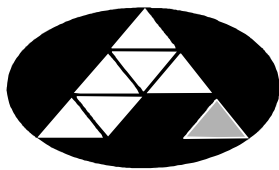


POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Alakopsa Heikki

HT JA HTS BETONIEN PERUSOMINAISUUDET

Opinnäytetyö
Marraskuu 2012



POHJOIS-KARJALAN
AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2012
Rakennustekniikankoulutusohjelma

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
p. (013) 260 6800

Tekijä
Heikki Alakopsa

Nimeke
HT ja HTS betonien perusominaisuudet
Toimeksiantaja
Lujabetoni Oy

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä määritettiin viiden eri betonilaadun perusominaisuudet. Tärkein mitattava ominaisuus oli kuivumiskutistuma. Tehtävänä oli verrata Lujabetoni Oy:n uusien HT ja HTS lattiabetonien kutistuma-arvoja ja verrata niitä muiden kolmen betonilaatujen kutistuma-arvoihin. Lisäksi betonin ominaisuuksista mitattiin tavallisessa laadunvarmistuksen mittauksen yhteydessä puristuslujuus, notkeus, tiheys ja ilmamäärä. Kutistuma-arvojen tietämisestä on Lujabetoni Oy:lle hyötyä esimerkiksi betonituotteiden markkinoinnissa ja niitä voi käyttää lähtötietoina rakennussuunnittelussa.

Opinnäytetyön mittausarvot kerättiin 56 vuorokauden ajalta. Koekappaleet valettiin joulukuussa 2011 Lujabetoni Oy:n Lehmon tehtaalla. Opinnäytetyössä käytettiin kahta eri kutistumamittausmenetelmää. Jokaisesta betonilaadusta valmistettiin kaksi koekappaleta kumpaakin mittausmenetelmää varten.

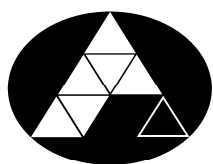
Mittausten kutistuma-arvot esitetään diagrammeina ja taulukko -muodossa. Mittausarvot osoittavat HT ja HTS betonilaatujen kutistuma-arvojen olevan hieman suurempia kuin muiden vertailukoekappaleiden kutistuma-arvot. Arvot ovat kuitenkin suositusten mukaisella tasolla.

Opinnäytetyössä käytetty koekappalemäärä oli melko pieni. Jatkossa on suositeltavaa kasvattaa koekappalemäärää, jolloin mittaustuloksiin saataisiin enemmän vertailuluotettavuutta.

Kieli
suomi

Sivuja 48
Liitteet 3
Liitesivumäärä 5

Asiasanat
Betoni, kuivumiskutistuma



NORTH KARELIA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

THESIS
May 2012
Degree Programme in Civil Engineering

Karjalankatu 3
FIN 80200 JOENSUU
FINLAND
Tel. 358-13-260 6800

Author
Heikki Alakopsa

Title
HT and HTS Concretes Measurement of Properties
Commissioned by
Lujabetoni Ltd

Abstract

The purpose of this study was to determine properties of five different concrete brands. The main property to be measured was drying shrinkage. The task was to analyze the shrinkage results of Lujabetoni Ltd's newest floor concretes HT and HTS and compare the results of three other concretes shrinkage results. Furthermore, the other properties were measured for quality assurance. These were compression strength, ductility, density and air content of concrete. After all, knowing the drying shrinkage value can be used in marketing and construction planning.

Data for this study was gathered during 56 days. Test samples were cast in December 2011 in Lujabetoni Ltd.'s factory in Lehmo. In this study two different drying shrinkage-measuring methods were used. From each concrete two test samples were made for both of the measuring methods.

The results of the shrinkage measurements are shown in form of diagrams and tables. These results suggest that HT- and HTS-concretes shrink a bit more than other compared test samples. Although, the shrinkage results are within the recommended levels.

The number of test samples could have been even higher. Larger amount of samples would improve the reliability of shrinkage measuring rates.

Language
Finnish

Pages 48
Appendices 3
Pages of Appendices 5

Keywords
Concrete, Drying Shrinkage

Sisällysluettelo

Alkusanat	6
1 Johdanto	7
1.1 Tutkimuksen tausta.....	7
1.2 Tutkimuksen ongelma.....	7
1.3 Tutkimuksen tavoite	8
1.4 Tutkimuksen rajaukset.....	8
2 Kirjallisuuskatsaus	9
2.1 Kutistuma.....	10
2.2 Kuivumiskutistuma.....	10
2.3 Autogeeninen kutistuma	11
2.4 Plastinen kutistuma.....	11
2.5 Notkistimet	11
2.6 Kutistumaan vaikuttavat tekijät	12
3 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät	13
3.1 Tutkittavat betonilaadut.....	13
3.2 Kuivumiskutistuma.....	15
3.3 Palkkikoe	16
3.4 Naulalevykoe	18
3.5 Kutistumakoekappaleiden säilytysolosuhteet.....	20
3.6 Laadunvarmistusmittaukset	23
3.7 Kuivumiskutistuman ennakoitavuus.....	28
4 Tutkimustulokset.....	30
4.1 Tuorebetoni.....	30
4.2 Puristuslujuus	31
4.3 Palkkikokeen kutistuma-arvot	34
4.4 Naulalevykokeen kutistuma-arvot.....	36
4.5 HT betonilaadun kutistuma-arvojen tarkastelu.....	38
4.6 HTS betonilaadun kutistuma-arvojen tarkastelu	40
4.7 Kuivumiskutistuma-arvot 56 vuorokauden kohdalta.....	41
5 Luotettavuusanalyysi	43
6 Johtopäätökset	45
Lähteet.....	48

Liitteet

- Liite 1. Kutistuma-arvot mittausajanjaksolta
- Liite 2. Tuotantohallin kuivumisolosuhteet
- Liite 3. Kutistumamittausmenetelmien koekappaleiden mittausarvot

Alkusanat

Haluan kiittää Lujabetoni Oy:tä mielenkiintoisesta opinnäytetyö aiheesta ja hyvin sujuneesta yhteistyöstä. Erityisesti haluan kiittää lujabetonin henkilökunnasta kehityspäällikkö Tuomo Kovasta, kehityslaborantti Perttu Ruuskaa ja Lehmon betonitehtaan henkilökuntaa. Lehtori Petteri Härköselle ja Lehtori Teija Kerkkäselle haluan lausua kiitokset ohjeistanne ja antamastanne ajasta. Lisäksi haluaisin kiittää ystäviäni Olli Kontkasta ja Miika Soikkelia luovista ilmaisuista ja kielioppivirheiden löytämisestä. Ilman teitä opinnäytetyöni ei näyttäisi yhtä hyvältä. Erityisesti haluaisin esittää kiitokset rakkaalle vaimolleni Ninalle. Sinun pitkäjänteisyytesi on auttanut ymmärtämään mikä on tärkeää. Suurin kiitos kuuluu Jumalalle, joka antaa toivon.

Joensuussa 15.11.2012

Heikki Alakopsa

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Yksi Betonin ominaisuuksista on kutistuma. Betonin kutistuminen voi johtaa muun muassa halkeiluun. Opinnäytetyön toimeksiantaja, Lujabetoni Oy, oli kiinnostunut erityisesti heidän uusien lattiabetonilaatujensa kutistumien suuruudesta. Lujabetoni Oy on kehittänyt myyntiin helposti tiivistettäviä lattiabetonilaatuja, jotka nopeuttavat työmaalla betonin valamista ja tasoitusta. Tässä opinnäytetyössä käydään läpi betonin kutistumamittausta kahden mittausmenetelmän avulla. Tutkimustuloksia voidaan hyödyntää betonituotteiden markkinoinnissa ja lähtötietona rakennussuunnittelussa.

1.2 Tutkimuksen ongelma

Helposti tiivistyvien betonilattioiden halkeilujen syyksi epäillään usein betonimassan suurta vesi-sementtisuhdetta. Näissä betonimassoissa, jotka ovat notkistettuja, ei ole suurta vesi-sementtisuhdetta. Vesi-sementtisuhde vaikuttaa massan työstettävyyteen ja notkeuteen; mitä notkeampaa betonimassa on, sitä helpompi betonimassaa on työstää. Nykyään notkeutta lisätään notkistimilla ja tehonotkistimilla, jolloin vedenmäärää saadaan vähennettyä. Notkistimia käyttämällä saadaan pienemmällä vesi-sementtisuhteella notkeampi massa, jolloin halkeiluja ei pitäisi syntyä. Kuitenkin nämä notkistetut betonimassat mielletään riskialttiiksi halkeilulle notkeuden vuoksi, vaikka syytä tähän ei olisi.

Lujabetoni Oy:llä ei ole vielä konkreettisia kutistumamittausarvoja helposti tiivistyvistä betonilaaduista, jotka osoittaisivat betonien kutistumien suuruuden olevan normaalia luokkaa. Vähäiset tutkimustulokset kutistumista lisäävät vain epäilyksiä. Tarkoituksena on osoittaa toimeksiantajan markkinoimien notkistettujen betonien kutistumien todelliset suuruudet epäilyjen hälventämiseksi.

1.3 Tutkimuksen tavoite

Tässä opinnäytetyössä päätavoitteena on saada selville mitattauksin kutistuma-arvot ja normaalit ominaisuudet helposti tiivistyvistä HT- ja HTS betonilaaduista. Vertailun vuoksi mitataan myös betonien NP, NK ja Rakennebetoni laaduista normaalit ominaisuudet ja kutistuma-arvot. Yhtenä osatavoitteena on arvioida kutistumamittausmenetelmien luotettavuutta ja käytettävyyttä kutistuma-arvoja vertailemalla. Mittausmenetelmistä saatujen analyysien on tarkoitus luoda Lujabetoni Oy:n laadunvalvonnalle pohjaa jatkossa tapahtuvia kutistumamittauksia varten.

1.4 Tutkimuksen rajaukset

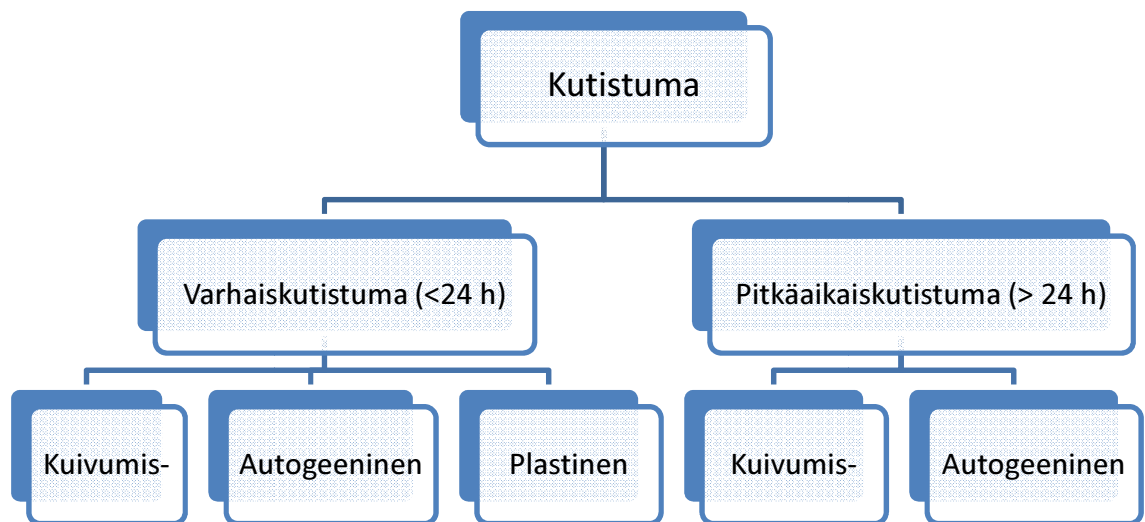
Betonilaatujen ominaisuuksien selvittämiseksi valittiin normaalin käytännön mukaiset mittaukset puristuslujuus-, notkeus-, ilmamäärä- ja tiheysmittaukset. Näiden lisäksi kutistuman mittaamiseksi valittiin kaksi empiiristä mittausmenetelmää, palkkikoe ja naulalevykoe. Näistä mittausmenetelmistä saadaan mitattaamalla ja laskemalla kutistuma-arvot. Mitattavia kutistumakoekappaleita tässä opinnäytetyössä käytettiin yhteensä 17 kappaletta.

Käytettyihin seos- ja lisäaineiden analysointeihin ei ollut tarkoituksenmukaista ryhtyä, koska toimeksiantajan pyyntö oli pelkästään betonien HT ja HTS ominaisuuksien mittaukset. Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä notkistimien käytön vaikutusta kutistumaan.

2 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsaus tehtiin alan oppikirjoihin ja tutkimuksiin. Lähteistä haettiin tutkimustuloksia kutistuma-arvoista ja teoriapohjaa betonin kutistumasta. Lähteet kattoivat opinnäytetyön teoriapohjan kokonaan. Tosin kokemukseen perustavaa tietoa tai kutistuma-arvoja mittaussuomenetelmistä ei ollut kattavasti kutistuma-arvojen analysointia varten käytettävissä. Käytetyt lähteet olivat luotettavia ja yleisesti tunnettuja.

Varhaiskutistuma rajataan ensimmäiseen 24 tuntiin valusta. Betonin kutistuma voidaan jakaa kahteen eri kutistumavaiheeseen, varhais- ja pitkäaikaiskutistumavaiheeseen, jota havainnollistaa kuva 1. Näiden lisäksi lämpötilan vaihtelu aiheuttaa lämpömuodonmuutoksia, joita ei käsitellä tässä opinnäytetyössä. Kuva on mukailtu VTT:n tiedotteesta. (Leivo & Holt, 2001. s. 9.) Rakentamisessa tarkkaa raja-arvoa kutistumalle ei ole määritetty.



