

Matti Kähkönen

BETONIN VEDENPAINENERISTYS KRISTALLISOIVILLA LISÄAINEILLA

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kandidaatintyö
Kesäkuu 2019

TIIVISTELMÄ

Matti Kähkönen: Betonin vedenpaineeneristys kristallisoivilla lisäaineilla
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Kandidaatintyö
Kesäkuu 2019

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan kristallisoivien lisäaineiden avulla toteutettua betonin vedenpaineeneristystä. Työssä selvitetään, millaisia vaikutuksia kristallisoivilla lisäaineilla on betonin tiiviyteen sekä muihin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen ja muokattavuuteen. Erityisesti keskityttiin uudisrakentamisessa käytettäviin lisäaineisiin.

Työ tehtiin kirjallisuustutkimuksena käyttäen apuna aiheesta aiemmin tehtyjä tutkimuksia sekä alan muuta kirjallisuutta. Aiheeseen liittyen haastateltiin lisäksi alan asiantuntijoita.

Työssä perehdyttiin betonin ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen sen reagoidessa veden kanssa. Kosteus voi siirtyä rakenteeseen esimerkiksi huokosten tai halkeamien kautta ja se saattaa aiheuttaa esimerkiksi raudoitteiden korroosiota, ulkonäköhaittoja tai betonin rapautumista. Tiiviyttä parantamalla voidaan nämä haitat ehkäistä, jolloin betonirakenteen elinikää saadaan kasvatettua.

Kristallisoivien lisäaineiden toiminta perustuu reaktioon veden, sitoutumattoman sementin ja lisäaineen välillä. Tällöin betonin huokosiin muodostuu kova kiderakenne. Lisäaineita voidaan käyttää monipuolisesti erilaisissa kohteissa, mutta erityisesti perustuksissa, maanpaineeseinissä ja altaissa, joissa tiivis betoni on erittäin tärkeää. Käytettävä betonilaatu ja lisäainemäärä vaikuttavat betonin ominaisuuksiin, joten on suositeltavaa tehdä koekappaleita ja -valuja. Täten betonin laatu saadaan varmistettua.

Kokonaisuudessaan työssä koottiin tietoa kristallisoivien lisäaineiden toimintatavoista, vaikutuksista sekä niiden antamasta lisäarvosta. Lisäaineet eivät muuta huonolaatuista betonia hyväksi, mutta niiden avulla voidaan saavuttaa lisävarmuutta tiiviin betonirakenteen valmistuksessa. Jokaista hanketta tulee kuitenkin tarkastella yksilöllisesti, sillä myös rakenteen ulkopuolisilla olosuhteilla on suuri vaikutus vedenpaineeneristyksen toteutustapaan.

Avainsanat: Betoni, lisäaine, kristallisoituminen, vedenpaine, tiiviys

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on toteutettu Tampereen yliopistolle yhteistyössä Sweco Rakennetekniikka Oy:n kanssa keväällä 2019. Työni ohjaajana toimi Sweco Rakennetekniikka Oy:n puolesta DI Kimmo Fabrin ja Tampereen yliopiston puolesta DI Toni Pakkala.

Haluan kiittää Sweco Rakennetekniikka Oy:tä mahdollisuudesta tehdä tämä kandidaatintyö. Kiitos myös molemmille ohjaajalleni sekä muille työtäni edesauttaneille osapuolille, ilman teitä työni ei olisi onnistunut.

Eriyinen kiitos myös ystäväilleni jatkuvasta tuesta ja lounasseurasta, saitte pitkät ja raskaat päivät kulumaan jopa rattoisasti.

Tampereella, 2.6.2019

Matti Kähkönen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. BETONI MATERIAALINA	3
2.1 Betonin huokosrakenne	3
2.2 Vesitiivis betonirakenne ja sen suunnittelu	5
2.3 Kosteuden aiheuttamat haitat	7
2.4 Kosteudeneristyksen keinot	8
2.4.1 Paineellinen vesi	8
2.4.2 Menetelmiä vedenpaineeneristyksen toteuttamiseksi	9
3. VEDENPAINENERISTYS KRISTALLISOIVILLA LISÄAINEILLA	11
3.1 Tutkimusmenetelmä vesitiiviin betonin varmistamiseksi	11
3.2 Toimintaperiaate	13
3.3 Vaikutus betonin tiiviyteen	15
3.4 Vaikutus betonin puristus- ja taivutuskestävyyteen	16
3.5 Vaikutus betonin pakkaskestävyyteen	17
3.6 Vaikutus betonin muokkautuvuuteen	18
4. LISÄAINEIDEN KÄYTTÖ	20
4.1 CE-merkintä ja lisäaineen kelpoisuus	20
4.2 Tuotteet	21
4.3 Käyttökohteet	22
5. YHTEENVETO	24
LÄHTEET	26
LIITTEET	29
Liite A: Testiraportti tiivistävien lisäaineiden toiminnasta	29

1. JOHDANTO

Rakennusten seinät, alapohjalaatat ja perustukset ovat usein kosketuksessa maan kanssa, mikä altistaa rakenteet maa-aineksessa olevalle kosteudelle. Pohjaveden pinnan alapuolella vesi pyrkii tunkeutumaan paineen seurauksena rakenteiden läpi, mikä kasvattaa kosteusvaurion riskiä. Paineellisen veden tunkeutumista voidaan eristää muun muassa bitumikermeillä, massaeristeillä tai bentoniittieristeillä. (RT 83-11032 2011, s. 1) Vedenpaineeneristys voidaan toteuttaa myös betonimassaan lisättävillä aineilla, joita tässä kandidaatintyössä erityisesti käsitellään. Lisäaineilla toteutettavien vedeneristystuotteiden suosio on kasvanut maailmalla runsaasti ja tuotteiden markkina-arvon on odotettu kasvavan yli 5 miljardiin euroon vuoteen 2026 mennessä (Wiseguy Research consultant Pvt Ltd).

Puutteellisesta vedenpaineeneristyksestä johtuvat haitat voivat aiheuttaa merkittäviä kustannuksia, ja virheiden korjaaminen on hidasta. Tässä työssä tarkastellaan vesitiiviin betonirakenteen toteuttamista kristallisoivilla lisäaineilla ja millaisia vaikutuksia niillä on muihin betonirakenteen ominaisuuksiin. Lisäaineet reagoivat betonissa olevan veden ja sementin kanssa, minkä seurauksena muodostuu kova kiderakenne, joka estää veden tunkeutumisen rakenteeseen. Työssä tarkastellaan betonimassaan valmistuksen aikana lisättäviä aineita ja rajataan pois valmiin betonirakenteen päälle siveltävät aineet sekä työ- ja liikuntasaumot.

Työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena ja lähdeaineistona käytetään aiemmin aiheesta tehtyjä tutkimuksia, valmistajien verkkosivuja sekä muuta kirjallisuutta. Lisäksi haastatellaan myös alan asiantuntijoita.

Aluksi työssä perehdytään betonin ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen sen reagoiessa veden kanssa. Tämän jälkeen tutustutaan vedenpaineeneristyksen syihin, keinoihin ja tavoitteisiin. Kolmannessa luvussa syvennytään lisäaineilla toteutettavaan vedenpaineeneristykseen. Luvussa tarkastellaan eurokoodin mukaista menetelmää vedenpaineen testaukseen sekä kristallisoivien lisäaineiden toimintaperiaatteita. Tässä osiossa tarkastellaan myös kristallisoivien lisäaineiden vaikutusta betonin muihin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen ja työstedävytyteen.

Neljännessä luvussa käydään läpi lisäaineiden käytön valvontaa sekä esitellään merkittävimpiä Suomen markkinoilla olevia tuotteita. Luvussa perehdytään myös kristallisoivien lisäaineiden käyttökohteisiin. Viimeisessä luvussa kootaan yhteen tärkeimmät työssä tehdyt havainnot sekä niistä tehdyt johtopäätökset.

Kiteytyvät lisäaineet mahdollistavat täysin uusia keinoja toteuttaa vedenpaineeneristys. Ne kuitenkin jakavat mielipiteitä alalla melko jyrkästi. Joidenkin mielestä lisäaineet ovat täysin relevantteja eristyskeinoja, joilla voidaan savuttaa entistä tehokkaampia rakenneratkaisuja. Toiset puolestaan ajattelevat, että lisäaineet eivät anna lisäarvoa vedenpaineeneristykselle ja voivat jopa heikentää betonirakennetta. Kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, miten vesitiiviit betonirakenteet toteutetaan lisäaineiden avulla ja millaista lisäarvoa ne antavat rakenteelle. Työssä selvitetään myös, miten kristallisoivat lisäaineet vaikuttavat betonin muihin ominaisuuksiin.

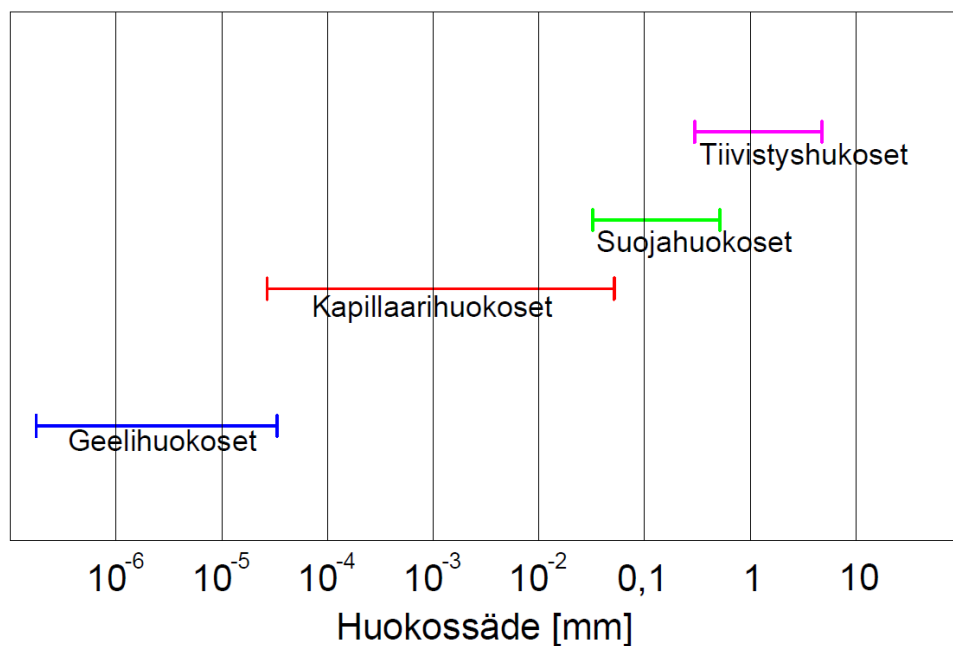
2. BETONI MATERIAALINA

Betoni on rakennusmateriaalina erittäin lujaa ja kestää hyvin siihen kohdistuvia puristusvoimia. Vetojännityksiä betoni kestää puolestaan huonosti, minkä takia betonirakenteet tulee raudoittaa. (by 201 2018, s. 17)

Betonin valmistukseen käytetään kolmea pääraaka-ainetta: kiviainesta, sementtiä ja vettä. Sementin ja veden reagoiessa keskenään hydrataatioreaktiossa syntyy sementtiliimaa, jota kovettuttuaan nimitetään sementtikiveksi. Sementtikivi sitoo betonin muut ainesosat yhteen ja antaa betonille sen lujuuden. Valmistuksessa voidaan myös käyttää erilaisia seos- ja lisäaineita, joilla voidaan korvata sementtiä tai kiviainesta sekä parantaa betonin ominaisuuksia. (by 201 2018, s. 24)

2.1 Betonin huokosrakenne

Hydrataatioreaktio jatkuu niin kauan kuin betonimassassa on jäljellä reagoimatonta sementtiä ja vettä (by 201 2018, s. 36). Hyvin usein sementti on reaktion rajoittava tekijä, sillä betoni, jolla on liian alhainen vesi-sementtisuhte, on vaikeasti työstettävää. Reaktion jälkeen betonimassassa on siis kiviainesta, sementtikiveä sekä huokosia, jotka ovat täyttyneet vedellä. (by 201 2018, s.81, 82) Huokokset vaikuttavat betonin käyttäytymiseen eri tavoin ja niiden kokoa on havainnollistettu kuvassa 1.



