

Valtteri Tokkonen, Juha Uusitalo

TALVIBETONOINTI

Insinöörityö
Kajaanin ammattikorkeakoulu
Tekniikan ja liikenteen ala
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Kevät 2013



Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma
Tekijä(t) Tokkonen Valter, Uusitalo Juha	
Työn nimi Talvibetonointi	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Tuotantotekniikka	Ohjaaja(t) Hietala Hannu Toimeksiantaja RPK Rakennus Kemppainen Oy
Aika Kevät 2013	Sivumäärä ja liitteet 99+15
<p>Tämä insinööri työ tehtiin RPK Rakennus Kemppainen Oy:lle keväällä 2013. Työn tavoitteena oli koota tietoa talvibetonoinnista selkeästi yhteen paikkaan ja vertailla eri talvibetonointivaihtoehtojen kustannuseroja. Tämän lisäksi laadittiin talvibetonointiohje työmaiden työnjohdon käytettäväksi.</p> <p>Teoriaosuus rajattiin käsittelemään betonoinnin työmaatekniikkaa, betonin ominaisuuksia sekä erilaisia betonilatuja ja betonin lisäaineita.</p> <p>Teoriaosuuteen kerättiin tietoa painettujen lähteiden lisäksi internetistä sekä haastattelemalla betonoinnin parissa työskenteleviä henkilöitä. Monipuolisen haastatteluhajonnan saavuttamiseksi ja luotettavuuden parantamiseksi haastateltaviksi valittiin eri työtehtävissä toimivia betonoinnin ammattilaisia. Haastateltavina oli rakennustyömaan työnjohtajia, lankalämmityksiä pitkään asentanut rakennusmies, betonipumppuauton kuljettaja ja valmisbetoniaseman työntekijä.</p> <p>Haastattelujen ja laskelmien perusteella saatiin arvioitua edullisimmat betonin lämmitysmuodot eri rakenteita valittaessa. Talvibetonointiin liittyvien lukuisten muuttujien takia kustannuslaskelmista on käytännössä mahdotonta saada täysin tarkkoja, mutta ne antavat kuitenkin hyvän kuvan siitä, mitä lämmitystapaa kussakin tilanteessa kannattaa käyttää.</p> <p>Talvibetonointiohje koettiin haastattelujen perusteella tarpeelliseksi työmailla esimerkiksi harjoittelijoille sekä työnjohtajille, joilla on vähemmän kokemusta talvibetonoinnista. Ohjetta voidaan käyttää lisäksi työnjohdon muistilistana talvibetonointia suunniteltaessa.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Talvibetonointi, betoni, betonilämmitys
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Verkkokirjasto Theseus <input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto



School School of Engineering	Degree Programme Construction Engineering
Author(s) Tokkonen Valtteri, Uusitalo Juha	
Title Winter Concreting	
Optional Professional Studies Production Technology	Instructor(s) Hietala Hannu
	Commissioned by RPK Rakennus Kempainen Oy
Date Spring 2013	Total Number of Pages and Appendices 99+15
<p>This Bachelor's thesis was commissioned by RPK Rakennus Kempainen Oy in the spring of 2013. The main purpose of the thesis was to gather information about winter concreting in one place and to compare the price differences between different methods of winter concreting. In addition, a guide about winter concreting was drafted for construction foremen to use.</p> <p>The theory part was limited to discuss the construction techniques of concreting, concrete's properties and different types of concrete and the use of chemical admixtures for concrete.</p> <p>Material for the theory part was collected from books and different Internet sources and by interviewing people working with concrete. Different types of concreting professionals such as construction foremen, an experienced construction worker, a concrete pump truck driver and a concrete station worker were interviewed to get different points of view and more versatile answers.</p> <p>The cheapest methods of concrete heating could be roughly estimated based on the interviews and calculations. It is practically impossible to calculate the costs of winter concreting completely accurately due to the numerous variables related to it. Those calculations still give a good idea about what heating method should be used in each situation.</p> <p>Based on the interviews, a guide for winter concreting was seen as a useful tool to use as a checklist when planning winter concreting. It can also provide useful information for trainees and construction foremen with less experience about winter concreting.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	Winter concreting, concrete, concrete heating
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Electronic library Theseus <input type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

ALKUSANAT

Tässä työssä tarkasteltiin talvibetonointia ja laskettiin eri talvibetonointitapojen kustannuksia sekä verrattiin niitä kesäolosuhteissa tapahtuvan betonoinnin kustannuksiin. Insinööriyön tilaajana toimi RPK Rakennus Kemppainen Oy.

Tilaaajan puolelta työtä ohjasi ja valvoi yrityksen toimitusjohtaja Samuli Myllykoski. Koulun puolelta ohjaajana toimi opettaja Hannu Hietala.

Haluamme kiittää työn ohjaajia hyvistä neuvoista sekä tuesta koko työn ajalta. Lisäksi kiitämme haastattelemiamme henkilöitä, joilta saatiin arvokasta käytännön tietoa työtä varten. Toivomme, että insinööriyöstä ja sen tuloksista on tilaajalle tulevaisuudessa hyötyä talvibetonointia suunniteltaessa.

Valtteri Tokkonen ja Juha Uusitalo

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 YLEISTÄ TALVIBETONOINNISTA	3
2.1 Betonityön suunnittelu	3
2.2 Alustavat työt	4
2.3 Betonointikalusto	5
2.4 Muotit	8
2.5 Betonityön suoritus	9
3 SÄÄOLOSUHTEET JA BETONIN SIIRROT	15
3.1 Sääolosuhteiden vaikutus betonointiin	15
3.2 Kuljetuksen ja käsittelyn vaikutus betonin lämpötilaan	18
4 BETONIN VALINTA	21
4.1 Lujuusluokan vaikutus betonin ominaisuuksiin	21
4.2 Betonin lisäaineet	22
4.2.1 Notkistimet	24
4.2.2 Huokostimet	24
4.2.3 Hidastimet	24
4.3 Rasitusluokat	25
4.4 Nopeasti kovettuva betoni	27
4.5 Kuumabetoni	29
4.6 Betonin lämpökäsittely	31
4.7 Pakkasbetoni	33
4.8 Säänkestävä (pakkasenkestävä) betoni	35
5 BETONIN LUJUUDENKEHITYS	38
5.1 Lujuudenkehityksen seuranta	39
5.2 Lämpötilamittaukset	40
6 BETONIN LUJUUDENKEHITYKSEN YLLÄPITO	45
6.1 Betonivalun lämmitys	45
6.1.1 Lankalämmitys	46
6.1.2 Lämpömuotit	55

6.1.3 Puhallinlämmitys	56
6.1.4 Säteilylämmitys	58
6.1.5 Höyrylämmitys	60
6.2 Betonivalun suojaaminen	61
6.3 Jälkihoito	64
7 YLEISIMMÄT VIRHEET TALVIBETONOINNISSA	66
8 TALVIBETONOINNIN KUSTANNUKSET	69
8.1 Yleiset kustannukset	69
8.1.1 Betonoinnin ja betonin lisäkustannukset	70
8.1.2 Valun eristämisen kustannukset	72
8.2 Lämmityskustannukset	73
8.2.1 Lankalämmitys	75
8.2.2 Lämpömuotit	77
8.2.3 Puhallinlämmitys	78
8.2.4 Säteilylämmitys	79
9 KUSTANNUSTEN VERTAILU	81
9.1 Betonoinnin kustannuserot talvi- ja kesäolosuhteissa	81
9.2 Lämmitysvaihtoehtojen vaikutus kustannuksiin	82
9.3 Betonivaihtoehtojen vaikutus lämmitysenergiankulutukseen ja muottikiertoon	83
10 YHTEENVETO	96
LÄHTEET	97
LIITTEET	

KÄSITELUETTELO

Betoni = Betoni on keinotekoinen kivi, jossa kovettunut sementtiliima eli sementtikivi sitoo runkoainerakeet yhteen. Pääraaka-aineet ovat sementti, vesi ja runkoaineet.

Hydrataatio = Hydrataatio on veden ja sementin reaktio, jonka vaikutuksesta sementin ja veden muodostama seos kovettuu kuivuessaan.

Karbonatisoituminen = Betonin neutraloitumisreaktio, missä ilman hiilidioksidi tunkeutuu betoniin ja alentaa betonin sisältämän huokosveden emäksisyyttä.

Runkoaine = Runkoaine on betonin valmistukseen käytettävää kiviainesta, jonka raekoko vaihtelee tavallisesti 0,02...32 mm välillä.

Sementti = Sementti on hydraulinen sideaine, joka kovettuu reagoidessaan veden kanssa.

1 JOHDANTO

Suomen olosuhteissa jopa 2/3 vuodesta lasketaan betonoinnin kannalta talvikaudeksi. Tämän seikan takia talvibetonointi on suuri osa suomalaista rakentamista.

Talvibetonoinnista on saatavilla melko vanhaa, mutta silti käytännöllistä tietoa. Tieto on hajautettu melko laajasti eri kirjoihin ja yhtä selkeätä teosta ei löytynyt. Enemmän tietoa talvibetonoinnista on saatavilla erilaisten koulutusten ja yritysten sisäisten tietojen kautta, mutta yleisessä jakelussa tietoa ei ole tarpeeksi saatavilla. Erityisesti tietoa eri betonointivaihtoehtojen kustannuksista on hyvin huonosti saatavilla, eikä erilaisten lämmitystapojen kustannuksia ole juurikaan vertailtu.

Työn tilasi RPK Rakennus Kempainen Oy, joka on Kainuun alueella toimiva, noin 100–150 henkilöä työllistävä rakennusliike. Tilaajayritys toimii vuosittain pääurakoitsijana useissa suurissa rakennuskohteissa, joista useimmissa betonointia joudutaan tekemään talviolosuhteissa. Tästä johtuen eri betonointimenetelmien ja niiden kustannuksien tutkiminen nähtiin tarpeelliseksi.

Työ päätettiin tehdä kahden opiskelijan yhteistyönä, sillä suoritimme molemmat työharjoittelujaksomme tilaajayrityksessä ja saimme kokemusta sekä kesä- että talviolosuhteissa tapahtuvasta betonoinnista. Insinööriyön teoriaosuus päätettiin jakaa karkeasti kahteen alueeseen, betonin ominaisuuksiin ja betonoinnin työmaatekniikkaan, jolloin molemmille saatiin oma pääaihealue. Valtteri Tokkonen keskittyi pääasiassa betonin ominaisuuksiin ja Juha Uusitalo betonoinnin työmaatekniikkaan. Lisäksi molempien osaamista hyödynnettiin kussakin aihealueessa tarpeen mukaan. Betonoinnin kustannuslaskelmissa yhdistyvät molempien pääaihealueiden tiedot ja ne laadittiinkin kokonaan yhdessä.

Insinööriyössä käsitellään betonoinnin työmaatekniikkaa muun muassa suunnittelun, kaluston, työn suorituksen ja erilaisten betonin lämmitysmuotojen osalta. Lisäksi työssä tutkitaan eri betonilaatuja, niiden ominaisuuksia, sääolosuhteiden vaikutusta betonointiin sekä lämpötilan vaikutusta betonin lujudenkehitykseen. Laskelmissa tutkitaan eri lämmitysmuotojen ja eri betonilaatujen käytön vaikutusta betonoinnin kustannuksiin sekä vertaillaan kesä- ja talviolosuhteissa suoritettun betonoinnin kustannuseroja. Kohdassa 9 esitellään laskelmien tulokset. Tulosten perusteella vertaillaan edullisimpia lämmitystapoja sekä eri betonivaihtoehtojen vaikutusta kustannuksiin.

Työmaiden työnjohdon käyttöön laadittiin talvibetonointiohje, jota voidaan käyttää muistilistana talvibetonointia suunniteltaessa. Ohjeeseen liitettiin Finnsementti Oy:n lujoudenkehitysohjelmaa apuna käyttäen laadittu taulukko, jossa on esitetty karkeat arviot muotinpurkulujuuksista eri betonilaatuja ja eri betonin tavoitelämpötiloja käytettäessä. Ohjeeseen pyrittiin tiivistämään insinööriyön teoriaosuuden olennaisimmat asiat sekä haastattelujen perusteella saatu hyödyllinen käytännön tieto.

2 YLEISTÄ TALVIBETONOINNISTA

2.1 Betonityön suunnittelu

Betonointia varten tulee aina tehdä betonityösuunnitelma, jonka merkitys korostuu entisestään talvibetonoinnissa. Aluksi suunnitelma voi olla karkeampi yleissuunnitelma, jota tarkennetaan valettavan kohteen ja olosuhteiden mukaan. Talvibetonointisuunnitelmassa on otettava huomioon mm. seuraavat asiat [1, s. 162]:

- betonointikalusto ja käytettävissä oleva työvoima
- muottikierto ja sen edellyttämä muottikaluston määrä
- kunkin valettavan kohteen muotinpurkulujuus sekä rakenteiden ja muottien tuenta
- betonin suojaus, lämmitys ja lämpötilaseuranta
- kylmän sään vaikutus työn suorittamiseen ja aikatauluun.

Hyvin tehty betonityösuunnitelma auttaa betonoinnin suorittamisessa, jolloin työt saadaan sujumaan aikataulussa ja lisätään kustannustehokkuutta. Betonityösuunnitelman pohjana voidaan käyttää esimerkiksi By 401 -betonointipöytäkirjalomaketta.

Ennen muottityön aloitusta tulee laatia muottisuunnitelma. Muottisuunnitelman pitää olla osa koko työmaan kone- ja kalustosuunnitelmaa ja siinä tulee miettiä muottityön vaatimat laitteet, niiden määrät, henkilöstön lisätarve ja tarveajat. Muottisuunnitelman tarkoituksena on muottien tehokas käyttö ja kierto, kustannusten optimointi, työn laatuvaatimusten täyttäminen ja aikataulussa pysyminen. [2, s. 233–235.]

Talvirakentamista ajatellen muottisuunnitelmassa on mietittävä, mitä ongelmia ja haasteita muottien käyttö ja säilytys talvella aiheuttaa. Talvella muottityön yleisimmät hidasteet ovat lumen ja jään poisto, pakkaspäivät, suojaus ja lämmitys. Näitä seikkoja on hyvä pohtia muottityön näkökulmasta jo muottisuunnitelmaa tehtäessä. [2, s. 235.]

Betonimassa on tilattava hyvissä ajoin ennakkoon, jolloin varmistutaan siitä, että massa saapuu työmaalle suunniteltuna ajankohtana eikä turhia odotusaikoja pääse syntymään. Ennen

massan toimitusta on huolehdittava, että ajoreitit työmaalle ja itse valukohteelle ovat kunnossa. Kuljetussäiliöauto täydessä lastissa voi painaa yli 30 000 kg, joten ajoreittien kantavuus on ehdottomasti varmistettava. Tarvittaessa kantavuus varmistetaan esimerkiksi kairaustutkimuksin. Lisäksi työskentelykohteessa on oltava riittävästi tilaa esimerkiksi betonipumppuautoa ja kuljetussäiliöautoa varten; ne vaativat yhdessä noin 20 metriä vapaata tilaa. Pumppuauton tukijalkojen vaatima tila leveyssuunnassa on yleensä noin 7 metriä ja puomin avaamiseen tarvittava korkeus vähintään 11 metriä. Mitat vaihtelevat käytettävästä betonipumppuautomallista riippuen. Pumppaamisen aloittaminen talviolosuhteissa nopeutuu huomattavasti, mikäli pumppuauton paikka on suunniteltu valmiiksi ja puhdistettu lumesta sekä hiekoitettu hyvin. Mahdolliselle ylijäämäbetonille tulee suunnitella sijoituspaikka ennen töiden aloittamista. [3.]

Liikennejärjestelyistä laaditaan rakennuttajan tai tienpitäjän niin vaatiessa erillinen kirjallinen suunnitelma. Mikäli työmaa sijaitsee yleisen tien vierellä, tai siitä voi muuten aiheutua haittaa muulle liikenteelle, on työmaasta varoitettava asianmukaisin liikennemerkein ja tarvittaessa järjestettävä vaihtoehtoiset ajoreitit. Työmaan sisäiset liikennejärjestelyt voidaan suunnitella esimerkiksi laadittaessa työmaan aluesuunnitelmaa. Liikennejärjestelyt tulee aina suunnitella niin, että työmaan läpi pääsee ajamaan. Tällä varmistetaan esimerkiksi rekka-autojen turvallinen poistuminen työmaalta peruuttelematta. Ajoreitit tulee olla työmaalla selvästi merkitty ja työnjohdon vastuulla on huolehtia työntekijöiden perehdyttämisestä työmaan järjestelyihin.

2.2 Alustavat työt

Perustuksia tehtäessä on huolehdittava, että niitä ympäröivä maa ei ole jäässä eikä lumen peitossa. Edullisin tapa estää maan jäätyminen on kaivaa perustusten vaatima kaivanto vain vähän ennen valua ja suojaamalla se eristematoilla. Tämän menetelmän käyttäminen vaatii hyvää suunnittelua työvaiheiden yhteensovittamisesta.

Mikäli maapohja on päässyt jäätymään, on se sulatettava ennen kuin perustuksia voidaan valaa. Jäätynyttä maata voidaan sulattaa esimerkiksi höyryllä tai kuumalla ilmalla, jolloin sulatettava maa-alue suojataan peitteillä ja höyry tai kuuma ilma puhalletaan suojapeitteiden alle. Vaihtoehtoisia sulatusmenetelmiä ovat muun muassa sähköiset routamatot, säteilylämmitys sekä höyry- tai kuumavesiletkujen käyttö. [4, s. 30–31.]

Muotti- ja raudoitustyön yhteydessä valettavaan kohteeseen asennetaan mahdollisesti käytettävät betonin lämmitykseen tarkoitetut vastuslangat sekä lämpötilan mittausanturit. Lisäksi muotit voidaan tarpeen mukaan lämpöeristää. Valmis muotti suojataan siten, ettei muotin sisälle pääse kertymään lunta tai jäätä.

Juuri ennen betonityön alkua muotit ja käytettävä kalusto puhdistetaan lumesta ja jäästä. Jos valumuotit puhdistetaan ja lämmitetään höyryllä liian aikaisin, voi höyrystä muottipintaan tiivistyvä kosteus jäätyä, joten höyrytyksen oikea ajoitus on erittäin tärkeää. Lisäksi mahdollisesti jäänyt raudoitus sulatetaan, jotta betonin ja raudoituksen välille saadaan aikaan hyvä tartunta. Betonin lämpöä ei saa käyttää jään sulattamiseen raudoitteista, sillä silloin betoni ja raudoitus voivat jäädä irti toisistaan, eikä rakenne toimi suunnitellulla tavalla. Suuret lumimäärät poistetaan mekaanisesti, esimerkiksi lapioimalla tai harjaamalla. Pienten lumi- ja jäämäärien sekä raudoituksen sulattaminen onnistuu helpoiten höyryllä, jolla saadaan samalla lämmitettyä itse muotti. Esilämmityksessä muottipinnan lämpötila ei saa nousta liian korkeaksi, ettei betonin pinta kovetu liian nopeasti. Pienet määrät kevyttä lunta voidaan poistaa myös puhaltamalla esimerkiksi reppumallisilla puhaltimilla. Näillä toimenpiteillä estetään betonin jäähtymistä sekä varmistetaan muotin täyttyminen oikein ja raudoituksien tarkoituksenmukainen tartunta. [1, s. 168; 5, s. 39.]

2.3 Betonointikalusto

Betoni tuodaan yleensä työmaalle sekoitussäiliöautolla. Sekoitussäiliöauton kuljetussäiliö on pyörivä ja varustettu sekoitussiivillä, joten betonia voidaan tarvittaessa sekoittaa juuri ennen valua. Allassäiliöauto on harvemmin käytetty betonin kuljetusauto, jolla nykyään kuljetetaan lähinnä maakostea betonia.

Kun betoni tulee työmaalle, se sijoitetaan tarpeen vaatimalla tavalla. Betoni voidaan ottaa säiliöautosta suoraan nostoastiaan, vastaanottosäiliöön, betonipumppuun, tai muottiin jos mahdollista. Kuvassa 1. on esimerkki betonin nostoastiasta. Nykyään yleisin betonointitapa, lukuun ottamatta pieniä valuja, on betonipumpun käyttö. [1, s. 66–67.]



Kuva 1. Betonin nostoastia. (Kuva: Juha Uusitalo)

Talvibetonointia varten tarvitaan normaalin kaluston lisäksi ainakin betonivalun lämmityslaitteet, lujuudenkehityksen seurantalaitteet, betonivalun suojaus- ja lämmöneristystarpeet, lumen ja jään poistoon soveltuvat laitteet ja talven lyhyen valoisan ajan vuoksi valaistuslaitteet [1, s. 169].

Höyrykehityslaitteet soveltuvat erityisen hyvin lumen ja jään poistoon raudoituksista ja muoteista. Höyrykehityslaitteiden lisäksi käytössä on hyvä olla lämpöpuhaltimia, lumenluontivälineitä ja sääsuojaustarpeet. Roudan sulatukseen käytetään yleensä roudansulatusvaunua, jossa on lämpökattila ja useampi sata metriä lämpöletkuja. Roudansulatusvaunu voi käyttää lämpöenergian tuottamiseen esimerkiksi polttomoottoria ja letkuissa kiertävän kuumen nesteen lämpötila voi olla jopa +90 °C. Routaa saadaan roudansulatusvaunulla sulamaan mallista riippuen esimerkiksi 30..40 cm/vrk. Esimerkki roudansulatusvaunusta kuvassa 2. [6, s. 5.]



Kuva 2. Roudansulatusvaunu.

Betonivalun lämpösuojaukseen tarvitaan lämpösuojaustarpeet ja niitä ovat esimerkiksi eristematot, pressut, sääsuojahallit ja muut suojaustarvikkeet. Betonin lämmitystä varten tarvitaan kohteeseen soveltuvat lämmitysvälineet, esimerkiksi säteilylämmittimet, lämpöpuhaltimet, vesikiertopuhaltimet, lämmitysmuuntajat tai betonin sähkölämmitystarvikkeet. [6, s. 5.]

Itse betonin valuvaiheessa tarvitaan ainakin tiivistyskalusto, lapioita, mahdolliset hiertovälineet ja jälkihoitoon tarvittavat välineet. Lisäksi betonityöhön osallistuville työntekijöille on varattava tavanomaisten työvarusteiden lisäksi henkilökohtaiset suojavälineet eli kumisaappaat, betonointiin soveltuvat nitrilikumipinnoitetut suojakäsineet sekä suojalasit.

Betonointikalusto tulee aina miettiä tapauskohtaisesti, ottaen huomioon työn vaativuus, valitsevat olosuhteet ja käytössä oleva aika.

2.4 Muotit

Muottien pääasiallinen tehtävä on tukea betonivalua ja saattaa se lopulliseen muotoonsa. Muottien on kestävä betonivalun aiheuttamat kuormat, kunnes betoni on saavuttanut muottien purkuun tarvittavan lujuuden.

Muottityyppejä on monia erilaisia. Työmaalla yleisimmin käytetyt muottityypit ovat paikalla tehdyt lauta- tai levymuotit ja järjestelmämuotit. Järjestelmämuotit ovat tietyn valmistajan tekemiä kasettimuotteja, joita voidaan helposti yhdistellä ja kiinnittää toisiinsa. Kuvassa 3. on järjestelmämuotteja varastoituna työmaalle. Muotteja voidaan luokitella myös vaaka- ja pystymuotteihin. Käytetyimmät muottimateriaalit ovat puu, puulevy, teräs, alumiini ja muovi.



Kuva 3. Järjestelmämuottien säilytys työmaalla. (Kuva: Juha Uusitalo)

Muottimateriaaleista puu on pisimpään käytössä ollut materiaali. Puuta voidaan käyttää muotissa runko-, tuki- tai pintamateriaalina. Pintamateriaali on yleensä puulevyä, esimerkiksi vaneria. Puun käyttöä puoltavat muun muassa sen edullisuus ja helppo käsiteltävyys. [2, s. 211–213.] Jos pinnoittamattomasta puusta tehdään muotin pintamateriaali, sen pintaan pitää eh-

dottomasti laittaa muottiöljyä ennen valua. Jos pintaa ei öljytä, puu imee betonimassasta vettä ja vähentää sen pintahuokosten syntyä. [7.]

Terästä voidaan käyttää muotissa runko- ja pintamateriaalina. Useimmat järjestelmämuotit ovat teräsrunkoisia. Teräksen vahvuuksia ovat sen suuri kulutus- ja kuormituskestävyys. Teräksen käyttöä rajoittaa sen suuri paino.

Alumiinia on ruvettu käyttämään Suomessa muottimateriaalina vasta 1970-luvun lopulla. Alumiinia voidaan käyttää muoteissa samoin kuin terästä, ja se on terästäkin kestävämpi materiaali. Alumiinirakenteisten muottien etuna on niiden keveys, joka vähentää myös nostokapasiteetin tarvetta ja helpottaa niiden käsittelyä. Alumiinin käyttöä rajoittava tekijä on sen teräkseen verrattuna korkea hinta. [2, s. 211–213.]

Muottien taloudellisen käytön ja laadukkaan betonipinnan saavuttamiseksi muotteja on syytä huoltaa hyvin työmaan aikana ja varastoitaessa [2, s. 211–213].

2.5 Betonityön suoritus

Talvibetonoinnin perusteet ovat lähes samat kuin kesällä betonoinnissa. Talven lisätöitä ovat lähinnä betonimassan lämmitys ja kaluston sekä muottien höyrytys. Lisäksi talvella pakkaneen, lumi ja jää vaikeuttavat ja hidastavat useiden työvaiheiden suorittamista. Talvibetonoidessa myös työnjohdon suorittaman valvonnan tarve korostuu ja epäonnistumisen riskit ovat suurempia kuin kesällä betonoidessa. Talvibetonoinnin suunnittelua ja suoritusta helpottamaan on laadittu talvibetonointiohje, joka on liitteenä 5. [8.]

Ennen varsinaisen betonityön aloittamista on valittava työtä varten sopivan suuruinen betonityöryhmä ja huolehdittava työntekijöiden mahdollisesti tarvittavasta perehdyttämisestä. Lisäksi hankitaan työryhmälle riittävä määrä henkilökohtaisia suojavarusteita ja varakalustoa mahdollisten kalusterikkojen varalle.

Betoni on pyrittävä siirtämään muottiin siten, että sen laatu pysyy mahdollisimman tasaisena ja että se täyttää tarkasti koko muotin. Muottien täyttö tapahtuu tavallisesti enintään 30...50 senttimetrin paksuisina tasaisina kerroksina. Kerrosten paksuus riippuu käytettävän betonimassan ominaisuuksista, rakenteen raudoituksesta sekä betonille asetetuista vaatimuksista. [2, s. 317.]

Betonimassa on laskettava suoraan sen lopulliselle sijoituspaikalle ja vältettävä turhia siirtoja. Massaa ei saa pudottaa korkealta, vaan maksimipudotuskorkeus on noin 1...1,5 metriä. Myös betonimassan iskeytymistä vinoihin pintoihin sekä raudoitukseen tulee mahdollisuuksien mukaan välttää. Edellä mainituissa tapauksissa karkeampi runkoaine jää paikoilleen ja hienoaines leviää erilleen. Tätä kutsutaan massan erottumiseksi. [2, s. 317–319.]

Betoni on tiivistettävä jokaisen massakerroksen välissä. Tiivistyksellä betonimassasta poistetaan ylimääräinen ilma, saadaan betonin kiviainekset lähemmäksi toisiaan ja saadaan massa täyttämään muotit sekä ympäröimään raudoitus suunnitellulla tavalla. Lisäksi tiivistyksellä saadaan uudet massakerrokset liittymään saumattomasti aiempaan kerrokseen.

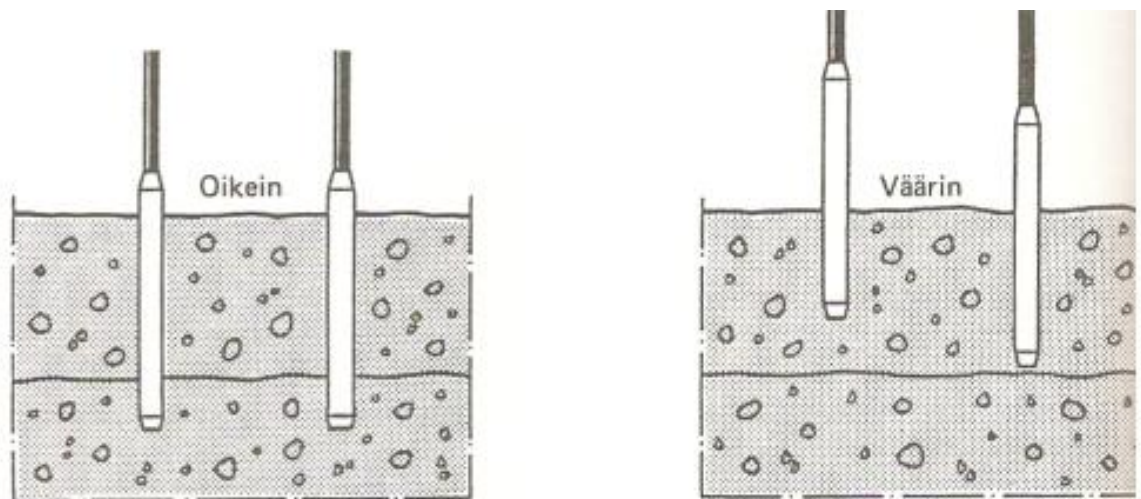
Tiivistykseen käytetään useimmiten sauvatärytintä. Tärytys on tehtävä siten, että uuden massakerroksen lisäksi tärytin upotetaan noin 150 millimetrin verran myös vanhaan rakentamiseen, jolloin varmistetaan massakerroksen yhteenliittymisestä. Kuvassa 4. on esimerkki sauvatäryttimestä.



Kuva 4. Sauvatärytin. (Kuva: Juha Uusitalo)

Sauvatärytin pistetään betonimassaan tasaisin välimatkoin. Pistoväli riippuu sauvatäryttimen tehosta, ollen keskimäärin noin 400 millimetriä. Tärytintä pidetään upotettuna betonimassan

notkeudesta ja rakenteen muodosta riippuen noin 5...20 sekuntia. Riittävän tärytyksen huomaa sauvan pistokohtaa ympäröivän betonipinnan tasoittumisesta ja kostumisesta. Liian pitkää tärytysaikaa tulee välttää, sillä se aiheuttaa betonimassan erottumista. Samasta syystä betonimassaa ei saa myöskään siirtää sauvatäryttimellä. [2, s. 322–325.] Kuvassa 5. on esitetty oikeaoppinen tiivistämistapa.



Kuva 5. Betonin tiivistäminen [2, s. 322].

Mikäli valetun betonirakenteen tiivistystä ei ole hoidettu asianmukaisesti, voi rakenteessa esiintyä seuraavia virheitä [2, s. 323]:

- betonin suuri huokoisuus
- betonin alentunut lujuus
- rakenteen ontelot
- heikkolaatuinen, epätasainen pinta
- huono tartunta terästen ja betonin välillä sekä betonikerrosten saumoissa.

Varsinaisen betonityön viimeinen vaihe on valetun kohteen jälkihoito. Jälkihoidolla pyritään varmistamaan betonin suunniteltu loppulujuus, vaatimukset täyttävä valupinta sekä muut sen ominaisuuksille asetetut vaatimukset. Jälkihoidon merkitys korostuu entisestään talviolosuhteissa, jolloin betoni on ehdottomasti suojattava kylmältä, ettei sen lujuudenkehitys pysähdy. Jälkihoitoon kuuluvat ainakin seuraavat seikat [2, s. 331]:

- Valettu kohde suojataan sateelta, tuulelta, auringonpaisteelta, pakkaselta sekä muilta ulkoisilta rasituksilta.
- Betonia kastellaan ja estetään liiallinen kosteuden haihtuminen.
- Huolehditaan oikeasta kovettumislämpötilasta.

Talvibetonointiin betonin kastelu ei tosin sovi, sillä viileä vesi jäädyttää betonipintaa, jolloin lämpötilaero rakenteen pinnan ja keskiosien välillä kasvaa, mikä voi aiheuttaa betonipinnan halkeilua [9].

Suojaaminen tarkoittaa yleensä valetun rakenteen peittämistä muovikalvolla tai jälkihoitoaineen levittämistä betonipinnalle. Suojaaminen ja kastelu liittyvät sikäli toisiinsa, että suojaamisen tarkoituksena on estää liian nopea veden haihtuminen tuoreesta betonista.

Oikeasta lämpötilasta huolehtimisella tarkoitetaan yleensä betonin lämmittämistä talviolosuhteissa. Massiivisissa rakenteissa tai erityisen kuumissa kesäolosuhteissa valettua kohdetta voidaan joutua myös jäädyttämään lujuuskadon välttämiseksi.

Mikäli jälkihoito jätetään tekemättä tai se on puutteellista, voi betonirakenteessa esiintyä muun muassa [2, s. 332]:

- kutistumishalkeilua
- loppulujuuden alenemista
- muita virheitä betonin ominaisuuksissa tai valupinnassa.

Huolellinen jälkihoito on taloudellisesti kannattavaa. Puutteellisesta jälkihoidosta johtuvien virheiden korjaaminen on lähestulkoon aina kalliimpaa kuin alun perin kunnolla suoritettu työ.

2.5 Työturvallisuus

Kuten muissakin rakennustöissä, myös betonityössä työturvallisuudesta huolehtiminen on erittäin tärkeä osa töiden suunnittelua ja suoritusta. Betonityönjohtajan on huolehdittava betonityöryhmän tarvittavasta perehdytyksestä liittyen työn turvalliseen ja oikeaoppiseen suoritukseen.

Mikäli betonointi suoritetaan nostoastialla, on nostot suunniteltava siten, ettei nostoja jouduta tekemään työskentelevien henkilöiden ylitse. Betonin pumppaukseen puolestaan liittyy useita huomioonotettavia työturvallisuusseikkoja, joita ovat ainakin:

- betonipumpun pystyttämisestä on aina täytettävä pystytyspöytäkirja, malli pöytäkirjalomakkeesta on liitteenä 6
- maapohjan riittävä kantavuus (yli 20 tonnin pistekuormat), riittävä etäisyys kaivantoihin
- riittävä suojaetäisyys sähkölinjoihin, jännitteestä riippuen vähintään 2–6 metriä
- sopivien pumppauspaineiden käyttö, pumppulinjan liitännöiden tarkastus
- pumpun ohjaajalla tulee olla esteetön näköyhteys betonityöryhmään
- työmaan henkilöstön informointi betonin pumppauksesta
- vaara-alueen eristäminen tarpeen mukaan esimerkiksi lippusiimalla.

Betonin pumppauksen työturvallisuusasiat tulee huolehtia betonipumppuauton kuljettajan ja työmaan vastaavan työnjohtajan yhteistyönä.

Työskentelyalueen tulee olla mahdollisimman avoin, eikä siellä saa olla ylimääräisiä rakennusmateriaaleja tai työkaluja, joista voi aiheutua kompastumisvaaraa. Talvella lumi ja jää lisäävät kaatumis- ja liukastumisriskiä, joten työskentelyalueet tulee mahdollisuuksien mukaan suojata lumisateilta ja jäätymiseltä. Työturvallisuusriskien lisäksi lumi aiheuttaa materiaali- ja kalustohukkaa pilaantuneiden ja lumen alle kadonneiden materiaalien ja työkalujen muodossa.

Tuore betoni on hyvin emäksistä (pH-arvo noin 12–13) ja se voi aiheuttaa ihoärsytystä tai jopa palovammoja. Tästä syystä betonoitaessa on aina käytettävä asianmukaisia suojarahusteita, joihin kuuluvat ainakin [10]:

- roiskeilta suojaavat lasit tai visiiri
- vedenpitävät, esimerkiksi nitrilikumiset hanskat

- kumisaappaat
- pitkälahkeiset housut ja takki
- suojakypärä.