Kuva 1. Kutistuman tyyppien ja vaiheiden jako

2.1 Kutistuma

Kutistuma on yksi betonin ominaisuuksista. Vapaan veden poistuessa betonista, sen tilavuus pienenee. Betonin tilavuuden pienentyessä betonin kutistuma voi olla pahimmillaan 7 mm/m, joka voi tulla varhaisvaiheessa huonoissa olosuhteissa. Kutistuman normaalina arvona voidaan pitää 0,4 – 0,6 mm/m. Kuitenkin pitkäaikaisen kutistuman suuruus voi olla 1,0 mm/m suuruusluokkaa, joka on vielä hyväksyttävissä rajoissa. Betonin kutistuma pyritään yleensä pitämään mahdollisimman pienenä, koska liiallisen kutistuman haitat ovat kalliita korjata. Betonin kutistuma esitetään kutistumana yhtä metriä kohden [mm/m]. (Leivo & Holt, 2001, s. 7–8.)

2.2 Kuivumiskutistuma

Betonimassan kuivussa sen sisältämä vapaana oleva vesi poistuu betonimassasta haihtumalla, jolloin betoni kutistuu. Tätä kutsutaan kuivumiskutistumaksi. Betonimassan kuivussa vesi siirtyy pinnalle kapillaarihuokosten kautta. Jos kapillaarihuokokset ovat tukossa, veden siirtyminen pinnalle hidastuu, jolloin kuivumiseen kuluu pidempi aika. Kapillaarihuokosten tukkeutuminen johtuu betonin pinnan liian nopeasta kuivumisesta. Näin ollen kapillaarihuokosten ollessa tukossa veden siirtyminen tapahtuu hitaammin diffuusion avulla. (Hietala, 2011, s. 25.)

Betonin tilavuus voi vaihdella kosteuden määrän mukaan. Kovettunut betoni kutistuu kuivussa ja laajenee kostuessaan. Betonin sisälle muodostuneet kapillaarihuokokset ovat valun aikana täyttyneet vedestä, kun vesi haihtuu pois huokosista, jäljelle jäävät tyhjät huokokset. Tyhjät kapillaari-huokokset voivat imeä kosteutta suoraan ilmasta sopivissa olosuhteissa, jolloin betoni laajenee. (Suomen betoniyhdistys, 2005, s. 91.)

2.3 Autogeeninen kutistuma

Varhaisvaiheen kutistumassa ensimmäisen vuorokauden aikana sementti reagoi veden kanssa, jolloin niiden yhteenlaskettu tilavuus sitoutumisen jälkeen on pienempi kuin niiden alkutilavuudet erillään. Tällöin betonin tilavuus pienenee, jota seuraa kutistuminen. (Rudus, 2010, s. 2) Tätä kutsutaan autogeeniseksi kutistumaksi.

Merkittävä osuus autogeenisellä kutistumalla kokonaiskutistumasta on vain betoneilla, joilla on alhainen vesi-sementtisuhte. Betonimassassa oleva vesi voi sitoutua kokonaan sementin kanssa. Sementti kuluttaa betonimassasta vettä hydrataation aikana, jolloin betonin sisäinen suhteellinen kosteus laskee. Tästä johtuen betoni kuivuu aivan kuin kuivumiskutistumassa, jolloin tilavuus pienenee. (Leivo & Holt, 2001, s.10.)

2.4 Plastinen kutistuma

Plastinen kutistuma on tuoreen betonin pinnan vaakatasossa tapahtuvaa kutistumaa. Tämä tapahtuu muutaman tunnin sisällä valusta. Plastinen kutistuma johtuu liian nopeasta kuivumisesta ennen betonimassan sitoutumista (Suomen betoniyhdistys, 2005, s. 73.)

Plastinen kutistuma aiheuttaa suurimman riskin betonin halkeamalle. Suuruudeltaan plastisen kutistuman osuus voi olla 7 mm/m. Näin suuri kutistuma on todettu tutkimuksissa ensimmäisen 10 tunnin aikana valusta, kun kunnollista jälkihoitoa ei ollut toteutettu. Koe tilanteen olosuhteet olivat ja tuulen nopeus on ollut 7 m/s ja lämpötila oli 20 °C ja ilman suhteellinen kosteus 40 % RH. (Leivo & Holt, 2001, s. 27.)

2.5 Notkistimet

Notkistin on betonin lisäaine. Notkistin on nesteytin, jota käytetään vedenvähennykseen sen heikentämättä betonin työstettävyyttä. Notkistimet

parantavat betonin teknisiä ominaisuuksia, kuten pumpattavuutta, koossapysyvyyttä ja notkeutta. Notkistimet jaetaan niiden tehokkuuden mukaan tehonotkistimiin ja notkistimiin. Niillä voidaan vähentää betonimassasta veden määrää 40 % riippuen notkistimen koostumuksesta. Vesimäärän vähennyksen takia betonin puristuslujuus kasvaa. (Suomen betoniyhdistys, 2005, s. 65)

Notkistimien käyttö vähentää vesimäärän tarvetta, jolloin se vähentää kuivumiskutistumaa. Samalla se tiivistää betonin kovettuneen sementtikiven mikrorakennetta, joka toisaalta lisää kutistumaa. (Leivo & Holt, 2001, s. 39)

2.6 Kutistumaan vaikuttavat tekijät

Leivo ja Holt osoittavat VTT:n tiedotteessa betonin jälkihoidon vaikuttavan varhaisvaiheen kutistumaan. Olosuhteisiin voidaan vaikuttaa toimimalla kirjallisuudessa annettujen ohjeiden mukaisesti. (Leivo & Holt, 2001, s. 25.)

Halkeamisen syntymistä voidaan estää jo suunnitteluvaiheessa ja valuvaiheessa oikealla jälkihoitomenetelmällä. Suunnitteluvaiheessa oikein mitoitettut raudoitukset, liikuntasaumot ja betonilaadun valinta vähentävät halkeamisen riskiä. Käytettävän jälkihoitoaineen määrä vaikuttaa myös kutistuman suuruuteen. Suurin syy betonin halkeilulle on liian nopea varhaisvaiheen kuivuminen, johon vaikuttaa muun muassa ilmankuivuus, tuulennopeus ja lämpötila. Jokaiselle betonille tarvitaan jonkinlainen jälkihoito. Eryteisesti jälkihoidon merkitys kasvaa, kun betonin vesi-sementtisuhde on pienempi. (Leivo & Holt, 2001, s. 27)

3 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät

Mitattavia betonilaatuja oli yhteensä viisi (5). Kutistumakoekappaleita oli yhteensä 17. Kutistumamittaukset tehtiin kahdella eri mittausmenetelmällä. Näiden kahden eri mittausmenetelmien välillä on tarkoitus vertailla tuloksia betonilaaduittain. Mittausmenetelmät olivat toimeksiantajan ehdottamat palkkikoe ja naulalevykokeet.

Kumpaakin kutistumamittausmenetelmää varten valmistettiin kaksi samanlaista koekappaleita. Koekappaleita on yhteensä kuitenkin 17. Osa koekappaleista oli virheellisiä tai niitä ei valmistettu säilytystilan puutteen vuoksi, jonka takia ne jätettiin pois tästä tutkimuksesta. Kutistumaa seurattiin 56 vuorokauden ajan.

Betonin ominaisuuksien mittaaminen oli tämän opinnäytetyön päätavoite. Näillä normaaleilla ominaisuuksienmittauksilla varmistetaan betonin laatu ja betonin odotusarvojen täytyminen. Betonin valmistajat suorittavat vastaavia mittauksia jokaisesta valuerästä tai annetuin määräajoin. Betoneista mitattiin betonin ollessa tuoretta notkeus leviämästä tai painumasta, tiheys, ilmamäärä ja lämpötila valuhetkellä. Kovettuneista betoneista mitattiin kuivumiskutistuma, lämpötila yhden vuorokauden aikana ja puristuslujuus 1, 3, 7 ja 28 vuorokauden ikäisenä. (Suomen betoniyhdistys, 2005, s.158)

3.1 Tutkittavat betonilaadut

Tässä kohdassa on esitelty betonilaaduittain tärkeimmät ja kutistumaan vaikuttavat tiedot. Kaikkien betonilaatujen suurin käytetty raekoko oli #16 mm ja käytetty sementti oli HOLCIM CemI 42,5R. Betonien tarkkoja vesi-sementtisuhteiden suuruuksia ei toimeksiantajan pyynnöstä ilmoiteta tässä opinnäytetyössä. Kuitenkin vesi-sementtisuhteen suuruusjärjestys voidaan ilmoittaa. Vesi-sementtisuhteet pienimmästä suurimpaan ovat NK, HT, HTS, NP ja Rakennebetoni. HT- ja HTS- betonien vesi-sementtisuhteet ovat kuitenkin melko samat.

Lujabetonin helposti tiivistyvien betonilaatujen tiivistäminen tehdään ”hevostelemalla”. Hevostelu tarkoittaa betonipinnan kevyttä tasoittamista, jotta betoni leviää tasaisesti. Seuraavassa on esitetty valmistajan ilmoittamat ominaisuudet tutkittavista betonilaaduista.

HT Lattiabetoni, C32/40 #16

HT-laatan betonoinnissa käytetään vaihtoehtoisesti maanvaraisissa laatoissa, holvi-, holvi kaksikerrosvaluissa sekä HT-lattiabetonilla pintalaattana ontelolaatan päällä. Kaksikerrosvalu voidaan tehdä rakennebetonin päälle. (Lujabetoni Oy, 2010, Työohje, s. 2)

Leviämä 550-650mm, (pitää tiivistää ”hevostelemalla”), leviämäluokka F4

Lisäaineet: notkistin ja huokostin

Lujuudet C28/35 – C32/40

Max raekoko #12-18

HTS Lattiabetoni, HTS C32/40 #16

Leviämä 600-670mm, (pitää tiivistää ”hevostelemalla”), leviämäluokka F5

Lisäaineet: notkistin ja huokostin

Lujuus C32/40

Max raekoko #12-18

NP Lattiabetoni, NP C25/30 #16

Nopeasti pinnoitettava lattiabetoni

Lujuudet C25/30 – C32/40

1-2 kertaa nopeampi kuivuminen kuin tavan rakennebetonilla

Lisäaineet: notkistin ja huokostin

Painuma 100—150 mm, (tiivistettävä täryttämällä), painumaluokka S3

Max raekoko #12—18

NK Lattiabetoni, NK C32/40 #16

Nopeasti kuivuva lattiabetoni, jota käytetään ”saneeraus” –kohteissa.

Leviämä noin 500 mm, (pitää tiivistää ”hevostelemalla”), leviämäluokka F4

Lujuudet C32/40

Kuivuminen 2-3 kertaa tavan rakennebetoniin verrattuna nopeampaa

Lisäaineet: notkistin ja huokostin

Rakennebetoni (Rak.bet), RN C25/30 #16

Normaali rakennebetoni, jota voidaan käyttää kaikessa rakentamisessa.

Painuma 100-150 mm, (tiivistettävä täryttämällä), painumaluokka S4

3.2 Kuivumiskutistuma

Toimeksiantaja oli valinnut ennalta menetelmät kutistuman mittaamiseen. Kuivumiskutistumaa mitattiin kahdella mittausmenetelmällä, palkkikokeella ja naulalevykokeella. Mittaukset suoritettiin 1, 2, 3, 7, 14, 28 ja 56 vuorokauden kuluttua valusta. Betonimassat valettiin kahtena peräkkäisenä päivänä. Muotteihin valun jälkeen betonit tiivistettiin joko kevyesti hevostelemalla tai täryttämällä sen mukaan, oliko betonimassa jäykkää vai notkeaa. Valun jälkeen koekappaleet peitettiin rakennusmuovilla. Koekappaleiden pintoja ei hierretty tai käsitelty kovettumisen jälkeen.

3.3 Palkkikoe

Tässä opinnäytetyössä käytettiin palkkikokeessa 400 mm korkeita palkkeja. Tavoitteena oli mitata palkien pituudenmuutokset. Muutokset mitattiin palkin päästä mittakellolla. Palkki lepää tarkoitukseen soveltuvassa mittalaitteessa, joka on esitetty kuvassa 2. Palkin alapäässä oli liimattu ohut metallilevyn pala, joka estää betonin kolhiintumisen, joka vastaa tylpän metallitappiin. Palkki mitattiin aina samansuuntaisesti, jotta mitattava kohta ei vaihtuisi.



Kuva 2. Palkkikokeessa käytetty mittalaite

Koekappaleiden mitat olivat $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$. Koekappaleiden muotteina käytettiin sekä vaneri- että teräsmuotteja. Standardi koekappaleista poiketen käytettiin lyhennettyjä 400 mm:n mittaisia koekappaleita. Koekappaleet valmistettiin siten, että valun yhteydessä muottiin laitettiin 100 mm:n pituinen styroxpala lyhentämään koekappaleita. Lyhentämisen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3. Tähän toimenpiteeseen päädyttiin, koska pidemmät koekappaleet eivät olisi mahtuneet jäädytys-sulatuskaappiin.



