

DELTABEAM®-rakenteen kuivumisen tehostaminen

Ilkka Valovirta¹, Eero Tuominen¹, Antti Mikkonen¹, Tuomas Raunima¹, Tuomas Harmaala², Juuso Salonen², Esa Rusila² ja Juha Vinha¹

¹ Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

² Peikko Finland Oy

Tiivistelmä

DELTABEAM®-palkkeihin tehtaalla asennettavilla kuivatusratkaisuilla on mahdollista saada lisävarmuutta DELTABEAM®-ontelolaatta- liittorakenteen kosteustekniseen toimintaan, mikäli betonin kuivumisen perusedellytykset ovat kunnossa. Tässä artikkelissa on esitetty tuloksia uudentyypisten kuivatusratkaisujen mallinnuksista ja mittauksista. Mittaukset on toteutettu onnistunutta työmaatoteutusta vastaavissa hallituissa olosuhteissa. Tutkimuksessa on tarkasteltu erityisesti sauma-/ palkkivalua, joka on rakenteen kuivumisen kannalta olennainen kohta. Tutkitut palkkityypit olivat D32-400 ja leuankorotuksella varustettu D50-500. Laskennallisen tarkastelun perusteella lupaavimmaksi kuivatusratkaisuksi osoittautui erikoisvalmisteisen kuivatusputken ja lämpölankojen asentaminen rakenteeseen. Lämpölangoilla varmistetaan riittävien lämpötilaerojen syntyminen rakenteeseen. Lämpötilaerot aikaansaavat kuivatusputkeen riittävän ilmavirtauksen. Ratkaisulla voidaan vähentää palkin sisälle päällystämisen jälkeen jäävää kokonaisvesimäärää. Betonin kuivumista tarkkailtiin mittausten aikana sekä valuun upotettavilla jatkuvatoimisilla antureilla että porareikämittauksin. Ensin mainitulla menetelmällä voidaan ennakoida betonin sopivaa päällystysajankohtaa, joka varmistetaan tarkasti ajoitetuilla porareikämittauksilla.

1. Johdanto

Suomessa yleisesti käytetyn DELTABEAM®-ontelolaatta- välipohjan kuivumisen kannalta olennainen kohta on DELTABEAM®-palkin ja ontelolaatan välinen saumavalu. DELTABEAM®-palkin betonitäyttö kuivumismahdollisuudet ovat käytännössä kemiallinen kuivuminen sekä kuivuminen uumareikien kautta saumavaluun [1]. Ontelolaattojen tulppauksen ja laatoissa käytetyn tiiviin betonin takia saumavalu kuivuu pääosin ylöspäin. Välipohjan pinnoittaminen kulutusta kestäväällä julkisten tilojen muovimatolla tai muulla tiiviillä lattianpäällysteellä sulkee tämän kuivumisreitit varsin tehokkaasti. Tällöin DELTABEAM®-ontelolaatta- rakenteen sauma-/ palkkivalun kuivuminen määrää välipohjan pinnoitusajankohdan, mikä voi tahdistaa työmaata oleellisesti.

DELTABEAM®-ontelolaatta -rakenteen kuivumista on tutkittu sekä mallintamalla että kokeellisesti [1] [2], ja kuivumisen varmistamiseen löytyy yksityiskohtainen ohjeistus [3]. DELTABEAM®-palkkeihin tehtaalla asennettavilla kuivatusratkaisuilla on kuitenkin mahdollista saada lisävarmuutta rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Betonin kuivumisedellytysten tulee aina olla kunnossa, mikä edellyttää muun muassa riittävän alhaista vesi-sementtisuhdetta, sääsuojauksia sekä riittävän korkeaa ympäristön lämpötilaa ja alhaista suhteellista kosteutta.

Tässä tutkimuksessa vertailtiin erityyppisten kuivatusratkaisujen tehokkuutta. Tavoitteena on ollut palkkien varustelu mahdollisimman pitkälle jo tehtaalla, jolloin työmaalle kuivatusratkaisusta aiheutuva työ minimoidaan erityisesti runkovaiheen aikana.