Mikäli betonia joutuu paljaalle iholle tai silmiin, on kyseinen alue huuhdeltava heti puhtaalla vedellä. Pidentynyt ihokosketus voi pahentaa mahdollista ihovauriota.

Tuoreen betonin käsittelyyn liittyvät ainakin seuraavat vaarat ja turvallisuustoimenpiteet [11]:

- R36/38: Ärsyttää silmiä ja ihoa
- R41: Vakavan silmävaurion vaara
- R43: Ihokosketus voi aiheuttaa herkistymistä
- S24: Varottava tuoreen betonin joutumista iholle
- S25: Varottava joutumasta silmiin
- S26: Roiskeet silmistä huuhdeltava välittömästi runsaalla vedellä ja mentävä lääkäriin.

Työmaalla on varmistuttava siitä, että jokainen betonityöhön osallistuva tietää edellä mainitut vaarat ja toimintaohjeet, mikäli betonia joutuu iholle tai etenkin silmiin.

3 SÄÄOLOSUHTEET JA BETONIN SIIRROT

3.1 Sääolosuhteiden vaikutus betonointiin



Betonityön kannalta talvikaudeksi lasketaan se ajanjakso, jolloin vuorokauden keskilämpötila laskee mahdollisesti alle +5 °C:n. Suomessa tämä tarkoittaa käytännössä noin 2/3 vuodesta. Tätä lämpötilaa alempana betonin kovettuminen on hyvin hidasta ja on vaarana, että mahdolliset yöpakkaset voivat vaurioittaa valettuja betonirakenteita. [2, s. 342.]

Talvibetonointi vaatii erityistoimenpiteitä, joilla varmistetaan betonin lujudenkehitys ja ehkäistään betonin jäätymisestä johtuvia vaurioita. Suurimpana erona lämpimän sään betonointiin on, että talviaikainen betonivalu vaatii useimmiten erillistä lämmitystä, jotta betonin lämpötila pysyy riittävän korkeana kovettumista varten. [1, s. 161.]

Pakkasen vaikutus betonointityöhön on merkittävä. Useat työvaiheet ovat selvästi hitaampia suorittaa verrattuna lämpimällä säällä työskentelyyn. Pakkanen aiheuttaa myös ylimääräisiä töitä, kuten kaivantojen suojaaminen jäätymiseltä, raudoitusten mahdollinen lämmittäminen tai sulattaminen ja muottien sekä valua vasten olevan maan lämmittäminen. Lisäksi kovalla pakkasella (alle -15 °C) betonin toimittajat eivät yleensä lähetä betonipumppua työmaalle kaluston rikkoontumisvaaran takia. Kylmällä säällä betonimassa on yleensä tilattava tavallista lämpimämpänä tai harkittava kuumabetonin käyttöä. Massan lämpötila valitaan sitä korkeammaksi, mitä kylmempi sää on. Taulukossa 1. esitetään, kuinka tuulen nopeus vaikuttaa pakkasen purevuuteen.

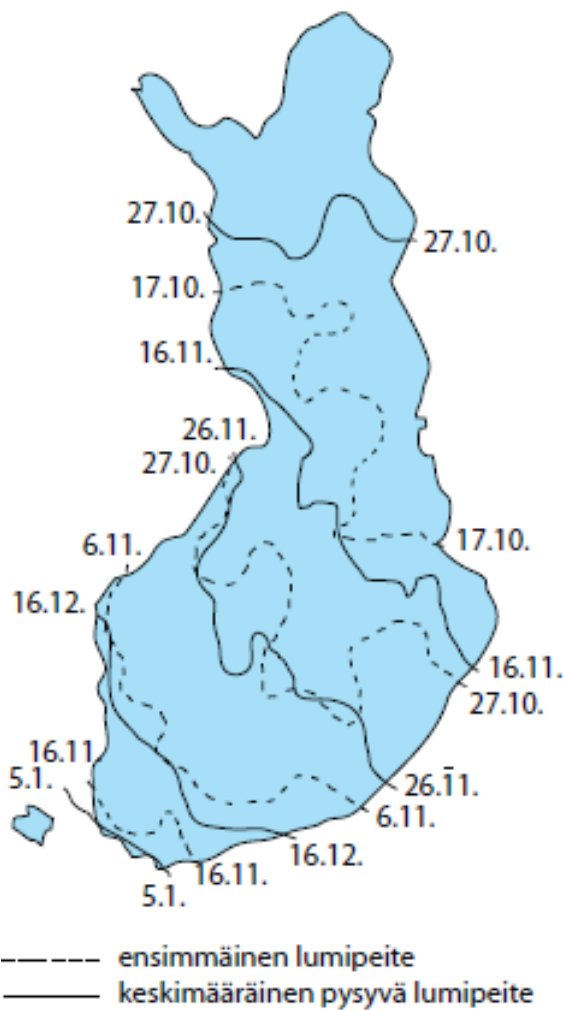
Taulukko 1. Tuulen nopeuden ja ilman lämpötilan yhteisvaikutus pakkasen purevuuteen [6].

		Ilman lämpötila °C						
		0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
Tuulen nopeus m/s	2	-3	-8	-14	-20	-26	-32	-38
	4	-4	-11	-17	-23	-29	-35	-41
	7	-6	-12	-19	-25	-32	-38	-45
	10	-7	-14	-20	-27	-34	-40	-47
	13	-8	-15	-22	-28	-35	-42	-48

-  **Erittäin kylmä: Paleltumat todennäköisiä pitkähkön ulkona olon seurauksena.**
 **Paleltumisvaara: Paleltumat mahdollisia 10 minuutin ulkona olon seurauksena.**

Raudoitustyössä on otettava huomioon, että teräksen sitkeys alkaa vähetä jo +10 °C:n...-10 °C:n lämpötiloissa, jolloin on vältettävä liian jyrkkiä taivutuksia sekä teräsiin kohdistuvia iskuja. Mikäli raudoitusta joudutaan hitsaamaan, on hitsaustyöt tehtävä lämpimässä ja tarvittaessa esilämmitettävä tangot. [2, s. 364.]

Lumisade on toinen talvirakentamista hidastava tekijä. Kuvassa 6. on esitetty ensimmäisten lumisateiden keskimääräiset ajankohdat eri puolella Suomea. Jo työmaan aluesuunnitelmaa tehdessä on työmaan mahdollinen auraaminen ja lumen kasaamispaikat suunniteltava huolella. Lisäksi kalusto ja rakennusmateriaalit on suojattava lumisateilta. Jos suunniteltuna työajankohtana on lumisateen vaara, tulee kaluston ja työskentelykohteen puhdistamiseen varata riittävästi aikaa. Kannattaa pohtia myös mahdollisuutta rakentaa suurempaa sääsuojaa, mikäli tietyllä alueella joudutaan tekemään paljon töitä, jotka hankaloituvat merkittävästi lumisateen tai pakkasen vaikutuksesta. Sääsuojauksen rakentaminen vähentää lumen ja jään poistosta aiheutunutta työmenekkiä ja voi siten maksaa itsensä takaisin alentuneina työvoimakustannuksina.



Kuva 6. Ensimmäisten lumisateiden todennäköiset ajankohdat [6].

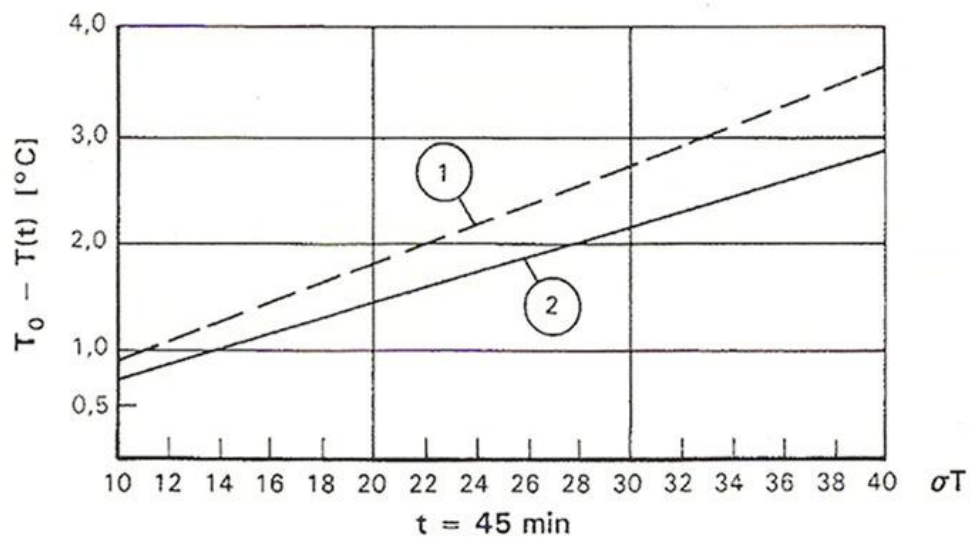
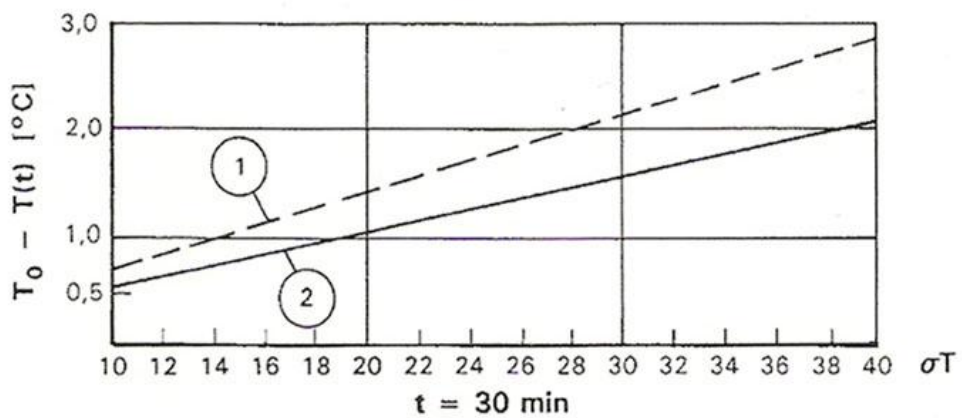
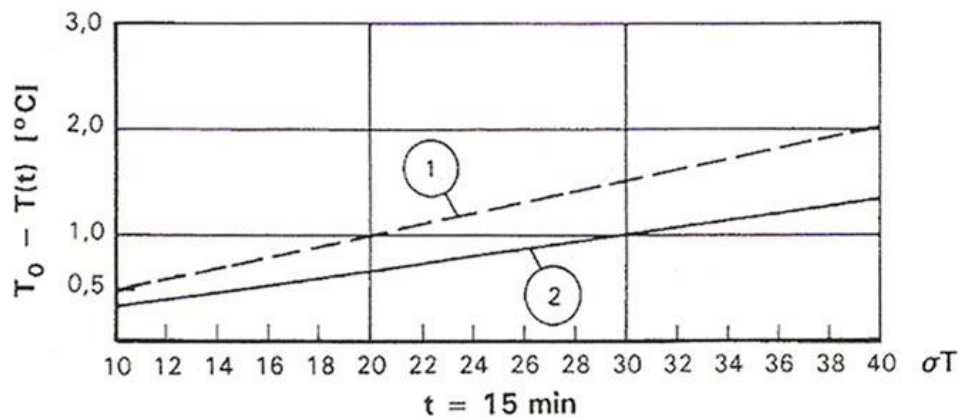
Talvikautena omat ongelmansa rakentamiseen tuo myös pimeys. Pimeimpänä aikana joudutaan pimeässä tai hämärässä työskentelemään jopa lähes puolet työpäivästä. Tämä lisää työtatapaturmien riskiä, mikäli työmaan valaistusta ei ole toteutettu kunnolla. Työmaata suunniteltaessa tuleekin laatia erillinen valaistussuunnitelma, jossa määritellään työmaan yleisvalaistus sekä erilliset työkohtevalaistukset.

Sääolosuhteet on otettava huomioon jo ennalta, työvaiheita ja aikataulua suunniteltaessa. Tässä apuna ovat eri lähteiden sääennusteet ja erikseen rakentajille suunnatut sääpalvelut. Sääennusteiden tärkeimpiä tietoja betonointia ajatellen ovat ilman lämpötila, tuulen nopeus ja lumisateiden mahdollisuus.

Joskus sääolosuhteet voivat estää jonkin työvaiheen suorittamisen suunniteltuna ajankohtana. Tällaisen tilanteen varalle on hyvä olla etukäteen suunniteltuna mahdollisia varatoita, jotka veisivät rakennusprojektia eteenpäin.

3.2 Kuljetuksen ja käsittelyn vaikutus betonin lämpötilaan

Kylmällä säällä edullista olisi, mikäli betonin kuljetusmatkat saataisiin pidettynä mahdollisimman lyhyinä, jotta betonimassa ei pääsisi jäähtymään kuljetuksen aikana liiaksi. Toisaalta kuljetusmatkaan on usein mahdotonta juurikaan vaikuttaa, koska mahdollisia betonitoimitajia on lähialueella yleensä vain yksi. Massan jäähtymistä betonin kuljetusautossa voidaan kuitenkin ehkäistä ajoittamalla betonitilaukset ja toimitukset siten, ettei betoniauto joudu turhaan odottamaan työmaalla. [2, s. 367.] Kuvan 7. nomogrammeista voidaan nähdä, ettei betonimassan lämpötila laske kuljetuksen aikana kovinkaan paljon, mikäli kuljetusmatkat pysyvät kohtuullisina.



- 1 on kuljetus keskinopeudella 50 km/h
 2 on kuljetus keskinopeudella 30 km/h
 $T_0 - T(t)$ on keskilämpötilan aleneminen [C°]
 σT on massan ja ulkoilman lämpötilan erotus [C°]
 t on kuljetusaika [min]

Kuva 7. Betonimassan jäähtyminen kuljetuksen aikana [2, s. 368].

Nomogrammista esimerkkinä: jos matka betoniasemalta valupaikalle kestää 30 minuuttia, massaa kuljetetaan 50 km/h keskinopeudella ja ulkolämpötilan ja massan lämpötilaero on 20 °C, se viilenee matkan aikana 1,5 °C. Eli jos betoniasemalta lähtiessä massa on ollut +20 °C ja ulkolämpötila +0 °C, työmaalle tullessa betonimassan lämpötila on noin +18,5 °C.

Betonin turhia välivarastointeja on vältettävä, sillä niiden vaikutus betonimassan jäähtymiseen on huomattava. Mikäli betonimassaa ei jostain syystä voida siirtää suoraan kuljetusautosta muottiin ja se on otettava työmaalla vastaanottosäiliöön, tulee säiliö puhdistaa lumesta ja jäästä sekä lämmittää siten, että sen lämpötila on vähintään +0 °C. Sulatus ja lämmitys hoi-
tuu helpoiten höyryllä.

Mikäli betonityö on hidasta, voi betonimassa jäähtyä työn aikana paljonkin. Siksi betonointi tuleekin suorittaa mahdollisimman nopeita menetelmiä käyttäen, samalla kuitenkin huolehti-
en työturvallisuudesta ja siitä, että muotit kestävät nopean betonoinnin aiheuttamat muotti-
paineet. Välittömästi valun jälkeen valettu betonirakenne on suojattava pakkaselta ja tuulelta
ennalta suunnitelluin menetelmin.

4 BETONIN VALINTA

4.1 Lujuusluokan vaikutus betonin ominaisuuksiin

Betonin lujuusluokat jaotellaan betonin puristuslujuuden mukaan (MN/m^2). Puristuslujuus on hyvä betonin ominaisuuksien tulkitsija, koska moni muu betonin ominaisuus on verrannollinen siihen, kuten vetolujuus, taivutusvetolujuus ja kimmokerroin. Betonin lujuusluokka korreloi suoraan siihen, miten suuri puristuslujuus on. Esimerkiksi C25/30 betonissa puristuslujuus on lieriön muotoisella koekappaleella $25 \text{ MN}/\text{m}^2$ ja kuution muotoisella koekappaleella $30 \text{ MN}/\text{m}^2$. Koekappaleiden mitat ovat standardoituja. Kokeissa käytetyn lieriön korkeus on 300 millimetriä ja halkaisija 150 millimetriä. Vastaavasti kokeissa käytetyn kuution mitat ovat $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$. [2, s. 79.] Eurokoodin mukaisia merkintöjä (esimerkiksi C25/30) on voinut käyttää Suomessa jo vuodesta 2007 asti, mutta vanhoja betoninormien mukaisia merkintöjä (esimerkiksi K30) on vieläkin melko laajasti käytössä. Vanhassa lujuusluokan merkintätavassa on merkitty vain betonin kuutiopuristuslujuus ja koska molemmissa merkintätavoissa kuutiopuristuslujuus on samankokoisella koekappaleella mitattu, on molempia merkintöjä helppo tulkita.

Suomessa käytössä olevat betonin lujuusluokat ovat C12/15...C90/105 [12, s. 107]. Omien kokemuksiemme mukaan tavallisimmat työmailla käytetyt lujuusluokat ovat C20/25...C50/60.

Mitä suuremman lujuusluokan betonia käytetään, sitä enemmän se tuottaa hydrataatiolämpöä. Tämä johtuu siitä, että suuremman lujuusluokan betonissa vähimmäissementtimäärä on isompi. Hydrataatiolämmön syntyyn vaikuttaa myös sementin laatu, ja hydrataation nopeus.

Talvibetonoinnissa on otettava erityisesti huomioon se, ettei betoni pääsee jäätymään ennen kuin se on saavuttanut jäätymislujuuden $5 \text{ MN}/\text{m}^2$. Lujuusluokka ei vaikuta jäätymislujuuteen vaan se on kaikilla lujuusluokilla sama. $5 \text{ MN}/\text{m}^2$ on samalla myös ei-kantavien rakenteiden muottien purkulujuus.

Kun betoni on saavuttanut jäätymislujuuden, voidaan tarvittaessa lämmitys keskeyttää. Jos betoni pääsee jäätymään ennen kuin se on saavuttanut jäätymislujuuden, se vaurioituu pysyvästi. Tämä vaikuttaa loppulujuuden vajaaksi jäämiseen ja muihin betonin ominaisuuksiin.

Betonin loppulujuus voi pahimmassa tapauksessa alentua jopa 80 % jäätyksen johdosta. Jos betoni pääsee jäätyään ennen jäätymlujuutta, syntyy jäätyksen aiheuttama valesitoutuminen. Valesitoutuminen voi näyttää alussa normaalilta lujuudenkehitykseltä ja lujuutta saattaa tulla jopa 10...20 MN/m². Kun betoni on saavuttanut jäätymlujuuden, se kestää sen sisällä jäätyvän veden aiheuttamat rasitukset kerran. Jos betonin on tarkoitus kestää säävaihteluita useasti, tulee siitä tehdä pakkasenkestävää. Betonista saadaan pakkasenkestävää huokostamalla se. [2, s. 344–346.]

Talvibetonoinnissa on lujuudenkehityksen kannalta kolme erityisen tärkeää hetkeä, jotka tulee tarkastaa [2, s. 347]:

- jäätymlujuuden saavuttaminen (5 MN/m²)
- muottien purkamislujuuden saavuttaminen (ei-kantavilla rakenteilla 5 MN/m², kantavilla 60 % nimellisljuudesta).
- nimellisljuuden saavuttaminen.

Edellä mainittujen asioiden tarkastus on erittäin tärkeää betonoinnin onnistumisen varmistamiseksi ja ettei rakenteita esimerkiksi kuormiteta liikaa liian varhaisessa vaiheessa. Kantavia rakenteita betonoitaessa on tärkeää muistaa, että muottien purkamisen salliminen betonirakenteen saavuttaessa 60 % nimellisljuudesta on vain viranomais määräys. Tämä tarkoittaa sitä, että niitä ei ehdottomasti saa purkaa ennen sitä. Mikäli rakenteita aiotaan kuormittaa heti muottien purkamisen jälkeen, on varmistuttava siitä, että rakenteet ovat saavuttaneet riittävän nimellisljuuden kestääkseen niille johdettavat kuormat. Tarvittaessa rakennetta on tuettava erillisin tuin muotinpurun jälkeenkin. Jos rakenteita kuormitetaan liian isoilla kuormilla liian varhaisessa vaiheessa, voi rakenteisiin tulla vakavia rakenteellisia virheitä, kuten halkeamia ja venymiä. Pahimmassa tapauksessa koko rakenne voi sortua.

4.2 Betonin lisäaineet

Betonin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa käyttämällä erilaisia betonimassaan sekoitettavia lisäaineita. Lisäaineiden käytöllä voidaan pyrkiä muokkaamaan betonin ominaisuuksia vastaamaan paremmin haluttua käyttötarkoitusta tai parantamaan betonin valmistuksen taloudellisuutta. [2, s. 63.]

Lisäaineet vaikuttavat betoniin fysikaalisesti tai kemiallisesti ja niiden vaikutustavat ja käyttöohjeet on syytä tuntea hyvin ennen niiden käyttämistä. Yleisimmin käytetyt lisäainetyypit ovat notkistin, huokostin ja hidastin. Muita lisäaineita ovat muun muassa erilaiset injektointi-, tiivistys- ja tartunta-aineet sekä kiihdyttimet. Näistä kiihdytintä on ennen käytetty yleisemmin betonin varhaislujuuden kasvattamiseen, mutta nykyään esimerkiksi kuumabetonin käytöllä päästään hallitummin samoihin lopputuloksiin. [2, s. 68.]

Betonimassassa käytetyt lisäaineet merkitään yleensä betonitoimittajalta saatuun kuormakirjaan, jossa näkyy käytetyn lisäaineen nimi sekä lisäaineen määrä. Esimerkki betonin kuormakirjasta kuvassa 8.

Ruskon Betoni Oy		VALMISBETONITEHDAS		FI		4. VASTAANOTTAJA	
Petäisentie 17 87400 KAJAANI		Alv rek.		ISO 9001:2008 SUREAU VERITAS Certified		LÄHETYSLUETTELO N:o	
Puh. 0207 933 280		www.ruskonbetoni.fi					
Vastanottaja		Laskutusosoite					
Tonttuosoite		Asiakasnumero		Merkki			
Huom.							
BETONI		LUJUUS LK		NOTK. MAX#		MÄÄRÄ	
PAKKASBETONI -10 C		K 30 2		S4 8		5.50 m3	
TILATTU: 5.5		TOIMITETTU: 5.5					
RASITUSLUOKAT XC1		KLOORIDIL. C1 0.2					
LISÄAINEET:		SKY 600 0.90% JAABETO 6.00%					
LISÄT: TALVILISA							
Pumppausputkiston voitelu <input checked="" type="checkbox"/>							
Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.							
Myyjän	Auton tunnus	Valtapa	KULJETUSPUNPPU		Puku	Pukupää	
Truuspin	Truus klo	Maku	4-5		1.2		
Tähtäpäin	Varmistuksen aloitus	Päätty klo	09.40		Pakautuslaitteen c arvioitu määrä		m ³
26.02.2013	09.18						

Kuva 8. Betonitoimituksen kuormakirja. (Kuva: Juha Uusitalo)

4.2.1 Notkistimet

Notkistavat lisäaineet voidaan jaotella notkistimiin, tehonotkistimiin ja nesteyttimiin. Notkistimet ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka parantavat betonin työstettävyyttä ja joiden ansiosta on mahdollista käyttää pienempiä vesi- ja sementtimääriä. Notkistimet voivat olla lignosulfonaatti-, melamiini-, naftaleeni- tai polykarboksylaattipohjaisia, joista nykyisin käytetään yleisimmin polykarboksylaattipohjaisia. Talvibetonoinnissa on otettava huomioon se, että etenkin lignosulfonaattipohjaiset lisäaineet hidastavat sementin sitoutumisreaktioiden alkamista, joten niiden käyttö ei ole suositeltavaa, mikäli tavoitellaan nopeaa muottikiertoa. [2, s. 64–65.]

4.2.2 Huokostimet

Huokostimet ovat lisäaineita, jotka lisäävät betonin ilmapitoisuutta muodostamalla betonimassaan ilmakuplia, joita kutsutaan suojarahokosiksi. Sujarahokosten ansiosta betonin sisältämä vesi voi jäätyä rikkomatta itse rakennetta, eli betonin pakkasenkestävyys paranee. Huokostimien ja notkistimien käyttö yhdessä ei ole suositeltavaa, sillä monet notkistimet estävät huokostamisaineen halutunlaisen toiminnan. Lisäksi huokostimien käyttö alentaa betonin loppulujuutta keskimäärin 5 prosenttia per nostettu ilmamääräprosentti. [2, s. 66–67.]

4.2.3 Hidastimet

Hidastavien lisäaineiden on tarkoitus siirtää betonin sitoutumisen alkamisajankohtaa myöhemmäksi. Niitä käytetään yleensä silloin, kun kuljetusmatkat betoniasemalta työmaalle ovat pitkiä, tai kun betonimassalta vaaditaan pitkää työstöaikaa. Myös lämpimillä kesäkeleillä hidastimen käyttö voi olla tarpeen, kun taas talvella alhainen lämpötila riittää yksinään hidastamaan sitoutumisen alkamista riittävästi. [2, s. 67.]

4.3 Rasitusluokat

Betonin rasitusluokalla tarkoitetaan sitä, minkälaisia rasituksia betoni on suunniteltu kestä-
mään. Rasitusluokan valinta on suunnittelijan tehtävä ja suunnittelija valitsee rasitusluokan
seuraavien rasitustekijöiden suhteen [12, s. 88]:

- karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio
- kloridien aiheuttama korroosio
- merivedessä olevien kloridien aiheuttama korroosio
- jäätymis- ja sulamisrasitus
- kemiallinen rasitus.

Betonin rasitusluokat on selostettu taulukossa 2. lyhyesti.

Taulukko 2. Betonin rasitusluokat [2, s. 253].

Pääluokka	Rasitustekijä	Alaluokan merkintä	Olosuhdekuvaus
X0	Ei korroosioriskiä betonille tai raudoitteille	X0	Betoni sisätiloissa, jossa ilman kosteus on hyvin alhainen
XC	Karbonatisoituminen	XC1	kuiva tai jatkuvasti märkä
		XC2	Kostea, harvoin kuiva
		XC3	Kohtalaisen kostea
		XC4	Jaksollinen kastuminen ja kuivuminen
XD	Kloridien aiheuttama korrosio	XD1	Kohtalaisen kostea
		XD2	Kostea, harvoin kuiva
		XD3	Kostea ja kuiva vaihtelevat
XS	Merivedessä olevien kloridien aiheuttama korrosio	XS1	Betonia rasittavat tuulen mukana tulevat kloridit, ei suoraa kosketusta veteen
		XS2	Veden alla
		XS3	Vesirajassa ja roiskevyöhykkeellä
XF	Jäätymis-/sulamisrasitus	XF1	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita
		XF3	Suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita
	Jäätymis-/sulamisrasitus ja suolarasitus	XF2	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet
		XF4	Suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet
XA	Kemiallinen rasitus	XA1	Kemiallisesti heikosti aggressiivinen ympäristö
		XA2	Kemiallisesti kohtalaisesti aggressiivinen
		XA3	Kemiallisesti voimakkaasti aggressiivinen ympäristö

Betonin rasitusluokkien täyttämiseen tarvitaan seuraavia asioita [12, s. 102, 108]:

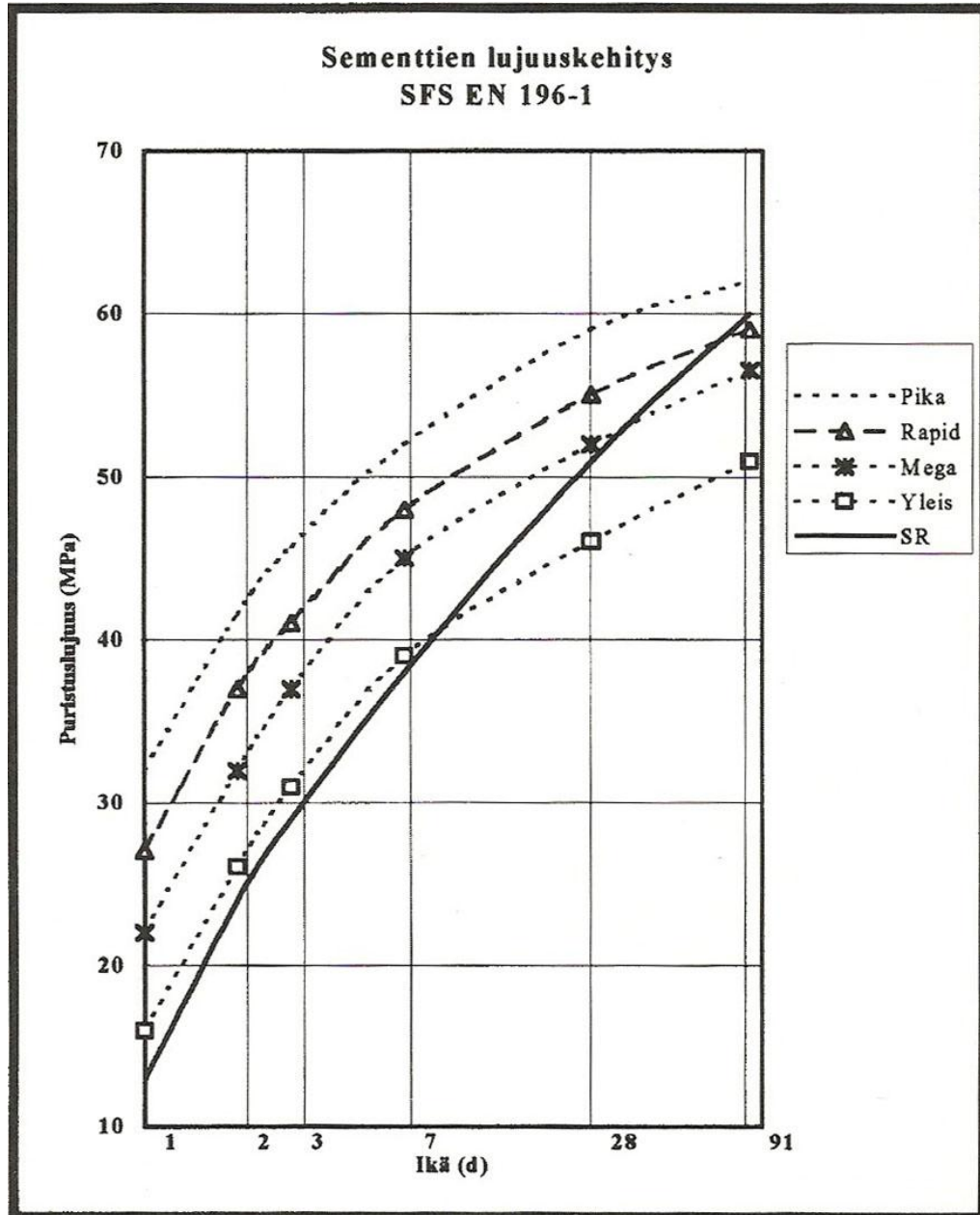
- sopiva sementtityyppi
- tietyt seosainekertoimet (silika, lentotuhka, masuunikuona)
- enimmäisvesisementtisuhte
- vähimmäislujusluokka
- vähimmäissementtimäärä (kg/m^3)
- tietty ilmamäärä.

Edellä mainittuihin asioihin vaikuttaa myös se, että suunnitellaanko betonirakenne kestämään 50 vuotta vai 100 vuotta [12, s. 108–109].

Yleisesti talviaikaan liittyvät luokat ovat XF1...XF4, jotka ovat jäätymis-sulamisrasitusluokkia.

4.4 Nopeasti kovettuva betoni

Nopeasti kovettuva betoni tarkoittaa betonia, jonka sementtinä on käytetty nopeasti hydratoituvaa sementtiä. Sementin hydrataatioreaktio tarkoittaa sementin ja veden välillä tapahtuvaa kovettumisreaktiota, jonka sivutuotteena syntyy lämpöenergiaa. Nopeasti kovettuvia sementtejä ovat esimerkiksi pikasementti, megasementti ja rapidsementti. Näistä erityisesti rapidsementtiä suositellaan talvibetonointiin. Sementtien väliset hydrataatioreaktion nopeudet näkyvät kuvassa 9.



Kuva 9. Sementtien hydrataatioreaktionopeudet [2, s. 55].

Nopeasti hydratoitua sementtiä tuottaa paljon hydrataatiolämpöä ja hitaasti hydratoitua vähän. Ne vaihtelevat hitaasti hydratoituvan 250 kJ/kg ja nopeasti hydratoituvan 400 kJ/kg per seitsemän vuorokautta välillä. Hydrataatioreaktiota saadaan nopeutettua käyttämällä nopeasti reagoivaa sementtiä ja hidastettua käyttämällä hitaasti reagoivaa sementtiä. Hydratoituminen eli lujuusreaktio jatkuu niin pitkään, kun reagoinnin mahdollistavaa vettä on vapaana. [2, s. 53.]

Talvibetonoinnissa nopeasti hydratoituvasta sementistä on erityisen paljon hyötyä, koska se tuottaa enemmän lämpöä. Tällöin saadaan betonin lujuudenkehitys alkamaan hyvin [2, s. 57]. Betonin lujuudenkehitykselle lämpö on kriittinen suure. Teoreettisesti betonin tavoitelujuus saavutetaan 28 vuorokaudessa, jos lämpötila on +20 °C ja betonin koostumus sekä työsuoritus ovat optimaaliset. Mitä korkeampi lämpötila on, sen nopeammin betonin lujuudenkehitys edistyy ja mitä matalampi se on, sitä hitaammin. [2, s. 341.] Betonin lämpötilan tulee aina olla valun päätteeksi yli +5 °C, että lujuudenkehitys pääsee alkamaan [2, s. 360].

Lämpötilan kasvu kiihdyttää lujuudenkehitystä hyvin paljon, esimerkiksi +10 °C:n nousu huoneenlämpötilassa nostaa lujuudenkehityksen vauhdin noin kaksinkertaiseksi. Lämpötilaa ei kuitenkaan suositella nostettavan yli +50 °C, koska se voi aiheuttaa betonin loppulujuuteen lujuuskadon. [2, s. 350.]

4.5 Kuumabetoni

Kuumabetoniksi kutsutaan betonimassaa, jonka lämpötila on betonoitaessa yli +30 °C. Kuumabetoni lämmitetään betoniasemalla haluttuun lämpötilaan. Betonimassan lämpötilaa nostetaan lämmittämällä valmistuksessa käytettävää vettä sekä runkoainetta. Lämmitys tehdään yleensä kuumalla höyryllä.

Suomen rakentamismääräyskokoelman B4 Betonirakenteet, ohjeet -osion mukaan kuumabetoni rinnastetaan lämpökäsitelyyn betoniin. Betonin lämpökäsittelyä on käsitelty tarkemmin kohdassa 4.6.

Kuumabetonia toimitetaan yleensä kahdessa eri lämpöluokassa, joiden lämpötila vaihtelee toimittajasta riippuen +25...+35 °C ja +35...+45 °C. Kuumabetonia voidaan valmistaa myös +50 °C:n lämpöluokassa, mutta sen käyttö on harvinaista betonimassan huonon käsiteltävyyden ja korkean lämpötilan aiheuttaman lujuuskadon vuoksi. Lämpöluokan valinta tehdään vallitsevien sääolosuhteiden ja suunnitellun valun lämmityksen perusteella. [2, s. 372–373.]

Kuumabetonia käytetään koska sen lujuudenkehitys on nopeaa, minkä ansiosta muottikierto nopeutuu ja valun lisälämmitystarvetta saadaan pienemmäksi. Lämpötilan nosto vaikuttaa sementin ja veden väliseen hydrataatioreaktioon kiihdyttävästi, jolloin hydrataatiolämpöä va-

pautuu huomattavasti nopeammin kuin tavanomaista noin +20 °C:n lämpöistä betonia käytettäessä. Kuumabetonin käyttö on hyvin energiatehokas menetelmä, kun valetun kohteen lämpösuojauksesta on huolehdittu asianmukaisesti ja näin liiallinen lämmön haihtuminen estetty. Toisaalta tulee huolehtia, ettei valetun betonin lämpötila nouse liian suureksi ja näin aiheuta lujuskatoa, joka vaikuttaa betonin loppulujuuteen. [2, s. 373–374.]