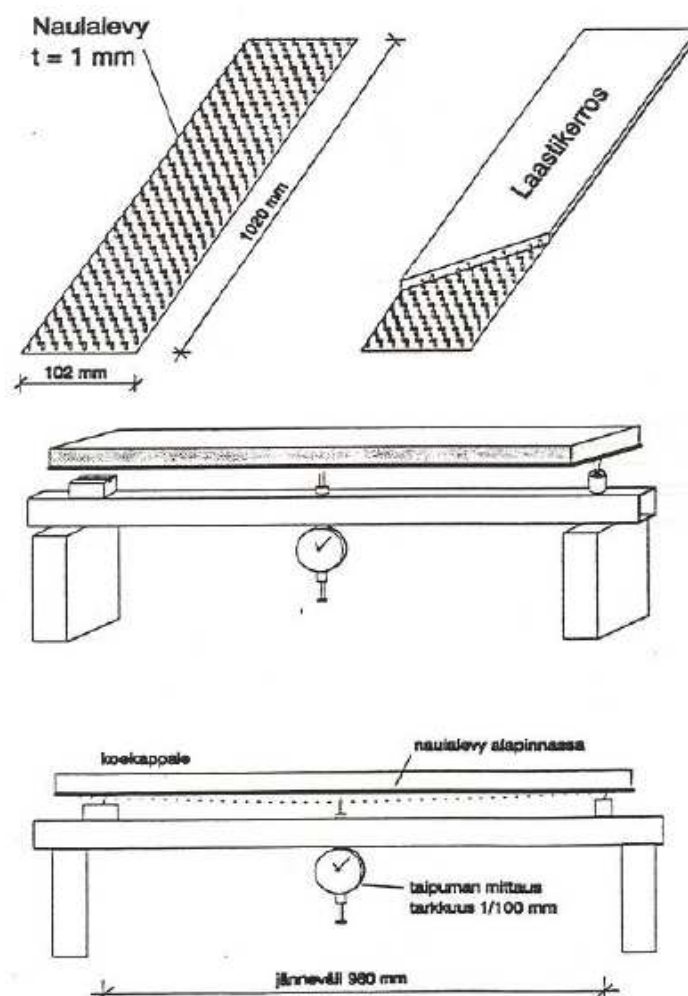
Kuva 3. Kaksi palkkikokeen muottia valun jälkeen

Ensimmäisenä mitattiin koekappaleen yhden vuorokauden niin sanottu nollatuloksesta. Seuraavien päivien mittaustulokset vähennettiin nollatuloksesta. Saatu erotus oli pituuden muutos. Tämä arvo kerrottiin 2,5:llä, jolloin tulokseksi saatiin 1000 mm:n pituisen betonipalkin kutistuma-arvo. Pituuden muutos vielä laskettuna $1000\text{mm}/400\text{mm} = 2,5$. Tällöin tulos on vertailukelpoinen muiden kutistumamittausmenetelmien kanssa. Palkkikokeen mittausarvot ovat liitteessä 3.

NK betonin molemmat kutistumakoekappaleet jäivät hieman vajaamittaisiksi, minkä vuoksi niitä jouduttiin pidentämään metallilevyillä. Metallilevyillä tehty korjaus oli noin 10 mm suuruinen. Oletetaan etteivät metallilevyt vaikuta kutistuman suuruuteen, kun olosuhteet olivat vakiot, eikä lämpölaajenemista ole päässyt tapahtumaan. Kutistuma on huomioitu kertoimella 2,5, jolloin ei tapahdu kovinkaan suurta kutistuma-arvon vääristymistä. Kutistuman ero muihin koekappaleisiin verrattuna voi olla 0,01 mm/m suuruinen.

3.4 Naulalevykoe

Naulalevykoe on yksi menetelmä mitata betonin kutistuma. Naulalevykokeen mittausperiaate on esitetty kuvassa 4. Tässä opinnäytetyössä on käytetty kokeen suorituksessa Suomen betoniyhdistyksen ohjetta. Taipumakutistuma mitattiin $40 \times 120 \times 1020 \text{ mm}^3$ koekappaleista, jotka olivat valettu alapinnastaan kiinni naulalevyyn. Korkeus ei vastaa ohjeen mukaista nelinkertaista kiviaineksien ylänimellisrajaa, vaan korkeutena käytettiin 40 mm. Käytetyissä betonilaaduissa kiviaineksin ylänimellisraja oli #16 mm. Toimeksiantaja oli valinnut tämän korkeuden muotteihin. Taipumakutistumakoekappaleiden muotit valmistettiin vettä imemättömästä vanerista. (Suomen betoniyhdistys, 2010, s. 8–9.)



Kuva 4. Periaatekuva naulalevykoe -mittausmenetelmästä, mittateline ja –kello (Suomen betoniyhdistys, 2010, s. 10)

Taipumaa mitataan mittakellolla koekappaleen keskeltä. Mittakellon mittatarkkuus oli 0,01 mm. Opinnäytetyössä käytetty mittateline ja mittakello ovat esitetty kuvassa 5. Mittakello on mittauslaitteen keskellä. Mittatelineen päädyissä ovat tuet, joita vasten mitattava koekappale tuetaan, jotta koekappale olisi aina samassa kohdassa mittauksen aikana.



Kuva 5 Taipumakutistuman mittausteline ja –kello

Koekappaleen betoni on valettu naulalevyn päälle. Betonin kuivuesssa betoni kutistuu, jolloin naulalevy pyrkii vastustamaan muodonmuutosta, josta seuraa koekappaleen taipuminen. Kutistuman ansiosta koekappale taipuu alaspäin. Taipuessaan taipumakutistumakoekappale luo mitattavan suureen, jonka avulla voidaan laskea betonin kutistuma.

Taipuman muutos alaspäin mitataan koekappaleen taipumiskohtan keskeltä. Taipuman muutoksella voidaan selvittää betonin kutistuma annetulla laskukaavalla 1. (Suomen betoniyhdistys, 2010, s. 9.)

$$Kutistuma = \frac{8hv}{L^2} \quad (1)$$

jossa h on koekappaleen korkeus [mm]

v on koekappaleen jännevälin keskipisteen taipuma [mm]
 L on koekappaleen jänneväli [mm]

Koekappaleiden korkeus oli tässä opinnäytetyössä 40 mm. Taipuman suuruus v oli keskipisteen taipuman muutos mm:inä. Jänneväli oli 980 mm, joka määräytyi mittatelineen jännevälistä.

Kaavalla 1 laskettuna saadaan laaduton luku. Kaavasta saatu vastaus kerrotaan 1000:lla, jotta saadaan kutistuman arvoksi promilleja. Promille vastaa kutistuman suuruutta mm/m. (Puhelinkeskustelu, Ari Ipatti, Contesta, 29.5.2012.)

Lähtökohtaisesti mittausmenetelmä on suunniteltu juotos- ja saumaustöihin tarkoitettujen erikoislaastien ja –betonityyppien kutistumien mittaukseen. Näitä ovat juotoslaastit ja –betonit, talvijuotoslaastit ja –betonit, pystysaumalaastit ja talvipystysaumalaastit, pakkaslaastit ja -betonit (Suomen betoniyhdistys, 2010, s. 3.)

3.5 Kutistumakoekappaleiden säilytysolosuhteet

Valettu betoni säilytettiin rakennusmuovin alla suojassa yhden vuorokauden ajan. Muotit purettiin yhden vuorokauden kuluttua valusta, ja siirrettiin olosuhdekaappeihin. Koekappaleiden määrän takia varsinaiseen kuivumiseen tarkoitettuja säilytyspaikkoja oli tässä opinnäytetyössä kaksi. Tavoite olosuhteet olivat lämpötila 20 °C -astetta ja ilman suhteellinen kosteus 40 % RH.

Palkkikokeessa säilytysolosuhteet rajoittivat koekappaleiden määrää. Kaikki palkkikokeen koekappaleet eivät olisi mahtuneet tarkoitettuun säilytyspaikkaan, joten palkkikokeen rakennebetonikoekappaleita ei valmistettu.

Koekappaleiden säilytyspaikat

- Palkkikoe
 - Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, Betonilaboratorio, Jäädytys-sulatuskaappi (2009), Espec PL- 2KPH, (Kuva 6).
- Naulalevykoe
 - Lujabetonin tuotantohalli, omatekemä olosuhdekaappi, ympärillä rakennusmuovi, (Kuva 7).



Kuva 6. Palkkikokeen koekappaleiden säilytyspaikka, jäädytys-sulatuskaappi



Kuva 7. Naulalevykokeen koekappaleiden säilytyspaikka

Teknisen vian vuoksi palkkikokeen koekappaleet saatiin jäädytys-sulatuskaappiin kaksi päivää valun jälkeen. Tästä johtuen ensimmäisen valupäivän palkkikoekappaleiden säilyttämistä jatkettiin rakennusmuovissa yhden vuorokauden ajan. Olosuhteet olisivat muuten olleet liian kuivat kuivassa betonilaboratoriossa, eikä haluttu koekappaleiden kuivua alussa normaalia enempää.

Naulalevykokeen koekappaleet saatiin ajallaan olosuhdekaappiin, mutta säilytysolosuhteet eivät olleet tavoitteen mukaiset. Koekappaleet laitettiin tasaiselle teräshyllylle kapeammalle kyljelleen, jotta betonikappale pääsisi vapaasti taipumaan betonin kutistuessa.

Tavoite olosuhteet olivat $+20\text{ °C}$ ja RH 40 % (Suomen betoniyhdistys, 2010, s. 9). Tällöin absoluuttinen kosteus on $6,91\text{ g/m}^3$. Jäädytys-sulatuskaapista olosuhteet asetettiin kahdeksi ensimmäiseksi vuorokaudeksi arvoihin $+17\text{ °C}$ ja RH 45 %, joka myöhemmin vaihdettiin $+20\text{ °C}$ -asteeseen ja ilmansuhteellinen kosteus RH 40 % -arvoon. Naulalevykokeen olosuhdekaapissa ei voitu asettaa lämpötilaa ja kosteutta.

Olosuhteiden seuraamisen vuoksi naulalevykokeessa järjestettiin olosuhdekaappiin jatkuva lämpötilan ja kosteuden mittaaminen. Kuivumisolosuhteita voidaan verrata tavoiteolosuhteisiin. Olosuhteita tarkkailtiin kahdella Tinytag +2 dataloggerilla kahden kuukauden ajan kahdessa eri mittausjaksossa. Mittausolosuhteet on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2.

Naulalevykokeen olosuhteet olivat kylmimmillään $+11,1\text{ °C}$ ja RH 17,8 %, jolloin absoluuttinen kosteus on ollut $1,80\text{ g/m}^3$. Tuotantohallin kuivumiskaappia pyrittiin lämmittämään lämpöpatterilla ja lisäämään kosteutta määrällä kangaspalalla, joka oli osittain ilmassa ja osittain vesisangossa, kuva 8. Tämä järjestely tehtiin, koska tuotantohallin sisäilman todettiin olevan kuivempi kuin tavoiteolosuhteet. Mittausaikajakson loppupuolella kuivumisolosuhteet olivat kuivemmat kuin tavoiteolosuhteet.



Kuva 8. Tuotantohallin ilman lämmitys- ja kosteutusjärjestelyt

3.6 Laadunvarmistusmittaukset

Betonimassan notkeus

Betonin notkeutta kuvataan Suomessa yleensä leviämällä ja painumalla. Notkeus ilmoittaa betonimassan työstettävyydestä, kuinka helppoa sitä on työstää. Liian vetelässä ja nestemäisessä betonimassassa plastiset ja pitkäaikaiset muodonmuutokset, vedenerottumisen ja halkeilun riskit kasvavat. Tämän vuoksi yleinen suositus on, että betonin valmistuksessa käytetään niin jäykkää ja suurta kiviainesta betonimassassa kuin mahdollista. (Suomen betoniyhdistys, 2005, s. 70.)

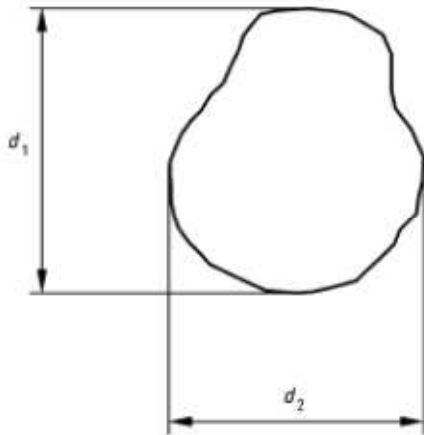
Betonin notkeuteen vaikuttavat käytetyt seos- ja lisäaineet ja niiden määrät. Näitä ovat esimerkiksi veden- ja sementinmäärä, rakeisuuskäyrä ja notkistimet.

Betonin ominaisuuksia tavoitellaan suhteituksella. Suhteituksella arvioidaan betonin ainemäärät. (Suomen betoniyhdistys, 2005, s. 143.)

Notkeuden testausmenetelmänä käytettiin SFS-standardeissa esitettyjä menetelmiä. Leviämä ja painuma mitattiin massoista sen mukaan oliko massa notkea tai jäykkä. Leviämällä ilmoitetaan leviämäalueen halkaisijan mitta. Mittauksen suoritus tehdään siten, että halkaisija mitataan kahdesta suunnasta. Leviämän mittauksesta on esitetty periaate kuvassa 10.

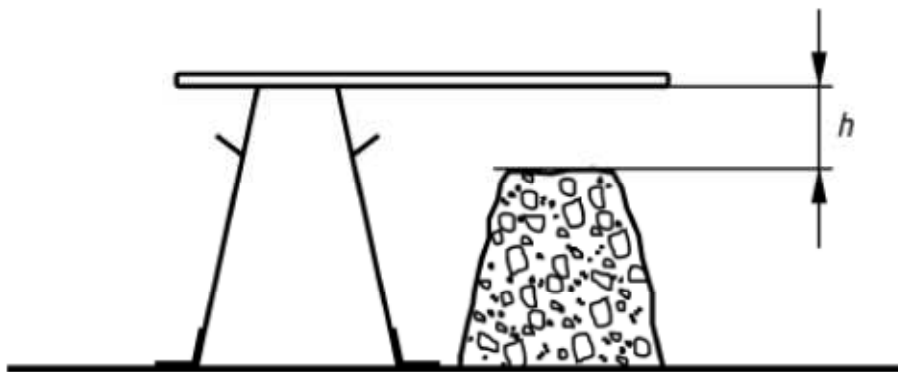


Kuva 9. Oikealla betonin leviämästä muodostunut leviämäalue ja vasemmalla ilmamäärän mittauslaite



Kuva 10. Periaatekuva leviämän mittauksesta (Tuoreen betonin testaus, osa 5: Leviämä, Suomen Standardisoimisliitto SFS, s. 8)

Painumalla ilmoitetaan, kuinka paljon betoni on painunut mitta-astian korkeimpaan kohtaan nähden. Periaatekuva painumasta on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Periaatekuva painuman hyväksyttävästä mittaussuorituksesta (Tuoreen betonin testaus, osa 2: Painuma, Suomen Standardisoimisliitto SFS, s. 6)

Puristuslujuus

Kovettuneen betonin tärkein ominaisuus on puristuslujuus. Puristuslujuus saadaan puristamalla koekappale murtolujuuteen. Puristuslujuusarvot ilmoitetaan MPa:na. Vastaavasti betonin yksi heikkous on vetolujuus, joka on yleensä 1/10 betonin puristuslujuudesta.

