

Tuomas Mannonen

# Betonin lujuudenkehityksen arviointi lämpötilan perusteella

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri

Rakennustekniikka

Opinnäytetyö

13.4.2019

Tekijä(t) Otsikko	Tuomas Mannonen Betonin lujuudenkehityksen arviointi lämpötilan perusteella
Sivumäärä Aika	45 sivua 13.4.2019
Tutkinto	Insinööri
Koulutusohjelma	Rakennustekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Infrarakentaminen
Ohjaaja(t)	Juha Virtanen, lehtori, betonitekniikka, Metropolia Arvi Hokkanen, Laatupäällikkö, Swerock Oy
<p>Opinnäytetyössä tutkittiin betonin lujuudenkehityksen arviointia lämpötilan perusteella. Työssä käytiin läpi erilaisia menetelmiä lujuudenkehityksen arvioimiseksi, sekä vertailtiin välineitä lämpötilan mittaamiseen.</p> <p>Työn tutkimusosio on jaettu karkeasti kahteen osaan: kirjallisuustutkielmaan betonin lujuudenkehityksen periaatteista ja syistä betonin lujuudenkehityksen seurantaan, sekä kenttäkokeisiin perustuvaan lämpötilanseurantalaitteistojen vertailuun.</p> <p>Kirjallisuustutkielmassa selvitettiin eri betonin lujuudenkehityksenarviointimenetelmien erot ja niiden käytettävyys ja tarkkuus. Lisäksi selvitettiin syyt, minkä takia valetun betonirakenteen lämpötilaa halutaan seurata ja minkälaiset lujuudenkehityksen raja-arvot ovat tärkeitä betonirakentamisen kannalta.</p> <p>Kenttäkokeisiin perustuvassa tutkimusosassa verrattiin opinnäytetyön toimeksiantajalla aikaisemmin käytössä ollutta tallentavaa lämpötilanseurantalaitteistoa uuteen etäluettavaan lämpötilamittariin. Kokeissa selvitettiin sekä eroja mittareiden mittaustulosten tarkkuuksissa, että etäluettavan lämpötilanseurantajärjestelmän käytettävyyttä.</p> <p>Lopussa pohdittiin tutkimuksissa saatuja tuloksia. Pohdinnassa otettiin huomioon nykyisin opinnäytetyön toimeksiantajan käytössä olevan järjestelmän käytettävyys ja ajantasaisuus sekä verrattiin sitä tutkittuihin mahdollisiin uusiin menetelmiin. Pohdinnassa huomioitiin käytettävyys ja taloudellisuus. Lisäksi huomioitiin muut hyötynäkökulmat opinnäytetyön toimeksiantajan sekä asiakkaan kannalta.</p>	
Avainsanat	betoni, lujuudenkehitys, lämpötila, etäluettava loggeri

Author(s) Title Pages Date	Tuomas Mannonen Estimating the strength development of concrete based on the temperature 45 pages 13.4.2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree program	Civil Engineering
Specialization option	Infrastructure
Instructor(s)	Juha Virtanen, Lecturer, concrete technology, Metropolia Arvi Hokkanen, Quality Manager, Swerock Oy
<p>The purpose of this thesis is to research the estimating of strength development of concrete based on the temperature. In this thesis there is looked over different methods of strength development estimations and different tools of metering the temperature.</p> <p>Research part of this thesis is divided in two parts: the first part is literature research about principles of strength development estimations and about the reasons to estimate the strength development of concrete. Second part of the thesis is about the comparison of the tools used in metering temperature. The research of this part is based on field-testing.</p> <p>On the literature-research there is sorted out the differences of different methods, which are used for estimating the strength development of concrete and usability of those methods. Also there is sorted out the reasons for monitoring the temperature of young concrete structure and which are the limits of the strength values.</p> <p>On the research part which is based on the field-testing there is compared the earlier recordable temperature monitoring system that the client of this thesis is used before to the new remote readable temperature monitoring system. In these tests there is sorted out the differences of the accuracy of these systems and the usability of the remote system.</p> <p>In the last part of the thesis, there is discussion about the found results. In this part there is discussion about the usability and timeliness of the system the client of this thesis is now using and it is compared to new methods that are found in the research of this thesis. In the discussion there is comparison of usability and viability of these different systems. Also there is observed the other benefits for the client of this thesis but also the benefits for the customers.</p>	
Keywords	concrete, strength development, temperature, remote usable temperature monitoring system

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Betoni	3
2.1	Lujuus	3
2.2	Tuoreen betonin lämpötila	4
3	Betonin lujuudenkehitys	5
3.1	Lujuudenkehitys	5
3.2	Lämpötilan kehitys	5
3.3	Arviointimenetelmät	6
3.3.1	Kypsyysikään perustuvat lujuudenarviointimenetelmät	7
3.3.2	Menetelmien vertailu	12
4	Syitä betonin lämpötilan seurantaan ja lujuudenkehityksen arviointiin	14
4.1	Jälkihoito	14
4.2	Muottien purkulujuus	14
4.3	Kylmällä säällä betonointi	15
4.4	Suuret lämpötilaerot	16
4.5	Jälkijännitettävät rakenteet	16
4.6	Lämpökäsittely	16
4.7	Lujuuskato	17
5	Betonin lämpötilanseuranta etäluettavalla lämpötilamittarilla	18
5.1	Vertailu tallentavaan lämpötilamittariin	18
5.1.1	Nykyään käytössä oleva tallentava mittari	18
5.1.2	Testattava etäluettava mittari	19
5.2	Koejärjestelyt	22
5.2.1	Ensimmäinen kenttäkoe	23
5.2.2	Toinen kenttäkoe	24
5.2.3	Ääriarvojen testaus	26
5.2.4	Kolmas kenttäkoe	26
5.2.5	Ääriarvojen testaus 2	29
5.2.6	Neljäs kenttäkoe	30
6	Tulokset ja kehitysmahdollisuudet	32

6.1	Mittausten tarkkuus	32
6.2	Lujuuslaskelmien tarkkuus	34
6.3	Etäluettavan loggerin käytettävyys	35
6.4	Hyödyt lämpötilan hallinnassa	36
6.5	Kustannukset	37
	6.5.1 Kustannukset lämpötilanseurantapalvelun tarjoajan kannalta	37
	6.5.2 Kustannukset asiakkaan kannalta	38
6.6	Asiakkailta saatu palaute	39
6.7	Tutkimuksen aikana tehdyt kehitykset	40
6.8	Kehityskohteet	41
7	Johtopäätökset	43
	Lähteet	45
	Kuvalähteet	46

## Käsitteet

Etäluettava loggeri: Loggeri, jonka mittaamia lämpötila-arvoja pystytään lukemaan käymättä fyysisesti mittauslaitteen luona.

Loggeri: Yleisnimitys lämpötilamittarille, jota käytetään betonirakenteen lämpötilan seuraamiseen betonin kovettumisvaiheessa.

Loggeripalvelu: Loggeripalvelulla tarkoitetaan betonitoimittajan tarjoamaa palvelua, joka ulottuu betonin lämpötilan seuraamisesta valmiiden lujuuslaskelmien toimittamiseen.

Lujuuslaskelma: Laskelmat, joissa arvioidaan betonirakenteen lujuudenkehitystä mitattujen lämpötilojen perusteella.

Seebeck-ilmiö: Ilmiö, jossa kahden eri metallisen johtimen välinen jännite muuttuu ympäröivän lämpötilan mukaan.

Tallentava loggeri: Loggeri, joka kerää mitatut lämpötilatiedot laitteessa olevaan muistiin. Mitattujen arvojen tarkkailemiseksi täytyy loggeri yhdistää tietokoneeseen.

Termopari: Termopari on lämmönmittausmenetelmä, joka perustuu Seebeck-ilmiöön.

Termoparilanka: Kutsumanimi johtimelle, jota käytetään lämpötilamittauksessa.

Väliluku: Tallentavan loggerin tulosten lukeminen kesken mittausjakson ja niiden perusteella tehtävät lujuuslaskelmien välitulokset.

## 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Swerock Oy. Swerock toimii rakennus- ja maanrakennusalalla materiaalien ja palveluiden toimittajana. Omalla alallaan Swerock on yksi pohjoismaiden suurimmista toimijoista. Suomessa Swerock myy, kuljettaa ja pumppaa valmisbetonia Etelä-Suomen, Länsi-Suomen ja Pohjanmaan alueilla. [1.]

Betonirakennetta valmistettaessa syntyy monesti tarve betonin lujuuden kehityksen arviointiin. Betonin lujuudenkehityksen arviointiin on olemassa monia erilaisia menetelmiä. Yksi tapa arvioida lujuudenkehitystä on käyttää menetelmä, jossa seurataan betonin lämpötilaa valuhetkestä lähtien. Tämän perusteella pystytään antamaan arvio betonirakenteen lujuudesta halutulla ajanhetkellä, kun tunnetaan betonimassan ominaisuudet. Lujuudenkehityksen arviointiin lämpötilan perusteella on olemassa muutamia erilaisia menetelmiä. Tässä työssä vertaillaan näitä menetelmiä ja käydään läpi yleisimmät syyt lujuudenkehityksen arviointiin. Muut lujuudenkehityksen arviointitavat, kuin lämpötilaan perustuvat menetelmät, rajataan tästä opinnäytetyöstä pois.

Opinnäytetyön toimeksiantajalla on tähän mennessä ollut betonin lujuudenkehityksen arviointiin tarjolla palvelu, jossa betonirakenteen lämpötilaa seurataan tallentavalla lämpötilamittarilla eli ns. loggerilla ja tämän perusteella asiakkaalle tuotetaan lujuuslaskelmat valetusta rakenteesta. Nyt on kuitenkin herännyt tarve etäluettaville lämpötilamittareille, eli mittarille jonka tulosten lukemiseen ei tarvitse käydä fyysisesti työmaalla. Swerock on hankkinut testikäyttöön yhden tällaisen mittarin.

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tutkia etäluettavan lämpömittarin toimintaa ja kannattavuutta. Tärkeitä tutkimuksen aiheita ovat mittarin toimivuuden selvittäminen ja sen kannattavuuden pohtiminen. Kannattavuutta voidaan käsitellä vertailemalla mittarin taloudellisia kustannuksia verrattuna nykyiseen järjestelmään, mutta toisaalta on hyvä pohtia uuden palvelun hyödyllisyyttä asiakkaan näkökulmasta. Lisäksi tarkoituksen on selvittää etäluettavan mittarin kehitysmahdollisuuksia. Lisäksi selvitetään, onko nykyään käytössä oleva lujuudenkehityksen arviointimenetelmä tarkoituksenmukainen ja ajantasainen.

Insinööriyön ohessa tuotetaan Swerockin käyttöön käyttöohje etäluettavalle loggerille, sekä nyt jo käytössä olevalle tallentavalle logegrille. Käyttöohje tuotetaan työkaluksi loggeria työmaalle asentavalle laborantille. Ohjeen on tarkoitus pitää sisällään ohjeistuksen loggereiden asennukseen sekä tietojen lukemiseen ja loggerin saattamiseen asennuskuntoon.

Eri lujuudenkehityksen arviointimenetelmiä vertaillen ja syitä tuoreiden betonirakenteiden mittaamiselle selvittäessä, tutkimusmenetelmänä käytettiin kirjallisuustutkimusta. Kirjallisuuslähteiksi valittiin betonialan oppikirjoja ja normeja sekä tutkimuksia ja artikkeleita. Etäluettavan loggerin käytettävyyttä ja sen kehittämistä tutkittaessa pääaisallinen tutkimusmenetelmä oli taas järjestää kenttäkokeita ja haastatella asiakkaiden sekä opinnäytetyön toimeksiantajan tarpeita.

Opinnäytetyössä esiintyvät valokuvat, joissa ei ole lähdeviitettä, ovat opinnäytetyön tekijän itse ottamia valokuvia.



## 2 Betoni

Betonin tärkeimmät raaka-aineet ovat kiviaines, sementti ja vesi. Lisäksi nykyaikaisessa valmisbetonituotannossa käytetään erinäisiä lisä- ja seosaineita, joilla on tarkoitus parantaa betonin ominaisuuksia. Tuoreessa betonissa vesi ja sementti reagoivat keskenään, milloin sementtihiukkaset alkavat muodostaa sauvamaisia ja levyjäisiä kiteitä. Kiteistä alkaa muodostua massaa eli nk. sementtigeliiä. Tätä veden ja sementin välistä reaktiota kutsutaan hydrataatioreaktioksi. [2, s. 24,35.]

Kun sementin ja veden välinen reaktio on alkanut, puhutaan massan sitoutumisesta. Massan koostumus alkaa aluksi muuttua hyytelömäiseksi. Sementtistandardi SFS-EN-197-1 määrittelee eri sementtilaaduille alkusitoutumisajan, jolloin sementtiliima on saavuttanut määritellyn jäykkyyden. Sitoutumisaika on vahvasti verrannollinen massan lämpötilaan. [2, s. 35–36.]

### 2.1 Lujuus

Kovettuneen betonin tärkein ominaisuus on sen suuri puristuslujuus. Puristuslujuuden perusteella betoni jaotellaan lujuusluokkiin. Betonin lujuutta testataan puristuskokein ja arvosteluikä on yleensä 28 vrk. Puristuslujuuskokeessa puristetaan joko 150 mm sivumitaltaan olevia kuutioita tai 150 mm halkaisijaltaan ja 300 mm pituudeltaan olevia lieriöitä. Koekappaleen muoto vaikuttaa puristuslujuuteen: mitä suurempi korkeuden ja leveyden suhde on, sitä alempi arvo puristuskokeessa saadaan. Täten lieriökoekappaleella saadaan puristuskokeessa 0,78...0,85 -kertainen lujuus kuutiokoekappaleeseen nähden riippuen lujuusluokasta. Lujuusluokka esitetään eurokoodin mukaan merkinnällä  $C f_{ck,cyl}/f_{ck,cube}$ , eli toisin sanoen kirjain C ja lieriökoekappaleen puristuslujuus/kuutiokoekappaleen puristuslujuus. Oheisessa taulukossa on esitetty tarkemmin puristuslujuuksien riippuvuus eri koekappaleilla. [2, s. 85-86.]

Taulukko 1 Puristuslujuuksien suhde lujuusluokittain [a, s. 36.]

Lujuusluokka mukaan	Alin 150x300 lieriöllä määrätty ominaislujuus (C) $f_{ck,cyl}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Alin 150 mm:n kuutiolla määrätty ominaislujuus (K) $f_{ck,cube}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Alin 100 mm:n kuutiolla määrätty ominaislujuus $f_{ck,cube}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
C12/15	12	15	15,5
C16/20	16	20	20,6
C20/25	20	25	25,8
C25/30	25	30	30,9
C30/37	30	37	38,1
C35/45	35	45	46,4
C40/50	40	50	51,5
C45/55	45	55	56,6
C50/60	50	60	61,8
C55/67	55	67	69,0
C60/75	60	75	77,2
C70/85	70	85	87,6
C80/95	80	95	97,8
C90/105	90	105	108,2

Talonrakennustekniikassa käytetään yleensä lujuusluokkia C20/25...C50/60. Joissain erikoistapauksissa sekä elementtiteollisuudessa voidaan käyttää korkealujuusbetoneita, eli massoja, joiden lujuusluokka on suurempi kuin C50/60. [2, s. 86.]