2. Tutkimusjärjestelyt

2.1 Mallinnus

Mallinnuksessa käytettiin COMSOL® -ohjelmistoa, mikä saatiin mallinnettua sekä tutkittavan rakenteen geometria että rakennusfysikaaliset olosuhteet tarkasti [4]. Esimerkiksi rakenteen yläpinta mallinnettiin alussa paljaana, ja kuivatusjakson jälkeen puolestaan tasoitettuna ja lattianpäällysteellä pinnoitettuna. Mahdolliset lämpölangat olivat päällä tasoitukseen asti. Mallinnusta jatkettiin neljä vuotta tasoitteen lisäyksestä, jolloin saatiin havainnoitua rakenteen kuivumista päällystettyä sekä kosteusjakauman muutosta rakenteessa.

Mallinnettu rakenne koostui 6 metrin pituisesta DELTABEAM® D32-400 -palkista ja 320 mm korkuisista ontelolaatoista. Mallinnuksessa vertailtiin toisiinsa kolmea uudentyyppistä kuivatusratkaisua sekä yleisesti käytössä olevaa perustapausa. Ensimmäisessä variaatiossa palkin pohjassa oli kolme reikäriviä mitoituksella 15 mm x 100 mm k300. Tavoitteena oli mahdollistaa palkkiprofiilin sisäosan kuivuminen alaspäin. Toisessa variaatiossa pyrittiin muodostamaan kuivumisreitti ontelolaattojen onteloihin jättämällä niiden tavanomaiset muovitulpat pois laskentamallista. Tällä jäljiteltiin vesihöyryä hyvin läpäisevää tulppa-/ tukemateriaalia. Kolmannessa variaatiossa palkin sisälle mallinnettiin kuivatusputki. Tutkimuksessa vertailtiin kolmea tapausa, joista kahdessa käytettiin 50 mm ja yhdessä 100 mm halkaisijaltaan olevaa putkea. Toisessa 50 mm tapauksista putki oli ilmankierron parantamiseksi mahdollisimman kalteva, ja muissa tapauksissa se oli vaakasuorassa alalaipan yläpuolella. Putkien toinen pää oli avoin palkin ala- ja toinen yläpuolelle, mikä mahdollisti ilman läpivirtauksen painovoimaisesti.

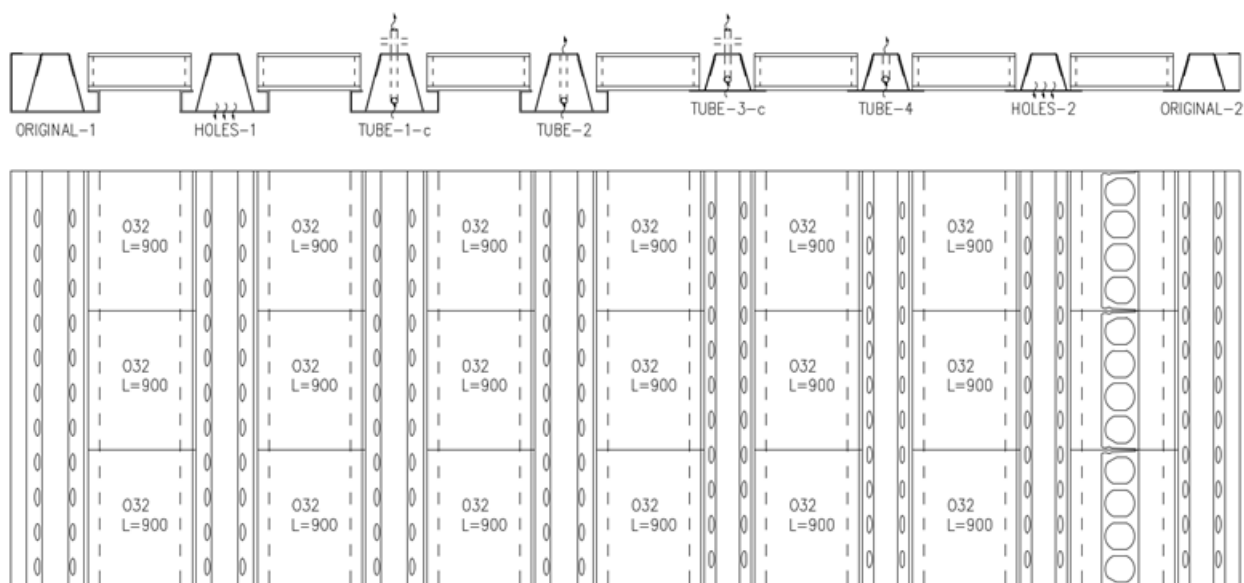
Kuivatusputkellisten tapausten kanssa mallinnettiin aina lämpölangat, jotka olivat välttämätön edellytys putkissa tapahtuvalle painovoimaiselle ilmanvaihdolle. Perustapaus, alalaipastaan rei'itetty palkki sekä läpäisevillä ontelotulpilla varustettu tapaus mallinnettiin sekä lämpölankojen kanssa että ilman. Lämpölankojen teho oli yhteensä 160 W/m.