Puristuskoekappaleet säilytettiin +20 °C asteen lämpötilassa vesialtaassa. Puristuslujuuskoekappaleet, joiden lujuuden kehitystä haluttiin seurata +10 °C lämpötilassa, säilytettiin suojaamattomana kyseisessä lämpötilassa. Koekappaleiden puristuslujuudet mitattiin 1, 3, 7 ja 28 vuorokauden ikäisinä. (Suomen betoniyhdistys, 2005, s.79)

Lieriökoekappaleet olivat +20 °C asteisessa vesialtaassa muoteista purkamisen jälkeen. Osa kuutiokoekappaleista säilytettiin viileässä tuotantohallissa noin 10 °C asteen lämpötilassa ja osa +20 °C asteisessa vesialtaassa. Koekappaleina käytettiin 150x150x150 mm³ ja 100x100x100 mm³ kuutiota ja lieriöitä, joiden halkaisijat olivat 150 mm ja korkeudet 300 mm. (Suomen betoniyhdistys, 2005, s.79)



Kuva 12. Puristuslujuus koekappaleet



Kuva 13. Puristuslujuuden mittaaminen 150 mm sivumitoiltaan olevasta betonista

Lämpötila ensimmäisen vuorokauden ajalta

Betonin lämpötilan käyttäytymistä seurattiin jokaisesta betonilaadusta ensimmäisen vuorokauden ajalta. Lämpötilakoekappaleet säilytettiin 24 tunnin ajan kylmälaukussa. Koekappale on esitetty kuvassa 14. Tällä aikajaksolla betonimassat alkoivat jäähtymään huippulämpötilasta.



Kuva 14. HT betonin yhden vuorokauden lämpötilamittauskoekappale ja lämpötila-dataloggeri

Tiheys ja ilmamäärä

Betonin tiheyteen vaikuttavat osa-aineet, kuten kiviaines, sementti, vesi sekä lisä- ja seosaineet. Ilmamäärä kertoo kuinka paljon betonissa on tilavuudeltaan ilmaa. Normaali ilmamäärä betoneissa on yleensä noin 20 dm^3 eli 2 %. Ilmamäärä vaikuttaa muun muassa betonin pakkasrapautumiskestävyyteen. Ilmamäärää nostamalla parannetaan pakkasrapautumiskestävyyttä. Suuri ilmamäärä nopeuttaa myös betonin kuivumista.

3.7 Kuivumiskutistuman ennakoitavuus

Kutistuman arviointiin on kehitelty monia laskentakaavoja. Tässä opinnäytetyössä käyn lyhyesti läpi raudoittamattoman betonin loppukutistuman laskemisen, kun tarkempia menetelmiä ei käytetä. Menetelmä on Suomen Rakennusmääräyskokoelman (SRMK) B4 ohje. SRMK neuvoo, kuinka voidaan laskea loppukutistuma ellei tarkempia menetelmiä käytetä. (SRMK B4, 2005 s.

11.) Ohjeen mukaan taulukosta 1 valittiin olosuhteeksi kuiva ilma, kun suhteellinen kosteus oli 40 % RH. Loppukutistuman ϵ_{cs0} perusarvoksi saadaan 0,6 ‰, joka vastaa 0,6 mm/m. Taulukosta 2 valittiin h_e -arvoksi alle 50 mm paksuista laattaa, josta saadaan kertoimen k_{sh} arvoksi 1,2. Perusteena on molempien mittausten menetelmien kuivumisen tapahtuvan vähintäänkin kolmeen suuntaan ja etäisyys reunoihin on enimmillään 50 mm:ä.

Taulukko 1. Loppukutistuman perusarvo (SRMK B4, 2005, s. 11)

Rakenteen ympäristöolosuhteet	Suhteellinen kosteus [%]	Loppukutistuman perusarvo ϵ_{cs0} [‰]
Vesi	100	0
Hyvin kostea ilma	90	0,2
Ulkoilma	70	0,4
Kuiva ilma	40	0,6

Taulukko 2. Kutistumakerroin (SRMK B4, 2005, s. 11)

h_e [mm]	k_{sh}
≤ 50	1,20
100	1,00
200	0,80
300	0,65
≥ 500	0,50

Loppukutistuma SRMK:n ohjeen mukaan on laskettavissa kaavalla 2.

$$Kutistuma = \epsilon_{cs0} * k_{sh} \quad (2)$$

$$Kutistuma = 0,6 \text{ ‰} * 1,2 = 0,72 \text{ ‰}$$

ϵ_{cs0} on loppukutistuman perusarvo, joka valitaan rakenteen ympäristöolosuhteiden perusteella

h_e on rakenteen paksuus

k_{sh} on rakenteen muunnetusta paksuudesta h_e riippuva kerroin, joka saadaan

0,72 promillen kutistuma vastaa kutistuma-arvoa 0,72 mm/m. Tämä kutistuma-arvo on raudoittamattoman betonin viitteellinen kutistuman suuruus.

4 Tutkimustulokset

Tässä luvussa esitetään betonien ominaisuuksien mittausarvot sekä analysoidaan tuloksia ja niiden luotettavuutta. Kovettuneen Betonin ominaisuuksista mitattiin puristuslujuus ja kutistuma-arvot. Tuoreesta betonista mitattiin notkeus, joka mitattiin leviämä- tai painumamenetelmillä, tiheys, ilmamäärä ja massan lämpötila. Opinnäytetyön valut ja tuorebetonien mittaukset suoritettiin 12.-13.12.2011 Lujabetoni Oy:n Lehmon tehtaalla. Apuna mittauksien suorituksissa olivat toimeksiantajan puolelta kehittämisspällikkö Tuomo Kovanen ja kehityslaborantti Perttu Ruuska sekä betonitehtaan työntekijät.

4.1 Tuorebetoni

Tuorebetonin mittausarvot ovat esitetty taulukossa 3. Yleisesti leviämät ja painumat vastasivat valmistajan antamia ohjearvoja. Rakenne- ja NP-betonien painumat olivat suurempia kuin oli odotettu. NP-betonissa odotusarvoa suurempi painuma voi johtua huokostimen ja notkistimen käytöstä.

Jäykistä massoista NP –betonin painuma oli suurempi kuin rakennebetonissa, vaikka NP betonissa oli pienempi vesi-sementtisuhde. NP-betonissa oli käytetty sekä notkistinta että huokostinta.

Taulukko 3. Tuoreen betonin ominaisuuksien mittausarvot

Betonimassa	Leviämä	Painuma	Tiheys	Ilmamäärä	Massan lämpötila
	0 min / heti	0 min / heti			
	mm	mm	kg/m ³	%	°C
HT	650	-	2283	2,0	20,1
HTS	650	-	2281	2,9	18,8
NP	-	240	2175	6,5	16,9
Rak.Bet	-	170	2348	1,3	20,8
NK	510	-	2287	5,8	20,5

Tiheys pysyi melko samana kaikilla massoilla. HT- ja HTS-betonimassojen ilmamäärät ja tiheydet olivat hyvinkin lähellä toisiaan.

Selkeästi suurimmat ilmamäärät olivat NP- ja NK-betonimassoilla. Näissä betonilaaduissa huokostinta oli käytetty erityisesti nopean kuivumisen saavuttamiseksi.

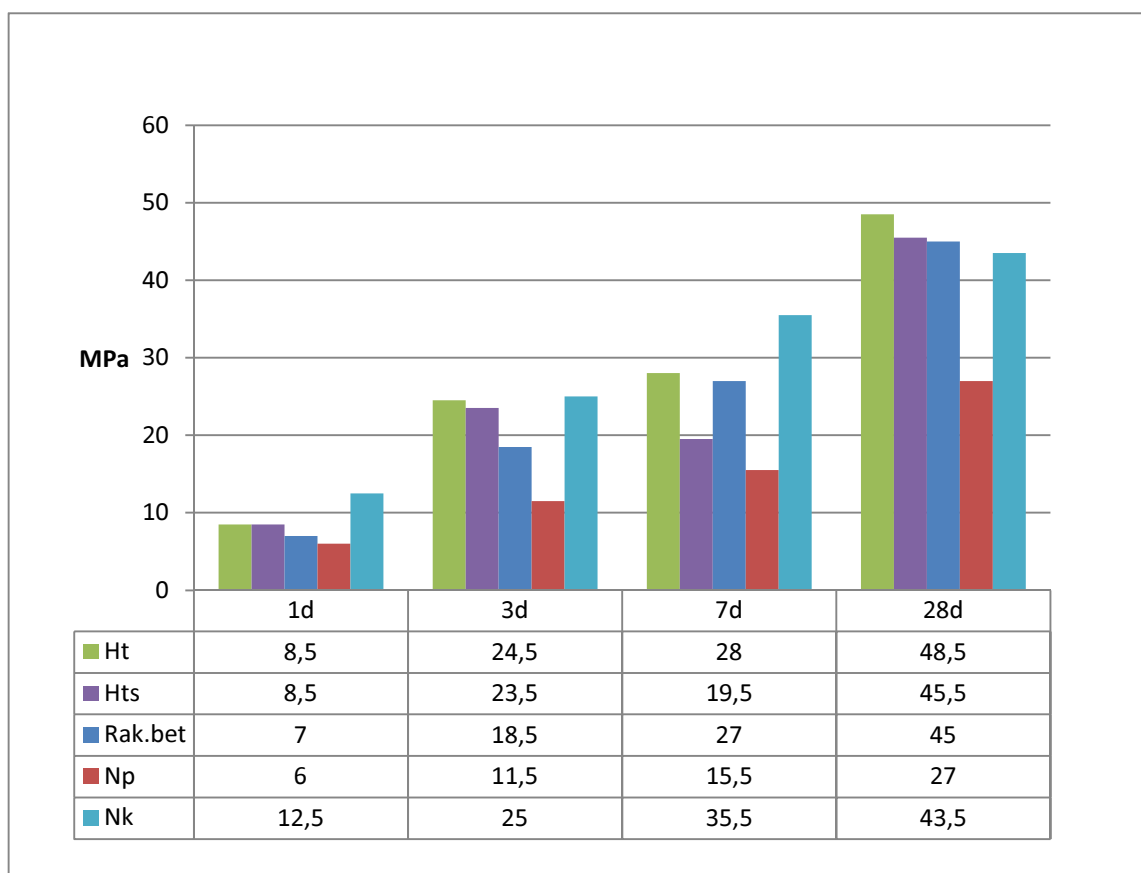
4.2 Puristuslujuus

Kovettuneen betonin tärkein ominaisuus on puristuslujuus. Tässä opinnäytetyössä puristuslujuudet mitattiin kahdessa eri lämpötilassa säilytetyistä koekappaleista 1, 3, 7 ja 28 vuorokauden ikäisinä. Tulokset on muutettu vastaamaan 150x150x150 mm³ kuutioiden puristuslujuuksia. Lieriölujuudet on saatu halkaisijaltaan 150 mm ja 300 mm korkeasta koekappaleesta. Kuutiolujuudet saatiin 100x100x100 mm³ ja 150x150x150 mm³ koekappaleista. Taulukossa 4. on esitetty Lujabetoni Oy:n ilmoittamat tavoite- ja nimellislujuudet betoneille.

Taulukko 4 Betonien tavoite- ja nimellislujuudet

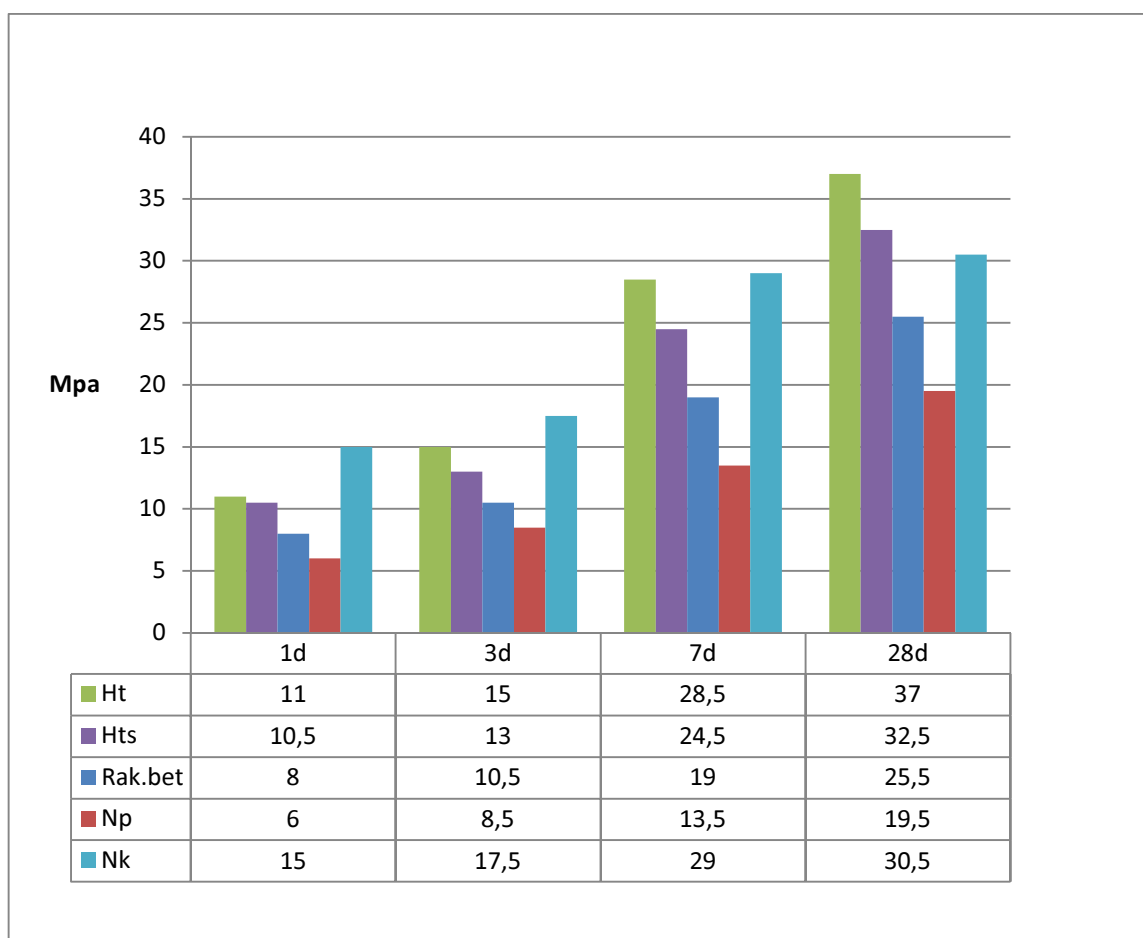
Betonilaatu	Nimellislujuus MPa	Tavoitelujuus MPa
HT	40	45
HTS	40	45
Rak.Bet	30	35
Np	30	35
NK	40	45

Kuvassa 15 on esitetty puristuslujuudet koekappaleista, jotka säilytettiin 20 °C –asteen lämpötilassa. Kolmen, seitsemän ja 28 vuorokauden koekappaleet säilytettiin vesialtaassa. Ensimmäisen vuorokauden puristustulokset olivat lämpötilamittauksessa käytetyistä 150x150x150 mm³ kuutioista. Kolmannen vuorokauden puristustulokset on saatu 100x100x100 mm³ kuutioista. Seitsemän ja 28 vuorokauden ikäisten koekappaleiden puristusarvot ovat lieriölujuus koekappaleita. Näistä koekappaleista kaikki, paitsi NP-betoni, ylittivät nimellislujuuden.