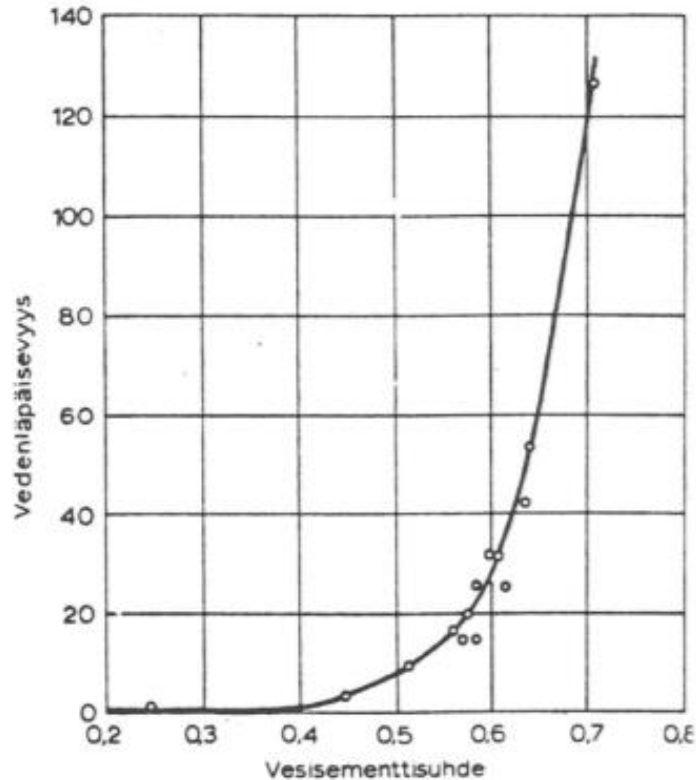
Kuva 1. Betonin huokosten koot (by 201 2018, s. 82).

Geelihuokokset ovat pienimpiä, kooltaan 1–5 nm ja aina hygroskooppisesti vesitäytteisiä. Huokokset siis sitovat ympäristöstä vettä itseensä. Geelihuokokset sijaitsevat sementtikivessä, eikä niillä ole vaikutusta betonin vedenläpäisevyyteen, sillä veden liike huokosissa on todella vähäistä. (by 201 2018, s. 81)

Kapillaarihuokokset ovat puolestaan kooltaan noin 0,01–50 µm, ja ne syntyvät ylimääräisen veden haihtuessa pois betonimassasta. Kapillaarihuokosten imuvoima on verrattain pieni. Niiden imunopeus puolestaan on erittäin suuri ja vaikutus betonin vedenläpäisevyyteen merkittävä. Tämän vuoksi kapillaarihuokosten määrä tulisi minimoida hyvälaatuisen betonin valmistuksessa. (by 201 2018, s. 81–84)

Gravitaatiohuokosiin lukeutuvat suojahuokokset, tiivistyshuokokset ja betonin halkeamat. Huokosten koko on yleensä yli 50 µm. Suojahuokokset muodostetaan betonin lisäaineena käytettävien huokostimien avulla, ja ne ovat optimikooltaan noin 25–300 µm. (Tiehallinto 2007, s. 26) Suojahuokosten tavoitteena on parantaa betonin pakkasenkestävyyttä, sillä kapillaarihuokosissa olevan veden jäätyessään aiheuttama paine pääsee purkautumaan suojahuokosiin (by 201 2018, s. 84, 117–118).

Betoni on huokoinen materiaali, jonka huokosrakenne riippuu ensi sijassa veden ja sementin suhteesta. Ideaalitalanteessa vesi-sementtisuhte on 0,4, jolloin kapillaarihuokosia ei muodostu laisinkaan. Suhteen ollessa alle 0,6 betoniin muodostuu kapillaariverkosto, joka ei kuitenkaan ole yhtenäinen. Suhteen ollessa yli 0,7 syntyy yhtenäinen kapillaariverkosto, joka mahdollistaa veden helpon siirtävyyden rakenteen läpi. (by 201 2018, s. 81–84) Betonin vedenläpäisevyyttä on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Sementin vesi-sementtisuhteen vaikutus vedenläpäisevyyteen (Iso-Mustajärvi 2016, s. 136)

Vesi-sementtisuhte vaikuttaa kuitenkin betonin työstettävyyteen: mitä pienempi suhde on, sitä jäykempää betonimassa on ja sen työstettävyys vaikeutuu. Betonin valmistuksessa voidaan käyttää notkistimia, joiden avulla betonimassa saadaan notkeammaksi ja helpommin työstettäväksi. (by 201 2018, s. 62)

2.2 Vesitiivis betonirakenne ja sen suunnittelu

Veden- ja vedenpaineeneristyksen päätavoitteena on aina muodostaa vesitiivis betonirakenne. Rakenne koostuu vesitiivistä betonista ja rakenteellisista yksityiskohdista, kuten rakennesaumoista. Vedenpitävyyttä vaaditaan esimerkiksi pohjavedenpinnan alapuolisilta rakenteilta, maanpaineeseiniltä, padoilta ja säiliöiltä. (Iso-Mustajärvi 2016, s. 135) Yksityiskohdtien huomioiminen suunnittelussa onkin ensiarvoisen tärkeää.

Saumat ovat betonirakenteiden heikoimpia kohtia. Esimerkiksi työsaumat vuotavat tavallisesti vettä, ellei niihin kohdisteta erikoistoimenpiteitä, kuten injektointia. Vedenpaineelle alttiiden rakenteiden tulisi olla yhtenäisiä, eikä sisältää liikuntasauvoja, sillä ne ovat suunniteltaan ja toteutukseltaan vaativia edellyttäen erikoisosaamista. (RT 83-11032 2011, s. 12)

Vesitiiviin betonirakenteen tulee olla halkeilematon, mikä vaatii betoniin kohdistuvien jännitysten hallintaa. Rakenne on heti valusta asti alttiina esimerkiksi estetyn kutistuman, rakenteelle kohdistuvien kuormien ja lämpötilamuutosten aiheuttamille vetojännityksille. Vetojännitykset voivat aiheuttaa betoniin halkeamia tai harventaa huokosrakennetta. (RT 83-11032 2011, s. 10)

Betonirakenteet voidaan jakaa neljään tiiviysluokkaan sen mukaan, miten paljon vuotoa rakenteen odotetaan päästävän lävitseen. Tiiviysluokassa 0 nesteiden vuodolla ei ole merkitystä, luokassa 1 vuoto tulee rajoittaa pieneen määrää ja pinnan tahriintuminen on hyväksyttävä. Luokassa 2 tahriintuminen ei saa heikentää rakenteen ulkonäköä, joten vuodon on oltava minimaalista. Luokassa 3 vuotoa ei sallita lainkaan, jolloin rakenteen vesitiiveyden varmistamiseen vaaditaan usein erityistoimenpiteitä, kuten vuorausta tai vesitiiviitä työsaumoja. (SFS-EN 1992-3 2006, s. 10)

Suunniteltaessa vesitiiviitä betonirakenteita tulee kiinnittää erityistä huomiota betonin suhteitukseen. Kiviaineksen, sementin ja seosaineiden keskinäisten suhteiden tulee olla sellaisia, että betonista saadaan lujaa ja erikokoiset partikkelit pakkautuvat mahdollisimman tiiviisti toistensa lomaan. Näin saadaan minimoitua betoniin syntyvät tyhjät tilat. Käytettäessä riittävän suurta maksimiraekokoa saadaan myös pienennettyä kutistumia, jotka aiheuttavat rakenteen halkeilua. Kutistumiin voidaan vaikuttaa myös vesi-sementtisuhteen ja erilaisten lisäaineiden avulla. (Paukku, haastattelu 24.5.2019) Yleensä betonin valmistaja määrittelee massalle vesi-sementtisuhteen, mutta rasitusluokissa XD ja XS, eli kloridien aiheuttamassa korroosiossa, suunnittelija on vastuussa suhteen valinnasta. Suunnittelijan on kuitenkin tarkistettava, että betoni täyttää sen muut vaatimukset ja betonin valmistus on kyseisellä vesi-sementtisuhteella mahdollista. (by 68 2016, s. 10)

Hanka (2019) mainitsee tärkeimmiksi lähtökohdiksi vesitiiviin betonin suunnittelussa tiiviysluokituksen valinnan lisäksi lämpötilakuormien yhdistelyt vedenpaineen kanssa sekä riittävän raudoituksen läpihalkeilun rajoittamiseksi. Hanka nimeää tärkeäksi lähtökohdaksi myös riittävän jälkijännittämisen, jos tarkastellaan tiiviysluokka 3:n rakenteita. (Hanka, haastattelu 24.5.2019)

Työmaalla käytettävä valutekniikka on suunniteltava ja valittava huolella eritoten vaikeissa, esimerkiksi raskaasti raudoitetuissa tai vain yhdeltä sivulta valettavissa kohteissa. Valutekniikka vaikuttaa myös betonimassan koostumuksen valintaan. Haastaviin kohteisiin suositellaan tehtäväksi koevalua, jonka avulla saadaan selville työtekniikan tai -tavan puutteet juuri kyseisessä kohteessa. Koevalun ei tarvitse välttämättä olla täydessä mittakaavassa, sillä pienemmänkin mittakaavan valusta saadaan arvokasta tietoa. (Paukku, haastattelu 24.5.2019)

Vesitiiviin rakenteen suunnittelussa voi tapahtua myös isoja virheitä, joiden myötä rakenteen vesitiiviyys alenee huomattavasti. Hanka (2019) mainitsee tällaisiksi tilanteiksi esimerkiksi

maanpaineeseinissä estetyn muodonmuutoksen huomiotta jättämisen tai jälkijännitetyjen rakenteiden vähäiset irrotukset. Maanpaineeseinässä vaarana on, että se valetaan esimerkiksi kalliota vasten, mutta pituussuuntaista raudoitusta on liian vähän. Tällöin tuloksena on ei-vesitiivis-betonirakenne, jossa on halkeamia muutaman metrin välein. Jälkijännitetyissä rakenteissa liian vähäisten irrotusten takia puristava jännevoima ei siirry suunnitellusti rakenteeseen, jolloin pakotettu muodonmuutos aiheuttaa läpihalkeilua. (Hanka, haastattelu 24.5.2019) Paukku (2019) puolestaan mainitsee vaaraksi työn toteutuksen puutteellisen suunnittelun, jolloin betonoinnissa tehdään virheitä. Rakenne saattaa olla puutteellisesti tiivistetty tai massassa voi ilmetä erottumista tai lajittumista. (Paukku, haastattelu 24.5.2019)

2.3 Kosteuden aiheuttamat haitat

Kuten alaluvussa 2.1 kerrottiin, betonin kapillaarihuokokset mahdollistavat veden liikkumisen betonirakenteessa. Tästä syystä vesi altistaa rakenteet kosteusrasitukselle, joka voidaan havaita esimerkiksi maanvastaisen seinän pinnoitteen irtoiluna, värjäytymisenä tai materiaalien mikrobivaurioina (FISE 2016, s. 1).