Mallinnetut tapaukset olivat siis seuraavat:

1. Perustapaus ilman kuivatustoimenpiteitä (nykyisin käytetty perusratkaisu)
2. Palkin pohjassa rei'itys
3. Perustapaus (1) sekä lämpölangat
4. Palkin pohjassa rei'itys kuten (2) sekä lämpölangat
5. Ontelolaattojen tulpat vesihöyryä läpäiseviä
6. Ontelolaattojen tulpat vesihöyryä läpäiseviä kuten (5) sekä lämpölangat
7. Diffuusioavoin kuivatusputki, kalteva, halkaisija 50 mm, sekä lämpölangat
8. Diffuusioavoin kuivatusputki, vaakasuora, halkaisija 50 mm, sekä lämpölangat
9. Diffuusioavoin kuivatusputki, vaakasuora, halkaisija 100 mm, sekä lämpölangat

2.2 Kuivumismittaukset hallituissa olosuhteissa

Kuivumismittauksia varten rakennettiin Peikko Finland Oy:n tiloissa sijainneeseen vakio-olosuhdehuoneeseen kahdeksasta DELTABEAM®-palkista ja niiden väliin asennetuista ontelolaatoista koostuva koerakenne (Kuva 1) [5]. Palkit asennettiin pukkien varaan, jolloin ilma pääsi kiertämään rakenteen alla. Tutkituista palkkiprofileista neljä oli tyyppiä D50-500 leuankorotuksella ja neljä tyyppiä D32-400. Ensin mainittu on kuivumisen kannalta erityisen haastava. Kaikki ontelolaatat olivat 320 mm korkeita.



Kuva 1. Koelaatasto sivulta ja ylhäältä katsottuna. Neljän vasemmanpuoleisimman palkin profiili on D50-500 leuankorotuksella ja neljän oikeanpuoleisen D32-400.

Molemmista palkkityypeistä mitattiin perustapausta sekä alalaipastaan rei'itettyä, 50 mm halkaisijaltaan olevalla kuivatusputkella varustettua sekä samanlaisella kuivatusputkella ja 1 m pituisella pystyhormilla varustettua variaatiota (Taulukko 1). Palkkeihin asennettiin lisäksi lämpölangat. Lämmitystä ohjattiin kellokytkimellä siten, että tilanne vastasi jatkuvaa lämmitystä teholla 160 W/m. TUBE-4-palkkiin oli erehdyksessä asennettu 100 W/m lämpölanka, minkä lisäksi palkkien ORIG-1 ja TUBE-3-c vikaantuneet lämpölangat jouduttiin korvaamaan alalaipan alapintaan asennettavilla ulkopuolisilla lämpölangoilla.

Taulukko 1. Olosuhdehuoneessa tutkitut palkkivariaatiot

Palkin tunnus	Palkkityyppi	Kuivatusjärjestely
ORIG-1	D50-500	(Vakiopalkki, verrokki) Huom. Lämpölanka vikaantunut n. 2kk valusta ja korvattu alalaipan alapuolisella langalla.
HOLES-1	D50-500	Reiät 15x300 k300 kolmessa rivissä palkin pohjassa
TUBE-1-c	D50-500	Kuivatusputki sisällä, yläpäässä hormijatke
TUBE-2	D50-500	Kuivatusputki palkin sisällä
TUBE-3-c	D32-400	Kuivatusputki palkin sisällä yläpäässä hormijatke Huom. Lämpölanka kokeen alusta alkaen alalaipan alapuolella
TUBE-4	D32-400	Kuivatusputki palkin sisällä. Huom. Muita alempitehoinen lämpölanka
HOLES-2	D32-400	Reiät 15x300 k300 kolmessa rivissä palkin pohjassa
ORIG-2	D32-400	(Vakiopalkki, verrokki)

