



# Betonin syklisen jäätymissen ja sulamisen vaikutus varhaislujuudenkehitykseen

Liisi Laakso

OPINNÄYTETYÖ

Kesäkuu 2022

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma  
Rakennustuotanto

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma  
Rakennustuotanto

LAAKSO, LIISI:

Betonin syklisen jäätyamisen ja sulamisen vaikutus varhaislujuudenkehitykseen

Opinnäytetyö 49 sivua, joista liitteitä 7 sivua  
Kesäkuu 2022

---

Opinnäytetyössä selvitetään betonin syklisen jäätyamisen ja sulamisen vaikutusta lujuudenkehitykseen betonin varhaisvaiheessa. Valutyöt sekä betonin puristus- ja tartuntavetolujuuskokeet tehtiin Tampereen ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa.

Tavoitteena on selvittää, ehtiikö betoni kehittämään lujuutta lyhyillä lämpimillä ajanjaksoilla jäätymisten välissä. Tutkimuksessa pyrittiin simuloimaan todellisia kevät- ja syysolosuhteita, jolloin yölämpötila laskee noin  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een.

Työssä tehtiin kaksi suhteutuslujuudeltaan C30/37 betonierää. Eristä toinen tehtiin huoneenlämpöiseksi ja toinen viileäksi. Betoneilla valettiin koekappaleita puristus- ja tartuntavetokokeisiin. Kappaleita pidettiin vuorotellen huoneenlämmössä ja pakastimessa 12 tuntia kerrallaan lämpötila-antureiden kanssa. Kappaleita murrettiin päivittäin neljän päivän ajan.

Tulosten perusteella voidaan päätellä, että betonin lujuusominaisuudet jatkavat kehittymistään lämpimillä ajanjaksoilla jäätymisten välillä. Tämä lujuudenkehitys on kuitenkin hitaampaa kuin sen pitäisi teoreettisesti olla kyseisillä lämpötiloilla. Yleisesti tiedetään, että betonin jäätyminen ennen jäätymislujuuden saavuttamista aiheuttaa lujuuskatoa loppulujuuteen. On mahdollista, että löydetyt lujuudenmenetykset ovat osa lujuuskatoa.

Vastaavanlainen tutkimus voitaisiin tehdä suojahuokoistetulla betonilla. Lisätutkimuksia voitaisiin tehdä myös betonin mikroskooppiseen rakenteeseen ohut-  
hietutkimuksella, kun sille on tehty vastaava jäätymis-sulamissykli.

---

Asiasanat: betoni, lujuudenkehitys, lujuuskato, jäätyminen, pakkasvaurio

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree programme in Construction Engineering  
Construction Production

LAAKSO, LIISI

Effects of Cyclic Freezing and Melting on the Development of Concretes Strength

Bachelor's thesis 49 pages, appendices 7 pages  
June 2022

---

The purpose of this thesis was to investigate the effects of cyclic freezing and melting on the development of concrete strength. Casting work and the tests to establish concrete's compressive strength and adhesion strength were made in concrete laboratories of Tampere University of Applied Sciences.

The goal was to find out whether concrete develops strength during short warm periods. The study aimed to simulate real spring and autumn conditions when temperatures at night drop to below zero.

In the study two batches of concrete with estimated compression strength of C30/37. One batch was room temperature, and the other batch was cold. The test samples were kept alternately at room temperature and in a freezer for 12 hours each. There were temperature sensors inside the concrete. One test sample from each batch was broken daily for four days.

Based on the results it can be concluded that the strength properties of the concrete continue to grow in room temperature between freezing periods. However, the strength properties were weaker than they theoretically should be in the testing temperatures.

A comparable study could be done with aerated concrete. Further research could also be done on the microscopic structure of concrete by a thin sheet test.

---

Key words: concrete, strength development, loss of strength, freezing, frost damage

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	BETONIN LUJUUDENKEHITYS.....	6
3	JÄÄTYMISEN VAIKUTUS BETONIIN KOVETTUMISVAIHEESSA .....	9
	3.1 Lujuuskato ja valelujuus .....	10
	3.2 Halkeilu .....	12
4	TALVIBETONOINTI .....	15
	4.1 Suomen talviolosuhteet.....	15
	4.2 Suojaaminen .....	15
	4.3 Lämmittäminen.....	17
	4.4 Kylmällä käytettävät betonilaadut.....	19
	4.5 Työmaatoiminta.....	20
5	TESTAUSMENETELMÄT .....	22
	5.1 Notkeuden painumamittaus .....	22
	5.2 Puristuslujuus.....	23
	5.3 Tartuntavetolujuus.....	23
6	TYÖNSUORITUS .....	25
	6.1 Kokeen valmistelut ja betonointi.....	25
	6.2 Koekappaleiden testaukset .....	26
7	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU .....	29
	7.1 Lämpötilan seuranta.....	29
	7.2 Painumakoe .....	31
	7.3 Puristuskoe .....	31
	7.4 Tartuntavetolujuuskoe.....	36
8	POHDINTA .....	39
	LÄHTEET .....	41
	LIITTEET .....	43
	Liite 1. Lämpimän massan ulko- ja sisälämpötila .....	43
	Liite 2. Kylmän massan ulko- ja sisälämpötila.....	46

## 1 JOHDANTO

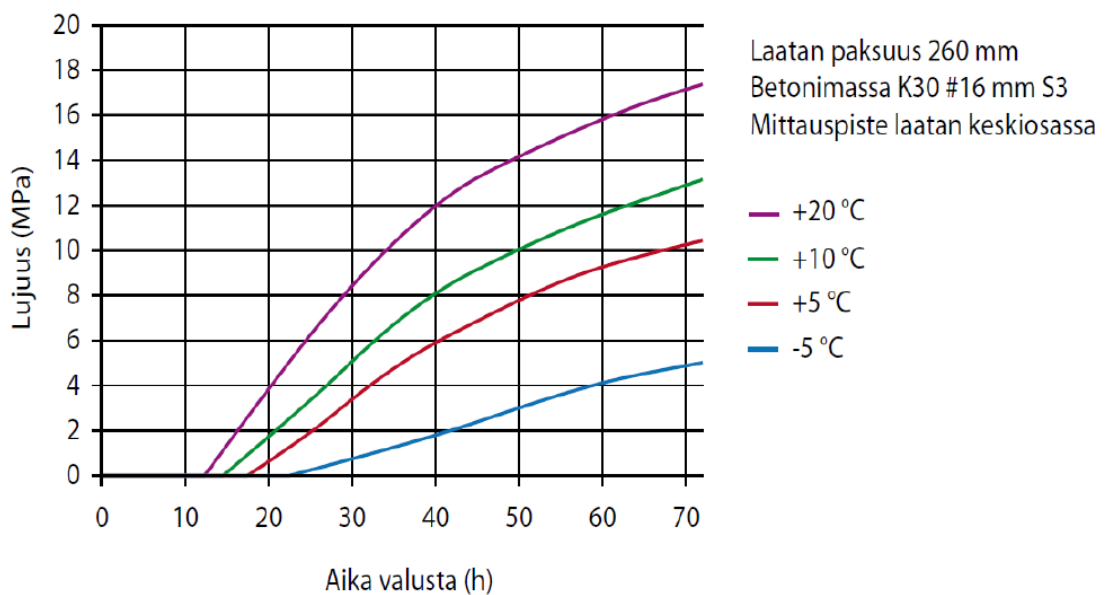
Suomessa esiintyy pakkasia suurimman osan vuodesta, joka asettaa betonoinnille lisävaatimuksia ja lisää valutyön onnistumisen riskejä. Lämpötila vaikuttaa betonin lujuudenkehitykseen vahvasti. Jäätyminen puolestaan aiheuttaa lujuuskatoa ja pysäyttää väliaikaisesti betonin lujuudenkehityksen. Betonin lujuuden on saavutettava sille asetetut tavoitteet taatakseen rakenteelle riittävän kantavuuden.

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Tampereen ammattikorkeakoulun kanssa. Opinnäytetyössä tutkitaan betonin lujuudenkehitystä, kun betoni pääsee jäätymään useasti kovettumisen varhaisvaiheessa. Tavoitteena on selvittää kovettumisen varhaisvaiheessa olevan betonin lujuudenkehityksen eteneminen syys- tai kevätolosuhteissa, kun yölämpötilat ovat miinuksen puolella.

Tutkimuksessa selvitetään koevalujen avulla betonin puristus- ja tartuntavetolujuudenkehitystä. Kokeissa käytetään normaalisti kovettuvaa betonia.

## 2 BETONIN LUJUUDENKEHITYS

Betonin lujuudenkehitys on riippuvainen erityisesti betonin omasta lämpötilasta, johon ympäristön lämpötila vaikuttaa. Lujuudenkehitys on nopeampaa kuumassa ja hitaampaa kylmässä. Betoni saavuttaa nimellislujuutensa 28 vuorokauden päästä valusta, kun lämpötila on +20 °C. Betonin lämpötilan ollessa +5 °C, sen lujuudenkehitys on liian hidasta tavanomaiseen rakentamiseen tahtiin. Jos betonin lämpötila jää 0 °C:een tai matalammaksi niin sen lujuudenkehitys hidastuu huomattavasti. Puolestaan yli +50 °C:een lämpötilassa kovettuneessa betonissa esiintyy lujuuskatoa eli pysyvää loppulujuuden heikentymistä. Suositeltava lämpötila betonimassalle on +30...40 °C. (Betoniteollisuus 2013, 15.) Kuviossa 1 on esitetty, kuinka suuri vaikutus betonin lämpötilalla on betonin lujuudenkehitykseen varhaisvaiheessa.

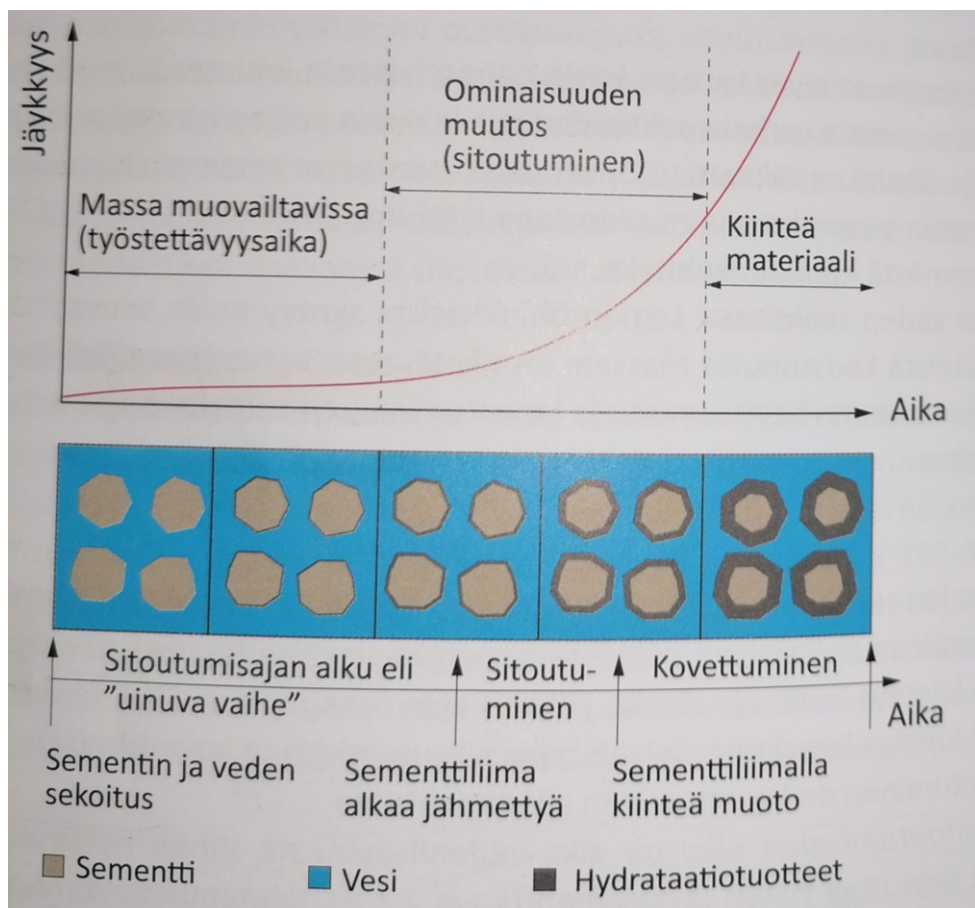


KUVIO 1. Lämpötilan vaikutus betonin lujuudenkehitykseen (Rudus 2017, 8)

Betonimassan valmistuksessa heti veden lisäämisen jälkeen alkaa sementin ja veden kemiallinen hydrataatioreaktio, josta vapautuu lämpöä niin kauan kuin massassa on riittävästi reaktioon vaadittavia ainesosia. Betonin lujuudenkehitys alkaa, kun betoni ei ole enää työstettävää. Tästä vaiheesta käytetään nimeä betonin sitoutuminen, joka alkaa noin 2...4 tunnin kuluttua betonimassan sekoituksesta 20 °C lämpötilassa. Betonin sitoutumisen ja kovettumisen eli varsinaisen

lujuudenkehittymisen välillä ei ole kuitenkaan selvää rajaa, vaan sitoutuminen on kovettumisen alkutapahtuma. Kuitenkin sitoutumisen ja kovettumisen aikana tehdyt toimenpiteet vaikuttavat rakenteen ominaisuuksiin ja laatuun. Kuviossa 2 on esitelty sementin ja veden muodostaman sementtiliiman sitoutumisaika, sitoutuminen ja kovettuminen ajan funktiona. (by 201 2018, 35, 74, 80.)

Sitoutumisen alkuun eli sitoutumisaikaan vaikuttaa vahvasti massan lämpötila. Matalassa lämpötilassa sitoutuminen voi alkaa monta tuntia myöhemmin tai korkeassa lämpötilassa sitoutuminen alkaa huomattavasti aiemmin. 10 °C:n nousu lämpötilassa tarkoittaa sitoutumisajan puoliintumista ja 10 °C:n lasku lämpötilassa tarkoittaa sitoutumisajan kaksinkertaistumista. Sitoutumisaikaan vaikuttaa myös massan vesi-sementtisuhde. (by 201 2018, 74, 80.)



