



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Joni Lakso

Betonointiprosessin kehittäminen siltavalukohteissa

Opinnäytetyö

Kevät 2024

Insinööri (AMK), Rakennustekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Rakennustekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Talonrakennustekniikka

Tekijä: Joni Lakso

Työn nimi alaotsikoinen: Betonointiprosessin kehittäminen siltavalukohteessa

Ohjaaja: Janne Pihlajaniemi

Vuosi: 2024

Sivumäärä: 58

Liitteiden lukumäärä: -

Uusi Infrabetonien Valmistusohje sekä InfraRYL ohjaavat infrakohteilla suurelta osin betonin valmistusta ja betonointia. Näiden lisäksi sillan suunnittelussa ja betonoinnissa käytetään niin Suomen Betoniyhdistyksen (By) kuin Suomen Rakennusinsinöörien Liiton (RIL) yleisesti hyväksi rakennustavaksi muodostuneita ohjeistuksia.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia kevyen tärypalkin tiivistystehoa sekä tuottaa ohjeita betonityöjohtajan tueksi betonisen kansirakenteen betonointiin siltavalukohteella. Kyseinen ohjeistus on tarkoitettu Destia Oy:n käyttöön ja siten se on työn liitteenä määritelty salaiseksi.

Tämän opinnäytetyön alussa tutustutaan betoniin yleisesti ja viimeisimmän Väyläviraston ohjeen mukaiseen infrabetoniin. Betonin lisäksi tutustutaan sillan kannen betonointiin ja betonin tiivistämisen tärkeyteen. Työn kokeellisen tutkimuksen osiossa tutkitaan kevyen tärypalkin tiivistystehoa tilanteessa, jossa työmaalla tehtävässä sillan kannen valamisen yhteydessä on tapahtunut valukatko pintaverkon tasossa.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että riittämättömän tärytyksen takia pinnan lujuus verrattuna kontrollikappaleeseen oli 8 prosenttia heikompi. Sisäkerroksissa saavutettiin myös 13 prosentin heikennys puristuslujuuteen, kun jo sitoutumaan alkanutta valukerrosta jälkitärytettiin. Tämän vuoksi tärytyksen vaikutuksia tulisi tutkia enemmän sellaisten rakenteiden osalta, missä jälkitärytys saatetaan ulottaa useampaan valukerrokseen, jossa sitoutuminen on jo käynnissä.

¹ Asiasanat: Infrabetoni, siltatyömaa, betonointiprosessi, plastinen painuma, tärypalkki

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Bachelor of Engineering, Construction Engineering

Specialisation: Building Construction

Author: Joni Lakso

Title of thesis: Development of the Concreting Process at a Bridge Casting Site

Supervisor: Janne Pihlajaniemi

Year: 2024

Number of pages: 58

Number of appendices: -

The new manufacturing instructions for infrastructure concrete (Infrabetonien Valmistusohje; Väyläviraston ohjeita 41/2020) and InfraRYL (a description of the general quality requirements for infrastructure construction, collaboratively developed by the infrastructure sector) largely guide the production and concreting of concrete in infrastructure projects. In addition to these, the guidelines established as general good building practices by Concrete Association of Finland (By) and Finnish Association of Civil Engineers (RIL) are used in the design and concrete of bridges.

The purpose of the thesis was to study the compaction efficiency of a light vibrating beam and to produce guidelines to support the concrete work supervisor in the concreting of a concrete deck structure at a bridge casting site. The guidance is intended solely for the use of Destia Oy, a Finnish infrastructure company. In the beginning of the thesis, concrete was reviewed in general. Infrastructure concrete (Infrabetoni) was introduced through the latest guidelines of the Finnish Transport Infrastructure Agency. In addition to concrete, the concreting of the bridge deck and the importance of concrete compaction were examined. In the experimental research section of the thesis, the compaction efficiency of a light vibrating beam was studied in a situation where a casting interruption had occurred at the level of the surface reinforcement during the concreting of the bridge deck on the construction site.

Based on the results, it could be concluded that due to insufficient vibration, the surface strength was 8% weaker compared to the control sample. In the inner layers, a 13% reduction in compressive strength was also observed when a layer that had already begun to set was post-vibrated. Therefore, the effects of vibration should be studied further in structures where post-vibration might extend to multiple casting layers where setting had already begun.

¹ Keywords: Infrastructure concrete, bridge construction, concreting process, vibrating beam

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	8
1 JOHDANTO	9
1.1 Opinnäytetyön taustaa	9
1.2 Opinnäytetyön tavoite ja rajaus	9
1.3 Opinnäytetyön toimeksiantaja	10
2 BETONI SILTARAKENTAMISESSA.....	11
2.1 Betoni yleisesti	11
2.1.1 Sementti.....	11
2.1.2 Vesi.....	14
2.1.3 Runkoaines.....	15
2.1.4 Lisäaineet.....	16
2.2 Infrabetoni	17
2.2.1 P-lukubetoni	18
2.2.2 Infrabetonien valmistus	19
2.2.3 Ennakkokokeet	22
2.2.4 Kelpoisuuden osoittaminen.....	25
2.2.5 Laadunvalvonta.....	29
3 BETONOINTIPROSESSI SILTATYÖMAILLA.....	30
3.1 Yleistä	30
3.2 Valmisbetonin tilaus	30
3.3 Betonointiin valmistautuminen.....	31
3.4 Betonointi	35
3.5 Betonin tiivistäminen	37
3.5.1 Tärysauvalla tiivistäminen	38
3.5.2 Tärypalkilla tiivistys	39

3.5.3	Alitiivistys	40
3.5.4	Ylitiivistys	40
3.5.5	Optimaalinen tiivistysaika.....	41
3.5.6	Jälkitiivistys	41
3.6	Viimeistely, jälkihoito ja suojaus	42
3.7	Työturvallisuus	44
4	KOKEELLINEN TUTKIMUS	45
4.1	Esipuhe	45
4.2	Koejärjestelyt.....	45
4.3	Koerakenteet.....	45
4.4	Betonointi	46
4.5	Tiivistysmenetelmä.....	47
4.6	Koetilanteen analysointi	49
4.7	Puristuskokeet.....	51
4.8	Puristuskokeiden tulokset.....	52
4.9	Puristuskokeiden tulosten analysointi.....	53
5	PÄÄTELMÄ.....	55
	LÄHTEET	57

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Teräsbetonisen ulokelaattasillan (Bul) reunapalkin vastavalu	37
Kuva 2. Nelikanavainen datalogger Testo 716T4 suojarasiassa	44
Kuva 3. Koerakenteen valumuotti	46
Kuva 4. Valutilanne 1. betonikuorman jälkeen	47
Kuva 5. Sauvatäryttimellä tiivistäminen.....	48
Kuva 6. Polttomootorilla varustettu kevyt tärypalkki	49
Kuva 7. Rakennekoekappaleen poraus	51
Kuvio 1. Betonin raaka-aineet.....	11
Kuvio 2. Sementtiklinkkerin mineraaleja	13
Kuvio 3. Suojahuokosen toiminta.....	18
Kuvio 4. Tuoreen betonin vähimmäisilmamäärä kahdelle eri P-luvulle, kun kiviaineksen yläraja on ≥ 12 millimetriä kuvassa myös esitetty katkoviivalla vaadittava ilmamäärä tehollisen vesi-sementtisuhteen funktiona, kun käytetään Oiva- sementtiä	20
Kuvio 5. Ilmamäärän vaikutus puristuslujuuteen	38
Kuvio 6. Tärysauvan ulottaminen edelliseen kerrokseen	39
Kuvio 7. Ohjeelliset tiivistysajat	41
Taulukko 1. Betonin käyttökohteen määrittämä betonin valmistuksessa käytettävän veden suurin sallittu kloridipitoisuus	15

Taulukko 2. Betonin käyttökohteen määrittämä betonin suurin sallittu kloridipitoisuus painoprosentteina sementin määrästä	15
Taulukko 3. Käyttöön suositeltavat infrabetonilaadut	23
Taulukko 4. Ennakkokokeiden testejä betonilaaduittain	24
Taulukko 5. Puristuslujuuden tunnistusehdot.....	27
Taulukko 6. Testausiästä riippuva puristuslujuuden korjauskerroin $X(t)$	28
Taulukko 7. Työmaan betonityösuunnitelman ja valukohtaisen betonointisuunnitelman runko.....	32
Taulukko 8. Puristuskokeiden tulokset.....	52
Taulukko 9. Puristuskokeiden tiheyden arvot keskiarvoina.....	53
Taulukko 10. Puristuskokeiden lujuuden arvot keskiarvoina.....	53
Taulukko 11. Rakennekoekappaleiden puristuslujuus, kun verrataan tuloksia valukerrosten välillä.....	54
Taulukko 12. Rakennekoekappaleiden tiheydet, kun verrataan tuloksia valukerrosten välillä.....	54
Taulukko 13. Valukoekappaleiden tiheyden ja puristelujuuden tulokset	54

Käytetyt termit ja lyhenteet

Arvosteluera	Samalla kertaa valetun rakenneosan betonin ja betonilaadun muodostama kokonaisuus.
Infrabetoni	Tie-, rata- tai vesiväylien betonisten taitorakenteiden rakentamisessa käytettävä betoni, jonka valmistuksessa noudatetaan Väyläviraston vuonna 2020 antamaa ohjetta.
InfraRYL	Yleisesti hyväksytyjä rakentamisen laatuvaatimuksia listaava ohjeistus, joka on myös yleisesti hyväksytty hyvää rakentamistapaa kuvaava ohjeistus. InfraRYL käsittelee infrarakentamisessa työmaiden toimintaa.
SILKO-ohjeet	Väyläviraston alaisuuteen kuuluvan SILKO työryhmän johdolla hyväksytyjä ohjeita sillan korjaukseen ja soveltuvin osin uudisrakentamiseen
Taitorakenne	Rakenteet kuten sillat, tunnelit, laiturit ja muut rakenteet, jotka vaativat lujuuslaskentaan perustuvat suunnitelmat koska rakenteellinen vaurioituminen voi aiheuttaa vaaraa ihmisille ja liikenteelle.
Tiksotrooppinen	Kuvailee materiaalin ominaisuutta joka lepotilassa on jähmeää mutta muuttuu juoksevaksi, kun siihen tuodaan energiaa esimerkiksi betonitryttimellä.
Tuotesertifiointi	Tuotesertifiointilla osoitetaan tuotteen kelpoisuus ja ennalta määriteltyjen vaatimusten mukaisuus
Väylävirasto	Väylävirasto on liikenne- ja viestintäministeriön hallinnonalalla toimiva keskushallinnon virasto, joka väylänpitäjänä vastaa tie-, rata- ja vesiväylien palvelutason ylläpidosta ja kehittämisestä valtion hallinnoimilla liikenneväylillä.

1 JOHDANTO

1.1 Opinnäytetyön taustaa

Sillan kannen betonointiprosessi on tapahtuma, jossa usein kulminoituu monen kuukauden työ, ja joka määrittää usein, onko työmaa onnistunut vai ei. Tästä syystä betonointia johtavalla työnjohtajalla tulisi olla laaja-alainen kokemus ja tieto betonointiprosessista. Kokemus ei tule kuin itse tekemällä kyseistä työtä, ja tietoa tulisi omaksua kaiken aikaa muuttuvien säädösten ja kiristyvien laatuodotusten vuoksi.

Siltabetonoinnin onnistumista seurataan laadunvalvonnallisesti muun muassa ennakkokein, olosuhdekappaleiden ja poranäytteiden kautta. Kiristynyt laadunvalvonnallinen jälkiseuranta on myös tuonut helpommin esille virheitä, jotka olisi muussa tapauksessa jäänyt huomaamatta. Vaikka betonoinnin onnistumiseen vaikuttavat sekä betoniaseman betonin valmistus että oikeaoppinen kuljetus, ei missään nimessä saisi unohtaa itse työmaalla tapahtuvaa betonointia. Kemijärven sillan ja Turun sairaalan laatuongelmien jälkeen syntipukiksi muodostuivat yleisesti betonin toimittajat, joiden laadunvalvonnassa huomattiin puutteita. Tästä seurasi niin sanottu myllykirje, joka toi toivottuja muutoksia betonin laadunvalvontaan valmistusprosessin, kuljetuksen ja pumppauksen aikana. Tämän työn tekijän mukaan parannettavaa löytyy vielä työmaan tasollakin.

1.2 Opinnäytetyön tavoite ja rajaus

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on luoda tietopaketti betonityönjohdon ja betonityöntekijöiden tueksi samalla kehittämällä itse betonointiprosessia siltatyömaalla. Työssä perehdytään betoniin rakennusmateriaalina, tutustutaan infrabetonin ja käydään läpi betonisen sillan kannen betonointiprosessi. Opinnäytetyö rajattiin betonisen sillan kannatinrakenteen betonointiin.

Työssä myös pyritään tutkimaan kevyen tärypalkin tiivistystehoa erityisessä ongelmatilanteessa betonisen sillan kansirakenteen valun aikana.

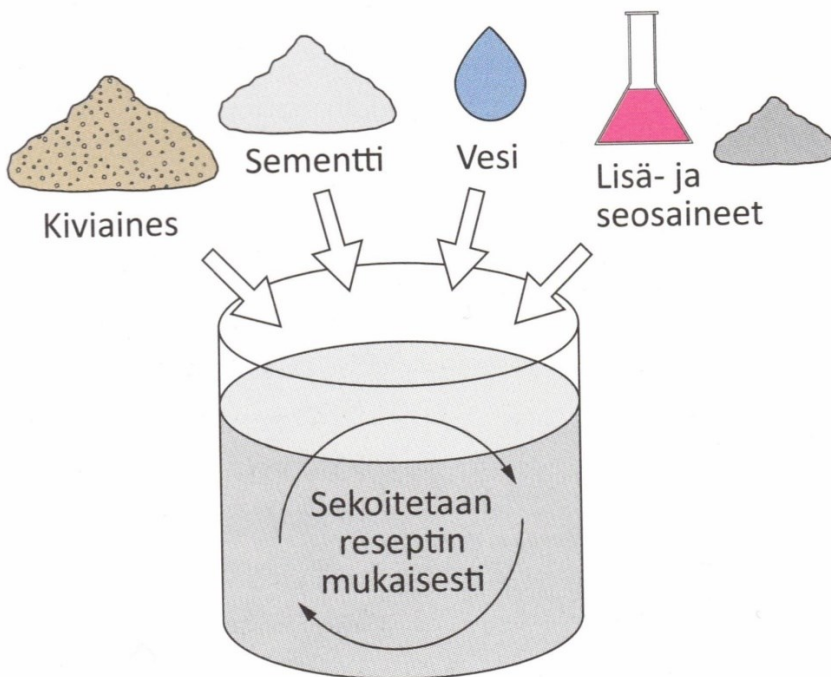
1.3 Opinnäytetyön toimeksiantaja

Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Destia Oy:n kanssa. Destia on tällä hetkellä Suomen suurin infra-alan toimija ja se on osa kansainvälistä Colas-konsernia (Destia, i.a.). Destia suunnittelee, rakentaa ja ylläpitää yhteiskunnan toiminnan kannalta tärkeää infrastruktuuria, kuten sähköverkoja, siltoja, teitä ja ratoja. Destia myös kehittää kaupunkeja, telematiikka- ja valaistusratkaisuja sekä tarjoaa monipuolisia palveluja liikenteen ja infraomaisuuden hallintaan.

