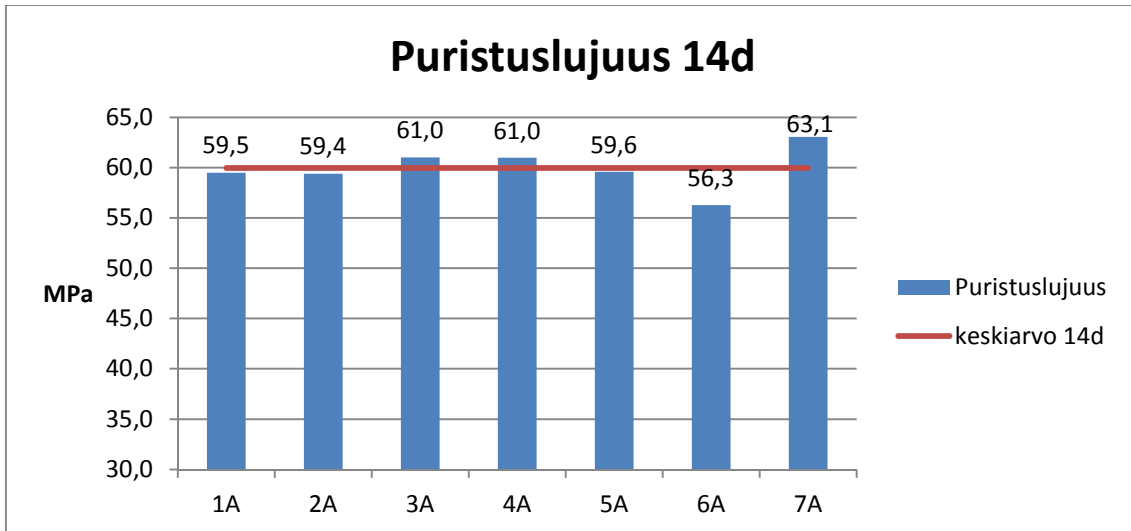
KUVA 13. Puristuslujuuksien keskiarvot sarjoittain 2d (N/mm<sup>2</sup>), sarja A

Puristuslujuuksien keskiarvo seitsemän vuorokauden (kuva 14) ikäisenä oli 53,9 MPa, suurin erotus keskiarvoon nähden oli sarjalla 4A (-8,3 MPa). Jälkihoitamaton sarja 1A kehitti lujuutta hieman yli keskiarvon (+1 MPa). Seitsemän vuorokauden kappalekohtaiset puristuslujuustulokset on esitetty liitteessä 3.



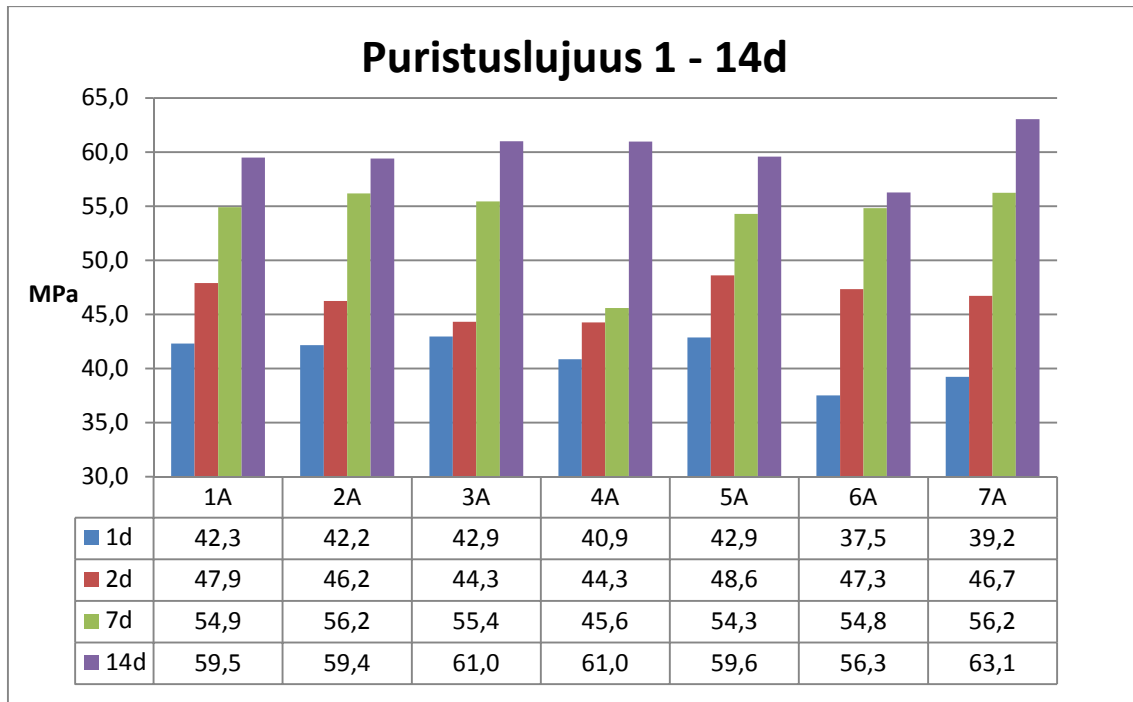
KUVA 14. Puristuslujuuksien keskiarvot sarjoittain 7d (N/mm<sup>2</sup>), sarja A

Puristuslujuuksien keskiarvo 14 vuorokauden (kuva 15) ikäisenä oli 60,0 MPa. Suurin erotus saatiin sarjasta 6A (-3,7 MPa). Jälkihoitamaton sarja 1A kehitti lujuutta hieman alle keskiarvon (-0,5 MPa). 14 vuorokauden kappalekohtaiset puristuslujuustulokset on esitetty liitteessä 4.