KUVIO 2. Sementtiliiman sitoutuminen ja kovettuminen (by 201 2018, 36)

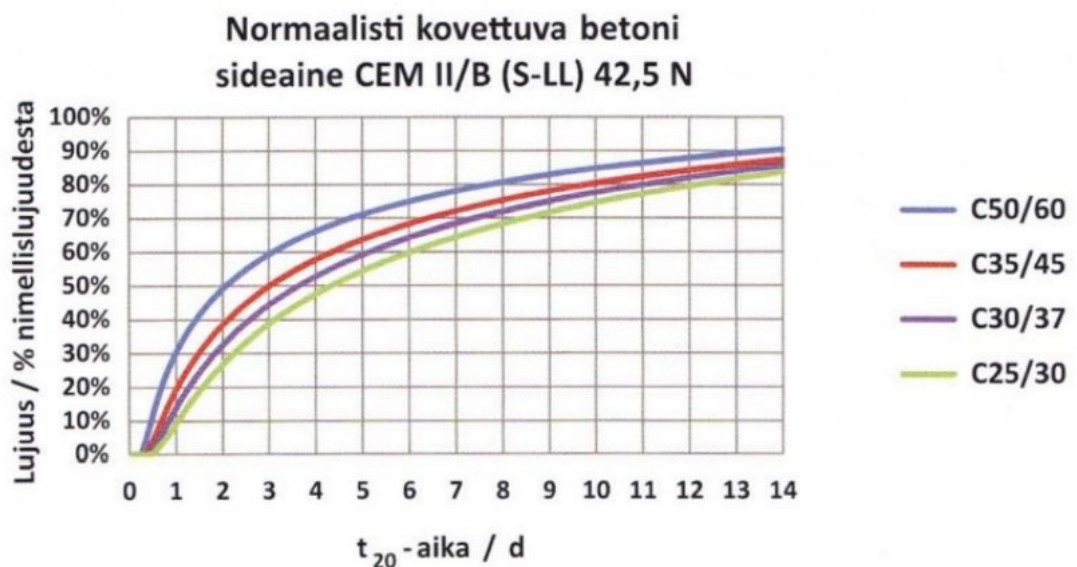
Lujuudenkehityksen arviointiin on olemassa tietokoneohjelmia, joilla voidaan ennustaa lujuudenkehitystä etukäteen. Betonin puristuslujuus voidaan laskea tietyllä ajanhetkellä, jos tunnetaan sementin lujuudenkehitys ja betonin lämpötila

rakenteen kylmimmästä osasta, jossa hydrataatioreaktiot ovat hitaimmat. Perinteinen tapa testata lujuudenkehitystä on olosuhdekoekappaleilla tai porausnäytteillä, jotka puristetaan laboratoriossa. Betonin kypsyysikä  $t_{20}$  voidaan myös arvioida käsin laskemalla Sadgroven kaavalla (kaava 1) tai jollain eurokoodipohjaisella arviointimenetelmällä. (by 201 2018, 92, 344.)

$$t_{20} = \left( \frac{T + 16 \text{ °C}}{36 \text{ °C}} \right)^2 \cdot t \quad (1)$$

missä  $T$  on betonin lämpötila aikana  $t$  [°C]  
 $t$  on kovettumisaika [d]

Kuviossa 3 on esitetty käyrät, jotka kuvaavat eri lujuusluokkien betonien lujuudenkehitystä ajan funktiona, kun massan lämpötila on +20 °C. Kuvioista 3 selviää saavutettu prosenttiosuus tavoitellusta nimellislujuudesta, kun kypsyysikä  $t_{20}$  tiedetään. (by 201 2018, 93.)

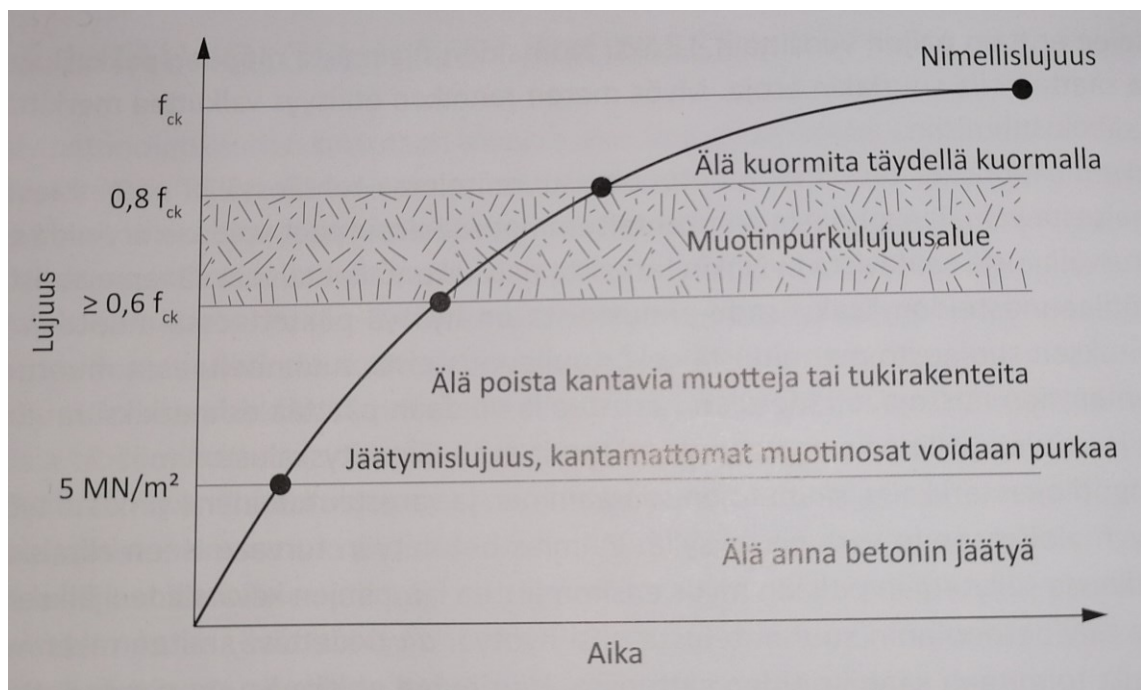


KUVIO 3. Normaalisti kovettuvan betonin lujuudenkehitys, jossa sideaineena CEM II/B (by 201 2018, 93)



### 3 JÄÄTYMISEN VAIKUTUS BETONIIN KOVETTUMISVAIHEESSA

Lämpötilan laskiessa alle  $-15\text{ °C}$ :een, lujuudenkehitys pysähtyy kokonaan. Kun betoni saavuttaa lieriöpuristuslujuuden  $5\text{ N/mm}^2$ , puhutaan jäätymislujuuden saavuttamisesta. Tällöin betoni kestää yhden jäätymisen vaurioitumatta, joskus jopa useamman. Jos betoni kumminkin pääsee jäätymään ennen jäätymislujuuden saavuttamista, siihen tulee vaurioita, joita pahentaa toistuva jäätyminen ja sulaminen. (by 201 2018, 493, 494.) Kuviossa 4 on kerrottu talviolosuhteissa valetun betonin tärkeimmät vaiheet. Näitä ovat jäätymislujuus ( $5\text{ N/mm}^2$ ), muottienpurku-  
lujuus ( $\geq 0,6 f_{ck}$ ) ja nimellislujuus ( $f_{ck}$ ).



KUVIO 4. Talviolosuhteissa valetun betonin tärkeimmät vaiheet (by 201 2018, 494)

Betoni voi vaurioitua pakkasessa joko kovettumisvaiheessa tai nimellislajuuden saavutettuaan. Betonin pakkasvaurioita ovat lujuuskato, tilavuuden kasvu, läpäisevyyden lisääntyminen ja pinnan rapautuminen eli halkeilu ja lohkeilu. Betonin pakkasvaurioiden yleisin aiheuttaja on kapilaarihuokosissa oleva vapaa vesi, joka jäätyessään laajenee 9 tilavuusprosenttia. Jäätymisestä johtuva veden laajeneminen aiheuttaa huokosverkostoon ylipainetta. Painetta kasvattaa edelleen

jääkiteen tilavuuden kasvu, kun lämpötila nousee taas lähelle nollaa. (by 201 2018, 116.)

Betonin pakkasvauriot ovat toisistaan riippuvaisia. Halkeamat lisäävät betonin läpäisevyyttä, jonka seurauksena haitalliset aineet pääsevät tunkeutumaan betoniin. Tämä aiheuttaa muun muassa betonin raudoitusten suojan heikkenemistä sekä nostaa betonin kyllästysastetta kloridien vuoksi. (by 201 2018, 102, 116–117.)

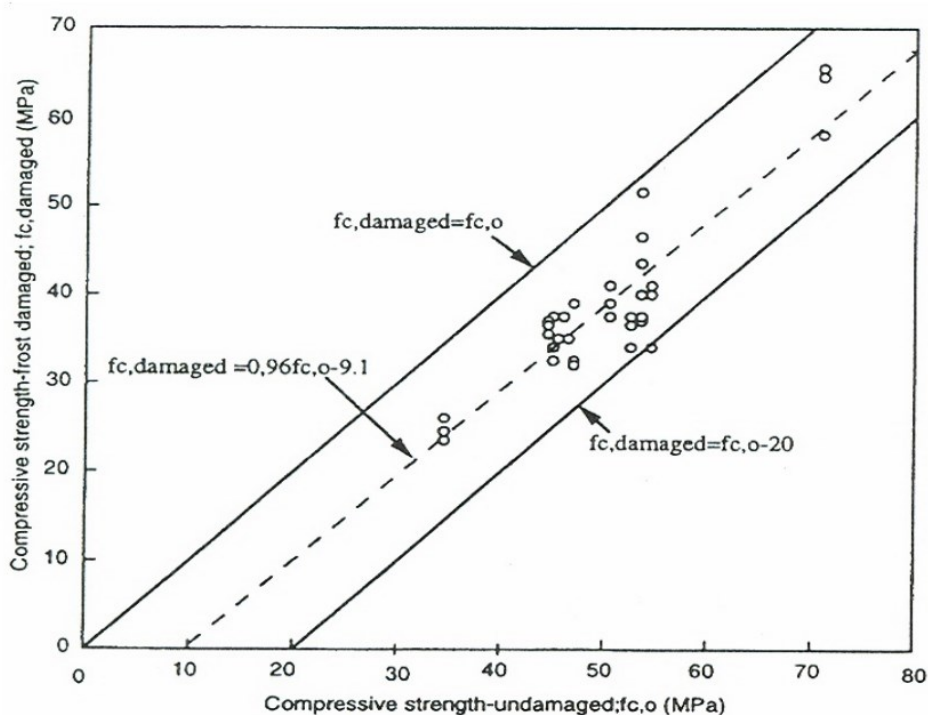
Veden jäätymistä betonissa voidaan ajatella kahdella vastaavanlaisella teorialla. Hydraulisen paineen teorian mukaan veden tilavuuden kasvu jäätyessä ei pääse tapahtumaan vapaasti, joten betoni vaurioituu. Jääkiteen kasvun teoriassa puolestaan ajatellaan, että jään kiteytymispaine huokosissa ylittää sementtikiven vetolujuuden, joka johtaa vaurioihin. (by 201 2018, 102, 116.)

### **3.1 Lujuuskato ja valelujuus**

Betonin lujuudenkehitys on hyvin lämpötilaherkkää. Jos betoni pääsee jäätymään heti valun jälkeen ennen jäätymislujuuden saavuttamista, tulee sen loppulujuus jäämään vajaaksi. Loppulujuuden pysyvistä heikentymisistä puhutaan lujuuskatona. Betonissa oleva vesi laajenee jäätyessään aiheuttaen sisäisiä rasituksia. Jos betoni ei kestä näitä rasituksia, kärsii se lujuuskadosta. (by 201 2018, 494.) Pakkasvauriosta seuraavat betonin eri lujuusominaisuuksien heikkenemiset eivät ole suorassa suhteensa toisiinsa. Puristuslujuuden heikkeneminen voi olla huomattavasti vähäisempää kuin vetolujuuden, tartuntalujuuden tai kimmomoduulin heikkeneminen. (Rappeutumisen vaikutus betonisillan kantokykyyn 2005, 18.) Jos lujuuskatoa epäillään, niin jäätymään päässeestä betonista voidaan selvittää todellinen loppulujuus rakennekoepalalla (Talvibetonointi 2013, 74). Jäätyneessä betonissa esiintyy valelujuutta, joka tarkoittaa betonin väliaikaista lujuutta jääty-misen takia.

Lundin yliopiston kokeissa tutkittiin betonin suurinta mahdollista pakkasen aiheut-tamaa betonin lujuuskatoa kyllästämällä kappaleet täysin vedellä. Suurin prosen-

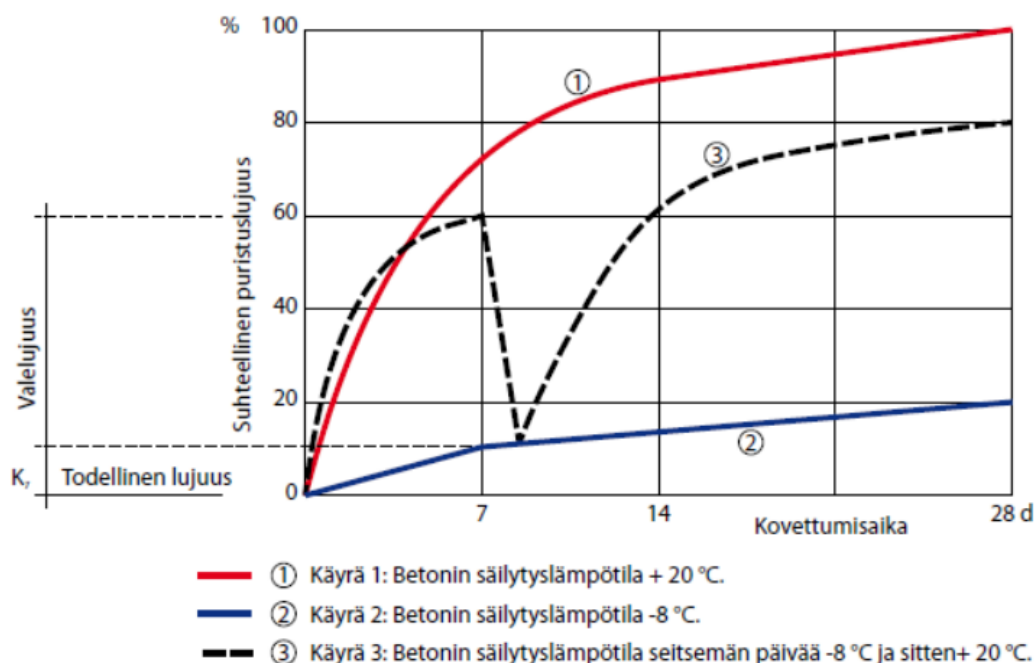
tuaalinen lujuuskato ilmeni alemman lujuusluokan betoneilla, ja se oli suuruudeltaan 35 %. Kuten kuvioista 5 on nähtävistä, keskimäärin puristuslujuus jäi 10 N/mm<sup>2</sup> vajaaksi nimellislujuudesta. Vaaka-akselilla on kuvattu normaalisti kovettuneen betonikappaleen lopullinen puristuslujuus. Pystyakselilla on samanlaisen kappaleen lopullinen puristuslujuus, kun se päästettiin jäätymään liian varhaisessa vaiheessa. Todennäköisesti näin suuria pakkasvaurioita ei kuitenkaan esiinny todellisuudessa. (Rappeutumisen vaikutus betonisillan kantokykyyn 2005, 19.)