2 BETONI SILTARAKENTAMISESSA

2.1 Betoni yleisesti

Betoni on todella monipuolinen rakennusmateriaali, jonka pääraaka-aineet ovat sementti, vesi ja erikokoisista kivirakeista koostuva runkoaines (kuvio 1), joka veden avulla hydratoitumisen seurauksena kovettuu (Haara, 2018, s. 13). Betonin ominaisuuksia muokataan lisä- ja seosaineilla. Nämä ainekset ovat suhteellisen helposti saatavilla, minkä vuoksi betonia hyödynnetään erittäin laajalti erilaisissa rakennusprojekteissa ympäri maailmaa. Tästä syystä betonia valmistetaan vuositasolla noin 13 miljardia kuutiota. Betonin suosio perustuu useisiin ominaisuuksiin, kuten kestävyyteen, helppoon muokattavuuteen ja suhteellisen alhaisiin kustannuksiin.



Kuvio 1. Betonin raaka-aineet (Haara, 2018, s. 24).

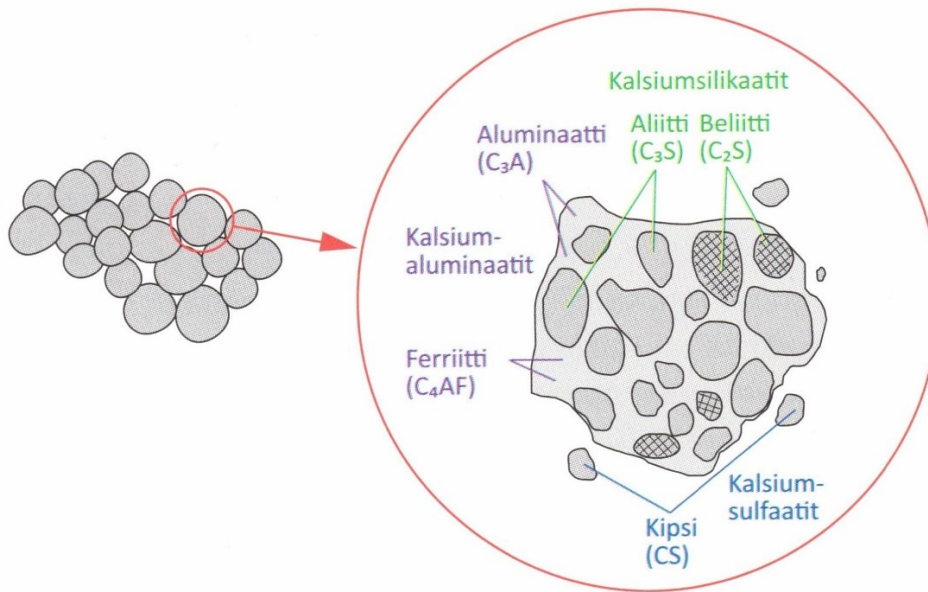
2.1.1 Sementti

Sementti on jauhemainen hydraulinen sideaine, joka veden kanssa sekoitettuna muodostaa pastan, sitoutuu ja kovettuu hydrataatioreaktioiden kautta kovaksi, ja joka kovettumisen

jälkeen pitää lujuutensa ja pysyvyytensä myös veden alla (Suomen Standardisoimisliitto (SFS), 2012, s. 9).

Sementti valmistetaan jauhamalla klinkkeriä, seosaineita ja kipsiä suurissa kuulamylyissä, jolloin tuloksena syntyy erittäin hienojakoinen jauhe (Haara, 2018, s. 25). Klinkkeri on sementin tärkein osa-aines, jota valmistetaan polttamalla hienoksi jauhettua sekoitusta, joka sisältää kalkkikiven kalsiumkarbonaattia (CaCO_3) (mts. 24). Kalsiumkarbonaatin lisäksi tarvitaan vielä piidioksidia (SiO_2), rautaoksidia (Fe_2O_3) ja alumiinioksidia (Al_2O_3). Klinkkerin poltto on kaksivaiheinen prosessi, jossa ensimmäisessä vaiheessa raakajauhatusseos esilämmittää poltosta tulevilla kaasuilla (mts. 25). Jauhe reagoi voimakkaasti lämpimien savukaasujen takia, jolloin kalkkikiven kalsiumkarbonaatti (CaCO_3) hajoaa kalsiumoksidiksi (CaO) ja hiilidioksidiksi (CO_2). Reaktiota kutsutaan esikalsinoinniksi.

Esilämmityksen jälkeen esikalsinoitu seos ohjataan pitkään kiertouuniin, jossa uunin pyöriessä varsinainen poltto tapahtuu (Haara, 2018, s. 25). Lämpötila nousee uunissa hitaasti noin $1450\text{ }^\circ\text{C}$, jolloin seos alkaa osittain sulamaan ja klinkkerimineraaleja alkaa muodostumaan. Seoksen saavutettua uunin loppuosan, seos jäähdytetään nopeasti noin $275\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaan, jonka jälkeen klinkkeri varastoidaan odottamaan jatkokäsittelyä. Valmis klinkkeri sisältää pääosin neljää mineraalia, joita ovat aliitti (trikalsiumsilikaatti C3S), beliitti (dikalsiumsilikaatti C2S), aluminaatti (trikalsiumaluminaatti C3A) ja ferriitti (tetrakalsiumaluminaattiferriitti C4AF) (kuvio 2). Näiden neljän klinkkerissä esiintyvän mineraalin keskinäisiä suhteita säätämällä pystytään vaikuttamaan sementin ominaisuuksiin.



Kuvio 2. Sementtiklinkkerin mineraaleja (Haara, 2018, s. 26).

Klinkkerin valmistuksen jälkeen varsinainen rakennussementti valmistetaan jauhamalla klinkkerin, seosaineiden ja kalkin seosta kuulamylyissä (Haara, 2018, s. 25). Eri osa-aineiden määriä ja jauhatushienoutta säätämällä saadaan aikaiseksi eri sementtilaatuja samasta klinkkeriseoksesta.

Sementtiin lisättävillä seosaineilla, kuten masuunikuonalla ja kalkkikivellä pyritään vähentämään sementin tuotannon aiheuttamaa ympäristökuormitusta (Finnsementti Oy, i.a.). Näillä seosaineilla on myös suotuisa vaikutus sementin ominaisuuksiin. Masuunikuona esimerkiksi reagoi veden ja sementin reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin kanssa kehittäen lujuutta, melkein samassa suhteessa kuin sementtiklinkkeri. Masuunikuona tuottaa samalla vähemmän lämpöä, mikä taas on hyödyllistä massiivisten betonirakenteiden valmistuksessa.

Kalkkikivi puolestaan toimii sementissä täyteaineena, parantaen betonin työstettävyyttä (Finnsementti Oy, i.a.). Kalkkikivi ja granuloitu masuunikuona muuttavat betoninmassan rakennetta parantaen sen työstettävyyttä, tiivistämällä huokosrakennetta, joka siten hidastaa haitallisten aineiden tunkeutumista betoniin. Molemmat seosaineet näin ollen tiivistävät betonin rakennetta parantaen sen kestävyyttä.

2.1.2 Vesi

Betonin valmistuksessa käytettävä vesi tulisi olla lähtökohtaisesti juomakelpoista, jolloin se soveltuu lähes poikkeuksetta betonin pääraaka-aineeksi (Haara, 2018, s. 59). Muitakin kuin juomakelpoisia vesiä voidaan käyttää, kunhan niiden soveltuvuus on ensin varmistettu. Betonteollisuuden prosessissa kerätty kierrätysvesi soveltuu sellaisenaan käytettäväksi betonin valmistukseen, ellei kierrätysvesi sisällä mitään ylimääräisiä ei-toivottuja ainesosia, kuten öljyä tai rasvoja, jotka voivat häiritä sementin hydratoitumista kiinnittymällä sementtihiukkasten pinnalle ja näin estämällä reaktion kulkua. Öljyt ja rasvat voivat myös heikentää tartuntaa runkoainekseen tai voivat vaikuttaa betonin ilmamäärään. Luonnosta kerätyn pintaveden tai muun teollisuuden jätevesien käyttö ei ole sallittua ilman tarkempaa tutkimusta eikä viemäri- ja merivesi sovellu koskaan käytettäväksi betonin raaka-aineena. Betonissa käytettävän veden kloridipitoisuudesta on määritelty raja-arvot, jotka ovat sidoksissa betonin käyttökohteeseen (taulukko 1). Näitä arvoja ei saa ylittää, ellei kyetä osoittamaan, että valmiin betonin kloridiarvot eivät ylitä taulukon 2 raja-arvoja.

Taulukko 1. Betonin käyttökohteen määrittämä betonin valmistuksessa käytettävän veden suurin sallittu kloridipitoisuus (Haara, 2018).

Loppukäyttö	Suurin kloridipitoisuus [mg/l]
Jännitetty betoni tai injektointilaasti	500
Raudoitettu tai metalliosia sisältävä betoni	1000
Raudoittamaton tai metalliosia sisältämätön betoni	4500

Taulukko 2. Betonin käyttökohteen määrittämä betonin suurin sallittu kloridipitoisuus painoprosenteina sementin määrästä (Haara, 2018).

Betonin käyttö	Kloridiluokka	Suurin sallittu Cl-määrä [paino-%] sementin määrästä ^{a)}
Raudoittamaton betoni, joka ei sisällä muitakaan metalliosia, lukuun ottamatta korroosionkestäviä nostoelimiä	Cl 1,00	1,00
Raudoitettu betoni tai muita metalliosia sisältävä betoni	Cl 0,20	0,20
Jännitetty betoni	Cl 0,20	0,20

^{a)} Jos käytetään II-tyyppin seosaineita, jotka otetaan huomioon sideainemäärässä, kloridimäärä lasketaan sementin ja seosaineen yhteenlasketusta määrästä.

2.1.3 Runkoaines

Rakentamisessa käytettävä kiviaines on materiaali, joka koostuu luonnosta seulotuista tai murskatuista kivistä (Haara, 2018, s. 43). Tämä materiaali luokitellaan yleisesti koon ja rakeisuuden mukaan. Karkeampi kiviaines, kuten murske sopii ominaisuuksiensa puolesta erinomaisesti esimerkiksi tukikerrokseen tienrakentamisessa. Hienojakoisempi materiaali, kuten hiekka ja sora sopivat käytettäväksi betonin runkoaineeksi. Kiviaineksen ominaisuuksilla on suuri merkitys betonin ominaisuuksiin, koska kiviaineksen tilavuusosuus betonissa on 65...80 prosenttia. Betonin valmistuksessa käytettävä kiviaineksen osuus on suuri, jolloin sitä tulisi olla helposti saatavilla ja sen kustannukset eivät saa olla korkeat. Murskaamattomien kiviaineksen käyttö betonin valmistuksessa on sallittua ja tietyissä tapauksissa taloudellisesti kannattavaa, erityisesti silloin kun sitä on paikallisesti runsaasti saatavilla ja louhinnan tai murskauksen kustannukset ovat korkeat. Hyvälaatuisen murskaamattoman luonnonkiviaineksen saanti varsinkin kasvukeskusten läheisyydessä on vaikeutunut, jonka seurauksena

murskatun kiviaineksen käyttö on lisääntynyt. Suomessa on laajat hyvälaatuiset kivivarannot, mutta maa-ainesten ottolupien saanti on vaikeutunut koska näitä luonnonvaraisia alueita halutaan suojella. Nämä luonnolliset sora- ja hiekkamuodostumat ovat tehokkaita pohjavettä suodattavia ja varastoivia alueita eikä pohjaveden muodostumista haluta häiritä veden laadun ja määrän vaarantamiseksi. Ottolupia ei myöskään myönnetä lähellä asutusta, louhinnassa syntyvän melu- ja pölyhaittojen vuoksi.

Myös keinotekoisia kiviaineita, kuten kevytsoraa tai uusiokiviaineita kuten masuunikuonaa, lentotuhkaa sekä tiili- tai betonimurskaa voidaan käyttää betonin valmistuksessa (Haara, 2018, s. 43). Kevytsora valmistetaan savesta polttamalla, jolloin tämän prosessin yhteydessä saven sisälle muodostuu ilmarakkuloja. Kevytsorasta valmistetaan kevytsorabetonia, jonka käyttökohde on pääasiassa kevytsoratuotteet kuten kevytsoraharkot. Kevytsorabetonia voidaan käyttää myös sellaisenaan muun muassa ontelolaattojen saumojen täytevalussa ja valuissa, joissa haetaan normaaliin betoniin verrattuna kevyempää ratkaisua. Kevytsoran hyötynä (keveytensä lisäksi) on muun muassa sen lämmöneristysominaisuudet ja helppo käsiteltävyys. Pelletoitu masuunikuona, ilmajähdytetty kappalekuona ja granuloitu kuona ovat vaihtoehtoja betonissa käytettäväksi kiviainekseksi. Vaikka nämä materiaalit muistuttavat kevytsoraa on niiden käyttö betonissa melko vähäistä. Lentotuhkaa hyödynnetään sekä sideaineena että täyteaineena betonissa. Se toimii erinomaisesti hienorakeisena täytekiviaineksena, joka korvaa perinteisen hienoaineksen osuuden betonissa.

2.1.4 Lisäaineet

Lisäaineet ovat määrällisesti pieni osa betonimassan valmistuksessa, mutta silti erittäin tärkeä ainesosa (Haara, 2018, s. 60). Monet erityisbetonin vaativat betonilta tai betonimassalta ominaisuuksia, joita ei kyetä saavuttamaan ilman lisäaineita. Tällaisia betonimassoja ovat esimerkiksi korkealujuusbetonit (>C55/67), jossa betonin työstettävyyttä parannetaan tehonotkistimilla johtuen betonimassan erittäin pienestä vesi-sideainesuhteesta, sekä pakkasenkestävät betonit, jossa betonille asetettua ilmamäärää säädellään huokostimilla, jotka muodostavat suojuhuokosia betonimassaan.

Lisäaineiden standardin SFS-EN 934-2 mukainen luokitus on seuraavanlainen:

- notkistimet

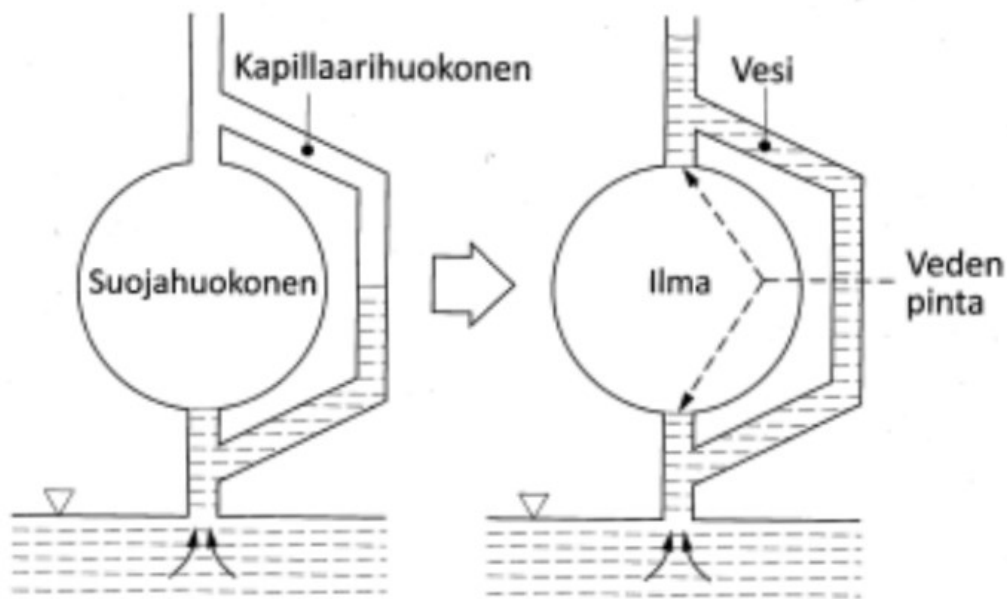
- sitoutumista hidastavat notkistimet
- sitoutumista kiihdyttävät notkistimet
- tehonotkistimet tai nesteyttimet
- sitoutumista hidastavat tehonotkistimet/nesteyttimet
- huokostimet
- sitoutumista nopeuttavat kiihdyttimet
- kovettumista nopeuttavat kiihdyttimet
- sitoutumista hidastavat hidastimet
- vedenerottumista vähentävät lisäaineet
- vedenimeytymistä estävät lisäaineet
- viskositeetin säätöaineet

2.2 Infrabetoni

Suomessa betoniset sillat valetaan betonista, joka on valmistettu Väyläviraston ohjeiden mukaisesti. Tätä betonia kutsutaan yleisemmin infrabetoniksi. Koska suomen ilmasto vaihtelee voimakkaasti vuodenaikojen mukaan, siltarakenteet altistuvat toistuvasti jäätymis- sulamis- sykleille. Tämän vuoksi siltarakentamisessa käytetty infrabetoni on erityistä P-lukubetonia, joka on suunniteltu kestäväksi näitä vaihtelevia sääolosuhteita sekä maantiestöön kohdistuvia suolarasituksia.