## 2.2 Tuoreen betonin lämpötila

Betonimassan lämpötila muodostuu eri osa-aineiden lämpötiloista. Lämpötila pystytään määrittämään käytännössä, kun tunnetaan eri ainesosien määrät, lämpötilat ja ainesosien ominaislämpökapasiteetit. Lämpötila lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$T_b = \frac{c_k \times T_k \times m_k + c_s \times T_s \times m_s + c_v \times T_v \times m_v}{c_k \times m_k + c_s \times m_s + c_v \times m_v}$$

Missä  $T_k, T_s, T_v$  = runkoaineen, sementin ja veden lämpötila

$m_k, m_s, m_v$  = runkoaineen, sementin ja veden massat

$c_k, c_s, c_v$  = runkoaineen, sementin ja veden ominaislämpökapasiteetit

Laskelmien toimivuus edellyttää sen, että missään osa-aineissa ei ole jäätä tai lunta. Tulee myös huomioida se, että osa lämmöstä karkaa, ellei tuotantolaitos ole hyvin eristetty tai lämmitetty. Laskelmat ovat aina teoreettisia ja betonimassan lämpötilaa tulee seurata aina jatkuvilla lämpötilamittauksilla. [3, s. 362-363.]

### 3 Betonin lujuudenkehitys

#### 3.1 Lujuudenkehitys

Kun aikaisemmin mainittu betonin sitoutumisvaihe päättyy, alkaa varsinainen kovettuminen eli lujuuden kehittyminen. Lujuudenkehitysvaihe alkaa siis sitoutumisen jälkeen ja kestää käytännössä niin pitkä kuin betonimassassa on jäljellä hydratoitumiseen osallistumiskykyistä vettä. Lujuusreaktiot ovat voimakkaasti riippuvaisia vesi-sementti-suhteesta ja suurimmat lujuudet saavutetaan käytännössä pienillä vesi-sementti-suhteilla. [2, s. 37.]

Täydellinen hydrataatioreaktio vaatii n. 25% vettä sementin määrästä. Tämän lisäksi sementin geelihuokosiin sitoutuu sementin painosta n. 20% vettä. Tällöin siis kaiken sementin reagoimiseen veden kanssa tarvitaan vähintään n. 40-45% vettä sementin painosta. Jos vettä on tätä enemmän, jää se ns. vapaana vetenä betonin eri huokosiin. [2, s. 37.]

Käytännössä sementtipartikkeleiden sisään jää ylisesti hydratoitumatonta sementtiä, eteenkin vesi-sementtisuhteen ollessa pienempi kuin 0,4. Tämä sementti reagoi vapaan veden kanssa esimerkiksi betonin halkeillessa ja näin rakenne ikään kuin korjaa itse itsensä. [3, s. 75.]

#### 3.2 Lämpötilan kehitys

Hydrataatioreaktiossa vapautuu lämpöä samassa suhteessa kuin lujuus kehittyy. Reaktion nopeus on voimakkaasti riippuvainen käytetyn sementin nopeuteen. Mitä nopeammin kovettava sementti on käytössä, sitä enemmän lämpöä vapautuu. Suomessa käytössä olevien sementtien hydrataatiolämmöntuotot liikkuvat yleensä välillä 200...400 kJ/kg sementtiä seitsemässä vuorokaudessa. Mitä hienommaksi sementti on jauhettu, sitä isompi reaktiopinta-ala sillä on ja tämä taas on suoraan verrannollinen sementin reaktionopeuteen ja samalla lämmönkehitykseen. [2, s. 38-39.]

Betonin lämmönkehitystä pystytään laskelmaan valitsemalla mahdollisimman hitaasti reagoiva sementti tai korvaamalla osa sementistä seosaineilla kuten masuunikuonalla tai lentotuhkalla. Betonirakennetta voidaan myös jäähdyttää lujuudenkehityksen aikana esimerkiksi putkistoilla joissa kiertää kylmä vesi. Myös valmiiksi mahdollisimman viileän massan valmistaminen tuotantoasemalla vähentää liian suurten lämpötilojen syntymistä.

Liian suuria lämpötilaeroja pystytään taas hallitsemaan mm. rakenteen osittaisella lämmittämällä ja pintojen peittelyllä. [2, s. 39.]

Suuresta lämpötilan kehittymisestä voi olla myös hyötyä eteenkin kylmällä säällä betonoidessa ja mahdollisimman nopeaa lujuudenkehitystä tarvittaessa. [2, s. 39.]

### 3.3 Arviointimenetelmät

Betonin lujuudenkehityksen seurantaan ja arviointiin on olemassa useita eri menetelmiä. Tässä työssä käsitellään lähinnä ns. rikkoumatonta ainekoetusta (*non-destructive testing*, NDT), eli menetelmää, joka ei tarkastelun aikana riko testattavaa osaa. [4, s. 5.]

Betonin lujuudenkehitystä voidaan seurata esimerkiksi lämpötilamittaustietojen, kimmoasaratestien ja olosuhdekoekappaleiden avulla. Olosuhdekoekappale tarkoittaa valun aikana massasta tehtyä koekappaletta, joka säilytetään samoissa olosuhteissa kuin betonoitu rakenne. Olosuhdekoekappaleen puristustuloksesta voidaan päätellä betonoidun rakenteen lujuus. [15, s.64-65.] Joissain tapauksissa lujuus voidaan määrittää rakenteesta poratuista koekappaleista, mutta tämä ei kuulu rikkoutumattoman ainekoetuksen piiriin [2, s. 383.].

Kimmoasaratestauksella voidaan seurata betonin lujuudenkehitystä tai jossain määrin korvata betonikoekappaleiden ottamista. Tässä menetelmässä käytetään betonin lujuuden mittaamiseen suunniteltua kimmoasaraa, jonka toiminta perustuu betonin kimmoisuuden tutkimiseen. Laite lyö metallisella kärjellä betonin pintaa aina samalla voimalla ja mittaa kärjen takaisin kimpoamisen. Mitä lujempi materiaali on, sitä enemmän kärki kimpoaa takaisin. Tämän perusteella voidaan päätellä betonin lujuus. Menetelmä aiheuttaa pientä vauriota betonin pintaan, joten sitä ei voi varsinaisesti kutsua rikkoutumattomaksi ainekoetuksiksi. [4, s. 10-11.] Liikennevirastolla on olemassa ohje, miten kimmoasaraa voidaan käyttää siltabetonien kelpoisuuden osoittamisessa. Tässä ohjeessa on käyty läpi testauksen rajoitukset ja laskukaavat, joilla voidaan todentaa betonin saavuttaneen vaadittavat lujuudet. [5.]

Seuraavissa luvuissa käsitellään lujuudenkehityksen arviointimenetelmiä, jotka perustuvat betonin lujuudenkehityksen aikana mitattuihin lämpötiloihin. Menetelmien perusperiaatteet on esitetty laskukaavojen avulla. Eri menetelmien esittelyn jälkeen niiden tulosten tarkkuutta vertaillaan luvussa 3.3.2 Menetelmien vertailu

### 3.3.1 Kypsyysikään perustuvat lujuudenarviointimenetelmät

Kaikille tässä työssä esitetyille lujuudenkehityksenarviointimenetelmille lämpötilan perusteella on yhteistä se, että niissä lujuuden kehityksen arviointiin sovelletaan kypsyysikä käsitettä. Kypsyysikä pystytään esittämään seuraavalla kaavalla:

$$S = S_u e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\alpha}$$

Missä S on betonin puristuslujuus ajassa t (MPa)  
 $S_u$  on betonin ominaislujuus (MPa)  
 $\tau$  on lujuuden arvosteluikä (vrk)  
 t on kypsyysikä (vrk)  
 $\alpha$  on muotoparametri

Käytännössä kypsyysikä kertoo sen, kuinka suuri osa betonin ominaislujuudesta on saavutettu tiettyyn aikaan mennessä. [6, s.2.]

#### 3.3.1.1 Nurse-Saul ja Nykäsen menetelmä

Saul esitteli vuonna 1951 menetelmän kypsyysikä arviointiin, jonka perusajatuksena on se, että betonin kypsyysikä kehittyy lineaarisesti. Saulin menetelmässä lujuuden oletetaan kehittyvän seuraavan kaavan mukaisesti:

$$t_e = \frac{\sum(T - T_0)}{(T_r - T_0)} \times \Delta t$$

Missä  $t_e$  on kypsyysikä (vrk)  
 T on keskilämpö mittausvälillä t (°C)  
 $T_0$  on lämpötilavakio (°C)  
 $T_r$  on vertailulämpötila (°C)  
 $\Delta t$  on aikaväli (h)

$T_0$  vakio vaihtelee kirjallisuuslähteiden mukaan. Vakion arvoksi on esitetty esim.  $-11^\circ\text{C}$ , joka on saatu muutaman eri kirjallisuuslähteen keskiarvosta. [6, s.2.] Vertailulämpötila on yleensä  $20^\circ\text{C}$ , mutta voidaan käyttää muitakin arvoja, jos on olemassa tutkimustulosta kypsyysien kehittymistä eri lämpötiloissa. [6, s.2-3.]

Suomalaisessa betonitekniikassa on ollut käytössä Nurse-Saul-menetelmään verrattava ns. Nykäsen kypsyysastelaskelma, jossa arvioidaan lujuudenkehitystä betonin lämpöastevuorokausisumma kaavasta seuraavasti:

$$N = k(T + 10^\circ\text{C}) \times t$$

Missä  $T$  on betonin lämpötila aikana  $t$  ( $^\circ\text{C}$ )  
 $t$  on kovettumisaika (d)  
 $k$  on muuttuja seuraavasti:  $k = 1$  kun  $+50^\circ\text{C} \geq T \geq 0^\circ\text{C}$   
 $k = 0,4$  kun  $0^\circ\text{C} > T \geq -10^\circ\text{C}$   
 $k = 0$  kun  $T < -10^\circ\text{C}$

Nykäsen menetelmä on suhteellisen karkea menetelmä lujuuden arvioinnissa ja se antaa epätarkkoja lujuuksia erityisesti korkeissa lämpötiloissa. Menetelmä on muutenkin vanhentunut, koska kypsyyskäyrät, joita se käyttää antavat liian pieniä alkulujuuksia nykyisin käytössä oleville nopeasti reagoiville sementteille. [3, s. 351.]

### 3.3.1.2 Rasturp

Fysikaalisessa kemiassa on yleisesti käytössä karkea oletus, että kemiallisen reaktion reaktionopeus kasvaa kaksinkertaiseksi, kun lämpötila nousee  $10^\circ\text{C}$ . Tähän oletukseen pohjautuu Rasturp-menetelmä kypsyysien arvioinnissa. [6, s. 3.] Tällä menetelmällä arvioidaan betonin kypsyysien kehittymistä seuraavalla kaavalla:

$$t_e = \sum 2^{(T-T_r)/10} \times \Delta t$$

Missä  $t_e$  on kypsyysikä (vrk)  
 $T$  on keskilämpö mittausvälillä  $t$  ( $^\circ\text{C}$ )  
 $T_r$  on vertailulämpötila ( $^\circ\text{C}$ )  
 $\Delta t$  on aikaväli (h)

### 3.3.1.3 Sadgroven menetelmä

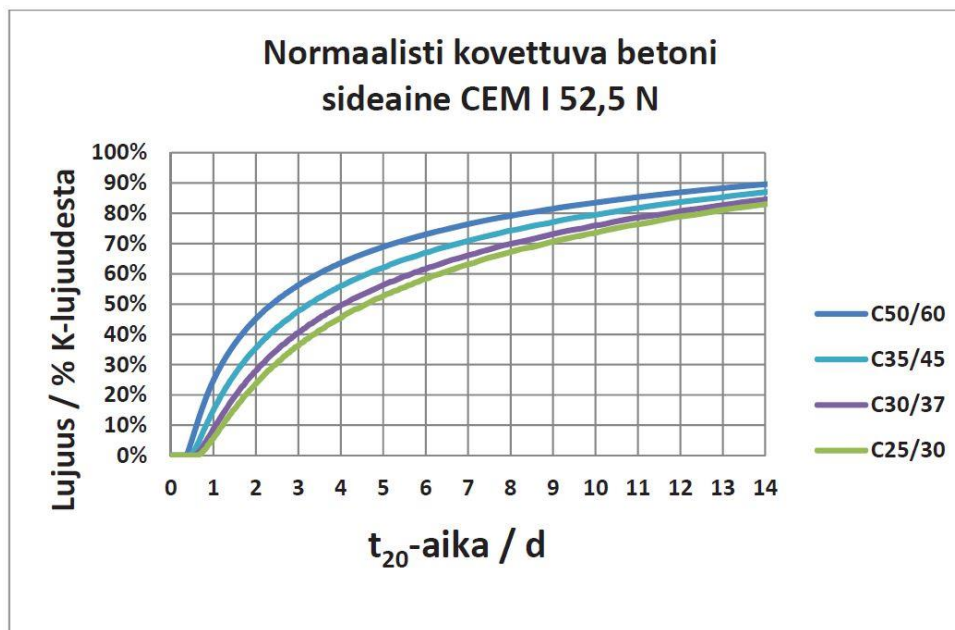
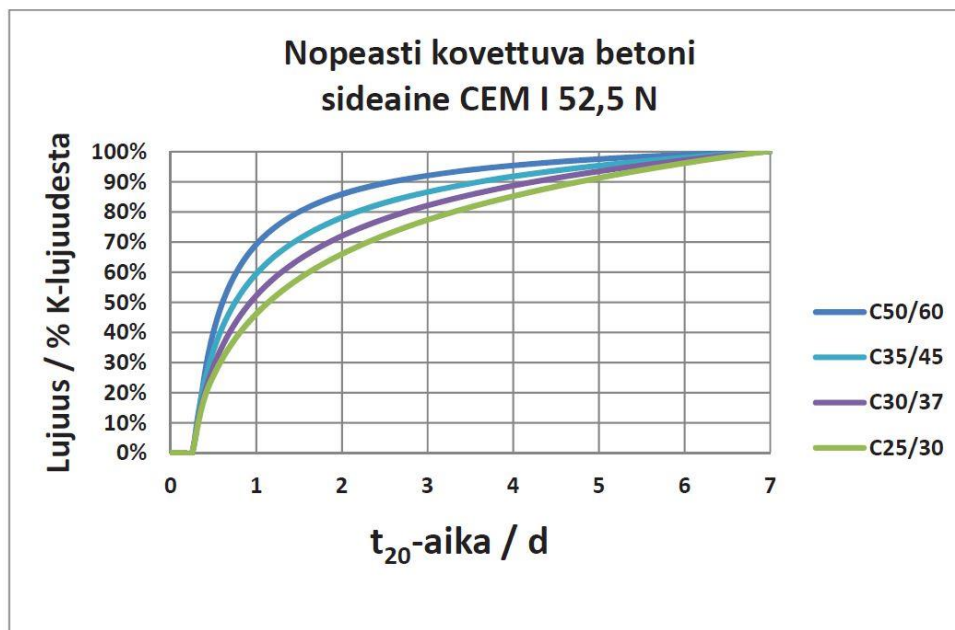
Sadgroven menetelmässä betonin kypsyysikää lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$t_{20} = \left( \frac{T + 16^{\circ}\text{C}}{36^{\circ}\text{C}} \right)^2 * t$$

Missä T on betonin lämpötila aikana t (°C)  
t on kovettumisaika (d)

Jos betonin lämpötila on pysynyt lähes samana koko kovettumisen ajan, voidaan kypsyysikä laskea suoraan kaavasta. Yleisessä tapauksessa kuitenkin betonin lämpötila vaihtelee lujuudenkehityksen aikana, jolloin kypsyysikä lasketaan ajanjaksoissa, jolloin lämpötila on pysynyt lähes vakiona. [3, s. 352.]