Laataston valussa käytetyn betonin lujuusluokka oli C35/45 ja vesi-sementtisuhde 0,4. Laatasto valettiin 19.10.2021. Rakennetta jälkihoidettiin kolme viikkoa pitämällä se muovikalvolla peitettynä. Kuuden kuukauden jälkeen se pohjustettiin sekä tasoitettiin nimellispaksuudeltaan 20 mm sementtipohjaisella tasoitteella. Yhdeksän vuorokautta tasoituksen jälkeen, päivämäärällä 6.5.2022, rakenteen päälle liimattiin tiivis julkisen tilan muovimatto. Maton vesihöyrynvastus oli $Z_v = 2980000 \text{ s/m}$, mikä vastaa sd-arvoa 79,8 m. Olosuhdehuoneen tavoitelämpötila oli +20 °C ja suhteellisen kosteuden tavoitearvo 50 %.

DELTABEAM® -palkin ja ontelolaataston välisen valusauman sekä palkin sisäosan betonitäytön lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin valuun sijoitetuilla jatkuvatoimisilla Matolog-

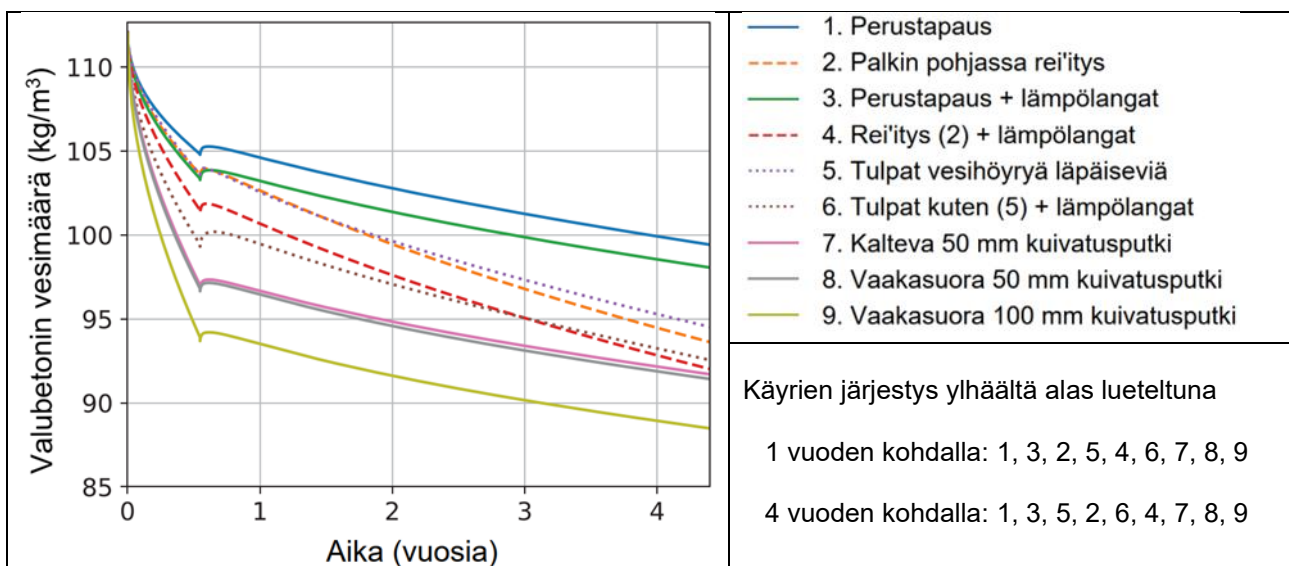
antureilla. Valusauman olosuhteita seurattiin lisäksi porareikämittauksilla, joita tehtiin kokeen aikana yhteensä viisi kertaa. Olosuhteita lattianpäällysteen alla mitattiin viiltomittauksilla, jotka ajoitettiin samaan aikaan kahden viimeisen porareikämittauksen kanssa.