Infrabetonit voivat olla huokostettuja ($P > 0$) tai huokostamattomia betoneita ($P = 0$) (Väylävirasto (Väylä), 2020, s. 7). Huokostettu infrabetoni sisältää lisäaineita, jotka luovat erittäin pieniä suojuhuokosia, joiden tarkoitus on tasata sisäisiä jännitteitä betonissa, yhdessä matalan vesi-sementtisuhteen kanssa, tilanteessa missä rakenteen sisällä oleva vesi jäätyy. Kun vesi-sementtisuhte pidetään matalana ($< 0,60$), kapilaarihuokosverkko pysyy epäyhtenäisenä, joka myös parantaa betonin pakkaskestävyyden lisäksi lujuutta, säilyvyyttä ja sen läpäisemättömyyttä (Haara, 2018, s. 118). Kun infrabetonin kapilaarihuokosissa oleva vesi jäätyy, jääkiteiden muodostaman sisäisen paineen kasvu ei pääse rikkomaan rakenteita. Paine pääsee purkautumaan tyhjiin suojuhuokosiin (kuvio 3), jotka toimivat väliaikaisena puskurina. Jotta huokostettu betoni sisältäisi optimimäärän kooltaan vain 0,01–0,8 millimetriä olevia suojuhuokosia tulisi ilmamäärän olla tiivistämisen jälkeen noin 4–8 tilavuusprosenttia. Tämä varmistaa, että betoni kestää Suomen ankaria sääolosuhteita ja pystyy vastustamaan jäätymis-

sulamissykliä aiheuttamia vaurioita. Väyläviraston ohjeiden (Väylä, 2020) mukaan tavoiteilmamäärä on aina reseptikohtainen, jonka betonitehtaat ovat todentaneet tehdaskohtaisilla ennakkokokeilla. Jos infrabetonilta ei vaadita pakkasenkestävyyttä ($P=0$) ei betonia silloin huokosteta eikä sille ole silloin ilmamäärävaatimuksia (Väylä, 2020, s. 7). Muilta ominaisuuksiltaan huokostamattomat infrabetonit tulee täyttää samat vaatimukset kuin huokostetut infrabetonit.



Kuvio 3. Suojahuokosen toiminta (Haara, 2018, s.118).

2.2.1 P-lukubetoni

P-lukubetoni on betonilaatu, jonka jäätymis-sulamiskestävyys sekä suolarasituskestävyys pystytään todentamaan ilman valmiin rakenteen testausta (Mölsä, 2016, 2017). Menetelmän tavoitteena oli parantaa betonin pakkas- ja suolakestävyyttä. P-lukumenetelmä myös mahdollisti pakkassuolarasituksille alttiina olevien rakenteiden betonien kelpoisuuden osoittamisen tuoreesta betonista. Tämä tarkoittaa, että ilman P-lukumenetelmää, kelpoisuuden toteaminen tehtäisiin kohdekohtaisilla testeillä valmiista rakenteesta, jolloin toteamiskustannukset kasvaisivat ja sitä kautta siirtyisivät mahdollisesti urakkahintoihin. Pahimmillaan tilanne voisi olla että 2–3 kuukauden kuluttua, kun testitulokset valmistuvat ja pakkaskestävyys todettaisiin riittämättömäksi, urakoitsija joutuisi maksamaan arvonalennusta tilaajalle ja samalla kiinnostella kustannuksista betonin toimittajan kanssa.

P-lukubetoni kehitettiin 1980-luvulla sekä 1990-luvun alussa ja ensimmäinen ohjeistus julkaistiin vuonna 1991 SYL 3 - Sillanrakennuksen Yleiset Laatuvaatimukset, Osa 3 Betonirakenteet (Mantila, 2021, s. 66). Ohjeistusta on päivitetty tarpeen mukaan vastaamaan betoniteknologian kehitystä. P-lukujärjestelmän tarkoitus oli saada luotettava kuva betonin pakkasulamissykliä kestävydestä suoraan työmaalla tapahtuvien ilmamäärämittausten perusteella. Tämä kuitenkin edellyttää, että betonista on suoritettu standardien mukaiset ennakkokokeet betoniasemalla. Pitkäaikaisten tutkimusten perusteella P-lukubetoni on osoittautunut toimivaksi järjestelmäksi eikä 1.1.2021 voimaan astuneessa uusimmassa päivityksessä tullut muutoksia itse P-luvun laskentaperiaatteeseen. Päivityksen tarkoituksena oli selkeyttää ohjeistusta ja tuoda vaatimukset paremmin mitattaviksi.

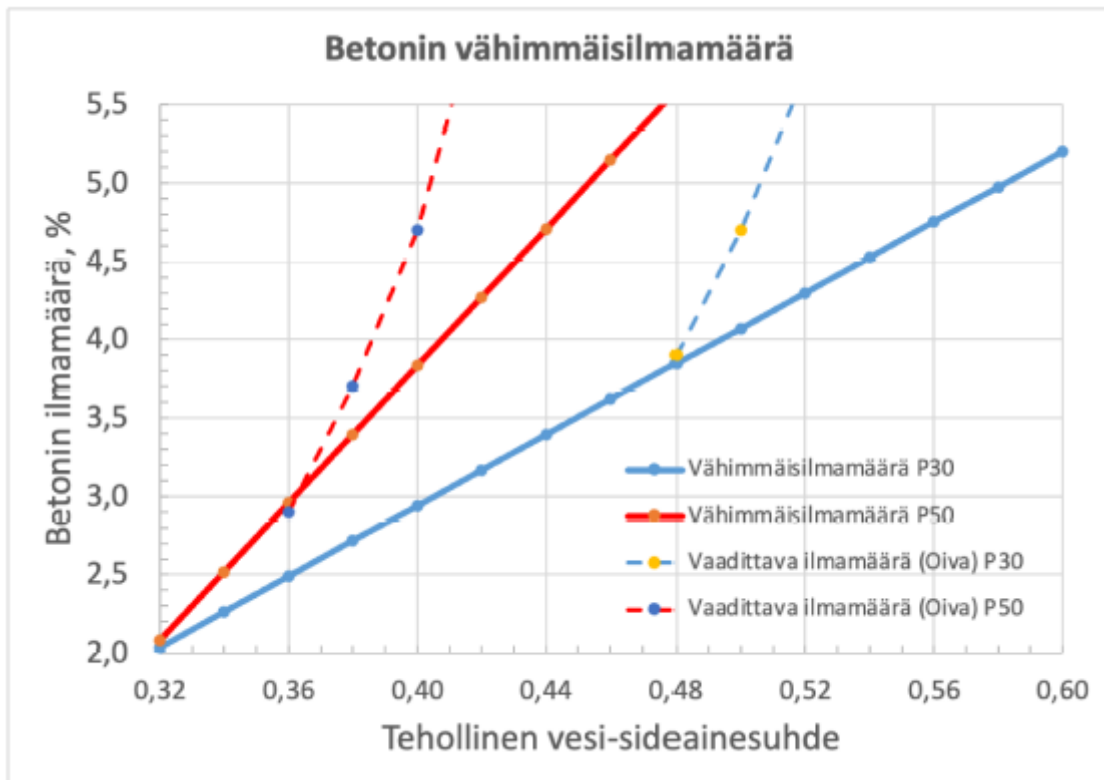
2.2.2 Infrabetonien valmistus

Infrabetonien suhteutus- ja valmistusprosessissa tulee käyttää standardin täyttäviä ainesosia, jotka tulee olla CE-merkittyjä, mikä takaa niiden vastaavuuden eurooppalaisten normien kanssa (Väylä, 2020, s. 7, 13). Väyläviraston ohje *Infrabetonien Valmistus* määrittää tarkat standardit ja prosessit betonin valmistuksesta, joilla varmistetaan betonin laatu ja kestävyys siltarakentamisessa. Näiden ohjeiden noudattaminen on tärkeää betonin valmistuksen jokaisessa vaiheessa, aina raaka-aineiden valinnasta, suhteutukseen ja betonin sekoitusprosessiin asti. Ohjeissa myös vaaditaan, että sitä noudatetaan kaikilla Väyläviraston alaisuuteen kuuluvilla tie-, rata- ja vesiväylillä, sekä valtion avustusta saavilla yksityisteillä, siltabetonirakentamisessa.

Infrabetonien Valmistus ohjeen vaatimusten mukaan kaikki osa-aineet pitää olla CE-merkittyjä lukuun ottamatta vesi (väylä, 2020, s. 14–16). Vaikka kyseinen ohje antaa melko vapaat kädet infrabetonien suhteutukseen, kunhan ennakkokokeilla saadut tulokset täyttävät vaaditut ominaisuudet lujuuden, säilyvyyden, vesi-sideainesuhteen, pakkasenkestävyyden ja työstettävyyden osalta. Suhteutukselle on tietenkin joitain rajoitteita, kuten betonin ilmamäärän, vesimäärän ja sideaineen kokonaismäärän osalta.

Ilmamäärä ei saa ohjeistuksen mukaan tuoreessa betonissa olla suurempi kuin 5,5 prosenttia, kun käytetyn kiviaineksen ylänimellisraja on 12 millimetriä tai suurempi (Väylä, 2020). Jos kiviaineksen ylänimellisraja on alle 12 millimetriä, lisätään betonin vähimmäisilmamäärän (kuvio 4) lukuarvoihin 1 prosenttiyksikkö. Väylävirasto ei kuitenkaan suosittele käytettäväksi P-

lukubetonia, jossa käytetyn kiviaineksen ylämääräraja on pienempi kuin 12 millimetriä. Vähimmäisilmamäärä ei voi olla korkeampi kuin 5,5 prosenttia. Suhteutuksessa kaikilla infrabetonilaaduilla, enimmäisilmamäärä on 5,5 prosenttia. Vaadittava ilmamäärä tarkistetaan aina tapauskohtaisesti kaavalla 1, kun tehollinen vesi-sideainesuhde on maksimissaan 0,60 ja vähimmäisilmamäärä on maksimissaan 5,5 prosenttia.



Kuvio 4. Tuoreen betonin vähimmäisilmamäärä kahdelle eri P-luvulle, kun kiviaineksen yläraja on ≥ 12 millimetriä kuvassa myös esitetty katkoviivalla vaadittava ilmamäärä tehollisen vesi-sementtisuhteen funktiona, kun käytetään Oiva-sementtiä (Väylä, 2020, s. 15).

P-lukulaskelman kaava vähimmäisilmamäärän laskentaan (Väylä, 2020, s. 15).

$$a = (0,529 * P - 4,560) * \left(\frac{Q_{vesi}}{Q_{sid}} \right) - 0,167 * P + 3,427 \quad (1)$$

Missä

P on pakkaskestävyysluku. Esimerkiksi P30 $\rightarrow P = 30$

$\frac{Q_{vesi}}{Q_{sid}}$ on tehollinen vesi-sideainesuhde

Vesimäärän tehollinen arvo suhteutuksessa ei saa ylittää $200 \text{ dm}^3 / \text{m}^3$, ja sideaineen kokonaismäärä pitää olla vähintään 300 kg/m^3 (Väylä, 2020, s.15–16). Mikäli betonin valmistaja lisää Portlandsementtiin masuunikuonaan siten, että kuonan osuus ylittää 35 prosenttia sideaineen kokonaismäärästä, tulee sideaineen vähimmäismäärä kasvattaa 350 kg/m^3 . Masuunikuonan osuus sideaineesta ei saa ylittää 50 prosenttia kokonaismäärästä. Poikkeuksena huokostamattomat betonit (C30/37 P0 ja C35/45 P0), joissa masuunikuonan osuus saa olla maksimissaan jopa 70 prosenttia sideaineen kokonaismäärästä. Tämä määrä sisältää sekä sementin sisältämän masuunikuonan että betonivalmistajan lisäämän masuunikuonan. Jos sideaineeseen lisätään muita seosaineita, vähennetään masuunikuonan määrää vastaavalla määrällä.

Sideaineen kokonaismäärästä saa silikajauhetta olla enintään 5 prosenttia, kun vesi-sideainesuhde on suurempi kuin 0,35 (Väylä, 2020, s. 16). Vesi-sideainesuhteen ollessa alle 0,35 saa silikajauhetta olla sideaineen kokonaismäärästä 7 prosenttia. Lentotuhkaa saa vastavasti olla maksimissaan 25 prosenttia sideaineen kokonaismäärästä. Tämä määrä sisältää sekä sementin sisältämän lentotuhkan kuin betonin valmistajan lisäämän lentotuhkan.

Tuoreen infrabetonin suhteutukselta vaadittavat vaatimusten edellä mainittujen lisäksi (Väylä, 2020, s. 16) ovat:

- Käytettäessä kiviainesta, jonka ylänimellisraja on < 12 millimetriä, tulee käytöllä olla Väyläviraston erillinen hyväksyntä sekä tehtävä omat ennakkokokeet (tehdaskohdainten lisäksi saattaa vaatia myös kohdekohtaiset).
- Jos betonille on asetettu vähimmäisilmamäärävaatimus, tulee betonin valmistuksessa käyttää huokostinta.
- Suhteutuksessa tulee huomioida kiviaineksen vedenimuprosentti (absorptio).
- Suhteutustiedot tulee tallentaa laadunvalvonnan varmistamiseksi. Tallennettavia tietoja ovat P-lukulaskelmat, reseptissä käytettävien raaka-aineiden suoritustasoilmoitukset, suhteutusmäärät sekä muut laatuerittelyt.

Betonin sekoitusaika määritellään betonilaatukohtaisesti vähimmäissekoitusaikana, jolla myös betonin valmistaja tekee ennakkokokeet (Väylä, 2020, s. 17). Sekoitusaika tulkitaan alkavaksi, kun kaikki betonin osa-aineet ovat lisätty sekoittimeen ja päättyväksi, kun purku aloitetaan sekoittimesta. Sekoitusaika huokostetulla betonilla tulee olla minimissään 90 sekuntia.

2.2.3 Ennakkokokeet

InfraRYL 42020 ohjeen vaatimusten mukaan Infrabetonit valmistetaan julkaisun *Infrabetonien valmistus* ohjeen mukaisesti ja betoniasemalla tulee olla hyväksytysti suoritettut ennakkokokeet voimassa vähintään viikkoa ennen rakenteen betonointia (Rakennustieto, 2023).