Normaalibetoniin verrattuna kuumabetoni jäykistyy huomattavasti nopeammin, johtuen sen korkeammasta lämpötilasta. Riippuen massan lämpötilasta, se on helposti työstettävissä noin 1...2 tuntia. Työstettävyysajan lisäämiseksi kuumabetoniin lisätään usein hidastinta, joka hidastaa betonimassan jäykistymistä. Paras lämpötila kuumabetonille on noin +40 °C, jolloin sen työstettävyys on vielä suhteellisen hyvä, eikä lujuskato kasva liian suureksi. [2, s. 373.]

Kuumabetonia käytettäessä huomioonotettavia seikkoja ovat [2, s. 376]:

- muottikaluston sopivuus kuumabetonin käyttöön
- valetun kohteen nopea lämpöeristys
- nopean betonoinnin vaikutukset muottikiertoon, työjärjestelyihin sekä -tekniikoihin
- lisälämmityssuunnitelman laatiminen
- valetun kohteen lämpötilaseurannan järjestäminen.

Yksi kuumabetonin käytön suurimmista hyödyistä on sen kauttaaltaan tasainen lämpötila, joka johtuu siitä, että betonimassa on lämmitetty jo sekoitettaessa tehtaalla. Tämän ansiosta betonin ainesosien erilaisista lämpölaajenemiskertoimista johtuva halkeiluriski on kuumabetonilla huomattavasti alhaisempi verrattuna työmaalla lämmitettävään betoniin. [2, s. 376.]

4.6 Betonin lämpökäsittely

Suomen rakentamismääräyskokoelman B4 Betonirakenteet, ohjeet -osion mukaan betoni on lämpökäsiteltyä, jos [13, s. 6]:

- betonimassan lämpötila ylittää +40 °C
- betonimassan lämpötila nousee kovettumisen aikana yli 25 °C
- betonimassan kovettumislämpötila on yli +50 °C.

Betonin lämpökäsittelyä käytetään muulloinkin kuin talvella tapahtuvassa betonointityössä, kun halutaan nopeuttaa muottikiertoa. Aikaisemmin betonin lämpökäsittelyn käyttäjiä olivat lähinnä betoniteollisuuden edustajat, eli elementtitehtaat ja erilaisten betonituotteiden valmistajat, mutta nykyisin sen käyttö on levinnyt yleisesti myös paikallavalurakentamiseen.

Betonin lämpökäsittelyllä saadaan nostettua huomattavasti betonin varhaislujuuksia jolloin pystytään nopeuttamaan muottikiertoa. Tällöin pyritään purkamaan ei-kantavien rakenteiden muotit jo noin puolen vuorokauden kuluttua valusta. Kantavien rakenteiden muottien purkulujuus puolestaan pyritään saavuttamaan noin 1...1½ vuorokauden kuluessa. [2, s. 357.]

Lämpökäsittelyn vaikutuksia betonin ominaisuuksiin [2, s. 357]:

- Betonin loppulujuus alenee. Yleensä lujuuskato on 0...30 %, mutta se voi olla jopa 40 %.
- Betonin pakkasenkestävyys heikkenee.
- Betonin kuivumiskutistuma sekä viruma pienenevät 10...40 %.

Lämpökäsittelyn aiheuttama lujuuskato johtuu muun muassa betonin osa-aineiden erilaisista lämpötilakertoimista, lämmön epätasaisesta jakautumisesta sekä kosteuden liikkumisesta lämpimämmistä osista kylmempään.

Lujuuskatoa ei kyetä täysin välttämään lämpökäsittelyä käytettäessä, mutta sen suuruuteen pystytään vaikuttamaan. Lujuuskatoa voidaan vähentää esimerkiksi käyttämällä notkeusluokaltaan jäykempää massaa tai käyttämällä betonimassan valmistuksessa nopeasti kovettuvaa

sementtiä. Lisäksi käytettävän massan vesisementtisuhteen tulisi olla mahdollisimman alhainen. Valun jälkeen rakenteen eri osien lämpötiloja on tarkkailtava ja mahdollisia lämpötilaeroja tasoitettava mahdollisuuksien mukaan. [2, s. 358.]

Koska loppulujuuden alenemista ei voida täysin estää, betonin lujuusluokka valitaan yleensä lämpökäsittelyä käytettäessä yhtä tai jopa kahta luokkaa korkeammaksi kuin rakennesuunnittelu vaatii.

Lämpökäsittelyn haittavaikutuksia ehkäistään ja valetun rakenteen laadusta varmistutaan parhaiten, kun noudatetaan viisivaiheista prosessia, joka sisältää niin kutsutut esisäilytys-, lämmönkohotus-, tasalämpö-, jäähtymis- ja jälkisäilytysvaiheet. Kuvassa 10. on esitetty prosessin kulku 18 tunnin lämpökäsittelyä käytettäessä.

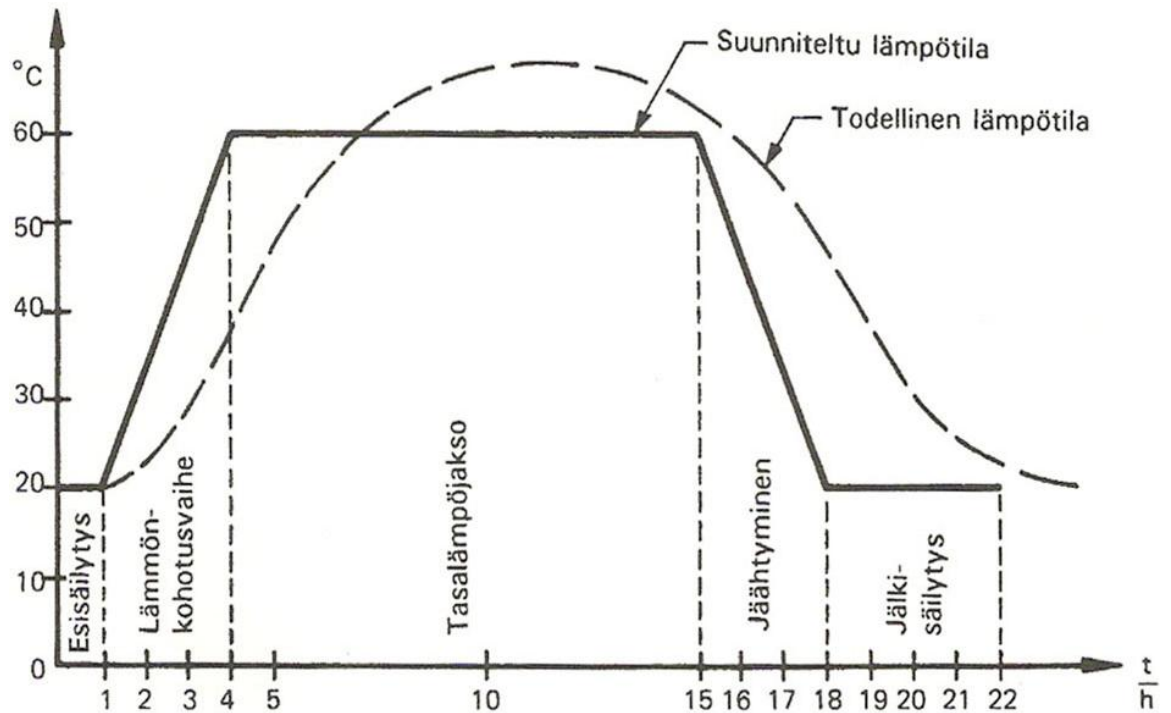
Esisäilytysvaiheessa betonimassa säilytetään sen omaa lämpötilaa vastaavissa olosuhteissa yhdestä viiteen tunnin ajan. Tällä saadaan vähennettyä loppulujuuden alenemista ja mahdollista halkeilua.

Lämmönkohotusvaiheessa betonirakenteen lämpötilaa nostetaan siten, että lämpötila on mahdollisimman tasainen kaikissa sen osissa. Erityistä huomiota kiinnitetään reuna-alueisiin ja rakenteiden liittymäkohtiin. Lämpötilan nousunopeutta tarkkaillaan, eikä nousunopeus saisi olla nopeampaa kuin 20 °C/h . Sallitun nousunopeuden raja-arvo ei ole tarkka, vaan se riippuu valettavan rakenteen paksuudesta; massiivisissa rakenteissa tulee käyttää alle 10 °C/h nopeutta, kun taas ohuemmissa rakenteissa voidaan nousunopeutena käyttää jopa 30 °C/h .

Tasalämpövaiheessa rakenteen lämpötila pidetään vakiona. Suositeltava lämpötila tässä vaiheessa on $+50\text{ °C}...+70\text{ °C}$. Ensisijaisesti vakiolämpötila pyritään pitämään tasaisena betonin tuottaman hydrataatiolämmön avulla, mutta lisälämmitystäkin voidaan joutua käyttämään.

Jäähtymisvaiheessa valetun rakenteen lämpötilan annetaan laskea tasaisesti ympäröiviä olosuhteita vastaavaan lämpötilaan. Lämpötilan laskunopeutta on tarkkailtava, eikä se saa olla nopeampaa kuin 20 °C/h . Ennen kuin muotteja puretaan, on varmistuttava siitä, ettei betonin ja ympäristön lämpötilaero ole suurempi kuin 40 °C .

Prosessin viimeinen vaihe on jälkisäilytysvaihe, jossa valettua betonirakennetta hoidetaan normaalilla jälkihoidolla ja näin varmistutaan loppulujuuden kehittymisestä ja estetään betonin halkeilua. Lämpökäsittelyssä jälkihoito on erityisen tärkeää, sillä lämpökäsitelty betoni ei saavuta täyttä nimellislujuttaan. [2, s. 359–360.]



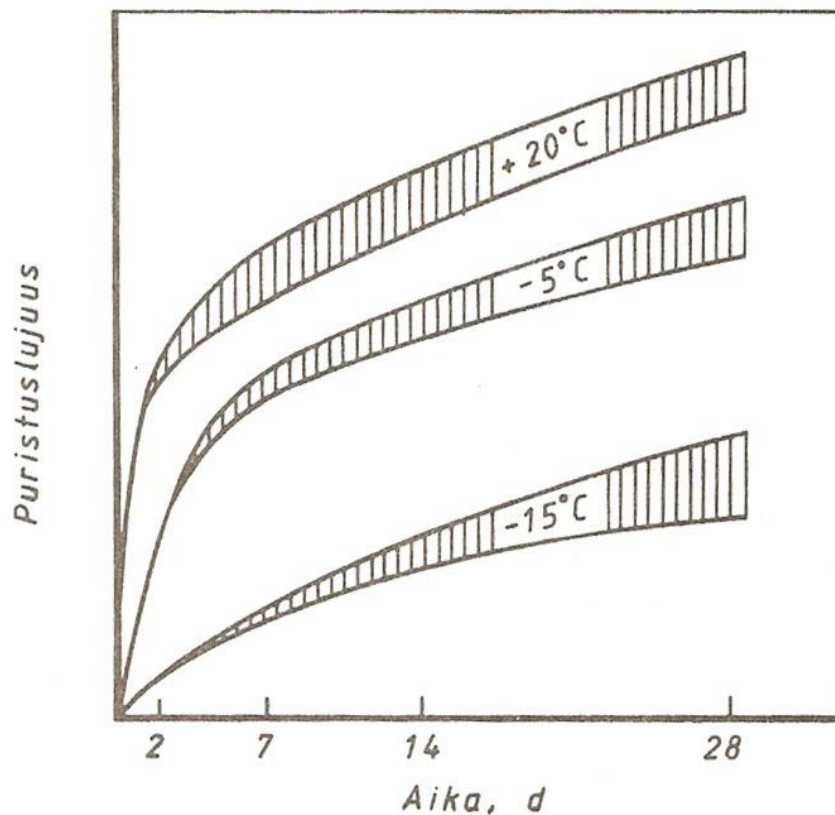
Kuva 10. Viisivaiheinen lämpökäsittelyprosessi [2, s. 360].

4.7 Pakkasbetoni

Pakkasessa kovettuva betonia kutsutaan pakkasbetoniksi. Se on betonia, jonka lujuudenkehitys jatkuu jopa -15 °C :n lämpötilaan asti. Paras ulkolämpötila pakkasbetonin järkevää ja taloudellista käyttöä ajatellen on $+0\text{...}-10\text{ °C}$. Mikäli lämpötila on valun aikana tai välittömästi sen jälkeen alle -15 °C , voi loppulujuus kärsiä lujuuskadosta. Samoin kuin normaalikin betoni, pakkasbetoni kestää jäätymisen vasta saavutettuaan jäätymislajuuden (5 MN/m^2). [2, s. 390; 14, s. 171.]

Pakkasbetonin toimivuus perustuu siihen, että betonin valmistuksessa betonimassaan lisätään veden jäätymispistettä alentavaa lisäainetta, jolloin ainakin osa betonissa olevasta vedestä pysyy sulana, mahdollistaen näin sementin hydrataatioreaktion ilman lisälämmitystä. Lisäaineet myös estävät koko massan jäätymisen. [2, s. 390.] Pakkasbetoniin on yleensä järkevää lisätä tehonotkistinta, että veden määrä saadaan pienemmäksi ja massan työstettävyys helpottuu [15, s. 47]. Vaikka pakkasbetonin lujuudenkehitys jatkuukin jopa -15 °C :seen asti, on sen lujuudenkehitys sitä hitaampaa, mitä kylmempi on. Tämä havainnollistuu kuvassa 11. Lujuu-

denkehityksen nopeus vaihtelee eri valmistajien pakkasbetonissa, koska käytetyt jäänestoaineet ovat erilaisia ominaisuuksiltaan. [15, s. 48.]



Kuva 11. Pakkasbetonin lujuudenkehityksen nopeus eri lämpötiloissa [15, s. 48].

Pakkasbetonia käytetään yleisimmin elementtien saumausvaluissa. Muita käyttökohteita ovat pienet ja vaikeasti lämmitettävissä olevat valut, kuten erilaiset juotosvalut sekä paikkaus- ja jälkivalut. Isompia valuja pakkasbetonilla ei yleensä valeta sen korkean hinnan takia. Pakkasbetonia on saatavana kuivabetonina, esimerkiksi 25 kg ja 1000 kg säkeissä. Kun valettavat kohteet ja betonimenekki ovat pieniä, voi kuivabetonin käyttö olla kustannustehokkaampaa kuin valmisbetonin tilaaminen. [8.]

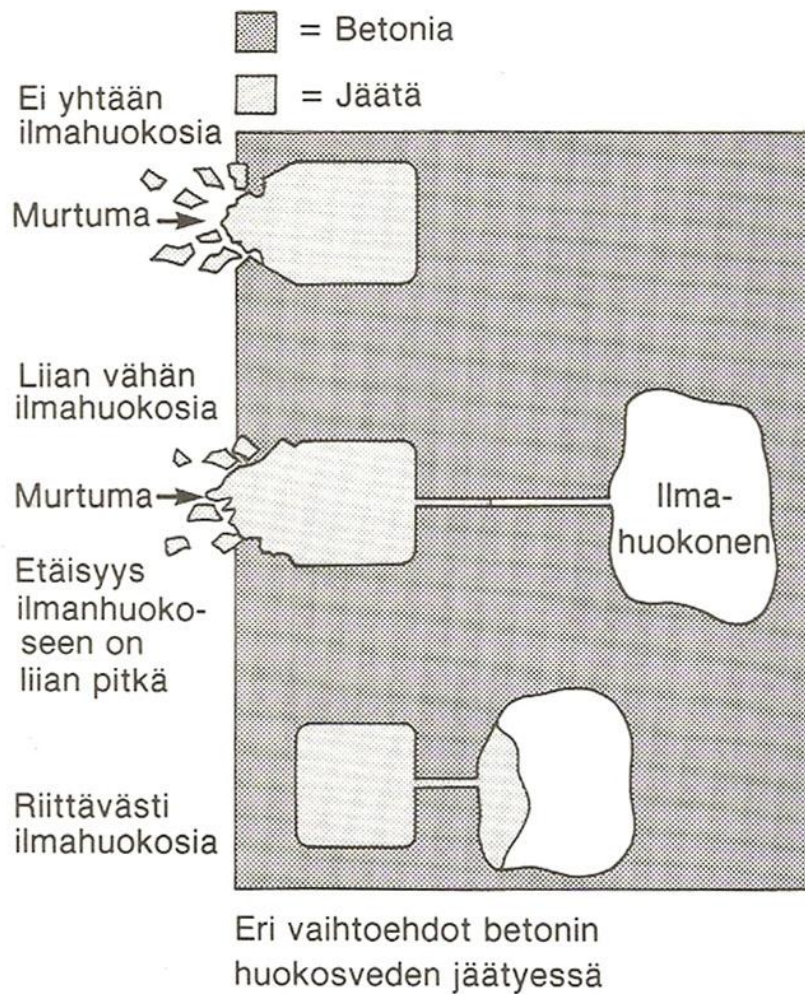
Pakkasbetonia käytetään lähes samalla tavalla kuin normaalibetonia. Sen kuljetus, itse betonointityö ja betonin jälkihoito eivät eroa normaalista. Huomioitavaa pakkasbetonin käytössä on kuitenkin se, että joidenkin pakkasbetonilaatujen työstettävyyss aika on normaalia lyhyempi ja pakkasbetonilla tehdyn valun jälkihoidossa veden haihtuminen on estettävä erityisen tehokkaasti pakkasbetonin hitaan lujuudenkehityksen takia. [2, s. 390.] Jos pakkasbetonista pääsee haihtumaan liikaa vettä liian aikaisessa vaiheessa, voi sen pintaan erottua suolakiteitä [15, s. 49].

4.8 Säänkestävä (pakkasenkestävä) betoni

On hyvin yleistä, että säänkestävä betoni ja pakkasbetoni sekoitetaan keskenään. Nämä eivät kuitenkaan ole sama asia. Säänkestävän betonin ja pakkasbetonin ero on se, että pakkasbetoni kestää pakkasta lujuudenkehityksen aikana ja säänkestävä betoni vasta kovetuttuaan tarpeeksi pitkälle. Säänkestävälle betonille lujuudenkehityksen alkuvaiheessa jäätyminen on yhtä vaarallista, kuin normaalillekin betonille. Suomen olosuhteissa säänkestävyyttä vaaditaan käytännössä jokaiselta ulkoilman kanssa kosketuksissa olevalta betonirakenteelta. Erityisesti vaurioalttiiden rakenteiden kuten siltojen, vesirakenteiden ja julkisivujen tulee olla säänkestäviä. [14, s. 37; 12, s. 88.]

Betonista tehdään säänkestävää huokostamalla se. Säänkestävän betonin tulee täyttää tarkoituksenmukaisen rasitusluokan vaatimukset. Jäätymis-sulamirasitusluokat ovat FX1...FX4.

Normaaliin betoniin syntyvät pakkasvauriot johtuvat siitä, että betonin huokosiin imeytyy vettä, joka jäätyy ulkoilman laskiessa alle $+0\text{ }^{\circ}\text{C}$:n. Jäätyessään vesi laajenee yhdeksän prosenttia ja täten aiheuttaa betoniin halkeamia. Tästä syntyy tapahtumaketju, koska kun betoni sulaa ja kastuu uudelleen, myös kertaalleen haljenneen betonin halkeamiin imeytyy vettä ja seuraavan jäätymisen vaikutus on entistä suurempi. Kun tapahtumaketju pääsee tapahtumaan toistuvasti, betoni alkaa vähitellen rapautua. Rakenteen rapautuminen riippuu rakenteeseen syntyvän paineen määrästä. Betoniin pääsevän mahdollisesti jäätyvän veden määrää voidaan pienentää tekemällä mahdollisimman tiivistä betonia, jolloin betoniin syntyy mahdollisimman vähän sellaisia ilmahuokosia, mihin vesi voisi päästä. Tämän onnistumiseksi betonimassan vesisementtisuhteen tulee olla alle 0,6. Betonin pakkasenkestävyyttä voidaan parantaa myös jo edellä mainitulla huokostamisella. Näiden lisähuokosten tulee olla tarpeeksi pieniä, ettei vesi normaaliolosuhteissa pääse tunkeutumaan niiden sisälle. Tämän lisäksi huokosten tulee olla tarpeeksi lähellä toisiaan, että veden jäätyminen aiheuttama paine pääsee purkautumaan niihin. Kuvassa 12. on esitetty huokosten vaikutus betoniin veden jäätyessä. [14, s. 37.]



Kuva 12. Ilmahuokosten vaikutus betoniin veden jäätyessä [14, s. 37].

Jäätymisrasitusta koskevilla luokilla XF1...XF4 ei ole erikseen lujuusluokkavaatimusta, mutta luokissa XF1 ja XF3 tulee vesi-sementtisuhde ja ilmamäärä valita niin, että betonin pakkaskestävyyttä kuvaava F-luku on taulukon 3. mukainen. Luokkien XF2 ja XF4 pakkas-suolakestävyydet osoitetaan toiminnallisilla menetelmillä.

Taulukko 3. Pakkaskestävyyttä kuvaavan F-luvun vähimmäisarvot rasitusluokissa XF1 ja XF3. [16.]

Suunnittelukäyttöikä:	50 v.		100 v.	
Rasitusluokka:	XF1	XF3	XF1	XF3
F-luku (vähimmäisarvo):	1,0	1,5	2,0	3,0

F-luku, eli betonin ilmamäärää ja vesi-sementtisuhdetta kuvaava luku, tulee olla tiivistettävissä betonissa taulukon 4. ja itsetiivistävässä betonissa taulukon 5. mukainen.

Taulukko 4. Tiivistettävän betonin vähimmäisilmamäärä rasiusluokissa XF1 ja XF3, kun kiviaineksen ylänimellisraja on D [12, s. 110].

Rasiusluokka	Betonin sallittu ilmamäärä [%]		
	D = 8 mm	D = 12 mm	D ≥ 16 mm
XF1	4,5	4	3,5
XF3	5,0	4,5	4,0

Taulukko 5. Itsetiivistyvän betonin vähimmäisilmamäärä rasiusluokissa XF1 ja XF3, kun kiviaineksen ylänimellisraja on D [12, s. 110].

Rasiusluokka	Betonin vähimmäisilmamäärä [%]		
	D = 8 mm	D = 12 mm	D ≥ 16 mm
XF1	3,5	3,0	2,5
XF3	4,0	3,5	3,0

F-luku lasketaan kaavasta [17, s. 81]:

$$F = \frac{1}{-4,0 + 7,2 \frac{\left(\frac{w}{c}\right)^{0,45}}{(a-1)^{0,14}}} \quad (1)$$

missä w/c on tehollinen vesi-sementtisuhde (tehollinen vesimäärä/kokonaissementtimäärä)

a on mitattu ilmamäärä [%] tapauksessa, jossa betonin kiviaineksen ylänimellisraja on 16 millimetriä. Ylänimellisrajan ollessa 12 millimetriä mitatusta ilmamäärästä vähennetään 0,5 prosenttiyksikköä ja ylänimellisrajan ollessa 8 millimetriä 1,0 prosenttiyksikköä.

Jos vesi-sementtisuhde on pienempi kuin 0,4, taulukoiden 4. ja 5. ilmamäärän raja-arvoja voidaan pienentää 0,5 prosenttiyksiköllä. Ilmamäärän yläraja on tuotantoa varten määriteltä vähimmäisarvo, johon on lisätty 4 prosenttiyksikköä. Perustellusta syystä, esimerkiksi tavoiteltaessa hyvin alhaista huokosjakoa, voi ilmamäärä olla taulukkoarvoa suurempi, kunhan varmistetaan ennakkokokein huokosjaon ja lujuuden oikea taso [12, s. 110].

5 BETONIN LUJUUDENKEHITYS

Betonin kovettuminen, eli lujuudenkehitys alkaa välittömästi veden ja sementin sekoituessa. Optimiolosuhteissa +20 °C:n lämpötilassa betoni saavuttaa nimellislujuutensa 28 vuorokaudessa. Tätä alhaisemmissa lämpötiloissa lujuudenkehitys on hitaampaa ja korkeammissa nopeampaa. Lujuudenkehitykseen vaikuttavat betonin säilytysolosuhteet sekä betonin koostumus. Esimerkiksi rapidsementtiä käytettäessä nimellislujuuden saavutus voi kestää vain 7 vuorokautta. [2, s. 341.]

Säilytysolosuhteista merkittävin lujuudenkehitykseen vaikuttava tekijä on lämpötila. Alhaisissa lämpötiloissa betonin lujuudenkehitys hidastuu tai jopa loppuu kokonaan. Toinen vaikuttava tekijä on kosteus. Liian alhainen kosteus on ongelmana lähinnä betonin pintaosissa, joista kosteus voi haihtua nopeastikin. Hyvällä jälkihoidolla, eli riittävän pitkällä suojauksella ja kastelulla tai jälkihoitoaineen käytöllä, ongelmilta kuitenkin vältytään.

Betonin koostumuksessa lujuudenkehitykseen vaikuttavat muun muassa [1, s. 51]:

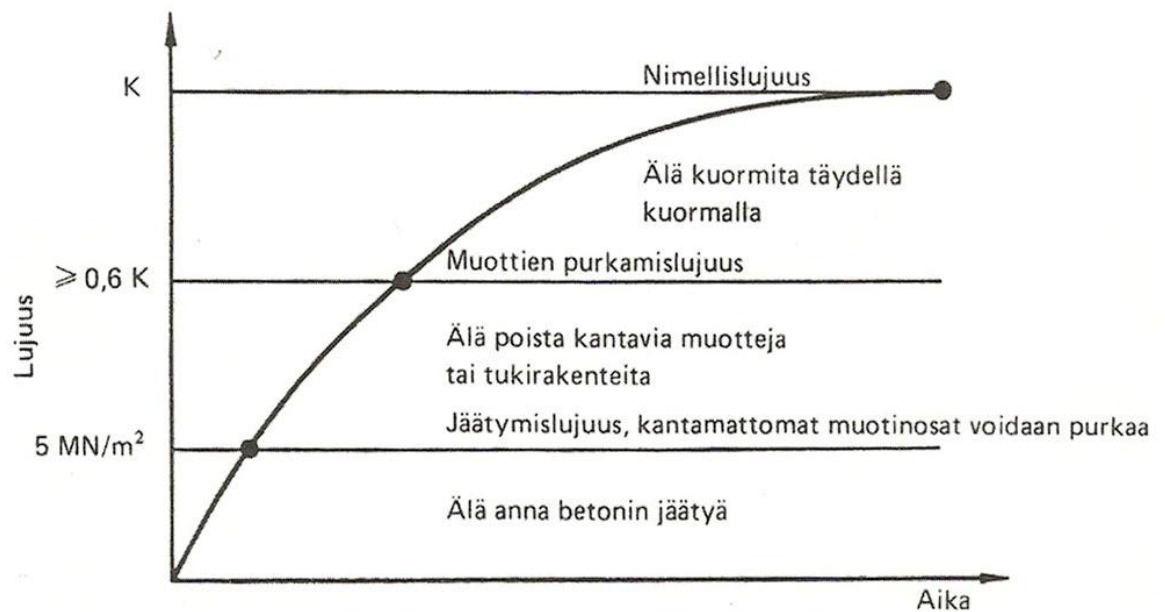
- käytettävä sementtilaatu ja -määrä
- runkoaineen laatu
- vesi-sementtisuhde
- mahdolliset seos- ja lisäaineet.

Koska suuri osa betonista on kiviainesta (65..80 %), on kiviaineksen laadulla suuri merkitys betonin ominaisuuksiin. Runkoaineeksi eivät sovellu hauraat tai huokoiset kivilajit. Suomessa yleisesti käytetty graniittiperäinen kiviaines on ominaisuuksiltaan hyvin betonin runkoaineeksi sopivaa. Betoninormien mukaan betoniin käytettävän kiviaineksen tulee olla standardin SFS-EN 12620 mukaista, CE-merkittyä ja tarkastettua. [2, s. 31, 38.]

Kainuun alueella luonnon kiviainesta on runsaasti saatavilla ja se soveltuu erittäin hyvin betonin runkoaineeksi. Etelä-Suomessa vastaavan kiviaineksen saatavuus on nykyään heikohko. [18.]

5.1 Lujuudenkehityksen seuranta

Betonin lujuudenkehityksen seuranta on tärkeä osa betonointityötä ja sen merkitys korostuu entisestään talvella tapahtuvassa betonointityössä. Lujuudenkehitystä seuraamalla tiedetään ajankohta, jolloin valetun kohteen muotit voidaan purkaa turvallisesti ja rakennetta vahingoittamatta. Lisäksi saadaan tietää, milloin betoni on saavuttanut jäätymis- ja nimellislujuuksensa. Kuvassa 13. esitetään betonin kovettumisen eri vaiheet.



Kuva 13. Betonin kovettumisen vaiheet talviolosuhteissa [2, s. 347].

Lujuudenkehityksen seuraamiseen on useita eri menetelmiä, joista tosin suurin osa on vielä kehitysasteella ja käytettävissä ainoastaan laboratorio-olosuhteissa. Työmaakäyttöön soveltuvia menetelmiä on ainoastaan muutama ja käytännössä aina lujudenseuranta suoritetaan lämpötilamittausten avulla.

Ainetta rikkomattomia lujudenseurantamenetelmiä ovat esimerkiksi kimmovasaramenetelmä sekä ultraäänen nopeuden mittaukseen perustuva menetelmä. Näistä kimmovasara on osoittautunut selkeästi luotettavammaksi menetelmäksi. Ultraäänen nopeuteen perustuva menetelmä sen sijaan sopii käytettäväksi ainoastaan laboratorio-olosuhteissa. Kimmovasaramenetelmässä jousella viritetty vasara laukaistaan vasten betonin pintaa, jolloin laite mittaa betonin puristuslujuuden betonin kimmoisuuden perusteella. Testauskohdan betonipinnan

tulee olla märkä, sileä ja sula. Mikäli betonipinta on jäänyt, voidaan kimmoasaralla saada liian suuria lujuuslukemia. [1, s. 53–54; 19.]

Ainetta rikkoviin menetelmiin lasketaan olosuhde- ja rakennekoekappaleet. Olosuhdekoekappaleiden avulla ei saada selville rakenteen tarkkaa lujuutta, sillä niiden tiivistys ja jälkihoito eroavat varsinaisesta valukohteesta. Rakennekoekappaleilla rakenteen lujuudesta saataisiin varmin tieto, mutta niiden avulla on vaikeaa kartoittaa suuria alueita. [1, s. 55.]

5.2 Lämpötilamittaukset

Betonin lujuudenkehitystä seurataan useimmiten lämpötilamittauksilla. Lämpötilamittauksin tapahtuva lujuudenseuranta perustuu betonin kypsyysikään, joka saadaan laskettua valun iän ja lämpötilan avulla. Kypsyysikä laskemiseen voidaan käyttää niin sanottua Sadgroven menetelmää, jonka tulosten on todettu vastaavan lähelle oikeita mitattuja tuloksia. Sadgroven menetelmän kaava betonin kypsyysikä laskemiseen on seuraava:

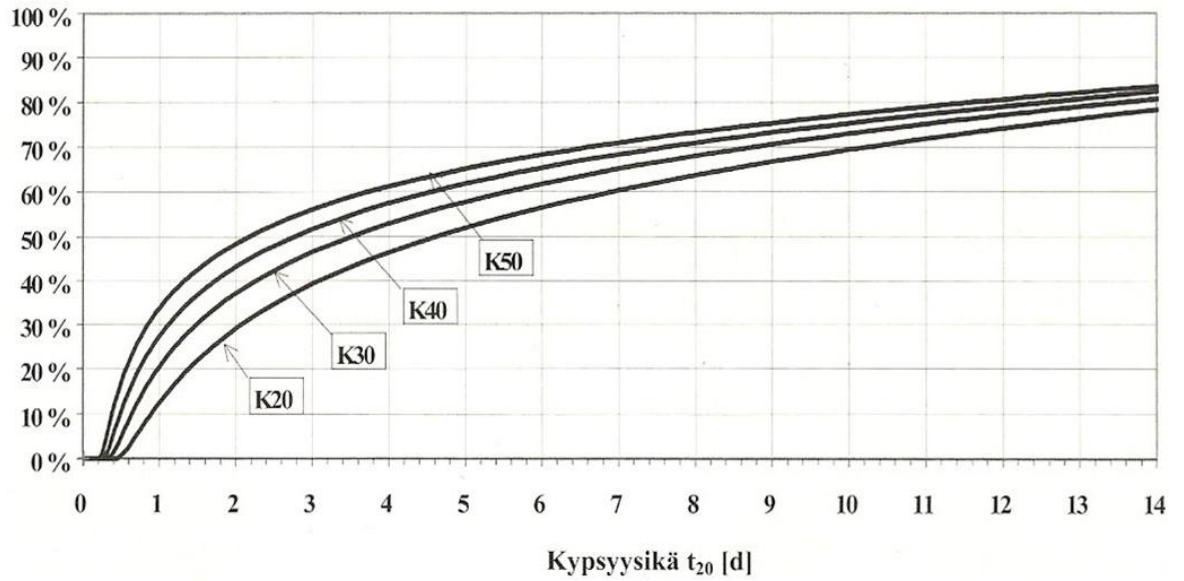
$$t_{20} = ((T + 16 \text{ } ^\circ\text{C}) / (36 \text{ } ^\circ\text{C}))^2 * t \quad (2)$$

missä t_{20} on betonin kypsyysikä

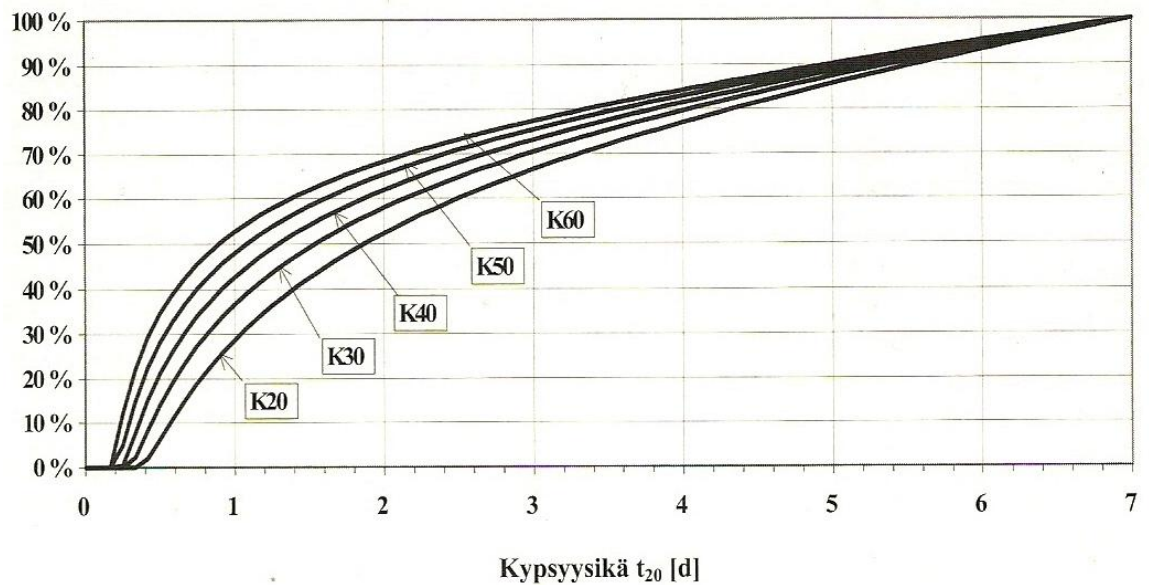
T on betonin lämpötila aikana t ($^\circ\text{C}$)

t on kovettumisaika (d)

Mikäli betonin lämpötila pysyy samana koko kovettumisaajan, kypsyysikä saadaan suoraan edellä mainitusta kaavasta. Kuvissa 14. ja 15. on esitetty betonin suhteellinen lujuudenkehitys kypsyysikä funktiona yleis- tai sr-sementtiä sekä rapid- tai megasementtiä käytettäessä. [2, s. 352–353.]