Kuva 15. Puristuslujuuden kehitys 20 °C –asteen lämpötilassa vesialtaassa säilytetyistä koekappaleista

Kuvassa 16 on esitetty +10 °C -asteen lämpötilassa säilytettyjen koekappaleiden puristuslujuudet. Ensimmäisen päivän puristuslujuus koekappaleet ovat 150x150x150 mm³ kuutioita ja loput koekappaleet ovat 100x100x100 mm³ kuutioita. Verrattuna +20 °C -asteessa säilytettyihin koekappaleisiin, voidaan huomata lämpötilan vaikuttavan puristuslujuuden kehitykseen.

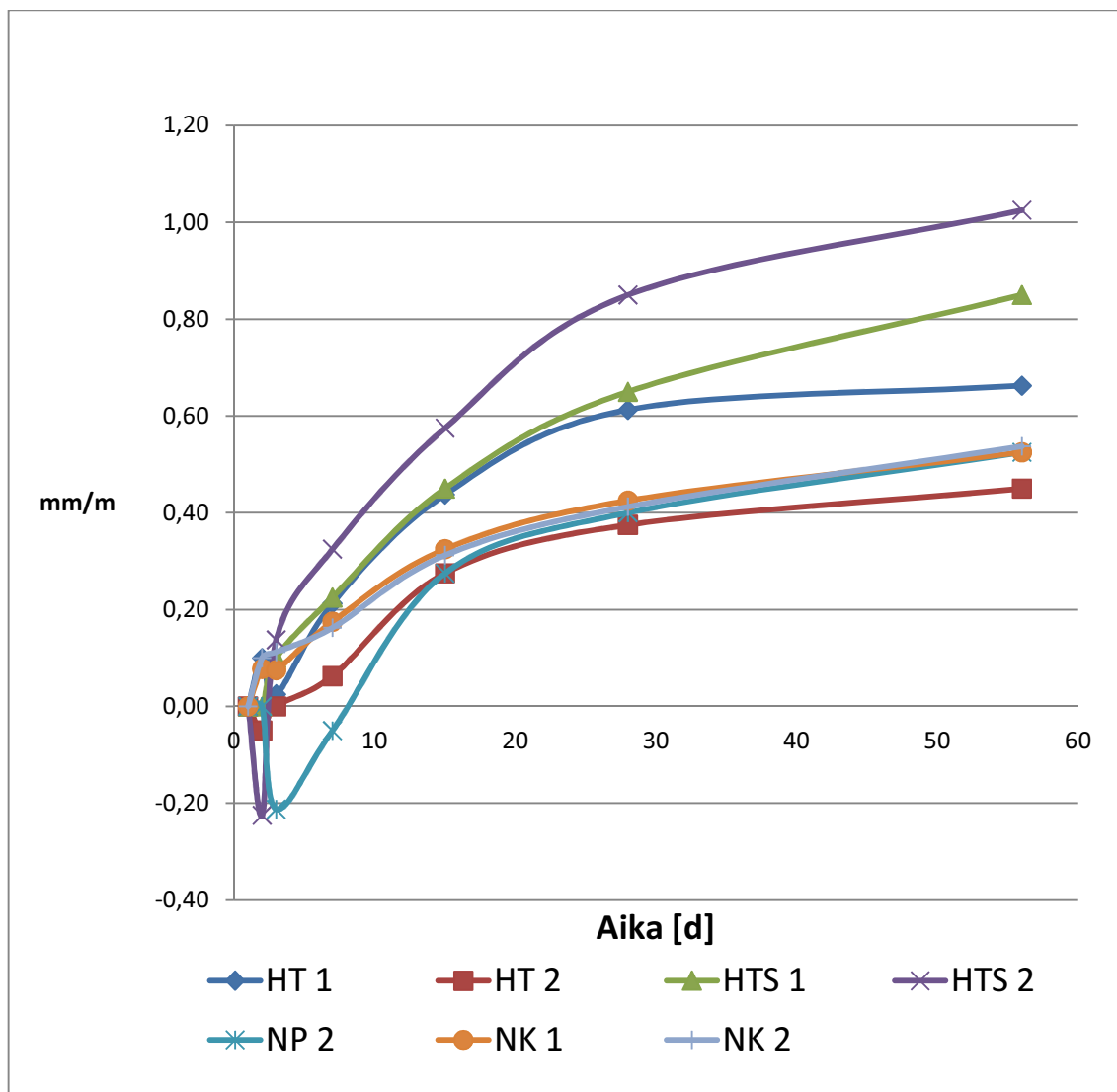


Kuva 16. Puristuslujuuden kehitys +10 °C -asteen lämpötilassa huoneolosuhteissa säilytettyistä koekappaleista

Kylmemmässä säilytetyt koekappaleet eivät ole saavuttaneet kumpaakaan nimellis- ja tavoitelujuuttaan 28 vuorokauden aikana. Lämpimämmässä olosuhteissa säilytetyt koekappaleet ovat taas huomattavasti korkeampia puristuslujuuksiltaan kuin kylmemmissä olosuhteissa säilytetyt koekappaleet.

4.3 Palkkikokeen kutistuma-arvot

Palkkikokeen koekappaleiden kutistuma-arvot ovat esitetty kuvassa 17. Vastaavat kutistuma-arvot ovat esitetty numeerisessa muodossa taulukossa 5. Taulukon mittaustulokset vastaavat 1000 mm:n pituista betonipalkkia ja sen kutistumaa. Mittausarvot ovat esitetty liitteessä 3.



Kuva 17. Palkkikokeen kutistuma-arvot

Kutistuman tulokset lähtevät tasaisesti nousemaan 1 vuorokauden kohdalta. Palkkikokeen koekappaleet ovat lähteneet kuivumaan heti, kun peitteet on poistettu. Kutistumatulokset ovat melko suurehkoja HTS 1 ja HTS 2 koekappaleilla.

HTS 2-koekappaleen kutistuma oli 1,03 mm/m, mikä oli melko suuri. Kyseisessä koekappaleessa ei ollut näkyviä merkkejä virheitä aiheuttavista tekijöistä, joten on hyväksyttävä koekappaleen antama kutistuma-arvo sellaisenaan. Samassa koekappaleessa toisen päivän kohdalla on tapahtunut laajenemista. Kyseessä ei siis ole lämpölaajeneminen, koska sen suurin lämpötila huippu tapahtui aiemman lämpötilamittauksen mukaan ensimmäisen vuorokauden aikana, johtuen hydrataatiosta tulevasta lämmöstä. Notkahduksesta huolimatta kutistuma-arvo lähtee nopeaan kasvuun ja ylittää jopa rinnakkaiskoekappaleen kutistuma-arvon. Eroa vertailukoekappaleeseen jäi loppukutistuma-arvojen välillä 0,18 mm/m.

Koekappaleessa HT 2 tapahtui vastaavanlainen laajeneminen kuin HTS 2 kappaleessa, joka näkyy negatiivisena arvona taulukossa. Koekappale HT 1 kutistuu 0,66 mm/m:n verran. Toisaalta HT 2 koekappale jää kutistumaltaan vain 0,45 mm/m. Eroa HT vertailukoekappaleiden kesken jäi 0,21 mm/m. Ainoa vertailukelpoinen pari oli NK-betonilaadun koekappaleet tällä mittausmenetelmällä. Eroa tämän vertailuparin välillä oli 0,02 mm/m

Taulukko 5. Palkkikokeen kutistuma-arvot mm/m

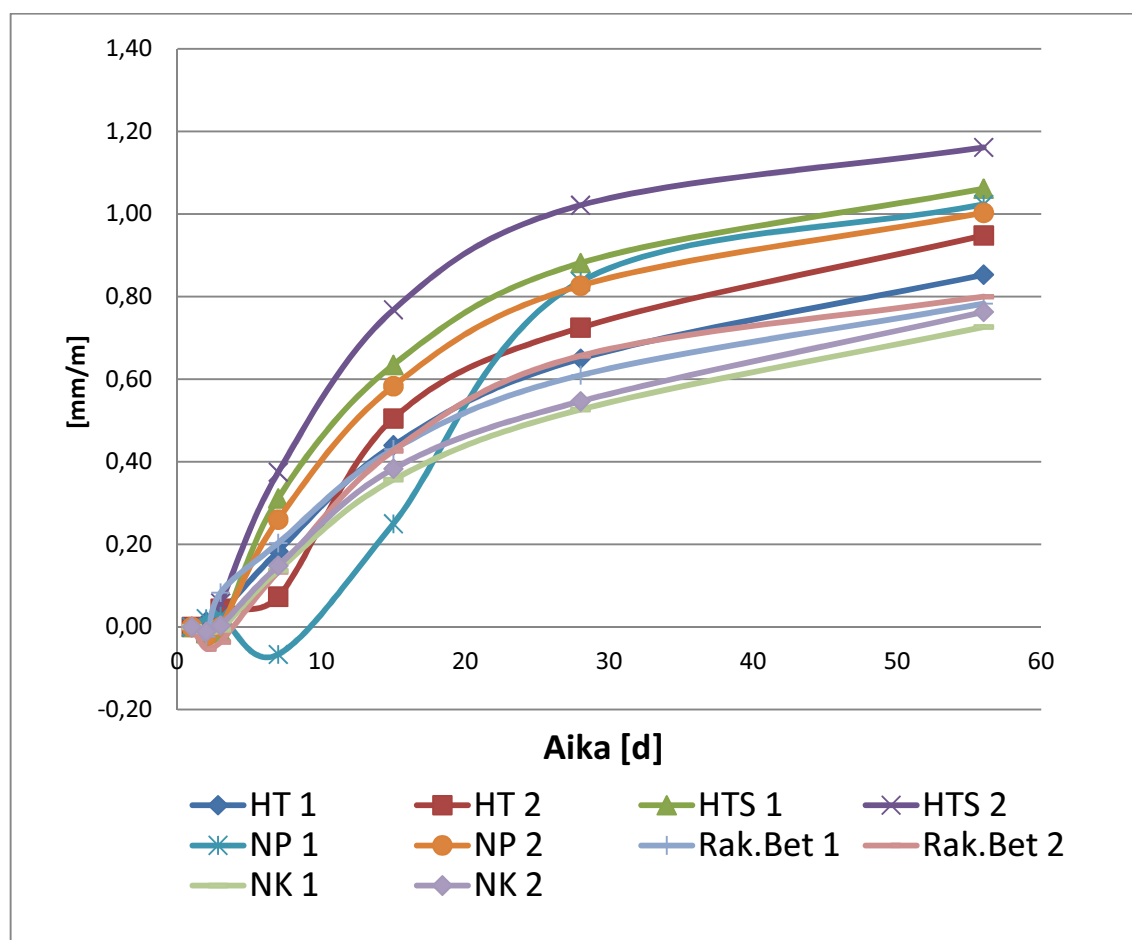
Ikä (d)	1	2	3	7	15	28	56
HT 1	0,00	0,10	0,02	0,21	0,44	0,61	0,66
HT 2	0,00	-0,05	0,00	0,06	0,27	0,38	0,45
HTS 1	0,00	0,00	0,10	0,23	0,45	0,65	0,85
HTS 2	0,00	-0,23	0,14	0,32	0,58	0,85	1,03
NP 2	-	0,00	-0,21	-0,05	0,28	0,40	0,53
NK 1	0,00	0,08	0,07	0,18	0,32	0,43	0,52
NK 2	0,00	0,10	0,11	0,16	0,31	0,41	0,54

NP 1 koekappaleen mittauksia ei voitu suorittaa, tämän koekappaleen ollessa viallinen. NP 2 koekappaleen kutistuma-arvoa ei voida yksinään pitää luotettavana. Voidaan kuitenkin olettaa betonin samankaltaisuuden vuoksi kutistuma-arvon olevan luotettava, joten kutistuma pidetään taulukossa vertailun vuoksi. NK-koekappaleiden kutistumat kasvoivat tasaisesti aina 56 vuorokauden ikään saakka ja vertailuparin kutistuma-arvot olivat hyvin lähellä

toisiaan. Toisin kuin NK betonilla vastaavasti HT ja HTS vertailuparien kutistumien eroavaisuudet olivat melko suuret.