Infrabetonista tehtävien ennakkokokeiden tarkoitus on varmistaa betonilaatujen ominaisuudet kuten valettavuus, puristuslujuus ja pakkaskestävyys ennen kuin kyseisellä betonilaadulla valetaan (Väylä, 2020, s. 18). Ennakkokokeet ovat kaksitasoisia, jotka ovat:

1. Tehdaskohtaiset ennakkokokeet
2. Kohdekohtaiset ennakkokokeet

Tehdaskohtaisten ennakkokokeiden voimassaolovastuu on betonitehtailla, mikä takaa, että heiltä voidaan tilata kyseisiä infrabetonilaatuja ja varmistua samalla kyseisen infrabetonin ominaisuuksien paikkaansa pitävyydestä (Väylä, 2020, s. 18). Tehdaskohtaiset ennakkokokeet ovat voimassa kaksi vuotta vain, kyseisen kokeen suorittaneella tehtaalla. Näin ollen tuloksilla ei voida todentaa saman valmistajan eri tehtaissa valmistettuja infralaatuja, vaikka resepti olisi täysin identtinen. Tehdaskohtaiset ennakkokokeet tulisi tehdä Väyläviraston ehdotamille infralaaduille (taulukko 3). Valmistajan ei kuitenkaan tarvitse tehdä ennakkokokeita jokaiselle taulukon 3 betonilaadulle vaan voi itse valita testattavat betonilaadut. Valmistaja ei kuitenkaan voi toimittaa kuin niitä betonilaatuja, joilla on voimassa ennakkokokeet. Väyläviraston 41/2020 antamassa ohjeistuksessa on suositeltu, että käytettävien infrabetonilaatujen määrä olisi yleisesti kuusi, jotta laadunvarmistusta voidaan yksinkertaistaa ja parantaa (mts. 10).

Taulukko 3. Käyttöön suositeltavat infrabetonilaadut (Väylä, 2020, s. 10).

Infrabetonilaatu
C30/37 P0
C30/37 P30
C35/45 P0
C35/45 P30
C35/45 P50
C45/55 P50

Mikäli tilataan taulukon 3 listalta poikkeavaa laatua, jonka lujuusluokka on korkeintaan C45/55 tai P-luku on alle P50, voi betoniasema korvata sen taulukon 3 mukaisella infrabetonilaadulla siten, että joko lujuusluokkaa tai P-lukua kasvatetaan (Väylä, 2020, s. 10). Betonilaadun korvaamisella tämän ohjeen mukaisesti tulee kuitenkin sopia betonin tilaajan kanssa. Jos tilattavan betonilaadun lujuus ylittää edellä mainitut C45/55, tai P-luku on suurempi kuin P50, tulee kyseisestä betonilaadusta valmistaa kaikki taulukon 4 sarakkeen 1 mukaiset ennakkokokeet. Kaikilla betoniaseman tarjoamilla infrabetonilaaduilla tulee taulukon 4 mukaiset olla voimassa tehdaskohtaiset ennakkokokeet, jotta niitä voidaan toimittaa (mts. 19). Ennakkokokeissa testataan betonista puristuslujuutta, tiheyttä, ilmamäärää, ilmamääräpotentiaalia, notkeutta, pakkassuolakestävyyttä sekä kiviainesten kosteuspitoisuutta. Betonilaadut, jossa P-luku on 0, ei tarvitse tehdä ennakkokokeita ilmamääräpotentiaalini, ilmamäärän eikä pakkassuolakestävyyden osalta (taulukko 4).

Taulukko 4. Ennakkokokeiden testejä betonilaadittain (Väylä, 2020, s. 18).

Infrabetonilaadut	Sarake 1 C30/37 P30, C35/45 P30, C35/45 P50, C45/55 P50	Sarake 2 C30/37 P0, C35/45 P0
Puristuslujuus valetuin koekappalein	Yhteensä 9 koekappaletta kolmesta kypsyysistä (7, 28 ja 91 vrk.) á 3 koekappaletta	
Tiheys	Tiheys määritellään tuoreesta massasta ja kaikista valetuista koekappaleista	
Ilmamäärä	3 ilmamäärämittausta (eri ajanhetkinä)	Ei tehdä
Ilmamääräpotentiaali	Ilmamäärämittaus välittömästi vähimmäissekoitusajan ja 6 min sekoituksen jälkeen	Ei tehdä
Notkeuden mittaus	3 kpl notkeuden mittauksia: välittömästi sekoittamisen jälkeen, 60 min sekoituksen alkamisen jälkeen sekä notkistimen lisäyksen jälkeen.	
Pakkassuolakestävyys CEN/TS 12390-9	4 kpl 150 mm kuutiota. Tehdään normaalitilanteessa betonilaaduilla C30/37 P30 ja C35/45 P50 ja tarvittaessa muilla betonilaaduilla.	Ei tehdä
Kiviaineksen kosteuspiitoisuus	Määritetään kaikista kiviaineslajeista.	

Kohdekohtaiset ennakkokokeet vaaditaan tehdaskohtaisten rinnalle, kun kyseessä on erityisen vaativia rakenteita (Väylä, 2020, s. 27). Ehdotuksen kohdekohtaisista ennakkokokeista tekee suunnittelija, mutta päätös ja ennakkokokeiden laajuus ovat viimekädessä väyläviraston edustajan päätettävissä.

Erityisen vaativia rakenteita ovat muun muassa:

- Vaikeasti valettavat rakenteet
- Erottumisherhät betonit
- Betoni, jonka lujuusluokka on suurempi kuin C45/55 tai P-luku on suurempi kuin P50.

Rakenteet, jotka ovat raudoitettu erityisen tiheään voidaan pitää vaikeasti valettavana, jolloin betonin valettavuus tulee varmistaa ennakkoon yhteistyössä urakoitsijan ja betonin valmistajan kanssa, eikä ne kuulu betonitehtaan tuotesertifiointiin piiriin (Väylä, 2020, s. 27). Erottumisherhänä betonina pidetään erityisen notkeita, huokostettuja betoneita, joiden kiviaineksen maksimiraekoko on alle 12 millimetriä.

Kohdekohtaisilla ennakkokokeilla on tarkoitus simuloida mahdollisimman samankaltaista rakennetta kuin mitä lopullinen varsinainen rakenne olisi (Väylä, 2020, s. 20). Esimerkiksi pystyrakenteilla koevalukappale tulisi olla vähintään 900 millimetriä korkea, joka vastaa tyypillisesti huokostetun betonin kolmen valukerroksen paksuista valua. Seinämäisen rakenteen koekappale tulisi olla minimissään 1200 millimetriä pitkä. Vaakarakenne koekappale tulisi olla vähintään pinta-alaltaan 1200 x 1200 millimetriä ja korkeuden puolesta vastaava kuin lopullinen rakenne. Käytettävä betoni tulisi olla mahdollisimman samankaltainen kaikilta osin kuin mitä lopullinen käytettävä betonilaatu tulisi olemaan. Tilanteessa, missä valettavia betonilaatuja on notkeuden suhteen useita, testataan ainoastaan notkein betonilaatu. Betonin valmistajalla tulee olla voimassa, kohdekohtaista ennakkokoea tehdessä, tehdaskohtainen ennakkokoe kyseisestä valettavasta betonilaadusta.

2.2.4 Kelpoisuuden osoittaminen

P-lukumenetelmä mahdollistaa rakenteiden kelpoisuuden toteamisen P-luvun ja puristuslujuusluokan yhdistelmällä, myös ilman rakenteesta porattavia rakennekoekappaleita (Väylä, 2020, s. 33). Tällöin valetun infrabetonilaadun ennakkokokeet tulee olla voimassa rakenteen valamisen aikana. Tästä huolimatta InfraRYL ohjeiden mukaan työmailla ja betoniasemilla tulee tehdä puristuslujuuden tunnistetestausta.

P-luku määritetään betonointikohteella jokaisesta tehdystä ilmamäärämittauksesta, suhteutustietojen perusteella, kuten kaavassa 2 (Rakennustieto, 2023; Väylä, 2020, s. 35–37). Betonin valmistajan velvollisuus on toimittaa suhteutustiedot aineosamäärinä, joiden avulla urakoitsija laskee P-luvun. Jos urakoitsija on valtuuttanut kolmannen osapuolen tekemään ilmamäärämittaukset, saa tämä osapuoli myös tehdä P-lukulaskennan. Tällöin suhteutustietoja ei tarvitse toimittaa urakoitsijalla. Betonin valmistaja toimittaa silloin suhteutustiedot suoraan Väyläviraston Taitorakennerekisteriin.

P-luvun määrittely suhteutustietojen, jälkihoidon ja työmaalla mitattujen ilmamäärien perusteella kaavan 2 avulla (Väylä, 2020, s. 35–36).

$$P = \frac{46 \cdot k_{jh} \cdot k_{sid}}{\frac{10 \cdot (WAS)^{1.2}}{\sqrt{a}} - 1} \quad (2)$$

jossa

- k_{jh} on jälkihoitotekijä (kaava 2)
 k_{sid} on sideainetekijä (kaava 3)
 WAS on redusoitu vesi-ilmasideainesuhde (kaava 4)
 a on ilmamäärä [%]

$$k_{jH} = 0,85 + 0,17 \cdot \text{LOG}_{10}(T_{jh}) \quad (3)$$

jossa

- T_{jh} on jälkihoitoaika [vrk]

$$k_{sid} = 1 - \left(\frac{Q_{vesi}}{Q_{sid}} \right)^{1,5} \cdot (0,05 \cdot sil + 0,02 \cdot kuona + 0,01 \cdot lt) \quad (4)$$

jossa

- sil on silikan osuus sideaineen kokonaismäärästä [%]
 kuona on masuunikuonan osuus sideaineen kokonaismäärästä [%]
 lt on lentotuhkan osuus sideaineen kokonaismäärästä [%]
 Q_{vesi} on tehollinen vesimäärä [kg/m^3]
 Q_{sid} on tehollinen sideaineen kokonaismäärä [kg/m^3]

$$Q_{sid} = Q_{sem} + 2,0 \cdot Q_{sil} + 0,8 \cdot Q_{kuona} + 0,4 \cdot Q_{lt} \quad (5)$$

jossa

- Q_{sem} on tehollinen sementtimäärä [kg/m^3] (Portlandsementillä (CEM I) k_a on 1)
 Q_{sil} on lisätyn silikajauheen määrä [kg/m^3]
 Q_{kuona} on lisätyn masuunikuonan määrä [kg/m^3]
 Q_{lt} on lisätyn lentotuhkan määrä [kg/m^3]

$$WAS = \frac{Q_{vesi} + 10 \cdot (a - 2)}{Q_{sid}} \quad (6)$$

InfraRYLlin mukaan tunnistetestausta varten betoniasemalla tehtävien kohdekohtaisten koevalukappaleiden lisäksi, työmaalla tulee myös valmistaa lieriön muotoiset koekappaleet, joiden nimellishalkaisija on 150 millimetriä, sekä nimelliskorkeus 300 on millimetriä (Rakennustieto, 2023). Työmaalla tehtävien koekappaleiden tunnistetestausta tulee suorittaa standardin SFS-EN 206 liitteen B menettelyä noudattaen. Kyseisen standardin liite velvoittaa noudattamaan tarkkoja ohjeita ja standardeja niin näytteenotosta, koekappaleiden valmistuksesta ja puristuslujuuden määrittämisestä (EN-12350-1, EN-12390-2 ja EN-12390-3). Näiden lisäksi tulee betonin puristuslujuuden tunnistustestauksessa noudattaa InfraRYLlin täydennyksiä, joita (Rakennustieto, 2023) ovat:

- Puristuslujuuden tunnistusehdot (taulukko 5)
- Ohjeet työmaalla valettavien koekappaleiden valmistuksesta (InfraRYL 42020.1.1.5)
- Koekappaleiden valmistajan pätevyys vaatimukset (InfraRYL 42020.1.1.5)
- Arvosteluerää kohden otettavat näytteet rakennuspaikalta (6 kpl ellei betonoitava määrä ole alle 12m³ ja kun betoni toimitetaan yhdellä kuormalla, tällöin otetaan 3 näytettä)
- Näytteiden ottamisen tulee jakautua tasaisesti betonikuormien, valukertojen ja betoniasemien kesken
- Betoninäytteestä valmistetaan kaksi tai useampi koekappale. Betoninäytteestä otettujen lujuustulos on samasta näytteestä otettujen koekappaleiden keskiarvo. Jos yksittäisen koekappaleen tulos poikkeaa yli 15 % saman ryhmän testiarvon keskiarvosta, kaikki saman näytteen koekappaleet hylätään, ellei ole perusteltua hylätä yksittäistä puristusjuustulosta

Taulukko 5. Puristuslujuuden tunnistusehdot (Rakennustieto, 2023).

Arvosteluerän betoni- näytteiden lukumäärä n	Ehto 1	Ehto 2
	Betoninäytteen lujuustulosten keskiarvo	Yksittäisen betoninäytteen testitulos
2..4	$\geq f_{ck} + 1 \text{ MPa}$	$\geq f_{ck} - 4 \text{ MPa}$
5..6	$\geq f_{ck} + 2 \text{ MPa}$	$\geq f_{ck} - 4 \text{ MPa}$

Jos suhteutustietojen ja työmaalla mitattujen ilmamäärätietojen perusteella ei P-lukuarvo saavuta suunniteltua arvoa tai betonin arvostelueristä valmistettujen koekappaleiden

puristuslujuus ei saavuta tunnistetestauksessa suunnitelmien lujuusarvoa, tulee betonin kelpoisuuden osoittamiseksi tehdä lisätutkimuksia (Rakennustieto, 2023). Täydentävät lisätutkimukset käytännössä tarkoittavat rakenteesta porattavia näytteitä, joista joko tehdään puristuslujuuden testaus InfraRYLin 42020.1.1.6.1 vaatimusten mukaisesti, tai teknisen spesifikaation CEN/TS 12390-9 mukainen 56-kierroksen pakkassuolakoe laattatestinä, tai molemmat testit yhdessä. Rakenteista porattavien koekappaleiden puristuslujuus lasketaan kaavan 7 perusteella ja suoran pakkassuolakokeen P-luku lasketaan kaavan 8 perusteella

$$f_{ci,cyl(28d\backslash 91d)} = X_{(t)} \cdot f_{ci,cyl(t)} \quad (7)$$

jossa

$f_{ci,cyl(28d\backslash 91d)}$ on ikäkorjattu (28 d tai 91 d) puristuslujuus

$f_{ci,cyl(t)}$ on ajanhetkellä (t) mitattu puristuslujuus

$X_{(t)}$ on testausiästä ja laadunvarmistusiästä riippuva korjauskerroin, joka saadaan taulukosta 6. Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti

$$P = k_{sid} \cdot \frac{3000}{(m_{56})^{0,74}} \quad (8)$$

jossa

k_{sid} on sideainekerroin (kaava 3)

m_{56} on standardin CEN/TS 12390-9 mukaisen 56 kierroksen pakkassuolakokeen rapautuma [g/m²]

Taulukko 6. Testausiästä riippuva puristuslujuuden korjauskerroin $X(t)$ (Rakennustieto, 2023).

Testausikä t	Korjauskerroin $X_{(t)}$	
	Laadunvarmistusikä 28 vrk	Laadunvarmistusikä 91 vrk
28 vrk	1,00	-
56 vrk	0,93	-
91 vrk	0,89	1,00
1 v	0,83	0,93
2 v	0,82	0,92
≥ 5 v	0,80	0,90

2.2.5 Laadunvalvonta

Väyläviraston vaatimusten mukaan betoniasemilla tulee olla tuotesertifiointi, joka varmistaa, että laadunvalvonnassa noudatetaan valmisbetonin valmistusta koskevia vaatimuksia By65 Betoninormit, SFS-EN 206 ja SFS 7022 sekä Väyläviraston Infrabetonien Valmistus ohjetta (Väylä, 2020, s. 12). Jos sertifioija havaitsee infrabetonien laadunvalvonnassa vakavia poikkeamia, on nämä saatettava Väyläviraston tietoon. Työmaalla tapahtuvassa laadunvalvonnassa noudatetaan laadunvarmistuksen ja betonirakenteiden kelpoisuuden osalta InfraRYLin vaatimuksia.