KUVIO 5. Vaurioituneen ja vaurioimattoman betonin puristuslujuussuhde (Rappeutumisen vaikutus betonisillan kantokykyyn 2005, 19)

Betonitekniiikan oppikirjassa (2018, 495) on esitelty tutkimus realistisimmilla olosuhteilla, jossa havaittu lujuuskato on pienempi kuin Lundin yliopiston tutkimuksessa. Kuvioista 6 on nähtävissä kyseisen tutkimuksen tulokset ja betonin lujuuskato. Tutkimuksessa on testattu kolmea C20/25-lujuusluokan betonikappaletta. Kappale 1 on ollut +20 °C:n lämpötilassa 28 vuorokautta ja kappale 2 on ollut -8 °C:n lämpötilassa 28 vuorokautta. Kappale 3 oli laitettu seitsemäksi päiväksi -8 °C:n lämpötilaan ja loput ajasta se oli saanut kehittyä +20 °C:n lämpötilassa. Kappaleen lujuuskato oli 20 % nimellislujuudesta.

Lisäksi kappaleessa 3 esiintyi valelujuutta noin 50 % nimellislujuudesta, joka katosi jään sulaessa. Yleisesti ottaen betoni voi saada jäätyessään valelujuutta 10...20 N/mm<sup>2</sup>, jonka tuoma väliaikainen puristuslujuus voi vaikuttaa hämäävästi normaalilta lujuudenkehitykseltä. (Betoniteollisuus 2013, 75.)



KUVIO 6. Jäätymisen vaikutus lujuudenkehitykseen (Betoniteollisuus 2013, 75)

Suomessa on valelujuudesta tunnettu esimerkki. Lahdessa vuonna 1963 rakenteilla ollut yhdeksänkerroksinen kerrostalo sortui parissa sekunnissa pitkäperjantaina. Rakennuksen valutyöt oli aloitettu marraskuussa, ja viimeinen kerros valettiin viikko ennen onnettomuutta. Betoni oli päässyt jäätymään liian aikaisessa vaiheessa, mutta jäätyneestä betonista johtunut valelujuus kannatteli rakennusta. Pitkäperjantaina sää lämpeni niin paljon, että betoni pääsi sulamaan ja rakennus sortui valelujuuden kadottua. (Kröger 2017.)

### 3.2 Halkeilu

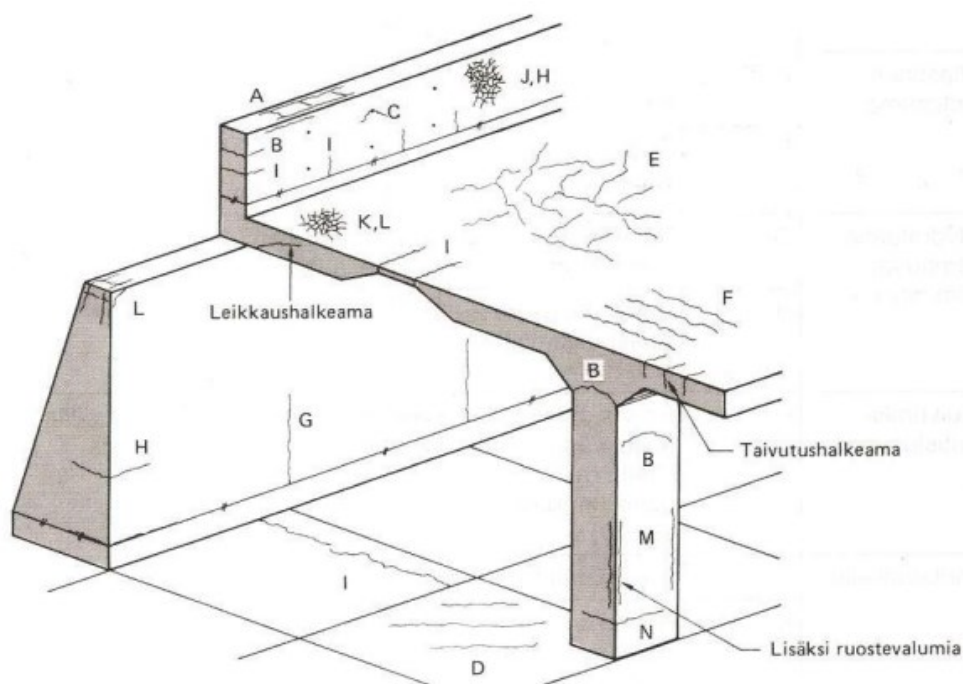
Halkeamia syntyy, kun kappaleeseen muodostuu vetojännityksiä, jotka ovat suurempia kuin betonin vetolujuus. Vetojännitysten yksi syy on lämpötilaerojen aiheuttamat muodonmuutokset, silloin kun muodonmuutokset eivät voi tapahtua

vapaasti. Kun betoni kovettuu, sementin hydraatio tuottaa lämpöä. Lämpö poistuu pinnan kautta, jolloin betonin sisälämpötila on suurempi kuin ulkolämpötila. Tämän vuoksi erityisesti massiivisiin rakenteisiin syntyy halkeamia. Talvivaluissa muottien aikainen purkaminen tai äkillinen lämmityksen lopettaminen voi aiheuttaa nopeita lämpötilamuutoksia. (by 201 2018, 105.)

Kun betoni on plastista eli työstettävää, vettä haihtuu ja betonin tilavuus muuttuu veden haihtumisen ja erottumisen vuoksi. Veden erottuminen on suurta, kun betonin lämpötila on +10 °C tai vähemmän. Lattioissa veden erottuminen näkyy lammikoitumisena. Betonin plastisen painuman syynä on kiviaineksen ja sementin painumisen estyminen raudoitteiden vuoksi. Tämä voi aiheuttaa halkeamia raudoituksen ja liittymäkohtien kohdalla. Kylmät olosuhteet pidentävät sementin sitoutumisaikaa, mikä puolestaan lisää veden erottumista ja plastista painumaa. (Betoniteollisuus 2013, 70–71.)

Betonin plastisen kutistuman syynä on betonin liian nopea kuivuminen ennen kuin massa on sitoutunut. Veden haihtuminen betonin pinnasta johtaa siihen, että betonimassan pienet hiukkaset johtuvat lähemmäksi toisiaan imun seurauksena. Jos runkoainerakeet ja hiukkaset eivät pääse liikkumaan, niin betonin pintaan syntyy vetojäännityksiä, jonka seurauksena syntyy halkeamia. (Betoniteollisuus 2013, 72.) Kuivassa ja tuulisessa ympäristössä, veden haihtuminen on nopeaa, jolloin riski halkeilulle kasvaa. Yleensä kylmä ilma on myös kuivaa. (by 201 2018, 78).

Kovettumisvaiheen alussa halkeilu on tiheää ja verkkomaista. Tähän syynä on voimakas veden haihtuminen sekä ensimmäisen vuorokauden aikana jäähtyminen ja ylipäättään lämpötilaerot. Halkeilua pahentaa lämpötilan muutokset, jotka ovat etenkin talvella suuria, jos lämmitys on epätasaista. Kuivumiskutistumisesta ja lämpötilanmuutoksista johtuvat halkeamat ovat pitkiä ja niiden sijainti on sattumanvarainen. Kuviossa 7 ja taulukossa 1 on esitetty betonirakenteen tyypilliset halkeamat. Tuoreen betonin halkeamia, jotka johtuvat liian nopeasta jäähtymisestä ovat H ja G. Plastisesta painumasta johtuva halkeilu on esitetty kirjaimilla A, B ja C. Plastisesta kutistumasta johtuva halkeilu on esitetty kohdassa kirjaimilla D ja E. (Betoniteollisuus 2013, 70–72.)



KUVIO 7. Betonirakenteiden tyypilliset vauriot (by 201 2004, 94)

TAULUKKO 1. Betonirakenteessa esiintyvien halkeamien selitykset (by 201 2004, 93)

Halkeilun aiheuttaja	Kirjain	Pääsyy	Toissijainen syy	Esiintymisaika-kohta
Plastinen painuma	A, B, C	Veden erottuminen	Nopea kuivuminen, liian myöhään aloitettu jälkihoito	0,5...4h (T=20...30°C), 4...8h (T=7...20°C)
Plastinen kutistuma	D, E	Pinnan nopea kuivuminen	Hidas haihtuvan veden korvautuminen (tiivis massa), liian myöhään aloitettu jälkihoito	0,5...4h (T=20...30°C), 4...8h (T=7...20°C)
	F	Lisäksi raudoitus yläpinnassa		
Hydrataatiolämpö tai lämmitys	G	Rakennusosien välinen lämpötilaero	Rakenteen liian nopea jäähtyminen	1...3d
	H	Rakennusosan sisäinen lämpötilaero		
Kuivumis-kutistuminen	I	Iso v/s, huono jälkihoito, väärin suunniteltu rakenne (kutistumis-liikkeet estetty)	Huono tartunta työsaumassa	Viikko...useita kuukausia
Pintahalkeilu	J	Huono muotti	Suuri sementti- ja vesimäärä, huono jälkihoito	Yleensä 1...7d, joskus myöhemmin
	K	Huono tai liian aikainen pinnan hierto		
Pakkasrapautuminen	L	Vesi, jäätyminen ja sulaminen	Liian vähän suojahuokosia, betoni vedellä kyllästynyt	Ensimmäiset talvet ... useita vuosia
Raudoituksen ruostuminen	M	Liian pieni betonipeite	Liian huokoinen betoni	Useita vuosia
	N	Kloridit		

## 4 TALVIBETONOINTI

### 4.1 Suomen talviolosuhteet

Talvibetonointikausi alkaa, kun lämpötila laskee vuorokauden aikana alle +5 °C:een. Etelä-Suomessa talvibetonointi kausi kestää seitsemän kuukautta, loka-kuusta huhtikuuhun ja Pohjois-Suomessa yhdeksän kuukautta, syyskuusta toukokuuhun. Suomessa talvibetonointikausi kestää siis noin 2/3 vuodesta, joten vain harvoin on mahdollista olla huomioimatta kylmyyden vaikutusta betonoinnissa. (by 201 2018, 492.)

Suomessa myös kovat tuulet sekä vesi-, räntä- ja lumisateet tuovat lisää työtä työmaalle. Talviolioissa tuuli lisää lämmön siirtymistä ja kosteuden haihtumista. Tämä on otettava huomioon kovettuvan betonin suojauksen suunnittelussa. Kova tuuli haittaa myös betonin pumppausta ja nosturilla työskentelyä. Kylmä ja tuulinen sää edesauttaa betonin jäätymistä betonipumpun putkistoon. Lumitöihin ja jään sulattamiseen on varattava kalustoa riittävän aikaisin. Ennen valun aloittamista muotit on puhdistettava jäästä ja lumesta. (by 201 2018, 492.)

Myös Suomessa ilmastonmuutos on vahvistamassa sääilmiöitä. Viimeisen sadan vuoden aikana keskilämpötila Suomessa on noussut yhden asteen, ja ilmastomallien pohjalta on arvioitu, että tämä trendi tulee jatkumaan. Sateisuus tulee lisääntymään etenkin talvella, rankkasateet voimistuvat sekä Etelä-Suomessa lumipeitteestä tulee ohuempi. (Betoniteollisuus 2013, 28.)

### 4.2 Suojaaminen

Suojauksen tärkein tarkoitus on varmistaa riittävä lujuudenkehitys eristämällä betonimassa kylmästä ulkoilmasta. Muita tarkoituksia ovat lumen ja jään kehittymisen estäminen valun pinnassa sekä vähentää lumen puhdistus- ja sulatustöitä. Säsuojaukseen on kiinnitettävä huomioita lumen vuoksi lokakuusta huhtikuulle. Säältä voidaan suojautua valmiilla tai väliaikaisilla rakenteilla. Valmiita rakenteita ovat esimerkiksi vesikatot, välipohjaholvit ja valmiit ulkoseinät. Väliaikaisia suojia



ovat esimerkiksi sääsuojahallit ja peitteet. Säältä kuitenkin voidaan suojautua parhaiten käyttämällä useampaa menetelmää samaan aikaan. (Betoniteollisuus 2013, 36.)

Sääsuojien tarkoitus on suojata työntekijät, työkohte ja rakennusmateriaalit luonnonvoimilta eli lumelta, sateelta, jäältä, tuulelta, pakkaselta ja kesällä liialliselta auringonvalolta. Sääsuojien yleisimmät käyttökohteet ovat kerrostalot ja saneerauskohteet. (Betoniteollisuus 2013, 37.) Kuvassa 1 on esimerkki sääsuojasta, joka suojaa koko rakennuksen.