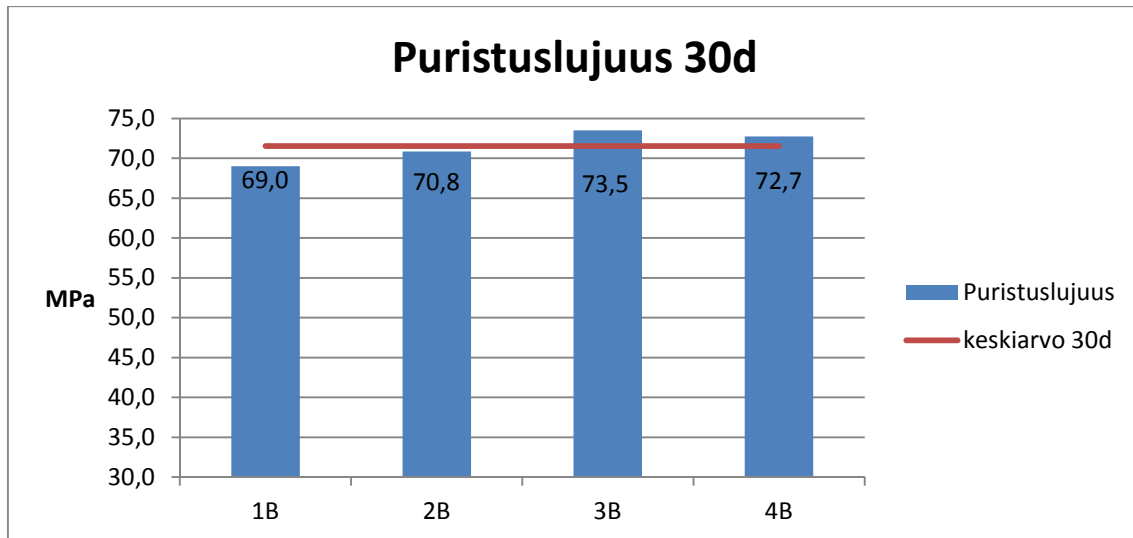
KUVA 15. Puristuslujuuksien keskiarvot sarjoittain 14d (N/mm<sup>2</sup>), sarja A

Kuvassa 16 on yhdistetty kaikki neljä testausajankohtaa. Lujuuksista voidaan todeta, että sarjojen lujuudenkehitys oli samansuuntaista. Käytetyllä jälkihoitomenetelmällä ei ole ollut suurta merkitystä. Suurimmat erot syntyivät muutaman koekappaleen hajonnasta.



KUVA 16. Puristuslujuuksien yhdistetyt keskiarvot sarjoittain 1-14d (N/mm<sup>2</sup>), sarja A

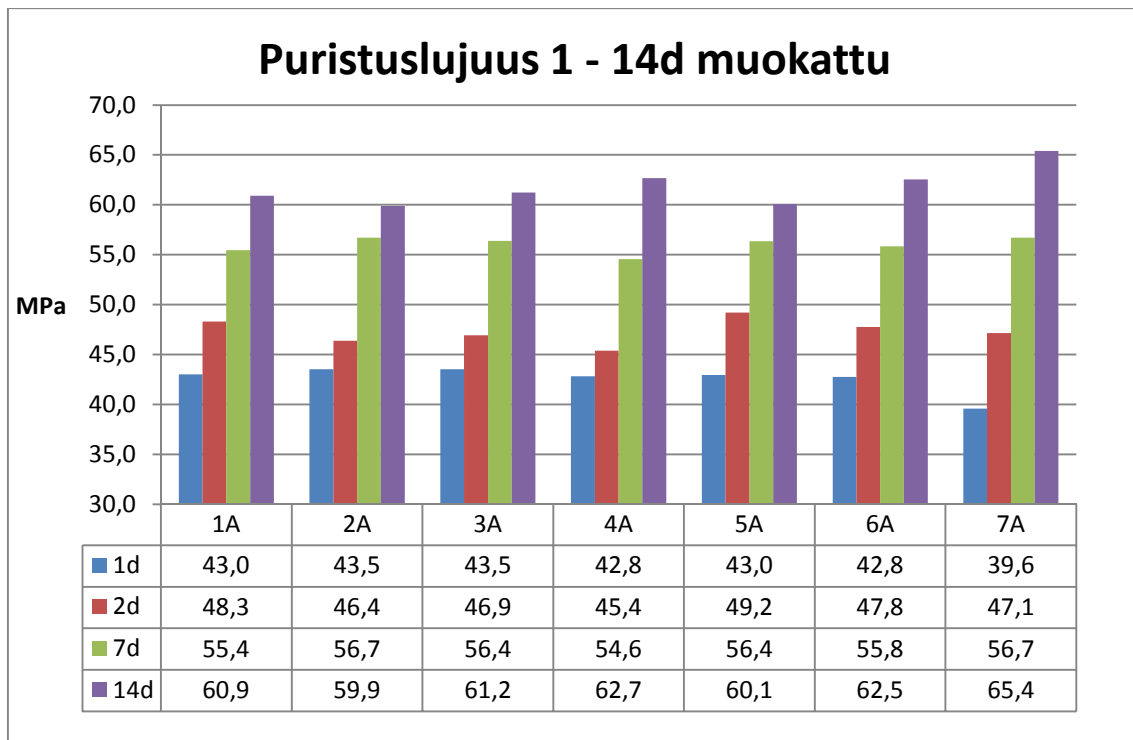
Kutistumalaatoista testattiin 30 vuorokauden ikäisenä rakennekoekappaleet, puristuslujuuden keskiarvo oli 71,5 MPa (kuva 17). Laattoja säilytettiin Oamk Oy:n rakennuslaboratoriossa normaalissa huoneilmastossa testaushetkeen saakka. Kutistumalaatat olivat kelmutettuna siten, etteivät laatat päässeet kuivumaan kuin jälkihoitettujen pintojen suuntaan. Suurimmat poikkeamat keskiarvosta saatiin jälkihoitamattomasta laatasta 1B (-2,5 MPa) sekä parafiinipohjaisella jälkihoitoaineella jälkihoitettusta laatasta 3B (+2 MPa). Puristuslujuustulokset on esitetty liitteessä 5.