Kuva 14. Betonin suhteellinen lujuudenkehitys käytettäessä normaalisti kovettuvaa sementtiä [2, s. 353].



Kuva 15. Betonin suhteellinen lujuudenkehitys kun käytetään rapid- tai megasementtiä [2, s. 354].

Kaavasta kaksi esimerkkinä: jos valettu K30 (C25/30) normaalisementillä tehty betonimassa olisi pysynyt +20 °C:n lämpötilassa koko kovettumisaajan, betonirakenne olisi valettu 3 päivää sitten ja muotit haluttaisiin purkaa rakenteen saavutettua 60 % lujuus, saadaan betonin suhteellisen lujuudenkehityksen taulukosta katsomalla muodostettua yhtälö:

$$t_{20} = ((20 \text{ °C} + 16 \text{ °C}) / 36 \text{ °C})^2 * t = 5,4 \text{ d}$$

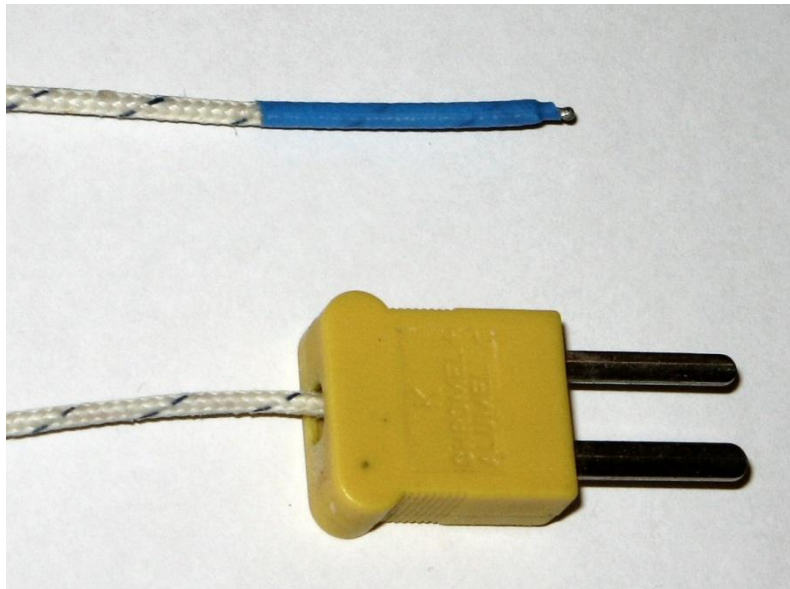
josta saadaan laskettua:

$$t = 5,4 \text{ d} / [((20 \text{ °C} + 16 \text{ °C}) / 36 \text{ °C})^2] = 5,4 \text{ d}$$

Eli esimerkkitapauksessa muotit voitaisiin purkaa vajaan kuuden vuorokauden jälkeen valusta.

Lämpötiloja tulee mitata erityisesti sellaisista valun kohdista, joissa oletetaan lämpötilan olevan alimmillaan, kuten esimerkiksi maata vasten valettavien rakenteiden alaosat ja pysty- sekä vaakarakenteiden liittymäkohdat. Luotettavimmat tulokset saadaan, kun antureita asennetaan tasaisesti valun keski- ja reuna-alueille. [14, s. 114.]

Lämpötilamittauksiin voidaan käyttää tavallisia lämpömittareita, jotka mittaavat lämpötilaa betoniin asennetuista putkista. Tarkempi ja yleisemmin käytetty menetelmä on asentaa betonin sisään termopariantureita, joiden avulla lämpötilat saadaan mitattua joko manuaalisesti tai tarkoitukseen suunnitelluilla automaattisilla dataloggereilla, jotka lähettävät mittaustulokset tietyin väliajoin järjestelmään yhdistetylle tietokoneelle. Esimerkki termoparianturista kuvassa 16. [2, s. 350; 1, s. 52–53.]



Kuva 16. K-tyypin termoparianturi [20].

Termoparianturit voidaan asentaa betonivalun sisään joko valua ennen tai valun jälkeen. Jos termopariantureita asennetaan ennen valua, voivat ne rikkoutua betonimassan valun tai muo-

tin tuplauksen aikana. Tästä johtuen termopariantureita olisi hyvä asentaa muutamia ennen ja jälkeen valun, riippuen valun koosta. Jos betonivalun lämmitysmenetelmänä on lankalämmitys, saadaan termoparianturit asennettua ennen muotin tuplausta lämmityslankalengkien väliin niin, että lämpötila mitataan oletettavasti kylmimmästä kohdasta. Tällöin lämpötilamittauksien kautta tehty betonin lujuudenlaskenta tuottaa luotettavampia tuloksia. Termoparianturit voidaan asentaa ennen valumuotin tuplausta esimerkiksi kiinni raudoituksiin sidontalangalla ja ottaa liitinpää ulos muotin alta tai muotin läpi pienen reiän kautta. Betonimassan valun jälkeen laitettavat anturit asennetaan käyttämällä apuna esimerkiksi harjateräksen pätkää, jolla tehdään betonimassaan pieni reikä, johon termoparianturi saadaan laitettua. Tällöin termoparianturin paikka voi sijoittua esimerkiksi lämmityslangan viereen, jolloin mitatut lämpötilat voivat olla korkeampia, kuin betonin keskilämpötila on. Tällöin lämpötilamittauksen perusteella tehdyistä lujuuslaskelmista saadaan liian korkeita tuloksia ja pahimmassa tapauksessa muotit voidaan purkaa ennen betonin vaaditun lujuuden saavuttamista.

Termopariantureiden asentamisen jälkeen tulee odottaa jonkin aikaa ennen ensimmäisten lämpötilamittauksien tekemistä, että anturit pääsevät tasaantumaan betonimassan lämpötilaan. Tämän jälkeen voidaan lämpötiloja alkaa mitata joko manuaalisesti käymällä mittarin kanssa jokainen termopari läpi, tai asettamalla dataloggeri mittaamaan lämpötilat ja tallentamaan ne.

Betonin lämpötilamittauksia tulee tehdä vähintään kolme kertaa päivässä, jotta lujuuslaskennan tulokset ovat luotettavia. Lujuuslaskennan voi suorittaa manuaalisesti kaavojen kautta esimerkiksi edellä mainitulla Sadgroven menetelmällä. Vaihtoehtoisena tapana voi käyttää tietokoneohjelmaa betonin kypsyysien selvittämiseen, esimerkkinä Finnsementti Oy:n tekemä betonin kypsyysikälaskuri.

Esimerkkinä lämpötilamittauksista ja Finnsementti Oy:n tekemän laskurin käytöstä tilanne (kuva 17), jossa käytetty betoni on K30 (C25/30) ja sementtinä normaalisti kovettuva sementti. Betonin alkulämpötila valun loputtua kello kahdeksalta aamulla on +20 °C ja kolmesti päivässä mitattujen lämpötila-arvojen perusteella betonin lämpötila on laskenut +15 °C:een kolmessa tunnissa. Laskuriin syötettyjen tietojen mukaan betonivalu olisi saavuttanut jäätymislujuuden (5 MN/m²) seuraavana päivänä kello yhdeltätoista.

Poista vanhat tiedot klikkaamalla tästä!			Aloita täyttäminen klikkaamalla tästä!						
Tyhjennys			Täyttö						
FINNSEMENTTI									
Tekninen neuvonta									8.2.2013
Kohde:			Malli kohde						
Rakennusosa:			Seinä 1						
Betoniönjohtaja:			Pasi Betoni						
Betoni:		K 30	Laadunarvosteluikä (d)		28				
Kypsyysikä t_{20} = 0,85 (d)					Lujuusarvio = 5 MPa				
Mittaustulokset			Aika valusta		Keskilämpötila	Kypsyyslisä	Kypsyysikä	Lujuus-	Suunnittelu
Päiväys	Kello	Lämpötila (C)	tunteina (h)	vuorokausina (d)	aikavälillä (C)	aikavälillä (d)	t_{20} (d)	arvio (MPa)	lujuudesta (%)
01.01.2013	8:00	20,0	0,0	0,00	-----	----	0,00	0	0 %
01.01.2013	11:00	15,0	3,0	0,13	17,5	0,11	0,11	0	0 %
01.01.2013	15:00	15,0	7,0	0,29	15,0	0,12	0,23	0	0 %
02.01.2013	7:00	15,0	23,0	0,96	15,0	0,49	0,73	4	12 %
02.01.2013	11:00	15,0	27,0	1,13	15,0	0,12	0,85	5	16 %
Oheinen laskelma perustuu betonin kypsyysian ja lujuuden väliseen riippuvuuteen ns. tyypillisillä perusbetoneilla.									
Jos betonin valmistuksessa käytetään erikoissuhteituksia esim. lisäaineita, seosaineita tai erittäin pieniä sementtimääriä on niiden vaikutus lujuudenkehitykseen selvitettävä erikseen.									
Finnsementti Oy ei vastaa syötettyjen tietojen oikeellisuudesta.									

Kuva 17. Finnsementti Oy:n tekemä betonin kypsyysikälaskuri.

6 BETONIN LUJUUDENKEHITYKSEN YLLÄPITO

6.1 Betonivalun lämmitys

Betonin lujuudenkehityksen varmistamiseksi talvibetonoitaessa betonivalua lämmitetään melkein aina. Poikkeuksina on vain hyvin paksut valut, jotka tuottavat tarpeeksi hydrataatiolämpöä ja pakkasbetonin käyttö. [2, s. 379.] Pää tarkoitus betonivalun lämmityksellä on estää betonia jäätymästä, mutta lämmitystä voidaan käyttää myös lujuudenkehityksen nopeuttamisen [5, s. 32].

Ennen betonin valua tulee suorittaa lämmitystarpeen arviointi. Lämmitystarpeen arvioinnissa mietitään betonin lämmitystehon tarvetta, johon vaikuttaa moni asia. Vaikuttavista asioista suurin on talviolosuhteissa sää. Muita vaikuttavia asioita ovat muun muassa betonimassan alkulämpötila, valun suojaus, valun eristys ja betonimassan hydrataatiolämmön kehitys. Jos kohteessa on useampia samankaltaisia valukohteita, saadaan ensimmäisten betonivalujen jälkeen tarkennettua lämmitystarvetta optimaalisemmaksi. [5, s. 32.]

Betonivalua voi lämmittää monin eri tavoin. Lämmitysprosessi voi tapahtua lämmittämällä betonivalun ympäröivää ilmaa, lämmittämällä muotteja tai lämmittämällä suoraan betonimassaa. Lämmönlähteenä voi olla sähkö, öljy tai kaasu. Lämmönsiirtymisen välikkeenä betonimassaan tai muotteihin voi olla vastuslangat (lankalämmitys), infrapunasäteily, ilma tai höyry. [2, s. 379.]

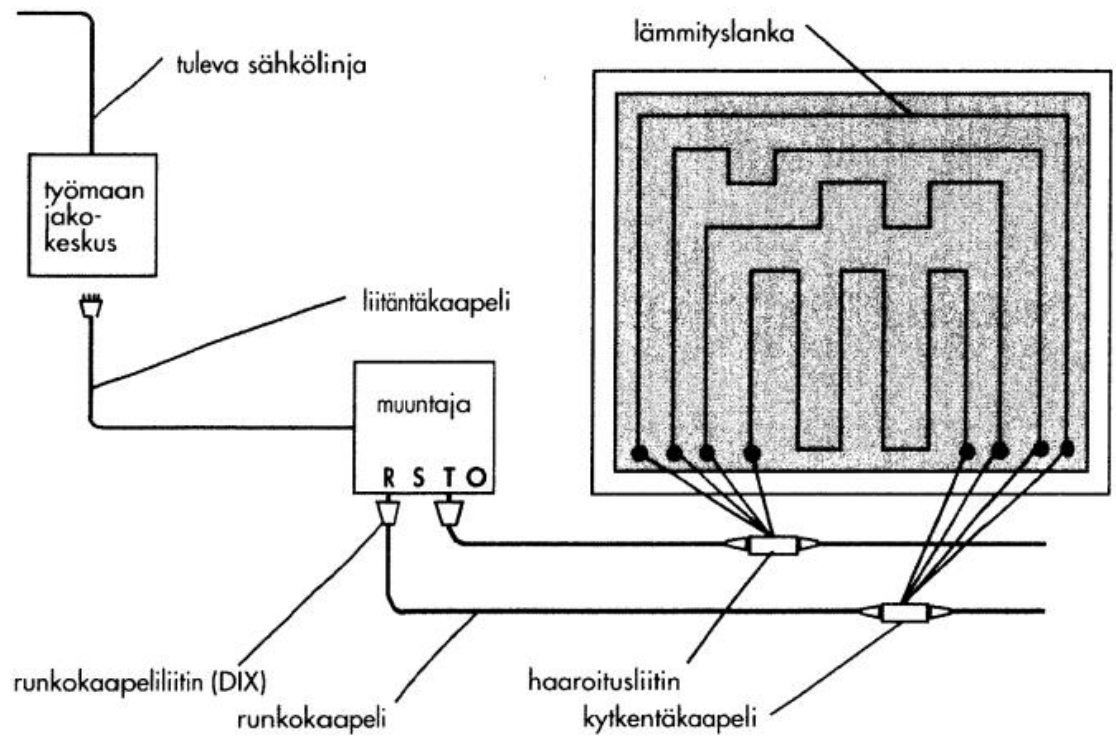
Betonivalujen lämmitysmuoto on hyvä olla tiedossa jo ennen työmaan perustamista, koska esimerkiksi sähkölämmitystä käytettäessä työmaalle pitää varata tarpeeksi iso sähköliittymä ja kaasulämmitystä käytettäessä pitää huomioida kaasun käyttöä edellyttävät viranomaismääräykset. Pienekköjen nestekaasumäärien (noin 200–5000 kg) tilapäisestä käytöstä ja varastoinnista riittää yleensä ilmoitus palokunnalle. Mikäli käyttö on pidempiaikaista ja nestekaasua varastoidaan suurempia määriä, tulee anoa nestekaasun käyttö- ja varastointilupaa Turvallisuus- ja kemikaalivirastolta (Tukes). Betonivalun lämmitysmuodon valintaan vaikuttaa hyvin moni asia, mutta yleensä valitaan edullisimmaksi osoittautuva vaihtoehto. Huolellisella lämmitysmuodon valinnalla ja suunnittelulla saadaan optimoitua kustannukset. [2, s. 379.]

Betonivalun lämmityksen suunnittelu etukäteen on hyvin tärkeää, että lämmityksen teho on varmasti riittävä ja lämpöenergia tasaisesti jakautunutta. On myös tärkeä muistaa huomioida valussa olevat mahdolliset kylmät kohdat. Kylmiä kohtia on yleensä muun muassa muotin reunoissa, kulmissa, vanhan rakenteen liitoskohdissa ja kylmän maan tai kalliopinnan vastaisesti olevissa kohdissa. Kylmät kohdat huomioidaan eri lämmitysmuodoilla eri tavoin, mutta yleisesti ne huomioidaan lisäämällä kohdan lämmitystä. [5, s. 32–33.]

Yleensä käytettävä lämmitysmuoto valitaan miettimällä soveltuvuutta kohteeseen ja energiatehokkuutta. Jos urakoitsijalla on jo varastossa esimerkiksi lankalämmityksessä käytettävät muuntajat, on se siten yleisin käytettävä lämmitysmuoto. Esimerkkitapauksessa lämmityskustannuksia ei muodostuisi enää muusta kuin käytetystä energiasta, valun sisään sijoitetuista vastuslangoista ja lankojen asennuksesta. [8.]

6.1.1 Lankalämmitys

Lankalämmityksessä betonirakennetta lämmitetään sähköllä, joka muutetaan lämpöenergiaksi betonirakenteen sisälle asennettujen vastuslankojen kautta. Vastuslankoihin syötetään sähköenergiaa työmaalla olevan sähkölämmitysmuuntajan kautta, joka muuttaa verkkovirran 9...42 voltin suojajännitteeksi. Tällöin lämmitystehoa voidaan säätää tarvittavan suuruiseksi. Lämmitystehon säädön tarkkuus riippuu käytetystä muuntajasta. Yleensä muuntajissa on viisi eri suojajänniteasetusta, eli viisi eri lämmitystehoasetusta. Kuvassa 18. on esitetty periaatekaavio lankalämmityslaitteistosta ja kuvassa 19. työmaalla käytetty muuntaja. [2, s. 381.]



Kuva 18. Lankalämmityslaitteisto [21, s. 3].

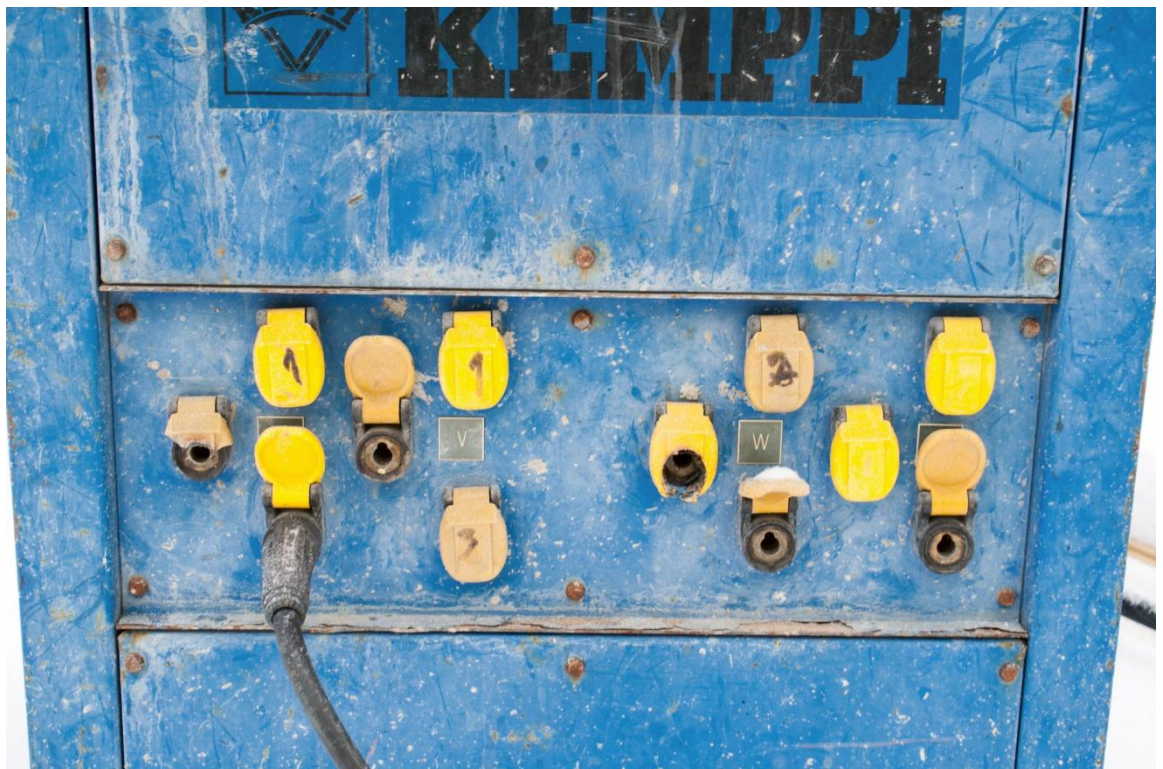


Kuva 19. Työmaalla lankalämmitykseen käytetty muuntaja. (Kuva: Juha Uusitalo)

Runkokaapelit voidaan kytkeä muuntajaan, joko vaihe ja nolla- tai vaihe ja vaihe välille. Vaiheen ja nollan välille kytkettäessä muuntaja antaa runkokaapeliin pienemmät jännitteet (esimerkiksi 16...24 V) ja kahden vaiheen välille kytkettäessä isommat jännitteet (esimerkiksi 28...42 V). Esimerkki lankoihin syötettävän tehon säätömahdollisuuksista taulukossa 6. Esimerkki muuntajan vaihe- ja nollatuloista kuvassa 20. [21, s. 5.]

Taulukko 6. Esimerkki lankatehon säätömahdollisuuksista [21, s. 5].

Jännitteen säätö		Jännite	Lankateho (W/m) (virran voimakkuus (A))						
Muuntajan kytkentä	Tehon säätö- kytki- men asento	V	40 W/m (27 A)	50 W/m (30 A)	60 W/m (32 A)	70 W/m (34 A)	80 W/m (36 A)	90 W/m (37 A)	100 W/m (39 A)
Lankasilmukan pituus m									
Tähtikytkentä:									
vaihe - nolla	1	16	11	10	9	8	7	6,5	6
vaihe - nolla	2	18	12	11	10	9	8	7	7
vaihe - nolla	3	20	14	12	11	10	9	8	8
vaihe - nolla	4	22	15	13	12	11	10	9	8,5
vaihe - nolla	5	24	16	14	13	12	11	10	9
Kolmiokytkentä:									
vaihe - vaihe	1	28	19	17	15	14	13	12	11
vaihe - vaihe	2	31	21	19	17	15	14	13	12
vaihe - vaihe	3	35	24	21	19	17	16	15	13,5
vaihe - vaihe	4	38	26	23	21	19	17	16	15
vaihe - vaihe	5	42	29	25	23	21	19	17	16



Kuva 20. Lankalämmitysmuuntajan vaihe- ja nollatulot. (Kuva: Juha Uusitalo)

Lämmitettävään betonivaluun laitetaan ennen valua 2 millimetrin paksuista muovipäällysteistä lämmityslankaa (vastuslanka), jotka liitetään runkokaapeleiden kautta muuntajaan. Runkokaapelit liitetään langan jakopalaasiin, muuntajaan ja toisiinsa helposti paikalleen pyöryttävien liittimien avulla. Kuvassa 21. näkyvät runkokaapelien liittimet. [2, s. 381.]



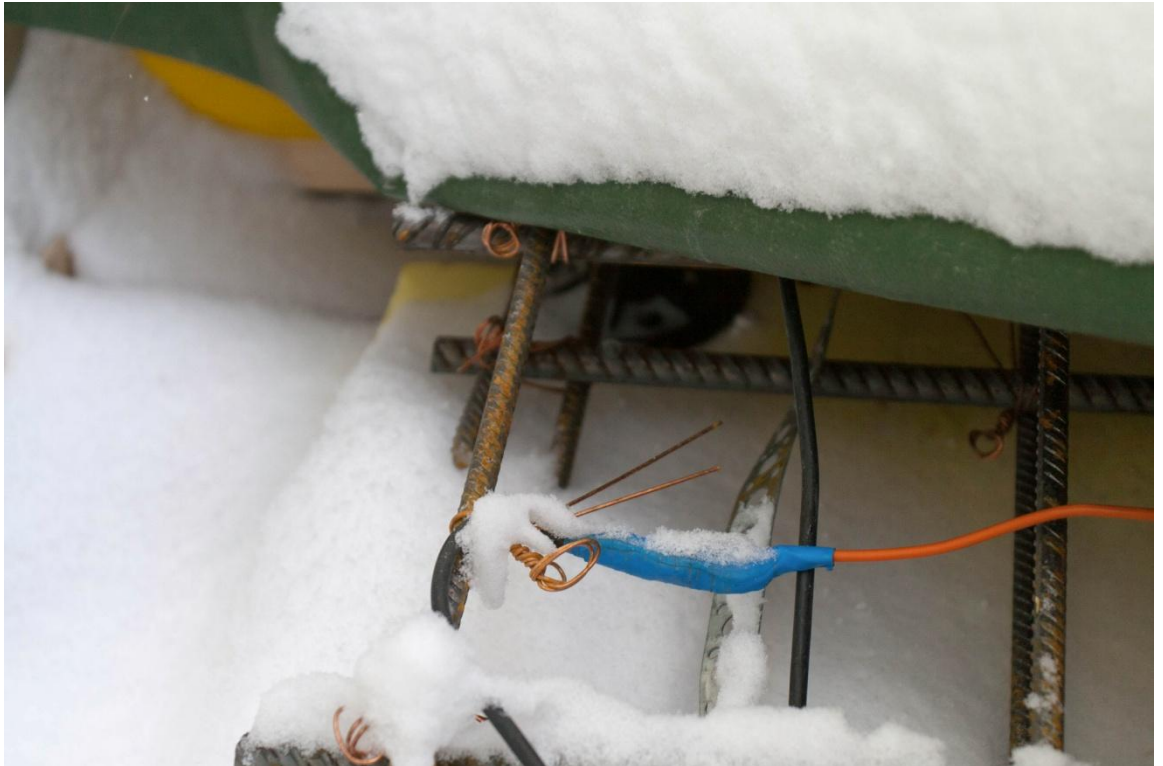
Kuva 21. Runkokaapelien naaras- ja urosliittimet. (Kuva: Juha Uusitalo)

Runkokaapelien jakopalaseen yhdistetään lämmityslankaa paksumpaa johtoa, jolla yhdistetään runkokaapelit ja itse lämmityslanka. Tästä esimerkkinä kuva 22.



Kuva 22. Sähköenergian välitys runkokaapeleilta lämmityslankaan. (Kuva: Juha Uusitalo)

Yhdistämiseen käytetty paksumpi johto vedetään ensimmäiseen lämmityslangan kiinnityspisteeseen asti, jolloin vain pieni osa johdosta jää betonivalun sisään. Tällöin johdosta joudutaan katkaisemaan vain pieni pätkä ja loput voidaan uusiokäyttää. Kuvassa 23. näkyy esimerkki johtojen kiinnityksestä.



Kuva 23. Runkokaapeilta sähköenergian viemiseen käytetyn kaapelin ja lämmityslangan liitos. (Kuva: Juha Uusitalo)

Lämmityslankalenkkejä on hyvä asentaa aina vähintään kaksi, koska on mahdollista että jokin lanka katkeaa valun aikana. Tällöin betonivalu ei jää kokonaan ilman lämmitystä mikäli vahinko tapahtuu.

Suositusarvot lämmityslankaväleille ovat eristämättömässä betonivalussa 200...300 millimetriä ja eristetyssä betonivalussa pidempi. Kuitenkaan yli 500 millimetrin välejä ei ole suositeltavaa käyttää, ettei lämpötilanvaihtelut ole liian suuria betonivalun sisällä. Jos betonivalussa on joitain kylmempiä kohtia, kuten kylmiä rajakohtia tai taitteita, lämmityslankavälin on hyvä olla lähempänä 100 millimetriä. [2, s. 381.]

Lämmityslangat voidaan sijoittaa valussa kiinni esimerkiksi työmuotissa olevaan raudoitukseen ja ne voidaan sitoa paikoilleen sidelangalla. On ehdottoman tärkeää muistaa, ettei lämmitystä kytketä päälle ennen kuin kaikki lämmityslangat ovat betonivalun peitossa. Jos lämmitys kytketään päälle ennen betonimassan valua, kuumenevat lämmityslangat liikaa ja aiheuttavat palovaaran muottiin. Liika kuumeneminen aiheuttaa myös lämmityslankojen palamisen poikki.

Esimerkki lankalämmityksen teon ja käytön ajoituksesta liitteenä 2.

Lankalämmitys soveltuu hyvin erilaisiin paikallavalettaviin kohteisiin. Erityisesti maata tai muita kylmiä pintoja vasten valettaessa lankalämmitys on hyvin kilpailukykyinen sen hyvän kohdistettavuuden ansiosta. Lankalämmitys sopii myös täydentämään muita lämmitysmuotoja esimerkiksi kylmissä kohdissa. Jos lankalämmitystä aikoo käyttää vedenpitävissä betonivaluissa, vaatii se erityistä asiantuntemusta ja huolellisuutta. Tämä johtuu siitä, että huolimattomalla lankojen asennuksella rakenteeseen voi jäädä pieniä kanavia lämmityslankojen yhteyteen, joita pitkin vesi pääsee kulkeutumaan rakenteen läpi. Eristämättömillä teräsmuoteilla valaessa lankalämmityksen käyttö ei ole suositeltavaa jos ulkolämpötila on alle +0 °C. Tällöin rakenteen reuna-alueet jäähtyvät voimakkaasti teräksen hyvän lämmönjohtavuuden takia ja lämpötilaerot rakenteessa voivat nousta haitallisen suuriksi. Suuret lämpötilaerot rakenteen eri osien välillä voivat aiheuttaa betonin halkeilua. [21, s. 1.]

Lankalämmityksen mitoitus perustuu siihen, että vastuslankojen kautta betonimassaan johdettavan lämpöenergian määrä vastaa pintojen kautta tapahtuvan lämpöhäviön määrää. Lisäksi lankalämmityksen tehon mitoituksessa otetaan huomioon betonimassan tuottama hydrataatiolämpö ja mahdollinen massan lämpötilan korotus. Mitoituksessa tulee ottaa huomioon riittävällä varmuuskertoimella mahdolliset olosuhteiden muutokset ja mitoituksen epätarkkuus. Esimerkiksi jos mitoituksessa lasketaan, että yksi lämmityslankasilmukka riittää betonimassan lämmitykseen, voidaan siihen laittaa toinen silmukka varasilmukaksi. [21, s. 3.] Kuitenkin omien kokemusiemme mukaan työmaalla arvioidaan usein lämmityslankojen tarve kokemuksen perusteella. Lämmitystehon hyvän säätömahdollisuuden ansiosta se onnistuu hyvin.

Kuitenkin jos lankalämmitys halutaan mitoittaa laskemalla, se aloitetaan katsomalla lankalämmityksen mitoitusnomogrammista tarvittu sähköteho (liite 1). Nomogrammin käyttämisen jälkeen lasketaan tarvittava lämmityslankamäärä, silmukoiden pituus ja määrä käyttäen apuna taulukkoa 6. Tämän jälkeen voidaan miettiä tarvitseeko lisälämmityslankoja esimerkiksi saumojen tai kylmien kohtien lämmittämiseen. Määrien laskemisen jälkeen voidaan miettiä miten lämmityslankatehoa säädellään lämmityksen aikana.

Kun betonimassa on muotissa ja lämmitys kytketty päälle, pitää lämmityksen toimivuus tarkastaa sopivin väliajoin, esimerkiksi lämpötilamittausten yhteydessä. Tarkastukseen voidaan käyttää esimerkiksi pihntiampeerimittaria. Lämmityksen tehoa säädetään lämpötilamittausten

ja halutun lujoudenkehitysnopeuden perusteella. Esimerkki lankalämmitysmuuntajan tehonsäädöstä kuvassa 24.



Kuva 24. Lankalämmitysmuuntajan tehonsäätö. (Kuva: Juha Uusitalo)

Lankalämmityksen hyviä puolia ovat [22, s. 16]:

- mahdollista kohdistaa hyvin tarkasti (muun muassa kylmien kohtien lisälämmitys)
- asennuskustannukset vakiot
- lämmitystehon helppo säätäminen
- lämmitystä ei tarvitse lopettaa muottien purkamisen jälkeen

- riippumaton muottityypistä [21, s. 1].
- hyötysuhde hyvä (jopa ~80 %) [23, s. 33].

Lankalämmityksen heikkouksia ovat [22, s. 16]:

- mahdolliset lämpötilaerot betonivalun sisässä
- lämmityslankojen mahdollinen katkeaminen
- betonivalun sisään jäävien lämmityslankojen kertakäyttöisyys.

Lankalämmitys on hyvin monipuolinen betonivalun lämmitystapa. Sitä on käytetty Suomessa jo hyvin pitkään ja se on vieläkin yksi käytetyimmistä lämmitysmenetelmistä.

Markkinoilla on myös helppokäyttöisempi ratkaisu lankalämmityksen käyttöön, jossa on esimerkiksi 30 tai 80 metriä lämmityslankaa, termostaatti ja 230 voltin pistoke samassa pake-tissa. Tässä vaihtoehdossa tarvitsee vain asentaa lämmityslanka betonin sisään ja kytkeä lan-gat pistokkeella sähköverkkoon, jolloin lämmitys alkaa. Tämä tapa lankalämmityksestä sovel-tuu kalliimman hintansa puolesta kohteisiin, joissa lämmityslankamenekki on pienehkö. 230 voltin lämmityskaapelin käytön kustannuksia on laskettu kohdassa 8.2.1. Ainakin yksi helppokäyttöisempi lankalämmityspaketti on hyvä olla työmaalla varalla, vaikka käytössä olisi pe-rinteinen lankalämmitys. Jos valussa on käytetty tällaista lämmityskaapelielementtiä, sitä voi-daan hyödyntää vielä myöhemmissäkin vaiheissa, jos valettua betonia halutaan esimerkiksi kuivattaa. Tämä tietysti vaatii sen, että betonivalun ulkopuolelle tuleva osa johdosta sekä pis-toke suojataan niin, että ne pysyvät ehjinä muiden rakennustöiden aikana. Esimerkki helppo-käyttöisestä betonilämmityksestä kuvassa 25.



Kuva 25. Helppokäyttöinen betonin lankalämmitysjärjestelmä. [24.]

6.1.2 Lämpömuotit

Lämpömuotilla tarkoitetaan eristettyä muottia, jonka muottipinnan taakse on asennettu kiinteästi vastuslankasilmukoita tai lämpövastuksia. Näiden vastuksien kautta lämpö siirtyy betonimassaan. Yleensä lämpömuottina käytetään suurmuotteja, esimerkiksi pöytä- tai seinämuotteja. Lämpömuotit voivat toimia joko verkkojännitteellä tai vaihtoehtoisesti 380 voltin jännite on voitu tiputtaa 42 voltin suojajännitteeksi, kuten lankalämmityksessä. Lämpömuotien lämmitysteho on helppo säätää muoteissa olevilla termostaateilla ja yleensä muotteihin on mahdollista saada myös kello-ohjaus. [14, s. 110.]

Turvallisuus- ja kemikaaliviraston ohjeiden mukaan suurin sallittu lämmitysteho on 250 W/m² kummassakin muotin puoliskossa ylikuumentumisvaaran takia. Lämpömuotteihin asennetaan myös turvatermostaatit ylikuumentumisvaaran poistamiseksi. [21, s. 34.]

Lämpömuotit voidaan kytkeä osateholle jo ennen betonoinnin aloitusta, että muotit sulavat ja lämpiävät. Tällöin muotteja ei tarvitse puhdistaa ja lämmittää höyryllä. Pitää kuitenkin muistaa se, ettei muottipintoja esilämmitä liikaa, koska tällöin betonin valamisen jälkeen betonimassan pinta kovettuu muuta massaa nopeammin ja hilseilee muotin purkuvaiheessa. [14, s. 110.]

Lämpömuottien käytön etuja [22, s. 11]:

- helppokäyttöinen, vähäinen työmenekki
- varmatoiminen, ei pelkoa lämmityslankojen katkeamisesta.

Huonoja puolia sen sijaan ovat [22, s. 11]:

- reuna-alueiden, etenkin seinien alaosien lisälämmitystarve
- suuret hankintakustannukset
- soveltuvuus vain suuriin valuihin.

Lämpömuotteja käytetään hyvin yleisesti, mikäli valettavaa pinta-alaa on paljon. Esimerkiksi seinien valaminen ja lämmittäminen onnistuu helpoiten lämmitettävillä suurmuoteilla.

6.1.3 Puhallinlämmitys

Puhallinlämmityksessä lämmitetään betonirakennetta ympäröivää ilmaa, josta lämpö siirtyy itse betoniin. Lämmitystä tarvitsevan kohteen ympärille tai alapuolelle järjestetään mahdollisimman hyvin suljettu ilmatila, jonne lämmittimet asennetaan. Lämmittiminä käytetään useimmiten sähkö-, öljy- tai kaasukäyttöisiä kuumailmapuhaltimia, mutta vaihtoehtona on myös kuumavesi- ja höyrykäyttöisiä malleja. Kuvassa 26. on pienikokoinen 9 kilowatin tehoinen lämmitin. [2, s. 380; 22, s. 14.]