Betonirakenteissa olevien terästen korroosio eli ruostuminen pienentää niiden poikkipinta-alaa heikentäen samalla rakenteen kestävyyttä. Ruoste on tilavuudeltaan jopa neljä kertaa isompaa, eikä betonissa ole tilaa vastaanottaa muodonmuutosta. Korroosio aiheuttaa betoniin sisäisiä jännitystiloja, joiden seurauksena betoni halkeaa. (by 201 2018, s. 110) Korroosion edellytyksenä on sopiva kosteuspitoisuus ja riittävä hapen kulkeutuminen terästen läheisyyteen. Kloridit, eli suolat, puolestaan nopeuttavat ruostumista ja saattavat paikoin aiheuttaa suuriakin muutoksia terästen poikkipinta-aloissa (by 2011 2018, s. 109). Pohjaveden korkea kloridipitoisuus johtuu yleensä teiden suolauksesta tai jätevesipäästöistä. Eritoten rannikkoseudulla tai vanhojen merenpohjasavien alueella kloridipitoisuudet voivat olla merkittäviä. (Ympäristö nyt 2015)

Korroosiota pyritään estämään fysikaalisin ja kemiallisin keinoin. Fysikaalisiin keinoihin lukeutuu betonipeitteen paksuuden varmistaminen, kun taas kemiallisiin keinoihin lasketaan betonin korkea pH-arvo. Fysikaalisen suojan toimivuus riippuu betonipeitteen paksuudesta sekä tiivyydestä, johon vaikuttavat muun muassa betonin vesi-sementtisuhde, valuvaiheessa tehty tiivistys sekä jälkihoito. Betonissa olevat halkeamat mahdollistavat veden liikkumisen betonissa ja voivat myöskin olla syynä terästen ruostumiselle. (by 201 2018, s. 108)

Kemiallisiin keinoihin lukeutuu raudoituksen pinnalle emäksisissä olosuhteissa muodostuva oksidikerros, joka estää terästen ruostumisen. Oksidikerroksen vaikutus lakkaa, kun teräksiä ympäröivä pH-arvo on alle 9. (by 201 2018, s. 108) Betonin reagoidessa ilmassa olevan hiilioksidin kanssa betoni karbonatisoituu ja vähitellen sen pH laskee arvoon 8,5. Kloridit voivat aiheuttaa ruostumista jo ennen karbonatisoitumista, joten on tärkeää estää halkeamien syntymistä ja varmistaa betonin tiiviyttä. (by 201 2018, s. 111, 114)

2.4 Kosteudeneristysten keinot

Paras keino estää veden kulkua betonissa on tarpeeksi pieni vesi-sementtisuhte, jonka vuoksi kapillaarihuokosia syntyy vain vähän. Halkeamien muodostumisen on myös oltava hallittua. Niiden syntymistä voidaan rajoittaa betonin sopivan koostumuksen valinnalla, huolellisilla työtavoilla sekä riittävällä jälkihoidolla (by 201 2018, s.102). Raskaasti raudoitettujen perustusten onnistuneen jälkihoidon varmistaminen saattaa kuitenkin olla vaikeaa (Mendes et al. 2014, s. 242).

Jälkihoidossa tulee kiinnittää huomiota rakenteen suojaukseen, veden haihtumisen estämiseen sekä oikeaan kovettumislämpötilaan. Rakenteen kosteana pitäminen on välttämätöntä tavoitellun tiivyyden saavuttamiseksi. Riittävä kosteus voidaan taata betonipinnan kastelulla ja haihtumisen estämisellä esimerkiksi muovikalvoilla tai jälkihoitoaineilla. (by 201 2018, s. 343)

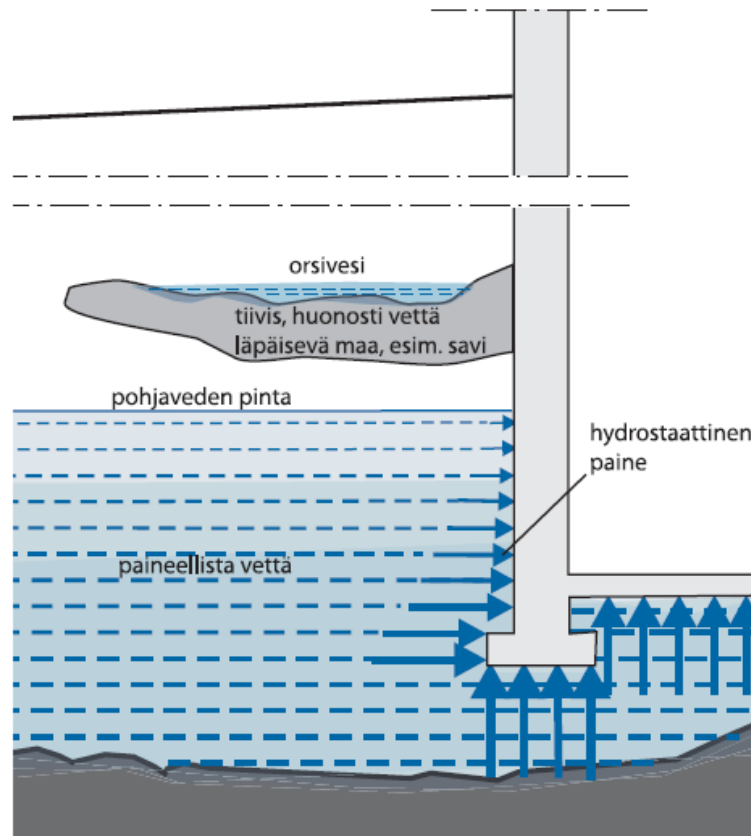
Rakenteen pitkällä käyttöiällä varmistetaan sen kestävyys. Tämä ei kuitenkaan ole tae sen vesitiivyydestä. Esimerkiksi perustukset saattavat pitkästä käyttöiästä huolimatta päästää vettä lävitseen. Näissä tapauksissa vedeneristys on tarpeen. (Mendes et al. 2014, s. 242)

2.4.1 Paineellinen vesi

Pohjavedenpinnan alapuolella maanvastaiseen seinään tai lattiaan kohdistuu jatkuvasti hydrostaattista painetta. Mitä syvemmällä ollaan, sitä suurempi paine rakenteisiin kohdistuu. Hydrostaattinen paine p voidaan laskea kaavalla

$$p = \rho gh, \quad (1)$$

missä ρ on nesteen tiheys (vedellä 1000 kg/m^3), g putoamiskiihtyvyyden ja h tarkasteltava korkeus. (RT 83-11032 2011, s.2) Esimerkiksi viiden metrin syvyydellä hydrostaattisen paineen suuruus on noin 50 kN/m^2 . Kuorma ei ole kuitenkaan tasaista, vaan kasvaa lineaarisesti syvyyden kasvaessa, kuten kuvassa 3 on esitetty.



Kuva 3. Pohjaveden pinnan alapuolinen hydrostaattinen paine (RT 83-11032 2011, s.1)

Vedenpaineeneristyksen tehtävä on estää paineellisen veden tunkeutuminen rakenteeseen tai rakennusosiin, sekä kestettävä vedenpaineen aiheuttamat rasitukset suunnitelmien mukaisen käyttöajan ajan. Rakenteen tulee kestää myös muut kuormat, jotka aiheutuvat muun muassa maanpaineesta, hyötykuormista tai kutistumisesta johtuvasta rasituksesta. (RT 83-11032 2011, s. 3)

2.4.2 Menetelmiä vedenpaineeneristyksen toteuttamiseksi

Vedenpaineeneristys voidaan toteuttaa esimerkiksi bitumikermeillä, massa- tai bentoniit- tieristeillä. Kohteissa, joissa rakenteen läpi kulkeutuvan kosteuden määrä on minimoitava, voidaan käyttää erilaisia yhdistelmiä, kuten vesitiivistä betonia ja bitumikermejä.

Bitumikermit ovat tukikerroksellisia vedeneristyskermejä, jotka on valmistettu kumista tai muovista ja ne asennetaan betonirakenteen ulkopintaan. Kermejä voidaan käyttää aina 30 metrin suureen vedenpaineeseen ja +50 °C lämpötilaan saakka. (RT 83-11032 2011, s. 1–2) Kermien käyttömahdollisuudet ovatkin siis varsin laajat, mutta niiden asennuksessa tulee huolehtia kermien kiinnityksestä ja limityksestä (RT 83-10955 2009, s. 5–7). Kermien määrää

säädellään vedenpaineen suuruuden mukaan ja esimerkiksi paineen suuruuden ollessa 5...10 m, käytetään neljää bitumikermiä (RT 83-11032 2011, s. 6). Huonolaatuinen asennustyö heijastuu kustannusten kasvamisena ja Mendes et al. (2014, s. 242) toteavatkin, että perustusten esiin kaivaminen on todella vaikeaa tai jopa mahdotonta sekä lisäksi erittäin kallista.

Bentoniittieristeet ovat puolestaan pehmeää ja helposti muovautuvaa savea, joka pystyy sitomaan itseensä suuria määriä vettä ja sen tilavuus voi kasvaa oikeissa olosuhteissa jopa kymmenkertaiseksi. Laajentuessaan bentoniitti täyttää saumat ja pienet halkeamat, jolloin muodostuu yhtenäinen tiivis pinta. Bentoniitti asennetaan yleensä mattoina, jotka koostuvat kahdesta kuitukankaasta ja niiden välissä olevasta bentoniittisavesta. Yksittäisiin vaikeampiin kohtiin voidaan käyttää jopa irrallista bentoniittisavea. Bentoniittimattoa asennettaessa asennuspinnan tulee olla mahdollisimman suoraviivainen ja yhtenäinen. (RT 83-11032 2011, s. 10)

Massaeristeet ovat aineita, joita levitetään valmistajan ohjeiden mukaan valmiin betonirakenteen pintaan, jolloin betonin huokokset täyttyvät. Eristeessä olevat lisäaineet kulkeutuvat betonin huokosiin ja reagoivat vapaana olevan kalkin ja veden kanssa muodostaen vettä läpäisemättömän kiderakenteen. Eristeen tiivistysvaikutus riippuu kuitenkin betonin huokosrakenteesta. Kiteytymisreaktio etenee aina kosteuden läsnäolosta ja sitä voi verrata betonin hydrataatioon. (RT 83-11032 2011, s. 8, 10) Yleensä massaeristeet asennetaan rakenteen positiiviselle, eli veden kanssa kosketuksessa olevalle puolelle, mutta jotkut aineet voidaan asentaa negatiiviselle, eli kuivalle puolelle (Carter 2019, s. 3; Penetron 2019c, s. 2). Mendesin et al. (2014, s. 243) mukaan kalvomaisia vedeneristystuotteita on kuitenkin erittäin vaikeaa tai mahdotonta korjata. Vedeneristystuotteen kuitenkin mahdollistavat rakennuksen pitkäikäisen käytön, joten tuotteiden kestävyys on tärkeässä roolissa.