Alla olevista käyrästä voidaan huomata betonin kypsyysikänsä ja sen suhteellisten lujuuksien riippuvuus. Käyrästä on laadittu eri sementtilaaduille ja niissä on esitetty lujuudenkehitys lujuusluokittain. [8, s. 74-75.] Mikäli käytössä on erikoissuhteituksia, jossa on käytetty esim. erittäin pieniä sementtimääriä, suuria määriä seosaineita tai radikaalisti betonin lujuudenkehitykseen vaikuttavia lisäaineita, tulee näiden vaikutus betonin lujuudenkehitykseen tutkia erikseen. [3, s. 353.]



Kuva 1 Kuvaajissa on esitetty betonin kypsyysien ja suhteellisen lujuuden riippuvuudet lujuusluokittain. Ylempi kaavio koskee nopeasti kovettuvaa betonia sideaineella CEM I 52,5 ja alempi normaalisti kovettuvaa betonia samalla sideaineella [a s.74.]

Sadgroven kaavaa tarkastelemalla voidaan huomata, että betonin lujuus kehittyy myös alle 0°C lämpötiloissa, vaikkakin hyvin hitaasti. Jotta kaavaa voidaan käyttää betonin lujuuden laskemiseen näissä lämpötiloissa, täytyy huomioida, että betoni on saavuttanut jäätymislujuutensa 5 MN/m<sup>2</sup> ennen sen jäätymistä. Betonitekniikan oppikirja 2004 by 201 esittää, että yli 50°C saavuttava betoni käsitetään lämpökäsitellyksi ja sen lujuudenkehitys tulee selvittää muita keinoja käyttäen. [3, s. 353.]



### 3.3.1.4 Freiesleben Hansen ja Pedersen (Arrheniuksen) yhtälö

Freieslebenin Hansenin ja Pedersenin oletus betonin kypsyysien kehittymiseen perustui kemiassa yleisesti tunnettuun Arrheniuksen yhtälöön [6, s. 3-4.]. Menetelmästä saatava lujuusarvio perustuu betonimassassa käytettyyn suhteitukseen ja raaka-aineiden ominaisuuksiin toisin kuin aikaisemmin mainitut menetelmät [6, s. 17.]. Arrheniuksen yhtälön perusajatus on, että kemiallisen reaktion nopeus on riippuvainen vallitsevasta lämpötilasta ja aine kohtaisesta aktivaatio energiasta, eli pienimmästä mahdollisesta energiasta jonka voimasta reaktio käynnistyy. [7, luku 3.6.]

Arrheniuksen yhtälöön perustuvaa betonin kypsyysikää voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$t_e = \sum e^{-\frac{E_a}{R}(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s})} \times \Delta t$$

Missä  $t_e$  on kypsyysikä (vrk)

$T_a$  on keskilämpö mittausvälillä  $t$  (°K)

$T_s$  on vertailulämpötila (°K)

$E_a$  on aktivaatio energia (J/mol)

$R$  on kaasuvakio (J/°K·mol)

$\Delta t$  on aikaväli (h)

### 3.3.1.5 Hollantilainen "painotettu kypsyys" -menetelmä

Vuonna 1979 hollantilaiset De Vree ja Tegelar esittelivät kypsyysikään perustuvan lujuudenkehityksenarviointimenetelmän, jota he kutsuivat painotetuksi kypsyys menetelmässä. [6, s. 4.]

Kuten edellä mainittu Arrheniuksen yhtälöön perustuva lujuudenkehityksenarviointimenetelmä, hollantilaisessa painotettu kypsyys menetelmässä arvio lujuudenkehityksestä on suhteituksesta ja käytetyistä materiaaleista riippuvainen. [6, s. 17.]

Painotetussa kypsyys menetelmässä arvioidaan betonin lujuuden kehitystä seuraavan kaavan perusteella:

$$M_w = \sum t * T * C^n$$

Missä  $M_w$  on painotettu kypsyys ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$  tai  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{vrk}$ )  
 $t$  on betonin ikä (h tai vrk)  
 $T$  on betonin keskilämpö aikavälillä  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $C$  on sideaine tai muu raaka-aine kohtainen vakio  
 $n$  on lämpötilariippuvainen vakio, joka voidaan laskea kaavasta:

$$n = 0,1 * T - 1,245$$

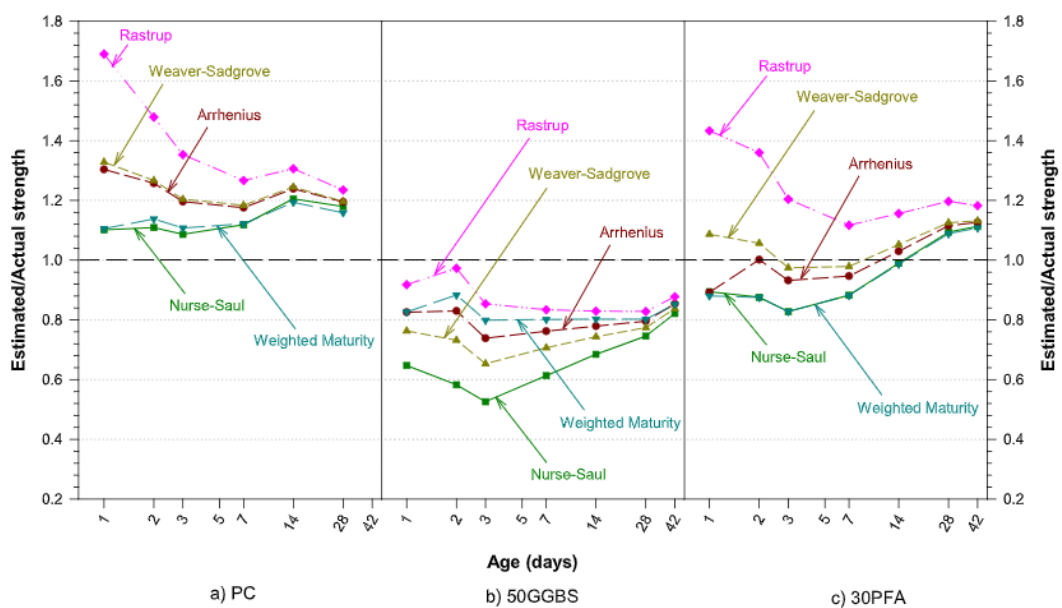
Vakio  $C$  on yleensä käytettyyn sementtiin sidonnainen vakio, jolle on määritetty arvo sementin ominaisuuksien mukaan, mutta sitä pystytään laajentamaan käsittämään myös esimerkiksi massan valmistuksessa käytetyt seosaineet. Vakion  $C$  pystyy myös määrittämään valamalla kymmenen koekappaletta vesi-sementtisuhteella 0,5 ja määrittämällä niiden lujuudenkehitys sekä  $20^{\circ}\text{C}$ , että  $60^{\circ}\text{C}$  lämpötiloissa. Näiden tietojen perusteella iteroidaan yrityksen ja erehdyksen kautta vakio vastaamaan testausta. [6, s. 4.]

### 3.3.2 Menetelmien vertailu

Perinteisesti suomalaisessa betoniteknikassa käytettyjen lineaarisen Nykäsen menetelmän ja eksponentiaalisen Sadgroven menetelmän välillä erot syntyvät erityisesti korkeissa lämpötiloissa. Myös selvä ero lujuuden kehityksen arvioinnissa syntyy lämpöasteilla  $0 \dots 15^{\circ}\text{C}$ . Näistä lujuudenkehityksen arviointimenetelmistä on käytännön mittauksissa todettu Sadgroven menetelmän olevan huomattavasti lähempänä todellisuutta. [3, s. 352.]

Queensin yliopistossa Belfastissa vertailtiin eri arviointimenetelmien tarkkuuksia koejärjestelyillä, joissa käytettiin kolmella eri suhteituksella valmistettua betonimassaa. Yksi massoista oli valmistettu sideaineena pelkkää portlandsementtiä (PC) käyttäen, toisessa massassa käytettiin saman sementin lisäksi 50% masuunikuonaa (50GGBS) ja kolmannessa massassa sementin määrästä 30% oli korvattu lentotuhkalla (30FA). Kustakin massasta valmistettiin koekappaleita, joita pidettiin eri lämpötiloissa ja puristettiin eri ikäisinä. [6, s. 5.]

Tutkimuksessa merkille pantavaa on se, että arviointimenetelmästä huolimatta betonin lujuudenkehityksen alkuvaiheita on vaikea arvioida. Ensimmäisen vuorokauden aikana arvioidut lujuudet erosivat puristustuloksista suhteellisen paljon. Tämä ilmiö korostui vielä enemmän korkeissa lämpötiloissa. Lujuudenkehityksen ajanjakson pidentyessä tuloksien tarkkuus paranee. Kaikkein tarkimpiin tuloksiin vertailluista menetelmistä päästiin pääsääntöisesti hollantilaisella painotetulla kypsyys menetelmällä ja hieman tätä epätarkempia tapoja arvioida lujuudenkehitystä oli sekä Arrheniuksen yhtälöön perustuva arviointitapa, että Sadgroven menetelmä. Rasturpin ja Nurse-Saulin menetelmiä käytettäessä arviot erosivat eniten muista arviointimenetelmistä. [6, s. 13-16.]



Kuva 2 Menetelmien tarkkuudet [b, s. 14.]

## 4 Syitä betonin lämpötilan seurantaan ja lujuudenkehityksen arviointiin

Tässä luvussa käydään läpi yleisimmät syyt betonin lujuudenkehityksen arviointiin, sekä esitetään näissä tapauksissa määritetyt lujuuden ja lämpötilojen raja-arvot.

### 4.1 Jälkihoito

Jälkihoidolla tarkoitetaan valun jälkeisiä toimenpiteitä betonin haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Nämä ovat esimerkiksi talviolosuhteissa betonin lämmöneristäminen, suojaaminen ja lämmittäminen, massiivivaluissa liian suurien lämpötilaerojen syntymisen rajoittaminen ja betonilattiavaluissa betonipinnan liian nopean kuivumisen estäminen. Betonipinnan jälkihoidon menetelmiä ovat esimerkiksi kasteleminen, jälkihoitoaineilla käsittely sekä peittely lämmöneristeillä tai muovipeitteillä. [8, s.72.]

Jälkihoidon lopettamisajankohta on sidoksissa rasitusluokkiin ja lujuuden kehityksestä suhteessa nimellisljuuteen. Rasitusluokissa X0 ja XC1 jälkihoito voidaan lopettaa, kun betoni on saavuttanut 50% nimellisljuudestaan ja muissa paitsi XF2 ja XF4 rasitusluokissa jälkihoito voidaan lopettaa, kun rakenne on saavuttanut 70% nimellisljuudestaan. Rasitusluokissa XF2 ja XF4, sekä rakenteissa jotka edellyttävät erityistä kulutuksen kestävyyttä, vastaavan lujuuden suhde on 80%. [8, s.72.]

### 4.2 Muottien purkulujuus

Tehokkaan muottikierron saavuttamiseksi, sekä rakenteisiin syntyvien vaurioiden välttämiseksi on tärkeää saada selvitettyä oikea-aikaisesti betonin lujuudenkehitys ennen muottien purkua. Lujuutta, joka betonin on saavutettava ennen muottien purkua, kutsutaan muotinpurkulujuudeksi. Mikäli piirustuksissa ei ole toisin esitetty, on betonin lujuuden oltava vähintään 60 % sen nimellisljuudesta kun muottien purku aloitetaan. Muottien ei-kantavat osat voidaan purkaa kun betoni on saavuttanut 5 MN/m<sup>2</sup> puristuslujuuden. [9, s. 11.]

Tarvittaessa muotinpurkulujuus voidaan todeta myös laskelmilla. Mikäli rakenne toimii muottien purkuvaiheessa samoin kun se tulee valmiina toimimaan, voidaan käyttää samoja laskelmia kuin valmiin rakenteen kanssa. Jos muotteja purettaessa rakenteeseen kohdistuu huomattavasti pienempi rasitus kuin suunniteltuun rakenteeseen valmiissa rakennuksessa, voidaan päätyä paljonkin pienempään muotinpurkulujuuteen kuin aiemmin esitetty 60 %. Laskelmissa tulee ottaa aina huomioon rakenteisiin kohdistuva hyötykuorma rakentamisen aikana. [2, s.91.]

#### 4.3 Kylmällä säällä betonointi

Kylmällä säällä suoritetuissa betonoinneissa betonimassa tulee lämmittää niin, että sen lämpötila on vähintään 5°C betonointivaiheessa. Betonin lämpötilaa voidaan nostaa käyttämällä kuumaa vettä tai lämmittämällä kiviainesta. Jäätynyttä kiviainesta ei saa käyttää betonin valmistuksessa. [8, s.77.]

Talvella betonoitaessa tulee kiinnittää huomiota erityisesti jäätymislujuuteen. Jäätymislujuudella tarkoitetaan lujuutta, jonka betonin on saavutettava ennen, kun se saa jäätymään ensimmäisen kerran. Betonin jäätymislujuuden minimiarvo on 5 MN/m<sup>2</sup> riippumatta betonin lujuusluokasta. Kun kyseinen lujuus on saavutettu, ei jäätymisen aiheuta rakenteelle enää sellaisia vaurioita, mitä kehittyvä hydratoituminen ei voi korjata. Muotteja ei kuitenkaan saa purkaa ennen kuin rakenne on saavuttanut muotinpurkulujuuden. [2, s.91.]

Betonimassan jäätymisen estämiseksi tulee tarvittaessa tuoretta betonia vasten tulevat pinnat, kuten muotit, kalliot, aikaisemmin valetut betonipinnat jne. lämmittää ennen valun aloitusta. [8, s. 77.]

Kun muotteja puretaan ja lämmitykset lopetetaan, alkaa betonirakenne jäähtyä. Liian nopea jäähtyminen voi aiheuttaa halkeilua betonirakenteen pinnassa. Betoninormeissa ohjeistetaan, että 30 cm paksussa rakenteessa saa lämpötila laskea maksimissaan 30°C ensimmäisen vuorokauden aikana. 50 cm paksussa rakenteessa vastaava jäähtymisvauhti saa olla enintään 20°C/vrk ja kaksi metriä paksussa 10°C/vrk. [8, s. 77.]

#### 4.4 Suuret lämpötilaerot

Betonin lujuudenkehityksen aikana betonoitavan rakenteen lämpötilaerot eivät saa nousta yli 20°C metrin matkalla, jotta lämpölaajeneminen ei aiheuta rakenteeseen liikaa halkeilua. Lämpötilaerot tulee ottaa huomioon eteenkin massiivisia rakenteita betonoitaessa, missä hydrataatiolämmöt voivat olla suuria. Lämpötilaerojen hallitsemiseksi on betonimassa valittava valuun sopivaksi ja valupintojen peittäminen suunniteltava huolellisesti. [8, s. 76.]

Lämpötilaerot voivat aiheuttaa halkeilua rakenteeseen myös tilanteessa, jossa betonoitava rakenne on jäykästi kiinnitetty aikaisemmin valettuun rakenteeseen. Mikäli lämpötilat kasvavat suuriksi betonin kovettumisen aikana, kasvaa rakenne lämpölaajenemisen johdosta. Kun betonin kovettuu ja lämpötilan laskee, rakenne taas kutistuu. Tämä voi aiheuttaa jännitteitä ja halkeamia rakenteisiin. Tähän ilmiöön pystytään vaikuttamaan rakennesuunnittelulla ja tarkasteluilla. [8, s. 77.]

#### 4.5 Jälkijännitettävät rakenteet

Jälkijännitettävissä rakenteissa tulee selvittää betonin lujuuden riittävä arvo ennen jännitystyön aloittamista. Betonin lujuus voidaan arvioida lujuudenkehityksen aikana mitattujen lämpötilatietojen perusteella laskemalla. Riittävää lujuutta jännitystyön aloittamiseksi kutsutaan jännityslujuudeksi ja tämä on määritetty suunnitelmissa. [2, s. 383, 386.]