Kuva 26. Pienikokoinen 9 kW lämpöpuhallin. (Kuva: Juha Uusitalo)

Lämmittimien tehoalue on laaja, muutamasta kilowatista aina useisiin satoihin kilowatteihin. Käytettävien lämmittimien määrä ja teho valitaan aina valettavan kohteen paksuuden, laajuuden, lämmitettävän kohteen ilmatilavuuden ja ympäröivien olosuhteiden mukaan. Taulukossa 7. on esitetty karkeitä lämmitystehontarpeita erikokoisille rakenteille. Yleensä kaksi pientä lämmitintä on parempi vaihtoehto kuin yksi iso, sillä jos toinen lämmittimistä jostain syystä rikkoontuu, ei lämmitettävä kohde pääse täysin jäähtymään. [2, s. 380; 22, s. 14.]

Taulukko 7. Puhallinlämmityksen arvioitu tehontarve erikokoisille rakenteille [2, s. 381].

Laatan paksuus	Valettavan laatan pinta-ala			
	50 m ²	100 m ²	200 m ²	300 m ²
100 mm	28 kW	56 kW	112 kW	168 kW
200 mm	56 kW	112 kW	168 kW	336 kW
300 mm	112 kW	168 kW	336 kW	672 kW

Puhallinlämmitys sopii parhaiten vaakarakenteiden, erityisesti holvirakenteiden lämmitykseen. Holvirakenteen alapuolinen tila tulee olla mahdollisimman hyvin suljettu ja vedoton sekä holvimuotin eristämätön, jotta kuumailmalämmitys toimii halutulla tavalla. Mikäli edellä mainituista seikoista on huolehdittu, voi kuumailmalämmitys yksinään riittää valettavan holvirakenteen lämmitykseen. Aina on kuitenkin varmistettava erityisesti valetun kohteen reuna-alueiden mahdollisesta lisälämmitystarpeesta esimerkiksi lankalämmityksen avulla. [22, s. 14.]

Puhallinlämmitys on helppo järjestää ja sillä saadaan lämmitettyä vastavaletun kohteen lisäksi myös aiemmin valettuja alapuolisia rakenteita, varmistaen näin niiden lujoudenkehitys. Lämmittimien siirtäminen tarvittaessa on nopeaa ja lämmitintyyppistä riippuen ne ovat varsin huoltovapaita. [22, s. 14–15.]

Puhallinlämmityksen haittapuoliin voidaan lukea sen verrattain huono hyötysuhde, joka on yleensä vain noin 30 %. Hyötysuhdetta voidaan parantaa eristämällä ja tiivistämällä lämmitettävä tila huolellisesti. Puhallinlämmityksen käyttö vaatii myös pitkää lämmitysaikaa, noin 3...4 vuorokautta. [2, s. 380; 22, s. 15.]

6.1.4 Säteilylämmitys

Säteilylämmityksessä lämmittimen lähettämä säteily ei lämmitä ilmaa, vaan säteilyenergia muuttuu lämpöenergiaksi vasta kohdatessaan kiinteää ainetta, kuten betoni- tai muottipinnan. Näin ollen säteilylämmitys on hyötysuhteeltaan huomattavasti parempi, kuin esimerkiksi kuumailmalämmitys, jossa lämmitysenergiaa menee paljon hukkaan ilman liikkeiden vaikutuksesta. [2, s. 385; 22, s. 12.]

Säteilylämmitys on erittäin tehokas lämmitysmenetelmä, kun halutaan nostaa lämpötilaa nopeasti ja suunnata lämmitys tiettyyn kohteeseen. Tämä on tarpeen kun halutaan varmistaa valettavan betonirakenteen nopea lujoudenkehitys. Kuten kuumailmalämmityksessä, voidaan säteilylämmityksen tehoa parantaa suojaamalla lämmitettävää kohdetta ympäröivä tila tuulelta, jolloin myös tilan lämpötila nousee ja ilmavirtaukset eivät pääse jäähdyttämään lämmitettäviä rakenteita. [22, s. 12.]

Säteilylämmitystä käytettäessä on lämmitettävän kohteen muottimateriaalilla suuri merkitys lämmityksen tehokkuuden kannalta. Käytännössä säteilylämmitys sopii käytettäväksi ainoas-

taan teräsmuottien kanssa, sillä puurakenteisen muotin lämmönjohtavuus on hyvin heikko. On myös huomioitava, etteivät tukirakenteet estä säteilyn kulkua lämmitettävään kohteeseen. Lisäksi betonirakenteet on lämpösuojattava hyvin lämmityksen vastakkaiselta puolelta. [2, s. 388.]

Muita huomioitavia seikkoja säteilylämmitystä käytettäessä:

- Säteilylämmittimien tehon tulee olla säädettävissä, jotta vältetään liian nopealta lämpötilannostolta ja tästä aiheutuneelta halkeilulta.
- Rikkoontumisvaaran ja tasaisen lämmitystehon saamiseksi on suositeltavaa käyttää mieluummin useampaa pienitehoista kuin yhtä suuritehoista lämmitintä.
- Säteilijöiden sijoitus on suunniteltava siten, että ulkoilmaan rajoittuvat osat ja rakenteiden liittymäkohdat saavat enemmän säteilyä kuin keskialueen osat.

Lämmitettävien rakenteiden lämpötiloja on seurattava koko ajan ja säädettävä lämmittimien tehoa ja sijoitusta tarpeen vaatiessa. [2, s. 388–389.]

Säteilylämmityksen etuja ovat esimerkiksi [22, s. 12]:

- lämmityksen helppo suunnattavuus
- lämmön tasainen jakaantuminen rakenteeseen, jolloin reuna-alueiden lisälämmitystä ei välttämättä tarvita
- laitteiden helppo siirrettävyys.

Säteilylämmityksen haittapuolia [22, s. 12]:

- betonin halkeiluriski, mikäli käytetään liian suuria tehoja tai jos lämpötilaerot kasvavat liian suuriksi
- soveltuvuus käytännössä ainoastaan teräsmuotteille
- palovaara ja huono hyötysuhde puumuotteja käytettäessä.

Säteilylämmitys on harvemmin käytetty betonin lämmitysmenetelmä, jolla saadaan tarvittaessa nostettua betonin lämpötilaa nopeasti ja näin nopeutettua varhaislujoudenkehitystä tehok-

kaasti. Lisäksi säteilylämmittimiä voidaan käyttää muihinkin tarkoituksiin, kuten roudan sulattukseen tai sääsuojausten tai -hallien lämmitykseen. [2, s. 387.]

6.1.5 Hörylämmitys

Betonivalua voidaan lämmittää myös höyryllä, mutta sen käyttö ei ole teknisesti eikä energiataloudellisesti järkevää hörylämmityksen huonon hyötysuhteen ja sen aiheuttaman ylimääräisen kosteuden takia [2, s. 389].

Höyry sopii kuitenkin erinomaisesti muottien lämmittämiseen sekä lumen ja jään sulattamiseen, sillä kuuma höyry voidaan suunnata tarkasti haluttuun kohteeseen. Kuvassa 27. on höyrykontti, jonka sisällä on höyryntuottolaitteisto ja tila höyryletkuille ja -pillille.



Kuva 27. Höyrykontti. (Kuva: Juha Uusitalo)

6.2 Betonivalun suojaaminen

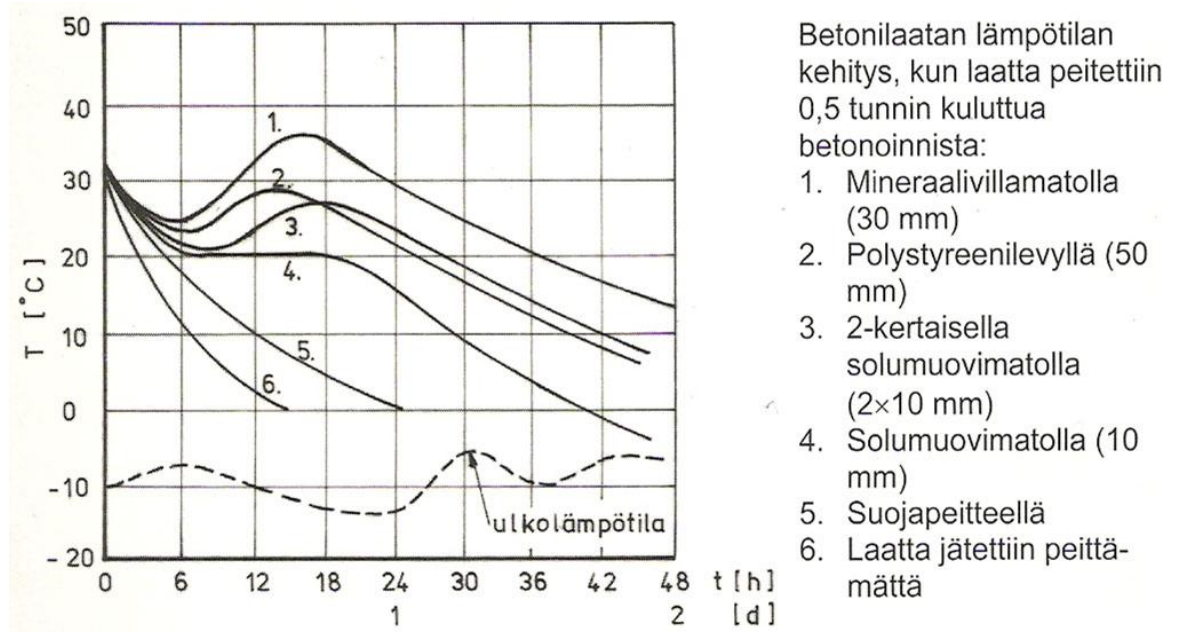
Betonimassan jäähtymistä ja lisälämmitystarvetta voidaan vähentää huomattavasti lämpösuojaamalla valettu kohde välittömästi valun päätyttyä. Lisäksi suojauksella saadaan tasoitettua valun lämpötilaeroja ja estettyä kosteuden haihtumista. Lämpösuojaus voidaan asentaa [1, s. 175]:

- valun ulkopinnalle
- käytettäviin muotteihin
- valun sisäpuolelle muodostuvaan tilaan.

Erityisen tärkeää lämpösuojauksen asentaminen on valun yläpintaan, josta jäähtyminen ja kosteuden haihtuminen on hyvin nopeaa. Yläpinnan lämpösuojaus tulisikin asentaa kiinni betonipintaan, ettei ilma pääsisi kiertämään lämpösuojauksen ja betonipinnan välissä ja näin jäähdyttämään pintaa. Lämpösuojausta asennettaessa on varottava vahingoittamasta tuoretta betonipintaa ja varmistettava suojausten paikallaan pysyminen. [1, s. 175.]

Kuvassa 28. esitetään peittämiseen käytetyn suojausmateriaalin vaikutus betonilaatan lämpötilaan. Käytettävä suojausmateriaali ja -tapa valitaan valettavan kohteen sekä vallitsevien sääolosuhteiden mukaan. Lämpösuojaukseen voidaan käyttää esimerkiksi [2, s. 370]:

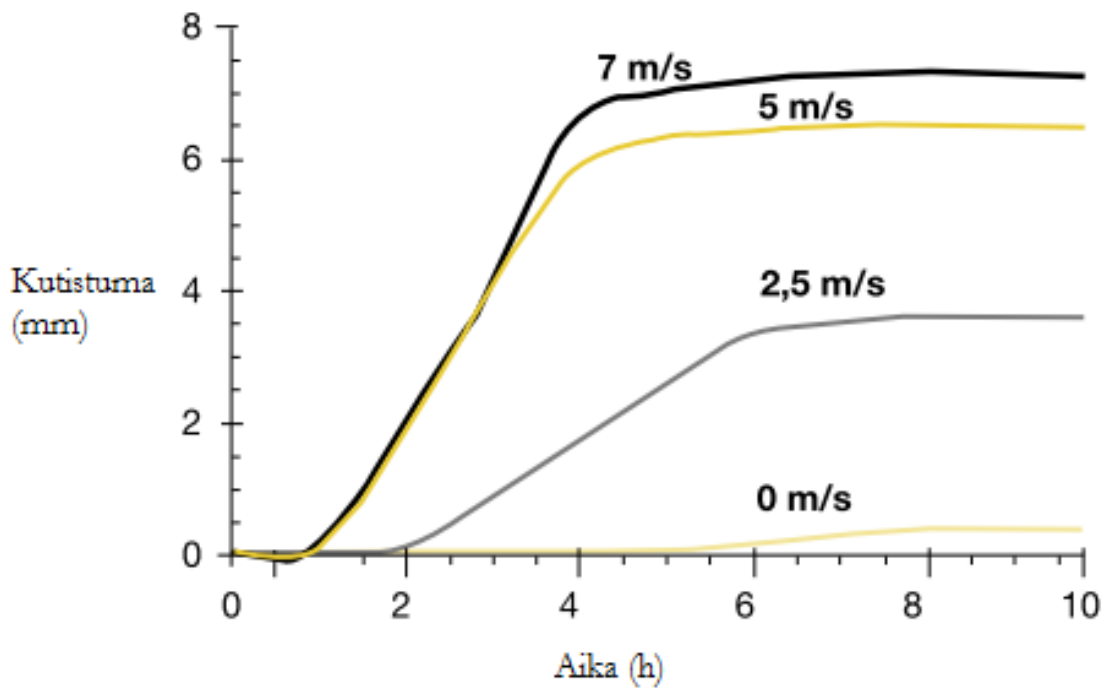
- mineraalivillamattoa
- EPS-levyä
- solumuovimattoa
- suojapeitettä.



Kuva 28. Suojaustavan vaikutus betonin lämpötilaan [2, s. 370].

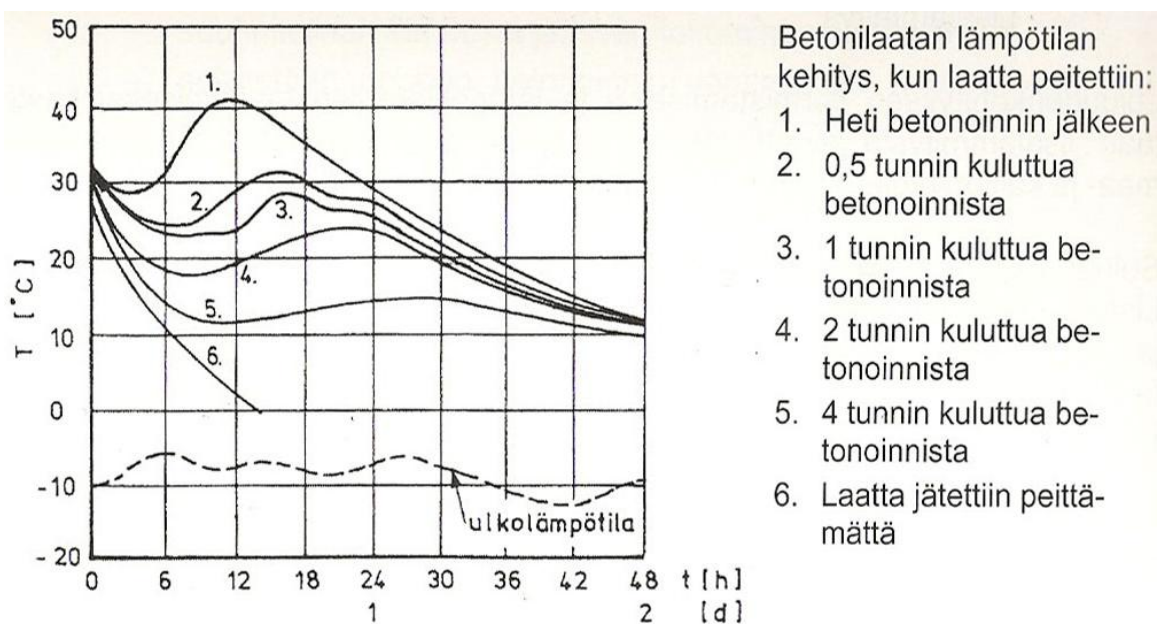
Kuten kuvasta 28. nähdään, on ohuellakin lämpöeristekerroksella suuri vaikutus vastavaletun betonirakenteen jäähtymiseen, joten eristys on syytä tehdä aina kylmällä säällä suoritettavissa betonivaluissa. Vaikka suojapeitteen vaikutus betonin lämpötilaan vaikuttaa varsin pieneltä, estää se kosteuden haihtumista rakenteesta sekä alentaa tuulen kuivattavaa ja jäädyttävää vaikutusta.

Jos vastavaletun betonirakenteen pintaan pääsee tuulemaan, aiheuttaa se jo edellä mainittujen haittojen lisäksi betonin plastista kutistumista. Kovan tuulen päästessä puhaltamaan betonirakenteeseen, voi plastinen kutistuma olla jopa yli kymmenkertainen verrattuna kuivumiskutistumaan. Esimerkki tuulen aiheuttaman plastisen kutistuman suuruudesta näkyy kuvassa 29.



Kuva 29. Tuulen aiheuttama plastinen kutistuma [16].

Lämpösuojauksen tehokkuus riippuu käytetyn eristemateriaalin lisäksi suojauksen asennusajankohdasta. Mitä nopeammin lämpösuojaus suoritetaan valun päätyttyä, sen parempi. Kuvassa 30. havainnollistetaan valun peittämisajankohdan merkitystä betonin lämpötilaan.



- Betonilaatan lämpötilan kehitys, kun laatta peitettiin:
1. Heti betonoinnin jälkeen
 2. 0,5 tunnin kuluttua betonoinnista
 3. 1 tunnin kuluttua betonoinnista
 4. 2 tunnin kuluttua betonoinnista
 5. 4 tunnin kuluttua betonoinnista
 6. Laatta jätettiin peittämättä

Kuva 30. Suojausajankohdan vaikutus betonin jäähtymiseen [2, s. 378].

6.3 Jälkihoito

Jälkihoidon tarkoituksena on varmistaa betonille sopivat olosuhteet jotta sen ominaisuudet kehittyvät kuten on suunniteltu. Keskeisimmät asiat ovat betonin lujuudenkehityksen varmistaminen ja betonipinnan liian nopean kuivumisen estäminen. Myös betonin hydrataatiolämpötilojen hallinta massiivisissa rakenteissa sekä betonirakenteen lämmittäminen kylmissä olosuhteissa luetaan jälkihoitoon. Jälkihoitotoimenpiteet ja niiden aloitusajankohta suunnitellaan rakenteen koon, muodon, käytetyn betonin ja ympäröivien olosuhteiden mukaan. [9.] Jälkihoidon suunnittelu työmaaolosuhteissa tarkoittaa käytännössä sitä, että valitaan jälkihoitotapa ja jälkihoidosta vastaava henkilö tai henkilöt. Erityisesti talvibetonoinnissa jälkihoidon valvontaan on kiinnitettävä erittäin suurta huomiota.

Useimmissa tapauksissa jälkihoito voidaan lopettaa kun betoni on saavuttanut 70 prosenttia nimellisljuudestaan. Poikkeuksena tästä ovat rasisluokat X0 ja XC1, joissa jälkihoito voidaan lopettaa jo kun betoni on saavuttanut 60 prosenttia nimellisljuudestaan. Lisäksi rasisluokissa XF2 ja XF4 tai mikäli rakenteelta vaaditaan erityistä kulutuskestävyyttä, jälkihoitoa on jatkettava kunnes 80 prosenttia nimellisljuudesta on saavutettu. [12, s. 127.]

Betonin riittävän kosteuden ylläpitämiseksi voidaan käyttää kastelua, betonin pintaan levitettäviä jälkihoitoaineita tai rakenteen peittämistä esimerkiksi muovikalvolla.

Talvibetonointiin soveltuvin jälkihoitomenetelmä on peittäminen, jolloin voidaan samalla estää lämmön haihtumista rakenteesta. Kasteleminen jäähdyttää betonipintaa, mikä voi aiheuttaa lämpötilaeroista johtuvaa halkeilua eikä kastelu näin sovellu talvibetonoinnin jälkihoitotavaksi.

Betonipintaan levitettävät jälkihoitoaineet muodostavat lähes vesitiiviin kalvon ja estävät siten kosteuden haihtumista rakenteesta. Jälkihoitoaineita voidaan käyttää myös talviolosuhteissa, mutta tällöin on otettava huomioon käytettävän aineen sallitut käyttölämpötilat. Mikäli jälkihoitoaineella käsiteltävä betoni aiotaan pinnoittaa, on jälkihoitoaine poistettava valmistajan ohjeiden mukaan ennen pinnoitusta. Yleensä jälkihoitoaine poistetaan harjaamalla, pesemällä tai sinkopuhaltamalla. Joidenkin jälkihoitoaineiden poistaminen on erittäin vaikeaa, eikä niitä suositella käytettäväksi pinnoitettaville betonirakenteille.

Talvibetonoinnissa keskeisintä on betonin oikeasta lämpötilasta huolehtiminen. Betonipinta suojataan mahdollisimman pian valun jälkeen tuulelta ja pakkaselta ja lämmitys kytketään

päälle. Betonirakenteen lämpötilaa tulee seurata jatkuvasti. Eritystä huomiota kiinnitetään rakenteiden reuna-alueisiin ja huolehditaan niiden mahdollisesti tarvitsemasta lisälämmityksestä.

7 YLEISIMMÄT VIRHEET TALVIBETONOINNISSA

Betonoinnissa voi tapahtua virheitä sekä kesä- että talviolosuhteissa, mutta kokemusten mukaan melkein kaikki hankalasti korjattavat ja vaaralliset virheet sattuvat talviaikana. Talvibetonoinnissa on erittäin monia asioita, joissa on mahdollista tapahtua virheitä. Virheet ja epäonnistumiset aiheuttavat kovettuvaan betoniin vaurioita ja yleensä virheiden seurauksia ei huomaa ennen kuin muotit on purettu tai jopa vasta jonkin aikaa muottien purun jälkeen. Virheiden seurauksina betoni voi esimerkiksi lohkeilla ja rapautua muottien purun aikana. Tämä voi myös tapahtua vasta jonkin aikaa muottien purkamisen jälkeen, jos betoni on esimerkiksi valesitoutunut tai tartunnat ovat jääneet vajavaisiksi muottiin jääneen lumen ja jäätäkien takia. [1, s. 196.]

Talvibetonoinnin aikana todennettuja vakavia virheitä, jotka voivat olla myös vaarallisia turvallisuuden kannalta, ovat [1, s. 197]:

- Laittevikojen sattuminen ja alimitoitettu betonimassan lämmitys, mitä ei ole havaittu puutteellisen lämpötilojen seurannan takia. Seurauksina voi olla betonin jäätyminen ennen jäätymslujuuden saavuttamista tai muottien purkaminen ennen muotinpurkulujuuden saavuttamista.
- Epätasaisesti lämmitetty betonivalu, minkä seurauksena on se, että osassa valua, esimerkiksi keskikohdissa, lämpötilat voivat olla hyvinkin korkeita, ja esimerkiksi alareunasta valu voi olla jopa pahimmillaan pakkasen puolella.
- Betonivalun lämpösuojaus on puutteellinen tai huonosti paikoilleen asennettu. Tästä voi seurata valun oletettua hitaampi lujudenkehitys erityisesti pintaosissa. Pahimmassa tapauksessa betoni voi päästä jopa jäätymään.
- Betonimassan lämpötila valun alkaessa on ajateltua reilusti alhaisempi, minkä seurauksena voi olla betonin lujudenkehityksen hidastuminen, jolloin esimerkiksi muotinpurkulujuuden saavuttamiseen menee suunniteltua enemmän aikaa. Tämä virhe voi esiintyä yleensä vain silloin, kun betonimassan toimitusmäärät ovat suuria ja toimitusrytmi on nopea.

- Lisäaineiden käytön yhteydessä, nopeaa muottikiertoa käytettäessä, ei ole osattu arvioida betonimassan lujuudenkehitystä oikein. Tällöin vaikutuksena on yleensä muottikierron viivästyminen.
- Betonivalun tekeminen jäätyneen maan päälle. Tällöin maan sulaessa tapahtuu maan routimista, ja tästä johtuen betonirakenne voi halkeilla ja painua.
- Muottien puutteellinen puhdistus lumesta ja jäädästä. Tämä tapahtuu yleensä, jos höyrytys on jätetty tekemättä tai se on tehty huolimattomasti. Virhe tapahtuu yleisimmin etenkin seinä ja pilarimuottien alaosissa. Tästä seurauksena betonivalun alaosaan voi tulla onkaloita tai koloja, ja betonin ja terästen tartunta voi jäädä heikoksi tai kokonaan irralleen. Pahimmassa tapauksessa betonivalun alaosa voi jäädä kokonaan vain raudoituksen varaan.
- Muottien tukeminen jäätyneen maan varaan. Jos muotit tuetaan jäätyneen maan varaan ja maa pääsee lämpiämään, esimerkiksi muottien lämmityksen vaikutuksesta, alkaa maa painua. Tästä voi seurata betonivalun joskus jopa huomattava painuminen. Rakenteiden täysiä sortumisia tapahtuu harvemmin. Tämä voi tapahtua myös silloin, jos muotit pystytetään jo talvella, mutta itse valu on vasta keväällä, jolloin ilman lämpötilan nousu aiheuttaa maan lämpenemisen ja painumisen.

Betonivalun jäätyminen ennen jäätymslujuuden (5 MN/m^2) saavuttamista aiheuttaa lujuuskatoa, vaikka betoni olisi tämän jälkeen lämmitetty ja jälkihoidettu oikein. Lujuuskadon suuruus vaihtelee ja siihen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi betonin koostumus, jäätymsajankohta ja jäätymsnopeus. Koska lujuuskadon suuruus vaihtelee tapauskohtaisesti, tulee ennen jäätymslujuuden saavuttamista jäätyneen betonimassan loppulujuus selvittää aina rakennekoekappaleilla. Se tapahtuu ottamalla rakenteesta näytekappale ja lähettämällä se laboratorioon testattavaksi. [1, s. 197.]

Jos betonin jäätymistä ei huomata, voi siitä seurata hyvin vakava vaaratilanne, koska betonin jäätyessä sille kertyy niin sanottua valelujuutta. Valelujuus voi olla jopa $10\text{...}30 \text{ MN/m}^2$, joten betonimassan jäätymistä ei välttämättä huomaa edes muottien purkamisen jälkeen. Betonin jäätyminen hyvin isoilta alueilta on kuitenkin harvinaista ja sitä esiintyykin yleisimmin betonivalun reunoilla ja pintaosissa. [1, s. 197–198.]

Tavanomaisempia ja lähinnä rakenteen laatua ja säilyvyysominaisuuksia heikentäviä talvibetonointivirheitä ovat [1, s. 198]:

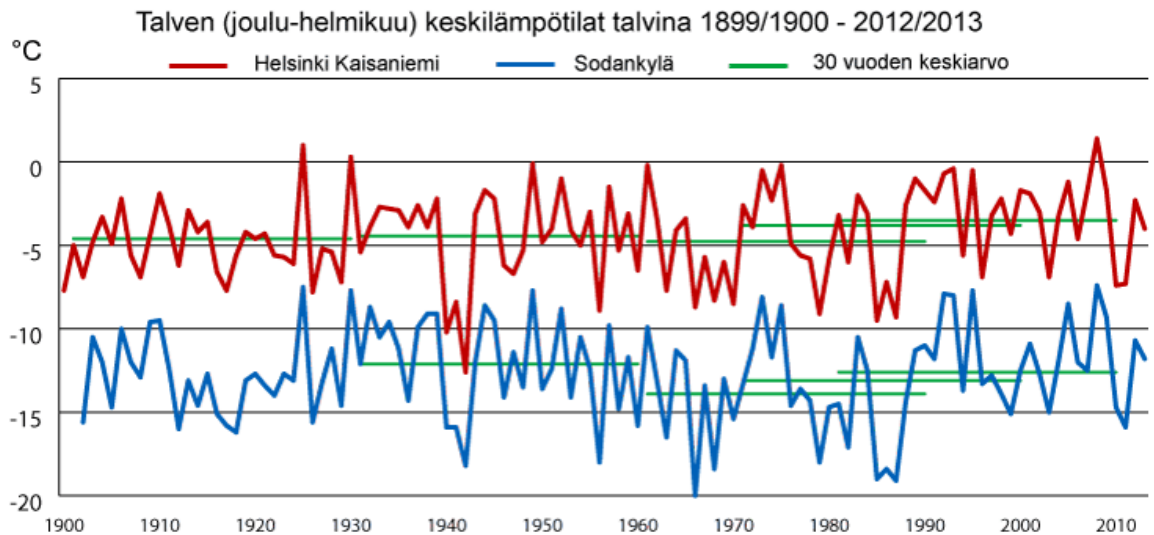
- Säänkestävyyttä vaativien betonirakenteiden liika lämmitys, jolloin korkein suositeltu lämpötila on tavallisella betonimassalla noin +40 °C.
- Liian suuri paikallinen lämmitys, jolloin esimerkiksi betonimassan pinta kovettuu ennen sisusta. Tästä voi johtua betonimassan pinnan hilseily, verkkohalkeilu ja betonin säilyvyysominaisuuksien huononeminen. Liian suuri lämpötila aiheuttaa myös lujuuskatoa.
- Muottien ja nostoastioiden viileiksi jääminen höyrytyksestä huolimatta. Silloin betoni herkästi tarttuu esimerkiksi nostoastian reunoihin. Tämä aiheuttaa betonin lisähukkamenekkiä, nostoastian tilavuuden pienenemistä ja nostoastian puhdistamiseen käytetyn ajan pidentymistä. [8].
- Betonivalun lämmityksen aloittaminen tai suojaus myöhässä, josta seurauksena on betonin alkulämmön lasku. Tätä seuraa lujuudenkehityksen hidastuminen ja vaadittavan lämmitysenergian kasvu. [8.]
- Massiivisten rakenteiden tai metallirakenteiden, esimerkiksi ontelolaattojen, delta-palkkien ynnä muiden jääminen höyrytyksestä huolimatta kylmiksi. Näiden kylmäksi jääminen aiheuttaa paikallista betonimassan lämpötilan laskua ja seurauksina voi olla esimerkiksi tartunnan heikentymistä tai halkeilua, riippuen rakenteiden sijainnista. [8.]

Rakenteiden kokonaan sortuminen tai pystyrakenteiden kaatuminen on hyvin harvinaista. Mikäli koko rakenne sortuu tai kaatuu, on todennäköisesti tapahtunut niin, että betonivalu on päässyt jäähtymään tai kokonaan jäätymään ennen jäätymislujuuden (5 MN/m^2) saavuttamista. Tällaisessa tapauksessa betonin lujuudenkehitys ei ole kerinnyt kehittyä tarpeeksi ja betonivalun lujuus on ollut olemattoman pieni. Tällöin kyseessä on ollut betonoinnin täydellinen epäonnistuminen, joka on johtunut useiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta. Mahdollisia tekijöitä ovat lämmityksen rikkoutuminen, sähkölämmitystä käytettäessä esimerkiksi sähköjen katkeaminen, lämmityksen ja suojauksen puuttuminen kokonaan tai muista syistä johtuen betonivalun lämpötilan odottamaton ja nopeasti sattunut runsas laskeminen. [1, s. 197.]

8 TALVIBETONOINNIN KUSTANNUKSET

8.1 Yleiset kustannukset

Talvirakentaminen lisää töiden menekkejä ja rakennusmateriaalien kulutusta. Näiden lisäksi kaluston ja koneiden tarve on suurempi kesään verrattuna. Myös yksi suuri tekijä on hyvin paljon isompi energiankulutus. Talvirakentamisen kustannukset vaihtelevat myös paikkakunnittain, koska esimerkiksi Helsingin ja Sodankylän keskilämpötilat sydäntalvella eroavat suuresti toisistaan (kuva 31.).



Kuva 31. Helsingin Kaisaniemen ja Sodankylän sydäntalven (joulu-helmikuu) keskilämpötilat talvesta 1900 lähtien. [25.]

Lisätöiden vaatimat lisäresurssit voidaan osittain korvata käyttämällä enemmän henkilöstöä, mutta se luonnollisesti lisää kuluja. Talvirakentamisessa on erityisen tärkeää suunnitella työt järkevästi, että talven aiheuttamat haitat saadaan minimoitua. [4, s. 6.]

Usein on kuitenkin niin, että talvi viivästyttää rakentamista ja aiheuttaa lisäkustannuksia. Lisäkustannukset ja isompi henkilöstötarve on hyvä ennakoida jo urakkalaskennassa. Lisäksi mahdollisiin talven aiheuttamiin häiriöihin, kuten pakkaspäiviin ja lumen ja jään aiheuttamiin lisätöihin, on hyvä varautua. Taulukossa 8. on esimerkki talven aiheuttamista lisäkustannuksista kerrostalon rakentamisessa. [6, s. 1.]

Taulukko 8. Esimerkki talvirakentamisen lisäkustannuksista kerrostalohankkeessa [6, s. 1].

Kustannuslajit	Rakennusvaiheiden lisäkustannukset (%)		
	Perustustyövaihe	Runkotyövaihe	Sisävalmistusvaihe
Työmenekkilisä	2,6...2,9	0,6...0,7	–
Materiaalilisä	1,7...3,7	0,6...1,9	–
Energialisä	0,9...1,0	1,2...1,4	2,8...3,2
Kone- ja kalustolisä	1,8...2,2	1,2...1,4	0,1...0,2
Talvilisätyöt	1,6...1,8	0,7...0,9	0,2...0,4
Aikakustannuslisä	2,0...2,2	1,0...1,2	–
Yhteensä	13...15	5,5...7,5	3,3...3,7

Esimerkkitaulukosta nähdään, että talvi aiheuttaa lisäkustannuksia jopa 15 % perustustyövaiheeseen, 5,5...7,5 % runkotyövaiheeseen ja 3,3...3,7 % sisävalmistusvaiheeseen. Näiden tietojen perusteella rakennustyö olisi edullisinta suorittaa siten, että perustustyövaihe sijoitettaisiin lämpimään rakennusaikaan ja muut vaiheet talviaikaan. Tällöin säästettäisiin jo paljon lisäkuluissa. Tietenkin optimaalisin tilanne olisi rakentaa kaikki vaiheet lämpimään aikaan, mikä harvoin on käytännössä mahdollista.

8.1.1 Betonoinnin ja betonin lisäkustannukset

Talvibetonoinnin kustannuksia lisää myös betonimassan hinta, joka on usein korkeampi kuin kesäaikana. Hintaa nostaa ainakin valmisbetoniasemien useimmiten veloittama betonin lämmityslisä, joka on noin 3...6 % betonin hinnasta.

Joissain tilanteissa voi olla perusteltua käyttää esimerkiksi kuumabetonia, pakkasbetonia tai muuta erikoisbetonia, jolloin betonimassan hinta on tavallista korkeampi. Saumavaluissa usein käytetyn pakkasbetonin hinta on jopa kaksinkertainen normaaliin betoniin verrattuna. Kuumabetonin käyttö lisää hintaa halutusta lämpöluokasta riippuen noin 5...10 %. Nopeasti kovettuva betoni maksaa betonin toimittajasta riippuen 10...20 % enemmän kuin normaali betoni. Lujuusluokan nosto lisää betonin hintaa noin 3...7 % per nostettu luokka. Toisaalta on otettava huomioon lujuusluokan nostolla ja nopeasti kovettuvan betonin käytöllä saavutettu lyhyempi muottikierto ja sitä kautta saadut säästöt.

Käytettävä betoni valitaan aina tapauskohtaisesti valettavan rakenteen, suunnitellun muokkierron ja ympäröivien olosuhteiden mukaan.