4.4 Naulalevykokeen kutistuma-arvot

Kutistuma-arvot ovat esitetty kuvassa 18, josta huomataan että tavoitearvo 0,72 mm/m ylittyi. Vastaavat kutistuma-arvot ovat esitetty taulukossa 6. Kutistuma-arvot ovat melko suuria, mikä ilmeisesti johtuu toteutuneista olosuhteista. Tuotantohallin olosuhteet saatiin selville dataloggereilla mitatuista arvoista, jotka osoittavat olosuhteiden olleen kuivat. Kutistuma-arvot ovat siinä määrin luotettavat, että olosuhteiden vaikutus näkyy kutistuman suuruudessa. Kutistumien tulokset eivät kuitenkaan ole suosituksen antamissa rajoissa. Naulalevykokeen kutistumakaava on esitetty kaavassa 1. Mittausarvot ovat esitetty liitteessä 3.



Kuva 18. Naulalevykokeen kutistuma-arvot, mm/m

Ensimäisen seitsemän päivän aikana NP 1-koekappale sai poikkeavia kutistuma-arvoja muihin koekappaleisiin nähden. Kutistuma-arvojen mukaan NP 1-koekappale oli laajentunut melko paljon. Vertailukoekappaleen NP 2-kutistuma-arvot olivat eroavaiset NP 1-koekappaleen kanssa vielä 15 vuorokauden mittauksen kohdalla. NP 1-koekappaleen lämpötila on ollut sama kuin muidenkin koekappaleiden, joten voidaan todeta ettei laajentuminen ollut lämpölaajenemista. Kutistuma koekappale NP 1 oli kuitenkin palautunut 28 vuorokauden iässä vertailuparin NP 2:n vastaavalle tasolle.

Laajenemisen syy on tosin hieman epäselvä. Jos koekappaleiden eroavaisuus olisi ollut vain yhdellä mittauskerralla, kyseessä olisi voinut olla mittausvirhe tai koekappaleeseen vaikuttava virhe tekijä. Virhetekijöitä on voinut aiheuttaa koekappaleiden epätasaisuus. Koekappaleista osa ei ollut vakaa mittaustelineessä. Osa koekappaleista oli epätasaisia, johtuen naulalevyn noususta betonin sisään tärytyksen yhteydessä. Näin tapahtui vain jäykille betonimassoille. Kaikki epätasaiset koekappaleet on esitetty taulukon 6 yhteydessä. Kaikkien koekappaleiden pohjassa oli noin 0,5-1,0 mm ohut betonikerrostuma.

Taulukko 6. Naulalevykokeen kutistuma-arvot, mm/m

Ikä (d)	1	2	3	7	15	28	56
HT 1	0,00	0,01	0,03	0,18	0,44	0,65	0,85
HT 2	0,00	-0,01	0,04	0,07	0,50	0,72	0,95
HTS 1	0,00	-0,01	-0,01	0,31	0,63	0,88	1,06
HTS 2 ^a	0,00	0,00	0,06	0,37	0,77	1,02	1,16
NP 1 ^a	0,00	0,02	0,03	-0,07	0,25	0,84	1,02
NP 2 ^{ab}	0,00	-0,02	0,00	0,26	0,58	0,83	1,00
Rak.Bet 1 ^{ab}	0,00	-0,02	0,08	0,20	0,43	0,61	0,78
Rak.Bet 2 ^{ab}	0,00	-0,05	-0,04	0,13	0,43	0,66	0,80
NK 1	0,00	-0,01	-0,01	0,14	0,36	0,53	0,73
NK 2	0,00	-0,01	0,00	0,15	0,38	0,55	0,76

jossa a ilmoittaa siitä, että koekappale ei ole ollut vakaa mitattaessa
 b ilmoittaa siitä, että koekappaleen naulalevy on noussut tärytyksen yhteydessä muotinpohjasta noin 5-6 mm.

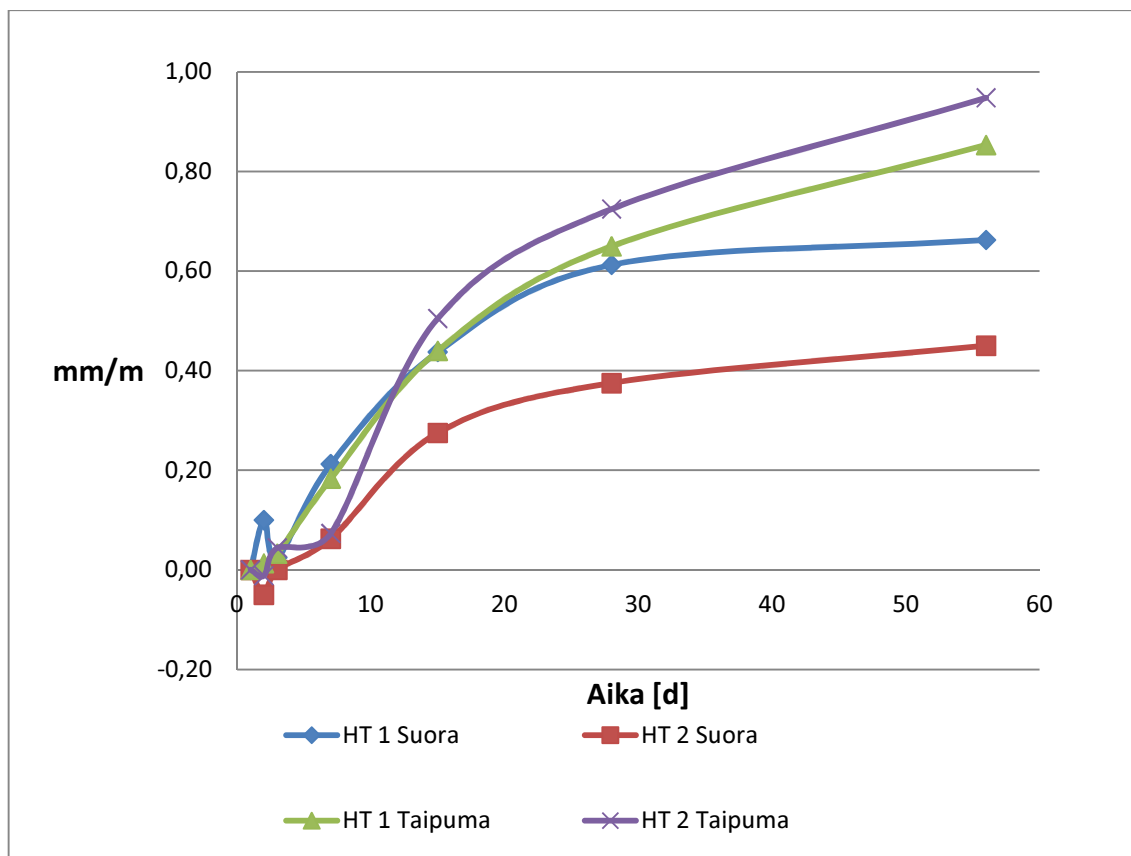
Kolmen päivän kuluttua valusta betonit eivät olleet kutistuneet kovinkaan paljoa. Kutistumat lähtevät melko nopeasti nousemaan kolmannen vuorokauden jälkeen. Ensimmäinen olosuhdemittaus saatiin naulalevykokeen olosuhdekaapista kolmannen päivän kohdalta. Tällöin olosuhteet olivat +18 °C –astetta ja RH 85 %. Näiden arvojen avulla absoluuttisen kosteuden arvoksi saadaan laskettua 13,07 g/m³.

Kosteuskaapin absoluuttinen kosteus seitsemännen päivän kohdalla oli 10,0 g/m³. Kosteus on ollut vielä silloin melko korkea, verrattuna tavoiteolosuhteeseen eli lämpötilaan +20 °C –astetta ja ilman suhteelliseen kosteuteen RH 40 %. Tällöin absoluuttinen kosteus olisi 8,64 g/m³. Seitsemännen päivän kosteusmäärä vastasi siis olosuhdetta +20 °C -astetta ja RH 60 %.

4.5 HT betonilaadun kutistuma-arvojen tarkastelu

Tässä kappaleessa verrataan HT betonilaadun palkki- ja naulalevykokeista saatuja kutistuma-arvoja. Koekappaleiden kutistuma-arvot kuvassa 19 osoittavat, että kutistumat eroavat toisistaan. Palkkikokeen koekappaleet saivat pienempiä kutistuma-arvoja. Palkkikokeen kutistuma-arvot olivat suositusten mukaisissa rajoissa, kun taas naulalevykokeen kutistuma-arvot olivat saaneet hieman suosituksista suurempia arvoja. Naulalevykokeen kutistuma-arvot olivat ”turvallisen” 1,0 mm/m rajan alapuolella.

Tämä voi johtua naulalevykokeen osalta kuivemmista olosuhteista kuin missä palkkikokeen koekappaleet olivat. Loppua kohden naulalevykokeen kutistuma-arvot eivät hidastu kuten palkkikokeen kutistuma-arvot. Kutistuminen jatkuu melko voimakkaasti loppukutistumaan asti.



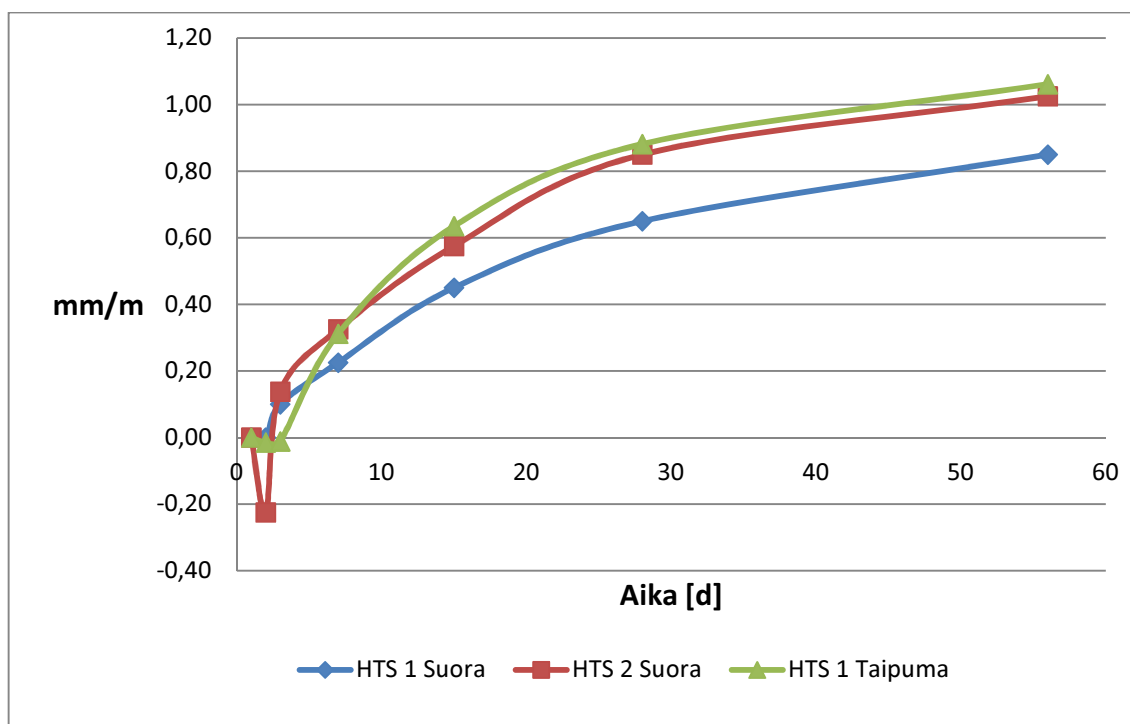
Kuva 19. HT-betonilaatujen palkki- ja naulalevykokeen kutistuma-arvot mm/m

jossa *Suora* on palkkikokeen kutistuma-arvo käyrä
Taipuma on naulalevykokeen kutistuma-arvo käyrä

4.6 HTS betonilaadun kutistuma-arvojen tarkastelu

Tässä kappaleessa verrataan HTS betonilaadun palkkikokeen ja naulalevykokeen kutistuma-arvoja. Kuva 20 osoittaa, että palkkikokeen koekappaleet ovat saaneet pienempiä kutistuma-arvoja kuin naulalevykokeen koekappaleet. HTS 2 taipumakoekappale on todettu aikaisemmin virheelliseksi, joten se on poistettu tästä vertailusta.

Naulalevykokeen HTS 1-koekappale on saanut palkkikokeen HTS 1 koekappaleen kanssa lähes samansuuruisen kutistuma-arvon. Kuitenkin HTS 1 palkkikokeen suorakoekappale on melko suuri ja poikkeaa paljon HTS 2 vertailukoekappaleen arvosta, joten voidaan todeta HTS 1 koekappaleen olevan epäluotettavana. Tällöin naulalevykokeen HTS 1 kutistuma-arvo on tulkittavissa suureksi, joka selittyy kuivista olosuhteista. Näiden kahden mittausmenetelmien erotukseksi palkkikokeen HTS 1 koekappaleen ja naulalevykokeen HTS 1 välillä jää 0,21 mm/m.



Kuvaaja 20. HTS-betonilaatujen palkki ja naulalevykokeen kutistuma-arvot mm/m

jossa *Suora* on palkkikokeen kutistuma-arvo käyrä
Taipuma on naulalevykokeen kutistuma-arvo käyrä

4.7 Kuivumiskutistuma-arvot 56 vuorokauden kohdalta

Kaikki 56 vuorokauden ajan kutistuma-arvot on esitetty taulukossa 7. Molemmilla mittausmenetelmillä HTS betonikoekappaleet ovat saaneet selkeästi suurimmat kutistuma-arvot. Palkkikokeessa ero vähemmän kutistuneeseen HTS 2 koekappaleeseen on kuitenkin 0,18 mm/m.