#### 4.6 Lämpökäsittely

Betonin lujuudenkehitystä pystytään nopeuttamaan betonin lämpökäsittelyllä. Betoninormien By 65 mukaan betoni katsotaan lämpökäsitellyksi jos

- betonimassan lämpötila betonoitaessa on yli +40°C tai
- lämpötilan nousu kovettumisvaiheen aikana on suurempi kuin 25°C tai
- lämpötila kovettumisvaiheen aikana nousee korkeammaksi kuin +50°C

Ennen lämpökäsittelyn käyttöön ottoa tulee selvittää sen vaikutuksen betonin ominaisuuksiin ennakkokokein. Ennakkokokeissa selvitettäviä asioita ovat betonin lujuudenkehitys ja lujuuskato sekä vaadittaessa myös betonin muut ominaisuudet, kuten pakkaskestävyys. Lujuuskato esitellään tarkemmin seuraavassa luvussa. Ennakkokokeiden tilalta voidaan käyttää myös muita laajempia selvityksiä. [8, s. 75–76.]

#### 4.7 Lujuuskato

Liian suuret lämpötilat betonin kovettumisvaiheessa voivat johtaa betonin lopullisen lujuuden vähenemiseen, eli lujuuskatoon. Betoninormien By 65 mukaan korkeat lämpötilat  $+70^{\circ}\text{C}$  asti vaikuttavat lähinnä loppulujuuden alenemana. Tästä korkeammat lämpötilat lisäävät riskiä ns. myöhäisen ettringiitin muodostumiselle. Tämä tarkoittaa sitä, että hydrataatioreaktion alkuvaiheessa trikalssiumaluminaatin ja kipsin välisessä reaktiossa ettringiitin sijasta muodostuu metastabiilia monosulfaattia, joka voi myöhemmin kiteytyä ettringiitiksi. Tämä ilmiö voi aiheuttaa kovettuneeseen betoniin sisäisiä jännityksiä ja näistä johtuvia mikrohalkeamia. Halkeamien aiheuttamat vauriot voivat ilmetä myöhäisemässä vaiheessa betonin rapautumisena mm. pakkasrasituksen tai kemiallisen rasituksen johdosta. [8, s. 76.]

InfraRYL määrittää lujuuskadolle laskentakaavan siltarakentamisessa massiivisissa rakenteissa siten, että mikäli kovettumisvaiheessa betonin lämpötila nousee  $+80^{\circ}\text{C}$ :n, alenee betonin puristuslujuus 20 %.  $+60^{\circ}\text{C}$ :n maksimilämpötilassa ei oteta lujuuskatoa huomioon ja näiden lämpötilojen välillä lujuuskato interpoloidaan suoraviivaisesti. Tämä tarkoittaa siis käytännössä sitä, että jokainen  $+60^{\circ}\text{C}$  ylittävä lämpötila-aste betonin maksimilämpötilassa aiheuttaa yhden prosentin lujuuskadon lopullisessa puristuslujuudessa. Yli  $+80^{\circ}\text{C}$  lämpötilan vaikutukset tulee selvittää rakenteista irrotettujen näytteiden perusteella. [10, s. 124.]

## 5 Betonin lämpötilanseuranta etäluettavalla lämpötilamittarilla

### 5.1 Vertailu tallentavaan lämpötilamittariin

Lämpötilan mittaus etäluettavalla lämpömittarilla ja tallentavalla mittarilla toimivat samalla periaatteella. Molempien mittaustekniikka perustuu termoparin toimintaan eli ns. Seebeck-ilmiöön. Käytännössä termopari tekniikka toimii siten, että johtimessa on kaksi eri metallia, joiden välinen jännite muuttuu ympäröivän lämpötilan mukaan. Termoparimetelmää käyttäessä mittaustarkkuus sekä mitattavan lämpötilan minimi ja maksimi arvot riippuvat käytetyistä metalliseoksista. [11, s. 4-5.]

Seuraavissa luvuissa esitetään sekä aikaisemmin käytössä olleen, että kokeiluun otetun loggerin tekniset tiedot sekä muut ominaisuudet

#### 5.1.1 Nykyään käytössä oleva tallentava mittari

Toimeksiantajalla on tällä hetkellä käytössä Testo 176T4 dataloggerit betonirakenteiden lämpötilan seurannassa. Kyseessä on tallentava lämpötilamittari, jonka mittauseriaate perustuu termopariin. Käytössä on K termoparilanka, eli NiCr-Ni pari. Tällä termoparilangalla voidaan mitata lämpötiloja  $-195^{\circ}\text{C}$  ja  $+1000^{\circ}\text{C}$  välillä. Valmistaja ilmoittaa mittalaitteen tarkkuudeksi  $\pm 1\%$  lämpötilojen  $-195^{\circ}\text{C}$  ja  $-100,1^{\circ}\text{C}$  välillä,  $\pm 0,3\%$  lämpötilojen  $-100^{\circ}\text{C}$  ja  $+70^{\circ}\text{C}$  välillä sekä  $\pm 0,5\%$  lämpötilojen  $+70,1^{\circ}\text{C}$  ja  $+1000^{\circ}\text{C}$  välillä. [12.] Mittarissa on neljä mahdollista mittauskanavaa, joten sillä saa nauhoitettua lämpötiladataa esim. rakenteen kolmesta eri kohtaa ja lisäksi ulkoilman lämpötilaa. Kaikkia kanavia ei tarvitse käyttää ja käyttämättömät kanavat saa tulpattua laitteen suojaamiseksi.

Tallentavan loggerin mittausvälin voi itse asettaa mittarin asetuksiin. Mittausväli liikkuu yhdestä sekunnista useisiin tunteihin. Opinnäytetyön toimeksiantajan omien kokemusten mukaan sopiva mittausväli on yksi tunti. Tällöin tulosten käsittely on helppoa ja mittarin muistiin mahtuu riittävästi dataa. Tunnin mittausväli on myös todettu riittäväksi, sillä betonirakenteiden lämpötilamuutokset ovat hitaita.





*Kuva 3 Kuva tallentavasta loggerista. Näytössä näkyvissä 1 ja 2 kanavien ajantasaiset mittausarvot*

Loggerissa on näyttö ja painike, jota painamalla pystyy selaamaan näytettäviä tietoja. Näkyviin saa ajantasaisen lämpötilan kanavittain ja mitatut minimi ja maksimi lämpötilat. Lisäksi näytössä on ilmoitus kun laite on asetettu mittaamaan.

#### 5.1.2 Testattava etäluettava mittari

Testikäyttöön otettu järjestelmä on Nokkelvalin betonivalun lämpötilan mittaamiseen tarkoitettu mittasalkku. Järjestelmä koostuu kolmesta osasta: itse mittalaitteesta, tukiasemasta sekä seurantaohjelmasta. Mittalaite mittaa betonin lämpötilaa ja lähettää tästä määrätyllä aikavälillä tietoa tukiasemaan. Tukiasema liitetään verkkovirtaan ja se lähettää mittalaitteen mittaamia arvoja GSM-verkon kautta seurantaohjelmaan. Seurantaohjelmalla käyttäjä pystyy seuraamaan reaaliajassa lämpötilatietoja. [13.]

Mittalaite on mallia FTR264-TCK neljäkanavainen langaton termoparimittari. Mittari käyttää samaa K termoparia kuin edellä esitelty tallentava mittari. Käytettävälle termopari-langalle valmistaja lupaa maksimikäyttölämmön 105°C. Korkeampiin mittaustiloihin on tarjolla erikoistermoparilankaa, jonka luvataan kestävän lämpötiloja 250°C asti.

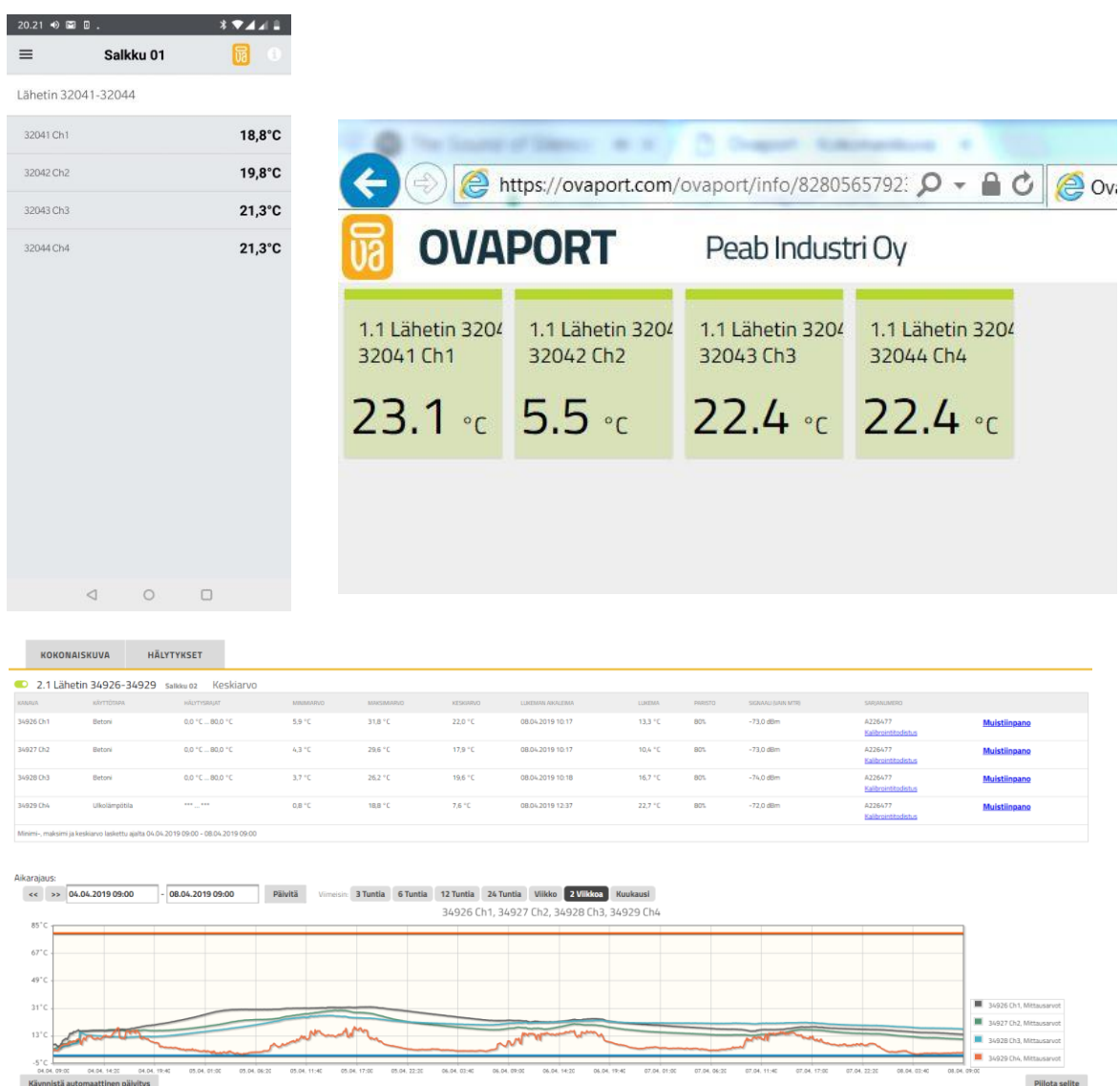
Valmistaja suosittelee käyttämään alle 30 m pituisia termoparilankoja mittauksissa. Periaatteessa laitteisto pystyy mittaamaan K-lämpöpari järjestelmällä lämpötiloja -150...1370°C ja tällä välillä mittatarkkuudeksi luvataan 0,5°C. [16.]



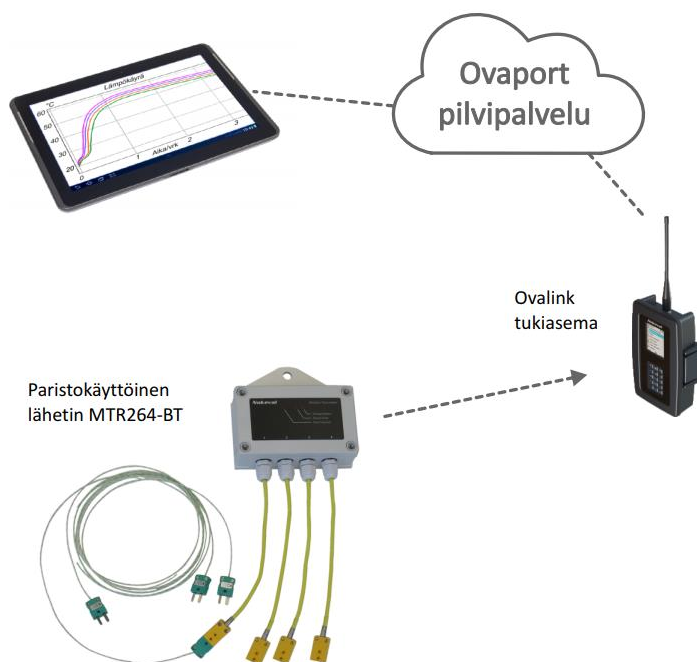
Kuva 4 Etäluettavan loggerin varustus. Laitteistoon kuuluu: mittalaite (1), lähetin (2), lähettimen virtajohto (3), tunnukset ja käyttöohje (4), jatkojohto (5, hankittu erikseen) ja salkku välineille (6)

Mittasalkun tukiasema on Nokevalin mallia Cell-MTR-Link-RS485-3G oleva laite. Laite vaatii toimiakseen verkkovirran, mutta siinä on myös varavirtana paristot lyhyiden sähkökatkojen varalta. Tukiasema vastaanottaa tiedon mittalaitteesta radiosignaalin välityksellä ja lähettää tiedon seurantaohjelmaan 3G-verkon välityksellä. Tukiaseman asennus mittauskohteeseen tapahtuu yksinkertaisesti vain verkkovirtaan liittämällä. Asettelu tulee olla valmistajan ohjeen mukaan maksimissaan 50 m päässä mittalaitteesta, mutta suositellaan asetettavaksi mahdollisimman lähelle mittalaitetta. Yhteen tukiasemaan voidaan myös liittää useita mittareita, jolloin mittauspisteitä voidaan saada samanaikaisesti jopa satoja. [14.] Valmistajan tietojen mukaan tukiasema on sääolosuhteita hyvin kestävä ja sitä voidaan käyttää ulkoilman lämpötilojen ollessa välillä -20°C...45°C [13].

Tulokset olosuhdevalvonnasta siirtyvät seurantaohjelmaan automaattisesti. Käyttäjä pystyy tarkastelemaan tuloksia kirjautumalla käyttäjätunnuksella ja salasanalla joko selainpohjaiseen järjestelmään tai mobiilisovellukseen. Lisäksi ajankohtaiset tulokset pääsee näkemään info-sivulta, joka ei vaadi kirjautumista. Käyttäjätunnuksia on mahdollista tilata useampia ja kullekin voidaan määrätä erilaiset käyttöoikeudet. Seurantaohjelmaan voi asentaa erilaisia hälytysrajoja ja on mahdollista saada käyttöön palvelu, joka lähettää ilmoituksen suoraan sähköpostiin, jos hälytysrajat ylittyvät. Seurantaohjelmasta saa ulos Excel-muotoisen tulosteen kaikista mitatuista tuloksista, mutta saatavilla on myös erilaisia raportteja, kuten anturi kohtaiset tunti keskiarvot. [13.]