3. VEDENPAINEEENERISTYS KRISTALLISOIVILLA LISÄAINEILLA

Vedenpaineeneristykseen käytettävät kristallisoivat lisäaineet koostuvat portlandsementistä, erikoiskäsitellystä kvartsihiekkasta sekä yhdistelmästä aktiivisia kemikaaleja. Tuotevalmistajat ovat kuitenkin pitäneet lisäaineiden tarkan koostumuksen salassa. (Reiterman & Pazderka, 2016, s. 1)

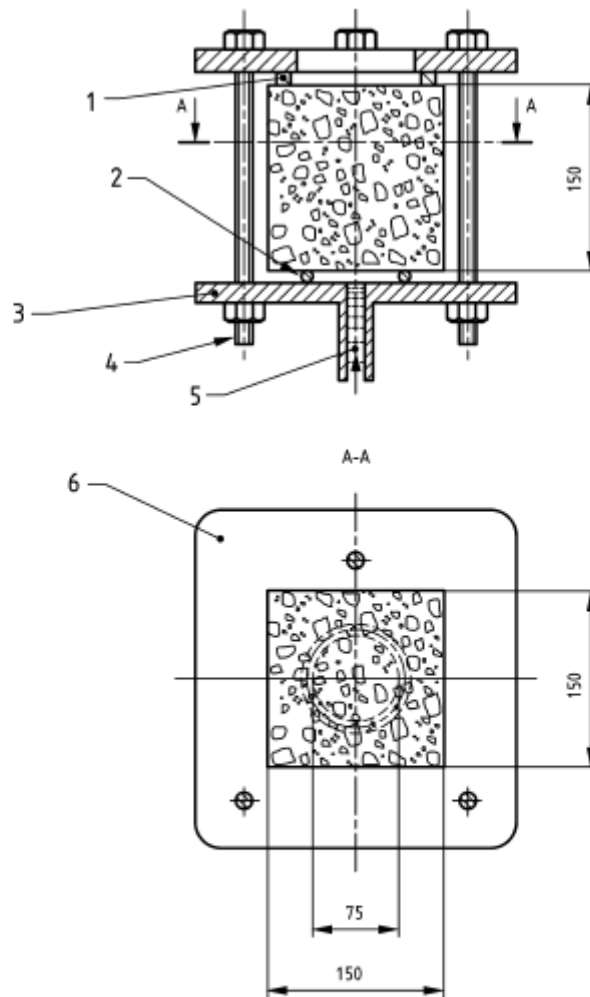
Kristallisoivilla lisäaineilla toteutettua betonia käytetään uudisrakentamisessa, mutta useilta toimijoilta löytyy runsaasti vaihtoehtoja myös korjausrakentamiseen (Reiterman & Pazderka, 2016, s. 2). Lisäaineita käytettäessä on syytä kuitenkin muistaa, että betonin tulee itsessään olla laadukasta, jolloin lisäaineista saadaan paras hyöty. Minkään lisäaineen avulla ei huonoa betonia voida muuttaa hyvälaatuiseksi. (Iso-Mustajärvi 2016, s. 80)

3.1 Tutkimusmenetelmä vesitiiviin betonin varmistamiseksi

Standardissa *SFS-EN 12390-8 2009 Kovettuneen betonin testaus. Osa 8: Paineellisen veden tunkeutumasyvyys* kerrotaan koemenettelystä paineellisen veden tunkeutumasyvyuden selvittämiseen. Tiivistettynä kokeessa kohdistetaan koekappaleeseen vakion suuruinen vedenpaine tietyn ajanjakson ajan. Tämän jälkeen koekappale halkaistaan ja veden tunkeutumisvyvyys mitataan.

Koejärjestelyssä käytettävä kappale voi olla muodoltaan kuutiomainen, lieriömainen tai prismamainen. Testattavan pinnan tulee olla vähintään 150 mm pitkä ja muiden mittojen vähintään 100 mm. Testi suoritetaan vähintään 28 vuorokauden ikäiselle betonille, jonka mitattava pinta on karhennettu teräsharjalla välittömästi muotin purkamisen jälkeen. (SFS-EN 12390-8 2009, s. 6)

Koekappaletta säilytetään standardin *SFS-EN 12390-8 2009 Kovettuneen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten* mukaisesti aivan testaukseen saakka vedessä, jonka lämpötila on 20 ± 2 °C tai kosteushuoneessa vastaavassa lämpötilassa ja yli 95% suhteellisessa kosteudessa. Esimerkki koejärjestelyistä on esitetty kuvassa 4.



Selite	
1	Kuormituslista
2	Tiivisterengas
3	Kierteisiin kiinnitetty levy
4	Kierretanko
5	Paineellinen vesi
6	Kierteisiin kiinnitetty levy

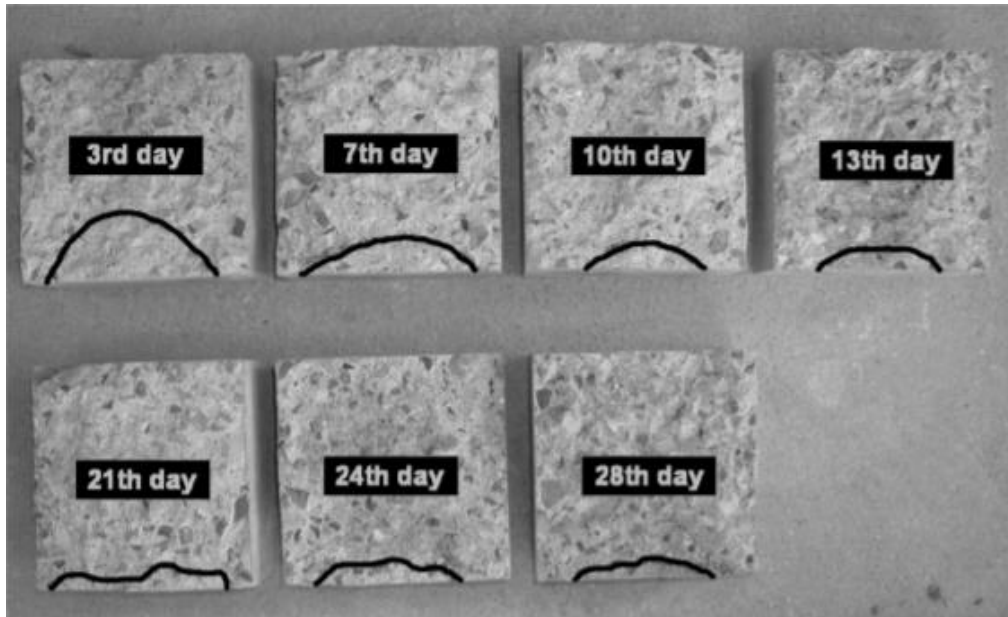
Kuva 4. Paineellisen veden tukeutumasyvyyden koejärjestely (SFS-EN 12390-8 2009, s. 5)

Koekappale kiinnitetään paikoilleen kahden levyn väliin kierretankojen avulla. Levyjen ja kappaleen väliin laitetaan kuormituslista ja tiivistysrenkas. Tiivistysrenkas on halkaisijaltaan noin puolet testattavan pinnan pituudesta tai halkaisijasta. Paineellinen vesi johdetaan joko kappaleen pohjaan tai yläpintaan. (SFS-EN 12390-8 2009, s. 6)

Koe suoritetaan vähintään 28 vuorokauden ikäiselle kappaleelle ja sen pintaan kohdistetaan (500 ± 50) kPa suuruinen vedenpainon (72 ± 2) tunnin ajan. Kappaleen muita pintoja tarkkailaan ajoittain kokeen aikana ja jos vettä havaitaan, tulee mittaustuloksen kelpoisuus arvioida

tapauskohtaisesti. (SFS-EN 12390-8 2006, s. 6) Koekappaleeseen kohdistuva vedenpaine vastaa kaavan (1) mukaisesti noin 50 metrin syvyydellä olevaa vedenpainetta.

Vedenpaineen vaikutuksen jälkeen kappale poistetaan laitteesta ja sen pinta pyyhitään ylimääräisestä vedestä. Kappale halkaistaan kohtisuoraa kuormitettua pintaa vastaan, jolloin saadaan paljastettua betonin sisäpinta. Halkaisupinnan annetaan kuivua sen aikaa, että veden tunkeutumissyvyys pystytään selvästi havaitsemaan. Vesirintaman sijainti merkataan koekappaleisiin kuvan 5 mukaisesti. Suurin tunkeutumasyvyys mitataan koealueen alla ja merkitään muistiin millimetrin tarkkuudella. (SFS-EN 12390-8 2006, s. 6)



Kuva 5. Vesirintaman sijainti koekappaleissa eri aikajaksoissa (Pazderka & Hájková 2016, s. 308)

Kokeesta tehdään testiraportti, jonka tulee sisältää muun muassa tiedot testauspäivän olosuhteista ja koekappaleista, maksimitunkeutumasyvyys sekä mahdolliset syntyneet poikkeamat (SFS-EN 12390-8 2006, s. 6). Liitteessä A on esitetty tarkemmin kolmelle testikappaleelle ja yhdelle vertailukappaleelle tehtyjen kokeiden tulokset.

Betoni voidaan todeta vesitiiviiksi, jos edellä esitellyn koejärjestelyn mukaisesti testattu tunkeutumasyvyys on alle 100 mm (by 65 2016, s. 97). Vesitiiviys ei ole normaalisti ongelma yli C30/37 luokan betoneilla. Sen sijaan alhaista lujuusluokkaa, karkeaa sementtiä tai pientä sideainemäärää käytettäessä saattaa vesitiiviys aiheuttaa hankaluuksia. (by 68 2016, s. 51)

3.2 Toimintaperiaate

Kristallisoivilla lisäaineilla toteutettava vedenpaineeneristys perustuu samantapaiseen teknologiaan kuin massaeristeet. Lisäaine siis reagoi betonissa olevan veden sekä sementin kanssa muodostaen ajan myötä kovan kiderakenteen. Neulamaiset kiteet kasvavat betonin

huokosten sisällä ja muokkaavat siten betonin huokosrakennetta tehden siitä vesitiiviin. (Reiterman & Pazderka 2016, s. 1)

Lisäaine voi olla joko nestemäisenä tai jauheena. Aine lisätään betonimassaan sen valmistuksen aikana, jolloin siitä tulee yhtenäinen osa betonimatriisia. Lisäaine aloittaa reagoinnin vasta kun rakenne on valettu ja tiivistetty, eli kun betonin liike seisahtuu, jolloin syntyvät sidokset eivät rikkoudu. (Sulin, haastattelu 30.5.2019)

Kuvassa 6 on esitetty kiderakenteen muodostumista 26 päivän aikana käyttäen hyväksi 5000- kertaisia suurennoksia betonista. Kuvassa vasemmalla on lisäaineetonta betonia ja keskellä lisäaineistettua betonia, jossa reaktio on juuri alkanut. Kuvassa oikealla lisäaine on ehtinyt reagoida 26 vuorokautta, joten kiderakenne on ehtinyt muodostua.