Kuvasta 32. nähdään betonitöiden talvityöhaitta- ja lisäprosentit lämpötilaluokittain. Kuvasta voidaan todeta, että betonointityön eri vaiheilla on hyvin suuri ero talvityöhaitta- ja lisäprosentissa. Esimerkiksi seinien pumppubetonoinnin lisäprosentti on 15...50 % ja taas suurmuokkiertyön lisäprosentti on betonointiin verrattuna vain 3...20 %.

Talo 90 Nro	Työlaji Nimi	Töiden talvityöhaitta- ja lisäprosentit (%)				Lähde
		Lämpötilaluokat				
		0...-2,5	-2,5...-7,5	-7,5...-12,5	alle -12,5	
21	Muokkiertyö					
	lautamuokkiertyö	7	10	15	20	Ratu
	levyumuokkiertyö	7	10	15	20	Ratu
	kasettimuokkiertyö	7	10	15	20	Ratu
	suurmuokkiertyö	3	5	10	20	Ratu
	pöytämuokkiertyö	3	5	10	15	Ratu
	kulmamuokkiertyö	3	5	10	15	Ratu
	erikoismuokkiertyö	7	10	15	20	mallytyö
muokkien purku ja puhdistus	7	10	15	20	mallytyö	
22	Raudoitus	7	15	25	35	mallytyö
23	Betonointi					
	nostaastiabetonointi					
	- anturat	15	15	40	50	Ratu
	- seinät ja pilarit	15	15	40	50	Ratu
	- laatat ja palkit	10	10	35	45	Ratu
	pumppubetonointi					
	- anturat	15	40	50	60	Ratu
- seinät ja pilarit	15	30	40	50	Ratu	
- laatat ja palkit	15	40	50	60	Ratu	

Kuva 32. Betonitöiden talvityöhaitta- ja lisäprosentit lämpötilaluokittain [6, s. 6].

Talvikauden aikana betonityöt olisi hyvä suunnitella niin, että pienen talvityöhaitta- ja lisäprosentin omaavat työt tehtäisiin kylmempänä aikana, esimerkiksi muokkiertyöt. Vastaavasti ne työt jolla on isompi talvityöhaitta- ja lisäprosentti, tehtäisiin lämpimämpänä aikana, esimerkiksi itse betonointityö. Joskaan tämä ei kovinkaan usein käytännössä ole mahdollista, koska muokki-, raudoitus- ja betonityöt tehdään yleensä hyvin pienen ajanjakson sisään. Tästä syystä koko betonityöprosessi olisi hyvä suorittaa vasta lämpimämpänä aikana, aikataulun sen sallimassa.

Esimerkkinä työmenekkien talvityöhaitta- ja lisäprosentteista 5000 neliömetrin (450 m³) seinien kasettimuokki-, raudoitus- ja pumppubetonointityökohde. Jos työt tehtäisiin kun lämpötila on +0...-2,5 °C, ja oletettaisiin tuntihinnan olevan 38 €/h, olisivat talven lisäkustannukset seuraavanlaiset:

Kasettimuottityö	$= 0,5 \text{ tth/m}^2 * 38 \text{ €/tth} * 0,07 * 5000 \text{ m}^2$	$= 6650 \text{ €}$
Raudoitustyö	$= 0,04 \text{ tth/m}^2 * 38 \text{ €/tth} * 0,07 * 5000 \text{ m}^2$	$= 532 \text{ €}$
Pumppubetonointityö	$= 0,3795 \text{ tth/m}^3 * 38 \text{ €/tth} * 0,15 * 450 \text{ m}^3$	$= 973,42 \text{ €}$

Eli lisäkustannukset +0...-2,5 °C lämpötilassa olisivat yhteensä 8155,42 €.

Jos samat kasettimuotti-, raudoitus- ja pumppubetonointityöt suoritettaisiin taas alle -12,5 °C lämpötilassa, olisivat lisäkustannukset seuraavanlaiset:

Kasettimuottityö	$= 0,5 \text{ tth/m}^2 * 38 \text{ €/tth} * 0,2 * 5000 \text{ m}^2$	$= 19000 \text{ €}$
Raudoitustyö	$= 0,04 \text{ tth/m}^2 * 38 \text{ €/tth} * 0,35 * 5000 \text{ m}^2$	$= 2660 \text{ €}$
Pumppubetonointityö	$= 0,3795 \text{ tth/m}^3 * 38 \text{ €/tth} * 0,5 * 450 \text{ m}^3$	$= 3244,73 \text{ €}$

Eli lisäkustannukset alle -12,5 °C lämpötilassa olisivat yhteensä 24904,73 €

Näistä esimerkeistä laskettuna saadaan koko 5000 m² kokonaisuudelle +0...-2,5 °C:n ja alle -12,5 °C:n lämpötiloissa tehtynä 16749,31 € hintaeroa, joka on huomattavan iso summa. Esimerkkikohteessa (1000 metriä * 2,5 metriä * 0,18 metriä betoniseinää) se tarkoittaisi yli 30 € lisähintaa betonikuutiota kohti vain kylmemmän ilman takia.

Jos esimerkkikohteen betonityöt olisi suoritettu kesällä, oltaisiin +0...-2,5 °C:n lämpötilaan verrattuna säästetty yli 8000 € ja alle -12,5 °C:n lämpötilaan verrattuna lähes 25 000 €.

8.1.2 Valun eristämisen kustannukset

Valun avonaisen yläpinnan eristäminen on useimmiten kohtuullisen vaivattomasti toteutettavissa, joten suuria työkustannuksia siitä ei muodostu. Valun yläpinnan eristämisen työmenekki mineraalivillamatoilla tai EPS-levyillä on 0,0363 tth/m² [26]. Työmenekki sisältää tarvittavien materiaalien siirrot työmaalla, eristyksen kiinnityksen sekä työkohteen siivouksen.

Esimerkiksi voidaan laskea yläpinnaltaan 9 neliömetrin suuruisen anturavalun lämpösuojaus:

Eristysmateriaali	$= 9 \text{ m}^2 * 3,50 \text{ €/m}^2$	$= 31,50 \text{ €}$
-------------------	--	---------------------

$$\text{Eristystyo} = 9 \text{ m}^2 * 0,0363 \text{ tth/m}^2 * 38 \text{ €/tth} = 12,40 \text{ €}$$

Oletetaan lisäksi, että samoja EPS-levyjä voidaan käyttää uudestaan valujen eristämiseen noin kymmenen kertaa, jolloin yhden eristyskerran materiaalikustannukseksi tulee vain noin 3,15 € ja kokonaiskustannukseksi noin 15,55 €.

Betonivalun avoimien pintojen lisäksi myös valumuotteja voidaan lämpöeristää. Lämpöeristäminen sopii parhaiten pystyrakenteiden muotteihin, mistä syystä useimpiin suurmuotteihin onkin asennettu kiinteät lämpöeristeet. Lämpöeristykseen voidaan käyttää esimerkiksi EPS-levyä, jolla on helppo eristää muun muassa järjestelmämuotteja. Puumuottien eristykseen suositellaan 30...50 millimetrin ja teräsmuotteihin vähintään 50 millimetrin mineraalivilla- tai muuta vastaavaa eristysmateriaalikerrosta.

Muottien eristäminen on hiukan työläämpää kuin valun yläpinnan eristäminen, mutta mikäli samoja muotteja käytetään useisiin samanlaisiin valuihin, voi niiden eristäminen olla taloudellisesti kannattavaa. Lisälämmitystarpeen vähenemisen ja betonin oman lämpötilan ylläpidon lisäksi muottien eristämällä saadaan tasoitettua mahdollisia lämpötilaeroja betonirakenteen keski- ja reuna-alueiden välillä ja näin ehkäistyä betonin halkeilua. [2, s. 370]

Betonivalujen eristystyön taloudellisuutta parannetaan suorittamalla eristystyo huolellisesti ja järjestelmällisesti ja varastoimalla eristämiseen käytettävät materiaalit ja tarvikkeet tarkoituksenmukaisesti. Eristeet on varastoitava irti maasta, esimerkiksi kuormalavojen päälle ja suojattava kosteudelta, lumelta ja kolhuilta suojapeitteillä.

8.2 Lämmityskustannukset

Talvibetonoinnissa välttämättömän betonivalun lämmityksen kustannukset vaihtelevat suuresti valettavan kohteen mukaan. Hyvin paksut betonivalut tarvitsevat yleensä vähemmän lisälämmitystä kuin ohuet, koska paksut betonivalut tuottavat itsessään paljon hydrataatiolämpöä. Esimerkiksi massiiviset anturat voidaan yleensä valaa kokonaan ilman erillistä lisälämmitystä.

Jokaisessa esiteltyssä lämmitysmuodossa samoja menoeriä ovat esimerkiksi:

- lämmityksen asentamiseen tai paikalleen laittoon kulunut työaika
- käytetty lämmön tuottamiseen tarvittu energia
- tarvittavien suojauksien tekeminen
- lämmitysten toimivuuden tarkistamiseen kulunut työaika
- lämmityslaitteiden purkuun käytetty työaika.

Talvibetonoinnin lämmitystä suunnitellessa kannattaa aina huomioida ja käyttää hyväksi mahdolliset rakennuksen omat lämmöntuottolaitteistot, joilla voitaisiin pienentää tarvittavan betonivalun lisälämmityksen kustannuksia. Tästä esimerkkinä lattialaatan valaminen, johon on jo aiemmin asennettu lattialämmityspotket, joiden hyödyntämistä valettavan lattialaatan lämmityksessä voidaan harkita. Tällöin lämmityksestä aiheutuvia kuluja olisivat parhaimmillaan vain käytetty lämmön tuottamiseen tarvittu energia.

Energian käyttöä betonivalun lämmityksessä tulee tehostaa oikein valitulla lämmitystavalla, lämmitystavan oikealla ja energiatehokkaalla käytöllä, tarkoituksenmukaisella lämmönsuojauksella ja lämmityksen ajantasaisella valvonnalla. Aina kannattaa myös harkita suuremman lujuusluokan betonin tai kuumabetonin käyttöä. Niiden käytöllä voidaan saada kustannussäästöjä pienentyneiden lämmityskustannusten ja lyhyemmän muottikierron kautta. [23, s. 3.]

Joissain tapauksissa on mahdollista, että betonilämmitysten suunnittelu tehdään vanhoilla opituilla tottumuksilla ja lämmityskapasiteetti voidaan silloin esimerkiksi ylimitoittaa. Tämän lisäksi lämmityksiä voidaan myös pitää liian pitkään päällä, mikä on tarpeetonta energiankulutusta. [8.]

8.2.1 Lankalämmitys

Lankalämmitys on hyvin yleisesti käytetty lämmitysmuoto, johtuen sen hyvästä hyötysuhteesta ja soveltuvuudesta erilaisiin rakenteisiin.

Esimerkkinä lankalämmityksen kustannuksista lasketaan 5000 neliömetrin (450 m^3) seinän muottityö suurmuotteilla ja lämmitys lankalämmityksellä, kun lämpötila on $-7,5\text{...}-12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja koko seinä valetaan kerralla. Lämmityslankojen asennuksen työmenekki on noin $0,022 \text{ tth/m}^2$ [27].

Suurmuottityö	$= 0,094 \text{ tth/m}^2 * 5000 \text{ m}^2 * 38\text{€/tth}$	$= 17680 \text{ €}$
Lämmityslankojen asennus	$= 0,022 \text{ tth/m}^2 * 2500 \text{ m}^2 * 38 \text{ €/tth}$	$= 2090 \text{ €}$
Lämmityslangan hinta	$= 0,21 \text{ €/m} * 2500 \text{ m}^2 * 6,6 \text{ m/m}^2$	$= 3465 \text{ €}$
Energiankulutus	$= 80 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 * 0,15 \text{ €/kWh}$	$= 5400 \text{ €}$
Betoni C25/30	$= 110,42 \text{ €/m}^3 + 6,85 \text{ €/m}^3 * 450 \text{ m}^3$	$= 52771,50 \text{ €}$
Pumppubetonointityö	$= 0,5313 \text{ tth/m}^3 * 38 \text{ €/tth} * 450 \text{ m}^3$	$= 9085,20 \text{ €}$

Mikäli yrityksellä ei ole tarvittavaa muotti- ja lämmityskalustoa omana, lisätään kustannuksiin suurmuottien ja betonilämmitysmuuntajan sekä runkokaapelin vuokrahinnat. Suurmuottien vuokra on noin $0,5 \text{ €/m}^2/\text{vrk}$ ja betonilämmitysmuuntajan vuokra $47,19 \text{ €}$ ensimmäiseltä ja $26,47 \text{ €}$ seuraavilta vuokrapäiviltä.

Suurmuotit	$= 0,5 \text{ €/m}^2/\text{vrk} * 2 \text{ vrk} * 5000 \text{ m}^2$	$= 5000 \text{ €}$
Lankalämmitysmuuntaja	$= 20 * (47,19 \text{ €} * 1 + 26,47 \text{ €} * 1)$	$= 1473,20 \text{ €}$
Runkokaapeli	$= 1120 * (0,58 \text{ €} * 1 + 0,52 \text{ €} * 1)$	$= 1232 \text{ €}$

Kokonaiskustannuksiksi tulee siis yhteensä $98196,90 \text{ €}$.

Toisena esimerkkinä lasketaan $-7,5\text{...}-12,5 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa valettava 500 neliömetrin (140 m^3) välipohjalaatta, jonka avoin yläpinta suojataan valun päätteeksi suojapeitteillä. Muotteina käytetään pöytämuotteja ja rakennetta lämmitetään lankalämmityksellä.

Pöytämuottityö	$= 0,191 \text{ tth/m}^2 * 500 \text{ m}^2 * 38 \text{ €/tth}$	$= 3629 \text{ €}$
Yläpinnan suojaustyö	$= 0,022 \text{ tth/m}^2 * 500 \text{ m}^2 * 38 \text{ €/tth}$	$= 418 \text{ €}$
Lämmityslankojen asennus	$= 0,022 \text{ tth/m}^2 * 500 \text{ m}^2 * 38 \text{ €/tth}$	$= 418 \text{ €}$
Lämmityslangan hinta	$= 0,21 \text{ €/m} * 500 \text{ m}^2 * 6,6 \text{ m/m}^2$	$= 693 \text{ €}$
Energiankulutus	$= 80 \text{ kWh/m}^3 * 140 \text{ m}^3 * 0,15 \text{ €/kWh}$	$= 1680 \text{ €}$
Betoni C25/30	$= 110,42 \text{ €/m}^3 + 6,85 \text{ €/m}^3 * 140 \text{ m}^3$	$= 16417,80 \text{ €}$
Pumppubetonointityö	$= 0,3289 \text{ tth/m}^3 * 140 \text{ m}^3 * 38 \text{ €/tth}$	$= 1749,70 \text{ €}$

Kustannuksiin lisätään vielä pöytämuottien ja lankalämmitysmuuntajan sekä runkokaapelin vuokrat.

Pöytämuottien vuokra	$= 0,5 \text{ €/m}^2/\text{vrk} * 2 \text{ vrk} * 500 \text{ m}^2$	$= 500 \text{ €}$
Lankalämmitysmuuntaja	$= 2 * (47,19 \text{ €} * 1 + 26,47 \text{ €} * 1)$	$= 147,30 \text{ €}$
Runkokaapeli	$= 110 * (0,58 \text{ €} * 1 + 0,52 \text{ €} * 1)$	$= 121 \text{ €}$

Kokonaiskustannukset ovat siis 25773,80 €.

Esimerkkirakenteiden laskuissa on käytetty perinteistä lankalämmitystä, sillä oletettiin sen olevan huomattavasti halvempi tapa kuin 230 voltin lämmityskaapelielementtien käyttäminen.

Jos esimerkin seinä olisi valettu käyttäen 230 voltin lämmityskaapelielementtejä, olisivat materiaalikustannukset lämmityslangan osalta olleet seuraavat:

Lämmityskaapelin hinta	$= 12500 \text{ m} * 1,3 \text{ €/m}$	$= 16250 \text{ €}$
------------------------	---------------------------------------	---------------------

Verrattuna perinteisen lankalämmityksen lankojen, runkokaapelin ja muuntajan kustannuksiin, on lämmityskaapelielementtimenetelmä 10079,80 € kalliimpi. Jos muuntajia ja runkokaapeleita ei tarvitse vuokrata ja niistä ei lasketa aiheutuvan lisäkustannuksia, on perinteinen lankalämmitys jopa 12785 € halvempi. Pienissä valuissa lämmityskaapelielementtjärjestelmä voi osoittautua halvemmaksi vaihtoehdoksi, varsinkin jos urakoitsijalla ei ole omia lämmitysmuuntajia ja runkokaapeleita.

8.2.2 Lämpömuotit

Lämpömuotit soveltuvat hyvin suurien seinien ja laattojen valamiseen niiden varmatoimisuuden ja hyvän hyötysuhteen ansiosta. Lasketaan teoreettisena esimerkkinä 5000 neliömetrin (450 m^3) seinän muottityö ja lämmitys lämmitettävillä suurmuoteilla, kun lämpötila on $-7,5\dots-12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja koko seinä voidaan valaa kerralla.

Suurmuottityö	$= 0,094 \text{ tth/m}^2 * 5000 \text{ m}^2 * 38 \text{ €/tth}$	$= 17860 \text{ €}$
Energiankulutus	$= 75 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 * 0,15 \text{ €/kWh}$	$= 5062,50 \text{ €}$
Betoni C25/30	$= 110,42 \text{ €/m}^3 + 6,85 \text{ €/m}^3 * 450 \text{ m}^3$	$= 52771,50 \text{ €}$
Pumppubetonointityö	$= 0,5313 \text{ tth/m}^3 * 450 \text{ m}^3 * 38 \text{ €/tth}$	$= 9085,20 \text{ €}$

Mikäli yrityksellä ei ole tarvittavaa muottikalustoa omana, lisätään kustannuksiin muottien vuokrahinta, joka on noin $1 \text{ €/m}^2/\text{vrk}$. Muotteja tarvitaan kahden vuorokauden ajaksi.

Vuokrakustannukset	$= 1 \text{ €/m}^2/\text{vrk} * 2 \text{ vrk} * 5000 \text{ m}^2$	$= 10000 \text{ €}$
--------------------	---	---------------------

Kokonaiskustannuksiksi tulee siis yhteensä $94779,20 \text{ €}$.

Toisena esimerkkinä lasketaan $-7,5\dots-12,5 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa valettava 500 neliömetrin (140 m^3) välipohjalaatta käyttäen lämmitettäviä pöytämuotteja. Valun avoin yläpinta suojataan valun jälkeen suojapeitteillä.

Pöytämuottityö	$= 0,191 \text{ tth/m}^2 * 500 \text{ m}^2 * 38 \text{ €/tth}$	$= 3629 \text{ €}$
Yläpinnan suojaustyö	$= 0,022 \text{ tth/m}^2 * 500 \text{ m}^2 * 38 \text{ €/tth}$	$= 418 \text{ €}$
Energiankulutus	$= 85 \text{ kWh/m}^3 * 140 \text{ m}^3 * 0,15 \text{ €/kWh}$	$= 1785 \text{ €}$
Betoni C25/30	$= 110,42 \text{ €/m}^3 + 6,85 \text{ €/m}^3 * 140 \text{ m}^3$	$= 16417,80 \text{ €}$
Pumppubetonointityö	$= 0,3289 \text{ tth/m}^3 * 140 \text{ m}^3 * 38 \text{ €/tth}$	$= 1749,70 \text{ €}$

Mikäli muottikalusto joudutaan vuokraamaan, on kustannuksiin lisättävä vielä lämmitettävien pöytämuottien vuokrahinta, joka on noin $1 \text{ €/m}^2/\text{vrk}$.

Vuokrakustannukset	$= 1 \text{ €/m}^2/\text{vrk} * 2 \text{ vrk} * 500 \text{ m}^2$	$= 1000 \text{ €}$
--------------------	--	--------------------

Jolloin kokonaiskustannukset ovat 24999,50 €.

Esimerkkirakenteen lämmittäminen pöytämuoteilla on energiataloudellisesti erittäin tehokasta niiden hyvän hyötysuhteen ansiosta. Myös työkustannukset ovat pienet verrattuna esimerkiksi lankalämmitykseen.

8.2.3 Puhallinlämmitys

Puhallinlämmitys soveltuu erityisesti holvirakenteiden lämmittämiseen, kun lämmitettävän rakenteen alle muodostuu suljettu, tiivis tila. Tällöin kuumailmapuhaltimilla saadaan lämmitettyä varsinaisen lämmityskohteen lisäksi aiemmin valettuja rakenteita ja näin varmistettua niiden lujoudenkehitys.

Esimerkkirakenteena on -7,5...-12,5 °C:n lämpötilassa valettava 500 neliömetrin (140 m³) välipohjalaatta, jonka avoin yläpinta suojataan valun päätteeksi suojapeitteillä. Lämmitettävän rakenteen alapuolinen tila suojataan tuulelta ja vedolta suojapeitein. Oletetaan että suojattavaa alaa on 50 neliometriä.

Yläpinnan suojaustyö	= 0,022 tth/m ² * 500 m ² * 38 €/tth	= 418 €
Alapuolen suojaustyö	= 0,022 tth/m ² * 50 m ² * 38 €/tth	= 41,80 €
Suojausmateriaali	= 550 m ² * 0,65 €/m ²	= 357,50 €
Pöytämuottityö	= 0,191 tth/m ² * 500 m ² * 38 €/tth	= 3629 €
Lämmittimien asennus	= 0,5 tth/kpl * 8 kpl * 38 €/tth	= 152 €
Energiankulutus	= 325 kWh/m ³ * 140 m ³ * 0,15 €/kWh	= 6825 €
Betoni C25/30	= 110,42 €/m ³ + 6,85 €/m ³ * 140 m ³	= 16417,80 €
Pumppubetonointityö	= 0,3289 tth/m ³ * 140 m ³ * 38 €/tth	= 1749,70 €
Lämmittiminä käytetään nestekaasukäyttöisiä 102 kW:n tehoisia lämpöpuhaltimia, joita tarvitaan kyseiseen tilaan kahdeksan kappaletta noin neljän vuorokauden ajaksi.		
Lämmittimien vuokra	= 8 * (30,33 € * 1 + 17,07 € * 3)	= 652,30 €

$$\text{Pöytämuottien vuokra} = 0,5 \text{ €/m}^2/\text{vrk} * 4 \text{ vrk} * 500 \text{ m}^2 = 1000 \text{ €}$$

Kokonaiskustannuksiksi saadaan näin 31243,10 €.

Kuten energiakustannuksista nähdään, on puhallinlämmitys näin laskettuna energiataloudellisesti kohtalaisen kallis lämmitystapa. Toisaalta pitää ottaa huomioon se, että kuumailmapuhaltimilla lämmitetään yleensä varsinaisen kohteen lisäksi myös aiemmin valettuja kohteita.

8.2.4 Säteilylämmitys

Säteilylämmitystä käytetään yleensä silloin, kun tavoitteena on nostaa valetun rakenteen lämpötilaa nopeasti ja saada näin aikaan nopea lujoudenkehitys ja siten lyhentää muotinpurkuajan saavuttamiseen kuluvaa aikaa. Säteilylämmitys soveltuu puhallinlämmityksen tavoin parhaiten vaakarakenteiden lämmittämiseen. Samoin lämmitettävä tila on järjestettävä mahdollisimman tiiviiksi, jotta tuuli ei pääse jäähdyttämään rakenteita.

Esimerkkirakenteena on -7,5...-12,5 °C:n lämpötilassa valettava 500 neliömetrin (140 m³) välipohjalaatta, jonka avoin yläpinta suojataan valun päätteeksi suojapeitteillä. Lämmitettävän rakenteen alapuolinen tila suojataan tuulelta ja vedolta suojapeittein. Oletetaan että suojattavaa alaa on 50 neliometriä.

$$\text{Yläpinnan suojaustyö} = 0,022 \text{ tth/m}^2 * 500 \text{ m}^2 * 38 \text{ €/tth} = 418 \text{ €}$$

$$\text{Alapuolen suojaustyö} = 0,022 \text{ tth/m}^2 * 50 \text{ m}^2 * 38 \text{ €/tth} = 41,80 \text{ €}$$

$$\text{Suojausmateriaali} = 550 \text{ m}^2 * 0,65 \text{ €/m}^2 = 357,50 \text{ €}$$

$$\text{Pöytämuottityö} = 0,191 \text{ tth/m}^2 * 500 \text{ m}^2 * 38 \text{ €/tth} = 3629 \text{ €}$$

$$\text{Lämmittimien asennus} = 0,5 \text{ tth/kpl} * 26 \text{ kpl} * 38 \text{ €/tth} = 494 \text{ €}$$

$$\text{Lämmittimien valvonta} = 5 \text{ tth/valu} * 38 \text{ €/tth} = 190 \text{ €}$$

$$\text{Energiankulutus} = 135 \text{ kWh/m}^3 * 140 \text{ m}^3 * 0,15 \text{ €/kWh} = 2835 \text{ €}$$

$$\text{Betoni C25/30} = 110,42 \text{ €/m}^3 + 6,85 \text{ €/m}^3 * 140 \text{ m}^3 = 16417,80 \text{ €}$$

$$\text{Pumppubetonointityö} = 0,3289 \text{ tth/m}^3 * 140 \text{ m}^3 * 38 \text{ €/tth} = 1749,70 \text{ €}$$

Lämmittiminä käytetään nestekaasukäyttöisiä 15 kW:n infrapunalämmittimiä. Lämmittimiä tarvitaan noin 25 kappaletta kahden vuorokauden ajaksi.

$$\text{Lämmittimien vuokra} = 26 * (17,41 \text{ €} * 1 + 9,08 \text{ €} * 1) = 688,70 \text{ €}$$

$$\text{Pöytämuottien vuokra} = 0,5 \text{ €/m}^2/\text{vrk} * 2 \text{ vrk} * 500 \text{ m}^2 = 500 \text{ €}$$

Yhteiskustannukset ovat siis 27321,50 €.

Säteilylämmityksen hyötysuhde on selkeästi puhallinlämmitystä parempi, joten energiakustannukset ovat huomattavasti pienemmät. Säteilylämmittimet lämmittävät kuitenkin ainoastaan kohdetta, johon ne on suunnattu eivätkä sovellu samalla tavalla esimerkiksi aikaisemmin valettujen rakenteiden jälkilämmitykseen. Lisäksi säteilylämmittimiä käytettäessä on niiden valvonta erityisen tärkeää niiden aiheuttaman paloriskin takia.

9 KUSTANNUSTEN VERTAILU

9.1 Betonoinnin kustannuserot talvi- ja kesäolosuhteissa

Mikäli esimerkkinä käytetty seinä (1000 m * 2,5 m * 0,18 m) valettaisiin kesällä, jolloin muot-
ti- ja betonointityömenekkiin ei tule kylmän ilman aiheuttamaa lisämenekkiä, betonin lämmit-
tystä ei tarvita, eikä betonin hintaan tule talvilisää, tulisi valaminen maksamaan:

Suurmuottityö	= 0,0851 tth/m ² * 5000 m ² * 38 €/tth	= 16169 €
Vuokrakustannukset	= 0,5 €/m ² /vrk * 2 vrk * 5000 m ²	= 5000 €
Betoni C25/30	= 110,42 €/m ³ * 450 m ³	= 49689 €
Pumppubetonointityö	= 0,3795 tth/m ³ * 450 m ³ * 38 €/tth	= 6489,50 €

Jolloin kokonaiskustannukset olisivat 77347,50 €.

Ero kesällä valetun ja talvella lämpömuotteja käyttäen valetun esimerkiseinän kustannuksis-
sa on näin laskettuna 17431,70 €.

Esimerkin välipohjalaatan (500 m² * 0,28 m) valaminen kesällä puolestaan maksaisi:

Pöytämuottityö	= 0,173 tth/m ² * 500 m ² * 38 €/tth	= 3287 €
Vuokrakustannukset	= 0,5 €/m ² /vrk * 2 vrk * 500 m ²	= 500 €
Betoni C25/30	= 110,42 €/m ³ * 140 m ³	= 15458,80 €
Pumppubetonointityö	= 0,2415 tth/m ³ * 38 €/tth * 140 m ³	= 1284,80 €

Eli kustannukset ovat yhteensä 20530,60 €.

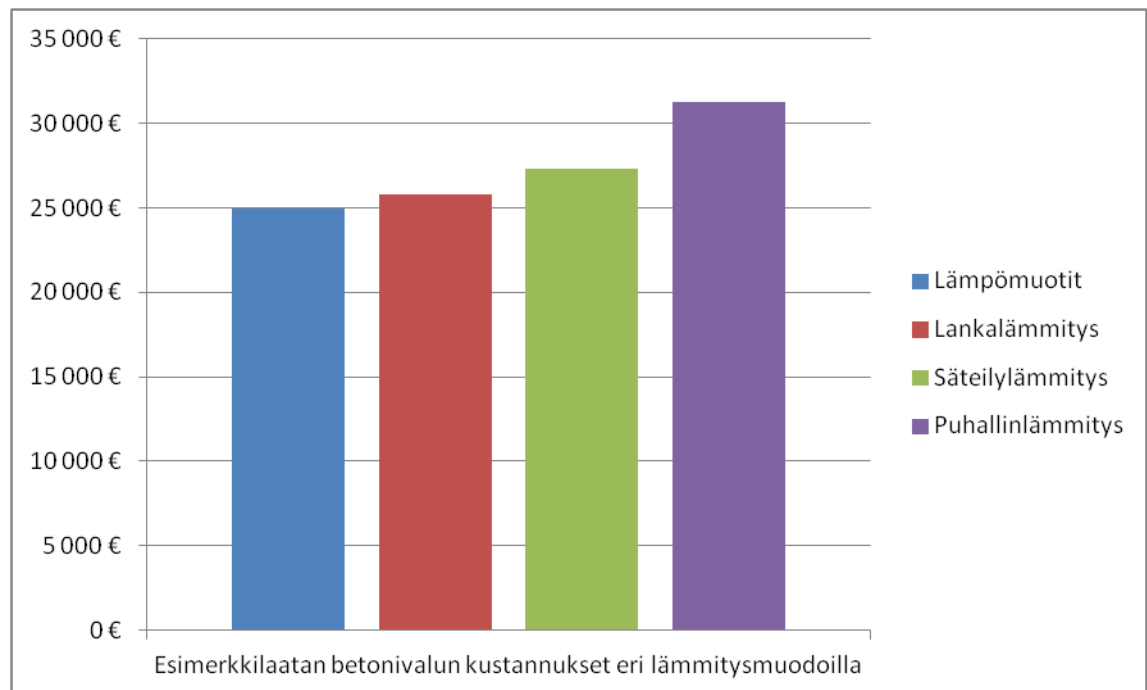
Näin kesällä valetun ja talvella lämpömuotteja käyttäen valetun esimerkivälipohjalaatan kus-
tannuseroksi saadaan 4468,90 €.

Molemmissa esimerkkirakenteissa saman rakenteen valaminen talvella on noin 18 % kalliim-
paa kuin kesäolosuhteissa. Laskut ovat melko pelkistettyjä, eikä niissä ole otettu huomioon

esimerkiksi mahdollisia kaluston kuljettamisesta aiheutuneita kustannuksia, eikä lumenpoistotyötä, jota joudutaan usein tekemään talviaikana tapahtuvassa betonoinnissa. Laskujen perusteella saadaan kuitenkin melko hyvä arvio kesällä ja talvella tapahtuvan betonoinnin kustannuseroista. Laskuissa käytetyt työmenekit ja talven aiheuttamat lisät työmenekkeihin perustuvat Ratu KI-6017 Rakennustöiden menekit 2010 ja Ratu C8-0377 Talvityöt ja kustannukset -kirjoihin.

9.2 Lämmitysvaihtoehtojen vaikutus kustannuksiin

Vertailurakenteena käytetään esimerkkilaskujen välipohjalaattaa, jonka ala on 500 neliometriä ja paksuus 280 millimetriä. Laskelmissa on keskitytty eri lämmitysvaihtoehtojen kustannusvaikutuksiin lämmittimien vuokran ja energiankulutuksen, käytettävien muottien sekä tarvittavan suojauksen osalta. Kuvassa 33. on esitetty eri lämmitysvaihtoehtojen kokonaiskustannukset kyseiselle esimerkkirakenteelle.



Kuva 33. Eri lämmitysvaihtoehtojen kustannukset.

Laskelmat on tehty sillä oletuksella, että kaikki lämmitykseen tarvittava kalusto joudutaan vuokraamaan. Vuokrahintoina on käytetty Ramirent Finland Oy:n hintoja. Eri lämmitystapojen arvioidut energiankulutukset perustuvat By 201 Betonitekniiikan oppikirjan tietoihin.

Laskelmien perusteella rakenne kannattaisi valaa ja lämmitellä käyttäen lämmittäviä pöytämuotteja, mikäli mahdollista. Lankalämmityksen ja lämpömuottien hintaero on kuitenkin niin pieni, että mikäli yrityksellä on jo valmiiksi käytössään lankalämmitykseen tarvittavat muuntajat ja runkokaapelit, kannattaa lämmitys suorittaa lankalämmitystä käyttäen.

Vaikka puhallin- ja säteilylämmityksen kustannukset ovat korkeat verrattuna lanka- ja lämpömuottilämmitykseen, on niiden käyttö perusteltua esimerkiksi varalämmityksenä varsinaisen päälämmityksen pettäessä.

Mikäli valettavaa on hyvin vähän ja valukertojen välinen aika on pitkä, voi olla kannattavaa lämmitellä valettavat rakenteet käyttäen 230 voltin lankalämmityselementtejä, varsinkin jos yrityksellä ei ole itsellään tarvittavia lankalämmitysmuuntajia ja runkokaapeleita. Perinteinen lankalämmitystapa tulee kuitenkin edullisemmaksi jo alaltaan noin 15 neliometriä ylittävissä kohteissa, kun kyseessä on normaalipaksuinen seinä- tai laattarakenne ja lämmityskalusto joudutaan vuokraamaan.

9.3 Betonivaihtoehtojen vaikutus lämmitysenergiankulutukseen ja muottikiertoon

Laskimme esimerkkitalanteen 180 millimetriä paksulla betoniseinällä, jossa käytettävänä muottityyppinä on suurmuotit, seinän kokona 1000 metriä * 2,5 metriä (450m³) ja vaadittuna betonin lujuusluokkana K30 (C25/30). Esimerkkikohteen betonivalun lämmöneristys on toteutettu tyydyttävästi ja ulkolämpötilan arvona on käytetty -15 °C. Käytetty sähköenergian hinta on 0,15 €/kWh.

Betonin lujuusluokkien hintaero ja kummabetonin sekä nopeasti kovettuvan betonin lisähinta on otettu Ruskon Betoni Oy:n Kajaanin alueen hinnastosta. Hinnasto on liitteenä 4. Ruskon Betoni Oy:llä on Kajaanissa saatavilla kuumabetonissa kahta eri lämpöluokkaa, lämpöluokka 1 (+25...+35 °C) ja lämpöluokka 2 (+35..+45 °C). Valitsimme näistä lämpöluokan 2 ja käytimme laskuissamme lämpötilana keskiarvoa +40 °C.

Laskimme esimerkkitapauksen sekä kantavana rakenteena ja ei-kantavana rakenteena. Laskuissa on käytetty apuna Finnsementti Oy:n tekemää betonin kypsyyksilaskuria ja Kone-Ratu 07-3031 lankalämmityksen suunnitteluohjetta. Käytimme laskuissa betonin lujuusluokan arvoina K-arvoja, koska ne olivat myös käyttämissämme laskurissa ja suunnitteluohjees-

sa käytössä. Tekemämme laskut ovat hyvin teoreettisia ja niiden tarkoituksena on saada selville hinta- ja aikaeroja. Laskimme laskut Excel-taulukkoon (liite 3), josta kokosimme tulokset seuraavaksi esitettyihin koontitaulukoihin.