Kuva 5 Etäluettavan loggerin tulosten näkymiä. Ylävasemmalla mobiilisovelluksen näkymä, yläoikealla asiakkaalle näkyvä infonäyttö ja alhaalla verkkopohjaisen palvelun näkymä



Kuva 6 Kaavakuva etäluettavan loggerin järjestelmästä [c, s. 6.]

## 5.2 Koejärjestelyt

Opinnäytetyön ja opinnäytetyön toimeksiantajan tarvitsemien tulosten kannalta etäluettavan loggerin testaus oli hyvä suorittaa erinäisin käytännön testein. Testauksesta haluttiin saada tulos mittalaitteen tarkkuudesta verrattuna aikaisemmin käytössä olleeseen tallentavaan loggeriin. Toinen tärkeä testauksesta saatava tieto on etäluettavan loggerin käytettävyys. Näiden testien tarkoituksena oli selvittää, onko etäluettava loggeri käyttökelpoinen työkalu betonin lujuudenkehityksen arviointiin. Testausta jatkettiin, kunnes testattavan laitteen toiminnallisuus saatiin selvitettyä.

Seuraavissa luvuissa käydään läpi testaukset kronologisessa järjestyksessä. Alla olevaan taulukkoon on tiivistetty kunkin testauksen tarkoitus, jotta lukijan on helpompi hahmottaa testauksia kokonaisuutena.

Kokeen järjestysnumero	Testin otsikko	Kokeen tarkoitus	Koetusolosuhde
1	Ensimmäinen kenttäkoe	Selvittää etäluettavan loggerin käytettävyyttä ja tulosten oikeellisuutta	Työmaaolosuhteet, lattiavalu parkkihallissa
2	Toinen kenttäkoe	Jatkaa käytettävyyden selvittämistä ja testata tuloksi suuremmilla lämpötila-arvoilla.	Ulkona valmisbetoniaseman pihalla
3	Ääriarvojen testaus	Testata etäluettavaan loggerin mittaamia arvoja ääriolosuhteissa	Keinotekoisesti tuotetut olosuhteet
4	Kolmas kenttäkoe	Selvittää etäluettavan loggerin toiminnallisuutta ja sen hyötyjä lämpötilanhallinnassa	Työmaaolosuhteet, holvivalu
5	Ääriarvojen testaus 2	Testata uudestaan etäluettavan loggerin arvoja suhteessa tallentavaan loggeriin	Keinotekoisesti tuotetut olosuhteet
6	Neljäs kenttäkoe	Selvittää etäluettavan loggerin toiminnallisuutta ja sen hyötyjä lämpötilanhallinnassa	Työmaaolosuhteet, holvivalu

### 5.2.1 Ensimmäinen kenttäkoe

Ensimmäisessä kenttäkokeessa tarkoituksena oli testata etäluettavan lämpötilamittarin toiminnallisuutta. Koe päätettiin suorittaa betonivalun yhteydessä. Kokeeseen valittiin kohde, missä valettava rakenne oli maanvarainen laatta. Valu sijaitsi rakenteilla olevan parkkihallin alimmassa kerroksessa. Valun paksuus oli n. 10 cm ja betonia käytettiin valun kaiken kaikkiaan 83 m<sup>3</sup>.

Betonimassaksi asiakas oli tilannut huokostetun lattiamassan 16 mm maksimi raekoolla ja lujuusluokalla C30/37. Sementtinä käytettiin CEM I 42,5 R sementtiä ja vesi-sementtisuhte reseptin mukaan oli 0,46. Lisäksi massassaan oli annosteltu teräskuitua 30 kg/m<sup>3</sup>.

Etäluettava loggeri sijoitettiin niin, että yksi anturi mittasi laatan lämpötilaa n. 5 cm päästä valua rajoittavasta seinästä, toinen n.20 cm päässä ja kolmas n. 3 m päässä seinästä. Neljäs anturi sijoitettiin mittaamaan vallitsevaa ilman lämpötilaa. Anturit kiinnitettiin nip-pusiteilla raudoitukseen. Sijoituspaikkoja rajoitti raudoituksen vähäinen määrä.



*Kuva 7 Antureiden sijoituspaikat*

Kenttäkokeen aikana jouduttiin etäluettavan loggerilaitteiston sijoittelua pohtimaan mo-neen otteeseen, koska verkkopalveluun ei meinannut siirtyä tietoa mitatuista lämpöti-loista. Toimiva systeemi saavutettiin sijoittamalla lähetinosa kellarikerrokseen n. 20 m etäisyydelle mittalaitteesta. Tämän jälkeen saatiin kerättyä tallentavan loggerin mittauk-siin verrattavaa lämpötiladataa.

## 5.2.2 Toinen kenttäkoe

Toinen kenttäkoe suoritettiin Swerock Oy:n Kirkkonummen betoniaseman pihassa. Paikalla valettiin 1600mm x 800mm x 800mm kokoisiin muotteihin IT-massalla betonia. Yksi muotti on tilavuudeltaan noin yhden kuutiometrin suuruinen.

Kenttäkokeessa oli tarkoituksena saada mitattua suurempia lämpötilanvaihteluita kuin edellisessä lattiavalussa olleessa kokeessa. Yksi antureista sijoitettiin painon avulla mahdollisimman keskelle muottia ja toinen valun pintaan noin kymmenen senttimetrin syvyyteen. Tässäkin kokeessa käytettiin rinnalla tallentavaa lämpötilamittaria. Vastaanotinyksikkö sijoitettiin taukotilaan kentän toiselle puolelle noin 40 m päähän valusta.



*Kuva 8 Koevalussa käytetty muotti täyteen valettuna*

Etäluettava loggeri aloitti lämpötilan mittauksen ongelmitta, mutta pian valun jälkeen lämpötilatulokset eivät enää päivittyneet. Samana iltapäivän laite käynnistettiin uudelleen, minkä mittaukset päivittyivät kahden tunnin ajan ja tämän jälkeen mittausten taas loppuivat. Kaksi vuorokautta ensimmäisen valun jälkeen valettiin muotit uudelleen ja loggerit siirrettiin mittaamaan tätä valua. Vastaanotin siirrettiin lähemmäs muotteja betoniaseman ohjaustilaan, joka sijaitsee n. 20 m päässä muoteista ja noin viisi metriä korkeammalla kuin edellinen sijoituspaikka. Tässä valussa mittari lähetti lämpötilatietoja noin kolmen tunnin ajan, kunnes datan lähetys taas loppui. Aseman alueella on tunnetusti huono GSM-verkko, joten oletuksena on, että laitteen verkosta tippuminen aiheuttaa lämpötilatietojen lähetyksen loppumisen.

### 5.2.3 Ääriarvojen testaus

Ovaporit ohjelmaan on asetettu hälytysrajat niin, että ohjelma antaa hälytyksen, jos lämpötila laskee alle 0°C tai jos se nousee yli 80°C.

Hälytyksien toimivuutta testattiin kokeella, jossa yksi anturi asetettiin ämpäriin, joka täytetään kiehuvalle vedelle. Ämpäri sijoitettiin parvekkeelle, jossa kokeen alkamishetkellä lämpötila oli noin +12°C, joten oletettavissa oli veden lämpötilan nopea aleneminen.

Koe suoritettiin 5.10.2018, jolloin ulkoilman lämpötilat olivat liikkuneet viime päivinä +5°C ja +15°C väleillä. Sääennustuksessa luvattiin alueelle kuitenkin lähivuorokausien aikana mahdollisia yöpakkasia, joten yksi anturi asetettiin lasitetun parvekkeen ulkopuolella mittaamaan ulkoilmalämpötilaa ja toiveena oli, että lämpötilat laskisivat alle 0°C ja hälytyksen alarajakin saataisiin aktivoitua.

Edellä mainittujen mittauspisteiden lisäksi asetettiin yksi anturi mittaamaan asunnon sisälämpötilaa, lämpöpatterin yläpuolelta ja yksi anturi mittasi parvekkeella vallitsevan ilman lämpötilaa. Oletuksena oli, että sisäilman anturi mittaisi kohtuullisen tasaista +25°C lämpötilaa ja parvekkeen lämpötila olisi saman tyylinen kuin ulkoilma, mutta hieman pienemmillä lämpötilanvaihteluilla. Kaikkien lämpötila-antureiden rinnalle asennettiin mittaamaan aikaisemmin käytössä ollut tallentava loggeri vertailutuloksien aikaansaamiseksi.

Testausta jatkettiin kuuden vuorokauden ajan. Koko tämän ajan etäluettava loggeri mittasi keskeytymättömästi lämpötiloja. Kokeen kannalta harmillisesti ei ulkoilman lämpötila tippunut missään vaiheessa pakkasasteisiin, joten alarajan hälytys jäi testaamatta.

### 5.2.4 Kolmas kenttäkoe

Kolmas kenttäkoe suoritettiin parkkihallin holviin, jonka betonin kokonaismenekki oli noin 570 m<sup>3</sup>. Tilattu betoni oli säänkestävää massaa, jonka lujuusluokka oli C35/45, maksimi raekoko 16 mm ja rasisluokat XC3, XF3 ja XD2. Käyttöiäksi oli määritetty 50v ja sementtinä käytettiin CEM I 42,5 R sementtiä. Holvissa oli viisi palkkia, joiden syvyys ja



leveys oli noin metrin ja laatta jonka syvyys n. 40 cm. Holvi oli jälkijännitettävä rakenne. Holvia lämmitettiin yhdellä lämpöpuhaltimella holvin alta ja valupinnan päälle levitettiin pakkasmatot ja muovipeitteet valua seuraavan vuorokauden aikana.

Etäluettava loggeri asennettiin palkkiin valualueen alkupäässä niin, että yksi anturi mittasi lämpötilaa palkin pohjalta, yksi keskeltä ja yksi pinnasta. Lämpötilatiedoilla toivottiin käytettäväksi lämpötilan hallintaan sekä lujuuslaskelmiin.

Ongelmaksi etäluettavan loggerin toiminnan kannalta syntyi asennusvaiheessa lähettimen sijoituspaikka, jossa olisi käytettävissä verkkovirtaa, riittävän hyvä GSM signaali ja yhteys mittauslaitteeseen. Ensimmäinen sijoituspaikka oli saman taloyhtiön sisätilat, jotka sijaitsivat n. 40 m etäisyydellä mittauslaitteesta, mutta välissä oli useampi seinä. Tästä pisteestä ei saatu yhteyttä mittauslaitteeseen, joten lähetin siirrettiin toisen kerroksen parvekkeelle jatkojohtoa käyttäen. Parvekkeella saatiin ensin joitakin mittauksia serverille, mutta yhteys katkesi usein. Kun laite asennettiin parvekkeen kaiteeseen kiinni niin, että siitä oli suora näköyhteys mittalaitteeseen, alettiin daada päivityksiä lämpötilasta säännöllisesti. Etäisyys tästä kohdasta oli arviolta 35 m mittalaitteeseen.



*Kuva 9 Holvi valun jälkeisenä päivänä peiteltyinä. Kohta 1 on mittalaitteen sijoituspaikka ja kohta 2 tukiaseman sijoituspaikka*

Etäluettavan loggerin lisäksi valun loppupäähän asennettiin kaksi tallentavaa loggeria, jotka tallensivat kahdesta eri palkista lämpötiloja kuten etäluettava loggerikin ja tämän lisäksi molempien loggereiden yksi anturi sijoitettiin tallentamaan laatan lämpötilaa n. metrin etäisyydeltä holvin reunasta. Yksi loggeri sijoitettiin näiden lisäksi tallentamaan ulkoilman lämpötilaa.

Lämpötilan kohoamista seurattiin betonin toimittajan osalta säännöllisesti sekä mobiilisovelluksesta, että Ovaportin verkkosivuilta. Asiakkaalle annettiin mahdollisuus seurata lämpötiloja verkossa toimivan infosivun kautta, jossa ilmoitetaan tuoreimmat lämpötilamittaukset.

Valu aloitettiin iltapäivällä n. klo 17 ja antureiden päälle betoni valettiin noin klo.18. Ulkoilman lämpötila oli valun alkaessa n. 12°C. Seuraavana aamuna klo. 9 lämpötilat olivat

nousseet n. 55°C lukemiin anturissa, joka mittasi betonin lämpötilaa palkin keskikohdalta. Tällöin ilmoitettiin asiakkaalle, että lämpöpuhallin parkkihallin hovin alla olisi hyvä sulkea, jotta rakenteen lämpö ei kohoaisi liian suureksi.

#### 5.2.5 Ääriarvojen testaus 2

Edellisten kokeiden perusteella oli syntynyt ongelma, että kaksi anturia näytti tismalleen samoja lämpötila-arvoja. Tähän ongelmaan haettiin apua etäluettavan loggerin palveluntarjoajalta. Ongelma oli ollut palveluntarjoajan säätämässä asetuksissa ja se saatiin ratkaistua pikaisesti.

Kun oletuksen mukaan mittarin pitäisi toimia moitteettomasti, lähdettiin tekemään uusia testejä mittarin tarkkuuden määrittämiseksi. Käytännössä betonin lujuudenkehityksen kannalta tärkeät lämpötila-arvot liikkuvat -10°C ja 80°C välillä. Todettiin, että testatukseen riittää lämpötilat arvojen -20°C ja 100°C välillä.

Testaus suoritettiin niin, että anturit asetettiin vesiastioihin ja astiat eri lämpötiloihin. Yksi vesiastia (anturi 1) pistettiin lämpenemään hitaasti, kunnes vesi alkoi kiehumään ja kiehattamista jatkettiin noin puolen tunnin ajan. Yhteen astiaan (anturi 2) laskettiin kuumaa vesijohtovettä ja se jätettiin jäähtymään huoneen lämpöön. Kolmas astia (anturi 3) täytettiin käden lämpöisellä vedellä ja asetettiin jääkaappiin (oletuslämpötila n. 10°C) jäähtymään. Neljäs astia (anturi 4) täytettiin viileällä vedellä ja asetettiin pakastimeen (-20°C) jäähtymään. Kaikkien lämpötila-antureiden rinnalle sijoitettiin vertailun vuoksi vastaavat anturit, jotka oli asennettu tallentavaan lämpötilamittariin. Tässä kokeessa tallentavan lämpötilamittarin mittausväli oli 10 minuuttia.

Tallentava loggeri tallensi sekunnin tarkasti tuloksia kymmenen minuutin välein, kun taas etäluettavan loggerin tulokset kirjautuivat noin viiden minuutin välein. Tämä asetti haasteen lämpötilatulosten vertailuun. Vertailu suoritettiin niin, että etäluettavan loggerin mittaamista tiedoista valittiin joka toinen, jolloin tulosten väli oli n. 10 minuuttia ja näistä arvoista laskettiin painotettu keskiarvo vastaamaan mahdollisimman lähelle tallentavan loggerin arvoa. Laskentakaava oli seuraava:

$$T_e = T_{e1} + (T_{e2} - T_{e1}) \times \frac{t_e - t_t}{10}$$

Missä  $T_e$  on painotettu keskiarvo etäluettavan loggerin peräkkäisistä arvoista  
 $T_{e1}$  ja  $T_{e2}$  ovat etäluettavan loggerin kaksi peräkkäistä arvoa  
 $t_e$  on etäluettavan loggerin aikaleima  
 $t_t$  on tallentavan loggerin aikaleima

Edellä mainittuja arvoja vertaillaan tarkemmin ”Tulokset ja kehitysmahdollisuudet”-kappaleessa

#### 5.2.6 Neljäs kenttäkoe

Neljäs kenttäkoe tehtiin holvivaluun, jossa valettiin n. 40 cm paksu jälkijännitettävä holvi säänkestävällä, lujuusluokaltaan C40/50, betonimassalla. Betonin kokonaiskulutus oli 125 m<sup>3</sup>. Kenttäkokeen tarkoituksena oli testata etäluettavan loggerin käyttöä kenttäolosuhteissa, sekä sen toimivuutta lämpötilojen hallinnassa ja asiakaspalvelussa.