3. Tulokset

3.1 Mallinnus

Kuivatusratkaisuista tehokkaimmiksi osoittautuivat kuivatusputket (mallinnustapaukset 7, 8 ja 9), joista 100 mm putki toimi parhaiten. Myös vesihöyryä läpäisevät tulpat ja palkin pohjan rei'itys tehostivat palkin kuivumista, joskin vähemmän kuin kuivatusputket. Lämpölangat tehostivat sekä näiden kahden ratkaisun että myös perustapauksen kuivumista, joskin perustapauksen yhteydessä ne vaikuttivat vähemmän kuin läpäisevät tulpat tai pohjan rei'itys ilman lankoja. Kuivatusputkia käytettäessä lämpölangat ovat välttämättömiä, jotta putkiin aikaansaadaan painovoimaisen ilmankierron edellyttämä lämpötilaero.

Kuva 2 näyttää valubetonin kosteuspitoisuuden (vesimäärän) kehityksen mallinnuksen aikana havainnollistaen eri kuivatusratkaisujen eroja. Vesimäärät kg/m^3 on laskettu jakamalla valubetonin kokonaisvesimäärät valujen tilavuuksilla.



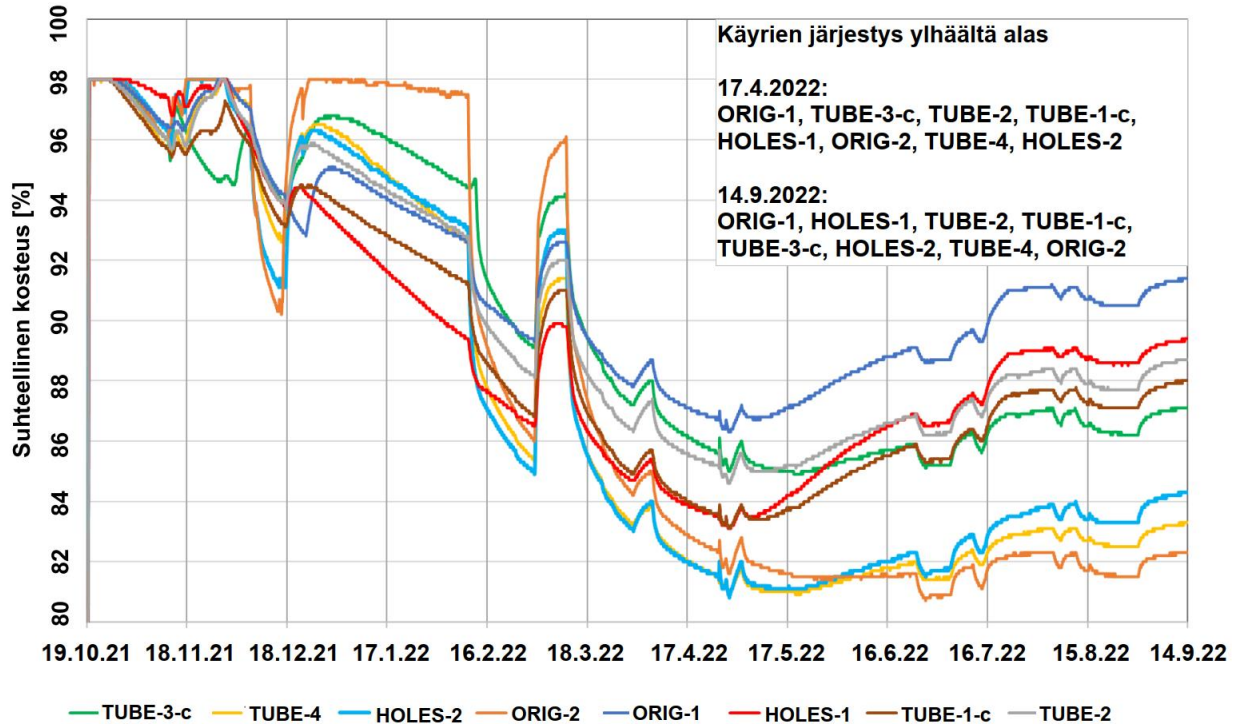
Kuva 2. Mallinnettu valubetonin vesimäärän kehitys.

Suhteellinen kosteus ja vesihöyryn osapaine laskivat kuivatusputken ympäristössä hyvinkin alas. Kuitenkaan tämä putkea ympäröinyt kuiva vyöhyke ei vielä vuodenkaan päästä saavuttanut valusauman ylöspäin kuivuvaa vyöhykettä. Kosteuden poistuminen palkin sisältä kuivatusputken kautta vähentää kuitenkin suhteellisen kosteuden nousua rakenteessa pinnoittamisen jälkeen, antaen rakenteen toiminnalle lisävarmuutta.