Seuraavaksi on esitetty taulukot 9. ja 10., joissa olemme teoreettisesti laskeneet betonivalun lisälämmityksen tarvitseman lämpöenergian lankalämmitystä käyttäen. Samoihin taulukkoihin on myös laskettu muotipurkuaika käyttäen eri betonivaihtoehtoja. Betonivaihtoehtoina käytimme vaaditun lujuusluokan nostoa (K30 -> K40), nopeasti kovettuvan betonin käyttöä ja näiden vaihtoehtojen tilaamista kuumabetonina (+40 °C).

Olemme laskeneet molemmat tapaukset (kantava rakenne ja ei-kantava rakenne) käyttäen massan lämmityksen tavoitelämpötilana +20 °C ja +40 °C. Tavoitelämpötilalla tarkoitetaan betonin lämmittämistä lankalämmityksellä kyseiseen lämpötilaan.

Taulukko 9. Kantavan rakenteen suurmuottiseinän tarvitsema lisälämmitysenergia, sekä seinän muotinpurku-aika käyttäen eri betonivaihtoehtoja.

Suurmuottiseinä (tydyttävä lämmöneristys), ulkolämpötila -15 °C		
Tavoitelämpötila +40 °C, kantava rakenne -> purkulujuus 60 % K30-betonista		
Käytetty betoni	Massan valulämpö +20 °C	Aika muotinpurkuun
Normaalisti kovettuva betoni, K30	71,5 kWh/m ³	2 d 9 h 30 min
Normaalisti kovettuva betoni, K40	38,5 kWh/m ³	1 d 30 min
Nopeasti kovettuva betoni, K30	37 kWh/m ³	23 h
Nopeasti kovettuva betoni, K40	26,5 kWh/m ³	12 h 30 min
Käytetty betoni	Massan valulämpö +40 °C	Aika muotinpurkuun
Normaalisti kovettuva betoni, K30	57,5 kWh/m ³	2 d 9 h 30 min
Normaalisti kovettuva betoni, K40	23,5 kWh/m ³	23 h 30 min
Nopeasti kovettuva betoni, K30	22 kWh/m ³	22 h
Nopeasti kovettuva betoni, K40	11 kWh/m ³	11 h
Tavoitelämpötila +20 °C, kantava rakenne -> purkulujuus 60 % K30-betonista		
Käytetty betoni	Massan valulämpö +20 °C	Aika muotinpurkuun
Normaalisti kovettuva betoni, K30	68 kWh/m ³	5 d 16 h
Normaalisti kovettuva betoni, K40	28 kWh/m ³	2 d 8 h
Nopeasti kovettuva betoni, K30	26 kWh/m ³	2 d 4 h
Nopeasti kovettuva betoni, K40	13 kWh/m ³	1 d 2 h
Käytetty betoni	Massan valulämpö +40 °C	Aika muotinpurkuun
Normaalisti kovettuva betoni, K30	60 kWh/m ³	5 d 6 h
Normaalisti kovettuva betoni, K40	15 kWh/m ³	1 d 22 h
Nopeasti kovettuva betoni, K30	13 kWh/m ³	1 d 18 h
Nopeasti kovettuva betoni, K40	0 kWh/m ³	16 h

Kuten taulukosta 9. huomataan, on erittäin kannattavaa valita lankalämmityksen (todennäköisesti myös lämpömuottien) tavoitelämpötilaksi +40 °C, ennemmin kuin +20 °C. Lämmityskustannukset ovat miltei samat, mutta muotinpurku-aika lyhenee huomattavasti isompaa lämpötilaa käytettäessä. Seuraavaksi esimerkkilaskut jo aiemmin käyttämällemme esimerkki-kohteelle laskettuna:

Käytetty betoni normaalisti kovettuva K30, kantava rakenne, massan valulämpö +20 °C, lämmityksen tavoitelämpötila +20 °C.

$$\text{Lankalämmityksen energiankulutus} = 68 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 30600 \text{ kWh}$$

$$= 30600 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} = 4590 \text{ €}$$

$$\text{Aika muotinpurkuun} = 5 \text{ d } 16 \text{ h}$$

Eli yhteensä kustannuksia normaalin K30-betonin lisäksi tulee 4590 € (10,2 €/m³). Kun taas sama kohde valetaan käyttäen lämmityksen tavoitelämpötilana +40 °C, saadaan seuraavanlaiset arvot:

$$\text{Lankalämmityksen energiankulutus} = 71,5 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 32175 \text{ kWh}$$

$$= 32175 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} = 4826,25 \text{ €}$$

$$\text{Aika muotinpurkuun} = 2 \text{ d } 9 \text{ h } 30 \text{ min}$$

Tavoitelämpötilan nostaminen +20 °C:sta +40 °C:seen maksaa esimerkkikohteessa (450 m³) lämmitysenergiankulutukseltaan vain 236,25 € (0,525 €/m³) enemmän ja vastaavasti muotinpurkuaika lyhenee jopa yli kolme päivää (78,5 tuntia) per valu. Laskuista huomaamme, että betonin lujoudenkehitys nopeutuu samassa suhteessa lämpötilan nostamisen kanssa, joten lankalämmityksen avulla betonivalun lämpötilan nostaminen +40 °C:seen asti on hyvin suositeltavaa. Hetkellinen lämmitysenergiankulutus on tällöin suurempi, mutta lyhyemmän muotinpurkuajan ansiosta lämmitysenergian kokonaiskulutus jää miltei samaksi, kuin +20 °C:n tavoitelämpötilalla. Tästä syystä vertaamme muiden betonointivaihtoehtojen kulutuksia tähän.

Taulukosta 9. huomataan myös, että jo pelkällä lujusluokan nostolla saavutetaan huomattavasti lyhempi muotinpurkuaika. Tämän lisäksi lisälämmitysenergiankulutuksessa saavutetaan jopa yli puolet pienempiä energiankulutusarvoja, jotka vähän kompensoivat lisäkustannuksena tulevaa betonin lujusluokan noston lisähintaa.

Tästä havainnollistamisena lasku esimerkkikohteella, jossa käytetty betoni on normaalisti kovettuva K30, rakenne on kantava, massan valulämpö +20 °C ja lämmityksen tavoitelämpötila +40 °C. Kohde valetaan käyttäen lujusluokaltaan K30-betonin sijasta K40-betonia:

$$\text{Lankalämmityksen energiankulutus} = 38,5 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 17325 \text{ kWh}$$

$$= 17325 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} = 2598,75 \text{ €}$$

$$\text{Lujusluokan korotuksen hinta} = 22 \text{ €/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 9900 \text{ €}$$

Aika muotinpurkuun = 1 d 30 min

Suurina rahallisina lisäkustannuksina lujuusluokan nosto esimerkkikohteessa (K30 -> K40) maksaa 7672,5 € (17,05 €/m³), mutta muottien purkuun päästään vastaavasti 33 tuntia aikaisemmin. Jos esimerkkikohteen (450 m³) valu tapahtuisi yhdellä kerralla, ei lujuusluokan nosto vaikuttaisi kovin järkevältä. Jos taas betonivalut tapahtuisivat esimerkiksi kymmenessä osassa (45 m³/valu) tulisi säästöä jo miltei 14 päivää (330 tuntia), joka on jo huomattavan iso ajallinen säästö. Jos betonivalut tapahtuisivat vielä pienemmissä erissä, esimerkiksi 22,5 m³ per valu (20 valukertaa) tulisi säästöä jo jopa melkein 28 päivää (660 tuntia). Näistä lukemista päätellen voidaan todeta, että jos kohteen betonivalut tapahtuvat monessa osassa, on erittäin järkevää harkita lujuusluokan nostamista.

Jos taas saman esimerkkikohteen valuun käytettäisiin K30-kuumabetonia käyttäen +40 °C:n tavoitelämpötilaa, saataisiin seuraavanlaiset arvot:

$$\text{Lankalämmityksen energiankulutus} = 57,5 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 25875 \text{ kWh}$$

$$= 25875 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} = 3881,25 \text{ €}$$

$$\text{Kuumabetonin lisähinta} = 6,78 \text{ €} * 450 \text{ m}^3 = 3051 \text{ €}$$

Aika muotinpurkuun = 2 d 9 h 30 min

K30-kuumabetonin käyttö esimerkkikohteessa verrattuna normaalin K30-betonin käyttöön aiheuttaa lisäkustannuksia 2106 € (4,68 €/m³). Kuitenkaan, kun lankalämmityksen tavoitelämpötilana on +40 °C, ei kuumabetonin käyttö nopeuta muottikiertoa yhtään. Tämän takia kuumabetonin käytöstä saatava hyöty on vain vähentynyt sähköenergiankulutus, joka ei kata kuumabetonin lisäkustannuksia. Kyseisessä tapauksessa kuumabetonin käyttö ei ole suositeltavaa, koska mitään hyötyä ei saavuteta.

Jos esimerkkikohteen valuihin käytettäisiin kahden edellisen vaihtoehdon yhdistelmää, K40-kuumabetonia, +40 °C:n tavoitelämpötilalla, tulisi arvoista seuraavanlaiset:

$$\text{Lankalämmityksen energiankulutus} = 23,5 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 10575 \text{ kWh}$$

$$= 10575 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} = 1586,25 \text{ €}$$

$$\text{Betonin lisähinta} = (22+6,78 \text{ €/m}^3) * 450 \text{ m}^3 = 12951 \text{ €}$$

Aika muotinpurkuun = 23 h 30 min

Lujuusluokan korotuksen ja kuumabetonin yhdistelmän käyttäminen esimerkikohteessa toisi 8124,75 € (18,055 €/m³) lisäkustannuksia. Näin tehtynä muotinpurku-aika lyhenisi 34 tuntia, joka on vain tunnin vähemmän mitä pelkällä lujuusluokan nostolla. Toisaalta kustannuksetkaan eivät ole kuin noin 1 €/m³ korkeammat. Jos työmaata auttaa tunnin lyhempi muotinpurku-aika, kannattaa kuumabetonin ja lujuusluokan noston yhdistelmää käyttää.

Jos esimerkikohteen valut tehtäisiin nopeasti kovettuvalla K30-betonilla käyttäen +40 °C:n tavoitelämpötilaa, saataisiin seuraavanlaiset arvot:

Lankalämmityksen energiankulutus = 37 kWh/m³ * 450 m³ = 16650 kWh

= 16650 kWh * 0,15 €/kWh = 2497,5 €

Nopeasti kovettuvan betonin lisähinta = 12,1 €/m³ * 450 m³ = 5445 €

(Nopeasti kovettuvan betonin lisähinta on 10 % betonin hinnasta, joten se vaihtelee käytettävän betonilaadun mukaan)

Aika muotinpurkuun = 23 h

Nopeasti kovettuvan K30-betonin käyttö esimerkikohteessa verrattuna normaalin K30-betonin käyttöön aiheuttaisi esimerkikohteessa 3116,25 € (6,925 €/m³) lisäkustannuksia. Vastaavasti muotinpurku-aika lyhenee yli päivällä (34,5 tuntia) per valu. Tästä huomaamme, että nopeasti kovettuvan betonin käytön edut ovat suuremmat, kuin lujuusluokan noston. Nopeasti kovettuvan betonin käytön haittapuolena on sen sijaan sen aiheuttamat muutokset betoniin, kuten todennäköisempi halkeilu. Tästä johtuen nopeasti kovettuvaa betonia tulee käyttää oman harkintakyvyn mukaisesti ja sitä ei yleensä käytetä kaikissa betonivaluissa.

Jos esimerkikohteen valuihin käytettäisiin lujuusluokan noston ja nopeasti kovettuvan betonin yhdistelmää eli nopeasti kovettuvaa K40-betonia, +40 °C tavoitelämpötilalla, saataisiin seuraavanlaiset arvot:

Lankalämmityksen energiankulutus = 26,5 kWh/m³ * 450 m³ = 11925 kWh

= 11925 kWh * 0,15 €/kWh = 1788,75 €

Betonin lisähinta = (22+14,2 €/m³) * 450 m³ = 16290 €

Aika muotinpurkuun = 12 h 30 min

Nopeasti kovettuvan K40-betonin käyttö esimerkkikohteessa verrattuna normaalin K30-betonin käyttöön aiheuttaisi 13252,5 € (29,45 €/m³) lisäkustannuksia. Vastaavasti muotinpurkuaika lyhenee miltei kaksi päivää (45 tuntia) per valu. Betonin lisähinta nousee kyseisessä tapauksessa niin korkeaksi verrattuna nopeasti kovettuvaan K30-betoniin, ettei nopeasti kovettuvaa K40-betonia kannata käyttää, ellei muotinpurkuajan 10 tunnin lyhenemisestä ole erittäin suurta hyötyä.

Laskujemme perusteella kaikkein nopeimpaan muotinpurkuaikaan päästäisiin nopeasti kovettuvalla K40-kuumabetonilla, +40 °C:n tavoitelämpötilaa käyttäen. Jos esimerkkikohte valettaisiin kyseisellä yhdistelmällä, saataisiin seuraavanlaiset arvot:

Lankalämmityksen energiankulutus = 11 kWh/m³ * 450 m³ = 4950 kWh
 = 4950 kWh * 0,15 €/kWh = 742,5 €

Betonin lisähinta = (22+14,2+6,78 €/m³) * 450 m³ = 19341 €

Aika muotinpurkuun = 11 h

Nopeasti kovettuvan K40-kuumabetonin käyttö esimerkkikohteessa verrattuna normaaliin K30-betonin käyttöön aiheuttaisi 14514,75 € (32,255 €/m³) lisäkustannuksia. Vastaavasti muotinpurkuaika lyhenee melkein kaksi päivää (46,5 tuntia) per valu. Kyseisessä vaihtoehdossa betonin kuutiohintaa nousee melkein kolmella eurolla verrattuna nopeasti kovettuvaan K40-betoniin, mutta muotinpurkuaika ei lyhene kuin 1,5 tuntia. Tästä syystä nopeasti kovettuvan K40-kuumabetonin käyttö ei vaikuta perustellulta, ellei ole äärimmäinen kiire.

Laskujemme perusteella kuumabetonin käyttö ei ole monessakaan tilanteessa kovin kustannustehokas vaihtoehto, jos vaihtoehtona on käyttää lankalämmityksen tavoitelämpötilana +40 °C.

+20 °C:n pitäminen lankalämmityksen tavoitelämpötilana ei myöskään ole kovin kustannustehokasta, jos sitä vertaa +40 °C:n tavoitelämpötilaan. Parhaimmillaan säästöä tulee 10 kWh/m³ (450 m³ esimerkkikohteessa 675 €), mutta muotinpurkuajat ovat karkeasti sanottuna jokaisessa tapauksessa puolet pidempiä.

Taulukko 10. Ei-kantavan rakenteen suurmuottiseinän tarvitsema lisälämmitysenergia, sekä seinän muotinpurku-aika käyttäen eri betonivaihtoehtoja.

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämmöneristys), ulkolämpötila -15 °C		
Tavoitelämpötila +40 °C, ei-kantava rakenne -> purkulujuus 5 MN/m ²		
Käytetty betoni	Massan valulämpö +20 °C	Aika muotinpurkuun
Normaalisti kovettuva betoni, K30	24 kWh/m ³	10 h
Normaalisti kovettuva betoni, K40	21 kWh/m ³	7 h
Nopeasti kovettuva betoni, K30	21,5 kWh/m ³	7 h 30 min
Nopeasti kovettuva betoni, K40	19,5 kWh/m ³	5 h 30 min
Käytetty betoni	Massan valulämpö +40 °C	Aika muotinpurkuun
Normaalisti kovettuva betoni, K30	8,5 kWh/m ³	8 h 30 min
Normaalisti kovettuva betoni, K40	5,5 kWh/m ³	5 h 30 min
Nopeasti kovettuva betoni, K30	6 kWh/m ³	6 h
Nopeasti kovettuva betoni, K40	4,5 kWh/m ³	4 h 30 min
Tavoitelämpötila +20 °C, ei-kantava rakenne -> purkulujuus 5 MN/m ²		
Käytetty betoni	Massan valulämpö +20 °C	Aika muotinpurkuun
Normaalisti kovettuva betoni, K30	10 kWh/m ³	20 h
Normaalisti kovettuva betoni, K40	6,5 kWh/m ³	13 h
Nopeasti kovettuva betoni, K30	7,25 kWh/m ³	14 h 30 min
Nopeasti kovettuva betoni, K40	5 kWh/m ³	10 h
Käytetty betoni	Massan valulämpö +40 °C	Aika muotinpurkuun
Normaalisti kovettuva betoni, K30	0 kWh/m ³	11 h
Normaalisti kovettuva betoni, K40	0 kWh/m ³	7 h
Nopeasti kovettuva betoni, K30	0 kWh/m ³	7 h
Nopeasti kovettuva betoni, K40	0 kWh/m ³	5 h

Taulukkoa 9. ja 10. verratessa huomataan, että ei-kantavia rakenteita tehdessä eri betonivaihtoehtojen erot ovat huomattavasti pienempiä, kuin kantavia rakenteita tehdessä. Tämä johtuu siitä, että ei-kantavien rakenteiden muottien purkulujuus on huomattavasti pienempi, kuin kantavien rakenteiden. Esimerkkikohteeseen sovellettuna ei-kantavien rakenteiden pisin muotinpurku-aika on 20 tuntia, kun taas kantavilla rakenteilla se on 5 päivää ja 16 tuntia. Seuraavaksi esimerkkilaskut jo aiemmin käyttämällemme esimerkkikohteelle laskettuna:

Käytetty betoni normaalisti kovettuva K30, ei-kantava rakenne, massan valulämpö +20 °C, lämmityksen tavoitelämpötila +20 °C.

$$\begin{aligned} \text{Lankalämmityksen energiankulutus} &= 10 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 &&= 4500 \text{ kWh} \\ &= 4500 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} &&= 675 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\text{Muotinpurkuaika} = 20 \text{ h}$$

Eli yhteensä kustannuksia normaalin K30-betonin lisäksi tulee 675 € (1,5 €/m³). Jos muotinpurkuaika haluttaisiin puolittaa, voitaisiin käyttää +40 °C:n tavoitelämpötilaa, jolloin saataisiin seuraavanlaiset arvot:

$$\begin{aligned} \text{Lankalämmityksen energiankulutus} &= 24 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 &&= 10800 \text{ kWh} \\ &= 10800 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} &&= 1620 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\text{Muotinpurkuaika} = 10 \text{ h}$$

Tavoitelämpötilan nostaminen esimerkkikohteessa +20 °C:sta +40 °C:seen maksaisi lisääntyneenä energiankulutuksena 945 € (2,1 €/m³). Muotinpurkuaika on vastaavasti 10 tuntia, eli se lyhenisi puoleen, verrattuna +20 °C:n tavoitelämpötilan käyttöön.

Jos ajateltaisiin, että esimerkkikohteessa olisi rakennusalan normaalin mittaiset työpäivät (klo 7–16) ja betonirakenne olisi valettu, sekä lämmöt saatu päälle kello 11:00 mennessä, päästäisiin muotteja purkamaan vasta seuraavana aamuna kello 7:00, riippumatta siitä, olisiko tavoitelämpötilana käytetty +20 °C vai +40 °C. Tosin kello 11:00 ja kello 7:00 välinen aika on tasan 20 tuntia, joten jos betonivalun suoritus menisi myöhemmälle iltapäivään, venyisi myös muottien purkamisen aloitus +20 °C:n tavoitelämpötilaa käytettäessä. Tätä ongelmaa ei ole +40 °C:n tavoitelämpötilaa käytettäessä, koska muotinpurku voidaan aloittaa jo 10 tunnin päästä valusta. Mutta tilanteessa jossa betonivalun lankalämmitys päästäisiin kytkemään päälle viimeistä kello 11:00, kannattaisi käyttää +20 °C:n tavoitelämpötilaa energiankulutuksen vähentämiseksi.

Jos esimerkkikohte valettaisiin käyttäen K30-kuumabetonia +20 °C:n tavoitelämpötilalla, saataisiin seuraavanlaiset arvot:

$$\text{Lankalämmityksen energiankulutus} = 0 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 0 \text{ kWh}$$

= 0 €

Kuumabetonin lisähinta = $6,78 \text{ €/m}^3 * 450 \text{ m}^3$ = 3051 €

Muotinpurkuaika = 11 h

K30-kuumabetonin käyttö esimerkkikohteessa verrattuna normaaliin K30-betonin käyttöön +20 °C:n tavoitelämpötilalla aiheuttaisi 2376 € ($5,28 \text{ €/m}^3$) lisäkustannuksia ja muottien purkaminen onnistuisi 9 tuntia aiemmin per valu. +40 °C:n tavoitelämpötilan käyttöön verrattuna lisäkustannuksia tulisi 1431 € ($3,18 \text{ €/m}^3$) ja muottien purkaminen onnistuisi tunnin myöhemmin per valu. Kuitenkin laskujemme perusteella K30-kuumabetonilla esimerkkikohtetta valettaessa ei tarvitsisi ollenkaan lankalämmitystä, joten kuumabetonilla valaminen tulisi selkeästi halvemmaksi. Kuten kohdassa 8.2.1 olemme laskeneet, esimerkkikohteen lankalämmityksen laittamisen työ- ja materiaalikustannukset olisivat karkeasti 18 €/m^3 . Tällöin K30-kuumabetonin käyttäminen tulisi 5724 € ($12,72 \text{ €/m}^3$) halvemmaksi, kuin +20 °C:n tavoitelämpötilalla normaalin K30-betonin käyttäminen. Kuitenkin lasku on hyvin teoreettinen ja talven aiheuttamien säävaihteluiden ja muiden arvaamattomien ongelmien takia K30-kuumabetonillakin valettaessa seinän lämmitykseen tulisi varautua. Jos esimerkiksi ilman lämpötila lähtisi laskemaan, seinä jouduttaisiin esimerkiksi huputtamaan ja lämmittämään puhallinlämmityksellä, joka on hyötysuhteeltaan huomattavasti lankalämmitystä heikompi.

K30-kuumabetonin muotinpurkuaikaa saataisiin edellistä lyhemmäksi käyttämällä K40-kuumabetonia, nopeasti kovettuvaa K30-kuumabetonia tai nopeasti kovettuvaa K40-kuumabetonia. Myös näissä kaikissa vaihtoehdoissa säästettäisiin teoreettisesti lankalämmityksen asentamisen aiheuttamat kulut. Kuitenkin parhaimmillaankaan muotinpurkuaikaa saataisiin vain 6 tuntia per valu pienemmäksi. Tällöin lisäkustannuksia tulisi K30-kuumabetoniin verrattuna $36,2 \text{ €/m}^3$, joten kuumabetonia käytettäessä on taloudellisinta käyttää normaalia K30-kuumabetonia +20 °C tavoitelämpötilalla. Jokaisessa kuumabetonin käytön tapauksessa +40 °C:n tavoitelämpötilan käyttö lisäisi lankalämmityksen aiheuttamat kulut ja pienentäisi muotinpurkuaikaa vain muutamasta tunnista tuntiin.

Jos esimerkkikohte valettaisiin käyttäen korkeamman lujuusluokan K40-betonია +20 °C:n tavoitelämpötilalla, olisivat arvot seuraavanlaiset:

Lankalämmityksen energiankulutus = $6,5 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3$ = 2925 kWh
 = $2925 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh}$ = 438,75 €

$$\text{Lujuusluokan korotuksen hinta} = 22 \text{ €/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 9900 \text{ €}$$

$$\text{Muotinpurkuaika} = 13 \text{ h}$$

Lujuusluokan nosto esimerkkikohteessa tuottaisi lisäkustannuksia normaalin K30-betoniin +20 °C:n tavoitelämpötilalla verrattuna 9663,75 € (21,475 €/m³). Vastaavasti muotinpurkuaika lyhenisi 7 tuntia per valu. Kun lujuusluokan nostoa verrataan normaalin K30-betonin käyttöön +40 °C:n tavoitelämpötilalla, aiheuttaa K40-betonin käyttö lisäkustannuksia 8718,75 € (19,375 €/m³), mutta siltikin muotinpurkuaika on 3 tuntia pidempi. Tästä syystä K40-betonin käyttö +20 °C:n tavoitelämpötilalla on esimerkkikohteessa hyvin epätaloudellista.

Jos lujuusluokan noston lisäksi käytettäisiin +40 °C:n tavoitelämpötilaa, olisivat arvot seuraavanlaiset:

$$\text{Lankalämmityksen energiankulutus} = 21 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 9450 \text{ kWh}$$

$$= 9450 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} = 1417,50 \text{ €}$$

$$\text{Lujuusluokan korotuksen hinta} = 22 \text{ €/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 9900 \text{ €}$$

$$\text{Muotinpurkuaika} = 7 \text{ h}$$

Lujuusluokan noston K40-luokkaan ja +40 °C tavoitelämpötilan käytöstä tulisi lisäkustannuksia normaalin K30-betonin +40 °C tavoitelämpötilan käyttöön verrattuna 9697,50 € (21,55 €/m³) ja vastaavasti muotinpurkuaika lyhenisi 3 tuntia per valu. Kuitenkin lisäkustannukset ovat niin suuret, ettei K40-betonin käyttö +20 °C:n tai +40 °C:n tavoitelämpötilaa käyttäen ole taloudellisesti järkevää. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että lujuusluokan nosto soveltuu parhaiten kantavien rakenteiden valuun.

Jos esimerkkikohteessa käytettäisiin nopeasti kovettuvaa K30-betonia +20 °C tavoitelämpötilalla saataisiin seuraavanlaiset arvot:

$$\text{Lankalämmityksen energiankulutus} = 7,25 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 3262,5 \text{ kWh}$$

$$= 3262,5 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} = 489,375 \text{ €}$$

$$\text{Nopeasti kovettuvan betonin lisähinta} = 12,1 \text{ €/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 5445 \text{ €}$$

Muotinpurkuaika = 14 h 30 min

Nopeasti kovettuvan K30-betonin käyttö kohteessa toisi 5259,375 € (11,6875 €/m³) lisäkustannuksia verrattuna normaalin K30-betonin ja +20 °C:n tavoitelämpötilan käyttöön. Muotit voitaisiin vastaavasti purkaa 5 tuntia ja 30 minuuttia aiemmin. Mutta jos nopeasti kovettuvan K30-betonin käyttöä verrataan normaalin K-30 betonin käyttöön +40 °C:n tavoitelämpötilalla, lisäkustannuksia tulee 4314,375 € (9,5875 €/m³) ja muotinpurkuaika on silti 4 tuntia ja 30 minuuttia pidempi. Esimerkkikohteessa nopeasti kovettuvan K30-betonin käyttö ei ole kustannustehokasta.

Jos nopeasti kovettuvaa K30-betonia käytettäisiin +40 °C:n tavoitelämpötilalla saataisiin seuraavanlaiset arvot:

$$\begin{aligned} \text{Lankalämmityksen energiankulutus} &= 21,5 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 &&= 9675 \text{ kWh} \\ &= 9675 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} &&= 1451,25 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\text{Nopeasti kovettuvan betonin lisähinta} = 12,1 \text{ €/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 5445 \text{ €}$$

Muotinpurkuaika = 7 h 30 min

Nopeasti kovettuvan K30-betonin +40 °C:n tavoitelämpötilalla käyttö tuo kohteessa lisäkustannuksia normaalin K30-betonin +40 °C:n tavoitelämpötilan käyttöön verrattuna 5276,25 € (11,725 €/m³). Vastaavasti muotinpurkuaika on 2 tuntia ja 30 minuuttia lyhempi per valu. Koska muotinpurkuaajan ero on suhteessa pieni verrattuna lisäkustannuksiin, ei nopeasti kovettuvan betoni käyttö ole taloudellista esimerkkikohteessa. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että nopeasti kovettava betoni, kuten lujuusluokan nostokin, soveltuu parhaiten kantavien rakenteiden tekemiseen eikä se ole kustannustehokas ei-kantavien rakenteiden valuissa. Lujuudenkehityksen nopeutuminen ei ehdi vaikuttamaan tarpeeksi kun valetaan ei-kantavia rakenteita.

Nopeasti kovettuvan betonin ja lujuusluokan noston yhdistelmällä, eli nopeasti kovettuvan K40-betonin +20 °C:n tavoitelämpötilan käytöllä saataisiin seuraavanlaiset arvot:

$$\begin{aligned} \text{Lankalämmityksen energiankulutus} &= 5 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 &&= 2250 \text{ kWh} \\ &= 2250 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} &&= 337,5 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\text{Betonin lisähinta} = (22+14,2 \text{ €/m}^3) * 450 \text{ m}^3 = 16290 \text{ €}$$

$$\text{Muotinpurkuaika} = 10 \text{ h}$$

Nopeasti kovettuvan K40-betonin käyttö +20 °C:n tavoitelämpötilalla toisi kohteessa 15007,50 € (33,35 €/m³) lisäkustannukset verrattuna normaalin K30-betonin +40 °C:n tavoitelämpötilan käyttöön. Kuitenkin muotinpurkuaika olisi täysin sama, joten vaihtoehto olisi hyvin epätaloudellinen.

Jos esimerkkikohde valettaisiin nopeasti kovettuvalla K40-betonilla käyttäen +40 °C:n tavoitelämpötilaa, tulisi arvoista seuraavanlaisia:

$$\text{Lankalämmityksen energiankulutus} = 19,5 \text{ kWh/m}^3 * 450 \text{ m}^3 = 8775 \text{ kWh}$$

$$= 8775 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/m}^3 = 1316,25 \text{ €}$$

$$\text{Betonin lisähinta} = (22+14,2 \text{ €/m}^3) * 450 \text{ m}^3 = 16290 \text{ €}$$

$$\text{Muotinpurkuaika} = 5 \text{ h } 30 \text{ min}$$

Nopeasti kovettuvan K40-betonin käyttö +40 °C:n tavoitelämpötilalla toisi kohteessa 15986,25 € (35,525 €/m³) lisäkustannukset verrattuna normaalin K30-betonin +40 °C:n tavoitelämpötilan käyttöön. Vastaavasti muotinpurkuaika lyhenisi 4 tuntia 30 minuuttia per valu. Kuitenkin muotinpurkuajan lyhentymisen suhde kustannuksien nousuun on huono, eli kyseistä vaihtoehtoa ei ole taloudellista käyttää muutoin kuin poikkeustilanteissa.

10 YHTEENVETO

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia talvibetonoinnin kustannuksia eri lämmitysvaihtoehtoja ja erilaisia betonilaatuja käyttäen sekä tutkia niiden vaikutusta betonin kovettumisaikaan. Lisäksi vertailtiin kesä- ja talviolosuhteissa tapahtuvan betonoinnin kustannuksia. Insinööriyöprosessin edetessä ilmeni tarve myös talvibetonointiohjeen laatimiselle työmaiden työnjohdon ja erityisesti harjoittelijoiden käyttöön. Betonin kovettumisen ja muotipurkulujuuden saavuttamiseen kuluvan ajan arvioimisen helpottamiseksi laadittiin myös taulukko, jossa on esitetty arvioitua ajan betonin jäätymslujuuden sekä eri rakenteiden muotipurkulujuuksien saavuttamiseen.

Betonoinnista ja talvibetonoinnista oli saatavilla kohtuullisen paljon lähdetietoa. Ongelmana oli tiedon hajaantuminen useisiin eri kirjoihin ja osa tiedosta oli jo vanhentunutta. Myöskään erilaisia betonin lämmitysvaihtoehtoja ja niiden kustannuksia ei oltu selkeästi esitetty missään teoksessa. Insinööriyöhön pyrittiinkin tästä syystä kokoamaan keskeisimmät talvibetonointiin liittyvät asiat ja ajankohtaisimmat tiedot.

Mikäli laskujen haluttaisiin vastaavan tarkemmin juuri tilaajayrityksen todellisia kustannuksia, vaatisi se pidempää seurantajaksoa eri työmailla todellisten työmenekkien selvittämiseksi. Täysin tarkkojen laskelmien laatiminen eri betonointitapojen ja lämmitysmenetelmien kustannuksista on käytännössä mahdotonta niihin liittyvien lukuisten muuttujien takia. Vaikka laatimamme laskelmat ovat hyvin teoreettisia, niiden tuloksien perusteella saa melko hyvän kuvan eri lämmitysvaihtoehtojen kustannuseroista sekä eri betonilaatujen käytön vaikutuksesta muottikiertoon.

LÄHTEET

1. Betonityöohjeet. kokonaan uusittu ohje. ed. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto; 1995.
2. Betonitekniikan oppikirja 2004. 5. uud. p. ed. Helsinki: Suomen betonitieto; 2005.
3. Haastattelu, Hannu Kananen, betonipumppuauton kuljettaja, Ruskon Betoni Oy 3.4.2013.
4. Talvirakentaminen. Helsinki: Rakentajain kustannus; 1990.
5. Kilpi E, Sarja A. Rakentajan talvibetonointiopas. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus; 1981.
6. Talvityöt ja kustannukset 2010. RT C8-0377
7. Työmaatekniikka 2012 -opintomoniste, Hannu Hietala, julkaisematon lähde
8. Haastattelu, Tuomas Komulainen, työnjohtaja, RPK Rakennus Kemppainen Oy 15.2.2013.
9. Betonin jälkihoito, Lujabetoni [PDF-dokumentti]
lujabetoni.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/luja/embeds/lujabetoniwwwstructure/16886_betonin_jalkihoito.pdf (luettu 15.2.2013)
10. Betonin turvallisuusopas, Finnsementti Oy [PDF-dokumentti]
http://www.finnsementti.fi/files/pdf/betonin_turvallisuuskortti.pdf (luettu 22.2.2013)
11. Betonin käyttöturvallisuustiedote, Rudus [PDF-dokumentti]
<http://www.rudus.fi/Download/24626/Betonin%20k%3%a4ytt%3%b6turvallisuustiedote.pdf> (luettu 22.2.2012)
12. Betoninormit 2012. Helsinki: BY-Koulutus; 2011.

13. Kilpi E. Kuuman betonin käyttö rakennustyömaalla. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus; 1982.
14. Uusitalo J, Ihanamäki J, Rajala R, Vallin O. Betonityöt. 2., tark. p. ed. Helsinki: Rakentajain kustannus; 1994.
15. Tuovinen M. Betonielementtirunkojen rakentaminen talviolosuhteissa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus; 1987.
16. Betonin valintaopas, Rudus [PDF-dokumentti]
rudus.fi/Download/21818/Betonin_valintaopas.pdf (luettu 16.2.2013)
17. Edilex B4 Betonirakenteet [PDF-dokumentti]
<http://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/b4.pdf> (luettu 12.1.2013)
18. Haastattelu, Henri Vaak, betonialan yrittäjä, Ohenmäen Sora Oy 21.3.2013.
19. Kimmovasaran käyttäjän ohje. Helsinki: Tiehallinnon selvityksiä; 2001 [PDF-dokumentti]
<http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/kimmovasaraohje01.pdf> (luettu 22.3.2013)
20. K-luokan termopari [kuva]
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/Thermocouple0003.jpg>
21. Lankalämmityksen suunnitteluohje 1995. RT 07-3031
22. Vuorinen P. Talvibetonointi. Lahti: Kestävä Kivitalo -projekti; 1999.
23. Kilpi E, Kukko H. Energian taloudellinen käyttö betonin lämmityksessä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus; 1985.
24. Helppokäyttöinen betonin lämmityskaapeli [kuva]
http://www.tarviketalo.net/product_pictures/big/1109-2520-betoninkovetuskaapeli.jpg
25. Talven keskilämpötilat, Ilmatieteenlaitos [WWW-dokumentti]
http://cdn.fmi.fi/legacy-fmi-fi-content/documents/climate/talven_keskil_1900.gif
(luettu 11.1.2013)

26. Rakennustöiden menekit 2010. RT KI-6017

27. Haastattelu, Raino Keränen, rakennusmies, RPK Rakennus Kemppainen Oy
19.3.2013.

LIITTEET

Liite 1, Lankalämmityksen mitoitusnomogrammi.

Liite 2, Lankalämmityksen teon ja käytön sijoittuminen suurmuottiseinän teossa.