Etäluettavan loggerin mittalaite sijoitettiin valun alkupäähän niin, että yksi antureista mittasi lämpötiloja n. 250 cm päästä lähimmästä holvin reunasta, toinen anturi valun pinnasta n. metrin etäisyydeltä valun reunasta ja kolmas anturi asetettiin n. 15 cm etäisyydelle muotin reunasta n. 10 cm syvyyteen. Tukiasema saatiin asetettua alle 10 m etäisyydelle mittausyksiköstä. Tukiasema asetettiin siten, että siitä oli suora näköyhteys mittariin. Valuun asetettiin myös kaksi tallentavaa loggeri eri puolille holvia.

Holvi oli alapuolelta suljettu kevytpeitteillä ja sinne oli asennettu lämpöpuhaltimia lämmittämään valua alhaalta käsin. Valutöiden jälkeen holvin pinta peiteltiin routamatoilla. Asiakkaalle ole tärkeää, että holvin jännitystyöt saadaan mahdollisimman pikaisesti käyntiin. Jännitystöiden aloittamiseksi oli suunnittelija määrännyt, että betonin on saavutettava koko holvin alueelta 70% sen ominaislujuudesta. Lämpötilan tuli näin olla mahdollisimman korkea, mutta kuitenkin jäädä alle 60°C mahdollisen lujuuskadon välttämiseksi.

Etäluettavan loggerin asennus onnistui kohteessa hyvin, kun oli edellisten kenttäkokeiden perusteella opittu asentamista rajoittavien tekijöiden vaikutus. Lämpötilatulokset lähtivät päivittymään seurantaohjelmaan heti asennuksen jälkeen. Lämpötilan kehittymistä seurattiin verkkoselaimella. Aika ajoin tuli hetkiä, kun yksi tai useammat kanavat eivät päivittäneet lämpötilatuloksia. Koko lämpötilan seurannan aikana pisimmät tauot olivat hieman yli tunnin mittaisia ja niitä oli muutamia. Kuitenkin pääsääntöisesti tietoa tuli seurantaohjelmaan säännöllisesti.

Lämpötilatulokset olivat erinomaisia nopean lujuudenkehityksen kannalta. Maksimilämpötilat rakenteen keskeltä etäluettavalla loggerilla mitattuna olivat 57°C ja reunalta 50°C. Holvin lämmitys oli säädetty sopivaksi ja sitä ei tarvinnut muuttaa mittausten aikana. Asiakkaalla oli toive välituloksista lujuudenkehityksestä noin kolmen vuorokauden ikäiselle rakenteelle ja ne pystyttiin tarjoamaan suoraan etäluettavan loggerin seurantaohjelmasta saatavien lämpötilatietojen perusteella. Näiden tietojen perusteella pystyttiin ajoittamaan myös tallentavien loggereiden lukuajankohta sopivasti niin, että työmaalla ei tarvinnut käydä useita kertoja.

## 6 Tulokset ja kehittymismahdollisuudet

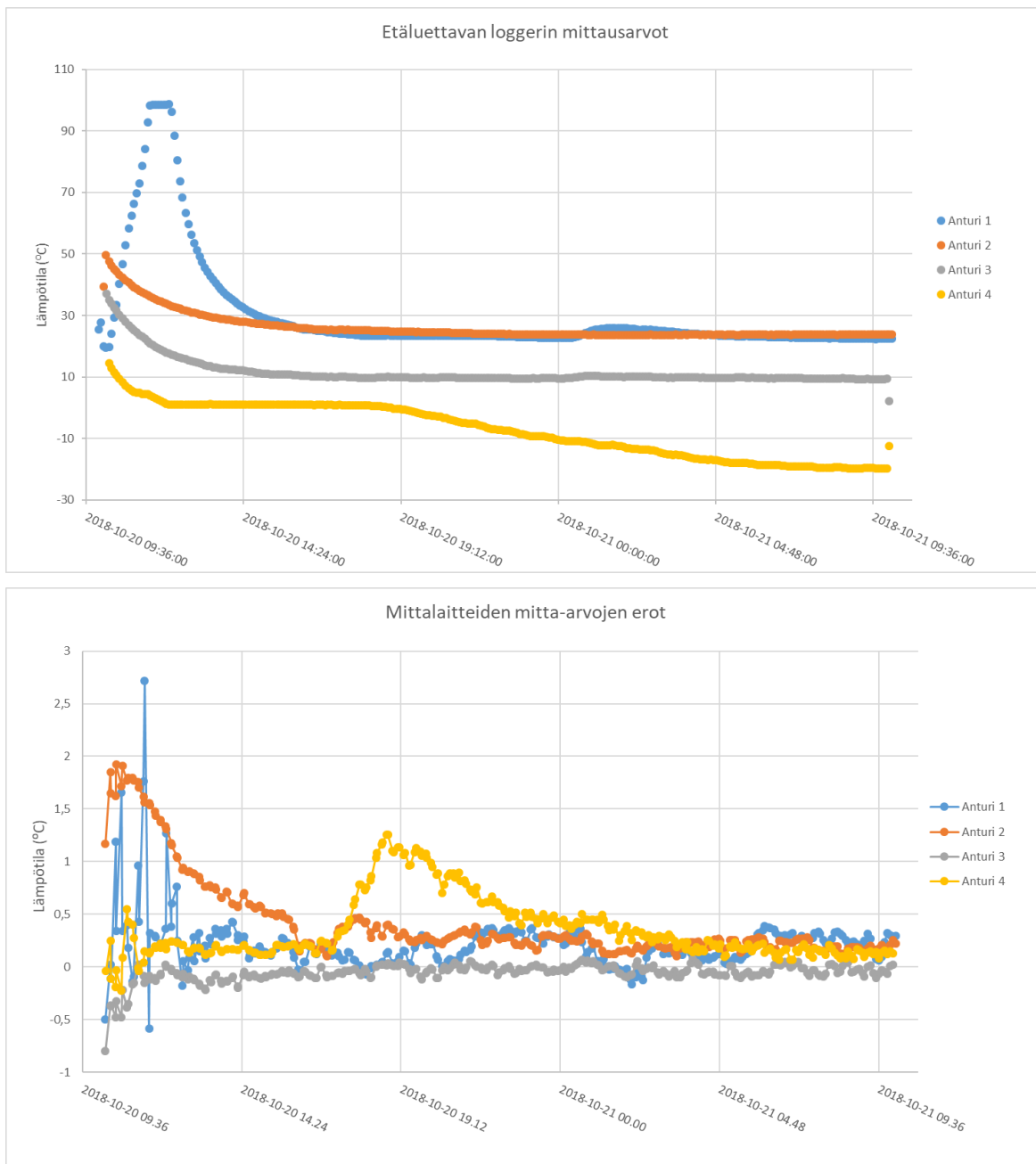
### 6.1 Mittausten tarkkuus

Ensimmäisessä kenttäkokeessa ja kahdessa erillisessä mittalaitteen testauksessa keskityttiin mittausten tarkkuuteen. Lämpötilatulosten tarkkuutta mitattiin vertailemalla etäluettavan loggerin mittaamia arvoja tallentavan loggerin mittaamiin arvoihin.

Ensimmäisten kokeiden aikana huomattiin virhe mittauskanavissa ja tämä korjattiin palvelun tarjoajan teknisen tuen avulla. Näistä kokeista ei siis saatu täydellistä dataa mitta-arvojen vertailuun, vaikkakin pystyttiin päättämään suuntaa antavia tuloksia.

Selvimmän lämpötila-arvojen erot näkyivät jälkimmäisessä erillisessä kokeessa, eli testissä otsikolla ”ääriarvojen testaus 2”, jossa kaikki anturit oli saatu toimimaan oikein. Luvussa 4.2.5 Tarkkuuden testaus ääriarvoilla käsiteltiin teoria kahden mittalaitteen arvojen vertailuun. Alla käydään nämä tulokset läpi ja niiden merkitys lujuudenarviointiin.

Kyseisessä kokeessa huomattiin, että suurimmillaan kahden eri mittauslaitteen erot olivat silloin kuin lämpötilan muutos oli nopeimmillaan. Tämä on helposti selitettävissä sillä, että mittareiden mittaushetket eivät vastanneet toisiaan ja lämpötila-arvoja jouduttiin arvioimaan muiden mittausten perusteella. Ensimmäisessä alla olevassa kaavioissa on esitetty etäluettavan loggerin mittauserot antureittain. Seuraavassa kuvaajassa on esitetty etäluettavan ja tallentavan loggerin mittauserojen erotus, eli käytännössä kuinka paljon suuremman arvon etäluettava loggeri on mitannut kuin tallentava loggeri.



Kuva 10 Mittalaitteiden mittausarvot ja niiden erot. Ylemmässä kuvassa on esitetty etäluettavan loggerin mittaamat lämpötila-arvot ja alemmassa kuvassa on esitetty loggerien mittaamien arvojen erotukset.

Suurin mittalaitteiden mittaamien lämpötila-arvojen ero oli tässä testissä alle 3°C ja tämä oli yhden anturin yksittäinen arvo. Tämä arvo syntyi tilanteessa, missä mitta-anturin lämpötila nousi n. 20°C yhden tunnin aikana. Suurin osa mitta-arvojen eroista oli alle yhden asteen. Kunkin eri anturin mitta-arvojen eroista laskettiin keskiarvot ja ne sijoittuivat välille 0,1-0,4°C. Mittausaineistoista etsittiin suurimmat ja pienimmät arvot kullekin anturille ja laskettiin näiden arvojen erotukset mittalaitteiden välillä. Maksimilämpötilojen suurin

ero oli anturissa 3, missä tallentava lämpömittari oli mitannut 1,1°C suuremman lämpötilan kuin etäluettava. Tämä arvo on syntynyt aivan mittausten alussa, missä anturin jäähtyminen oli nopeaa ja tallentava lämpömittari oli mitannut ensimmäisen arvon n. kolme minuuttia ennen kuin etäluettava mittari. Pienin ero maksimilämpötiloissa oli taas anturilla 1, missä etäluettava mittari oli mitannut 0,4°C suuremman lämpötila-arvon. Minimilämpötiloissa suurin ero syntyi anturille 2, missä etäluettava mittari oli mitannut 0,5°C korkeamman lämpötilan. Pienin ero minimiarvoissa saatiin anturilla 3, missä etäluettava loggeri oli mitannut 0,1°C korkeamman lämpötilan kuin tallentava

Testissä syntyi muutamia hetkiä, joissa mittalaitteiden arvot olivat kohtuullisen suuria. Nämä arvot syntyivät hetkillä, joilla lämpötilan muutos oli hyvin nopeaa. Arvojen vertailumenetelmä ja mahdolliset erot arvojen ajanhetkissä selittävät suurien arvojen syntymisen. Keskimääräiset erot lämpötilamittausmenetelmien välillä olivat suhteellisen pieniä, kun otetaan huomioon lujuudenkehityksen arviointiin tarvittava lämpötilamittauksen tarkkuus. Maksimi ja minimilämpötilojen erot eivät myöskään aiheuta suurta huolta kummankaan lämpötilamittausmenetelmän tarkkuuden suhteen.

Tämän testin tarkastelujen perusteella molemmat mittausmenetelmät ovat riittävän tarkkoja betonin lujuuden kehityksen arviointiin. Sitä kumpi mittalaitteista olisi tarkempi, on hankalaa arvioida testien perusteella. Erot mittalaitteiden mittausten välillä tuntuivat syntyvän silloin, kun lämpötilan muutos on nopeaa. Kuitenkin betonirakenteen lämpötilan muutos on yleisessä tilanteessa hyvin paljon hitaampaa kuin testeissä aiheutetut lämpötilan muutokset, joten tämän perusteella ei mittausmenetelmien välillä pitäisi syntyä suuria eroja. Etäluettavaan loggerissa on lämpötilamittausten välinen aika asetettu lähtökohdaisesti pienemmäksi kuin opinnäytetyön toimeksiantaja on perinteisesti käyttänyt tallentavan loggerin mittaustavallia, joten voitaisiin olettaa, että etäluettavalla loggerilla mittausten tarkkuus olisi aavistuksen parempi.

## 6.2 Lujuuslaskelmien tarkkuus

Luvussa 3.3.2 Menetelmien vertailu käsiteltiin erilaisia lämpötilan mittauksen perusteella toimivien lujuudenkehityksen arviointimenetelmien tarkkuuksia. Tällä hetkellä opinnäytetyön toimeksiantajalla on käytössään laskukaava, joka perustuu Sadgroven menetelmään. Tutkimuksen aikana selvisi, että Sadgroven menetelmä on yleisesti riittävän



tarkka menetelmä arvioida betonin lujuudenkehitystä. Kuitenkin on olemassa vielä tarkempiakin menetelmiä, mutta niiden käyttöönotto vaatii syvällistä tietämystä eri sidosaineiden ominaisuuksista. Jotkut sementin toimittajat ovat kehittäneet palvelun, jossa lujuudenkehitystä arvioidaan side- ja seosaineiden määrän ja laadun mukaan. Näitä palveluita on opinnäytetyön toimeksiantajan mahdollista käyttää apunaan, jos jostain syystä johonkin kohteeseen ei oma laskentamenetelmä tunnu riittävältä. Jos tulevaisuudessa syntyy tarve lujuuslaskelmien kehittämiseksi, niin esimerkiksi hollantilaista painotettua kypsyysmenetelmää voitaisiin harkita Sadgroven menetelmän rinnalle. Tämä vaatii kuitenkin kohtuullisen suuria panostuksia ja tulee tehdä kokonaan omana projektinaan.

Eri arviointimenetelmien tarkkuutta tutkittaessa tuli eteen tieto, että eteenkin suurissa lämpötiloissa betonin varhaislujuuden arviointi on epätarkkaa. Tämä tulos on arvokas tieto lujuuslaskelmia tehdessä ja voitaisiin lisätä nykyiseen raportointi pohjaan, jotta asiakas voi ottaa epätarkkuuden huomioon.

### 6.3 Etäluettavan loggerin käytettävyys

Kun verrataan etäluettavan loggerin käytettävyttä työmaalla aikaisemmin käytössä olleeseen menetelmään mitata lämpötiloja tallentavalla loggerilla, on luontevaa jakaa vertailu mittarin asentamiseen työmaalla sekä lämpötilatulosten tarkasteluun.

Suurin ero tallentavan ja etäluettavan loggerin asennukseen ja toimintaan työmaalla syntyy siitä, että etäluettava mittari vaatii verkkovirran koko mittauksen ajaksi toimiakseen. Etäluettavan loggerin valmistaja ohjeistaa, että lähetinyksikkö tulisi asentaa 50m etäisyydelle mittalaitteesta, mutta tämä etäisyys tuntui monissa kenttäkokeissa liian suurelta. Lisäksi kokeissa kävi ilmi, että mikäli mittalaitteen ja lähettimen välillä on seinä tai muita rakenteita, niin laitteiden välinen yhteys toimii huonosti. Näiden huomioiden perusteella opinnäytetyön toimeksiantajalle laadittuun loggerin käyttöohjeeseen lisättiin kohta, jossa ohjeistettiin asentamaan lähetin mahdollisimman lähelle mittalaitetta tai maksimissaan 20 m etäisyydelle. Lisäksi mittalaitteen ja lähettimen välillä tulee olla näköyhteys. Näitä ohjeita noudattamalla on etäluettava loggeri toiminut moitteettomasti, kunhan vain verkkovirta on pysynyt työmaalla päällä.