Kuva 6. Kiderakenteen muodostuminen (Xypex 2019a).

Kiderakenteen muodostumisen kesto vaihtelee lämpötilasta johtuen ja sillä onkin suuri vaikutus kiteytymisreaktion etenemiseen. Alhaisissa, alle +5 °C:n, lämpötiloissa kiteytymisreaktio pysähtyy kokonaan ja jatkuu lämpötilan noustessa. Optimaalinen lämpötila lisäaineen toiminnalle on 20 °C. (Sulin, haastattelu 8.4.2019) Tämän vuoksi on tärkeä muistaa huolehtia valun jälkeisestä lämmityksestä ja muusta jälkihoidosta etenkin kylmissä olosuhteissa.

Kaikki lisäaine ei kuitenkaan kulu kiderakenteen muodostumisessa, vaan se on yhtenäinen osa betonirakennetta. Jos rakenne altistuu kiteiden muodostumisen jälkeen vedelle, käynnistyy reaktio lisäaineen, veden ja sitoutumattoman betonin kanssa uudelleen muodostaen uuden kiderakenteen. (Sulin, haastattelu 8.4.2019) Esimerkiksi usean metrin syvyydessä pohjavedenpinnan alapuolella sijaitsevan hissiuilun vedenpaineeneristys on helppo hoitaa kristallisoivilla lisäaineilla juuri tämän takia. Oishi ja Taguchi (2019) selostavat, että bitumikermien kiinnitys saattaa ajan saatossa heikentyä, tai olla alun perin huono, jolloin vesi pääsee betonirakenteeseen. Ajan kuluessa vesi kulkeutuu betonin huokosissa ja päätyy hissiuiliin. Tässä vaiheessa on mahdotonta tunnistaa vaurioitunutta osaa kermeissä, joten betonia joudutaan injektoimaan. Injektointi auttaa kuitenkin vain paikallisesti, sillä vesi siirtyy seuraavaan heikkoon kohtaan betonissa, mikä puolestaan johtaa jatkuvaan, mutta tehottoomaan injektointisykliin. (Oishi & Taguchi 2019, s. 2) Kristallisoivien lisäaineiden suurin etu saavutetaan kuitenkin aikataulusäästöissä, sillä aine on toiminnassa heti valun yhteydessä. Kermeissä ja muissa pinta-asennettavissa eristysvaihtoehdoissa tulee olla riittävä ja selkeä

alue urakoitsijalle. Työmaa etenee vaiheittain, joten vedeneristystyö toteutetaan myös osissa. (Sulin, haastattelu 30.5.2019)

3.3 Vaikutus betonin tiiviyyteen

Kristallisoivia lisäaineita käytetään pääsääntöisesti betonin tiiveyden parantamiseen, sillä ne täyttävät kapillaarihuokosia ja halkeamia pidentäen samalla rakenteen elinikää. Lisäaineiden tehoa on testattu useilla laboratoriokokeilla ja tulokset ovat olleet vakuuttavia (Pazderka, Hájková, 2016 s. 306)

Technical and Testing Construction Instituten (2009) toteuttama tutkimus esimerkiksi osoitti, että lisäaineistetun betonin vedenpaineeneristävyys parani vertailukappaleeseen verrattuna jopa 90%. Vertailukappaleen vedentunkeutuman keskiarvo oli 113,3 mm, kun taas yhden painoprosentin lisäainepitoisuus pienensi tunkeutumaa arvoon 25 mm. Kahden painoprosentin lisäainemäärällä tunkeutuma pieneni arvoon 10,3 mm. Tutkimuksessa käytetty betoni ei aluksi ollut vesitiivistä, mutta lisäaineistetut kappaleet täyttivät Betoninormeissa (by 65 2016, s. 97) määritellyn 100 mm rajan helposti. Technical and Testing Construction Institute (2009, s. 2–3) Liitteessä A olevassa Contestan (2019) tekemässä tutkimuksessa kristallisoiva lisäaine pienensi veden tukeutumaa vertailuarvosta 35 mm arvoon 26 mm ja 15 mm riippuen lisäainepitoisuudesta. Vedenpaineeneristys parani myös Betocrete CP 360-WP -lisäaineelle tehdyille testeille, joiden tulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. *Betocrete® CP 360-WP lisäaineelle toteutetun vedenpaineeneristyskokeen tulokset (MPA Hannover 2017, s. 4).*

	Vertailukappale	CP 360-WP
Näytteen numero	Maksimitunkeutuma	Maksimitunkeutuma
1	20	14
2	23	13
Keskiarvo	22	14

Tulosten eroavaisuudet eri tutkimusten välillä johtuvat todennäköisesti betonikappaleiden ominaisuuksien, kuten vesi-sementtisuhteen tai lujuusluokan, vaihtelusta. Aina ei voida etukäteen tietää, miten lisäaine reagoi betoni tai siinä olevien lisäaineiden kanssa, joten koh-teissa käytettävistä betonimassoista tulee tehdä ennakkokokeita (Paukku, haastattelu 24.5.2019).

Betonilla on kyky tiivistää itse pieniä halkeamia ja ilmiötä kutsutaan itsetiivistymiseksi. Itsetiivistyminen kuitenkin edellyttää, että betonissa on hydratoitumatonta sementtiä ja halkeaman leveys ei vaihtele ajan kuluessa. Läpivirtaava vesi ei puolestaan saa olla hapanta tai liian

voimakkaasti virtaavaa. Betonin pinnalla oleva vesi ei myöskään saa haihtua pois. Tiivistymisreaktiossa sementissä oleva kalsiumhydroksidi karbonatisoituu ja reaktiotuotteet kiteytyvät halkeamaan veden haihtuessa pois. (by 201 2016, s. 107) Li & Yang (2007) osoittivat, että erään kuitubetonin täydellinen itsetiivistyminen vaatii alle 50 µm:n halkeamaleveyttä. Itsetiivistymisen vaikutus loppuu, kun halkeamaleveyden arvo on yli 150 µm. (Li & Yang 2007, s. 172–173). Sisophon et. al (2012) puolestaan osoittivat, että 150 µm halkeamaleveys riitti täydelliseen tiivistymiseen 28 päivässä. Isompia halkeamia, jotka olivat kokoluokkaa 250–400 µm saatiin tiivistettyä kokonaan kristallisoivan ja laajentavan lisäaineen avulla, joiden toimintaperiaatteet ovat samanlaisia. (Sisophon et. al 2012, s. 573)

Betonirakenteet voivat altistua useille kemiallisille aineille, kuten klorideille, sulfaateille tai muille haitallisille aineille. Jos rakenteen mikrorakenne on rikkonainen, helpottuu haitallisten aineiden tunkeutuminen betoniin ja siten lyhentää sen käyttöikää sekä kasvattaa vaurioiden mahdollisuutta. (Paukku, haastattelu 24.5.2019) Kristallisoivien lisäaineiden tiivistävä vaikutus voi siis parantaa betonin kemiallista kestoaa.

3.4 Vaikutus betonin puristus- ja taivutuskestävyyteen

Pazderka ja Hájková (2016) tähdentävät, että kristallisoivien lisäaineiden kokonaisvaltaisessa arvioinnissa tulee ottaa huomioon vedeneristyskyvyn lisäksi aineiden vaikutus betonin puristuslujuuteen. Puristuslujuus on yksi perusparametreista kantavissa betonirakenteissa, joten sitä ei voi jättää huomiotta. (Pazderka & Hájková 2016, s. 306)

Jotkut lisäainevalmistajat väittävät, että betonin puristuslujuus kasvaisi lisäaineiden myötä. Kuitenkin 2 %:n lisäainemäärä heikensi lievästi betonin puristuslujuutta. Mahdollinen puristuslujuuden kasvu tapahtuu todennäköisesti 28 vuorokauden jälkeen. (Pazderka & Hájková 2016, s. 310) Myös Betocrete CP 360-WP -lisäaineelle toteutetut puristuslujuuskokeet antoivat saman suuruusluokan arvoja 28 vuorokauden ikäiselle betonille (MPA Hannover 2017, s. 4). Xypex Admix C-1000NF -lisäaineelle tehtyjen mittausten perusteella betonin puristuslujuudet kuitenkin paranivat 6–11 %. riippuen lisäainepitoisuudesta ja lentotuhkan määrästä (Kao 2003, s. 4).

Al-Kheetan et.al. (2019) saivat tutkimuksessaan ristiriitaisia arvoja kristallisoivien lisäaineiden puristuslujuuteen. Tutkimus osoitti, että koekappaleet, joiden vesi-sementtisuhte oli 0,32 ja 0,37 ja joissa on käytetty 2 % tai 4 % silikaattipohjaista kristallisoivaa lisäainetta, puristuslujuus kasvoi 13,1...42,2 % 28 vuorokauden ikäisillä betonikappaleilla. Isommilla vesi-sementtisuhteilla (0,40 ja 0,46) puristuslujuudet kuitenkin heikkenivät 19,8...32 %. (Al-Kheetan et.al. 2019, s. 306). Ei siis voida olettaa, että kristallisoivilla lisäaineilla olisi suoraa parantavaa vaikutusta betonin lujuuteen. Sulin (haastattelu 8.4.2019) arvioikin, että joidenkin markkinoilla olevien tuotteiden heikentävät vaikutukset betonin lujuuteen ovat suurin haaste lisäaineiden tulevaisuuden kannalta.