3.2 Koelaataston kuivumismittaukset

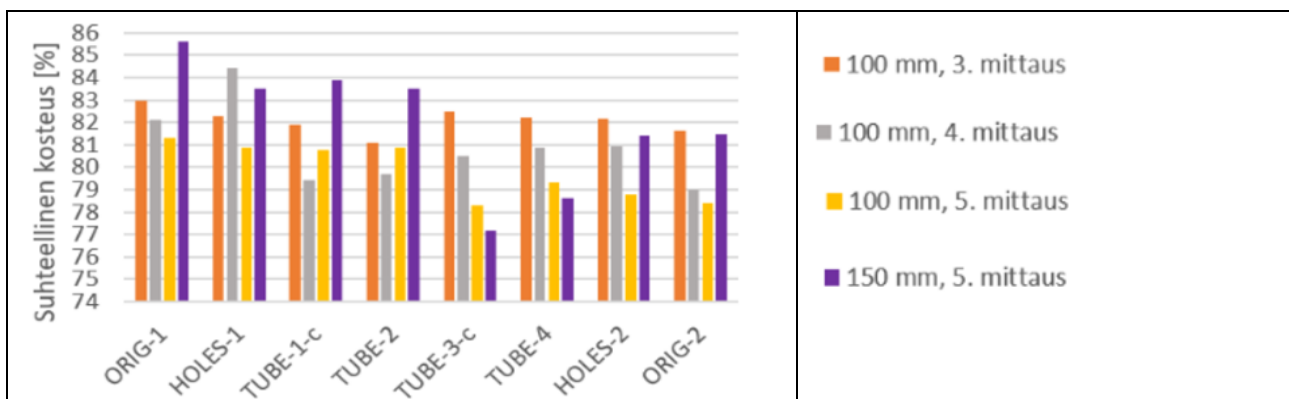
Kuva 3 esittää suhteellisen kosteuden kehityksen 85 mm syvyydellä. Suhteellisen kosteuden vaihteluväli on ollut lattianpäällysteen asennushetkellä (6.5.2022) noin 6 %-yksikköä ja syyskuun 2022 lopulla noin 10 %-yksikköä. Palkit ovat jakaantuneet päällystämisen jälkeen kolmeen ryhmään. ORIG-1 -palkissa suhteellinen kosteus on ollut selvästi korkein, mihin on epäilemättä

vaikuttanut lämpölangan vikaantumisen 2 kk valun jälkeen. HOLES-1-, TUBE-1c-, TUBE-2- ja TUBE-3-c -palkit muodostavat toisen ryhmän. TUBE-3-c -palkin tuloksiin vaikuttaa epäilemättä jälkiasennettujen lämpölankojen sijainti alalaipassa. Palkkiin ei selvästikään ole syntynyt tehokkaan painovoimaisen ilmankierron edellyttämää lämpötilajakaumaa. Muut D32-400 -palkit ovat kuivimpia. Tulokset havainnollistavat erityisesti palkkityypin vaikutusta kuivumiseen.



Kuva 3. Matolog-antureilla mitatut suhteelliset kosteudet 85 mm syvyydellä.

Osoitus kuivatusputkien tehosta näkyy vertailtaessa palkkeihin tehtyjen porareikämittausten tuloksia 100 ja 150 mm syvyydellä, kts. Kuva 4. Pienemmissä kuivatusputkellisissa palkkeissa TUBE-3-c ja TUBE-4 on suhteellinen kosteus ollut viimeisellä mittauskerralla alhaisempi 150 mm kuin 100 mm syvyydellä. Kaikissa muissa palkkeissa tilanne on selvästi päinvastoin. On ilmeistä, että pienemmissä palkkeissa kuivatusputken vaikutus on ulottunut 150 mm porareiän alueelle.



Kuva 4. Porareikämittausten tuloksia 100 ja 150 mm syvyyksiltä. Mittauspäivämäärät: 3. mittaus 21.3.2022, 4. mittaus 20.9.2022 ja 5. mittaus 27.-28.11.2023.