Mitatun datan käsittely ja lujuuslaskemien tekeminen todettiin kokeissa pitkälti yhtä helppoksi kummallakin tutkitulla menetelmällä. Lujuuslaskelmien tekeminen on alkuun ehkä hieman työläämpää etäluettavalla loggerilla, sillä siitä ulos saadun mittausdatan käsitteilyyn ei ole opinnäytetyön toimeksiantajalla vielä kohdennettuja työkaluja. Kuitenkin tällaiset työkalut on helppo luoda Exceliin ja niiden valmistelu onkin yksi jatkokehityksen aiheista. Tällaisenaan mittaustulosten kääntäminen lujuudenkehityksen arviointiin käytettyyn laskentataulukkoon ei ole ongelmallista, ainoastaan hieman työläämpää.

Merkittävin ero mittalaitteiden tulosten tulkinnassa kuitenkin syntyy siitä, että lujuuslaskelmien tekemiseksi ei tarvitse lähteä fyysisesti työmaalle, vaan laskelmien laatija pystyy tekemään ne koska vain kunhan pääsee kirjautumaan internetissä toimivaan palveluun. Asiakkaille on yleensä tärkeää saada tietoja lujuudenkehityksestä esim. muottien purun tai lämmityksen lopettamisen takia. Tähän etäluettava loggeri antaa huomattavasti paremmat lähtökohdat. Asiakkaalle voidaan tarjota väliluku hyvinkin nopealla aikataululla käymättä enää fyysisesti työmaalla. Lisäksi etäluettava loggeri mahdollistaa tarkemman ajankohdan mittalaitteen poistamiseen rakenteesta, koska lujuuslaskelmat voi tehdä etätyönä ja kun asiakkaan tarvitsema lujuus on arvioitu saavutetuksi, voidaan laitteisto käydä noutamassa työmaalta. Tallentavat loggerit viettävät työmaalla aikaa yleensä viidestä seitsemään päivään, vaikka lujuuslaskelmia tehdessä selviääkin monesti, että loggeri oltaisiinkin voitu poistaa työmaalta jo kolmen vuorokauden jälkeen.

#### 6.4 Hyödyt lämpötilan hallinnassa

Etäluettavan loggerin testauksen yhteydessä on saavutettu huomattavia hyötyjä betonirakenteiden lämpötilan hallinnassa. Hyödyt näkyvät sekä kylmällä ilmalla betonoitaessa, massiivisten rakenteiden lämpötilan hallinnassa sekä muottien purkulujuuden oikean aikaisuuden saavuttamisessa. Seuraavassa joitain esimerkkejä, joissa on saavutettu merkittävää hyötyä etäluettavana loggerin käytössä lämpötilan hallinnan kannalta:

Esimerkki 1: Asiakas betanoi loppu kesästä massiivisen holvin, jota lämmitetään alapuolelta valun jälkeen. Noin 12 h valun jälkeen huomataan etäluettavan loggerin tuloksista, että lämpötila holvin massiivisimmasta kohdasta nousee liian rajusti ja saattaa huipussaan saavuttaa liian suuren arvon. Asiakkaalle ilmoitetaan asiasta ja tämä lopettaa holvin lämmityksen alta ja antaa ulkoilman kiertää holvin alta. Lämpötilat pysyvät kurissa ja kuitenkin muotteja päästään purkamaan suunnitellussa aikataulussa.

Esimerkki 2: Asiakas valaa talviolosuhteissa holvia torstaina. Tavoitteena on päästä purkamaan muotteja seuraavan viikon maanantaina tiukkojen aikataulujen puitteissa. Holvin alapuolinen kerros on suljettu, mutta lämmitys on kohtuullisen kevyt. Perjantaina huomataan etäluettavan loggerin arvoista, että betonin lämpötila näyttää laskevan niin, että muottien purkuun vaadittavan lujuuden saavuttamiseksi joudutaan odottamaan huomattavasti pidempi aika. Asiakas lisää lämmitystä holvin alapuolisessa kerroksessa mikä lisää betonin lämpötilaa niin, että muotteja päästään purkamaan halutussa aikataulussa.

Esimerkki 3: Asiakas valaa pakkasella kevytrakenteisia nauha-anturoita. Pian valun jälkeen huomataan etäluettavan loggerin arvoista, että lämpötila näyttää tippuvan niin nopeasti rakenteen pinnasta, että tämä ei saavuta välttämättä jäätymislujuutta ennen kuin rakenne voi alkaa jäätymään. Asiakkaalle ilmoitetaan asiasta, tämä tarkistaa muotin pinnassa kulkevat lämpölangat ja selviää että en ovat olleet epäkunnossa. Asiakas korjaa tilanteen ja lämpötilat lähtevät nousuun eikä riskiä rakenteen jäätymisestä synny.

## 6.5 Kustannukset

Seuraavissa kappaleissa tutkitaan loggeripalvelun kustannuksia sekä opinnäytetyön tilaajan kannalta, sekä asiakkaan näkökannasta. Kustannuksia on arvioitu suurpiirteisesti, eikä euromääräisesti, koska loggeripalvelun hinnat voivat vaihdella asiakkaan ja opinnäytetyön toimeksiantajan välisten sopimusten mukaan. Lisäksi tallentavia loggereita on saatavilla useita malleja ja niiden hinnat vaihtelevat jälleenmyyjän ja tehtyjen sopimusten mukaan.

### 6.5.1 Kustannukset lämpötilanseurantapalvelun tarjoajan kannalta

Kustannusten tarkastelussa on heti todettavissa, että etäluettava loggeri on kokonaisuudessaan mittalaitteena noin kolme kertaa kalliimpi kuin aikaisemmin käytössä ollut tallentava loggeri. Lisäksi verkkopalvelusta joutuu maksamaan pientä kuukausittaista korvausta. Opinnäytetyön aloituksen aikaan etäluettavan loggerin laitteistoa ei tarvinnut välttämättä ostaa itselleen, vaan sitä saattoi vuokrata, mutta tämä palvelu on poistunut käytöstä.

Tallentavien loggereiden kanssa työskennellessä on huomattu, että kosteuden päästessä termoparilankoja pitkin laitteistoon, hapettuu piirilevyt hyvinkin nopeasti ja näiden korjaamisen kustannukset nousevat hyvin lähelle uuden laitteen hintaa. Vaikka laitteiden asettelua ja suojaamista onkin opinnäytetyön toimeksiantajan puolesta kehitetty ja ohjeistusta parannettu, ei ole laitteiden rikkoutumista voitu kokonaan estää. Vaikka näistä rikkoutuneista laitteista voidaan periaatteessa laskuttaa asiakasta, ei tämä onnistu tilanteissa joissa laitteen rikkoutuminen ei ole selkeästi asiakkaan aiheuttama. Etäluettavan loggerin laitteisto ei ole lähes vuoden testauksen aikana rikkoutunut kertaakaan sääolosuhteiden ansiosta. Joskus on laitteiston osia jouduttu uusimaan, kun työmaalla on mekaanisesti työkoneilla rikottu laitetta tai laitteen osat kuten virtajohto on jäänyt betonivalun alle. Näiden kokemusten mukaan on etäluettavan laitteiston korjaaminen ja uusien osien tilaaminen helpompaa kuin tallentavan loggerin. Etäluettavan loggerin laitteistossa suurin kulutus tuntuu kohdistuvan mittauslaitteeseen, jonka arvo on hyvin lähellä tallentavan loggerin hintaa.

Kuten käytettävyyttä tutkivassa kappaleessa todettiin, voidaan etäluettava loggeri poistaa työmaalta usein aikaisemmin kuin tallentava loggeri. Tämä tarkoittaa samalla sitä, että opinnäytetyön toimeksiantaja tarvitsee vähemmän mittalaitteita saman määrän loggeripalveluita tarjoamiseen.

Samat lämpötilan mittaamiseen tarvittavat termoparilangat sekä liittimet toimivat sekä etäluettavassa, että tallentavassa järjestelmässä, joten näistä ei synny mitään eroa järjestelmien välisiä kustannuksia pohdittaessa.

#### 6.5.2 Kustannukset asiakkaan kannalta

Asiakkaan näkökannasta etäluettava loggeri on pitkälti yhtä kallis ratkaisu kuin aikaisemmin käytössä ollut tallentava loggeri. Tällä hetkellä opinnäytetyön toimeksiantaja hinnoittelee kaikki loggeripalvelut samoin. Asiakkaalta laskutetaan kiinteä hinta loggerin asennuksesta sekä erikseen siihen käytetyistä työtunneista ja kilometreistä toimittavalta betoniasemalta työmaalle ja takaisin. Työtunnit laskutetaan aina alkavalta tunnilta. Itse termoparilankojen asennus rakenteeseen ja mittalaitteen kiinnitys ovat yhtä vaivalloisia ja ajankäytöltään vastaavia sekä etäluettavalla, että tallentavalla laitteistolla. Etäluettavan laitteen kohdalla asennuksen tekijä joutuu kuitenkin asentamaan myös lähettimen ja hankkimaan siihen virran sekä testaamaan lähettimen toiminnan. Tämä lisää hieman

työaika työmaalla, mutta testauksen aikana ei ole lisääntynyt työaika ylittänyt kertaaan yhtä tuntia. Yleensä asiakkaalta veloitettavien työtuntien määrä jopa pysyy yhtä suurena kuin tallentavankin loggerin asennuksissa.

Jos asiakas toivoo välituloksia betonin lujuudenkehityksen arviosta, pystytään tämä tarjoamaan huomattavasti edullisemmin etäluettavaa loggeria käytettäessä, kuin tallentavalla laitteella. Tallentavaa loggeria käytettäessä joutuu laskelman tekijä lähtemään työmaalle tekemään välilukua ja tästä laskutetaan kilometrikorvaus sekä käytetty aika. Työmaan etäisyydestä ja tarvittavien välilukujen määrästä riippuen loggeripalvelun hinta voi jopa kaksinkertaistua etäluettavan loggerin käyttöön verrattuna.

Asiakkaalle etäluettavan loggerin parempi säänkestävyys on etuna siltä kannalta, että laite ei niin helposti rikkoonnu asiakkaan toimesta. Lisäksi mittausyksikön, joka on suurimmassa vaarassa rikkoutua työmaalla, arvo on samaa luokkaa kuin tallentavan loggerin. Lähetin laite on kuitenkin huomattavan arvokas ja jos asiakas joutuu sitä korvaamaan, syntyy siitä huomattavasti suurempia kustannuksia kuin tallentavan mittalaitteen rikkomisesta.

## 6.6 Asiakkailta saatu palaute

Koko opinnäytetyön tekemisen aikana tehtyjen työmaakäyntien yhteydessä on asiakailta kerätty suullista palautetta sekä kehitysehdotuksia lämpötilan seurantaan liittyvistä asioista ja erityisesti etäluettavan loggerin käytöstä.

Useamman kerran asiakkaiden haastattelussa on tullut esiin, että etäluettavan loggerin käyttö kiinnostaisi hyvinkin paljon, mutta palvelua ei uskalleta tilata koska verkkovirran pelätään tippuvan pois loggerin käytöstä. Tähän syynä on yleensä se, että työmaiden sähkökeskuksissa sulakkeet palavat usein ja loggerin virtajohdon irrottamista sähkökeskuksesta on hankala estää.

Tällä hetkellä asiakkaille pystytään tarjoamaan vain linkki verkkosisältöön, jossa on näkymä etäluettavan loggerin tuoreimpiin mittauksiin kullakin kanavalla. Mittaushistorian selaaminen on suojattu salasanalla ja tätä ei asiakkaalle mielellään luovutaisi, koska samalla asiakas pääsisi käsiksi kaikkiin loggerilla tehtyihin, myös muiden asiakkaiden valujen, mittauksiin. Asiakkaalle tämä on hieman ongelmallista, koska asiakasta kiinnostaa yleensä onko rakenteen lämpötila nouseva vai laskeva ja tämä taas vaatisi nykyisellä

systeemillä jatkuvaa seuraamista. Lisäksi asiakkailta on tullut kyselyitä siitä, olisiko mahdollista saada näkyviin reaaliaikainen tieto lujouden kehityksestä.

Tällä hetkellä betonin lämpötilaa mittaavien antureiden hälytysrajat on asetettu niin, että hälytysilmoitus tulee, kun lämpötila laskee alle 0°C tai nousee yli 80°C. Asiakkaiden palautteen perusteella tarpeellisemmat rajat olisivat esimerkiksi, kun lämpötila laskee alle 5°C ja kun lämpötila nousee yli 50°C. Tällöin asiakas ehtisi reagoida lämpötilan säätämiseen ajoissa. Lisäksi tällä hetkellä ilmoitukset tulevat vain salasanan takana olevaan palveluun joka on vain loggeripalvelun tarjoajan käytössä. Asiakkailla on ollut toive, että hälytykset lähtisivät automaattisesti sähköpostilla heille.

#### 6.7 Tutkimuksen aikana tehdyt kehitykset

Opinnäytetyön aloituksen ajankohtana etäluettavaa loggeria ei oltu juurikaan edes kehitetty. Työ aloitettiin testaamalla mittausarvoja, jolloin nopeasti selvisikin, että kaksi kanavaa antaa täysin samoja mittausarvoja. Tämä ongelma saatiin korjattua nopealla yhteydenotolla palvelun tarjoajalle, joka korjasi tilanteen. Tämän jälkeen laitteistoa testattiin ja todettiin arvojen olevan johdonmukaisia ja vähintään riittävän tarkkoja.

Työmaakokeilussa saavutettiin yrityksen ja erehdytyksen kautta toimiva käyttömalli, joka täytti sekä asiakkaan, että opinnäytetyön toimeksiantajan tarpeet. Tämän käyttömallin pohjalta tuotettiin ohjeistus etäluettavan loggerin asennukseen työmaalla, sekä sen käyttöön muuten. Samalla etäluettavan salkun varustukseen lisättiin jatkojohto, mikä lisäsi laitteiston käytettävyyttä huomattavasti. Kun mittari todettiin toimivaksi systeemiksi, tilattiin opinnäytetyön toimeksiantajan Etelä-Suomen toimipisteiden yhteiseen käyttöön toinen, sekä Länsi-Suomeen yksi laitteisto. Lisäksi Pirkanmaan ja Pohjanmaan toimipisteiden yhteiseen käyttöön on hankittu kaksi etäluettavaa loggeria.

Etäluettavasta loggerista saatavat tulokset ovat hieman erilaisessa muodossa kuin aikaisemmin käytetyssä tallentavasta loggerista saadut tulokset. Tämä vaati lujuuslaskelmien tekemistä edellyttävien työkalujen päivitystä ja ohjeistuksen uusimista. Opinnäytetyön tekemisen aikana nämä päivitykset saatiin sellaiselle tasolle, että laskelmien tekeminen on mahdollista ja ne voidaan tehdä kohtuullisen vaivattomasti.

## 6.8 Kehityskohteet

Etäluettavan loggeripalvelun tarjoaja lupaa, että asiakas pystyy muokkaamaan tulosten tulkintaan tarkoitettuja raportteja ja näkymiä. Yksi työn painopisteistä on ollut se, että kerätään asiakkailta tietoa heidän tarpeistaan lämpötilan seuranta palveluista.