Al-Kheetan et.al. (2019) osoittivat tutkimuksessaan myös, että silikaattipohjaisilla kristallisoivilla lisäaineilla on lujuutta lisäävä vaikutus taivutuskestävyyteen, kun käytetään pieniä vesi-sementtisuhteita (0,32 tai 0,37). Isommilla vesi-sementtisuhteilla (0,4 tai 0,46) vaikutus oli päinvastainen. Al-Kheetan et.al. (2019, s. 6)

3.5 Vaikutus betonin pakkaskestävyyteen

Betonin altistuessa pakkaselle, huokosissa oleva vesi jäätyy ja sen tilavuus kasvaa noin 9%, jolloin huokosiin muodostuu painetta. Jos paine ei pääse purkautumaan minnekään, se aiheuttaa betoniin sisäisiä halkeamia, joihin vesi pääsee imeytymään betonin sulaessa ja kasvuessa uudelleen. Toistuvat jäätymis- ja sulamisvaiheet aiheuttavat betonin rapautumista. (Iso-Mustajärvi 2016, s. 141–142) Betonin pakkaskestävyyttä parannetaan muodostamalla betoniin suojahuokosia, jonne huokosissa oleva paine pääsee purkautumaan (by201, 84)

Pakkaskestävyyttä mitataan esimerkiksi suojahuokossuhdemäärityksellä, huokosjakomäärityksellä, jäädytys-sulatussykleillä, suolapakkaskokeilla tai erilaisilla laskennallisilla menetelmillä. Betonin suojahuokosiin vaikuttavat monet tekijät, kuten betonin lujuus ja notkeus, jälkihoito, erilaiset seosaineet ja pakkasrasituksen ankaruus. Pakkaskestävässä betonissa on noin 3,5–7% ilmaa, jolloin siihen muodostuu sopiva määrä suojahuokosia. Betonin tiiviyys parantaa myös pakkaskestävyyttä, sillä se vähentää veden imeytymistä. (Iso-Mustajärvi 2016, s. 143, 145). Kristallisoivilla lisäaineilla saattaa siis olla betonin pakkaskestävyyttä parantava vaikutus.

Alalla ollaan huolestuneita siitä, että kristallisoivat lisäaineet saattavat täyttää betonin suojahuokosia ja siten heikentää sen pakkaskestävyyttä. Sulin (2019) vakuuttaa, että suojahuokokset eivät täyty lisäaineen vaikutuksesta, mutta hieman lisäainereaktiota voi huokoseen syntyä. Lähtökohtana kuitenkin on, että kristallisoivien lisäaineiden tiivistävä vaikutus parantaa betonin pakkaskestävyyttä, sillä vesi ei pääse rakenteeseen jäätymään. (Sulin, haastattelu 30.5.2019) Taulukossa 2 on esitetty Betocrete® CP 360-WP lisäaineelle toteutetun jäädytys-sulatuskokeen tulokset.

Taulukko 2. *Betocrete® CP 360-WP* lisäaineen jäädytys-sulatuskokeen keskiarvotulokset (MPA Hannover 2017, s. 5).

		Pintahilseily [g/m ²]		Suhteellinen kimmomoduuli [%]	
		Vertailukappale	CP 360-WP	Vertailukappale	CP 360-WP
Pakkaskierro	0	0	0	100	100
	4	36	51	99	99
	10	167	180	94	98
	14	386	345	91	97
	18	1053	611	85	95
	24	2591	1245	73	96
	28	3680	1671	70	95

Tuloksista voidaan huomata, että lyhyemmällä pakkaskierroilla lisäaineistettu betoni rapautuu enemmän kuin vertailubetoni. Lisäaineistetun betonin pakkasrapautuminen kuitenkin vähennee jopa puoleen pakkaskierrojen määrän kasvaessa.

3.6 Vaikutus betonin muokkautuvuuteen

Betonin muokkautuvuus riippuu kolmesta tekijästä: notkeudesta, koossapysyvyydestä ja tiivistyvyydestä. Näistä kolmesta ainoastaan betonimassan notkeutta voidaan suoranaisesti mitata, kun taas koossapysyvyyttä voidaan arvioida ainoastaan silmämääräisesti. (Iso-Mustajärvi 2016, s.97) Notkeutta mitataan yleensä painuma- tai leviämäkokeen avulla, jotka on esitetty tarkemmin standardeissa *SFS-EN 12350-2* ja *SFS-EN 12350-5* (by 201, s. 71).

Betonimassan ominaisuuksista tärkein on notkeus, joka vaikuttaa betonimassan siirtymiseen muotissa ja muotin täyttymiseen. Notkuteen voidaan vaikuttaa seostussuhteilla ja myös lisäaineita voidaan käyttää tähän tarkoitukseen. Hyvin tiivistyvä betoni täyttää muotin ja liimautuu raudoitukseen joka puolelta, kun taas huonosti tiivistyvää betonia joudutaan tiivistämään esimerkiksi täryttämällä. Väärin tehty täryttäminen saattaa kuitenkin aiheuttaa betonimassan erottumista, eli veden ja hienoaineksen kerrostumista betonin pintaan. Erottuminen heikentää betoniterästen tartuntaa ja sen takia myös betonin lujuusominaisuudet saattavat kärsiä. Betonimassan koossapysyvyydellä tarkoitetaan sen kykyä pysyä homogeenisena aina kuljetuksesta tiivistykseen. (Iso-Mustajärvi 2016, s.95–96)

Sulin (haastattelu 30.5.2019) toteaa, että kristallisoivien lisäaineiden vaikutus alkaa vasta valun jälkeen, joten niillä ei ole vaikutusta työstettävyyteen. Al-Kheetan et.al. (2019) puolestaan osoittivat tutkimuksessaan, että pienillä vesi-sementtisuhteilla (0,37-0,46) silikaattipohjaisen lisäaineen määrän nostaminen kahdesta painoprosentista neljään nosti painumien arvoja. Painumakokeiden arvot jopa kolminkertaistuivat ollen korkeimmillaan 160mm ja luokkaa S4, joka (by 201 2016, s. 70) mukaan kuitenkin hyvin yleisesti käytetty notkeusluokka. Vesi-sementtisuhteen ollessa 0,32 betoni oli lisäainemäärästä riippumatta hyvin jäykkää, eikä painunut ollenkaan. Tiivistysvaikeuksista huolimatta betonissa ei havaittu selviä halkeamia. (Al-Kheetan et.al. 2019, s. 7)

4. LISÄAINEIDEN KÄYTTÖ

Kristallisoivia lisäaineita käytetään laajalla skaalalla erilaisissa kohteissa maailmanlaajuisesti. Tyypillisimpiä kohteita ovat perustukset, maanvastaiset seinät, altaat ja tunnelit. Lisäaineita voidaan käyttää betonin tiiveyden varmistamiseksi tai antamaan kemiallista kestoä.

Lisäaineiden käyttö vaatii aina ammattitaitoa ja tehostettua valvontaa. On aina selvitettävä miten lisäaineet reagoivat keskenään ja millainen vaikutus niillä on betonin ominaisuuksiin. (Iso-Mustajärvi 2016, s. 81; Paukku, haastattelu 24.5.2019)

4.1 CE-merkintä ja lisäaineen kelpoisuus

Suomessa käytettävien betonin lisäaineiden tulee olla CE-merkittyjä, jos ne kuuluvat lisäainestandardin SFS-EN 934 piiriin. Standardin osassa 2 käsitellään betonin lisäaineita, jotka voidaan luokitella standardin mukaan 12:een erilaiseen alakategoriaan. CE-merkinnän saatuaan, tuotteen valmistaja takaa, että lisäaineen ominaisuudet ovat standardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän (ETA:n) mukaisia. Mikäli lisäaine ei ole CE-hyväksytty tai sillä ei ole ETA:n mukaista hyväksyntää, voidaan sen kelpoisuus todentaa varmennustodistuksella. Varmennustodistuksella varmistetaan, että lisäaineilla saadaan tavoitellut ominaisuudet sekä selvitetään mahdolliset sivuvaikutukset. Ympäristöministeriön hyväksymä toimielin voi antaa varmennustodistuksen jatkuvan varmistamisen tai toimituseräkohtaisen näytetarkastuksen perusteella. (by 201 2018, s. 60–61)

Kristallisoiville lisäaineille ei ole täysin omaa standardin *SFS-EN 934-2 (2013)*. *Betonin, laastin ja injektio-laastin lisäaineet. Osa 2: betonin lisäaineet. Määritelmät, vaatimukset, vaatimuksen mukaisuus ja merkintä* mukaista kategoriaa, mutta ne testataan vedenimeytymistä estävien lisäaineiden mukaisesti (Sulin, haastattelu 8.4.2019). Testin osat on esitetty kuvassa 7.

Nro	Ominaisuus	Vertailulaasti/-betoni	Testausmenetelmä	Vaatimukset
1	Kapillaarinen imeytyminen	EN 480-1 vertailulaasti	EN 480-5	Testattuna 7 vrk:n ajan 7 vrk:n jälkihoidon jälkeen: koeseos ≤ 50 paino-% vertailuseoksesta Testattuna 28 vrk:n ajan 90 vrk:n jälkihoidon jälkeen: koeseos ≤ 60 paino-% vertailuseoksesta
2	Puristuslujuus	EN 480-1 vertailubetoni I	EN 12390-3	28 vrk:n ikäisenä: koeseos ≥ 85 % vertailuseoksesta
3	Betonimassan ilmapitoisuus	EN 480-1 vertailubetoni I	EN 12350-7	Koeseos ≤ 2 tilavuus-% suurempi kuin vertailuseos, ellei valmistaja ole toisin ilmoittanut

^a Kaikki testaukset tulee suorittaa joko vakionotkeudella tai w/c:n vakioarvolla.

Kuva 7. Vedenimeytymistä estävien lisäaineiden testausmenettely (SFS-EN 934-2 2013, s. 9)

Sulin (haastattelu 8.4.2019) toteaa, että kristallisoivat lisäaineet täyttävät edellä esitetyn testausmenettelyn, vaikkakaan eivät menesty siinä. Tämä johtuu siitä, että kristallisoiville lisäaineille ei ole standardissa määritelty omaa kategoriaa.

4.2 Tuotteet

Suomessa on saatavilla laaja-alainen tarjonta erilaisia aineita, joilla voidaan tiivistää betoni-rakennetta ja siten parantaa sen elinikää ja kestävyyttä. Tarjolla on sekä pinnoitteita että betonimassaan lisättäviä aineita. Seuraavaksi käsitellään joitain Suomen markkinoilta löytyviä lisäainevalmistajia ja heidän tuotteitaan.