Kuva 1. Suuri, koko rakennuksen suojaava sääsuoja (Ramirent n.d)

Suojapeitteiden tarkoitus on olla väliaikaisena suojana sekä täydentää muita suojausmenetelmiä. Talvibetonoinnissa käytetään lämpöä eristäviä suojapeitteitä, jotka koostuvat kahdesta suojakankaasta, joiden välissä on ohut lämmöneristekerros. Suojapeitteiden hyviä puolia ovat edullisuus, monikäyttöisyys, liikuteltavuus ja vedenpitävyys. (Betoniteollisuus 2013, 39.) Kuvassa 2 asennetaan lämpöä eristävä solumuovipeite, joka tunnetaan myös norsunnahkana. Solumuovipeitteen päälle asetetaan vielä suojapeite.





Kuva 2. Lämpöä eristävän peitteen asennus (Betonin lämmittäminen talvivaluissa 2011, 12)

Lämpösuojauksen tehtävät ovat estää rakenteen jäähtyminen, tasata rakenteen lämpötilaeroja ja vähentää lämmityksen tarvetta sekä estää kosteuden haihtumista. Yleisiä lämpösuojaustapoja ovat muottien lämpöeristys ja suojapeitteet. Suoja on laitettava valun päälle mahdollisimman pian ja lämmöneristys asennetaan kiinni valuun niin, että betonipinta ei jää näkyviin. (Betoniteollisuus 2013, 40.)

### 4.3 Lämmittäminen

Lämmitysmenetelmän valinnassa on tiedettävä betonoinnin ajankohta sekä tästä aiheutuva lämmöntarve. Lisäksi betonoitavien rakenteiden koko ja muoto, betonointikalusto, työnopeus ja lämmitettävän tilan sulkumahdollisuudet vaikuttavat lämmitysmenetelmän valintaan. Lämmitysmenetelmän valintaan vaikuttaa myös, tullaanko lämmitysjärjestelmää käyttämään rakennuksen rungon kuivatuksessa.

Työmaalla on myös hyvä olla valmiina varalämmitysjärjestelmä. Lämmitysmenetelmät ovat kuumailmalämmitys, lankalämmitys, lämmitettävät muotit ja kohdelämmitys. (Betoniteollisuus 2013, 42.)

Kuumailmalämmittimillä lämmitetään betonia ja muotteja puhaltamalla lämmintä ilmaa. Jotta lämmittäminen onnistuisi taloudellisesti, tila on tiivistettävä huolellisesti. Jos betonipinta on suojattu hyvin ja valun alapuolinen tila on suljettu, niin kuumailmalämmitys riittää talviajan holvivalujen lämmitykseen. Kuumailmapuhaltimet on pidettävä pois päältä betonivalun aikana. Muuten ilma kuivuu lämmityksen takia, jolloin pinnalta haihtuu vettä nopeammin, ja betonipinnan halkeilu lisääntyy. Osa kuumailmalämmitysmenetelmistä perustuu palamiseen, josta syntyy myrkyllisiä palamiskaasuja- ja hiukkasia. Lämmitettävään tilaan on siis tehtävä tuuletus. (Betoniteollisuus 2013, 43.)

Infrapunasäteilylämmitys eli kohdelämmitys perustuu lämmön siirtämiseen säteilyllä. Säteily lämmittää betonipintaa ja muottia. Infrapunalämmitys sopii suurten rakenteiden lämmittämiseen. Muottimateriaalien ja -rakenteiden on sovelluttava infrapunasäteilylämmitykseen ja säteily ei saa estyä. Suurin osa työmailla käytävistä laitteista ovat nestekaasulämmitteisiä, joten työmaalla on huomioitava kuumien säteilijöiden ja polttoaineen aiheuttama palovaara. (Betoniteollisuus 2013, 44.)

Lankalämmitys on betonivalun sisään asennettava lämpiävä lämmityslanka tai -kaapeli. Lankalämmityksessä lämpö voidaan kohdistaa suoraan haluttuihin rakenteisiin sisältäpäin. Tämä tarkoittaa, että rakenne saadaan lämmitettyä ilman suurempaa energiahukkaa. Myös lankalämmitystä käytettäessä rakenne on suojattava, koska muuten lämpötilaerot rakenteessa aiheuttavat halkeiluriskin. Lankalämmityksen riskinä on langoituksen katkeaminen. Lämmityskaapelilla lämmitystehon säätäminen on jälkikäteen mahdotonta, joten lämpötila voi jäädä liian pieneksi tai korkeaksi. (Betoniteollisuus 2013, 45–46.)

Lämmitettävät muotit ovat lämpöeristettyjä suurmuotteja. Lämpö siirtyy betoniin muottipinnan ja lämmöneristeen välissä olevilla vastuslankasilmukoilla tai lämpövastuksilla. Muottipinnan lämpötila on säädettävissä. Lämmitettävät muotit ovat

helppokäyttöisiä, mutta niiden taloudellinen hyödyntäminen vaatii kohteessa useita käyttökertoja samalle muotille. (Betoniteollisuus 2013, 49.)

#### 4.4 Kylmällä käytettävät betonilaadut

Käytettävää betonilaatua tarkennetaan työmaalla yleensä rakennekohtaisen suunnitelman yhteydessä, kun sää- ja työskentelyolosuhteet ovat tiedossa. Betonilaatua valittaessa on huomioitava rakenneosa ja käytettävä lämmitysmenetelmä. Betonilaatu määritellään yhdessä työnjohton, rakennesuunnittelijan ja betoniasiantuntijan kanssa. Talvibetonoinnissa käytetään usein nopeasti kovettuvaa betonia tai kuumabetonia. (Betoniteollisuus 2013, 19–20.)

Talvibetonoinnissa voidaan käyttää tavallista normaalisti kovettuvaa noin +20 °C:sta betonia joissain tapauksissa. Normaalisti kovettuva betoni sopii käytettäväksi, kun betonilta ei vaadita erityisominaisuuksia kuten pakkasenkestävyyttä valu- ja kovettumisvaiheessa. Tätä betonilaatua käytetään talvibetonoinnissa, kun suojaus ja lämmitys ovat kunnossa, eikä kovia pakkasia ole odotettavissa. (Betoniteollisuus 2013, 20.)

Nopeasti kovettuva betoni saavuttaa nimellislujuutensa seitsemän vuorokauden kypsyysikänsä. Nopeasti kovettuva betoni kehittää runsaasti lämpöä kovettuaan, mikä nostattaa vastavaletun rakenteen lämpötilaa. Korkean lämpötilan ansiosta betoni saavuttaa kypsyysikänsä varhaisvaiheessa tavallista nopeammin. (Betoniteollisuus 2013, 20.) Nopeasti kovettuva betoni saavuttaa siis jäätyms- ja muotipurkulujuutensa nopeasti, ja tekee näin lujuudenkehityksestä varmempaa.

Kuumabetoni on betonilaatu, joka on lämmitetty tavallista korkeampaan lämpötilaan. Yleensä se on noin + 30 °C lähtiessään tehtaalta. Korkean lämpötilan vuoksi betoni sitoutuu nopeasti, joka puolestaan lyhentää työstettävyyttä, mutta parantaa lujuudenkehitystä. Kuumabetonimassan korkeaa lämpötilaa hyödynnetään parhaiten, kun massa valetaan lämpöeristettyyn muottiin ja peitetään eristepeitteellä ennen jäähtymistä. Lämmitetyssä betonissa yleensä esiintyy lujuuskatoa, kun betonin lämpötila nousee yli +50 °C:n. (Betoniteollisuus 2013, 20–21.)

Lämpökäsittelystä betonista puhutaan, kun betonimassan lämpötila nousee yli +40 °C:een valun aikana tai yli +50 °C:een betonin kovettumisvaiheessa. Betoni kovettuu nopeasti käsittelyn vuoksi, mutta siinä esiintyy lujuuskatoa 10...30 %. Tämän vuoksi lämpökäsiteltyä betonia ei käytetä betonointiin kylmällä, vaan sitä käytetään ensisijaisesti betoniteollisuudessa nopeuttamaan muottikiertoa. (by 201 2018, 504.)

Pakkasbetonia käytetään enimmäkseen elementtien saumavaluissa. Pakkasbetonia voidaan käyttää pienessä pakkasessa, mutta sen lujuudenkehitys on hidasta ja pysähtyy -10 °C:ssa. Pakkasbetoni ei vaurioidu jäätyessään, vaikkei se olisi saavuttanut jäätymislujuutta. Pakkasbetonia ei voida kumminkaan käyttää XF-rasitusluokan rakenteissa sillä se ei ole pakkasenkestävää. On olemassa erikseen pakkasenkestävä eli säänkestävä betoni. Se kestää kovettuneena toistuvaa jäätymistä ja sulamista. (Betoniteollisuus 2013, 22.)

Itsetiivistyvä betoni eli IT-betoni tiivistyy painovoiman avulla ilman tärytystä. Itsetiivistyvä betoni sopii kohteisiin, joissa raudoitus on tiheää ja rakenteet ovat ah-taita. Talviolosuhteissa IT-betonin käyttöön on suhtauduttava varauksella, koska IT-betonissa on paljon lisäaineita ja sen lujuudenkehitys on hidasta kylmässä. (Betoniteollisuus 2013, 22.)

Eri betonilaatujen lisäksi talvivaluissa voidaan käyttää suunniteltua suuremman lujuusluokan betonia, jotta tavoiteltu puristuslujuus saavutetaan nopeammin. Samalla kovettuminen on nopeampaa, kuten kaaviosta 3 on nähtävissä. (Betonin lämmittäminen talvivaluissa 2011.) Koska lujuusluokka on suurempi kuin tavoiteltu nimellislujuus niin pieni lujuuskato ei välttämättä laske betonin lujuutta suunniteltua matalammaksi.

#### **4.5 Työmaatoiminta**

Ennen betonointia on tehtävä viranomaisohjeiden edellyttämä betonointisuunnitelma. Siinä on noudatettava jatkuvan ja tarkentuvan suunnittelun periaatetta. Betonoidessa talviaikaan, laaditaan betonointisuunnitelman teon yhteydessä talvi-betonointisuunnitelma. Työmaalla on tehtävä myös betonointityöohje, jossa on

käytävä läpi rakenteeseen sopiva betoni, sen siirto, toimitusnopeus ja kalusto. Lisäksi on tarkistettava muottikierto ja muottien purkulujuus sekä suunniteltava riittävä lämmitys ja lämmönsuojaus. Myös betonointipäivän sääennusteita on katsottava. Puhdistettava muotit lumesta ja jäästä ennen valua sekä esilämmitettävä kylmät rakenteet. Työmaalla on myös pidettävä betonointipäiväkirjaa, johon merkitään kattavat huomiot betonoinnin edetessä. (Betoniteollisuus 2013, 50–53.)

Ennen valun aloitusta on betonikuormalle tehtävä vastaanottotarkastus, jossa varmistetaan tilauksenmukaisuus kuormakirjasta. Kuormakirjat lisätään laatuodokumentteihin. Virheistä ilmoitetaan betonitehtaalle. Betonin laadunvarmistus tehdään betonitehtaalla, mutta jos työmaalla halutaan teettää koekappaleita, niin ne on säilytettävä betoninormien mukaisesti. (Betoniteollisuus 2013, 58–59.)

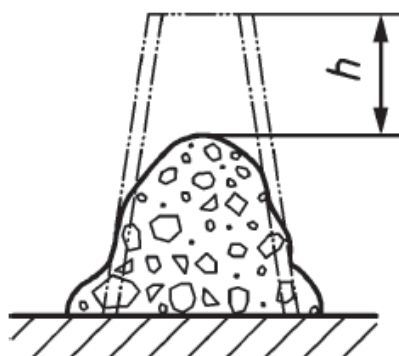
Betonointi pyritään pitämään ilman turhia taukoja ja massan lämpötilaa on seurattava jatkuvasti. Suojaaminen on aloitettava heti valun jälkeen tai mieluiten samalla kun valetaan. Lämmityslaitteet kytketään heti valun jälkeen suunnitellulle teholle. (Betoniteollisuus 2013, 59.)

Valun jälkeen alkaa jälkihoito. Jälkihoidon tarkoituksena on estää kosteuden haihtuminen ja lujuudenkehityksen varmistaminen. Veden liian aikainen haihtuminen betoninpinnalta ehkäistään kunnollisella suojaamisella. Talvella jälkihoito alkaa suojaamisella ja vettä ei käytetä, jos sen vaarana on jäätyä. Jälkihoitoa jatketaan, kunnes betoni on saavuttanut 60...80 % nimellislujuudestaan. Arvo on suurempi vaikean rasitusluokan rakenteilla. Jälkihoidossa on huomioitava, että suojaukset pysyvät paikallaan, rakennetta lämmitetään ohjeiden mukaan ja betonin lämmönkehitystä seurataan. (Betoniteollisuus 2013, 60.)

## 5 TESTAUSMENETELMÄT

### 5.1 Notkeuden painumamittaus

Notkeutta voidaan mitata standardin SFS-EN 12350-2 mukaisella painumakokeella. Notkeus on tärkeä tekijä betonin valettavuudelle ja pintojen viimeistelylle (by 201 2018, 70). Työn suoritus alkaa kartion ja pohjalevyn kastelulla. Täytön aikana kartiota on painettava aluslevyyn. Kartio täytetään kolmessa yhtä suuressa osassa, joidenka välissä betonia tiivistetään 25:llä sullontasauvan iskulla. Iskut jaetaan tasaisesti. Jos päällimmäinen kerros tiivistyy liikaa, niin betonia lisätään niin paljon, että kartio on täynnä. Kartio nostetaan hitaasti kohtusuoraa ylöspäin tasaisella nopeudella. (SFS-EN 12350-2 2019, 5.) Taulukosta 2 voidaan lukea betonin notkeusluokka mittaustuloksen  $h$  (kuvio 8) perusteella.



KUVIO 8. Painumakokeen painuman arvo (SFS-EN 12350-2 2019, 6)

TAULUKKO 2. Betonin notkeusluokat (by 201 2018, 71)

Luokka	Standardin SFS-EN 12350-2 mukaisesti määritelty painuma (mm)
S1	10...40
S2	50...90
S3	100...150
S4	160...210
S5 <sup>a</sup>	≥220

a) Koska tiettyjen notkeusarvojen ulkopuolella testausmenetelmät eivät ole tarkkoja, suositellaan käytettäväksi muita menetelmiä.