Tällä hetkellä etäluettavan loggerin ohjelmistoon on asetettu lämpötilojen hälytysrajat niin, että ne eivät varsinaisesti palvele asiakkaan tarpeita. Hälytykset tulevat silloin, kun korjausten tekeminen on jo monesti myöhäistä. Hälytysrajojen muokkaaminen on yksinkertainen projekti, joka ei vaadi kuin yhteydenoton etäluettavan loggerin palvelun tarjoajaan. Hälytysrajojen muokkaus ei pelkästään riitä, vaan asiakkaan pitäisi saada hälytyksistä ilmoitus esimerkiksi sähköpostiin, jotta asiaan voitaisiin reagoida riittävän nopeasti. Tällainen ominaisuus on palvelun tarjoajan mukaan saatavissa, mutta ongelmaksi syntyy se, että samaa laitteistoa kierrätetään eri asiakkailta. Tämä kehitysehdotus vaatii vielä suunnittelua toimiakseen kokonaan, mutta hälytysrajojen muokkaaminen järkeväksi aloitetaan heti ensi tilassa.

Asiakkaiden toiveista olisi tarpeellista saada etäluettavaa loggeria käytettäessä käyttöön verkkopohjainen näkymä, jossa näkyisi reaaliaikaisen lämpötilan lisäksi lämpötilahistoriaa vähintäänkin sen verran, että asiakas pystyisi päättämään onko lämpötilan kehitys nousussa vai laskussa. Tämä olisi mahdollisesti toteutettavissa niin, että näkymässä olisi myös merkintä esimerkiksi viimeisen kuuden tunnin aikaisista minimi ja maksimi lämpötiloista kanavittain. Ongelmallista asian kannalta on se, että loggeri ei aloita lämpötilan mittausta silloin, kuin betoni peittää anturit vaan silloin kun laite asennetaan. Laitteen asennuksen ja betonivalun välillä voi olla useitakin tunteja aikaa ja tällöin anturit mittaavat muotin sisällä olevan ilman lämpötilaa. Tällöin minimi ja maksimi lämpötilat eivät välttämättä kerro betonin lämpötilasta ja tämä vaikeuttaa tulosten tulkintaa.

Yksi asia, mitä asiakkaiden toiveissa tuli monesti eteen, oli reaaliaikainen arvio lujuuden kehityksestä. Tämän tuottaminen on hieman haasteellisempi ja raskaampi urakka, mutta ei välttämättä mahdoton. Tämän järjestämiseksi tulisi tehdä laskentaohjelma joka muokkasi lämpötiloja niin, että saadut tulokset olisi automaattisesti siirrettävissä lujuudenkehityksen laskentaohjelmaan. Tässäkin tilanteessa on edellä mainittu ongelma, laitteisto ei yksin tunnista millä hetkellä valu on alkanut. Tähän vaaditaan luultavasti aina fyysinen henkilö tulkitsemaan valun ajankohtaa.

Tähän asti opinnäytetyön toimeksiantajan kokemus lämpötilan vaikutuksesta betonin lujuuden kehitykseen perustuu teoriaan sekä tarkkaan tuntemukseen lujuudenkehityksestä standardiolosuhteissa, eli 20°C vesialtaassa pidettyjen kappaleiden puristuslujuuksista eri ikäisinä. Kiinnostavaa olisi kuitenkin tutkia kuinka tarkka teoria on suhteessa todellisiin olosuhteisiin. Esimerkki koejärjestelyinä voisi olla uuni, jonka lämmityksessä mukaillaan todellisen valun lämpötiloja. Uunissa pidettäisiin koekappaleita, joiden lämpötilaa seurattaisiin loggerilla. Koekappaleita voitaisiin puristaa eri iässä ja verrata puristutuloksia teoreettisiin laskelmiin. Kokeita olisi mielekästä järjestää useilla eri lujuusluokilla sekä huokostetusta-, että huokostamattomasta betonista. Tällä hetkellä ei opinnäytetyön tilaajalla ollut käytössä riittävää kalustoa joka mahdollistaisi riittävän tarkat koejärjestelyt. Järjestelyt vaatisivat riittävän ison uunin johon mahtuisi riittävä määrä koekappaleita ja sen lämpötilaa pystyttäisiin säätämään riittävän tarkasti. Lisäksi uuni pitäisi olla sijoitettuna niin, että koekappaleita päästäisiin testaamaan suhteellisen vaivattomasti ja nopeasti uunista poiston jälkeen. Tähän tutkimukseen ryhdytään, kun sopiva kalusto saadaan järjestettyä.

Tällä hetkellä opinnäytetyön toimeksiantaja tarjoaa tallentavaa ja etäluettavaa loggeripalvelua samaan hintaan asiakkaalle. Etäluettava systeemi kuitenkin aiheuttaa hieman suurempia kustannuksia kuin tallentava opinnäytetyön toimeksiantajalle, joten näiden palveluiden hinnoittelua tulee varmasti pohtia uudestaan. Asiakkaan näkökulmasta, kohteesta ja tarpeesta riippuen, etäluettava loggeripalvelu voi tulla jopa huomattavasti halvemmaksi pelkästään palvelun kannalta. Lisäksi mahdollisesti nopeutuva rakennusaikataulu voi aiheuttaa suuriakin säätöjä asiakkaalle. Nämäkin asiat puoltavat sitä ajatusta, että etäluettavasta loggeripalvelusta voisi pyytää himan suurempaa korvausta.

Opinnäytetyön tekemisen aikana opinnäytetyöntilaaja tilasi jo muutaman uuden etäluettavan laitteiston tutkittavan laitteiston lisäksi. Kaluston lisäämiselle vielä ennestäänkin tuntuu olevan tarvetta. Seuraavaksi pohdinnan alle tulee, onko tarvetta salkulle, joka sisältäisi useamman mittalaitteen, jotka on yhdistetty samaan lähettimeen. Tällä systeemillä olisi mahdollista mitata yhteensä kuudesta kohtaa valua betonin lämpötiloja ja näiden lisäksi kahdesta kohtaa ulkoilman lämpötilaa. Tällaiselle palvelulle voisi olla käyttöä esimerkiksi tilanteessa, jossa valetaan rakennetta, joka koostuu monenlaisista muodoista. Esimerkiksi suuri holvi, joka koostuu massiivisista palkeista ja suuresta laattamai-



sesta rakenteesta, voi vaatia useamman mittapisteen, jotta voidaan selvittää koko rakenteen lujuudenkehitys ja lämpötilaerot. Toinen käyttökohde voisi olla esimerkiksi työmaa, jossa valetaan kaksi holvia saman päivän aikana tai peräkkäisinä päivinä. Tällöin pystyttäisiin molempien holvien lämpötilaa seuraamaan yhdellä laitteistolla. Laitteisto toimisi myös kohteissa, joissa on kyseessä suuri valualue ja asiakas haluaa saada tuloksia sen koko alueelta.

## 7 Johtopäätökset

Eri lujuudenkehityksen arviointimenetelmiä vertaillen ilmeni, että tällä hetkellä opinnäytetyön toimeksiantajan käyttämä Sadgroven menetelmä soveltuu tarkkuutensa puolesta hyvin lujuudenkehityksen arvioimiseen. Menetelmän käyttö on kohtuullisen vaivastonta ja laskennan päivittäminen vastaamaan mahdollisesti vaihtuvia materiaaleja ja suhteituksia onnistuu riittävän helposti. Monimutkaisemman laskenta metodin käyttöönotto vaatisi huomattavasti materiaalia ja tutkimusta. Tämä on periaatteessa mahdollista toteuttaa, mikäli tulevaisuudessa sille ilmenee tarvetta, mutta se tulee vaatimaan huomattavaa suunnittelua ja resursointia.

Etäluettava loggeri on opinnäytetyön tekemisen aikana todettu toimivaksi ja tarkoituksenmukaiseksi systeemiksi. Sen edut ovat ilmenneet etenkin valuissa joissa pystytään hallitsemaan lämpötiloja lujuuden kehityksen aikana. Tällaisia käyttökohteita ovat esimerkiksi massiiviset valut, kylmällä ilmalla betonointi sekä työmaille joissa aikataulu on tiukkoja ja muottikierto tulee optimoida. Jatkossa etäluettavaa loggeria tullaan suosittamaan etenkin holvivaluihin ja muihin massiivisiin rakenteisiin.

Ennen opinnäytetyön aloittamista työn tilaaja oli saanut kasvavassa määrässä palautetta etäluettavan lämpötilamittausjärjestelmän tarpeesta. Opinnäytetyön tekemisen aikana tähän tarpeeseen on pystytty vastaamaan ja palaute on asiakkaiden puolesta ollut pelkästään positiivista. Etäluettava loggeripalvelu on saatu kehitettyä toimivaksi systeemiksi ja kalustoa on lisätty sekä ollaan jatkuvasti lisäämässä. Järjestelmän kehitykseen on myös syntynyt tarvetta ja sitä tullaan kehittämään käytön aikana yhteistyössä palvelun tarjoajan kanssa.

Kokonaan perinteistä tallentavaa loggeria ei etäluettava järjestelmä ole syrjäyttänyt, eikä tällaiselle toimenpiteelle ole näkyvissä tarvettakaan. Tallentava loggeri on hieman helpokäyttöisempi tapa mitata lämpötiloja eikä se ole riippuvainen verkkovirrasta tai GSM-verkon voimakkuudesta. Tallentava loggeri sopii erityisen hyvin kohteisiin, jossa loggeripalvelun tarkoitus on toimia laadun varmistuksessa, eikä tulosten saamisen ajankohta ole tärkeä asiakkaalle. Opinnäytetyön tilaaja tulee korvaamaan osan tallentavista loggereista etäluettavilla sitä mukaa kun tallentavia loggereita rikkoontuu.

Kustannusten puolesta etäluettava loggerijärjestelmä on opinnäytetyön tilaajalle himan kallimpi kuin aikaisemmin käytössä ollut tallentava järjestelmä. Kuitenkin kustannuksia tarkasteltaessa pystyttiin toteamaan, että etäluettavaa loggeria käytettäessä syntyi vähemmän ns. piilokustannuksia esimerkiksi sen puolesta, että etäluettava loggeri sitoo vähemmän kalustoa ja työtunteja monissa kohteissa, kun perinteinen tallentava loggeri.

Etäluettavan loggeripalvelun tarjoaminen voi parhaimmillaan jopa osoittautua myyntivaliksi rakennusprojektien tarjousvaiheessa. Opinnäytetyötä tehdessä monet asiakkaat olivat kuulleet etäluettavasta järjestelmästä, mutta pitivät sitä epäluotettavana. Joillain oli valmiiksi negatiivisia kokemuksia etäluettavista loggereista, joiden toimivuutta pidettiin epävarmana ja tuloksien oikeellisuutta kyseenalaistettiin. Kun opinnäytetyön tilaajalla on nyt hallussaan tutkimustuloksia ja luotettavaksi osoitettu järjestelmä, on etäluettavalle loggeripalvelulle varmasti tulevaisuudessa kovaakin kysyntää.

Allekirjoittaneelle opinnäytetyön tekemisen aikana kertyi valtava määrä tietoa lujuudenkehityksen arvioinnista ja siitä, miksi lujuudenkehitystä on tärkeä seurata. Lisäksi etäluettavan loggerin testauksen aikana tuli laitteen käyttö ja ominaisuudet hyvin tutuiksi ja näitä oppeja tullaan jakamaan opinnäytetyön toimeksiantajan yrityksen sisällä.

Opinnäytetyössä saavutettiin opinnäytetyön toimeksiantajan kannalta tavoitteet, mitä työn aloittaessa lähetettiin hakemaan. Lisäksi opinnäytetyö tulee toimimaan erinomaisena dokumenttina betonin lujuudenkehityksen arviointiin liittyvän tiedon tarkistamisessa.

## Lähteet

- [1.] Swerock verkkosivut, [<https://swerock.fi/>] viitattu 30.5.2018
- [2.] Suomen Betoniyhdisty ry. Oppikirja by201 2018. Helsinki: BY-Koulutus Oy, 2018. ISBN 978-952-68619-4-4
- [3.] Suomen Betoniyhdisty ry. Oppikirja by201 2004. Helsinki: BY-Koulutus Oy, 2012. ISBN 978-952-67169-6-1
- [4.] Anton Van Beek. Dielectric properties of young concrete - Non-destructive dielectric sensor for monitoring the strength development of young concrete. Delft, Alankomaat: Delft University Press, 2000. ISBN 978-904-07201-7-8
- [5.] Liikennevirasto. Kimmovasaran käyttäjän ohje - Liikenneviraston ohjeita 21/2016. Helsinki: Liikennevirasto, 2016. ISBN 978-952-317-280-7
- [6.] Soutsos, M., Kanavaris, F., & Hatzitheodorou, A. Critical analysis of strength estimates from maturity functions, Case Studies in Construction Materials. Belfast, Iso-Britania: Queen's University Belfast, 2018
- [7.] Lagzi, I., Mészáros, R., Gelybó, G., Leelőss Á. Atmospheric Chemistry. [verkkójulkaisu.] 2013. [viitattu 6.4.2019.]. Saatavilla: <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/AtmosphericChemistry/ch03s06.html>
- [8.] Suomen Betoniyhdistys ry. Betoninormit By 65. Helsinki: BY Koulutus Oy, 2016. ISBN 978-952-68068-4-6
- [9.] KONE-RATU 06-3023 Muottikaluston valinta ja käyttö. Suunnitteluohje. Rakennustieto 1992
- [10.] InfraRYL 2006 Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset Osa 3 Sillat ja rakennustekniset osat. Hämeenlinna: Rakennustieto Oy, 2008
- [11.] Jack, Peter Michael. Physical Space as a Quaternion Structure, I: Maxwell Equations. A Brief Note. Toronto, Kanada, 2003
- [12.] testo 176T4 - Four-channel temperature data logger. [verkkójulkaisu.] 2019. [viitattu 5.7.2018.] Saatavilla: <https://www.testo.com/en-US/testo-176t4/p/0572-1764>
- [13.] Nokeval verkkosivu. [verkkójulkaisu.] 2019. [viitattu 1.11.2018.] Saatavilla: [https://www.nokeval.com/olosuhdevalvonta/mittalaitteet/kannettava\\_lampotilan\\_mittaussalkku/](https://www.nokeval.com/olosuhdevalvonta/mittalaitteet/kannettava_lampotilan_mittaussalkku/)
- [14.] Nokeval CELL-MTR 3G base station. [verkkójulkaisu.] 2019. [viitattu 1.11.2018.] Saatavilla: [https://www.nokeval.com/en/products/transmitters\\_converters/wireless\\_devices/base\\_stations/cell\\_mtr/](https://www.nokeval.com/en/products/transmitters_converters/wireless_devices/base_stations/cell_mtr/)
- [15.] Tiehallinto. Sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset, BETONIRAKENTEET - SYL 3. Helsinki: Tiehallinto, 2002. ISBN 951-726-768-1

[16.] FTR264 Series Manual, Nokeval. [verkkajulkaisu.] 2016. [viitattu 5.12.2018.] Saatavilla: [https://www.nokeval.com/data/documents/FTR264-Series\\_V2.0\\_2016-12-05\\_manual\\_EN%20\(ID%206693\).pdf](https://www.nokeval.com/data/documents/FTR264-Series_V2.0_2016-12-05_manual_EN%20(ID%206693).pdf)

## Kuvalähteet

[a.] Suomen Betoniyhdistys ry. Betoninormit By 65. Helsinki: BY Koulutus Oy, 2016. ISBN 978-952-68068-4-6

[b.] Soutsos, M., Kanavaris, F., & Hatzitheodorou, A. Critical analysis of strength estimates from maturity functions, Case Studies in Construction Materials. Belfast, Iso-Britania: Queen's University Belfast, 2018

[c.] Sovellutusopas Betonivalun lämpötilan mittaus langattomilla lähettimillä. [verkkajulkaisu.] 2019. [viitattu 5.3.2019.] Saatavilla: <https://docplayer.fi/5559551-Sovellutusopas-betonivalun-lamportilan-mittaus-langattomilla-lahettimilla.html>