Ottaen huomioon, että säilytysolosuhteet olivat kuivat naulalevykokeessa, NP-koekappaleet saivat naulalevykokeissa HTS-laatuja lisäksi ”turvallisen” 1.0 mm/m -rajan ylittäviä kutistuma-arvoja. Palkkikokeessa taas NP-koekappaleen kutistuma-arvo antoi selkeästi suosituksen mukaisen kutistuma-arvon.

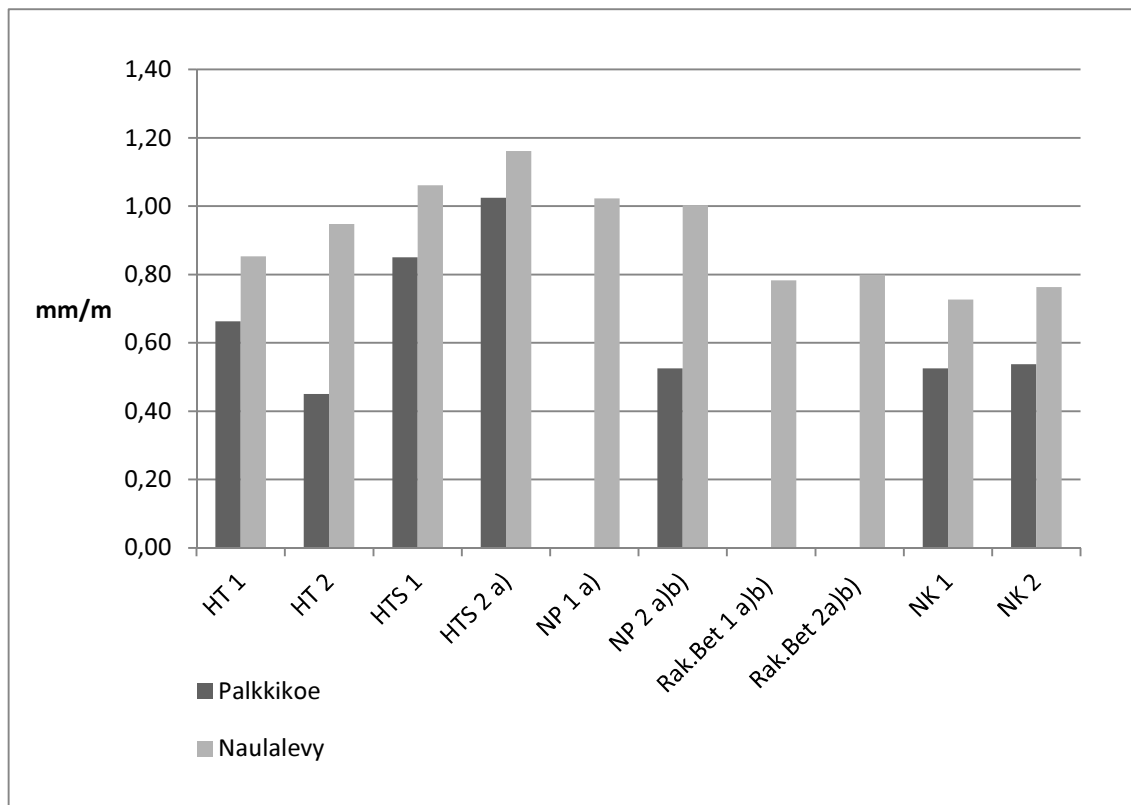
Suurin loppukutistumavaihtelu mittausmenetelmien välillä on NP betonilaadulla. Erotus naulalevykoekappaleen ja palkkikokeen välillä on 0,47 mm/m. Tähän saattaa vaikuttaa säilytysolosuhteiden lisäksi koekappaleiden virheellisyudet. NP naulalevykokeen toinen kutistumakoekappale oli osittain virheellinen ja toinen oli epätasainen.

Taulukko 7. 56 vuorokauden kutistuma-arvot, mm/m

Betonilaatu	Palkkikoe	Naulalevy
HT 1	0,66	0,85
HT 2	0,45	0,95
HTS 1	0,85	1,06
HTS 2 ^a	1,03	1,16 ^a
NP 1 ^a	-	1,02 ^a
NP 2 ^{ab}	0,53	1,00 ^{ab}
Rak.Bet 1 ^{ab}	-	0,78 ^{ab}
Rak.Bet 2 ^{ab}	-	0,80 ^{ab}
NK 1	0,52	0,73
NK 2	0,54	0,76

jossa a ilmoittaa siitä, että naulalevy koekappale ei ole ollut vakaa mitattaessa
 b ilmoittaa siitä, että naulalevy koekappaleen naulalevy on noussut tärytyksen yhteydessä muotin pohjasta noin 5-6 mm.

Palkkikokeen kaikki kutistuma-arvot olivat pienempiä kuin naulalevykokeen kutistuma-arvot, joka näkyy selvästi kuvasta 21. Menetelmien välinen vertailu oli tässä tapauksessa vaikeaa, koska säilytysolosuhteet erosivat toisistaan. Jos säilytysolosuhteet olisivat olleet samat, oltaisiin mahdollisesti saatu luotettavampia vertailuarvoja.



Kuva 21. 56 vuorokauden kutistuma-arvot, mm/m

jossa a) ilmoittaa siitä, että naulalevy koekappale ei ole ollut vakaa mitattaessa
 b) ilmoittaa siitä, että naulalevy koekappaleen naulalevy on noussut tärytyksen yhteydessä muotinpohjasta noin 5-6 mm.

Palkkikokeen olosuhteet olivat alusta asti vakiot. Vastaavasti naulalevykokeessa olosuhteet vaihtelivat jatkuvasti. Aluksi ilman suhteellinen kosteus naulalevykokeessa oli suuri, joka hidasti koekappaleiden kuivumista. Mittausaikajakson loppupuolella olosuhteet muuttuivat kuivemmiksi, jotka olivat mahdollistaneet suuremmat kutistuma-arvot ja nopeamman kuivumisen kuin palkkikokeen olosuhteet. On myös huomioitava mittausmenetelmien erilaisuudet, jotka saattavat vaikuttaa kutistuma-arvojen muodostumiseen.

5 Luotettavuusanalyysi

Tärkeimmiksi huomatuiksi virheiksi muodostuivat naulalevykokeen virheelliset koekappaleet ja samasta mittausmenetelmästä säilytysolosuhteet. Olosuhteet vaihtelivat naulalevykokeen aikana jakuvasti. Naulalevykokeen kutistuma-arvoista voidaan tehdä karkeita johtopäätöksiä ja yleistyksiä. Palkkikokeen kutistuma-arvoista päätarkastelun kohteena olleiden HT ja HTS vertailuparien suuruudet olivat toisistaan eniten poikkeavia. Tämä vähentää palkkikokeen luotettavuutta merkittävästi.

Naulalevykokeen kutistuma-arvojen suuruudet pystyttiin selittämään säilytysolosuhteilla ja koekappaleiden virheellisyydellä vain osittain. Lisäksi opinnäytetyön analysoinnissa oli jätetty pois naulalevyn alkuperäisen käyttötarkoituksen vaikutuksen huomiointi kutistuman suuruuteen. Oletuksena käytettiin, että mittausmenetelmät saisivat samansuuruiset kutistuma-arvot. Jokatapauksessa nämä virheiden aiheuttajat jättävät epäilyksen mittausmenetelmien vertailun luotettavuuteen.

Naulalevykokeen olosuhteisiin ei voitu vaikuttaa riittävän tarkasti, jotta oltaisiin saatu palkkikoetta vastaavat olosuhteet. Naulalevykokeen olosuhteet aiheuttivat järjestelmällisesti virheitä. Olosuhteet ovat vaikuttaneet kutistuma-arvojen suuruuteen kasvattamalla kutistumaa.

Virheelliset koekappaleet antoivat virheellisiä kutistuma-arvoja naulalevykokeessa. Mahdollinen virheellisyys koekappaleessa on voinut vaikuttaa kutistuman suuruutta lisäävästi tai vähentävästi. Kutistuma-arvoista päätellen virhetekijät ovat pääsääntöisesti kasvattaneet kutistumaa. Näin on mahdollisesti käynyt naulalevykokeen NP-betonilaadun osalta, kun vertailun koemenetelmän koekappaleet kutistuivat huomattavasti vähemmän. Koekappaleiden epätasaisuuksista johtuvat virheet ovat muodostuneet lähinnä valun yhteydessä käytetystä tärytyksestä. Tällöin naulalevyt olivat joissakin tapauksissa kohonneet koekappaleen pohjasta valun sisälle.

Lähtökohtaisesti naulalevykoe on tarkoitettu erikoislaasteille ja –betoneille, kuten juotoslaastit ja –betonit, talvijuotoslaastit ja –betonit, pystysaumalaastit ja talvipystysaumalaastit, pakkaslaastit ja -betonit. Näiden betonien tiedetään olevan kiviaineksiltaan pienempiä kuin lattiabetonit. Yleisesti lattiabetoneiden valmistukseen suositellaan käytettävän mahdollisimman suurta kiviainesjakaumaa. Tämä saattaa muuttaa taipumakokeen kutistuma-arvoja hieman erilaiseksi, kun kiviaines lattiabetoneissa on suurempijakoista ja se vähentää veden ja sementin määrää koekappaleessa.

Aiemman kokemuksen ja mittaustietojen puutteen vuoksi eikä voida tehdä päätelmiä olisivatko mittausmenetelmät keskenään vertailukelpoisia. Jos haluttaisiin saada varmuus mittausmenetelmien vertailukelpoisuudesta, pitäisi tehdä jatkotutkimuksia sekä naulalevy- että palkkikokeista. Tämän lisäksi on mahdollista kysyä muilta betonin toimittajilta käyttökokemuksia vastaavanlaisista mittausmenetelmistä ja kutistuma-arvojen suuruuksista.

Kutistuma-arvot saadaan hieman tarkemmin ja luotettavammin palkkikokeella kuin naulalevykokeella. Naulalevykokeessa on suurempi epäonnistumisen vaara. Tämän lisäksi palkkikokeen kutistuma-arvot nähdään suoraviivaisemmin. Palkkikoetta on käytetty enemmän lattiabetonien kutistuman mittaamiseen kuin naulalevykoetta.

6 Johtopäätökset

Keskeiset tulokset ja luotettavuus

Kutistuma-arvot ovat saaneet mittausmenetelmistä erilaisia kutistuma lukuarvoja. Tämä johtuu mittausmenetelmien erilaisuudesta ja olosuhteista. Palkki- ja naulalevykokeesta luotettavampana kuitenkin voidaan pitää palkkikokeen kutistuma-arvoja. Palkkikokeessa ei ollut virheellisiä koekappaleita ja vertailukoekappaleiden kutistuma-arvojen hajonnat olivat lähempänä toisiaan. Tämän lisäksi palkkikokeen suoritusmenetelmä oli selkeämpi ja sitä on myös käytetty enemmän lattiabetonien kutistumien mittaukseen.

Päätavoitteen mukaiset HT- ja HTS-betonilaatujen tavoitellut loppukutistuma-arvot olivat palkkikokeesta saatuina seuraavanlaiset. Loppukutistumat ovat esitetty taulukossa 8. HT-betonilaatu kutistui yhtä paljon kuin vertailussa käytetyt NP- ja NK-betonilaadut. HTS-betonilaadun kutistumakoekappaleet kutistuivat hieman enemmän kuin vertailussa käytetyt NP ja NK betonilaadut, eivätkä täyttäneet toimeksiantajan asettamia tavoitearvoja. Kuitenkin voidaan todeta niiden kutistuman olevan normaalin suuruinen

Taulukko 8. Palkkikokeen loppukutistuma-arvot, 56 vrk, [mm/m]

Betonilaatu	Palkkikoe
HT 1	0,66
HT 2	0,45
HTS 1	0,85
HTS 2 ^a	1,03

Betonin normaaliominaisuudet täyttivät lähes täysin odotusarvot puristuslujuudessa, notkeudessa, ilmamäärässä ja tiheydessä. Mitatut ominaisuudet olivat laaduntarkastuksellisesti onnistuneita

Työn merkitys tieteellisesti ja ammatillisesti

Koe oli järjestetty tulosten hankintaa varten kokeellisella menetelmällä. Mittausmenetelmät on yleisesti käytössä olevia. Myöskään tarkempia suhteitus tietoja ei kerrota tässä opinnäytetyössä, josta voisi päätellä suhteituksen onnistuneisuutta. Ammatillisesti tarkasteltuna opinnäytetyö kehitti kutistumamittauksien suorittamisessa ja saatiin arvokasta kokemusta mittausmenetelmien arvioinnista.

Työn hyöty

Opinnäytetyön hyöty rajautuu Lujabetoni Oy:llä palkkikokeesta saatuihin kutistuma-arvoihin ja kokemusperäisen tiedon saamiseen. Teoriatietoa mitä tässä opinnäytetyössä käytettiin perustuu alan lähteisiin.

Näiden kahden mittausmenetelmän avulla lasketut kutistuma-arvot ja kokemukset antoivat lisäarvoa jatkotutkimuksia varten. Lisäksi saatuja kutistuma-arvoja voidaan käyttää hyödyksi markkinoinnissa. Laajemmassa mittakaavassa tarkasteltuna kutistuma-arvoja ei edes ilmoiteta. Harvemmin niitä on edes mitattu.

Sovellettavuus

Koekappaleiden määrä, koko ja tavoitettavat olosuhteet asettavat rajoitteet kokeen suorittamiselle. Erityisesti naulalevykokeen koekappaleet, joiden Naulalevykoekappaleiden pituus on yli yhden metrin. Tämä vaatimus kasvattaa olosuhdekaapin kokoa. Näin ollen naulalevykoekappaleiden koko sulkee pois yleisimmät paikat, mihin koekappaleet voidaan asettaa tasaisiin olosuhteisiin. Tavoiteltaessa tasaisia olosuhteita, on käytettävä tietokoneohjelmoituja jäädytys-sulatuskaapin tyyppisiä säilytysolosuhteita. Ilman tasaisia olosuhteita kutistuma-arvot eivät ole vertailukelpoisia muiden mittausmenetelmien kanssa.