## 5.2 Puristuslujuus

Betonin tärkein ominaisuus on sen puristuslujuus, jonka perusteella betoni luokitellaan lujuusluokkiin. Betonin muut ominaisuudet ovat verrannollisia puristuslujuuteen. Näitä ominaisuuksia ovat muun muassa vetolujuus, taivutusvetolujuus, kimmokerroin ja säilyvyys. Yleensä betonin puristuslujuus mitataan puristuskokeella 28 vuorokauden kypsyysikässä, joko lieriö- tai kuutiokappaleesta. Lieriö on halkaisijaltaan 150 mm ja 300 mm korkea. Kuutio on puolestaan sivumitaltaan 150 mm. Kuutiokokeen tulos  $f_{ck,cube}$  voidaan muuttaa lieriölujuudeksi  $f_{ck,cyl}$  kertomalla 0,78...0,85. (by 201 2018, 85.)

Puristuskokeessa koekappaleiden muotit ovat standardin SFS-EN 12390-1 mukaisia. Standardissa SFS-EN 12390-2 kerrotaan muottien valmistelu, betonin tiivistäminen ja pinnan tasoitus. Mittaukset tehdään standardin SFS-EN 12390-1 mukaisesti.

## 5.3 Tartuntavetolujuus

Tartuntavetolujuuskokeella, josta käytetään myös nimeä tartuntalujuuskoe, voidaan määrittää kerroksittain valetun betonin kerroksien välinen vetolujuus tai kalion ja betonin välinen tartuntavetolujuus. Tartuntavetolujuuskoetta voidaan myös käyttää betonin vetolujuuden määrittämiseksi rakenteesta suoraan. Ennen varsinaista koetta, betonipinta tulee hioa ja tehdä tarvittavat porausurat. Betonin pintaan liimataan vetokappale, joka kiinnitetään vetolaitteeseen liiman kuivuttua (kuva 3). Vetolaite vetää kappaleen betonista suoraan ylöspäin, ja käytettävää voimaa lisätään tasaisesti. Laitteen mitta-asteikolta luetaan murtolujuus eli suurin kuormitus  $F$  (kaava 2), jos kone ei automaattisesti laske tartuntalujuutta pinta-alaa kohden. Tartuntavetolujuuden tulos hylätään, jos murtuminen tapahtuu saumavyöhykkeen ulkopuolelta. (SFS 5446 1988, 1–2.)

$$f_{ctb} = \frac{F}{A} \quad (2)$$

missä  $F$  on murtolujuus [MN]  
 $A$  on mitattu pinta-ala [m<sup>2</sup>]



Kuva 3. Tartuntavetolujuuden mittaamiseen käytettävä tartuntavetomittari ja betonin pintaan liimattava kappale



## 6 TYÖNSUORITUS

Työn tarkoituksena oli selvittää jäätyminen ja sulamisen vaikutus betonin lujudenkehitykseen ja tartuntavetolujuuteen. Koejärjestelyt pyrkivät simuloimaan oikeita olosuhteita keväällä tai syksyllä, kun päivällä lämpötila on plussan puolella ja yöllä miinuksien puolella, eikä lämmitystä ole. Kappaleita pidettiin yön yli 12 tuntia noin  $-5\text{ °C}$ :ssa pakastimessa. Päivisin kappaleet olivat 12 tuntia huoneenlämmössä. Puristus- ja tartuntavetolujuuskokeet tehtiin päiväjakson puolella välillä.

Kokeissa lisäksi tutkittiin vastavalmistetun betonin lämpötilan vaikutusta lujudenkehitykseen. Toinen betonierä oli  $+20,1\text{ °C}$  massan sekoittamisen jälkeen ja toinen erä  $+10,1\text{ °C}$ .

### 6.1 Kokeen valmistelut ja betonointi

Tartuntavetolujuuskokeita varten tehtiin yhteensä kahdeksan puista muottia, joista puolet oli viileälle massalle ja puolet lämpimälle massalle. Puristuslujuuskokeisiin varattiin kymmenen kuutiomuottia, joidenka sivun pituus on 150 mm. Kaikki muotit öljyttiin ennen kuin niihin valettiin betonia.

Muottien esikäsitteilyn jälkeen valmistettiin C30/37-lujuusluokkaiseksi suhteutettua betonia taulukon 3 mukaisella reseptillä. Sementtinä käytettiin plussementti-tuotemerkkistä CEM II/B (S-LL) 42,5 N luokan sementtiä. Betonia valmistettiin kaksi erää. Ensimmäinen erä oli viileää massaa ja toinen lämmintä. Betonin raaka-aineet laitettiin betonimyllyn seuraavassa järjestyksessä: filleri, hiekka, puolet vedestä, sementti, sepeli ja loput vedestä. Kun betonimassa oli sekoitettu, niin sen notkeus laskettiin painumakokeella.

TAULUKKO 3. Betonin resepti

Raaka-aine	Massa (kg)
Sementti	10,7
Filleri	6,1
Hiekka 0/8	32,0
Sepeli 6/16	22,8
Vesi	6,6 + 0,7

Öllytyt muotit täytettiin massalla ja tärytettiin. Kahteen kuutioon, joista toinen oli viileästä betonista valmistettu ja toinen oli lämpimästä betonista valmistettu, laitettiin lämpötila-anturit keskelle betonia sekä betonin pintaan. Tämän jälkeen ne saivat olla huoneenlämmössä noin 6 tuntia. Illalla koekappaleet laitettiin pakastimeen 12 tunniksi. Aamulla koekappaleet otettiin pakastimesta ja ne saivat sulaa kuusi tuntia ennen kokeita.

## 6.2 Koekappaleiden testaukset

Tehdyt kokeet olivat puristuslujuuskoe ja tartuntavetolujuuskoe. Ensimmäisten kokeiden teko alkoi noin 24 tuntia valuhetkestä, jolloin kappaleet olivat olleet keran pakastimessa. Tästä seuraava päivänä tehtiin samat kokeet kappaleille, jotka olivat olleet kaksi kertaa pakastimessa. Näin tehtiin vielä kaksi kertaa, kun loput kappaleet olivat olleet kolme ja neljä kertaa pakastimessa.

Tartuntavetolujuuskokeissa käytettyihin kappaleisiin tehtiin epäviralliset urat, jotta varmistettiin, että jokaisesta kappaleesta saataisiin tartuntavetolujuus testattua. Urat tehtiin valun jälkeen, kun betoni oli vielä plastista. Jokaiseen kappaleeseen tehtiin kaksi epävirallista uraa. Kahtena ensimmäisenä päivänä tartuntavetolujuuskoetta ei voitu tehdä heti standardin SFS 5446 mukaisesti, koska betoni oli vielä liian pehmeää. Kappaleisiin saatiin testauspäivänä täpärästi porattua urat noin kaksi tuntia kokeiden jälkeen, mutta ne olivat lähestulkoon käyttökelvottomia. Kappaleisiin poratuista urista otettiin tartuntavetolujuuskoe uudelleen samana päivänä. Kahteen ensimmäiseen kappaleeseen saatiin kuitenkin porattua

vaivatta urat kahden päivän päästä, kun betoni oli saanut kovettua huoneenlämmössä. Tällöin tehtiin lisää tartuntavetolujuuskokeita näille kappaleille, jotta nähtäisiin, onko lujuus alkanut kehittymään massan ollessa pitkään huoneenlämmössä.

Loppuihin kappaleisiin pystyttiin poraamaan urat ennen tartuntavetolujuuskokeita, sillä betoni oli jo sen verran kovaa. Kappaleisiin porattiin kuitenkin vain yksi ura per testauspäivä. Epävirallisista urista otettiin kuitenkin myös tartuntavetolujuudet. Taulukoista 4 ja 5 on nähtävissä, monentenako päivänä mikäkin kappale on puristettu ja vedetty.

TAULIKKO 4. Puristuskokeiden päivät ja puristetut kappaleet

Mittauspäivä	Jäätymisten määrä, lämmin massa	Jäätymisten määrä, viileä massa
1	12 h pakkasessa 12 h lämpimässä	12 h pakkasessa 12 h lämpimässä
2	2 x 12 h pakkasessa 2 x 12 h lämpimässä	2 x 12 h pakkasessa 2 x 12 h lämpimässä
3	3 x 12 h pakkasessa 3 x 12 h lämpimässä	3 x 12 h pakkasessa 3 x 12 h lämpimässä
4	4 x 12 h pakkasessa 4x 12 h lämpimässä	4 x 12 h pakkasessa 4 x 12 h lämpimässä

TAULUKKO 5. Tartuntavetolujuuskokeiden päivät ja vedetyt kappaleet

Mittauspäivä	Jäätymisten määrä, lämmin massa	Jäätymisten määrä, viilestä massa
1	12 h pakkasessa 12 h lämpimässä	12 h pakkasessa 12 h lämpimässä
2	2 x 12 h pakkasessa 2 x 12 h lämpimässä	2 x 12 h pakkasessa 2 x 12 h lämpimässä
3	3 x 12 h pakkasessa 3 x 12 h lämpimässä	3 x 12 h pakkasessa 3 x 12 h lämpimässä
	12 h pakkasessa 60 h lämpimässä	12 h pakkasessa 60 h lämpimässä
4	4 x 12 h pakkasessa 4 x 12 h lämpimässä	4 x 12 h pakkasessa 4 x 12 h lämpimässä
	3 x 12 h pakkasessa 60 h lämpimässä	3 x 12 h pakkasessa 60 h lämpimässä
	2 x 12 h pakkasessa 72 h lämpimässä	2 x 12 h pakkasessa 72 h lämpimässä

## 7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELO

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää betonin syklisen jäätyminen ja sulamisen vaikutus varhaisvaiheessa betonin puristuslujuuteen ja tartuntavetolujuuteen. Käytännössä tutkimuksessa selvitettiin, palautuuko lujuudenkehitys jäätymisten välissä ja kuinka suurena.

Pienen otannan vuoksi virhemarginaali kaikissa tuloksissa voi olla suuri. Todellisten virhemarginaalien laskeminen kokeissa olisi hyvin vaikeaa, mutta arviolta suhteellinen virhe voisi olla noin 15 % luokkaa kaikilla kokeilla.

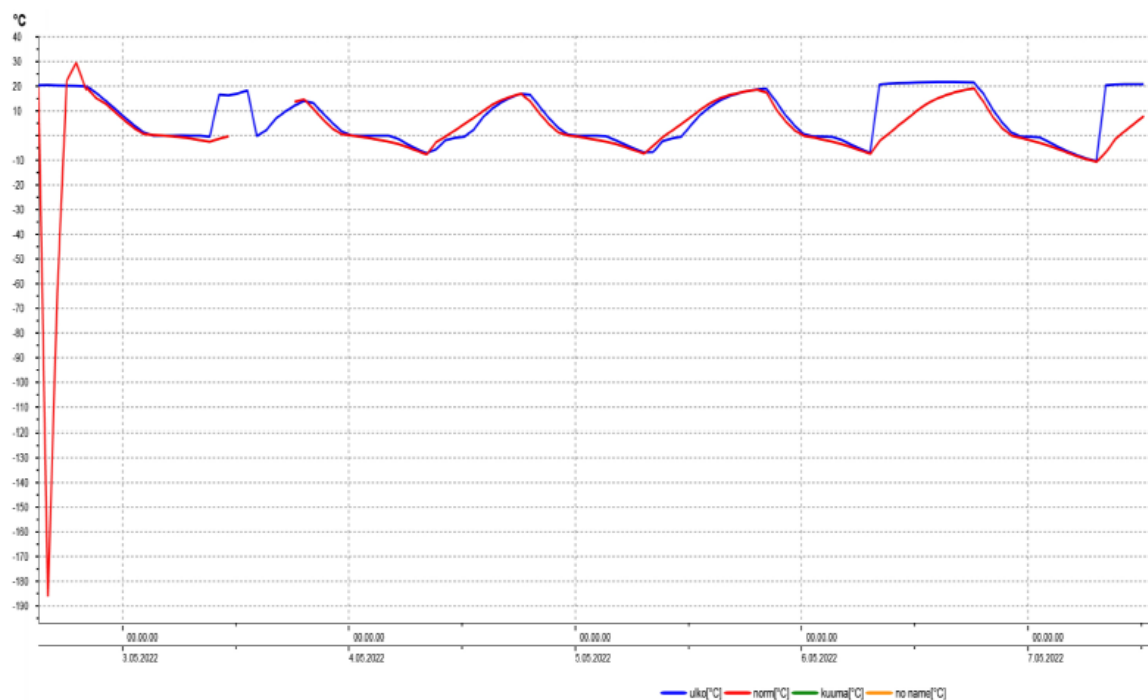
### 7.1 Lämpötilan seuranta

Kokeessa seurattiin kappaleiden lämpötiloja keskeltä kappaletta ja kappaleen pinnasta noin 1,5 cm syvyydestä yhdestä lämpimästä massasta tehdystä kappaleesta sekä yhdestä kylmästä massasta tehdystä kappaleesta. Kuvioissa 9 ja 10 ovat lämpimän ja viileän massan lämpötilat. Sininen käyrä kuvaa lämpötilaa pinnasta ja punainen käyrä kuvaa lämpötilaa keskeltä. Lämpimän massan anturit alkoivat mittaamaan lämpötiloja 2.5 eli valupäivänä. Puolestaan viileän massan anturit alkoivat mittaamaan lämpötiloja vasta seuraavana päivänä 3.5. Liitteistä 1 ja 2 ovat nähtävissä kappaleiden lämpötilat tunnin välein taulukkomuodossa.

