



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Henrikki Hautamäki

Kloridin migraatiokertoimen määrittäminen betonista

Opinnäytetyö

Syksy 2024

Insinööri (AMK), Rakennustekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Rakennustekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Talonrakennustekniikka

Tekijä: Henriikki Hautamäki

Työn nimi alaotsikoineen: Kloridin migraatiokertoimen määrittäminen betonista

Ohjaaja: Janne Pihlajaniemi

Vuosi: 2024

Sivumäärä: 33

Liitteiden lukumäärä: 1

Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä NT BUILD 492 -mukaiseen testauslaitteistoon. Testauslaitteistolla määritetään kloridien migraatiokerroin betonille. Tavoitteena oli rakentaa laitteisto ja laatia siihen käyttöohjeet, sekä turvallisuusohjeet. Tämän työn tilaaja oli Seinäjoen Ammattikorkeakoulu Oy, rakennustekniikan laboratorio.

Tämän opinnäytetyön alussa tutustutaan yleisesti betoniin ja sen ainesosiin. Alussa käydään myös läpi kloridien lähteitä, niiden vaikutusta betoniin ja kuinka betonia voidaan suojata kloridien tunkeutumista vastaan. Tämän jälkeen käydään läpi laitteiston osat, perehdytään testattaviin koekappaleisiin ja niiden esikäsittelyyn. Myöhemmin perehdytään testausmenetelmään ja tuloksien laskemiseen. Työhön on sisällytetty valokuvia havainnoimaan testausmenetelmää ja sen eri vaiheita.

Lopputuloksena saatiin rakennettua laitteisto ja tehtyä sillä onnistunut koetestaus. Testauksen jälkeen saatiin määritettyä testattavalle koekappaleelle epävakaa tilan siirtymiskerroin. Testauslaitteistolle saatiin laadittua käyttöohjeet ja niihin sisällytettyä turvallisuusohjeet, jotka on hyvä huomioida laitteistoa käyttäessä.

¹ Asiasanat: betoni, kloridi, testauslaitteet

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Bachelor of Engineering, Construction Engineering

Specialisation: Building Construction

Author: Henrikki Hautamäki

Title of thesis: Determination of chloride migration coefficient in concrete

Supervisor: Janne Pihlajaniemi

Year: 2024

Number of pages: 33

Number of appendices: 1

The purpose of the thesis was to gain familiarity with the NT BUILD 492 test method. The equipment is used to determine the chloride migration coefficient for concrete. The purpose was to build the testing equipment and prepare its user manual and safety instructions. The commissioner of the thesis was Seinäjoki University of Applied Sciences.

At the beginning of the thesis, concrete and its ingredients were introduced in general. The first section also discussed the sources of chlorides, their effects on concrete and how concrete could be protected from chloride penetration. After this, the components of the testing equipment were reviewed, and attention was paid to the test pieces and their preparation. Later, the testing method and the calculation of results were examined. Photographs were included in the thesis to illustrate the testing method and its various stages.

As a result, the testing apparatus was successfully constructed, and a successful test was conducted using it. Following the test, a non-steady-state migration coefficient was determined for the test specimen. User instructions, including safety guidelines to ensure proper use of the apparatus, were also prepared for the testing equipment.

¹ Keywords: concrete, chloride, testing method

SISÄLTÖ

| | |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Opinnäytetyön tiivistelmä | 2 |
| Thesis abstract | 3 |
| SISÄLTÖ | 4 |
| Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo | 6 |
| Käytetyt termit ja lyhenteet..... | 7 |
| 1 JOHDANTO | 8 |
| 1.1 Opinnäytetyön tausta ja tavoite | 8 |
| 1.2 Opinnäytetyön rakenne | 8 |
| 1.3 Opinnäytetyön tilaaja..... | 8 |
| 2 BETONI JA KLORIDIT | 9 |
| 2.1 Betoni yleisesti | 9 |
| 2.1.1 Sementti..... | 9 |
| 2.1.2 Kiviaines..... | 10 |
| 2.1.3 Vesi..... | 10 |
| 2.1.4 Lisäaineet..... | 11 |
| 2.2 Kloridien lähteet Suomessa..... | 12 |
| 2.3 Kloridien vaikutus betoniin..... | 13 |
| 2.4 Kloridien aiheuttamien vaurioiden ehkäisy | 14 |
| 3 TESTAUSLAITTEISTO JA KOEKAPPALEET | 15 |
| 3.1 Soveltamisala..... | 15 |
| 3.2 Testaukseen tarvittavat reagenssit ja laitteistot | 15 |
| 3.2.1 Reagenssit..... | 15 |
| 3.2.2 Laitteistot..... | 15 |
| 3.3 Koekappaleet | 18 |
| 3.4 koekappaleiden esikäsittely..... | 20 |
| 3.5 Katolyytti ja anolyytti..... | 21 |
| 4 TESTAUSMENETELMÄ..... | 22 |
| 4.1 Testauksen valmistelu..... | 22 |
| 4.2 Testaus | 23 |

| | | |
|-----|------------------------------------------------|----|
| 4.3 | Kloridien tunkeutumissyvyyden mittaaminen..... | 25 |
| 4.4 | Kaavat..... | 26 |
| 5 | TULOKSET | 29 |
| 6 | POHDINTA JA YHTEENVETO..... | 30 |
| | LÄHTEET | 31 |
| | LIITTEET | 32 |