*KUVA 17. Puristuslujuuksien keskiarvot 30d (N/mm<sup>2</sup>), sarja B rakennekoekappaleet*

Kuvan 18 tuloksista on poistettu sekä sarja- että vuorokausikohtaiset puristuslujuuksiin epäedullisimmin vaikuttavat lujuustulokset. Tuloksista nähdään, että muutamassa kappaleessa oli suurta hajontaa, jotka omalta osaltaan vaikuttivat tuloksiin. Muokatuissa sarjoissa (kuva 18) lujuuden kehitys sarjojen välillä on tasaisempaa mutta samansuuntaista kuin muokkaamattomissakin tuloksissa (kuva 16).

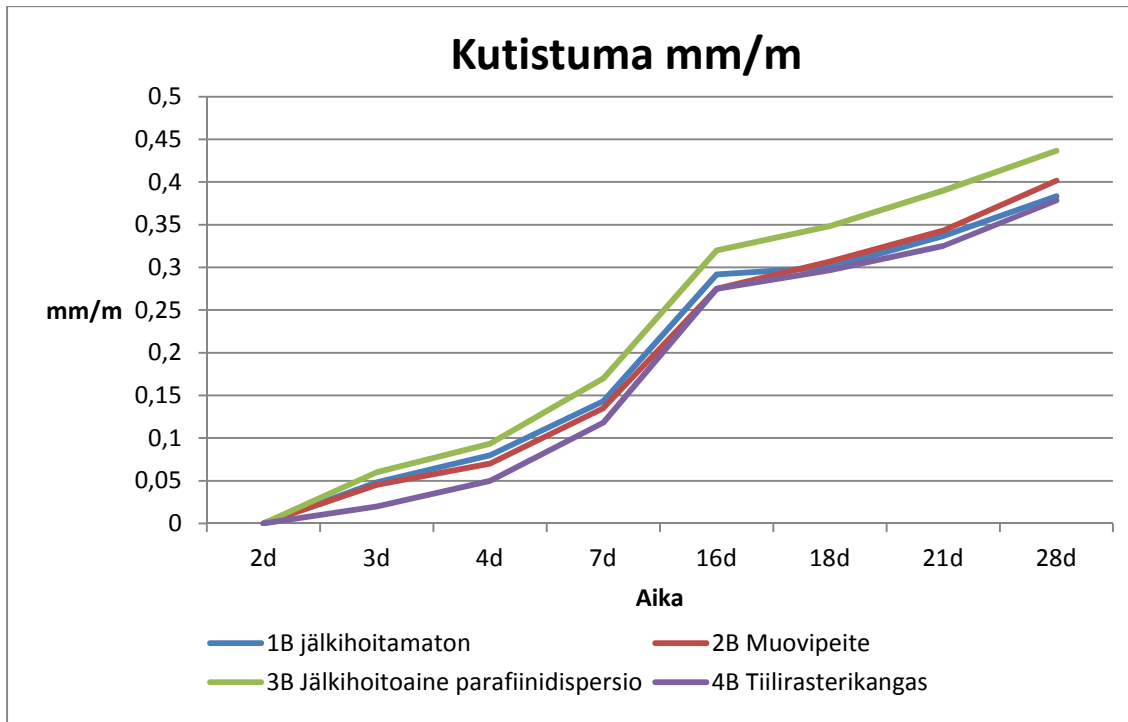




*KUVA 18. Puristuslujuuksien yhdistetyt keskiarvot 1–14d (N/mm<sup>2</sup>) sarja A, muokattu*