Jatkotutkimukset

Jatkotutkimukseksi suosittelen näiden kahden mittausmenetelmän käyttöä, niiden helppokäyttöisyyden vuoksi. Yhtenä tavoitteena voisi pitää mittausmenetelmien eroavaisuuksien kartoittamista. Toisena tavoitteena voisi pitää, kun tiedetään riittävällä tarkkuudella kutistumien samankaltaisuus, näiden opinnäytetyössä käytettyjen betonilaatujen seos- ja lisäaineiden muuttamista vähän kerrallaan. Näin saataisiin mahdollisesti selville eri seos- ja lisäaineiden vaikutus kutistumassa.

Mikäli tulevaisuudessa kutistuma-arvoja aiotaan rajoittaa, voi kyseeseen tulla vähemmän kutistuvien betonien valmistaminen. Tämä on kalliimpaa ja toisaalta suurta hyötyä ei varsinaisesti ole nähtävissä. Kuitenkin mahdollisen vähemmän kutistuvan betonilaadun tavoittelussa olisi syytä ottaa huomioon myös autogeeninen kutistuma. Tämä vaatisi koejärjestelyiltä hieman muutoksia siten, että koekappaleet säilytettäisiin ulkoisilta kuivamisolosuhteilta suojattuina. Tällöin koekappale voisi kuivua ja kutistua pelkästään hydrataation vaikutuksesta. Tämä tarkoittaisi betonilaadulta pienempää vesi-sementtisuhteita ja mahdollisesti enemmän tehonotkistimien käyttöä, mikä johtaisi tahallisesti korkealujuusluokan betonin muodostumiseen.

En näe esteitä molempien kutistumamittausmenetelmien käytön jatkamiselle. Kuitenkin pitää varmistua olosuhteiden ja koekappaleiden aiheuttamista virhetekijöistä. Yhtenä tärkeänä osana näkisin olosuhteiden säilyttämisen samana, jos mitataan kahdella eri mittausmenetelmällä.

Lähteet

Suomen Betoniyhdistys, 2010. Betoninormien edellyttämiä käyttöselosteita koskevat ohjeet F. erikoislaastit ja –betonit BY 22, Suomen betoniyhdistys r.y., Helsinki

Suomen Betoniyhdistys, 2005. Betonitekniikan oppikirja BY 201, 5. painos, Suomen Betoniyhdistys r.y., Helsinki

Hietala, J. 2011. Betonilattioiden kutistuman hallinta. Espoo. Aalto-yliopisto. Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos. Diplomityö.

Leivo M. & Holt E. 2001. Betonin kutistuma. VTT tiedotteita. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka.

Lujabetoni Oy. 2010. Työohje HT –lattiabetonit. Siilinjärvi. Lujabetoni Oy

Rudus Oy. 2010. Betonin kutistuma ja sen huomioiminen. Asiakastiedote 1/2010. <http://www.rudus.fi/Download/24663/2010-1%20Betonin%20kutistuma%20ja%20sen%20huomioiminen.pdf>.
24.3.2012

Suomen Rakentamismääräyskokoelama. 2005. B4 betonirakenteet, ohjeet. Helsinki. Ympäristöministeriö. Asunto- ja rakennusosasto.
Ladattavissa
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=411711&lan=FI#a1>

SFS. Tuoreen betonin testaus. osa 2: Painuma. Suomen Standardisoimisliitto SFS, vahvistettu 25.5.2009

SFS. Tuoreen betonin testaus. osa 5: Leviämä, Suomen Standardisoimisliitto SFS. vahvistettu 25.5.2009

Puhelinkeskustelu, Ari Ipatti, Contesta, Varmistettu 29.5.2012.

Kutistuma-arvot mittausajanjaksolta

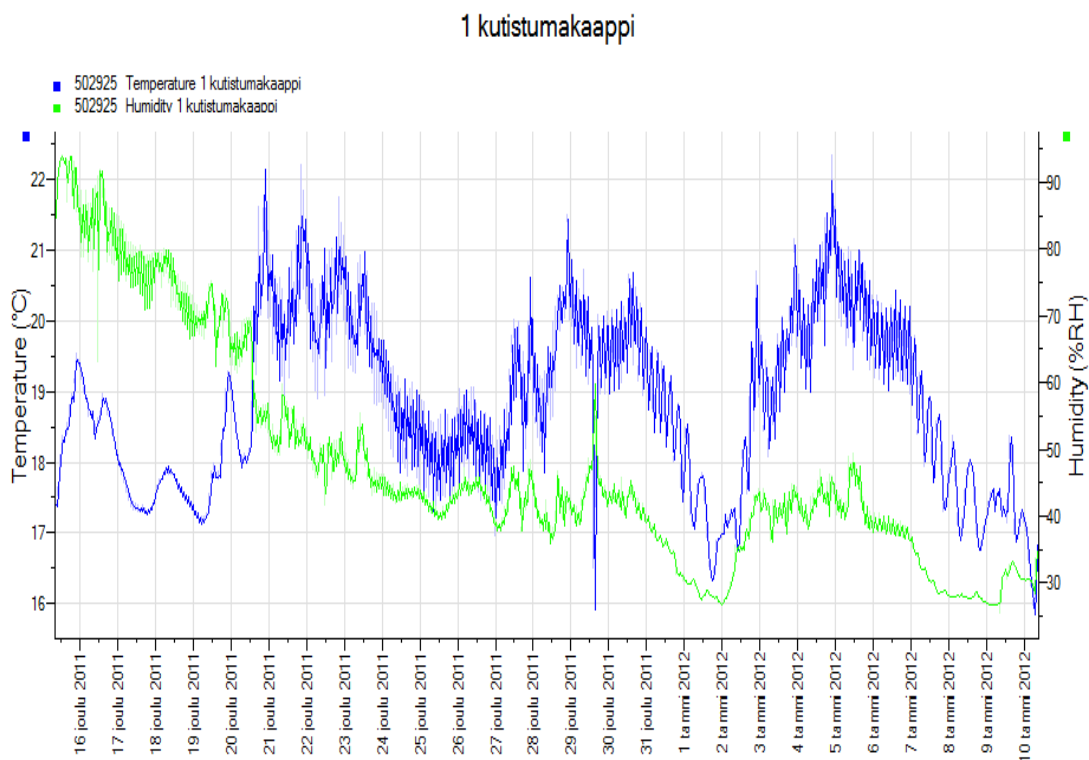
Taulukossa 1 on esitetty naulalevy- ja palkkikokeiden kutistuma-arvot mittausajanjaksolta.

Taulukko 1. 1—56 vuorokauden aikavälin kutistuma-arvot, mm/m

	Ikä (d)	1	2	3	7	15	28	56
	mm/m							
Palkkikoe	HT 1	0,00	0,10	0,02	0,21	0,44	0,61	0,66
	HT 2	0,00	-0,05	0,00	0,06	0,27	0,38	0,45
	HTS 1	0,00	0,00	0,10	0,23	0,45	0,65	0,85
	HTS 2	0,00	-0,23	0,14	0,32	0,58	0,85	1,03
	NP 2	-	0,00	-0,21	-0,05	0,28	0,40	0,53
	NK 1	0,00	0,08	0,07	0,18	0,32	0,43	0,52
	NK 2	0,00	0,10	0,11	0,16	0,31	0,41	0,54
Naulalevykoe	HT 1	0,00	0,01	0,03	0,18	0,44	0,65	0,85
	HT 2	0,00	-0,01	0,04	0,07	0,50	0,72	0,95
	HTS 1	0,00	-0,01	-0,01	0,31	0,63	0,88	1,06
	HTS 2	0,00	0,00	0,06	0,37	0,77	1,02	1,16
	NP 1	0,00	0,02	0,03	-0,07	0,25	0,84	1,02
	NP 2	0,00	-0,02	0,00	0,26	0,58	0,83	1,00
	Rak.Bet 1	0,00	-0,02	0,08	0,20	0,43	0,61	0,78
	Rak.Bet 2	0,00	-0,05	-0,04	0,13	0,43	0,66	0,80
	NK 1	0,00	-0,01	-0,01	0,14	0,36	0,53	0,73
	NK 2	0,00	-0,01	0,00	0,15	0,38	0,55	0,76

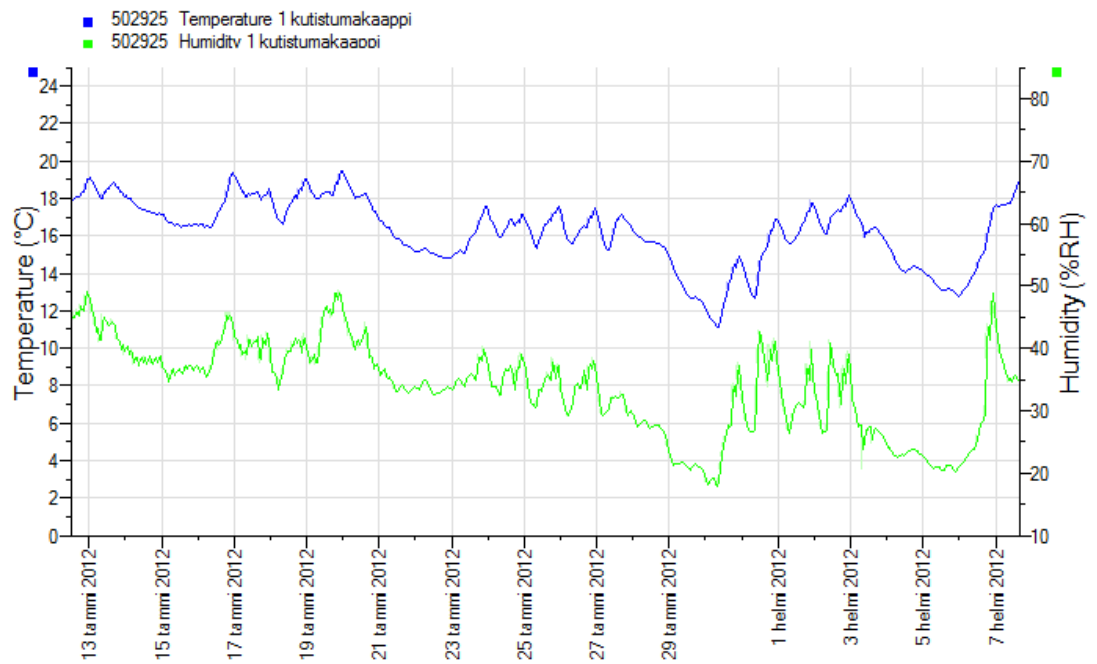
Tuotantohallin kuivumisolosuhteet

Kuvissa 1 ja 2 havainnollistetaan olosuhteiden vaihtelut naulalevykokeen säilytysolosuhteista. Sinen käyrä osoittaa lämpötilan vaihtelun ja vihreä käyrä osoittaa suhteellisen kosteuden vaihtelun RH %:n.



Kuva 1. Naulalevykokeen olosuhdekaappin ensimmäisen kuukauden olosuhteet

1 kutistumakaappi



Kuva 2. Naulalevykokeen olosuhdekaapin toisen kuukauden olosuhteet

Kutistumamittausmenetelmien koekappaleiden mittausarvot

Tässä liitteessä esitetään mitatut arvot molemmista mittausmenetelmistä. Kutistuman saa laskettua mittausmenetelmien omilla kutistuma -kaavoilla

Naulalevykoe

Naulalevykokeen mittausarvot on esitetty taulukossa 1. Mittausarvot on mitattu naulalevykokeessa koekappaleen keskeltä. Ensimmäisen päivän mittausarvot ovat lähtötilanteen arvoja eli niin sanotusti nollatuloksia Naulakaavan v -arvo saadaan erotuksena taipuman muutoksesta vähentämällä ensimmäisen vuorokauden ”nolla-arvo” seuraavien päivien arvosta.

Taulukko 1. Naulalevykokeen mittausarvot, [mm]

vrk	1	2	3	4	7	15	28	56
HT 1	2,01	2,05	2,11	2,24	2,56	3,33	3,96	4,57
HT 2	1,97	1,93	2,10	2,19	2,74	3,48	4,14	4,81
HTS 1	1,56	1,51	1,52	1,87	2,49	3,46	4,20	4,74
HTS 2	1,92	1,92	2,09	2,38	3,04	4,22	4,98	5,40
NP 1	1,90	1,96	1,98	1,70	2,65	3,72	4,41	4,97
NP 2	4,46	4,39	4,46	4,69	5,24	6,21	6,94	7,47
Rak.Bet 1	2,22	2,15	2,47	2,83	3,51	4,05	4,05	4,57
Rak.Bet 2	1,78	1,62	1,67	2,18	3,06	3,59	3,75	4,18
NK 1	2,00	1,97	1,98	2,41	3,07	3,58	3,58	4,18
NK 2	2,04	2,01	2,05	2,49	3,19	3,68	3,68	4,33

Palkkikoe

Palkkikokeen kutistuman mittausarvot ovat esitetty taulukossa 2. Ensimmäisen päivän mittausarvot ovat lähtötilanteen arvoja eli niin sanotusti nollatuloksia. Mittaustulokset ovat 400 mm korkeista palkeista.

Taulukko 2. Palkkikokeen kutistumamittausarvot, [mm]

vrk	1	2	3	7	15	28	56
HT 1	12,42	12,38	12,41	12,33	12,24	12,17	12,15
HT 2	11,16	11,18	11,16	11,14	11,05	11,01	10,98
HTS 1	11,60	11,60	11,56	11,51	11,42	11,34	11,26
HTS 2	11,01	11,10	10,96	10,88	10,78	10,67	10,60
NP 2	12,13	12,22	12,23	12,15	12,02	11,97	11,92
NK 1	8,51	8,48	8,48	8,44	8,38	8,34	8,30
NK 2	8,75	8,71	8,70	8,67	8,62	8,58	8,53