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Kuva 1. Tyhjiöpumppu ja tyhjiösäiliö | 16 |
| Kuva 2. Migraatiolaitteiston osia | 17 |
| Kuva 3. Yleismittari ja lämpötilamittari | 18 |
| Kuva 4. Porakappale menossa sahaukseen..... | 19 |
| Kuva 5. Koekappale kalsiumhydroksidiliuoksessa alipaineistetussa tyhjiösäiliössä | 20 |
| Kuva 6. Koekappale migraatiotestissä | 23 |
| Kuva 7. Jännitteen ja sähkövirran määrä..... | 24 |
| Kuva 8. Valkoinen hopeakloridisaostuma | 25 |
| | |
| Kuvio 1. Koekappaleen asettelu silikoniputkeen | 22 |
| Kuvio 2. Muovisten tukien ja katodin asettelu | 23 |
| Kuvio 3. Tunkeutumissyvyyksien mittaaminen..... | 26 |
| | |
| Taulukko 1. Testijännite ja testausaika betonikappaleille, joissa on normaali sideainepitoisuus | 24 |

Käytetyt termit ja lyhenteet

| | |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Sementtipasta | Veden ja sementin muodostama seos |
| Hydrataatio | Betonissa käytettävä vesi reagoi sementin kanssa kemiallisessa prosessissa |
| v/s-suhde | Tarkoittaa vesi-sementti-suhdetta |
| N | Eli normaaliteetti tarkoittaa ekvivalenttien määrää litraa kohti |
| M | Eli molarisuus tarkoittaa moolimäärää litraa kohti |
| Migraatio | Tarkoittaa aineen tai ionien liikkumista materiaalin sisällä sähkökentän vaikutuksesta |

1 JOHDANTO

1.1 Opinnäytetyön tausta ja tavoite

Betoni on Suomessa ja maailmalla yksi käytetyimmistä rakennusmateriaaleista. Suomessa betoni joutuu kosketuksiin kloridien kanssa etenkin rannikkoalueilla meriveden kanssa ja talvisin teitten suolauksen yhteydessä. Työn tarkoituksena on rakentaa Seinäjoen ammattikorkeakoulun rakennustekniikan laboratoriolle NT BUILD 492 -mukainen laitteisto, jolla voidaan mitata betonin kykyä vastustaa kloridien tunkeutumista vastaan. Tavoitteena on perehtyä laitteistoon, testimenetelmään ja tuloksien laskemiseen. Tavoitteena on myös lisätä ymmärrystä kloridien vaikutuksesta betoniin.

1.2 Opinnäytetyön rakenne

Opinnäytetyössä käsitellään alussa betonia ja klorideja yleisellä tasolla. Aluksi tarkastellaan betonin aineosia, kloridien esiintymistä, niiden vaikutuksia betoniin sekä keinoja suojata betonia klorideilta. Teoriaosion jälkeen keskitytään testilaitteiston osiin, reagensseihin ja koekappaleisiin. Testausmenetelmä ja tulosten laskentaprosessi esitellään tämän jälkeen. Lopuksi käydään läpi työn tulokset ja esitetään yhteenveto.

1.3 Opinnäytetyön tilaaja

Opinnäytetyön tilaajana toimi Seinäjoen Ammattikorkeakoulu Oy, rakennustekniikan laboratorio. Laboratorion palveluita käyttävät pääsääntöisesti rakennusteollisuuden parissa työskentelevät. Betonitestaukset, julkisivurakenteiden testaukset ja aineenkoestukset ovat pääsääntöisiä palveluita laboratorion. Laboratoriota käytetään myös opetustarkoitukseen.

2 BETONI JA KLORIDIT

2.1 Betoni yleisesti

Betoni on yksi maailman käytetyimmistä rakennusmateriaaleista (Betoniteollisuus, i.a.). Betonin monipuolisuus, kestävyys ja taloudellisuus tekevät siitä keskeisen rakennusmateriaalin monissa eri rakenteissa. Suomessa betonin käyttö on suosittua sen kestävyden ja ilmastolisten ominaisuuksien vuoksi. Betoni koostuu pääosin sementistä, vedestä, kiviaineksista ja mahdollisista lisäaineista. Lisäaineet voivat parantaa betonin ominaisuuksia, kuten lujuutta, työstettävyyttä ja pakkasenkestävyyttä.