## 6.2 Kutistuma

Kutistumamittauksia varten valmistettiin 4 eri jälkihoitomenetelmällä käsiteltyä laattaa, mittaukset suoritettiin Oamk Oy:n rakennuslaboratoriossa laattojen ollessa 2–28 vuorokauden ikäisenä. Tutkimuksessa pyrittiin korostamaan menetelmien eroavaisuuksia varhaisvaiheen kutistumien hallinnassa. Kutistumamittauksien tulokset on esitetty yksikössä mm/m. 28 vuorokauden ikäisenä kutistumat olivat välillä -0,378 - -0,436 mm/m (kuva 19). Suuria jälkihoitomenetelmien aiheuttamia eroja ei ole havaittavissa. Kutistuma mittauksien tulokset on esitetty liitteessä 6.



KUVA 19. Kutistuma-arvot 2–28d (mm/m), sarja B

### 6.3 Lämpö ja olosuhteet

Tehtaan todellisen jälkihoitotarpeen arvioimiseksi suoritettiin prosessilämpöjen tarkastelua tuotannosta. Lisäksi suoritettiin olosuhdemittauksia lämmön ja suhteellisen kosteuden osalta tuotantotiloista. Betoninormeissa on annettu raja-arvot, jolloin rakenne katsotaan lämpökäsitellyksi. Lämpökäsittelyllä tarkoitetaan lämmitysmenettelyä, jolla nopeutetaan betonin lujuudenkehitystä. (Betoninormit. 2012, 127-128.)

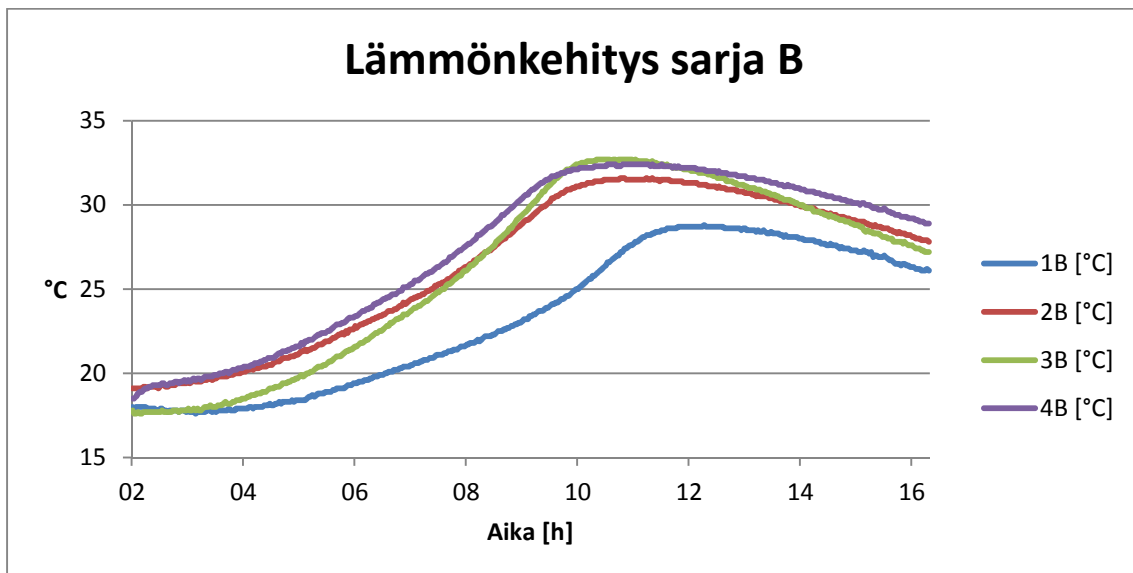
Betoni katsotaan lämpökäsitellyksi, jos betonimassan lämpötila on korkeampi kuin +40 °C, lämpötilan nousu kovettumisvaiheen aikana on suurempi kuin 25 °C tai lämpötila kovettumisvaiheen aikana nousee korkeammaksi kuin +50 °C. Lämpökäsittelyn vaikutus betonin ominaisuuksiin selvitetään etukäteen kokeiden avulla. Liian korkea lämpötila liian varhaisessa vaiheessa voi häiritä sementin normaalia hydrataatiota. Tämän takia ei suositella yli 60 °C:n lämpötiloja. Betoninormeissa on myös määritelty rakenteen jäähtymisen nyrkkisäännöt. Mitä

paksumpi rakenne on, sitä hitaammin betoni saa jäähtyä. Esimerkiksi 300 mm paksu rakenne saa jäähtyä enintään 30 °C 24 tunnin aikana. (Betoninormit. 2012, 127-128.)

Lämmönkehitystä mitattiin useista erityyppisistä elementeistä. Tuloksissa on esitetty näistä kaksi riskitapausta.