Xypex Chemical Corporation (myöhemmin Xypex) on vuonna 1969 perustettu kanadalaislähtöinen yritys, joka toimii yli 80 maassa ympäri maailman. Suomessa Xypexin tuotteet ovat olleet käytössä jo 1990-luvulta lähtien (Insinööritoimisto Sulin Oy 2019b). Xypex tarjoaa tuotteita sekä uudis- että korjausrakentamiseen, joiden avulla voidaan jo valmis betonipinta saada tiiviiksi vedenpainetta vastaan. Xypexillä on markkinoilla kahta kristallisoivaa lisäainetta: Xypex Admix C-500 NF ja C-1000 NF, joiden toiminta perustuu alaluvussa 3.2 esitettyyn kristallikiteen kasvuun. Tuotteet eroavat toisistaan siten, että C-500 NF ei vaikuta lainkaan betonin alkukovettumiseen tai sen vaikutus on minimaalinen. C-1000 NF on puolestaan suunniteltu normaaleille sekä hieman hitaammille kovettumisajoille. Xypexillä on maailman markkinoilla myös Xypex Admix C-2000 NF -lisäaine, joka on suunniteltu lämpimiin ilmasto-olosuhteisiin tai projekteihin, joissa vaaditaan hitaampaa alkukovettumista. Suomesta tätä lisäainetta ei kuitenkaan ole saatavilla. (Insinööritoimisto Sulin Oy 2019a) Xypexin liikevaihto on kasvanut vuodesta toiseen 90-luvulta lähtien ja yhtiö on tuplannut liikevaihtonsa tällä vuosikymmenellä. Xypexin maahantuoja on Insinööritoimisto Sulin Oy. (Sulin, haastattelu 30.5.2019)

Schomburg GmbH & Co. KGon 1930-luvun lopulla perustettu saksalainen yritys, joka aloitti kuitenkin toimintansa toisen maailmansodan jälkeen (Schomburg GmbH & Co. KG 2019). Yrityksellä on markkinoilla lisäaineiden lisäksi muita vedeneristystuotteita, kuten bitumia, massaeristeitä ja kalvomaisia vedeneristeitä. Kristallisoivat lisäaineet lukeutuvat BETOCRETE® C –tuoteperheeseen, joista Suomessa on saatavilla jauhemainen BETOCRETE® CP360-WP ja nesteinä oleva BETOCRETE® CL210-WP. Tuotteiden maahantuoja on Semtu Oy. (Semtu Oy 2019c) Kummankin lisäaineen toiminta perustuu kaksi yhdessä –teknologiaan eli lisäaine toimii kaksivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa BETOCRETE® reagoi kemiallisesti ja pienentää veden absorptiota, jonka jälkeen toisessa vaiheessa muodostuu katalyyttisesti kristallikiteitä. Rakenne pysyy kuitenkin vesihöyryä läpäisevänä, mikä pidentää rakenteen käyttöikää. Lisäaineiden annostelu on riippuvaista sementin reseptistä sekä reaktiivisuudesta, joten ennakkokokeet ovat välttämättömiä. (Semtu Oy 2019a; Semtu Oy 2019b)

PENETRON on Yhdysvalloissa 70-luvun lopussa sementin vesitiiviystuotteita ja lisäaineita kehittämään perustettu yritys. PENETRON on maailmanlaajuinen yritys, joka tarjoaa laajan valikoiman erilaisia tuotteita tiiveyden parantamiseen. Valmistajan lisäaineperheeseen kuuluu PENETRON ADMIX ja PENETRON ADMIX SB -tuotteet, joiden sanotaan esimerkiksi

kasvattavan betonin elinikää yli kuudellakymmenellä vuodella ja puristuslujuutta 13 %. (Penetron 2019a; Penetron 2019b) PENETRON ADMIXin sanotaan yhteensopiva kaikkien yleisesti käytettyjen työstettävyyttä parantavien lisäaineiden kanssa. Ennen valamista suositellaan kuitenkin koesekoituksia. (Penetron 2019d)

RPM Belgium Vandex on vuonna 2013 kahdesta isosta yrityksestä yhdistynyt yritys, joka keskittyy saumattomiin lattiaratkaisuihin, betonin korjaukseen ja suojaamiseen sekä vedeneristykseen rakennuksissa ja infrahankkeissa (RPM-Belgium 2019). Yrityksellä on kristallisoivaan teknologiaan perustuvia tuotteita sekä pintaleivityksenä asennettavana että lisäaineena. Lisäaine VANDEX AM 10 tukkii kapillaarihuokokset ja halkeamat sekä estää veden pääsyn rakenteeseen myös paineen alaisena. Muiden lisäaineiden tapaan myös VANDEX AM 10 päästää lävitseen vesihöyryä ja mahdollistaa siten betonin ”hengittämissä”. (Vandex International Ltd 2019)

4.3 Käyttökohteet

Kristallisoivia lisäaineita käytetään Suomessa ja maailmalla erilaisiin käyttökohteisiin. 90 % lisäainevalmistaja Xypexin suomalaisista käyttökohteista on perustuksia tai maanvastaisia seiniä ja loput noin 10 % ovat erilaisia altaita. Mukaan mahtuu myös esimerkiksi tunneleita ja pysäköintihalleja sekä patorakenteita. Maailmanlaajuisesti maanvastaisia seinä ja perustuksia on noin 75 % kaikista käyttökohteista. Lisäaineilla voidaan saavuttaa vesitiivistä betonia jopa 40 metrin syvyyteen asti. (Sulin, haastattelu 8.4.2019; Sulin, haastattelu 30.5.2019)

Lisäainetta voidaan hyödyntää myös tunneleiden ja pysäköintihallien ruiskubetonoinnissa. Etenkin Norjassa kristallisoivia lisäaineita on hyödynnetty tunneleiden vedenpaineeneristykseen. Kallioissa saattaa virrata pohjavettä, jonka kemiallinen koostumus on selvitettävä. Tällä tavoin voidaan betonirakenteille määritellä oikeat rasisitusluokat. Ruiskubetoni tunkeutuu kallion halkeamiin ja koloihin, jolloin se jäykistää ja lujittaa kalliopintaa. Halkeilleella ruiskubetonipinnalla on lujittava ominaisuus, mutta se mahdollistaa vuotoveden helpomman kulkeutumisen kalliotilaan. (Liikennevirasto 2018, s. 85–87) Lyhyellä aikavälillä tämä saattaa aiheuttaa tunnelin toimivuuden laskua ja ajan myötä vaarantaa tunnelin rakenteellisen kestävyys. Kristallisoivat lisäaineet tiivistävät ruiskubetoniin syntyviä halkeamia ja siten parantavat sen elinikää. (Xypex 2019b)

Allasrakenteita on monenlaisia ja esimerkiksi vesitornien alavesisäilöt vaativat ratkaisuja, jotka eivät vaikuta juomaveden laatuun. Toisaalta varastoitaessa kemikaaleja betonialtaissa, saattavat nämä aineet syövyttää allasrakennetta hyvinkin nopeasti. Lisäainevalmistajat lupaa tuotteilleen kestoa kemiallista rasisitusta vastaan. Lisäaineista ainakin Xypexin ja Vandexin lisäaineet ovat myös juomavesiturvallisia. (Insinööritoimisto Sulin Oy 2019a, MPA Hannover 2017, s. 6; Vandex International Ltd 2019). Rakenteita suunniteltaessa tulee kuitenkin

ottaa huomioon tapauskohtaisesti erilaiset rasitukset ja valita rakennusmateriaali sen mukaan. 10 % suolahappo syövyttää betonin ja myös teräkset nopeasti, kun taas etikkahappo rapauttaa rakennetta hitaasti. Oksaalihappo puolestaan suojaa säiliötä heikkoja happoja vastaan. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2015, s. 59–60)

Lisäainevalmistajat kertovat käyttökohteiksi myös esimerkiksi pato-, elementti- ja siltarakenteet. Vaikka lisäaineet nostattavat käyttökustannuksia betonimassan hinnassa, saavutetaan niillä lisävarmuutta tiiviyteen. Yksittäisten projektien lisäkustannuksia on melko vaikeaa arvioida, sillä lisäainemäärä on kohteesta riippuvainen.

5. YHTEENVETO

Kandidaatintyössä tarkoituksena oli selvittää kristallisoivien lisäaineiden toimintaa betonin vedenpaineeneristyksessä. Erityisesti tarkasteltiin aineen vaikutusta betonin tiiviyteen, mutta myös sen muihin ominaisuuksiin. Lähdeaineistona käytettiin tutkimuksia, ohjekirjoja, raportteja ja eurokoodeja. Näkökulmia haettiin myös alan asiantuntijoilta.

Betoni on huokoinen materiaali, jonka koostumukseen voidaan vaikuttaa suhteituksen avulla. Paras keino vesitiiviin betonin valmistamisessa on pitää vesi-sementtisuhte tarpeeksi pieninä, jolloin haitallisia kapillaarihuokosia syntyy mahdollisimman vähän. Myös halkeamien minimointi edesauttaa rakenteen tiiviyttä, joten jälkihoito on toteutettava huolellisesti.

Kristallisoivien lisäaineiden toiminta perustuu reaktioon lisäaineen, veden ja sitoutumattoman sementin välillä. Lisäaine sekoitetaan betoniin jo valmistusvaiheessa, jolloin siitä tulee kiinteä osa betonimatriisia eivätkä pintavauriot heikennä aineen toimintaa. Syntyneet kiteet paisuvat ja täyttävät betonin halkeamia ja kapillaarihuokosia tehden siitä entistä tiiviimpää. Tiiviyden ansiosta betonin kesto kemiallista ja pakkasrasitusta vastaan paranee, sillä haitalliset aineet tai vesi eivät pääse betonia tai siinä olevia raudoitteita. Tätä myötä rakenteen elinikä myös kasvaa.

Kristallisoivien lisäaineiden vaikutuksesta betonin lujuuteen on saatu risteäviä tutkimustuloksia. Osa tutkimuksista kertoo lujuuden kasvaneen muutamia prosentteja, kun taas toiset tutkimukset ovat havainneet lujuuden laskua melkein kolmanneksella. Betonin lujuuteen otetaan suunnittelussa yleensä mukaan varmuuskertoimia, mutta riittävä lujuuden lasku saattaa aiheuttaa katastrofaalisia seurauksia. Tämän vuoksi jokaisessa projektissa tulisi tehdä riittävästi ennakkokokeita ja koevaluja, jotta voitaisiin varmistua betonin ominaisuuksien laadusta.

Suomen markkinoilla on useita kristallisoivia lisäaineita, jotka perustuvat samaan kristallikiiteen kasvuun pohjautuvaan teknologiaan. Lisäaineiden tarkkaa kemiallista koostumusta ole ollut mahdollista selvittää, mikä hankaloittaa tarkan analyysin tekoa eri tutkimustulosten välillä. Aiheesta löytyi verrattain vähän tieteellistä tutkimusta ja työssä tukeuduttiin yritysten teettämiin tutkimuksiin ja niiden raportteihin. Lähtökohdat vaihtelivat tutkimusten välillä, joten niiden suoraa vertailua on mahdotonta toteuttaa. Testikappaleissa saatettiin esimerkiksi käyttää erilaisia vesi-sementtisuhteita tai raekokoja, jolloin tulokset olivat luonnollisesti erilaisia. Aiheesta tarvittaisiinkin lisää tutkimusta, jotta eroavaisuuksia lisäaineiden välillä voitaisiin paremmin selittää.

Lisäaineita voidaan hyödyntää monissa erilaisissa käyttökohteissa, kuten perustuksissa, altaissa, maanpaineeseinissä tai kalliorakenteissa. Lisäaineet tarjoavat helpon ja nopean ratkaisun, jossa on vähemmän työvaiheita ja siten valvonnan tarve on pienempi. Markkinoilla

on myös muita aineita, joilla voidaan parantaa betonin tiivyyttä. Rakennetta suunniteltaessa tulee tarkastella jokaista kohdetta yksilöllisesti ja selvittää, miten vedenpaineeneristys voidaan parhaiten toteuttaa. Lisäaineita käytettäessä on muistettava, että niillä ei voida muuttaa heikkolaatuista betonia hyväksi. Oikein käytettyinä niillä voidaan kuitenkin saavuttaa huomattavia etuja vesitiiviissä betonirakenteissa.

LÄHTEET

Al-Kheetan, M.J., Rahman, M.M. & Chamberlain, D.A. (2019). Optimum Mix Design for Internally Integrated Concrete with Crystallizing Protective Material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, vol. 31(7), 8p.