3 BETONOINTIPROSESSI SILTATYÖMAILLA

3.1 Yleistä

Uudet betoniset sillat suomessa suunnitellaan kestäväksi 100 vuotta (RIL, 2018, s 379). Pelkällä suunnittelulla tätä ei saavuteta vaan sillan koko eliniän ajan, silloilla täytyy olla huolto ja ylläpito. Edellä mainittuja asioita väheksymättä, sillan betonilla ja betonoinnin onnistumisella on myös suuri merkitys sillan käyttöikänsä (mts. 326). Suomessa siltojen suunnittelussa noudatetaan Väyläviraston eurokoodien mukaisia ohjeita ja määräyksiä (mts. 131). Betonoinnissa noudatetaan InfraRYL ja Väyläviraston ohjeiden lisäksi yleisiä työturvallisuutta koskevia ohjeita ja normeja sekä mahdollisia työkohtaisia erillishojeita (Rakennustieto, 2023).

3.2 Valmisbetonin tilaus

Suomessa lähes aina, valettava betoni tulee kiinteältä valmisbetonitehtaalta (Suomen betoni-yhdistys, 2019, s. 135). Ainoastaan suurissa betonointi projekteissa, kuten ydinvoimaloissa, voi olla tilapäinen betonitehdas, jonka tarkoitus on palvella ainoastaan tätä kyseistä projektia. Betonitehtaiden valmistuskapasiteetti normaaleilla betonilaaduilla on tyypillisesti 20–120 m³/h. Valmistuskapasiteettiin vaikuttaa huomattavasti käytössä oleva kuljetuskaluston määrä tai valmistettava erikoislaatuinen betoni. Toimituskapasiteettiin vaikuttaa nimenomaan betonoinnin syklistyys valun edetessä, joka vaikeuttaa kuljetusten optimointia. Lisäksi kesken valun toteutuneet betonin toimitusvaraukset, sotkevat helposti ennakkosuunniteltua toimitusta. Toimitusvaraukset ovat avoimia tilauksia, jotka tilataan esimerkiksi puhelimitse. Tällaisia tilauksia sillan kansilaatan valuissa ovat nimenomaan reunapalkkikuormat, missä betonilaatu sekä tilattava määrä on useasti erilainen kuin muun kannen osalla.

Yleisesti ottaen betonia tilatessa tulee ilmoittaa seuraavia tietoja:

- Työmaan tarkka osoite, yhteyshenkilö ja hänen puhelinnumerosa
- Tilaajan nimi, osoite ja puhelinnumero
- Laskutustiedot
- betonin määrä (m³)
- Betonin laatu ja suunnitellut ominaisuudet (lujuusluokka, rasitusluokka, maksimiraekoko, notkeus)

- Valukohde, erityisvaatimukset
- Toimitusten alkamisaika
- Toimitusnopeus m³/h ja tiedossa olevat valutauot
- Purkausaika
- Purkaustapa (yleensä purkaus pumppuun, tai erittäin pienissä valuissa suoraan muottiin)
- Kuljetuskalusto (lähes poikkeuksetta säiliöauto)

Infrabetonia tilatessa ei ilmoiteta rasitusluokkaa, ellei kyseessä ole kemialliselle rasitukselle alttiina olevat rakenneosat esimerkiksi sulfaattirasitukselle, jotka merkitään XA rasitusluokilla (Väylävirasto, 2020, s. 11). Tällöin merkintä on esimerkiksi C30/37 P30 XA1. Betonin valmistajan on otettava tällöin huomioon standardissa SFS-EN 7022 esitetyt vaatimukset sideaineen koostumukselle, vesisementtisuhteelle ja puristuslujuudelle.

3.3 Betonointiin valmistautuminen

Siltarakenteiden betonointiin tulee valmistautua huolella. Työn suunnittelun tulee sisältää InfraRYL 42020 ohjeistuksen mukaan standardin SFS 5975 perustuvan betonityösuunnitelman ja kohde tai valukohtaisen betonointisuunnitelman, jotka sisältävät vähintään taulukossa 7 esitetyt asiat (Rakennustieto, 2023).

Betonointityösuunnitelman laadinta on osa betonityöjohtajan työtä (Suomen Betoniyhdistys, 2021, s. 56). Suunnitelma laaditaan tiiviissä yhteistyössä rakennesuunnittelijan, muotti- ja telinetoimittajan, betonitoimittajan sekä työkonttien ja työmaan muiden työjohtajien kanssa ja sitä tarvittaessa muutetaan. Betonointityösuunnitelmaa voidaan tarkentaa aina ennen seuraavan rakenneosan betonointia, vaikka jokaisesta betonoitavasta rakenneosasta laaditaan vielä erillinen tarkempi betonointisuunnitelma. Betonointityösuunnitelman muotoa ei ole määritelty tarkasti, joten jokaiselle yritykselle on muotoutunut oma lomaketyylinen mallipohja suunnitelmasta. Valmiin lomakkeen etuna on, että se toimii myös työsuunnittelun aikana muisti- ja tarkistuslistana monille huomioitaville asioille. Hyvässä betonityösuunnitelmassa on tärkeintä, jotta se on tarpeeksi yksityiskohtainen ja helposti ymmärrettävä dokumentti, johon on koottu aineisto urakka-asiakirjoista ja muista dokumenteista, joita suunnittelun alussa on käyty lävitse. Betonointityösuunnitelma tulee hyväksyttävä valvojalla ja rakennesuunnittelijalla ennen sen toteuttamista.

Taulukko 7. Työmaan betonityösuunnitelman ja valukohtaisen betonointisuunnitelman runko (Rakennustieto, 2023).

Sisältö	Työmaan betonointisuunnitelma	Valukohtainen betonointisuunnitelma
Kohteen tiedot	Kerrotaan työmaan yleistiedot (tunnistetiedot, aluesuunnitelma, betonityösuunnitelman laatijan nimi ja päivämäärä). Kohdassa voidaan viitata tarkentavana tietona toiseen työmaan asiakirjaan.	Betonointikohteen ja betonityön kuvaus (esim. rakenteen massiivisuus ja liittyvät rakenteet).
Organisaatio	Kirjataan betonoitaviin kohteisiin liittyvä organisaatio ja heidän pätevyytensä (tilaaja, suunnittelija, valvoja, pääurakoitsijan henkilöt, aliurakoitsijat, raudoite- ja betonitoimittaja, laadunvarmistus, turvallisuus).	<ul style="list-style-type: none"> • Vastaava työnjohtaja • Työvuorot • Työryhmät ja niiden tehtävät • Varahenkilöt.
Aikataulu	Kerrotaan työmaan yleisaikataulu. Kohdassa voidaan viitata tarkentavana tietona toiseen työmaan asiakirjaan.	<ul style="list-style-type: none"> • Lähtötiedot (esim. muotien ja työsaumapintojen puhdistamisen sekä muiden valmistelutöiden vaatima aika, sallitut nousu- ja kiertonopeudet, laskeutumistauot, muut suunnitellut tauot, työsauman rakentamisen sekä pinnan suojauksen vaatima aika) • Betonointinopeudet rakenneosittain • Betonimassan toimitusaikataulu • Työaikataulu.
Betonirakenteet ja niiden laatuvaatimukset	<ul style="list-style-type: none"> • Luetellaan kaikki työmaan betonoitavat rakenteet ja käytettävät betonilaadut (lujuusluokka ja mahdollinen P-luku). • Määritellään valut, joista pidetään betonoinnin aloituskokoukset. • Kuvataan betonin saataavuuden varmistaminen esim. voimassa olevat ja tarvittavat ennakkokokeet. 	<ul style="list-style-type: none"> • Valussa käytettävien betonien perustiedot. • Betonille asetetut erityisvaatimukset (esim. jäähdytys/lämmitys). • Työskentelyolosuhteiden asettamat vaatimukset (esim. varautuminen kuivan, lämpimän ja tuulisen sään varalta, vedenalainen betonointi).

<p>Betonin lämpötilan ja lujuudenkehityksen hallinta</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kerrotaan betonin lämpötilan ja lujuudenkehityksen hallintasuunnitelman tekijä. • Yksilöidään lämpötilan kannalta riskirakenteet (esim. betonin laatu, massiivinen rakenne, vuodenaika, mahdollinen jäähdytys- tai lämmitystarve). • Huomioitavat kohdat InfraRYL 42020.3.5 (Korkeat kovettumisen aikaiset lämpötilat ja lämpötilaerot) ja InfraRYL 42020.3.6 (Betonointi kylmällä säällä). 	<ul style="list-style-type: none"> • Rakenteen kovettumisaikeisten lämpötilojen hallinta (mm. maksimilämpötila, lämpötilaerot (vrt. InfraRYL 42020.3.5)). • Lujuudenkehityksen suunnittelu tavoitteisiin verrattuna. • Toimenpiteet halkeilun rajoittamiseksi. • Toimenpiteet halkeilun rajoittamiseksi liittyen olemassa oleviin rakenteisiin. • Varautuminen kylmän sään varalta (vrt. InfraRYL 42020.3.6). • Vedenalaisen betonoinnin vaatimukset (vrt. InfraRYL 42020.3.7). • Liikenteen tärinäarvojen huomioon ottaminen (junaliikenne InfraRYL 42020: Liite R1, taulukko 41113:LR1, T1, Tieliikenne SILKO 1.231 kohta 2.2).
<p>Teline- ja muottityöt</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kerrotaan muotti- ja telinesuunnitelmien tekijä ja mitä järjestelmiä käytetään. • Kuvataan muottitöiden erityisvaatimukset esim. muottipinnan laatu ja muotin tiiviys. • Luetellaan rakenteet, joista tarvitaan muottien purkusuunnitelmat. • Huomioitava InfraRYL 42020.3.2 (Telineet ja muotit) 	

Raudoitus- ja jännitystyöt	<ul style="list-style-type: none"> • Kerrotaan raudoitustyösuunnitelmien tekijä. • Kerrotaan jännittämistyösuunnitelmien tekijä sekä mitä jännittämismenetelmää käytetään ja asennustapa. • Kuvataan mahdolliset erityisvaatimukset raudoitus ja jännityksille • Huomioidaan InfraRYL • Huomioidaan InfraRYL 42020.3.3 (Raudoitustyö) ja 42020.3.9 (Jännittämistyö). 	
Liikunta- ja työsaumat	Kerrotaan, tuleeko liikunta- ja työsaumojia.	Kuvataan saumojen sijainti, niiden laatuvaatimukset ja tarkastukset sekä työsaumojen jälkikäsittely.
Betonointityö	<ul style="list-style-type: none"> • Esitetään mallipohja työmaalla käytettävästä kohde/valukohtaisesta betonointisuunnitelmasta tai luetellaan asiat, jotka betonointisuunnitelmassa esitetään. • Kerrotaan, kuka betonointisuunnitelmat ja -pöytäkirjat laatii ja miten ne luovutetaan tilaajan edustajalle. 	<ul style="list-style-type: none"> • Käytettävissä oleva kalusto ja tekniikat. • Massan siirto betonointikohteeseen. • Tiivistys. • Jälkitärytys ja sen ajankohta, huomioon ottaen käytettävät lisäaineet. • Mahdollisten raudoitteiden ja/tai tartuntojen asentaminen valun aikana. • Varautuminen häiriöihin.

<p>Betonin jälkihoito ja muottien purkaminen</p>	<p>Kerrotaan, kuka vastaa betonin jälkihoidosta ja muottien purkamisesta.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kuvataan rakenneosittain, miten jälkihoito toteutetaan (menetelmät, materiaalit, aineet, kesto). • Halkeilun rajoittamistoimenpiteet betonin kypsymisen varhaisvaiheessa ja sitoutumisen ja kovettumisen aikana. • Jäätymisen estämisen toimenpiteet. • Varhaisvaiheen jälkihoitoaineen käyttö. • Hierto. • Jälkihoitoaineen käyttö tai muu jälkihoito- ja suojaustoimenpide (esim. veden käyttö). • Kuvataan, milloin muotit voidaan purkaa.
--	---	---

3.4 Betonointi

Sillan betonointi toteutetaan InfraRYLLin vaatimusten ja ohjeiden mukaisesti Infrabetonilla, joka on valmistettu Väyläviraston standardien ja ohjeiden mukaan (Rakennustieto, 2023).

Sillan kannen betonointi suoritetaan lähes poikkeuksetta aina pumppuvaluna (RIL, 2018, s. 326). Sillan koon mukaan valu voidaan suorittaa yhdellä tai usealla betonipumpulla, joiden ulottuman voi olla yli 60 metriä. Betonipumppuautojen ulottuman kasvu teknologisen kehityksen myötä on helpottanut selkeästi betonoinnin suunnittelua ja toteutusta.

Sillan kanteen suunniteltu betonilaatu on yleensä luokkaa C35/45 P30 (RIL, 2018, S. 326). Merkintätapa ilmaisee betonilaadun ominaispuristuslujuuden lieriömäiselle ja kuutiomaiselle kappaleelle, sekä betonin pakkas-suolarasituksen kestävyysluokan. Betonimassan runkoaines on yleensä raekooltaan maksimissaan 16 millimetriä ja notkeus luokkaa S3. Sillan betonoinnissa voidaan käyttää pienempää raekokoa sekä notkeampaa massaa, jos raudoituksen koon tai määrän vuoksi on syytä epäillä betonoinnin onnistumista. Tällöin ilman betonin notkeuden ja raekoon muuttamista ei betonointia kyettä toteuttamaan siten että betoni täyttäisi muotin sekä

ympäröisi raudoitteen täydellisesti. Valunopeus määräytyy valettavan kohteen, pumppuautojen ja työryhmien määrän mukaan. Tyypillisenä valunopeutena voidaan pitää 25–35 m³/h/pumppu. Kuitenkaan pelkällä pumppuautojen määrän lisäämisellä ei betonointia kyetä nopeuttamaan.

Valu alkaa tyypillisesti aloittavan pään päätypalkin ja siipimuurien betonoinnilla kerroksittain siten, ettei nousunopeus ylitä 300 mm/h (Rakennustieto, 2023). Betonimassan pinnan saavutettua kannen alapinnan, tulee tarvittaessa pitää valutauko ja suorittaa betonin jälkitärytys ennen betonoinnin jatkamista. Betonointi kannen osalla suoritetaan kaistoina, joiden paksuus on 250...400 millimetriä ja leveys 1,8...3,6 metriä. Kaistojen leveys ja paksuus määräytyy muotin mittasuhteiden ja vallitsevien olosuhteiden mukaan niin, ettei edellinen kerroksen betonimassa ole ehtinyt sitoutumaan, ennen seuraavan kerroksen betonointia. Valukerroksen ylemmän kerroksen reunan etäisyys, alempaan kerrokseen tulisi olla 1,2...1,5 metriä, jotta rintausta ei liiku, kun alemmaa kaistaa tärytetään. Lopettavan pään päätypalkin betonoinnin tulee aloittaa, jotta kannen osan betonoinnin yhdistyminen päätypalkkiin osuu ajallisesti siihen, että lopettavan pään osalla on jo suoritettu tarpeellinen valutauko ja jälkitärytys. Reunapalkkien betonointi seuraa kannen pinnan valmistumista ja alkaa aloittavan pään siipimuurien osalta. Siipimuurit jälkitärytetään ennen reunapalkin valun aloittamista. Reunapalkkien betonoinnissa huomioidaan mahdollinen betonilaadun muutos verrattuna kansirakenteen betoniin. Tämä yleensä tarkoittaa betonin P-luvun nostoa (P30 → P50), jolloin reunapalkille toimitettu betoni tulee niin sanottuna soittokuormana. Reunapalkin betonointi eroaa hieman eri valuporukkojen välillä, heidän tottumuksien mukaan, mutta yleisesti kannen osalle muodostetaan vastavalu reunapalkin sisäsiivun osalle, joka annetaan hieman sitoutua ennen reunapalkin betonointia (kuva 1).