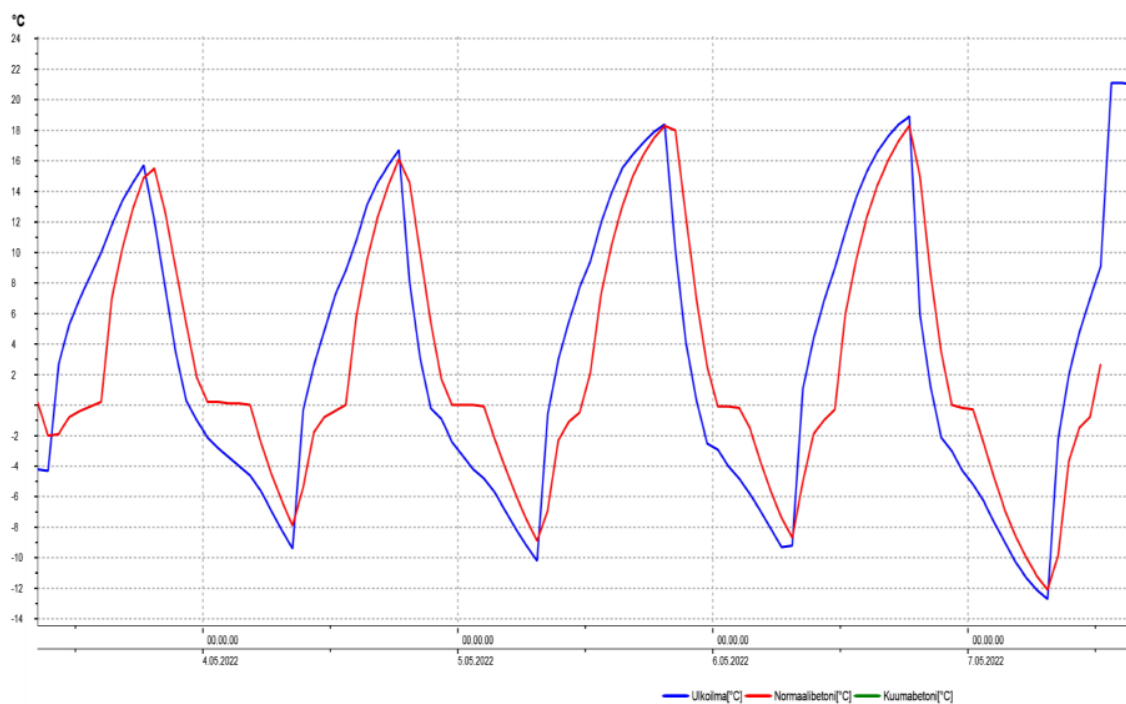
Kaikki tuloksissa esitetyt lämpötilat eivät ole luotettavia. Lämpimästä massasta tehdystä kappaleesta sisälämpötilaa mittaava anturi eli punainen käyrä (kuvio 9), on mitannut lämpötilaksi  $-186\text{ °C}$  mikä ei ole mitenkään mahdollinen sisälämpötila, kun pakastimen sisällä lämpötila on vain  $-5\text{ °C}$ . Punaisesta käyrästä on nähtävissä kumminkin, että betonin hydrataatioreaktio on nostanut kappaleen sisälämpötilan  $30\text{ °C}$ :een. Lämpimän massan käyrästä näkee myös sen, kuinka lämpötilat ovat tasoittuneet ympäristön lämpötilaan.

Molemmat viileän massan anturit alkoivat laskea lämpötiloja vasta vuorokautta myöhemmin valusta (kuvio 10). Viileästä massasta tehdystä kappaleesta ei näe

alkuhetken reaktioita, mutta siitä näkee kuinka sisä- ja ulkolämpötilat nousevat sekä laskevat melko tasaisesti ympäristön lämpötilaan.



KUVIO 9. Lämpimästä massasta valmistetun kappaleen lämpötilan kehitys 118 tunnin aikana



KUVIO 10. Viileästä massasta valmistetun kappaleen lämpötilan kehitys 146 tunnin aikana

## 7.2 Painumakoe

Betoni massojen painumakokeiden tulokset olivat tyyppilliset, eikä niissä ollut mitään yllättävää. Kylmän massan painuma oli 15 cm ja lämpimän massan 13 cm. Juoksevuusaste betonille siis on S3, jonka painuma on 100...150 mm välillä taulukon 2 mukaisesti.

## 7.3 Puristuskoee

Puristuskokeen tulokset ovat alla olevassa taulukossa 6. Viileässä +10 °C:na valetussa massassa on korkeampi puristuslujuus, mikä on epäloogista, sillä periaatteessa lämpimän + 20 °C:na valetun massan pitäisi kehittää lujuutta nopeammin. Tämä ei johtune valedlujuudesta, sillä kappaleet olivat kuusi tuntia ennen kokeiden aloitusta huoneenlämmössä. Lisäksi kappaleiden lämpötilat olivat nousseet plussan puolelle noin kaksi tuntia ennen kokeita. Mahdollisia tulokseen vaikuttaneita muuttujia olivat massojen sekoitus- ja valujärjestys sekä kappaleiden paikat pakastimessa. Viileä massa sekoitettiin ensin, joten se ehti kehittämään noin tunnin pidempään lujuutta kuin lämmin massa.

Pienen otannan vuoksi on hankala sanoa varmuudella mitään massojen lämpötilojen vaikutuksesta lujuudenkehitykseen. Lisäksi tulokset eivät vastaa yleisesti tiedettyä faktaa, että lämmin massa kehittää lujuutta nopeammin kuin viileä massa. Vaikka tulokset ovat yleisesti hyväksytyä teoriaa vastaan, niin tästä ei pidä vetää johtopäätöstä, että viileä massa sopisi paremmin betonointiin.

TAULUKKO 6. Kuutiopuristuslujuuskokeen tulokset

Puristuskoe suoritettu valusta (d)	Puristuslujuus $f_{ck,cube}$ , lämmin (N/mm <sup>2</sup> )	Puristuslujuus $f_{ck,cube}$ , viileä (N/mm <sup>2</sup> )
1	0,8	0,9
2	1,8	2,8
3	5,6	5,5
4	6,9	8,9

Kuutioiden reunat myös halkeilivat todella pahasti ensimmäisenä päivänä verrattuna neljänteen päivään, mikä johtunee siitä, että lujuudenkehitys reuna-alueilla on ollut hitaampaa kuin keskellä. Tämä on nähtävissä kuvien 4 ja 5 lämpimästä ja viileästä massasta valetuista kuutioista.



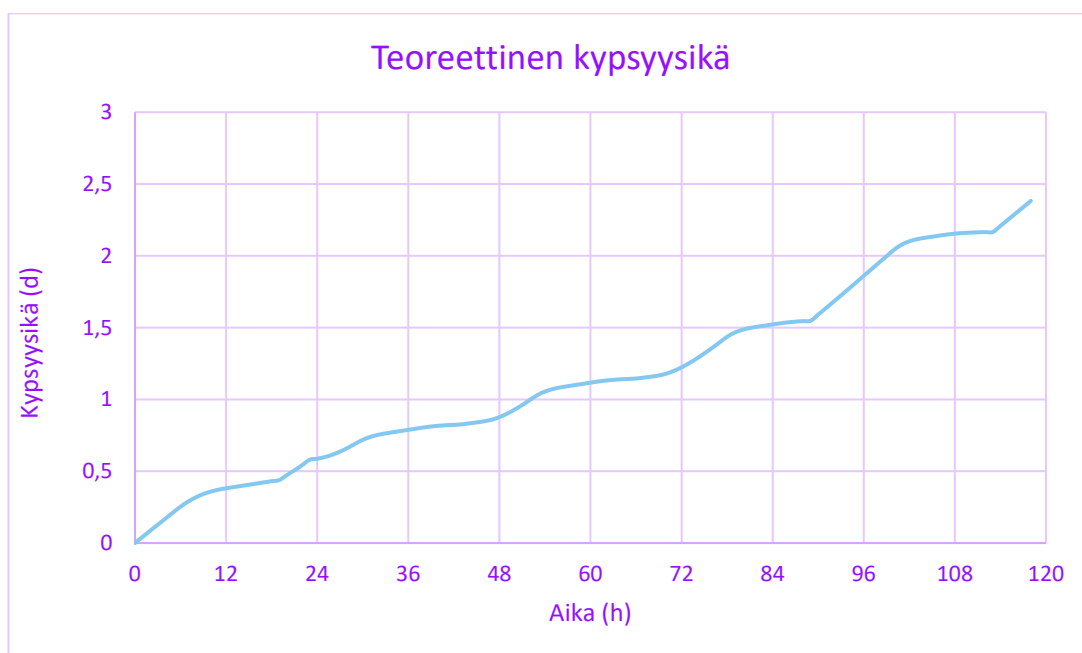
Kuva 4. Ensimmäisenä päivänä puristettu kuutio (vasen) ja neljäntenä päivänä puristettu kuutio (oikea) lämpimästä massasta



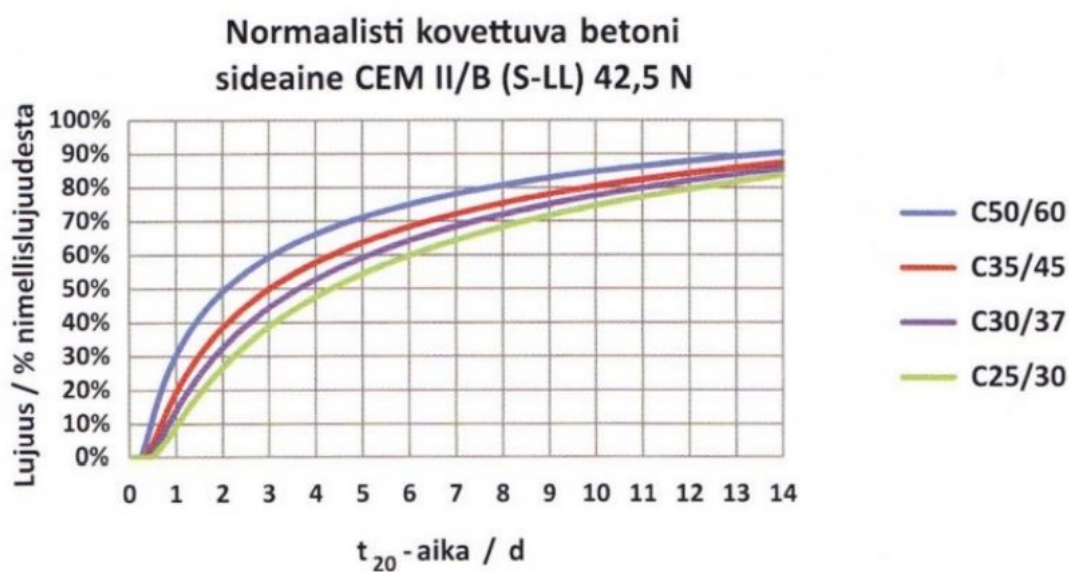


Kuva 5. Ensimmäisenä päivänä puristettu kuutio (vasen) ja neljäntenä päivänä puristettu kuutio (oikea) viileästä massasta

Betonin teoreettinen kypsyysikä selvitettiin betoniin laitettujen lämpötila-antureiden antamista lämpötiloista (liite 1). Laskennassa käytettiin Sadgroven kaavaa (kaava 1). Teoreettinen kypsyysikä laskettiin kaikille kappaleille vain lämpimän massan ulkopinnan lämpötilasta (kuvio 9, sininen käyrä), koska siitä saatiin ai-noat luotettavat tulokset koko kokeen ajalta. Tämä vääristää minimaalisesti vii-leän massan teoreettista kypsyysikää. Laskennasta saatiin tulokseksi teoreetti-nen kypsyysikä ajan funktiona, joka on esitetty kuviossa 11. Kuvioista 11 on näh-tävissä, että kypsyysikä kasvaa nopeimmin aikoina, jolloin betonin lämpötila on plussan puolella ja kasvu pysähtyy lähes kokonaan betonin lämpötilan ollessa miinuksen puolella. Teoreettinen puristuslujuus on laskettu kuvion 11 teoreetti-sella kypsyysiällä ja kuvion 12 C30/37-lujuusluokan betonin lujuudenkehitys-käyrällä. Tulokset ovat esitetty taulukossa 7.



KUVIO 11. Valetun betonin teoreettinen kypsyyssikä kehitty nopeasti kappaleen ollessa lämmin ja hitaasti sen ollessa kylmä



KUVIO 12. Normaalisti kovettuvan betonin lujuudenkehitys +20 °C:ssa (by 2018, 93)

TAULUKKO 7. Teoreettinen lujuudenkehitys

Puristuskoe suoritettu valusta (d)	Teoreettinen kypsyyssikä testaus-hetkellä (d)	Teoreettinen lujuus (%)	Teoreettinen puristuslujuus $f_{ck,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	0,59	5	1,85
2	0,88	10	3,70
3	1,22	20	7,40
4	1,86	29	10,73

Taulukoissa 8 ja 9 on esitetty todellisen puristuslujuuden kehitys molempien massojen kappaleille verrattuna teoreettiseen puristuslujuuteen. Viileän massan teoreettinen puristuslujuus ei kuitenkaan ole täysin oikea, sillä vain lämpimästä massasta pystyttiin laskemaan lujuudenkehitys kokoajalta. Ensimmäisenä päivänä toteutuneen ja teoreettisen puristuslujuuden erot olivat suhteellisesti suurimmat. Tämä johtuu siitä, että betonin lujuudenkehitys on nopeinta ensimmäisinä päivinä. Puolestaan absoluuttisen lujuudenmenetyksen tulokset nousivat ja laskivat epä johdonmukaisesti. Tästä voidaan päätellä, että todellisen puristuslujuuden ja teoreettisen puristuslujuuden välillä ei ole mitään johdonmukaista suhdetta tällä otannalla. Voidaan myös päätellä, että kappaleissa näkyvä pienempi lujuus verrattuna teoreettiseen puristuslujuuteen on todennäköisesti lujuuskatoa.

TAULUKKO 8. Toteutunut puristuslujuus ja teoreettinen puristuslujuus lämpimälle massalle

Puristuskoe suoritettu valusta (d)	Teoreettinen puristuslujuus $f_{ck,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Todellinen puristuslujuus $f_{ck,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Absoluuttinen lujuudenmenetys (N/mm <sup>2</sup> )	Lujuudenmenetys (%)
1	1,85	0,8	1,05	56,7
2	3,70	1,8	1,90	51,4
3	7,40	5,6	1,80	24,3
4	10,73	6,9	3,83	35,7

TAULUKKO 9. Toteutunut puristuslujuus viileälle massalle ja teoreettinen puristuslujuus lämpimälle massalle

Puristuskoe suoritettu valusta (d)	Teoreettinen puristuslujuus $f_{ck,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Todellinen puristuslujuus $f_{ck,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Absoluuttinen lujuudenmenetys (N/mm <sup>2</sup> )	Lujuudenmenetys (%)
1	1,85	0,9	0,95	51,4
2	3,70	2,8	0,90	24,3
3	7,40	5,5	1,90	25,7
4	10,73	8,9	1,83	17,1

#### 7.4 Tartuntavetolujuuskoe

Tartuntavetolujuuskokeet eivät sujuneet ongelmitta, koska kahtena ensimmäisenä päivänä tartuntavetolujuuskokeita ei voitu tehdä standardin SFS 5446 mukaisesti betonin ollessa vielä liian pehmeää. Lisäksi kappaleet eivät olleet vielä kehittäneet lujuutta niin paljoa, että vetolujuuslaite olisi tunnistanut lujuutta. Betonin pinnassa oli kosteutta, joten vain liimapinta irtosi muutamasta koekappaleesta murtamatta varsinaisesti betonia (kuva 6). Lisäksi pintaa ei pystytty hiomaan kahdesta ensimmäisestä kappaleesta kunnolla, koska betoni oli liian pehmeää.