Azarsa, P., Gupta, R. & Biparva, A. (2019). Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement. Vol. 99, pp. 17–31.

by 201 (2018). Betonitekniiikan oppikirja. Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 568 s.

by 65 (2016). Betoninormit. Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 164 s.

by 68 (2016). Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille. Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 95 s.

Carter, J. (2019). Elevator Pit Waterproofing with Crystalline Technology, White paper. Saatavissa (viitattu 20.4.2019): https://www.xypex.com/docs/default-source/technical/whitepaper/english/whitepaper-elevator-pit-eng.pdf?sfvrsn=728d0169_6.

FISE (2016). Maanvastaisen seinän puuttuva vedeneristys. Virhekortti. 4 s. Saatavissa (viitattu 7.3.2019): https://fise.fi/wp-content/uploads/2016/12/RVP-S-RF-59-Maanvastaisen-sein%C3%A4n-puuttuva-vedeneristys_P%C3%A4ivitetty-5.11.2018.pdf.

Hanka, J. (2019). Diplomi-insinööri, Osastopäällikkö, Sweco Rakennetekniikka Oy, Helsinki. Haastattelu 24.5.2019.

Insinööritoimisto Sulin Oy (2019a). C-1000 NF -tuotteen tiedot (Finnish). Tuote-esite. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): [https://www.xypex.com/docs/default-source/product-data-library/product-data-\(finland\)/2017-08-c-1000-nf-\(a4\)-finland.pdf?sfvrsn=2d6d0269_0](https://www.xypex.com/docs/default-source/product-data-library/product-data-(finland)/2017-08-c-1000-nf-(a4)-finland.pdf?sfvrsn=2d6d0269_0).

Insinööritoimisto Sulin Oy (2019b). Uuden betonirakenteen vedeneristäminen, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): <https://www.sulino.fi/fi/tuotteet/ratkaisut/betonirakenteet/uuden-betonirakenteen-vedeneristaminen>.

Kao, G. (2003). Plastic and hardened state properties of Xypex Admix C-1000NF modified commercial concretes. Data sheet. Saatavissa (viitattu 19.5.2019): <https://www.xypex.com.au/file/2423/365>.

Liikennevirasto (2018). Selvitys kalliotunnelin kallioteknisestä suunnittelusta 47/2018. Helsinki. 151 s. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-47_selvitys_kalliotunnelin_web.pdf.

Li V.C. & Yang E.H. (2007) Self healing in concrete materials, In: van der Zwaag, S. (ed.), Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of, materials science, Springer, Dordrecht, pp. 161–193.

MPA Hannover (2017). Test report no. 164162 english version. Data sheet. Saatavissa (viitattu 3.5.2019): <https://www.schomburg.com/de/en/files/betocrete-cp-360-wp-tests-regarding-the-efficiency-of-water-resisting-admixture-for-concrete-gb/BETOCRETE-CP-360-WP%20TESTS%20REGARDING%20THE%20EFFICIENCY%20OF%20WATER%20RESISTING%20ADMIXTURE%20FOR%20CONCRETE%20GB.pdf>.

Oishi, E., Taguchi, H. (2019). An Example on the Use of Concrete Waterproof Agent of XYPEX in Pressure Resistant Slabs. Saatavissa (viitattu 23.5.2019): <https://www.xypex.com.au/file/10357/378>.

- Paukku, E. (2019). Diplomi-insinööri, Betoniteknologia-asiantuntija, Sweco Rakennetekniikka Oy, Helsinki. Haastattelu 24.5.2019.
- Paula, M., Grand, L.J., de, B.J. & Feiteira João (2014). "Waterproofing of Concrete Foundations", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 28, no. 2, pp. 242–249.
- Pazderka, J. & Hájková, E. (2016). Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete. *CTU Central Library*. Vol 56(4), pp. 306–311.
- Penetron (2019a). Durable concrete starts with PENETRON ADMIX, tuote-esite. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): https://www.penetron.com/uploads/Penetron_Admix_Brochure.pdf.
- Penetron (2019b). Esittelyssä Penetron, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): <https://fi.penetron.com/company>.
- Penetron (2019c). Penetron ® Crystalline Waterproofing coating, Tekninen tiedote. Saatavissa (viitattu 20.4.2019): <https://www.penetron.com/products/PENETRON/data-sheet.pdf>.
- Penetron (2019d). PENETRON ADMIX, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): <https://fi.penetron.com/products#penetron-admix>.
- Reiterman, P. & Pazderka, J. (2016). Crystalline Coating and Its Influence on the Water Transport in Concrete. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2016, 8 p.
- RT 83-10955 (2009). Perusmuurien ja perustusten veden- ja kosteudeneristys. Rakennustietosäätiö. 12 s.
- RT 83-11032 (2011). Vedenpaineeneristys. Rakennustietosäätiö. 12 s.
- RPM Belgium (2019). Solutions, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): <http://www.rpmbelgiumgroup.be/page/en/solutions.php>.
- Schomburg GmbH & Co. KG, History, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): <https://www.schomburg.com/de/en/about-us/history>.
- SFS-EN 12390-8 (2009). Kovettuneen betonin testaus. Osa 8: Paineellisen veden tunkeutumasyvyys, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 6 s.
- SFS-EN 1992-3 (2006). Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 3: Nestesäiliöt ja siilot, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 22 s.
- SFS-EN 934-2 (2013). Betonin, laastin ja injektio-laastin lisäaineet. Osa 2: betonin lisäaineet. Määritelmät, vaatimukset, vaatimuksenmukaisuus ja merkintä, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 21 s.
- Semtu Oy (2019a). Betocrete®CP-210WP -esite, tuote-esite. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): <https://www.semtu.fi/application/files/5715/5713/3075/Betocrete-CL-210-WP-esite.pdf>.
- Semtu Oy (2019b). Betocrete®CP-360 WP -esite, tuote-esite. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): <https://www.semtu.fi/application/files/9515/5713/3090/Betocrete-CP-360-WP-esite.pdf>.
- Semtu Oy (2019c). Muut lisäaineet, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): <https://www.semtu.fi/fi/tuotteet/betonin-lisaaineet/muut-lisaaineet>.
- Sisomphon, K., Copuroglu, O. & Koenders, E.A.B. (2012). Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34(4), pp. 566-574.

Sulin, R. (2019). Kauppatieteiden maisteri, Myyntipäällikkö, Insinööritoimisto Sulin Oy, Helsinki. Haastattelu 8.4.2019 ja 30.5.2019.

Technical and Testing Construction institute (2009). Penetration Depth of Water in Hardened Concrete with and without Xypex Admix, tutkimusraportti. Saatavissa (viitattu 23.5.2019): <https://www.xypex.com.au/file/10835/2743>.

Tiehallinto (2007). Betoni sillankorjausmateriaalina, yleisohje. Saatavissa (viitattu 15.3.2019): https://julkaisut.vayla.fi/sillat/silko/kansio1/s1201_2007.pdf.

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (2015). Vaarallisten kemikaalien varastointi. Helsinki. 71 s. Saatavissa (viitattu 27.5.2019): <https://tukes.fi/documents/5470659/6406815/Vaarallisten+kemikaalien+varastointi/c5cd9a2c-e290-44e9-a7db-6089d08c932d?version=1.0>.

Vandex International Ltd (2019). Vandex Crystalline waterproofing admixture, tuote-esite. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): http://www.vandex.com/media/142623/e_ds_vandex_am_10.pdf.

Wiseguy Research consultant Pvt Ltd (2018). Waterproofing Admixtures -Market Demand, Growth, Opportunities and Analysis Of Top Key Player Forecast To 2023, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): <http://heraldkeeper.com/market/waterproofing-admixtures-market-2018-global-analysis-opportunities-forecast-2023-85188.html>.

Xypex (2019a). Xypex catalogue, katalogi. Saatavissa (viitattu 21.4.2019): https://www.xypex.com/docs/default-source/default-document-library/english/2017-04-xypex-catalogue.pdf?sfvrsn=e9df0169_40.

Xypex (2019b). Meeting the Challenge Protecting Tunnels, tuote-esite. Saatavissa (viitattu 28.5.2019): https://xypex.com/docs/default-source/default-document-library/english/tunnels-brochure.pdf?sfvrsn=34b36b88_30.

Ympäristö nyt, Pohjaveden kloridipitoisuus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.3.2019): <https://ymparistonyt.fi/pohjaveden-kloridipitoisuus/>.

LIITTEET

Liite A: Testiraportti tiivistävien lisäaineiden toiminnasta

Koeseos / Koostumus nro					
Valmistus pvm.					
Sementtilaji		CEM II / B-M (S-LL) 42,5 N			
Lisäaine		-			
Lisäaine %		-	1,0	2,0	10,0
Betoniainemäärä:					
Sementti		1	1	1	1
Runkoaine		10,10	10,10	10,10	10,10
Vesi (tehollinen)		0,80	0,80	0,80	0,80
Vesi (kokonaisuus)		0,84	0,84	0,84	0,84
Lisäaine		-	0,01	0,02	0,10
Valmistusolosuhteet °C / RH %		21,5 / 50	22,0 / 50	22,0 / 50	22,0 / 50
Mittaukset massasta :					
Lämpötila °C	10 min	20,0	19,5	20,0	22,0
	40min	19,5	19,0	20,0	
Leviämä mm	10 min	420	420	420	435
	40min	390	410	400	
	70 min	385	400	400	
Painuma mm	10 min	20	30	25	0
	40min	10	15	10	
	70 min	5	10	10	
VB sek.	10 min	3	3	3	26
	40min	5	4	4	
	70 min	6	6	5	
Tiheys ja ilmamäärä					
10 min	kg/m ³	2370	2380	2370	2410
	l/m ³	24	23	22	14
40 min	kg/m ³	2370	2370	2370	
	l/m ³	23	22	20	
70 min	kg/m ³	2390	2370	2390	
	l/m ³	20	22	19	
Vedenerottuminen					
cm ³ /dm ³	1 h	5	4	3	
	3 h	13	13	7	
Tärytysraja					
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N	h : min	5:20	6:50	6:30	3:30
	° C	20	20	20	20
CEM II/A-LL 42,5 R	h : min	4:50	6:30	6:30	
	° C	20	20	20	
Laskettu koostumus					
Sementti	kg/m ³	199	199	199	200
Runkoaine	kg/m ³	2012	2012	2013	2018
Vesi (tehollinen)	kg/m ³	159	159	160	160
Vesi (kokonaisuus)	kg/m ³	167	167	168	168
Vesi-ilma-sementtisuhte (teh)		0,92	0,92	0,91	0,87
Lisäaine	kg/m ³	-	1,99	3,98	20,00
Puristuslujuus MN/m ²	2d	8,6	10,0	9,9	
Kuutiot 100 mm (muutettu 150 mm)	7d	16,9	18,1	16,8	
	28d	24,0	25,2	24,9	20,5
Tiheys kg/m ³	2d	2420	2410	2390	
	7d	2410	2400	2400	
	28d	2410	2390	2400	2430
Kuivakutistuminen 7-56 d (RH 40 %)	mm/m	0,32	0,39	0,39	
	s	0,03	0,02	0,06	
Vedentunkeuma 150 mm kuutio					
2 kpl	mm	31 d	(29/40) 35	(30/22) 26	(15/15) 15