### Lämmönkehitys

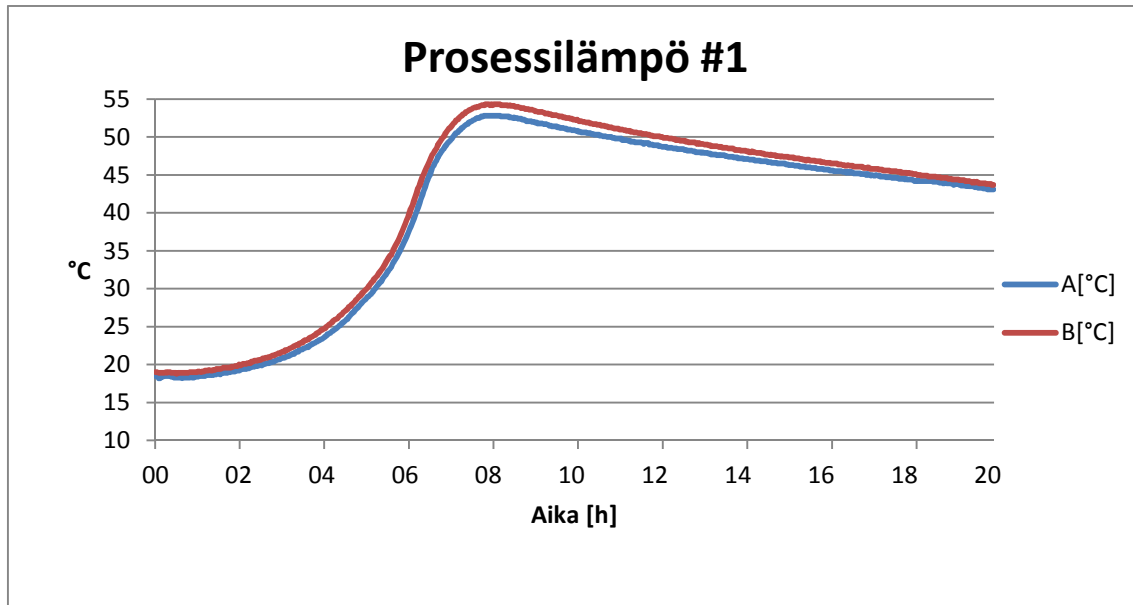
Kutistumalaatoista (sarja B) mitattiin lämmönkehitys laattojen purkuhetkeen saakka. Jälkihoitamaton laatta 1B kehitti vähemmän lämpöä kuin sarjat 2B, 3B ja 4B. Jälkihoitomenetelmällä näytti olevan vaikutusta valettavan kappaleen lämmönkehitykseen. Parafiinipohjaisella jälkihoitoaineella käsitelty laatta 3B näytti kehittävän suurimman lämpötilan (kuva 13).



KUVA 13. Kutistumalaattojen 1B-4B lämmönkehityksen huippu

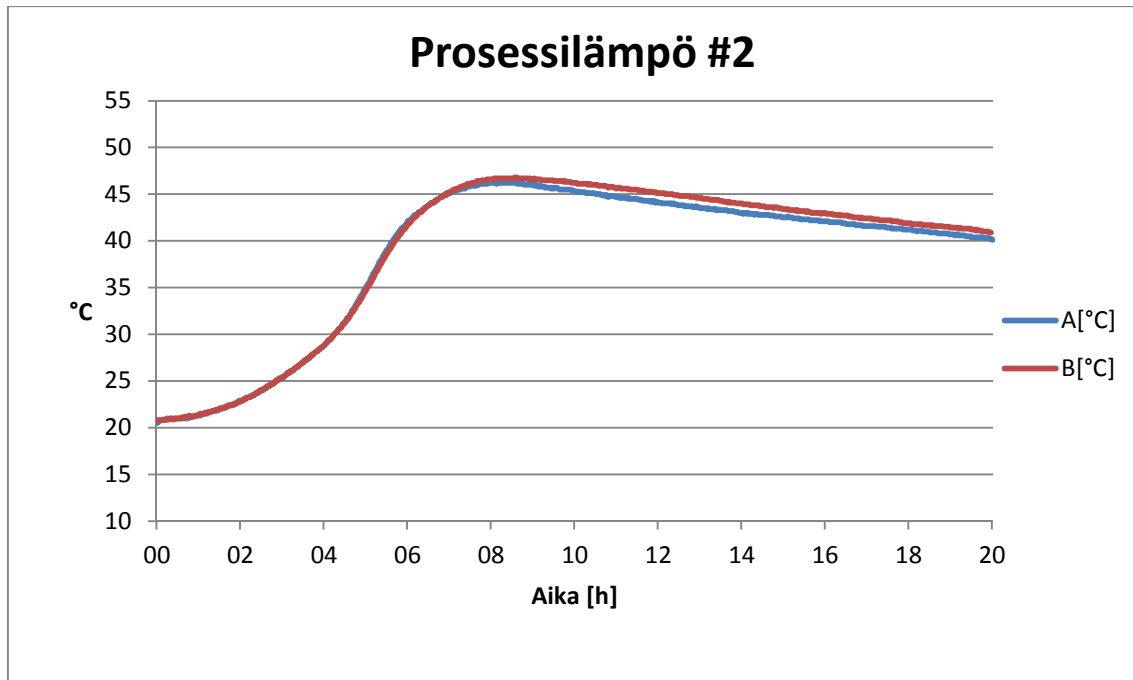
Kuvassa 14 esitetään itsetiivistyvän korkealujuusbetonin lämmönkehityksen huippu. Lämmönkehitys alkoi nousta voimakkaasti noin 3,5 tuntia valun jälkeen ja alkoi jälleen laskea 8 tunnin kohdalla. Suurin mitattu lämpötila oli 54,2 °C. Tässä tapauksessa betoni katsotaan lämpökäsitellyksi, koska lämpötilan nousu kovettumisvaiheen aikana oli noin +36 °C sekä lämpötila oli noussut korkeam-