Kuva 6. Irronnut liimapinta viileästä massasta ensimmäisen päivän tartuntavetolujuuskokeen jälkeen

Tartuntavetolujuuskokeen tulokset ovat alla olevissa taulukoissa 10, 11 ja 12. Tartuntavetolujuutta tuli lisää ajan mittaan ja tulokset paranivat huomattavasti, jos betoni sai olla lämpimässä muutaman päivän. Kokeen tuloksiin on vaikuttanut betonin pinnalla oleva kosteus etenkin ensimmäisinä päivinä. Tällä on ollut vaikutusta siihen, että vain liimapinta on irronnut betonin pinnasta. Lisäksi kokeen tulokset vaihtelivat huomattavasti riippuen näytteenottokohdasta. Kappaleista, jotka olivat käyneet läpi eniten jäätymis-sulamissyklejä, löytyivät myös pahimmat vauriot. Kappaleiden lujuudenkehitys ei pysähtynyt kokonaan, mutta se hidastui kylmän lämpötilan vuoksi. Tuloksista voidaan päätellä, että kappaleissa esiintyy mikroskooppisen pieniä säröjä jo melko syvällä betonissa. Tämän vuoksi kokeissa käytetty liima on todennäköisemmin imeytynyt betoniin lujittaen sitä. Tämä selittäisi melkein 10 mm:n syvyiset lohkeamat betonin tartuntavetokohdasta. (Korjauslupien laatuvaatimukset 2008, 9).

TAULUKKO 10. Tartuntavetolujuuskokeen tulokset

Vetokoe suoritettu valusta (d)	Pinnan lämpötila (°C)	Tartuntavetolujuus, epävirallinen, lämmin (N/mm <sup>2</sup> )	Tartuntavetolujuus, porattu, lämmin (N/mm <sup>2</sup> )	Tartuntavetolujuus, epävirallinen, viileä (N/mm <sup>2</sup> )	Tartuntavetolujuus, porattu, viileä (N/mm <sup>2</sup> )
1	20,5	Ei tulosta	Ei mahdollinen	Ei tulosta	Ei mahdollinen
2	17,0	0,14	Ei mahdollinen	Ei tulosta	Ei mahdollinen
3	19,6	0,46 ja 0,62	0,49	0,32 ja 0,46	0,41
4	21,7	0,88 ja 0,86	0,41	1,01 ja 0,74	0,93

TAULUKKO 11. Tartuntavetolujuuskokeen lisätulokset, joihin kaikkiin on tehty poraamalla urat

Jäätymissyklien määrä	Lisäaika huoneenlämmössä ensimmäisen kokeen jälkeen (h)	Tartuntavetolujuus, lämmin (N/mm <sup>2</sup> )	Tartuntavetolujuus, viileä (N/mm <sup>2</sup> )
1	2	Ei tulosta	0,14
2	2	0,16	Ei tulosta
1	48	1,03	1,13
2	48	0,68	0,89
3	48	0,68 ja 0,93	0,68

TAULUKKO 12. Vaurion syvyys

Massan tyyppi	Vetokoe suoritettu valusta (d)	Vaurion syvyys (mm)
Viileä	3	9,50
Lämmin	3	7,97
Lämmin	4	8,57

Toteutuneet tartuntavetokokeen tulokset ovat 5...13 % välillä todellisesta puristuslujuudesta kuutiolle. Tämä on melko lähellä kirjallisuudesta löytyviä arvoja, joidenka mukaan vetolujuus on noin 10 % puristuslujuudesta (by 201 2018, 89). Teorian mukaan vetolujuus kärsii enemmän jäätymisestä kuin puristuslujuus. Pienen otannan vuoksi ei voida varmaksi sanoa, että ilmenikö tutkituissa kappaleissa suurempaa vetolujuuden menetystä verrattuna puristuslujuuden menetykseen.

## 8 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää betonin varhaisen syklisen jäätyminen ja sulamisen vaikutus betonin lujuusominaisuuksiin. Työn kokeelliseen osaan kuului puristus- ja tartuntavetolujuuskokeet. Kaikki halutut mittaukset saatiin tehtyä viimeistään soveltamalla.

Tuloksista on nähtävissä, että kappaleiden puristuslujuus jatkaa kasvamistaan jäätymisten välissä. Kuitenkin lujuuden kasvu on hitaampaa, kuin mitä sen pitäisi teoreettisesti Sadgroven kaavalla olla. Betonissa esiintyy siis lujuuskatoa jo aikaisessa vaiheessa. Kokeessa havaitun varhaisvaiheen lujuudenkehityksen heikentyminen oli 17...57 % pienempi teoreettisesta puristuslujuudesta. Puristuslujuuden ollessa betonin tärkein ominaisuus, on tärkeää, että betoni saavuttaa vaaditun puristuslujuuden.

Kokeen tulosten mukaan puristuslujuus oli hieman korkeampi viileästä massasta valetuilla kappaleilla. Tämä on kuitenkin yleisen betonin lujuudenkehityksen teorian vastaista, ja johtunee valujärjestyksestä tai pienestä otannasta.

Tartuntavetolujuus käyttäytyi vastaavasti kuin puristuslujuus, eli vetolujuusominaisuudet kasvoivat jäätymisten välissä. Pienen otannan vuoksi ei kuitenkaan voida varmuudella todeta, että tartuntavetolujuuden kehitys heikkenisi huomattavasti enemmän tai vähemmän kuin puristuslujuuden kehitys, vaikka vaurioituminen ilmeni vetokokeissa selkeästi. Mitä enemmän syklejä betoni oli käynyt läpi, sitä suuremmat vauriot olivat nähtävissä. Vaurioituminen ilmaantui lähes 10 mm syvyisinä lohkeamina betonissa tartuntavetokokeiden yhteydessä, kun kokeissa käytetty liima imeytyi betonin pieniin säröihin kovettaen betonia.

Pienen otannan ja muiden ongelmien vuoksi kaikki saadut tulokset eivät vastaa täysin kirjallisuutta eivätkä ole johdonmukaisia. Kokeiden virhemarginaaleja oli mahdotonta tarkemmin laskea, mutta arviolta ne voisivat olla noin 15 % luokkaa. Tulosten perusteella on kuitenkin selvää, että jokainen jääty miskerta heikentää absoluuttista lujuudenkehitystä entisestään.

Tulokset vahvistavat virheistä huolimatta sen, että betonia ei kannata päästää jäätymään kovettumisen varhaisvaiheessa ennen jäätymislujuuden saavuttamista. Betonin lujuusominaisuudet ovat tällöin matalammat, kuin mitä niiden pitäisi teoreettisesti olla lämpötilan puolesta Sadgroven kypsyysikää käytettäessä. Toimenpiteet, joilla betonin jäätyminen estetään, ovat siis tärkeitä tekijöitä talvi-valun onnistumisessa.

Jatkotutkimuksena voitaisiin toistaa samat kokeet suuremmalla otannalla. Näin saataisiin minimoitua epävarmuustekijät ja eliminoidua epäonnistuneet tulokset. Koe voitaisiin myös suorittaa uudestaan verrokkikappaleiden kanssa, joista katsottaisiin lopullinen lujuuskato 28 vuorokauden kypsyysikässä. Lisäksi vastaava koejärjestely voitaisiin tehdä suojahuokoistetulla pakkasenkestävällä betonilla, jolloin selviäisi, eroaako lujuuskadon suuruus tavallisesta betonista. Koekappaleista voitaisiin ottaa myös ohuthienäytteitä, jotta nähtäisiin, millä tavalla testattavat näytteet ovat vaurioituneet.



## LÄHTEET

Betoniteollisuus ry. 2013. Talvibetonointi. Helsinki: Suomen Rakennusmedia Oy.

Betonin lämmittäminen talvivaluissa. 2011. Rudus Oy. Pdf-dokumentti. Viitattu 24.5.2022. <https://www.rudus.fi/Download/23944/Betonin%20l%C3%A4mmitt%C3%A4minen%20talvivaluissa.pdf>

By 201. 2004. Suomen Betoniyhdistys. Betonitekniikan oppikirja. Viides painos. Suomen Betoniyhdistys. Jyväskylä: Gummerus

By 201. 2018. Suomen Betoniyhdistys. Betonitekniikan oppikirja. Helsinki: BY-koulutus Oy

Korjausalustan laatuvaatimukset. 2008. Teknologian tutkimuskeskus. Pdf-dokumentti. Viitattu 6.6.2022. [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Taitorakenteet/julkaisut/korjausalusta\\_laatuvaatimukset\\_2008.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Taitorakenteet/julkaisut/korjausalusta_laatuvaatimukset_2008.pdf)

Kröger, T. 2017. Jäljelle jäi vain lautakasa – koko Suomea puhuttanut talo sortui yllättäen 54 vuotta sitten. Yle uutiset 18.4.2017. Viitattu 22.5.2022. <https://yle.fi/uutiset/3-9552482>

Ramirent. N.d. Sääsuojat ja telineet. Verkkosivu. Viitattu 24.5.2022. <https://www.ramirent.fi/tutustu-palveluihimme/saasuojat-ja-telineet>

Rappeutumisen vaikutus betonisillan kantokykyyn. 2005. Teknologian tutkimuskeskus. Pdf-dokumentti. Viitattu 21.5.2022. [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Taitorakenteet/julkaisut/rappeutuminen\\_betonisillat2005.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Taitorakenteet/julkaisut/rappeutuminen_betonisillat2005.pdf)

Rudus. 2017. Betonin ominaisuudet talvella. Pdf-dokumentti. Viitattu 20.5.2022. <https://www.rudus.fi/Download/27142/Betonin%20ominaisuudet%20talvella.pdf>

SFS-EN 12350-2. 2019. Tuoreen betonin testaus. Osa 2: Painuma. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 25.5.2022. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/987966.html.stx>

SFS-EN 12390-1. 2013. Testing hardened concrete. Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 25.5.2022. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1012866.html.stx>

SFS-EN 12390-2. 2019. Kovettuneen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujustestejä varten. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 25.5.2022. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1018412.html.stx>

SFS-EN 12390-3. 2019. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 25.5.2022. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/787655.html.stx>

SFS 5446. 1988. Betoni, tartuntalujuus. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 25.5.2022. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/hakutulos.html.stx>

## LIITTEET

## Liite 1. Lämpimän massan ulko- ja sisälämpötila

1 (3)

ID	Date/time	ulko [°C]	norm [°C]	kuuma [°C]	no name [°C]
1	2.5.2022 15.15.35	20.4	19.6	---	---
2	2.5.2022 16.15.35	20.5	-186.2	---	---
3	2.5.2022 17.15.35	20.3	-63.6	---	---
4	2.5.2022 18.15.35	20.2	22.2	---	---
5	2.5.2022 19.15.35	20.1	29.6	---	---
6	2.5.2022 20.15.35	19.9	19.1	---	---
7	2.5.2022 21.15.35	17.2	15.1	---	---
8	2.5.2022 22.15.35	14.1	12.8	---	---
9	2.5.2022 23.15.35	10.8	9.4	---	---
10	3.5.2022 0.15.35	7.4	6.0	---	---
11	3.5.2022 1.15.35	4.2	3.0	---	---
12	3.5.2022 2.15.35	1.4	0.6	---	---
13	3.5.2022 3.15.35	0.0	0.2	---	---
14	3.5.2022 4.15.35	0.0	0.0	---	---
15	3.5.2022 5.15.35	0.0	-0.3	---	---
16	3.5.2022 6.15.35	0.1	-0.7	---	---
17	3.5.2022 7.15.35	0.0	-1.2	---	---
18	3.5.2022 8.15.35	0.0	-1.9	---	---
19	3.5.2022 9.15.35	-0.4	-2.5	---	---
20	3.5.2022 10.15.35	16.6	-1.3	---	---
21	3.5.2022 11.15.35	16.3	-0.3	---	---
22	3.5.2022 12.15.35	17.1	---	---	---
23	3.5.2022 13.15.35	18.3	---	---	---
24	3.5.2022 14.15.35	-0.2	---	---	---
25	3.5.2022 15.15.35	2.3	---	---	---
26	3.5.2022 16.15.35	6.9	8.8	---	---
27	3.5.2022 17.15.35	9.8	---	---	---
28	3.5.2022 18.15.35	12.2	13.7	---	---
29	3.5.2022 19.15.35	14.1	14.7	---	---
30	3.5.2022 20.15.35	13.2	10.8	---	---
31	3.5.2022 21.15.35	9.1	6.5	---	---
32	3.5.2022 22.15.35	5.2	2.9	---	---