4. Organisaatio ja kiitokset

Tässä hankkeessa on tehty ratkaisujen ideoimista Tampereen yliopiston rakennusfysiikan ryhmän ja Peikko Finlandin edustajien kanssa. Näiden perusteella valittiin erilaisia vaihtoehtoja laskennallisiin tarkasteluihin, jotka toteutti Antti Mikkonen. Tämän lisäksi ideoitiin yhteistyössä koerakenteita, jotka tehtiin Peikon tehtaille Lahteen Peikon työntekijöiden toimesta. Tampereen yliopisto toteutti koerakenteiden seurantamittaukset, joista vastasi Tuomas Raunima. Artikkelin ja yhteenvetoraportin kirjoitustyössä ovat olleet mukana lisäksi Tampereelta Ilkka Valovirta ja Peikolta Tuomas Harmaala. Peikon puolelta projektipäällikkönä toimi Juuso Salonen ja hankkeen johtajana Esa Rusila. Tampereen yliopiston puolelta projektipäällikkönä toimi Eero Tuominen ja koko hankkeen vastuullisena johtajana Juha Vinha. Kiitämme kaikkia hankkeessa mukana olleita ja avustaneita henkilöitä arvokkaasta työpanoksesta hankkeen toteutuksessa.

5. Yhteenveto

Mallinnuksen perusteella kaikki tutkitut kuivatusratkaisut tehostavat kuivumista. Kuivatusputket nopeuttivat palkkien kuivumista myös mittauksissa, joten ne todettiin alalaipan rei'itystä lupaavammaksi kuivatustavaksi. Kuivatusputkien vahvuutena on nimenomaan kosteudenpoisto palkin sisäosista. Tämä vähentää kosteutta lattianpäällysteen alla rakenteen pinnoituksen jälkeen kosteuden tasaantuessa palkin sisällä ja valusaumoissa. Koska kuivatusputkien toiminnan edellytyksenä on lämpötilaerojen aiheuttama ilmavirtaus putken sisällä, tulee mahdolliset vaurioituneet lämpölangat korvata ulkopuolisilla lämpölangoilla tai ilmankierto kuivatusputkessa on järjestettävä muulla tavalla.

Kokeellinen tutkimus tehtiin hallituissa olosuhteissa. Ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus olivat betonin kuivumiselle edullisia ja betonin vesi-sideainesuhde alhainen. Rakenne ei myöskään päässyt kastumaan valun jälkeen, mikä on riskinä työmaaolosuhteissa. Näistä perusasioista huolehdittaessa rakenteen päällystämistä voitiin aikaistaa huomattavasti suunnitellusta.

Valuun upotettavilla antureilla voidaan tarkkailla palkkien kuivumisnopeutta ja lämpötilaa ja siten ennakoida välipohjan sopivaa päällystämisaikajankohtaa. Betonin kuivuminen voidaan tällöin varmistaa täsmällisesti ajoitetulla porareikämittauksella. Anturit kannattaa sijoittaa palkin ja ontelolaatan saumaan, uumareiän kohdalle, porareikämittausten arviointisyvyydelle ja vähintään 1,2 m etäisyydelle DELTABEAM® -palkin päästä.

Lähdeluettelo

- [1] ”Päällystettyjen elementtirakenteisten välipohjien kosteustekninen toimivuus osana rakennuksen tervettä elinkaarta. Asiantuntija-artikkeli”. Peikko Finland Oy, huhtikuuta 2016.
- [2] P. Sekki ja K. Viljanen, ”Betonirakenteiden kosteuskäyttämisen arviointi mallintamalla”, teoksessa *Rakennusfysiikka 2015 - Uusimmat tutkimustulokset ja käytännön ratkaisut*, teoksessa *Rakennustekniikan laitos. Rakennustekniikka. Seminaarijulkaisu 4. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto ja RIL ry, 22.10 2015, ss. 175–180.*
- [3] J. Salonen, ”DELTABEAM-liittopalkkirakenteiden kosteudenhallinnan työmaaohjeistus”. Peikko Finland Oy, 2022.
- [4] A. Mikkonen ja J. Vinha, ”Deltabeam – Infill Concrete Drying Time”, Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Tutkimuslaskelma RAK/2709/2024, 2024.
- [5] E. Tuominen ja I. Valovirta, ”Deltabeam-palkin kuivuminen, yhteenvetoraportti”, Tampereen yliopisto, Tampere, RAK/2729/2024, joulou 2024.