maksi kuin 50 °C. Kovettumisreaktioiden hidastuessa , lämmönkehitys kääntyi laskuun 0,8 °C/h, eli noin 19 °C/24h pysyen betonin ormeissa annettujen ohje-vojen sisällä. (Kuva 14.)



KUVA 14. Prosessilämpö #1

Kuvassa 15 on kuvattu tavanomaisen itsetiivistyvän elementtimassan lämmönkehityksen huippu. Lämmönkehitys oli voimakkaimmillaan noin 8 tunnin kohdalla ja laski tämän jälkeen tasaisesti. Suurin mitattu lämpötila oli 46,8 °C ja kovettumisvaiheen lämpötilanousu oli 26 °C, joten betoni katsotaan lämpökäsitellyksi. Kovettumisreaktioiden hidastuessa, lämmönkehitys kääntyi tasaiseen laskuun 0,5 °C/h. (Kuva 15.)



KUVA 15. Prosessilämpö #2

### Olosuhteet

Tuotantotilojen olosuhteita tarkasteltiin tuulen, lämmön ja suhteellisen kosteuden osalta. Voidaan olettaa, että kriittisimmät hetket betonin kovettumisen kannalta ovat hetket, kun betoni on vielä plastisessa tilassa, eli valuajankohdasta lujuusreaktioiden alkamiseen saakka. Tuotantotilojen ollessa suhteellisen uudet ovat tuuli sekä lämpö vakioita tilan ollessa suljettuna. Tehtaan oma kosteustuotto on vähäistä, joten ylimääräinen kosteustuotto on tuotantoprosesseista lähtöisin. Valuajankohdat tehtaalla sijoittuvat yleensä iltapäivään, jolloin vasta valettu tuore betoni saa rauhassa kovettua yön yli ilman ulkoisia rasitteita.

Sisä- ja ulkolämpötilojen sekä RH%-mittauksilla todettiin, että tuotantotilojen suhteellinen kosteus on hyvin riippuvainen ulkoilman kosteusprosentista. Tilojen lämpötilat taas vaihtelevat suuresti riippuen tehtaan tuotantomäärästä eli kovettuvan betonin määrästä sekä ulkoilman lämpötilasta.

## 7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia eri jälkihoitomenetelmien vaikutusta betonin ominaisuuksiin ja tarkastella betonimassan kuivumisolosuhteita tuotantotiloissa. Sekä täyttää SFS-standardissa 13369 annettu alkutestausvaatimus jälkihoitoaineen osalta. Työssä tutkittiin seitsemän eri jälkihoitomenetelmän vaikutusta betonin puristuslujuuteen, kutistumaan sekä lämmönkehitykseen.

### **Puristuslujuus**

Puristuslujuuksien osalta tutkimuksessa ei saatu selviä menetelmien aiheuttamia eroja esille. Koesarjat kehittivät lujuutta samansuuntaisesti. Ennakkolettamuksena oli, että jälkihoitettujen kappaleiden pitäisi kehittää suuremmat lujuudet verrattuna jälkihoitamattomaan betoniin.

Tuloksiin vaikutti oletettavasti se, että tuoreen betonin kuivumiseen vaikuttavat riskitekijät oli suljettu pois kokeesta. Koekappaleet valmistettiin noin 18 °C:n lämpötilassa ja tila oli täysin tuuleton.

Kutistumalaatoista poratuilla rakennekoekappaleilla tarkistettiin valettujen koekappaleiden tulokset. Tulokset olivat samansuuntaiset. Jälkihoitamattomasta laatasta poratut kappaleet antoivat heikoimmat tulokset, mutta 2,5 MPa ero keskiarvoon verrattuna on merkityksetöntä.

### **Kutistuma**

Kutistumamittaukset tehtiin betonin ollessa 2–28 vuorokauden iässä. Tarkasteluvälillä ei havaittu jälkihoitomenetelmän aiheuttamia selviä kutistumaeroja. Betonin kutistuminen on voimakkainta betonin ollessa vielä plastisessa tilassa, eli sinä aikana, kun sitoutumisreaktiot ovat käynnissä ja kovettumisreaktiot ovat alkamassa. Tutkimusvälineiden puutteellisuuden vuoksi kriittisintä aikaa ei päästy tutkimaan, eikä täten voida olla varmoja, ettei tänä aikana olisi tapahtunut haitallisia muodonmuutoksia.

Betonipinnan halkeilu on tyypillinen ilmiö liian nopeasti kuivuvalla raudoitetulla betonilla. Tutkimuksen kutistumalaatat olivat raudoittamattomia ja pinnan halkeilua ei ollut havaittavissa.