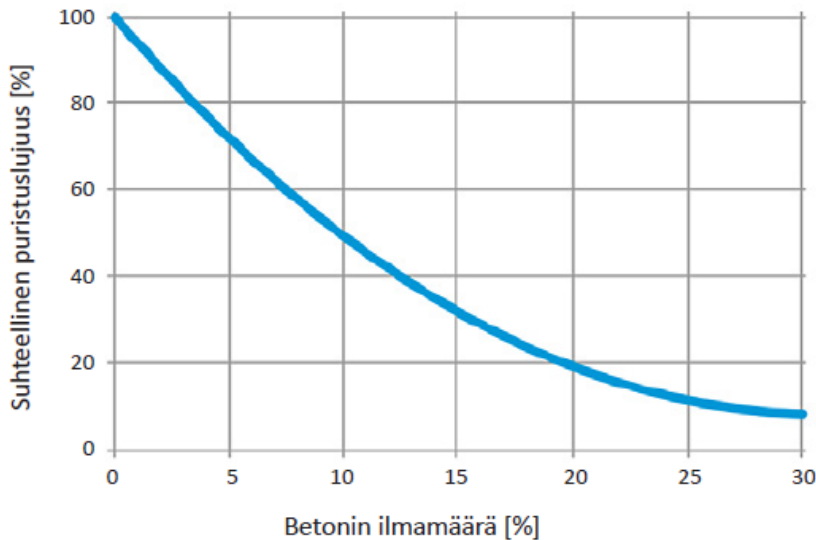
Kuva 1. Teräsbetonisen ulokelaattasillan (Bul) reunapalkin vastavalu (Lakso, 2023).

3.5 Betonin tiivistäminen

Betonia tiivistetään, jotta se saadaan täyttämään muotti ja ympäröimään raudoitus täydellisesti (Suomen Betoniyhdistys, 2020, s. 7). Tiivistämisessä myös poistetaan betonin valmistuksessa, kuljetuksessa ja valamisessa syntyneet tiivistysilmahuokokset, mikä mahdollistaa eri kokoisten kiviainesrakeiden pakkautumisen toisiaan vasten.

Tiivistäminen perustuu betonimassan tiksotrooppisen ominaisuuden hyväksikäyttöön, jonka avulla betonin viskositeettia saadaan pienennettyä tärytyksen aikana (Suomen Betoniyhdistys, 2020, s. 7). Näin ollen tiivistysilma lähtee nousemaan rakenteessa tärytyksen aikana 2–5 cm/s nopeudella. Jos valukerros on liian paksu, ei tiivistysilma pääse poistumaan ennen kuin erottuminen alkaa rakenteessa.

Ilmamäärä betonissa vaikuttaa jyrkästi betonin lujuuteen koska jo 1 tilavuusprosentin lisäys ilmamäärässä johtaa 3...5 % lujuuskatoon puristuslujuudessa (kuvio 5) (Suomen Betoniyhdistys, 2020, s. 15). Tämän vuoksi tiivistyksessä epäonnistuminen tai sen laiminlyönti johtaa uusien rakenteiden korjaamiseen, vahvistamiseen tai pahimmassa tapauksessa niiden purkamiseen.

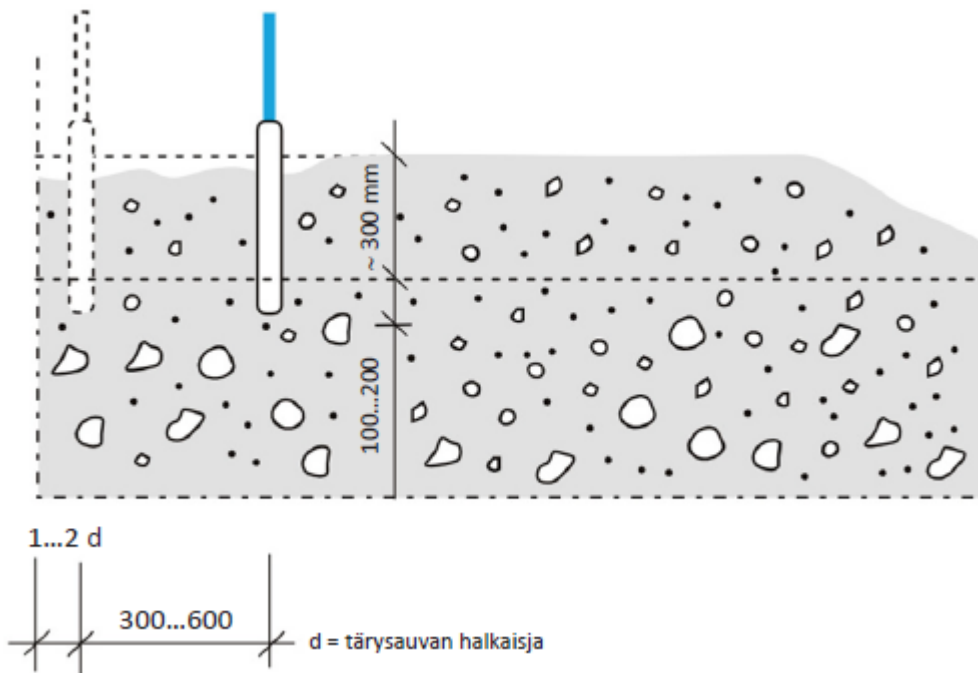


Kuvio 5. Ilmamäärän vaikutus puristuslujuuteen (Suomen Betoniyhdistys, 2020, s. 3).

3.5.1 Tärysausalla tiivistäminen

Betonimassan tiivistämiseen käytetään tyypillisesti sauvatärytintä, jonka sisässä olevan epäkeskisen pyörivän massan aiheuttama värähtely johdetaan betoniin (Suomen Betoniyhdistys, 2020, s. 26). Tärysauvan paineaallot säteilevät ulospäin ja muuttavat betonin nopeasti neste-mäiseksi ja juoksevaksi, joka mahdollistaa tiivistysilman poistumisen betonista. Koska tärytys vaimenee hyvin nopeasti suhteessa tärysauvan etäisyyteen, tulee sauvaa upottaa järjestelmällisesti siten että sauvan vaikutusalueet limittyvät (mts 27). Tärysauvan koko ilmoitetaan sauvan pään halkaisijan mukaan, joka on 20–150 millimetriä. Yleisin sauvan koko siltatyömailla keskittyy 35–55 millimetrin väliin. Tätä isompi sauva on painonsa puolesta epämukava käyttää monia tunteja kestävässä valussa ja tätä pienemmän tiivistysteho ei suurien alueiden tiivistyksen kannalta ole järkevää. Pieniä (alle 35 millimetrin) sauvoja käytetään erityisten

alueiden tärytyksen varmistamiseen ja alueiden mihin ei suurempi sauva ulotu. Tärysauvaa käytetään upottamalla sauva kohtisuorassa betoniin, ulottamalla se jo edelliseen valettuun kerrokseen asti vähintään 100 millimetriä (kuvio 6), jotta saavutetaan mahdollisimman tasainen sekoittumien eri aikaan purettujen betonikuormien välillä.



Kuvio 6. Tärysauvan ulottaminen edelliseen kerrokseen (Suomen Betoniyhdistys, 2020, s. 27).

3.5.2 Tärypalkilla tiivistys

Tärypalkki on metallinen palkki, jossa on yksi tai kaksi palkkia sekä epäkeskotärytin (Suomen Betoniyhdistys, 2019, s. 161). Tärypalkkia kuljetetaan joko metallisten ohjurien päällä tai siihen on asennettu sukset oikean betonipeitteen saavuttamiseksi. Tärypalkilla voidaan tasoittaa ja tiivistää ohuita laattarakenteita sekä paksumpien betonirakenteiden pintakerroksia. Tärytin kulkee ohjurien päällä samalla kun valuhenkilöstö varmistaa, että betonimassan pinta on jatkuvasti hieman tärypalkin alareunan yläpuolella. Tasauksen jälkeen tulisi pinta täryttää uudelleen palauttamalla tärypalkki lähtöasemiin ja ajamalla se uudelleen tasatun pinnan yli. Tämä ei kuitenkaan onnistu siltavalukohteilla koska sillan kannen pinnassa on kallistuksia, joiden vuoksi tärypalkilla tiivistys jää yleisesti aina yhteen yliajokertaan.

3.5.3 Alitiivistys

Betonin alitiivistys on selkeästi yleisempää kuin ylitiivistys (Suomen Betoniyhdistys, 2020, s. 59). Usein alitiivistys koskee vain yksittäistä aluetta valussa, jolloin seurauksena on, että betonimassa ei ole täyttänyt muottia täydellisesti tai betonin ilmamäärä on jäänyt suunniteltua suuremmaksi. Toisinaan vaikka kovettuneessa betonissa ei ole havaittavissa olevia valuviikoja tai valuonkaloja voi valuun jäädä ylimääräistä tiivistysilmaa (mts. 57) Tämä voi johtua käytettävästä tärytyskalustosta ja -menetelmistä mutta siihen voi vaikuttaa myös betonimassan ominaisuudet, käytetyt aineosat sekä monet muut tekijät.

Koska ilmamäärä vaikuttaa jyrkästi betonin lujuuteen on alitiivistetty betoni heikompaa ja alttiimpaa halkeilulle (Suomen Betoniyhdistys, 2020, s. 57–58). Tästä seurauksena sen kestävyys sään vaikutuksille, kuten pakkaselle ja sulamiselle heikkenee. Lisäksi se voi olla herkempi myös kemikaalien ja kosteuden vaikutuksille. Alitiivistetty betoni voi myös johtaa epätasaiseen pinnanlaatuun ja ilmakuplien jättämiin jälkiin, jotka vaikuttavat rakenteen ulkonäköön. Alitiivistys johtaa myös korjaustarpeen kasvuun ja voi lyhentää rakenteen suunniteltua käyttöikää. Vakavimmillaan huonosti tiivistetty betoni altistaa rakenteen epävakaudelle ja siten on omiaan lisäämään riskiä vaurioitumiselle tai jopa sortumiselle.

3.5.4 Ylitiivistys

Betonin liiallinen tärytys johtuu yleisesti liian pitkän tärytysajan käytöstä (Suomen Betoniyhdistys, 2020, s. 59). Tämä voi aiheuttaa monia ongelmia, kuten erottumista, jossa raskaammat kiviainekset painuvat alas, kun taas kevyemmät ja pienemmät kiviainekset jäävät pintaan. Samalla vesi ja ilma nousevat rakenteen pintaan tai jää rakenteen yläosaan. Huokostettujen betoneiden osalla on myös mahdollista, että suojahuokokset vähenevät, joka taas heikentää pakkaskestävyyttä. Suojahuokosten poistumista yleensä esiintyy massoilla, joissa on ylimääräistä vettä. Jos betoni on suhteutettu oikein eikä purkamisen yhteydessä betoniin lisätä vettä, ei suojahuokosten vähenemistä todennäköisesti tapahdu. Liiallisen tärytyksen takia muotti voi vaurioitua, jos tärytys lisää muottipainetta. Betonin erottuminen heikentää rakenteen laatua, mikä voi johtaa tiheyseroihin ja lujouden sekä säilyvyyden puutteisiin huokostetuissa betoneissa

3.5.5 Optimaalinen tiivistysaika

Tiivistysajan optimointi on aina betonityöntekijän arvioitavissa eikä täysin tarkkaa tiivistysaika voida antaa, joka toimii kaikissa tilanteissa (Ojala ym., 2019, s. 61). Optimaalinen tiivistysaika tasapainoilee aina erottumisen ja tiivistysilman poistumisen kanssa minkä vuoksi ohjeelliset tiivistysajatkin ovat tarkkuudessaan lähes suosituksia (kuvio 7). Aalto Yliopiston tutkimus Good Vibration on osoittanut, että kun tärytystä jatketaan niin kauan, jotta tiivistysilma on lähes kokonaan poistunut, on erottumien jo alkanut (Ojala ym., 2019). Tiheydellä ei niinkään ole suurta merkitystä rakenteen puristuslujuuteen, mutta betonin mekaaniset ominaisuudet saattavat tästä heikentyä.

Betoni	Notkeusluokka		
	S2, F1	S3, F2	S4, F3
Huokostamaton	400...800 (8...16 s)	200...400 (5...8 s)	200...400 (5...8 s)
Huokostettu	200...400 (5...8 s)	180...300 (4...6 s)	150...250 (3...5 s)

Kuvio 7. Ohjeelliset tiivistysajat (Ojala ym., 2019)

Good Vibrations -tutkimuksen mukaan tiivistysajan arvioinnissa tulisi ensisijaisesti keskittyä siihen, että betoni täyttää muotin ja raudoituksen unohtamatta huokostetun betonin erottumisherkkyttä, jolloin tärytysajat olisi mieluummin pidettävä lyhyinä ja tärytysväliä siten tiivistettävä (Ojala ym., 2019). Missään tapauksessa huokostetulle betonille ei suositella yli 10 s tiivistysaikoja.

3.5.6 Jälkitiivistys

Jälkitiivistyksellä pyritään edistämään erottuneen veden poistumista ja sulkemaan mahdollisia ilmahuokosia betonista, tällöin betonin tiiviys- ja lujuusominaisuudet paranevat (Suomen Betoniyhdistys, 2020, s. 35). Normaaleissa valuolosuhteissa ja tavanomaisilla rakennebetoneilla jälkitiivistys voidaan suorittaa noin 1–2 tunnin kuluttua varsinaisesta tiivistämisestä tai 4 tunnin kuluttua sekoituksesta. Yleinen sääntö jälkitiivistykseen on, että rakennetta voidaan jälkitäryttää vielä, kun tärysaus omalla painolla uppoaa betonimassaan sekä muuttuu juoksevaksi tärytyksen vaikutuksesta. Koska betoni on tässä vaiheessa jo jähmeämpää, tärkeää

on sauvan nostaminen tavanomaista hitaammin, jotta mahdolliset ilmahuokokset kykenevät nousemaan ja poistumaan rakenteesta sekä tärysauvan muodostama onkalo menee umpeen. Korkeissa rakenteissa pyritään jälkitärytyksellä edistämään valukerrosten rajapintojen sekoittumista, parantamaan näiden tartuntaa ja estämään plastisesta kutistumisesta sekä painumisesta johtuvia halkeamia. Plastisen painuman ja kutistuman muodostamat halkeamat syntyvät muutaman tunnin kuluttua kyseisen rakenneosan valusta. Korkeita rakenteita jälkitäryttäessä sauva voidaan upottaa syvälle aikaisempiin kerroksiin, kunhan sauva annetaan painua ainoastaan omalla painolla. Sauvanpistot pidetään normaaliin tärytysväliin verrattuna tiheämpinä, johtuen jäykemmän massan kyvystä vaimentaa tärytystä, jolloin vaikutusalue jää selkeästi pienemmäksi kuin tuoreessa juuri valetussa massassa.