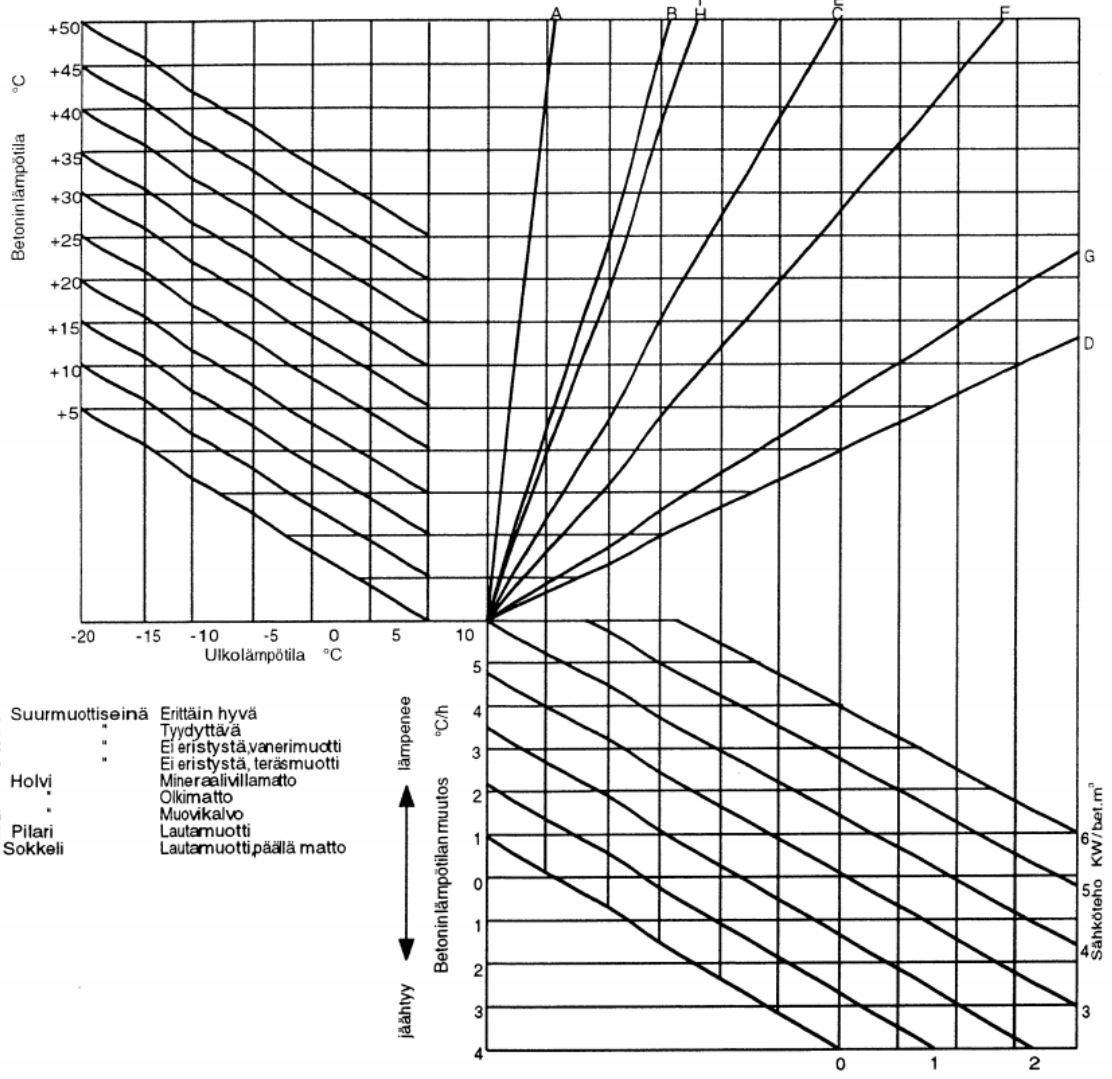
Liite 3, Laskutaulukot.

Liite 4, Ruskon Betoni Oy:n Kajaanin hinnasto.

Liite 5, Talvibetonointiohje.

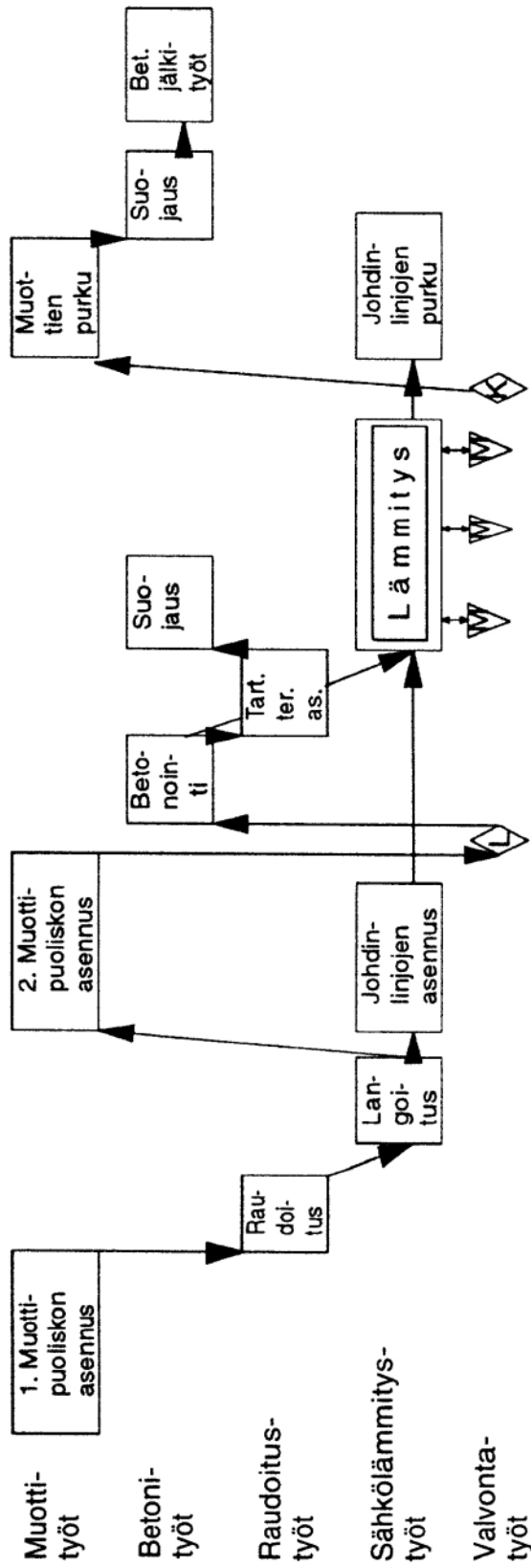
Liite 6, Pumppubetoniauton pystytyspöytäkirja.

Valun laatu ja lämpöeristys



- | | | |
|---|-----------------|----------------------------|
| A | Suurmuottiseinä | Erittäin hyvä |
| B | | Tyydyttävä |
| C | | Ei eristystä, vanerimuotti |
| D | | Ei eristystä, teräsmuotti |
| E | Holvi | Mineraalivillamatto |
| F | | Olkimatto |
| G | | Muovikalvo |
| H | Pilari | Lautamuotti |
| I | Sokkeli | Lautamuotti, päällä matto |

Työnvaihekaavio



Normaalisti kovettava sementti, K30, ulkolämpötila -15 C

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +40, kantava rakenne -> purkulujuus 60 %

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	71,5 kWh/m³	2 d 9 h 30 min	1.1 klo 7 : 00 -> 3.1 klo 16 : 30	4 h x 4,5 kw +	1 kw x 53,5 h
kuumabetoni 40	57,5 kWh/m³	2 d 9 h 30 min	1.1 klo 7 : 00 -> 3.1 klo 16 : 30	57,5 h x 1 kw +	0 kw x 0 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +20, kantava rakenne -> purkulujuus 60 %

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	68 kWh/m³	5 d 16 h	1.1 klo 7 : 00 -> 6.1 klo 23 : 00	136 h x 0,5 kw +	0 kw x 0 h
kuumabetoni 40	60 kWh/m³	5 d 6 h	1.1 klo 7 : 00 -> 6.1 klo 13 : 00	16 h x 0 kw + 0,5 kw x	120 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +40, ei kantava rakenne -> purkulujuus 5 Mpa

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	24 kWh/m³	10 h	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 17 : 00	4 h x 4,5 kw +	1 kw x 6 h
kuumabetoni 40	8,5 kWh/m³	8 h 30 min	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 15 : 30	8,5 h x 1 kw +	0 kw x 0 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +20, ei kantava rakenne -> purkulujuus 5 Mpa

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	10 kWh/m³	20 h	1.1 klo 7 : 00 -> 2.1 klo 3 : 00	20 h x 0,5 kw +	0 kw x 0 h
kuumabetoni 40	0 kWh/m³	11 h	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 18 : 00	0 h x 0 kw + 0,5 kw x	0 h

Normaalisti kovettava sementti, K40, ulkolämpötila -15 C

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +40, kantava rakenne -> purkulujuus 45 % (60 % K30 betonista)

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	38,5 kWh/m³	1 d 30 min	1.1 klo 7 : 00 -> 2.1 klo 7 : 30	4 h x 4,5 kw +	1 kw x 20,5 h
kuumabetoni 40	23,5 kWh/m³	23 h 30 min	1.1 klo 7 : 00 -> 2.1 klo 6 : 30	23,5 h x 1 kw +	0 kw x 0 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +20, kantava rakenne -> purkulujuus 45 % (60 % K30 betonista)

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	28 kWh/m³	2 d 8 h	1.1 klo 7 : 00 -> 3.1 klo 15 : 00	56 h x 0,5 kw +	0 kw x 0 h
kuumabetoni 40	15 kWh/m³	1 d 22 h	1.1 klo 7 : 00 -> 3.1 klo 5 : 00	16 h x 0 kw +	0,5 kw x 30 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +40, ei kantava rakenne -> purkulujuus 5 Mpa

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	21 kWh/m³	7 h	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 14 : 00	4 h x 4,5 kw +	1 kw x 3 h
kuumabetoni 40	5,5 kWh/m³	5 h 30 min	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 12 : 30	5,5 h x 1 kw +	0 kw x 0 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +20, ei kantava rakenne -> purkulujuus 5 Mpa

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	6,5 kWh/m³	13 h	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 20 : 00	13 h x 0,5 kw +	0 kw x 0 h
kuumabetoni 40	0 kWh/m³	7 h	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 14 : 00	0 h x 0 kw +	0 kw x 0 h

Rapidsementti, K30, ulkolämpötila -15 C

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +40, kantava rakenne -> purkulujuus 60 %

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	37 kWh/m ³	23 h	1.1 klo 7 : 00 -> 2.1 klo 6 : 00	4 h x 4,5 kw +	1 kw x	19 h
kuumabetoni 40	22 kWh/m ³	22 h	1.1 klo 7 : 00 -> 2.1 klo 5 : 00	22 h x 1 kw +	0 kw x	0 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +20, kantava rakenne -> purkulujuus 60 %

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	26 kWh/m ³	2 d 4 h	1.1 klo 7 : 00 -> 3.1 klo 11 : 00	52 h x 0,5 kw +	0 kw x	0 h
kuumabetoni 40	13 kWh/m ³	1 d 18 h	1.1 klo 7 : 00 -> 3.1 klo 1 : 00	16 h x 0 kw + 0,5 kw x	0 kw x	26 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +40, ei kantava rakenne -> purkulujuus 5 Mpa

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	21,5 kWh/m ³	7 h 30 min	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 14 : 30	4 h x 4,5 kw +	1 kw x	3,5 h
kuumabetoni 40	6 kWh/m ³	6 h	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 13 : 00	6 h x 1 kw +	0 kw x	0 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +20, ei kantava rakenne -> purkulujuus 5 Mpa

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	7,25 kWh/m ³	14 h 30 min	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 21 : 30	14,5 h x 0,5 kw +	0 kw x	0 h
kuumabetoni 40	0 kWh/m ³	7 h	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 14 : 00	0 h x 0 kw +	0 kw x	0 h

Rapidsementti, K40, ulkolämpötila -15 C

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +40, kantava rakenne -> purkulujuus 45 % (60 % K30 betonista)

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	26,5 kWh/m³	12 h 30 min	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 19 : 30	4 h x 4,5 kw +	1 kw x	8,5 h
kuumabetoni 40	11 kWh/m³	11 h	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 18 : 00	11 h x 1 kw +	0 kw x	0 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +20, kantava rakenne -> purkulujuus 45 % (60 % K30 betonista)

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	13 kWh/m³	1 d 2 h	1.1 klo 7 : 00 -> 2.1 klo 9 : 00	26 h x 0,5 kw +	0 kw x	0 h
kuumabetoni 40	0 kWh/m³	16 h	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 23 : 00	16 h x 0 kw +	0 kw x	0 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +40, ei kantava rakenne -> purkulujuus 5 Mpa

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	19,5 kWh/m³	5 h 30 min	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 12 : 30	4 h x 4,5 kw +	1 kw x	1,5 h
kuumabetoni 40	4,5 kWh/m³	4 h 30 min	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 11 : 30	4,5 h x 1 kw +	0 kw x	0 h

Suurmuottiseinä (tyydyttävä lämpöeristys), tavoitelämpötila +20, ei kantava rakenne -> purkulujuus 5 Mpa

Betonin valulämpötila: Energiantarve: Tarvittu aika:

20	5 kWh/m³	10 h	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 17 : 00	10 h x 0,5 kw +	0 kw x	0 h
kuumabetoni 40	0 kWh/m³	5 h	1.1 klo 7 : 00 -> 1.1 klo 12 : 00	5 h x 0 kw +	0 kw x	0 h

VALMISBETONIHINNASTO 20131.2.2013 alkaen sitoumuksetta
KORVAA HINNASTOT 2.1.2013

RAAHE	Betonimyllyrinkatu 1	92120 RAAHE	puh 0207 933 290	fax 0207 933 299
KAJAANI	Petäisentie 17	87400 KAJAANI	puh 0207 933 280	fax 0207 933 289
VUOKATTI	Lastaajantie 7	88610 VUOKATTI	puh 0207 933 275	fax 0207 933 279

NORMAALISTI KOVETTUVA BETONI									
Lujuus- luokka	Max. rae	Notkeusluokka							
		S 4 (0-1)		S 3 (1-2)		S 2 (2-3)		S 1 (3-5)	
		C20/25	8	127,05	157,54	123,54	153,19	120,67	149,63
	16	112,85	139,93	109,29	135,52	106,86	132,51	105,47	130,78
K25	32	108,61	134,68	105,04	130,25	103,60	128,46	102,59	127,21
C25/30	8	137,95	171,06	133,75	165,85	130,69	162,06	127,30	157,85
	16	120,67	149,63	116,42	144,36	114,55	142,04	112,56	139,57
K30	32	116,80	144,83	112,56	139,57	110,42	136,92	109,41	135,67
C28/35	8	147,21	182,54	142,40	176,58	138,69	171,98	135,51	168,03
	16	130,81	162,20	125,94	156,17	124,30	154,13	123,54	153,19
K35	32	126,99	157,47	122,05	151,34	120,05	148,86	118,91	147,45
C30/37	8	153,59	190,45	148,71	184,40	145,42	180,32	141,58	175,56
	16	136,35	169,07	131,41	162,95	129,62	160,73	128,59	159,45
K37	32	132,50	164,30	127,56	158,17	125,87	156,08	124,15	153,95
C32/40	8	159,97	198,36	155,02	192,22	152,14	188,65	147,64	183,07
	16	141,89	175,94	136,88	169,73	134,94	167,33	133,64	165,71
K40	32	138,00	171,12	133,06	164,99	131,69	163,30	129,38	160,43
C35/45	16	156,02	193,46	151,07	187,33	149,13	184,92	147,77	183,23
K45	32	152,14	188,65	147,14	182,45	145,76	180,74	143,51	177,95
C40/50	16	167,56	207,77	162,24	201,18	160,17	198,61	158,70	196,79
K50	32	163,40	202,62	158,02	195,94	156,54	194,11	154,13	191,12

NORMAALISTI KOVETTUVA LATTIABETONI									
Lujuus- luokka	Max. rae	Notkeusluokka							
		S 4 (0-1)		S 3 (1-2)		S 2 (2-3)		S 1 (3-5)	
		C20/25	8	134,75	167,09	130,94	162,37	127,87	158,56
	16H	125,63	155,78	121,89	151,14	119,09	147,67	117,50	145,70
K25	16	119,55	148,24	115,85	143,65	113,24	140,42	111,79	138,62
C25/30	8	146,20	181,29	141,82	175,86	138,50	171,74	134,94	167,33
	16H	135,20	167,65	130,79	162,17	128,26	159,04	125,59	155,73
K30	16	127,87	158,56	123,43	153,05	121,43	150,57	119,36	148,01
C28/35	8	156,08	193,54	150,89	187,10	147,02	182,30	143,64	178,11
	16H	145,65	180,60	140,42	174,12	137,86	170,94	136,02	168,66
K35	16	138,69	171,98	133,44	165,47	131,75	163,37	130,94	162,37
C30/37	8	162,84	201,92	157,61	195,44	154,15	191,15	150,05	186,06
	16H	151,84	188,28	146,62	181,81	144,09	178,67	141,77	175,79
K37	16	144,51	179,19	139,29	172,72	137,38	170,35	136,25	168,95
C32/40	8	169,60	210,30	164,33	203,77	161,27	199,97	156,45	194,00
	16H	158,03	195,96	152,82	189,49	150,31	186,39	147,52	182,92
K40	16	150,32	186,40	145,14	179,97	143,01	177,33	141,56	175,53

Muita betonilaatua erillisopimuksen mukaan.

Nopeammin päällystettävän betonin lisähinta (NP)	27,76	34,42
--	-------	-------

Nopeasti kovettuvan (rapid) betonin lisähinta: normaalisti kovettuvan betonin taulukkohinnasta 10 %.
--

VALMISBETONIHINNASTO 2013

RAAHE-KAJAANI-VUOKATTI

2(3)

JUOTOSBETONIT				HIERTOBETONIT			
		Alv. 0 %	Alv. 24 %			Alv. 0 %	Alv. 24 %
Lujuus luokka	Max. rae	Hinta €/m ³		Sideaine määrä	Max. rae	Hinta €/m ³	
C20/25 K25	8	131,23	162,73	H 300	8	110,30	136,77
C25/30 K30	8	143,58	178,04	H 325	8	113,98	141,34
C28/35 K35	8	152,89	189,58	H 350	8	117,67	145,91
C30/37 K37	8	159,55	197,84	H 400	8	125,30	155,37
C35/40 K40	8	166,16	206,04				

PAKKASBETONI

Lujuusluokka	Max. raekoko	Pakkasen kesto	Hinta €/m ³	
C25/30 K30	8 tai 16 mm	-10°C (Hidas lujuudenkehitys)	272,70	338,15

VALMISBETONIN LISÄHINNAT

Rasitusluokkien lisäehdot ja lisähinnat €/m³

<u>Hiiidioksidin aiheuttama rasitus</u>				<u>Kloridien aiheuttama rasitus</u>			
TUNNUS	50 vuotta	100 vuotta	TUNNUS	50 vuotta	100 vuotta		
XC1 lujuusluokka ≥ C20/25	C20/25	C20/25	XS1 lujuus ≥ C30/37	13,28	16,47	18,04	22,37
XC2 lujuusluokka ≥ C20/25	C20/25	C20/25	XS2, 3 lujuus ≥ C35/45	14,95	18,54	21,08	26,14
XC3 lujuusluokka ≥ C30/37	C30/37	C30/37	XD1, 2 lujuus ≥ C30/37	12,03	14,92	15,60	19,34
XC4 lujuusluokka ≥ C30/37	C30/37	C30/37	XD3 lujuus ≥ C35/45	14,95	18,54	21,08	26,14
<u>Jäätyminen ja sulaminen / Säänkestävä</u>				<u>Kemiallisesti aggressiiviset aineet</u>			
TUNNUS	50 vuotta	100 vuotta	TUNNUS	50 ja 100 vuotta			
XF1 lujuus ≥ C28/35	16,49	20,45	XA1 lujuus ≥ C30/37	13,28	16,47		
XF3 lujuus ≥ C32/40	20,90	25,92	XA2 lujuus ≥ C35/45	21,08	26,14		
			XA3 lujuus ≥ C40/50	25,30	31,37		

Mikäli rasitusluokka XA2 tai XA3 johtaa sulfaatinkestävän sideaineen käyttöön, saatavuus / hinta varmistettava tehtaalta!

P-LUKU BETONIT / vastaavat rasitusluokat 50 ja 100 vuotta

P-LUKU	LUJUUS	Lisähinta €/m ³	
P25 / XF2 (50 v)	> C28/35 K35	18,16	22,52
P30	> C28/35 K35	25,37	31,46
P40 / XF4 (50 v)	> C32/40 K40	31,74	39,36
P50 / XF2 (100 v)	> C40/50 K50	36,26	44,96
P80 / XF4 (100 v)	> C40/50 K50	58,00	71,92

KUUMABETONI

Lämpöluokka	Temperatuurivälillä	Lisähinta €/m ³	
Lämpöluokka 1	25 - 35 °C	6,85	8,49
Lämpöluokka 2	35 - 45 °C	13,63	16,90

NOTKISTETTU BETONI

Notkeusluokan notkistus	Lisähinta €/m ³
1 Notkeusluokan notkistus	10,24 12,70
2 Notkeusluokan notkistus	13,10 16,24

HIDASTETTU BETONI

Sitoutumisen hidastus	Lisähinta €/m ³
Sitoutumisen hidastus 3 - 6 h	10,72 13,29
Muita lisäaineita sopimuksen mukaan. Sovittujen lisäaineiden käytöstä erillisveloitus	

MUUT LISÄHINNAT

LÄMMITYSLISÄ

Betonin lämmityslisä 1.10. - 15.5. väliseltä ajalta	6,85	8,49
---	------	------

VALMISBETONIHINNASTO 2013**RAAHE-KAJAANI-VUOKATTI**

3(3)

TEHTAAN VUOROTYÖLISÄ		alv 0 %	24 %	
Arkisin	klo 16.00 - 22.00 ja la 06.00 - 12.00	15,18	18,82	€/ kuorma
Arkisin	klo 22.00 - 06.00	75,21	93,26	€/ kuorma
Muina aikoina sopimuksen mukaan.				
TEHTAAN ODOTUSAIKA				
Ark klo 16-06 välisenä aikana sekä lauantaisin, mikäli henkilökunta joutuu odottamaan valun aloitusta tai seuraavaa kuormaa ja valunopeus on < 2 kuormaa/ h, veloitetaan		47,64	59,07	€/ hlö/ h

BETONIN KULJETUS- JA SIIRTOKALUSTON HINNAT**KULJETUS TYÖMAALLE PYÖRINTÄSÄILIÖAUTOLLA**

≤ 5m ³ kuorma		45,63	56,58	€/ kuorma
jonka jälkeen jokaiselta alkavalta km:ltä		2,58	3,20	€/ km/ kuorma
Yli 5 m ³ kuomilta korotus 0,5 m ³ :n jaksoissa.				
Vuorotyö lisä	ark klo 16.00 - 22.00 ja la 06.00 - 12.00	11,86	14,71	€/ kuorma
	ark klo 22.00 - 06.00 ja la 12.00 jälkeen	23,73	29,43	€/ kuorma

KULJETUSKALUSTON PALVELUAIKAKORVAUS

20 min. kuluttua kaluston työmaalle saapumisen jälkeen alkaa veloitus jokaiselta alkavalta 10 min. jaksolta	14,27 €/ jakso	17,69 €/ jakso
---	----------------	----------------

HIHNAKULJETTIMEN KÄYTTÖ

(saatavuus tarkistettava tehtaalta etukäteen)

Kuljetinhihnan käytöstä veloitetaan	15,09 €/ m ³	18,71 €/ m ³
-------------------------------------	-------------------------	-------------------------

PUMPPUAUTON KÄYTTÖ

Pumpun perusmaksu (pumput ≤ 36 m)	88,67 €/ h	109,95 €/ h
Työskentely työmaalla / lyhin veloitus 1 h	88,67 €/ h	109,95 €/ h
Lisähinta pumpatusta betonista		
0 - 20 m ³ valukerta	12,88 €/ m ³	15,97 €/ m ³
20 - 50 m ³ valukerta	11,90 €/ m ³	14,76 €/ m ³
yli 50 m ³ valukerta	10,73 €/ m ³	13,31 €/ m ³
Pumput > 36 m puomilla: Lisähinta m ³ - ja tuntiveloituksiin	10 %	taulukkohinnoista
Putkiston voitelu	20,84 €/ kerta	25,84 €/ kerta
Vuorotyö arkisin klo 16.00 - 22.00 ja la 06.00 - 12.00	39,96 €/ h	49,55 €/ h
Yötyölisä klo 22.00 - 06.00 ja la 12.00 jälkeen	52,27 €/ h	64,81 €/ h
Pumppuauton siirtomaksu 10 km ylittävältä matkalta	1,45 €/ jkm	1,80 €/ jkm

KULJETUSPUMPPUAUTON KÄYTTÖ

Pumppausveloitus kuten pumppuautolla. Betonin kuljetus ja purkausveloitus hinnaston mukaisesti.

KULJETUSKALUSTON ODOTUSAIKA TEHTAALLA

Ark klo 16-06 välisenä aikana sekä lauantaisin, mikäli kalusto joutuu odottamaan valun aloitusta tai seuraavaa kuormaa ja valunopeus on < 2 kuormaa/ h, veloitetaan	53,59 €/ auto/ h	66,45 €/ auto/ h
---	------------------	------------------

PUMPPAUSTEN PERUUTUS

Pumppu/ kuljetuspumppuvaraus tulee tarvittaessa peruuttaa viimeistään edellisenä päivänä klo 12 mennessä, muutoin veloitamme varatusta pumppauksesta	111,30 €/ kerta	138,01 €/ kerta
--	-----------------	-----------------

YLIJÄÄMÄBETONI

Työmaalta takaisin palautetuista betonimassasta veloitetaan vastaanotto- ja käsittelykuluina	67,35 €/ m ³	83,51 €/ m ³
--	-------------------------	-------------------------

TILAUSTEN VASTAANOTTO

Raahe	puh 0207 933 290
Kajaani	puh 0207 933 280
Vuokatti	puh 0207 933 275

Tilaukset pyydetään tekemään viimeistään toimituspäivää edeltävänä päivänä

Maksuehto 14 vrk netto Yliaikakorko korkolain mukainen

Talvibetonointiohje

Betonitöiden suunnittelu

- Suunnittele muottikierto ja valitse muottityyppi ja lämmitystapa sen mukaan.
 - Varaa tarvittava muotti- ja lämmityskalusto työmaalle, esimerkiksi lankalämmitysmuuntajat, runkokaapelit, lämmityskaapelit, puhaltimet.
- Suunnittele valutapa ja massan vastaanotto työmaalle.
 - Mikäli valat pumpulla, tarkista pumpun ulottuvuus ja suunnittele valettavat kohteet ja pumpun sijoituspaikka/paikat sen mukaan siten, että pumppua tarvitsee siirrellä mahdollisimman vähän.
 - Varaa tarvittaessa vastaanottosuppilo tai nostoastia.
 - Nimeä betonityöryhmä.
 - Suunnittele mahdolliselle ylijäämäbetonille sijoituspaikka.
- Tarkista tarvittava betonimäärä ja laatu.
 - Laske määrä mieluummin muoteista kuin piirustuksista.
 - Harkitse kuumabetonin käyttöä tai lujuusluokan nostamista.
- Tilaa betonimassa hyvissä ajoin ennakkoon ja varmista tarvittaessa betonipumpun saatavuus.
 - Ilmoita valuajankohta ja -tapa betonityöryhmälle.
- Seuraa sääennusteita ja suunnittele valuajankohdat niiden mukaan.
 - Suojaa muotit/raudoitukset lumelta ja jäältä.
- Suunnittele betonin suojaustapa valun jälkeen.
 - Varaa suojausmateriaalit, esim. solumuovi, suojaressut.
 - Teetä pressusuojauksen mahdollisesti tarvitsemat tukirakenteet.

Toimenpiteet ennen betonointia

- Varmista, että valukohde on valmiina, ettei turhia odotuksia synny.
 - Ajoreitit, vastaanottokalusto, nostokalusto.
 - Muotit, raudoitukset, lämmityslangat.
 - Betonipumppuauton pystytyspaikkojen puhdistus lumesta (muista myös tukijalkojen vaatima tila!), hiekoitus.
- Lumen ja jään poisto muoteista ja raudoituksista juuri ennen valua.
 - Isot määrät mekaanisesti, loput höyryttämällä.
- Valukaluston ja muottien lämmitys höyryttämällä juuri ennen valua.
 - Nostoastia, vastaanottosuppilo
 - Muotit ja muut betonia vasten tulevat pinnat.
- Varmista betonityöryhmän kalusto.
 - Lapiot, sauvatäryttimet (toimivuus!), henkilökohtaiset suojaimet.

Betonityön suoritus

- Laadi pystytyspöytäkirja betonipumppua käytettäessä.
- Pyri suorittamaan betonointi mahdollisimman nopeasti betonimassan jäähtymisen estämiseksi.
- Vältä betonimassan turhia siirtoja.
- Mikäli käytetään lankalämmitystä, varo lämmityslankojen katkeamista betonimassaa muottiin laskettaessa ja tiivistäessä.

Toimenpiteet betonoinnin jälkeen

- Suojaa valetun betonirakenteen avoin yläpinta.
 - Solumuovi, pressut, EPS-levyt.
- Kytke betonilämmitys päälle.
 - Mittaa lämpötilat vähintään kolmesti päivässä.
 - Tarkista lämmityksen toimivuus lämpötilamittausten yhteydessä.
- Seuraa lujoudenkehitystä.
 - Jäätymislujuus 5 MN/m^2
 - Ei-kantavien rakenteiden muotinpurkulujuus 5 MN/m^2
 - Kantavien rakenteiden muotinpurkulujuus 60 % nimellislujuudesta.
 - Taulukossa 11. on esitetty betonin lujoudenkehitystä eri lämpötiloissa.
- Täytä betonointipöytäkirja.

Lämmitysmuodot rakennusosittain

Eri lämmitysmuodot soveltuvat erilaisiin rakenteisiin ja tilanteisiin. Edullisin ja käytännöllisin lämmitysmuoto tulee tästä syystä aina arvioida tapauskohtaisesti. Seuraavaksi esitetään eri rakennusosille soveltuvia lämmitystapoja.

- Perustukset:
 - kuumabetoni ja nopea suojaus (ei välttämättä vaadi lisälämmitystä)
 - reuna-alueiden lankalämmitys
 - huputus ja puhallinlämmitys

- Seinät:
 - suurissa rakenteissa lämmittävät suurmuotit
 - pienissä rakenteissa ja reuna-alueilla lankalämmitys
 - varalämmityksenä puhallinlämmitys

- Pilarit, palkit:
 - kuumabetoni ja muottien eristäminen
 - lankalämmitys
 - varalämmityksenä puhallinlämmitys

- Laatat:
 - reuna-alueiden lankalämmitys
 - suurissa rakenteissa lämmittävät pöytämuotit (tarkista saatavuus)
 - pienissä, helposti suojattavissa rakenteissa puhallinlämmitys (lämmittää samalla aiemmin valettuja rakenteita)
 - säteilylämmitys, mikäli käytössä on teräs- tai alumiinirakenteiset muotit

- Sauma- ja juotosvalut, muut pienet valut:
 - pakkasbetoni, valmiina tai säkkitavarana
 - lankalämmitys

Edellä esitetyt lämmitysmuodot eri rakennusosille perustuvat tehtyihin laskelmiin. Käytettävää lämmitystapaa valittaessa tulee ottaa huomioon valettavan rakenteen lisäksi muun muassa suunniteltu muottikierto ja käytettävissä oleva kalusto. Lisäksi on varmistuttava lämmittämiä asentavien ja käyttävien työntekijöiden asiantuntemuksesta; esimerkiksi säteilylämmityksen käyttö liian suurella teholla voi aiheuttaa betonipinnan halkeilua tai betonin lujjuuskatoa.

Taulukko 11. Betonin lujuudenkehitys eri betonin lämpötiloissa.

Betonin keskilämpötila +5 °C			
Betoni:	Jäätymisluku	60 % nimellislukuudesta	60 % K30-lukuudesta
K30	2 d 11 h	16 d 16 h	-
K40	1 d 15 h	13 d 18 h	6 d 21 h
Nopeasti kovettuva K30	1 d 18 h	6 d 9 h	-
Nopeasti kovettuva K40	1 d 6 h	5 d 10 h	3 d 5 h

Betonin keskilämpötila +10 °C			
Betoni:	Jäätymisluku	60 % nimellislukuudesta	60 % K30-lukuudesta
K30	1 d 15 h	10 d 21 h	-
K40	1 d 1 h	9 d 23 h	4 d 12 h
Nopeasti kovettuva K30	1 d 3 h	4 d 4 h	-
Nopeasti kovettuva K40	20 h	3 d 13 h	2 d 2 h

Betonin keskilämpötila +20 °C			
Betoni:	Jäätymisluku	60 % nimellislukuudesta	60 % K30-lukuudesta
K30	20 h	5 d 16 h	-
K40	13 h	4 d 16 h	2 d 8 h
Nopeasti kovettuva K30	15 h	2 d 4 h	-
Nopeasti kovettuva K40	10 h	1 d 20 d	1 d 2 h

Betonin keskilämpötila +40 °C			
Betoni:	Jäätymisluku	60 % nimellislukuudesta	60 % K30-lukuudesta
K30	9 h	2 d 9 h	-
K40	6 h	1 d 23 h	1 d
Nopeasti kovettuva K30	6 h	22 h	-
Nopeasti kovettuva K40	5 h	19 h	11 h

Toimitus		Laskutus	
Lisätietoja/Ajo-ohje		Asiakasno - Työmaanro	
Betonipumppu nro		Tilattu, päiväys, klo	
Pumppuautoa ja pumppausta koskeva tarkastus		Kunnossa	Korjattava
1. Pumppuautolle suoritettu rakenteellinen tarkastus (kats. pöytäk.)			
2. Tukijalkojen perustus			
3. Syöttöputkiston kunto (silmämäär. tark.)			
4. Pääteletkun turvalukitus			
5. Näköyhteys valukohteeseen			
6. Lähellä olevat sähkölinjat Suojaetäisyys sähkölinjaan _____ m varmistettu			
7. Pumppuauton käyttö- ja huolto-ohjeet sekä muut tarvittavat asiapaperit			
8. Ilmassa olevat muut mahdolliset vaaratekijät			
9. Työmaaolosuhteet (kulkureitit, kaiteet, liukastumis- ja kompastumisvaarat, valaistus)			
10. Pumpputilaus peruutettu			
Puhelin työmaalle		HUOM.	
Tarkastukset suorittivat:			
Ajoneuvon kuljettaja	Työntekijän edustaja	Vastaava työnjohtaja tai hänen edustajansa	
Linjapumppausta koskeva tarkastus		Kunnossa	Korjattava
1. Linjan suojaus esim. pressulla			
2. Turva-/suojaetäisyys. Työskentely turva-alueella kielletty.			
3. Pumppauksessa huomioitava betonilaatu/linjakoko (kts. pumppulinjan minimikototaulukko)			
4. Linjaputket, tiivisteet ja lukot ovat kunnossa			
5. Asiakas avustaa linjan rakentamisessa, puhdistuksessa sekä sen purkamisessa			
6. Näköyhteys valukohteeseen			
7. Kuitubetonin pumppauksessa huomioitavan linjan koko sekä betonin laatu			
HUOM.			
Tarkastukset suorittivat:			
Ajoneuvon kuljettaja	Työntekijän edustaja	Vastaava työnjohtaja tai hänen edustajansa	
Työmaalle toimitetut linjavarusteet asiakkaan pyynnöstä:			
Putket	m/kpl, Letkut	m/kpl, Lukot	kpl
Tiivisteet	kpl, Kompressorit	kpl	