### **Lämmönkehitys**

Lämmönkehityksen osalta huomattiin, että käsittelemätön laatta (1B) kehitti lämpöä hieman vähemmän verrattuna jälkihoidettuihin laattoihin. Tämä osaltaan saattoi nostaa marginaalisesti betonin lujuudenkehitystä. Mahdolliset lujuuserot olivat tasoittuneet ensimmäisen vuorokauden testaushetkeen mennessä.

Tutkimuksen tuloksissa esitetyt prosessilämpömittaukset olivat kriittisimmät saadut lämpötilat. Molemmat ylittivät rajat, joiden perusteella betonirakenne luokitellaan lämpökäsitellyksi. Mittauksen kohteet olivat perustuotannosta poikkeavia suurempia elementtejä. Kriittisin ja eniten huomiota kaipaava lämpötilatarkastelu saatiin elementistä, jonka betonimassa oli lujuudeltaan C65/80 ja elementin tilavuus oli 5,6 m<sup>3</sup>. Korkealujuusbetonit kehittävät lämpöä niiden suuren sementtiosuuden ja tilavuuden vuoksi. Mikäli betoni luokitellaan lämpökäsitellyksi, betoninormin mukaan tehtaalta tulee löytyä lämpökäsittelysuunnitelma.

Suunnitelmassa lämpökäsittelyn vaikutus betonin ominaisuuksiin selvitetään etukäteen kokeiden avulla. Kokeilla selvitetään lujuudenkehitystä ja lujuuskatoa sekä vaadittaessa betonin muita ominaisuuksia kuten pakkasenkestävyyttä. Lämpökäsittelyn tulee vastata ennakkokokeita ja selvityksiä.

Tehdyissä mittauksissa ei havaittu, että betoni olisi päässyt jäähtymään annettuja raja-arvoja nopeammin. Kylmään vuoden aikaan tulee huolehtia siitä, ettei lämmintä betonia viedä ulkoilmaan. Tuoretta elementtiä tulee säilyttää sisällä niin kauan, että lämpötila elementissä on tasaantunut vallitsevan ympäristön lämpötilaan. Elementtitehtailta tämä aiheuttaa sen, ettei edellispäivänä valmistettua elementtiä voida toimittaa seuraavana päivänä työmaalle.

### **Alkutestaus**

Standardissa SFS-EN 13369 kohdassa 4.2.1.3 jälkihoito mainittuun alkutestausvaatimuksen täyttymiseen voidaan todeta, että tutkimuksessa mukana olleilla

jälkihoitoaineilla päästiin samoihin lujuuksiin kuin perinteisillä jälkihoitomenetelmillä. Tosin samoihin tuloksiin päästiin myös jälkihoitamattomalla betonilla.

Tutkimuksen aikana huomio kiinnittyi siihen, kuinka tarpeellista jälkihoito on nykyaikaisella elementtitehtaalla. Tutkimuksen perusteella edes tuoreen betonin peittäminen muovilla ei vaikuta lujuudenkehitykseen. Peittämällä saavutetaan vain se, että iltapäivällä peitetyn elementin pinta on muottia purettaessa kosteampi ja hieman lämpimämpi kuin vapaasti kuivuva betonipinta.

Kontrolloiduissa olosuhteissa, joissa suoran auringon, tuulen ja muiden veden haihtumista tehostavien ulkoisten tekijöiden vaikutus tuoreeseen betonipintaan on estetty, korostuukin itse betonin ominaisuudet. Valmistettavan betonimassan tulee olla ominaisuuksiltaan sellaista, ettei liian nopeaa veden erottumista tapahdu. Elementtiteollisuudessa betonin laadunvalvonta on jatkuvaa, muottikierto on nopeaa ja osa tuotteista vaatii, että päästään 60 – 70 % betonin nimellislujuteen yön yli kovettuessaan. Elementtituotannossa tulisikin keskittyä enemmän riskien hallintaan ja tunnistamiseen. Tämän tutkimuksen perusteella yleisesti käytössä olevat jälkihoitoaineet näyttävät olevan ylimääräinen työ- ja kuluerä tehtaalla.

Tarkempiin tuloksiin päästäisiin kasvattamalla koesarjoja, testaamalla eri betonimassoja, korostamalla vaikuttavia olosuhteita sekä laajentamalla menetelmävalikoimaa. Laajempaan ja pitkäjänteisempään jälkihoitotutkimukseen tulisi valmistaa oikeita rakenteita ja käyttää tutkimuksessa rakennekoekappaleita. Lisähaasteita toisi esimerkiksi lentotuhkan ja masuunikuonan käytön lisääminen. Tällöin betonin kovettuminen hidastuu ja betonin kutistuminen voitaisiin tutkia pidemmällä aikajänteellä.



## LÄHTEET

Betonijulkisivujen materiaali- ja valmistustekniikka. 1998. Suomen Betonitieto. Helsinki.

Betonilattiat 2002 by 45 BLY 7. 2002. Suomen Betoniyhdistys ry. Jyväskylä.

Betoninormit 2012 by 50. 2012. Suomen Betoniyhdistys ry. Lahti.