3.6 Viimeistely, jälkihoito ja suojaus

Betoninen sillan kansi tasoitetaan ja ajetaan haluttuun muotoon tärypalkilla (Suomen Betoniyhdistys, 2019, s. 327). Tärypalkin jälkeen betonipinta annetaan sitoutua, kunnes betonipinnalla voidaan kävellä ilman, että pintaan jää painautumia. Tämän jälkeen pinta hierretään hiertokoneella, jossa on teräslautanen. Jos olosuhteet ovat erityisen kosteutta haihduttavia, voidaan betonipinnalle ruiskuttaa Väyläviraston hyväksymää välihiertoainetta. Kylmissä sääolosuhteissa voidaan betonipinnat joutua peittelemään lämmönhaihtumisen estämiseksi. Reunapalkit hierretään puuhiertona käsin. Hierrettäviä pintoja ei kuitenkaan saa hiertää liian tasaiseksi, jotta vedeneristeiden kiinnitys ei häiriintyisi. Tämän vuoksi tulisi ennen hierron laadutason määrittämistä selvittää kyseisen vedeneristemateriaalin kiinnityspinnalle asettamat vaatimukset pinnan karheuden osalta. Hierron jälkeen betonipinnat käsitellään jälkihoitoaineella tai peitellään rakennusmuovilla tai pressuilla. Kylmissä olosuhteissa peittelyssä käytetään routamattoja. Suositeltavaa kuitenkin olisi käyttää näiden peitemateriaalien yhdistelmää ja suojata jopa kesällä betonipinnat routamatolla tasaamaan lämpötilaeroja.

Lämpötiloja tulisi seurata valun aikana ja mieluummin niin kauan, kun rakenteissa on vielä hydrataatioreaktion aikaansaamaa lämpöä, jotta betonin kypsyysikä voitaisiin määrittää mahdollisimman tarkasti, muotin- ja telineidenpurkulujuutta ajatellen (Väylä, 2023). Lämpötilojen seurantaan käytetään dataloggereita (kuva 9), jotka tallentavat lämpötilatietoja ennalta asetetun mittausvälin mukaan. Lämpötila seuranta tulisi suunnitella siten, jotta rakenteen poikki-leikkausosan maksimilämpötila sekä kriittisten osien lämpötilaerot saadaan tietoon. InfraRYL

ohjeen mukaan betonin kovettumisen aikainen maksimilämpö ei saisi ylittää + 60 °C eikä rakenteiden lämpötilaero 1 metrin matkalla saa koskaan ylittää +20 °C (Rakennustieto, 2023). Jos maksimilämpö ylittää edellä ilmoitetun lämpötila-arvon tulee rakenteen loppulujuutta tulkittaessa olettaa, että puristuslujuuden alenema on 20 prosenttia, kun betonin korkein lämpötila on +80 °C. Kun betonin korkein lämpötila on +60 °C tai alle, on olettaa puristuslujuuden alenemasta 0 prosenttia. Näiden kahden lämpötilarajan väliset arvot puristuslujuuden alenemasta saadaan suoraan interpoloimalla. Jos betonin korkein lämpötila on +80 °C tai suurempi, voidaan rakenteen puristuslujuuden kelpoisuus todeta ainoastaan rakennekoekappalein. Kun betonin kovettumislämpötila nousee korkeaksi, voi se aiheuttaa epästabiilien hydrataatiotuotteiden muodostumisen betoniin. Nämä epästabiilit tuotteet voivat heikentää betonin pitkäaikaista kestävyyttä, mikä voi johtaa rakenteen ennenaikaiseen rapautumiseen ja muihin vaurioihin ajan myötä.



Kuva 2. Nelikanavainen datalogger Testo 716T4 suojarasiassa (Lakso, 2024).

3.7 Työturvallisuus

Sillanrakennuskohteessa noudatetaan kaikissa rakentamisen vaiheissa yleisiä työturvallisuusohjeita, työturvallisuuslakia sekä mahdollisia tilaajan kohdekohtaisia erillisohteita. Väylävirasto tilaajana on laatinut osana SILKO-ohjeistusta oman työturvallisuusohjeen (SILKO 1.111), jota siltojen korjauskohteiden lisäksi käytetään soveltuvin osin myös uudisrakentamisessa (Väylä, 2023, s. 6).

4 KOKEELLINEN TUTKIMUS

4.1 Esipuhe

Osana tätä opinnäytetyötä oli tarkoitus kolmen koevalukappaleen avulla puristuslujuuksien kautta tutkia kevyen tärypalkin tiivistämistehoa viimeisen valukerroksen tiivistämisessä tilanteessa, missä sitoutuminen on alkanut työmaalla sattuneesta viivästyksestä juuri ennen pintakerroksen betonointia.

Omaehtoisen kokemuksen kautta olen törmännyt vastaavanlaiseen tilanteeseen useasti valutyömailla, jossa viimeisen valukerroksen tiivistäminen on suoritettu lähes yksinomaan tärypalkilla, sauvatäryttimen toimiessa pinnan esitasajana. Näissä tilanteissa sauvatärytintä on vedetty betonimassan pinnalla, jotta betonimassa olisi tasaantunut tärypalkille. Betoniyhdistyksen ohjeiden mukaan tärypalkkia voidaan käyttää ohuiden valukerrosten tiivistämiseen.

Valun alempien kerrosten sitoutumisen alkaminen kiihdyttää myöhemmin valettujen valukerrosten sitoutumisreaktiota, jolloin sitoutumisen alkaminen saattaa yllättää kokeneemmankin valuhenkilön. Tämä saattaa toteutua erittäin herkästi kesäisissä sääolosuhteissa.

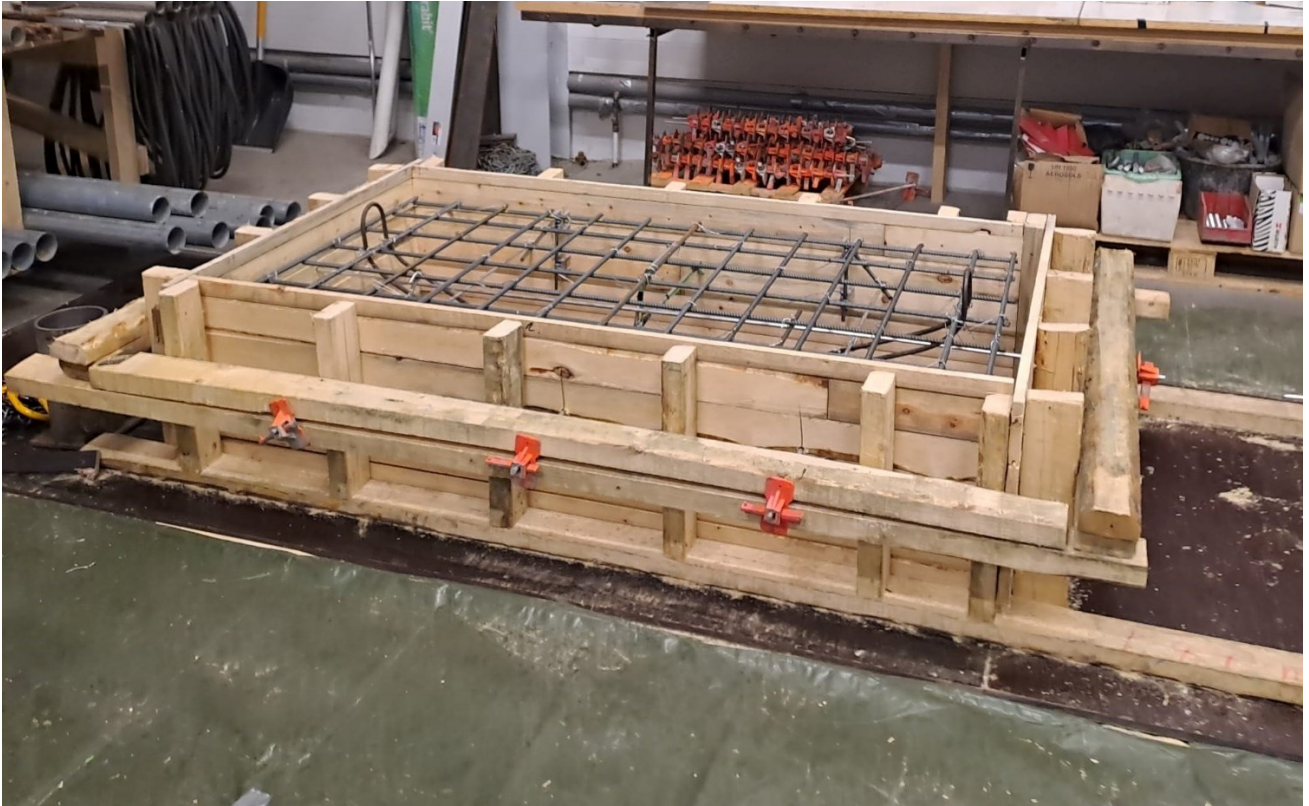
4.2 Koejärjestelyt

Tärypalkin tiivistystehoa arvioitiin koerakenteista porattavien rakennekoekappaleiden avulla, jotka koepuristettiin SeAMKin betonilaboratoriossa. Koevalu toteutettiin Kauhajoella Destian toimipisteessä lämmitetyssä hallissa.

4.3 Koerakenteet

Kauhajoella valmistettiin kolme valumuottia, joiden mitat olivat 1,75 x 1 x 0,5 metriä. Muotit valmistettiin ponttilaudasta ja tuettiin 47x100 millimetrin lankuilla sekä muottien lävitse asennettavilla alumiinitangoilla muottilukkoineen vastaanottamaan valupainetta. Muotit rakennettiin filmivanerien päälle, joiden alle asetettiin vielä suojaksi suojapeitteet (kuva 10). Muotteihin asennettiin rauditus (16Ø #150) pintaverkon tasoon, siten että suojapeite yläpintaan olisi 50 millimetriä ja muotin sivuille 40 millimetriä. Rakenteeseen lisättiin vielä nostolenkit valmiiden

kappaleiden siirtämistä helpottamaan. Lämpötiloja seurattiin Testo dataloggerilla kuin myös bluetooth anturi Ruuvitagillä.



Kuva 3. Koerakenteen valumuotti (Lakso, 2024).

4.4 Betonointi

Betoniksi valikoitui infrarakentamisessa yleisesti käytetty C35/45 P50 massa, joka tilattiin notkeusluokassa S3. Sementtilaatu toimitetussa betonissa oli CEM II/B-M 42,5 N, jossa yhtenä sementin seosaineena toimii myös masuunikuona. Betoni tilattiin kahdessa erässä, joista ensimmäisellä kuormalla betonipinta nostettiin koekappale nro. 1 ja 2 osalla kahdella valukerroksella pintaverkon tasoon, johon valu tilapäisesti pysäytettiin (kuva 11), kunnes havaittavissa oli betonin viskositeetin muutosta jähmeämmäksi. Koekappale nro. 3 toimi tilanteessa kontrollikappaleena, joka betonoitiin jälkimmäisellä betonikuormalla kolmella valukerroksella täyteen. Jälkimmäisellä kuormalla valettiin myös koekappaleiden 1 ja 2 pintakerrokset. Betoni siirrettiin palkkinosturia hyväksi käyttäen jassikalla muotteihin.



Kuva 4. Valutilanne 1. betonikuorman jälkeen (Lakso, 2024)

4.5 Tiivistysmenetelmä

Tiivistämiseen käytettiin 38 millimetriä halkaisijaltaan olevaa pistoolioteella varustettua sauvatärytintä (kuva 12) sekä kevyttä polttomoottorillista tärypalkkia (kuva 13). Tiivistämisen optimaika arvioitiin silmämääräisesti täryttäjän toimesta. Koekappaleiden nro. 2 ja 3 osalla sauvatärytintä käytettiin jokaisen valukerroksen tiivistämiseen ja koekappale nro. 1 kohdalla viimeinen pintakerros (n. 50 millimetriä) tärytettiin ainoastaan tärypalkilla. Jokaisen koekappaleen pinta tasattiin tärypalkilla.



Kuva 5. Sauvatäryttimellä tiivistäminen (Lakso, 2024).



Kuva 6. Polttomoottorilla varustettu kevyt tärpalkki (Lakso, 2024).

4.6 Koetilanteen analysointi

Betoni saapui klo. 9.10 ja purku muotteihin alkoi noin klo. 9.20. Betoniauton kuormakirjan mukaan betoni valmistettiin klo 7.43. Ulkolämpötila betonoinnin alkaessa oli noin -4 C° ja hallin sisällä noin 17 C° . Klo 9.24 betonin lämpötila oli $16,07\text{ C}^{\circ}$. Ensimmäinen kuorma oli purettuna

klo 9.45. Tästä kuormasta tehtiin myös kolme koevalukappaletta (1.1, 1.2 ja 1.3) ja valu saavutti koekappaleiden osalta suunnitellun pintaverkon tason. Seuraava kuorma saapui klo. 11.05, josta ensin valettiin koekappale nro.3 täyteen asti kolmella valukerroksella sekä valmistettiin 3 koevalukappaletta (2.1, 2.2 ja 2.3). Tässä vaiheessa, vaikka ensimmäisen kuorman valmistuksesta oli kulunut noin 3 tuntia ja 20 minuuttia, ei koekappaleiden 1 ja 2 osalla ollut tapahtunut betonin jäykistymistä ja lämpötilatkin olivat betonissa varsin alhaiset 15,91 C° ja 16,04 C°. Tästä syystä päätettiin vielä odotella ja pitää betonia jassikassa, kunnes koekappaleissa 1 ja 2 alkaa betoni jähmettyä. Klo 14.24, tämän työn tekijän keskustellessa työnjohtajien Tapio Sandbergin ja Jussi Mäkelän kanssa tultiin siihen tulokseen, että työmaaolosuhteissa näin pitkä valutauko (yli 4 h) on erittäin epätodennäköinen, joten valutauon pitkittäminen olisi täysin turhaa. Päätettiin valaa koekappaleiden pinnat, vaikka merkittävää viskositeetin muutosta koerakenteiden pinnassa ei vielä ollut tapahtunut. Lämmöt olivat edelleen varsin alhaiset 16,64 C° ja 16,76 C°, joista päättelemällä betonissa oleva masuunikuona todennäköisesti hillitsi jopa liiankin tehokkaasti sementin sitoutumisvaiheen lämmöntuottoa tai sitoutumisvaihe ei ollut vielä täysin käynnistynyt. Koekappale nro. 1 pintakerros tasattiin kevyesti sauvatäryttimellä, jonka jälkeen pinta tärytettiin tärypalkilla. Koekappale nro. 2 pinta tärytettiin sauvatäryttimellä tiheästi pistellen. Tässä vaiheessa sauvatärytin kohtasi hienoista vastustusta, joka indikoi, että sitoutuminen on alkanut kyseisessä koekappaleessa. Pinta tasattiin vielä tärypalkilla. Tämän jälkeen koekappaleet peiteltiin rakennusmuovilla tiiviisti. Hallin ulkopuoliset sääolosuhteet valun valmistumisen jälkeisinä viikkoina olivat kylmät, ja tämän vuoksi hallin sisälämpö pysytteli noin 16 asteen pinnassa.

Valusta seuraavana päivänä lieriön muotoiset koevalukappaleet, jotka olivat halkaisijaltaan 150 millimetriä ja korkeudeltaan 300 millimetriä poistettiin muoteistaan ja siirrettiin vesiastiaan huoneeseen, jossa oli tasainen +20 C° lämpötila. Varsinaiset koevalumuotit avattiin ja purettiin 5 vuorokauden kuluttua valusta, mutta peittelyä jatkettiin.

28 vuorokautta valusta, valmiista betonirakenteista porattiin (kuva13) yhteensä 9 rakennekoekappaletta (3 kpl per rakenne). Tässä vaiheessa rakennekoekappaleissa ei ollut havaittavissa valutauon aiheuttamaa valusaumaa. Kaikki rakennekoekappaleet sekä koevalukappaleet kuljetettiin muoviin käärittynä Seinäjoen ammattikorkeakoulun betonilaboratorioon valmisteltavaksi puristuslujuuden testaukseen.



Kuva 7. Rakennekoekappaleen poraus (Lakso, 2024).