ID	Date/time	ulko [°C]	norm [°C]	kuuma [°C]	no name [°C]
33	3.5.2022 23.15.35		1.8	0.5	---
34	4.5.2022 0.15.35		0.1	0.0	---
35	4.5.2022 1.15.35		0.0	-0.5	---
36	4.5.2022 2.15.35		0.0	-1.1	---
37	4.5.2022 3.15.35		0.0	-1.8	---
38	4.5.2022 4.15.35		0.0	-2.5	---
39	4.5.2022 5.15.35		-1.3	-3.4	---
40	4.5.2022 6.15.35		-3.5	-4.7	---
41	4.5.2022 7.15.35		-5.4	-6.2	---
42	4.5.2022 8.15.35		-7.1	-7.7	---
43	4.5.2022 9.15.35		-5.5	-2.7	---
44	4.5.2022 10.15.35		-1.8	-0.4	---
45	4.5.2022 11.15.35		-0.9	2.1	---
46	4.5.2022 12.15.35		-0.4	4.7	---
47	4.5.2022 13.15.35		2.5	7.2	---
48	4.5.2022 14.15.35		7.6	10.0	---
49	4.5.2022 15.15.35		11.1	12.6	---
50	4.5.2022 16.15.35		13.7	14.5	---
51	4.5.2022 17.15.35		15.6	15.9	---
52	4.5.2022 18.15.35		17.0	17.0	---
53	4.5.2022 19.15.35		16.5	13.8	---
54	4.5.2022 20.15.35		11.7	8.8	---
55	4.5.2022 21.15.35		7.0	4.5	---
56	4.5.2022 22.15.35		3.1	1.2	---
57	4.5.2022 23.15.35		0.4	0.0	---
58	5.5.2022 0.15.35		0.0	-0.4	---
59	5.5.2022 1.15.35		0.0	-1.1	---
60	5.5.2022 2.15.35		0.0	-1.8	---
61	5.5.2022 3.15.35		-0.2	-2.5	---
62	5.5.2022 4.15.35		-1.8	-3.4	---
63	5.5.2022 5.15.35		-3.5	-4.6	---
64	5.5.2022 6.15.35		-5.2	-6.0	---
65	5.5.2022 7.15.35		-6.7	-7.3	---
66	5.5.2022 8.15.35		-6.6	-4.0	---
67	5.5.2022 9.15.35		-2.2	-0.6	---
68	5.5.2022 10.15.35		-1.1	2.1	---
69	5.5.2022 11.15.35		-0.4	4.8	---
70	5.5.2022 12.15.35		4.2	7.6	---
71	5.5.2022 13.15.35		8.5	10.6	---
72	5.5.2022 14.15.35		11.6	13.1	---
73	5.5.2022 15.15.35		14.1	15.1	---
74	5.5.2022 16.15.35		15.9	16.4	---
75	5.5.2022 17.15.35		17.1	17.3	---
76	5.5.2022 18.15.35		18.1	18.1	---

ID	Date/time	ulko [°C]	norm [°C]	kuuma [°C]	no name [°C]
77	5.5.2022 19.15.35	18.7	18.6	---	---
78	5.5.2022 20.15.35	19.0	17.4	---	---
79	5.5.2022 21.15.35	14.1	10.7	---	---
80	5.5.2022 22.15.35	8.5	5.8	---	---
81	5.5.2022 23.15.35	4.1	2.0	---	---
82	6.5.2022 0.15.35	0.6	-0.2	---	---
83	6.5.2022 1.15.35	-0.3	-0.8	---	---
84	6.5.2022 2.15.35	-0.3	-1.7	---	---
85	6.5.2022 3.15.35	-0.5	-2.5	---	---
86	6.5.2022 4.15.35	-1.7	-3.5	---	---
87	6.5.2022 5.15.35	-3.6	-4.7	---	---
88	6.5.2022 6.15.35	-5.3	-6.1	---	---
89	6.5.2022 7.15.35	-6.9	-7.4	---	---
90	6.5.2022 8.15.35	20.7	-2.1	---	---
91	6.5.2022 9.15.35	21.0	0.9	---	---
92	6.5.2022 10.15.35	21.2	4.2	---	---
93	6.5.2022 11.15.35	21.3	7.1	---	---
94	6.5.2022 12.15.35	21.5	10.3	---	---
95	6.5.2022 13.15.35	21.6	12.9	---	---
96	6.5.2022 14.15.35	21.7	14.9	---	---
97	6.5.2022 15.15.35	21.7	16.4	---	---
98	6.5.2022 16.15.35	21.7	17.6	---	---
99	6.5.2022 17.15.35	21.6	18.5	---	---
100	6.5.2022 18.15.35	21.5	19.1	---	---
101	6.5.2022 19.15.35	17.1	13.6	---	---
102	6.5.2022 20.15.35	10.7	7.4	---	---
103	6.5.2022 21.15.35	5.4	2.9	---	---
104	6.5.2022 22.15.35	1.3	-0.1	---	---
105	6.5.2022 23.15.35	-0.4	-1.0	---	---
106	7.5.2022 0.15.35	-0.4	-2.0	---	---
107	7.5.2022 1.15.35	-0.7	-3.0	---	---
108	7.5.2022 2.15.35	-2.6	-4.2	---	---
109	7.5.2022 3.15.35	-4.6	-5.6	---	---
110	7.5.2022 4.15.35	-6.4	-7.1	---	---
111	7.5.2022 5.15.35	-8.0	-8.5	---	---
112	7.5.2022 6.15.35	-9.3	-9.7	---	---
113	7.5.2022 7.15.35	-10.3	-10.6	---	---
114	7.5.2022 8.15.35	20.4	-6.6	---	---
115	7.5.2022 9.15.35	20.7	-1.3	---	---
116	7.5.2022 10.15.35	20.8	1.9	---	---
117	7.5.2022 11.15.35	20.8	4.9	---	---
118	7.5.2022 12.15.35	20.8	7.9	---	---
119	7.5.2022 13.15.35	---	---	---	---
120	7.5.2022 14.15.35	---	---	---	---

## Liite 2. Kylmän massan ulko- ja sisälämpötila

1 (4)

ID	Date/time	Ulkoilma [°C]	Normaalibetoni [°C]	Kuumabetoni [°C]
1	3.5.2022 8.29.17	-4.2	0.2	---
2	3.5.2022 9.29.17	-4.3	-2.0	---
3	3.5.2022 10.29.17	2.7	-1.9	---
4	3.5.2022 11.29.17	5.3	-0.8	---
5	3.5.2022 12.29.17	7.0	-0.4	---
6	3.5.2022 13.29.17	8.5	-0.1	---
7	3.5.2022 14.29.17	10.0	0.2	---
8	3.5.2022 15.29.17	11.8	7.0	---
9	3.5.2022 16.29.17	13.4	10.3	---
10	3.5.2022 17.29.17	14.6	12.9	---
11	3.5.2022 18.29.17	15.7	14.9	---
12	3.5.2022 19.29.17	12.1	15.5	---
13	3.5.2022 20.29.17	7.8	12.7	---
14	3.5.2022 21.29.17	3.5	9.0	---
15	3.5.2022 22.29.17	0.3	5.3	---
16	3.5.2022 23.29.17	-1.0	1.8	---
17	4.5.2022 0.29.17	-2.1	0.2	---
18	4.5.2022 1.29.17	-2.8	0.2	---
19	4.5.2022 2.29.17	-3.4	0.1	---
20	4.5.2022 3.29.17	-4.0	0.1	---
21	4.5.2022 4.29.17	-4.6	0.0	---
22	4.5.2022 5.29.17	-5.6	-2.4	---
23	4.5.2022 6.29.17	-6.9	-4.5	---
24	4.5.2022 7.29.17	-8.2	-6.3	---
25	4.5.2022 8.29.17	-9.4	-7.9	---
26	4.5.2022 9.29.17	-0.3	-5.4	---
27	4.5.2022 10.29.17	2.6	-1.8	---
28	4.5.2022 11.29.17	4.9	-0.8	---
29	4.5.2022 12.29.17	7.2	-0.4	---
30	4.5.2022 13.29.17	8.8	0.0	---
31	4.5.2022 14.29.17	10.8	5.8	---
32	4.5.2022 15.29.17	13.1	9.5	---

ID	Date/time	Ulkoilma [°C]	Normaalibetoni [°C]	Kuumabetoni [°C]
33	4.5.2022 16.29.17		14.6	12.3
34	4.5.2022 17.29.17		15.7	14.4
35	4.5.2022 18.29.17		16.7	16.1
36	4.5.2022 19.29.17		8.1	14.6
37	4.5.2022 20.29.17		3.1	10.0
38	4.5.2022 21.29.17		-0.2	5.4
39	4.5.2022 22.29.17		-0.9	1.7
40	4.5.2022 23.29.17		-2.4	0.0
41	5.5.2022 0.29.17		-3.3	0.0
42	5.5.2022 1.29.17		-4.2	0.0
43	5.5.2022 2.29.17		-4.8	-0.1
44	5.5.2022 3.29.17		-5.7	-2.2
45	5.5.2022 4.29.17		-6.9	-4.1
46	5.5.2022 5.29.17		-8.1	-5.9
47	5.5.2022 6.29.17		-9.2	-7.5
48	5.5.2022 7.29.17		-10.2	-8.9
49	5.5.2022 8.29.17		-0.6	-6.9
50	5.5.2022 9.29.17		3.0	-2.3
51	5.5.2022 10.29.17		5.5	-1.1
52	5.5.2022 11.29.17		7.7	-0.5
53	5.5.2022 12.29.17		9.4	2.1
54	5.5.2022 13.29.17		11.9	7.2
55	5.5.2022 14.29.17		13.9	10.5
56	5.5.2022 15.29.17		15.5	13.0
57	5.5.2022 16.29.17		16.4	15.0
58	5.5.2022 17.29.17		17.2	16.4
59	5.5.2022 18.29.17		17.9	17.5
60	5.5.2022 19.29.17		18.4	18.3
61	5.5.2022 20.29.17		10.2	18.0
62	5.5.2022 21.29.17		4.1	12.3
63	5.5.2022 22.29.17		0.3	6.9
64	5.5.2022 23.29.17		-2.5	2.5
65	6.5.2022 0.29.17		-2.9	-0.1
66	6.5.2022 1.29.17		-4.0	-0.1
67	6.5.2022 2.29.17		-4.8	-0.2
68	6.5.2022 3.29.17		-5.8	-1.5
69	6.5.2022 4.29.17		-6.9	-3.7
70	6.5.2022 5.29.17		-8.1	-5.7
71	6.5.2022 6.29.17		-9.3	-7.4
72	6.5.2022 7.29.17		-9.2	-8.7
73	6.5.2022 8.29.17		1.1	-5.0
74	6.5.2022 9.29.17		4.4	-1.9
75	6.5.2022 10.29.17		6.9	-1.0
76	6.5.2022 11.29.17		9.0	-0.3

ID	Date/time	Ulkoilma [°C]	Normaalibetoni [°C]	Kuumabetoni [°C]
77	6.5.2022 12.29.17		11.4	6.0
78	6.5.2022 13.29.17		13.6	9.5
79	6.5.2022 14.29.17		15.3	12.3
80	6.5.2022 15.29.17		16.6	14.4
81	6.5.2022 16.29.17		17.6	16.0
82	6.5.2022 17.29.17		18.4	17.3
83	6.5.2022 18.29.17		18.9	18.3
84	6.5.2022 19.29.17		5.9	15.0
85	6.5.2022 20.29.17		1.2	8.6
86	6.5.2022 21.29.17		-2.1	3.5
87	6.5.2022 22.29.17		-3.0	0.0
88	6.5.2022 23.29.17		-4.3	-0.2
89	7.5.2022 0.29.17		-5.2	-0.3
90	7.5.2022 1.29.17		-6.3	-2.5
91	7.5.2022 2.29.17		-7.7	-4.8
92	7.5.2022 3.29.17		-9.0	-6.9
93	7.5.2022 4.29.17		-10.3	-8.6
94	7.5.2022 5.29.17		-11.3	-10.0
95	7.5.2022 6.29.17		-12.1	-11.2
96	7.5.2022 7.29.17		-12.7	-12.1
97	7.5.2022 8.29.17		-2.2	-9.9
98	7.5.2022 9.29.17		2.0	-3.7
99	7.5.2022 10.29.17		4.8	-1.5
100	7.5.2022 11.29.17		7.0	-0.8
101	7.5.2022 12.29.17		9.1	2.7
102	7.5.2022 13.29.17		21.1	---
103	7.5.2022 14.29.17		21.1	---
104	7.5.2022 15.29.17		21.0	---
105	7.5.2022 16.29.17		21.0	---
106	7.5.2022 17.29.17		21.1	---
107	7.5.2022 18.29.17		21.1	---
108	7.5.2022 19.29.17		21.1	---
109	7.5.2022 20.29.17		21.0	---
110	7.5.2022 21.29.17		21.0	---
111	7.5.2022 22.29.17		20.9	---
112	7.5.2022 23.29.17		20.9	---
113	8.5.2022 0.29.17		20.8	---
114	8.5.2022 1.29.17		20.8	---
115	8.5.2022 2.29.17		20.7	---
116	8.5.2022 3.29.17		20.7	---
117	8.5.2022 4.29.17		20.7	---
118	8.5.2022 5.29.17		20.7	---
119	8.5.2022 6.29.17		20.7	---
120	8.5.2022 7.29.17		20.9	---



ID	Date/time	Ulkoilma [°C]	Normaalibetoni [°C]	Kuumabetoni [°C]
121	8.5.2022 8.29.17	21.0	---	---
122	8.5.2022 9.29.17	20.9	---	---
123	8.5.2022 10.29.17	20.9	---	---
124	8.5.2022 11.29.17	20.8	---	---
125	8.5.2022 12.29.17	20.8	---	---
126	8.5.2022 13.29.17	21.0	---	---
127	8.5.2022 14.29.17	21.0	---	---
128	8.5.2022 15.29.17	21.1	---	---
129	8.5.2022 16.29.17	21.0	---	---
130	8.5.2022 17.29.17	21.1	---	---
131	8.5.2022 18.29.17	21.0	---	---
132	8.5.2022 19.29.17	20.9	---	---
133	8.5.2022 20.29.17	20.9	---	---
134	8.5.2022 21.29.17	20.8	---	---
135	8.5.2022 22.29.17	20.8	---	---
136	8.5.2022 23.29.17	20.7	---	---
137	9.5.2022 0.29.17	20.7	---	---
138	9.5.2022 1.29.17	20.7	---	---
139	9.5.2022 2.29.17	20.7	---	---
140	9.5.2022 3.29.17	20.6	---	---
141	9.5.2022 4.29.17	20.6	---	---
142	9.5.2022 5.29.17	20.7	---	---
143	9.5.2022 6.29.17	20.7	---	---
144	9.5.2022 7.29.17	21.1	---	---
145	9.5.2022 8.29.17	21.4	---	---
146	9.5.2022 9.29.17	22.4	---	---