Betonitekniikan oppikirja 2004 by 201. 2005. Suomen Betoniyhdistys ry. Jyväskylä.

ITB itsetiivistyvä betoni. 2004. Betonikeskus ry, Suomen Betonitieto Oy. Loviisa.

Leivo Markku - Holt Erika. 2001. VTT tiedotteita, Betonin kutistuma. VTT Valtion tieteellinen tutkimuskeskus, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo.

SFS-EN 12390-1 Kovettuneen betonin testaus osa 1: muoto, mitat ja muut koekappaleiden ja muottien vaatimukset. 2004. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Saatavissa <http://www.oamk.fi/kirjasto>, E-aineistot, SFS-online. Hakupäivä 26.11.2012.

SFS-EN 12390-2 Kovettuneen betonin testaus osa 2: koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten. 2009. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Saatavissa <http://www.oamk.fi/kirjasto>, E-aineistot, SFS-online. Hakupäivä 26.11.2012.

SFS-EN 13369 Betonivalmisteiden yleiset säännöt. 2004. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Saatavissa <http://www.oamk.fi/kirjasto>, E-aineistot, SFS-online. Hakupäivä 26.11.2012.

## **LIITTEET**

Liite 1 Puristuslujuustulokset 1d

Liite 2 Puristuslujuustulokset 2d

Liite 3 Puristuslujuustulokset 7d

Liite 4 Puristuslujuustulokset 14d

Liite 5 Puristuslujuus 30d, rakennekoekappaleet

Liite 6 Kutistuma-arvot 2 - 28d











	Kutistumamittaukset					1B	Jälkihoitamaton		
	Mittatappimenetelmä					2B	Muovipeite		
	9.4 - 5.5.2014 OAMK					3B	Parafiinidispersio		
						4B	Tiilirasteri		
	Mittaustulokset			Kutistuma / 300 mm			Kutistuma mm / m		
ikä		suunta	suunta						
2d		x	y	x	y	ka	x	y	ka
	1B	2,488	2,502	0	0	0	0	0	0
	2B	2,150	2,454	0	0	0	0	0	0
	3B	2,648	3,044	0	0	0	0	0	0
	4B	2,410	2,417	0	0	0	0	0	0
3d		x	y	x	y	ka	x	y	ka
	1B	2,474	2,487	0,014	0,015	0,014	0,047	0,050	0,048
	2B	2,135	2,442	0,015	0,012	0,014	0,050	0,040	0,045
	3B	2,636	3,020	0,012	0,024	0,018	0,040	0,080	0,060
	4B	2,402	2,413	0,008	0,004	0,006	0,027	0,013	0,020
4d		x	y	x	y	ka	x	y	ka
	1B	2,464	2,478	0,010	0,009	0,010	0,033	0,030	0,032
	2B	2,130	2,432	0,005	0,010	0,008	0,017	0,033	0,025
	3B	2,624	3,012	0,012	0,008	0,010	0,040	0,027	0,033
	4B	2,394	2,403	0,008	0,010	0,009	0,027	0,033	0,030
7d		x	y	x	y	ka	x	y	ka
	1B	2,444	2,460	0,020	0,018	0,019	0,067	0,060	0,063
	2B	2,112	2,411	0,018	0,021	0,019	0,060	0,070	0,065
	3B	2,595	2,995	0,029	0,017	0,023	0,097	0,057	0,077
	4B	2,372	2,384	0,022	0,019	0,021	0,073	0,063	0,068
16d		x	y	x	y	ka	x	y	ka
	1B	2,398	2,417	0,046	0,043	0,045	0,153	0,143	0,148
	2B	2,068	2,371	0,044	0,040	0,042	0,147	0,133	0,140
	3B	2,555	2,945	0,040	0,050	0,045	0,133	0,167	0,150
	4B	2,322	2,340	0,050	0,044	0,047	0,167	0,147	0,157
18d		x	y	x	y	ka	x	y	ka
	1B	2,397	2,413	0,001	0,004	0,003	0,003	0,013	0,008
	2B	2,062	2,358	0,006	0,013	0,010	0,020	0,043	0,032
	3B	2,545	2,938	0,010	0,007	0,008	0,033	0,023	0,028
	4B	2,315	2,334	0,007	0,006	0,006	0,023	0,020	0,022
21d		x	y	x	y	ka	x	y	ka
	1B	2,385	2,403	0,012	0,010	0,011	0,040	0,033	0,037
	2B	2,049	2,349	0,013	0,009	0,011	0,043	0,030	0,037
	3B	2,532	2,926	0,013	0,012	0,013	0,043	0,040	0,042
	4B	2,307	2,325	0,008	0,009	0,008	0,027	0,030	0,028
28d		x	y	x	y	ka	x	y	ka
	1B	2,370	2,390	0,015	0,013	0,014	0,050	0,043	0,047
	2B	2,032	2,331	0,017	0,018	0,018	0,057	0,060	0,058
	3B	2,520	2,910	0,012	0,016	0,014	0,040	0,053	0,047
	4B	2,290	2,310	0,017	0,015	0,016	0,057	0,050	0,053