4.7 Puristuskokeet

Rakennekoekappaleista sahattiin 1:1 kokoisia koekappaleita siten, että niistä testattaisiin ylimmän sekä keskimmäisen valukerroksen välistä lujuuseroa. Varsinaista huokosjakoa ja -määrää ei tutkittu. Testattavia rakennekoekappaleita valmistettiin puristuslujuuden testaukseen yhteensä 25 kpl, joista rakennekoekappaleita oli 18 kpl ja koevalukappaleita 7 kpl (3 per arvosteluerä sekä 1 betoniaseman toimittama).

Puristuskoekappaleiden puristuspinnot hiottiin tasaisiksi, jotta puristuskokeessa ei pääsisi muodostumaan heikentäviä jännityspiikkejä. Kappaleiden mittaus suoritettiin kalibroimattomille muoteille tarkoitetun standardin SFS-EN 12390-3:2019 Annex B mukaisesti.

4.8 Puristuskokeiden tulokset

Tuloksissa Koe1 on koevaluuottu 1, jossa pintakerros tärytettiin ainoastaan tärypalkilla ja valu pysäytettiin pintaverkon tasoon. Koe2 on koevaluuottu 2, jossa pintakerros tärytettiin tiheästi sauvatäryttimellä pistellen ja pinta tasattiin tärypalkilla. Koe3 on koevaluuottu 3, joka toimi kontrolliyksilönä, joka valettiin kokonaan kuormalla 2 ilman valutaukoa ja pintakerros tärytettiin sauvatäryttimellä sekä viimeisteltiin tärypalkilla.

Taulukko 8. Puristuskokeiden tulokset (Lakso, 2024).

Porakappaleet	Rakennekoekappaleen tunnus	Murtokuorma L (MN/m ²)	Tiheys kg/m ³
Koe1	Pinta		
	p1,1,1	24,4	2230
	p1,2,1	30	2261
	p1,3,1	33,1	2247
	Sisä		
	p1,1,2	33	2298
	p1,1,2	38,6	2341
	p1,2,2	31,8	2259
	koe2	Pinta	
p2,1,1		32,2	2285
p2,2,1		33,9	2255
p2,3,1		32,6	2287
Sisä			
p2,1,2		28,1	2269
p2,2,2		31,4	2276
p2,3,2		28,4	2279
Koe3 (kontrolli)		Pinta	
	p3,1,1	31,7	2272
	p3,2,1	31,5	2290
	p3,3,1	31,6	2287
	Sisä		
	p3,1,2	30,3	2311
	p3,2,2	33,7	2322
	p3,3,2	36,5	2328

4.9 Puristuskokeiden tulosten analysointi

Kaikki koekappaleet puristettiin joko 28 tai 29 vuorokauden iässä. Kokeiden tulokset puristuslujuuden ja tiheyden osalta jaettiin pintakerroksen ja sisäkerroksen keskiarvojen mukaan siten, että rakennekoekappaleet eroteltiin muottien perusteella.

Kaikki alla mainitut lujuudet ovat lieriömäisen koekappaleen lujuuksia ilman InfarRYL:in ohjeen mukaisia korjauskertoimia. Kappaleihin ei myöskään sovellettu taulukon 5 mukaisia ehtoja.

Rakennekoekappaleiden tiheyden keskiarvo olivat hyvinkin lähellä toisiaan, kun vertailua suoritettiin koevalukappaleiden 1 ja 2 osalta kontrollina toimineeseen kappaleeseen 3 (taulukko 9).

Taulukko 9. Puristuskokeiden tiheyden arvot keskiarvoina (Lakso, 2024).

Tiheys			
kg/m ³	Keskiarvo (kg/m ³)	ero kontrollin keskiarvoon (%)	Ero keskiarvoon (%)
Koe1	2273	-1,26 %	-0,46 %
Koe2	2275	-1,15 %	-0,35 %
Koe3 (kontrolli)	2302	0 %	0,81 %
Kaikki	2283	-0,80 %	0 %

Rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvot rakenteiden välillä olivat vähäisiä muutaman prosentin luokkaa (taulukko 10).

Taulukko 10. Puristuskokeiden lujuuden arvot keskiarvoina (Lakso, 2024).

Kokonaislujuus	Keskiarvo (MN/m ²)	Ero kontrollin keskiarvoon (%)	% ero keskiarvoon (%)
Koe1	31,8	-2 %	0 %
Koe2	31,1	-4 %	-2 %
Koe3 (kontrolli)	32,55	0 %	2 %
Kaikki	31,8	-2 %	0 %

Rakennekoekappaleiden keskiarvossa oli havaittavissa eroja, kun tarkastellaan pintavalukerroksen ja toiseksi ylimmän valukerroksen välisiä eroja koerakenteiden välillä puristuslujuuksien osalta (taulukko 11).

Taulukko 11. Rakennekoekappaleiden puristuslujuus, kun verrataan tuloksia valukerrosten välillä (Lakso, 2024).

Kokonaislujuus	koe1 (MN/m ²)	Koe2 (MN/m ²)	Koe3 (kontrolli) (MN/m ²)	% ero 1vs3 (%)	% ero 2vs3 (%)
Pintak. keskiarvo	29,2	32,9	31,6	-8 %	4 %
Sisäk. keskiarvo	34,5	29,3	33,5	3 %	-13 %

Tiheyksien osalla erot eivät olleet prosentuaalisesti suuria (taulukko 12).

Taulukko 12. Rakennekoekappaleiden tiheydet, kun verrataan tuloksia valukerrosten välillä (Lakso, 2024).

Tiheys	koe1 (kg/m ³)	Koe2 (kg/m ³)	Koe3 (kontrolli) (kg/m ³)	% ero 1vs3 (%)	% ero 2vs3 (%)
Pintak. keskiarvo	2246	2276	2283	-1,6 %	-0,3 %
Sisäk. keskiarvo	2299	2275	2320	-0,9 %	-2,0 %

Valun yhteydessä tehtyjen valukoekappaleiden tulokset, joita säilytettiin tasaisessa lämpötilassa vesiastiassa (taulukko 13). Tunnuksella BA betoniaseman toimittama koekappale. Koska rakennekoekappaleiden tulosten tulkinnassa ei käytetty InfraRYL:in mukaisia korjauskertoimia iän ja puristettavan kappaleen koon osalta päätettiin, ettei lähdetä vertaamaan valukoekappaleita rakennekoekappaleihin. Kappaleet toki puristettiin ja mitattiin samalla laitteistolla SeAMKin laboratoriossa tämän työn tekijän toimesta kuin rakennekoekappaleetkin. Valukoekappaleiden puristuslujuuden tulokset eroavat rakennekoekappaleihin säilytyslämpötilan vuoksi.

Taulukko 13. Valukoekappaleiden tiheyden ja puristelujuuden tulokset (Lakso, 2024).

Valukoekappaleet	(MN/m ²)	(kg/m ³)
1,1	49,3	2323
1,2	49,7	2328
1,3	49,4	2323
2,1	45,3	2319
2,2	46,4	2322
2,3	48,6	2325
BA	54,8	2353

5 PÄÄTELMÄ

Siltavaluissa tapahtuu erittäin herkästi tilanne, missä juuri pintaverkon tasoon nostettu valukaista pysähtyy hetkellisesti, kun pintakerroksen valamiseen pyritään saamaan useamman kaistan aluetta. Tähän pintavalukerrosten alan haalimiseen ja pysähtymiseen on usein syynä reunapalkkeihin erikseen tilattava soittokuorma, joka on usein suunniteltu valettavaksi suuremmalla P-luvulla olevalla betonilla kuin muut sillan kansirakenteet. Valutyöntekijöiden työtottumukset voivat olla myös yksi syy tähän pintakerroksen valamiseen mahdollisimman suurina aloina. Jos reunapalkki on verrattain matala, saattaa yksittäisen soittokuorman tilavuus jäädä niin pieneksi, että kuorman hinta kuljetuksineen tulee valettuun määrään suhteutettuna suureksi. Tällöin muodostuu tilanne, että pyritään saamaan mahdollisimman suuri määrä reunapalkkia samalla kuormalla valettua. Kun otetaan mahdolliset valuolosuhteet huomioon, kuten lämmin kesäsää sekä pitkä betonin toimitusmatka, saattaa pintaraidoitteen tasossa oleva valukerroksen betoni olla jo erittäin lähellä sitoutumisen alkamista, jolloin viskositeetti on jo muuttunut selkeästi jähmeämmäksi. Kun pintakerroksen betoni sitten saapuu, saattavat valutyöntekijät tasata betonin tärypalkille pelkästään uittamalla sauvatärytintä, jolloin viimeisen valukerroksen tärytys jää pelkästään tärypalkin hoidettavaksi. Tällöin voi syntyä olla tahattoman valusauman riski. Tietyin ohjein, ohuen valukerroksen tärytys voidaan hoitaa pelkästään tärypalkilla, mutta silloin tilanteessa tulisi ehdottomasti olla kokonaisvaltaisempi kuva ja ymmärrys valukerrosten sekoittumisesta toisiinsa. Tämän työn tutkimukset osoittivat, että jos pintakerros jää edellä mainituin ehdoin pelkästään tärypalkin täryttämäksi on puristuslujuudessa odotettavissa pintakerroksen osalla 8 prosentin heikennys.

Tilanteessa, jossa edellä mainittua tapahtumaa lähdetään korjaamaan tiheällä sauvatäryttimen tärytyksellä, voidaan pinnan puristuslujuus saada hyväksi. Toki tutkimuksessa oli havaittavissa, että tällä menetelmällä, heti pintakerroksesta seuraavassa valukeroksessa saattaa olla jopa 13 prosentin heikennys puristuslujuuteen.

Edellä mainitun tilanteen estämiseksi kannen betonointi voidaan toteuttaa samalla korkeammalla P-luvulla kuin reunapalkkeihin on suunniteltu. Tällöin poistuu tarve rytmittää betonointi soittokuormien toimitusten mukaan. Tällöin ongelmaksi saattaa muodostua betonin suhteutuksessa lisätty sementin määrä, joka kompensoi lisääntyntä suojuhuokosilman määrän tarvetta. Lisääntynyt sementin määrä nopeuttaa hydrataatioreaktiota betonissa, jolloin sitoutuminen saattaa nopeutua verrattuna pienemmällä P-luvulla suhteutettuun massa. Tällöin

massaan tulisi lisätä hidastinta, joka hidastaa hydrataatioreaktion alkamista. Hidastettu massa voi aiheuttaa lisäkuormia telineille ja muotille, jolloin tämän käyttö tulee varmistaa muotti- ja telinesuunnittelijalta.

InfraRYL viittaa, että betonitöissä tulisi noudattaa standardin SFS-EN 13670 kohta 8 mukaisia ohjeita, joissa myös kyseisen standardin liitteessä F sallitaan pelkällä tärypalkilla tapahtuva tiivistys. Koska tässä tutkimuksessa kuvatus kaltainen tapahtuma on aina mahdollinen, kun valetaan lämpimissä olosuhteissa. Suositellaan InfraRYL:iin lisättäväksi vaatimusta, joka kumoaisi pelkällä tärypalkilla tapahtuvan tiivistyksen kohteissa, missä noudatetaan InfraRYL ohjeistusta. Suositeltavaa on myös lisätä vaatimus valutyöntekijöiden kelpoisuudesta, taitorakennekohteiden tiivistämisessä. Kelpoisuus voidaan todeta esimerkiksi itsenäisesti suoritettavan Betoniyhdistyksen verkkokoulutuskurssi *eTiivistys* läpäisemisellä, joka käsittelee betonin oikeaoppista tiivistämistä.

Loppuyhteenvedonä voitiin tutkimuksen osalta todeta, että pinnan riittämätöntä tärytystä ei pystytä korvaamaan kevyellä tärypalkilla, varsinkaan tilanteissa, joissa edellinen valukerros on alkanut sitoutumaan. Riittämättömän tärytyksen vuoksi, pinnan lujuus verrattuna kontrollivalukoekappaleeseen oli 8 prosenttia heikompi. Mielenkiintoinen huomion kohde oli koevaluokappale 2, jossa sitoitumaan alkanutta kerrosta tärytettiin valukerrosten yhdistämisen vuoksi, oli lujuudessa nähtävissä heikentyminen. Tämän kokeen tulosten perusteella lujuuden heikentyminen oli jopa 13 prosenttia kontrollikappaleeseen verrattuna. Tämän vuoksi ehdotetaan, että plastisen painuman estämiseksi tehtävän jälkitärytyksen vaikutuksia lujuuteen tutkittaisiin enemmän. Jälkitärytyksen mahdollisia negatiivisia vaikutuksia tulisi tutkia varsinkin korkeissa rakenteissa, missä tärysauva voidaan upottaa useampien aikaisempien valukerrosten vaikutusalueelle. Vaikka koetilanteen valutauko on erittäin epärealistinen, voi korkeissa rakenteissa olla mahdollista ulottaa jälkitärytys jopa näinkin pitkälle sitoutuneeseen betoniin.

LÄHTEET

- Destia. (i.a.). *Destia A Colas Company*. <https://www.destia.fi/>
- Haara, T. (2018). *Betonitekniikan oppikirja By 201*. (6.p.). Suomen Betoniyhdistys. (alkuperäinen teos julkaistu 1982).
- Finnsementti Oy. (i.a.). *Seosaineet sementissä*. <https://finnsementti.fi/sementti/tietoa-sementista/seosaineet-sementissa/>
- Liikennevirasto. (2015). *Liikenneviraston Tutkimuksia Ja Selvityksiä: Taitorakenteiden ylläpidon toimintalinjat: Taustaselvitys*. https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121945/lts_2015-26_taitorakenteiden_yllapidon_web.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Mantila, A., Punkki, J., & Vuotari, J. (2021). Uusi Infrabetonien valmistusohje tuli voimaan 1.1.2021. *Betoni-lehti*, 91(1), 66-71 <https://betoni.com/lehti/betonilehti/1-2021/>
- Mölsä, S. (13.12.2016). *Tekniikan tohtori Seppo Matala vastaa Ruduksen väitteisiin P-lukubetoneista*. Rakennuslehti. <https://www.rakennuslehti.fi/2016/12/tekniikan-tohtori-seppo-matala-vastaa-ruduksen-vaitteisiin-p-lukubetoneista/>
- Mölsä, S. (14.12.2017). *Tekniikan tohtori Seppo Matala pitää betonin lujuusalitusten syytä selvänä: Rudus ei noudattanut ohjeita*. Rakennuslehti. <https://www.rakennuslehti.fi/2017/12/tekniikan-tohtori-seppo-matala-pitaa-betonin-lujuusalitusten-syyta-selvana-rudus-ei-noudattanut-ohjeita/>
- Ojala, T., Al-Neshawy, F., & Punkki, J. (2019). *Betonin koostumuksen vaikutus sen tiivistettyteen: Raportti tilaustutkimusprojektista "Good Vibrations"*, 2019. Aalto-Yliopisto. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-8407-7>
- Rakennustieto. (2023). *InfraRYL – Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset: Sillan betonin valmistus ja betonityöt (InfraRYL 42020)*.
- Suomen Betoniyhdistys ry (BY)/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto (RIL). (2019), *Betonirakenteiden työmaatoteutus BY 71/RIL 149-2019*.
- Suomen Betoniyhdistys ry (BY). (2020), *Betonin tiivistys 2020 by 73*.
- Suomen Betoniyhdistys ry (BY). (2021), *Betoninormit 2021 by 65*.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto (RIL). (2018). *RIL 179-2018: Sillat: -Suunnittelu, toteutus ja ylläpito*

Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (2012). *Sementti. osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus* (SFS-EN 197-1)

Väylävirasto (Väylä). (2020). *Väyläviraston Ohjeita 41/2020: Infrabetonien Valmistus*.
https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2020-41_infrabetonien_valmistus_web.pdf

Väylävirasto (Väylä). (2023). *Väyläviraston Ohjeita 45/2023. SILKO 1.111: Työturvallisuus*.
https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2023-45_silko_1.111_web.pdf