Suomessa käytetään useita erilaisia betonityyppejä, joista yleisimpiä ovat valmisbetoni, kevytsora- ja kevytbetoni sekä erilaiset korkealujuusbetonit (Betoniteollisuus, i.a.). Betonia käytetään niin asuin- kuin liikerakennuksissa, siltojen, teiden ja muissa infrastruktuurirakenteissa. Betoni on kestävä materiaali, joka sietää hyvin Suomen vaihtelevia sääolosuhteita, mukaan lukien pakkasia ja kosteutta. Betoni on myös paloturvallinen materiaali, joka kestää hyvin ajan ja ympäristön rasituksia. yksi betonin suurimmista eduista on sen pitkä käyttöikä. Oikein tehty betonirakenne voi kestää satoja vuosia, mikä tekee siitä suosittun materiaalin julkisissa rakennuksissa ja infrastruktuurihankkeissa.

2.1.1 Sementti

Yleisimmin betonissa käytettävä sideaine on portlandsementti (Betonitieto, i.a.-a). Sementti koostuu yleensä louhitusta kalkkikivistä, eli kalsiumkarbonaatista (CaCO_3), piidioksidista (SiO_2), raudasta (Fe_2O_3) ja alumiinista (Al_2O_3) sisältävistä kivilajeista. Sementin murskatut raaka-aineet poltetaan noin $1450\text{ }^\circ\text{C}$:ssa. Tässä vaiheessa kalkki, pii, alumiini ja rautayhdisteet ovat jo reagoineet kalsiumyhdisteiksi, jotka lopulta yhdistyvät ja sulavat yhteen muodostaen sementtiklinkkerikin. Klinkkeri jauhetaan hienoksi jauheeksi ja siihen lisätään yleensä kipsiä. Betonitiedon (i.a.-a) mukaan sementin koostumusta, laatuvaatimuksia ja vaatimustenmukaisuusehtoja ohjaa sementtistandardi SFS-EN 197-1.

2.1.2 Kiviaines

Betonin massasta pääosa 65–80 prosenttia on kiviainesta (Kosomaa ym., 2015, s. 38). Kiviaines vaikuttaa merkittävästi betonin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, kestävyteen ja muokattavuuteen. Kiviaines koostuu hienoaineesta yleensä hiekasta tai karkeasta aineksesta eli sorasta tai kivistä/kalliosta otettavasta murskeesta. Betonin kiviaines on CE-merkitty. Sen laadun kannalta oleellisia ominaisuuksia ovat lujuus, raemuoto ja raekokojakauma.

Kiviaineksella on useita tärkeitä ominaisuuksia, jotka vaikuttavat betonin laatuun (Kosomaa ym., 2015, s. 38). Raekoko määrittelee sen, kuinka hyvin kiviaines sekoittuu betonimassaan ja täyttää sen aukot. Hyvin tasapainoinen raekokojakauma, jossa on mukana sekä hienompia ja karkeampia rakeita, auttaa vähentämään tyhjää tilaa betonimassassa ja parantamaan lujuutta. Erityisesti betonin tilavuus ja työstettävyys riippuvat siitä, kuinka hyvin hieno ja karkea kiviaines jakautuvat seoksessa.

Kiviainesten on oltava puhtaita, eli niissä ei saa olla savea, multaa, orgaanista ainetta tai muita epäpuhtauksia (Kosomaa ym., 2015, s. 38). Nämä voivat heikentää betonin lujuutta ja pitkäaikaiskestävyyttä. Kiviaineksen kestävyys määritetään sen mekaanisten ominaisuuksien, kuten puristuslujuuden ja kulutuskestävyyden perusteella. Suomen olosuhteissa, joissa lämpötilan vaihtelut ovat suuria, myös kiviaineksen pakkasenkestävyys on erittäin tärkeä.

Kiviaineksen muoto vaikuttaa betonin työstettävyyteen (Betonitieto, i.a.-a). Sileät ja pyöreät rakeet antavat betonille paremman valuvuuden, kun taas teräväreunainen murskattu kivi lisää lujuutta paremman tartunnan ansiosta. Kiviainesten pinta voi myös vaikuttaa siihen, miten hyvin sementtipasta tarttuu siihen. Karkeampi pinta tarjoaa paremman tartuntapinnan.

2.1.3 Vesi

Betonissa käytettävä vesi on olennainen osa betonin valmistusprosessia, koska se aloittaa kemiallisen reaktion hydrataation sementin kanssa ja tekee betonimassasta työstettävän (Betonitieto, i.a.-b). Hydrataation aikana sementtihiukkasten pinnalla alkaa kemiallisia reaktioita, jotka synnyttävät massan, jota kutsutaan sementtigeeliksi (C-S-H-geeli). Tämä geeli liittyy hydratoituneet sementtihiukkaset toisiinsa ja kiinnittää ne betonin kiviainekseen. Vesi liittyy betonin lujuuden kehittymiseen ja vaikuttaa merkittävästi betonin ominaisuuksiin. Veden laatu

ja määrä ovat kriittisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat betonin työstettävyyteen ja lopullisiin lujuusominaisuuksiin.

Yksinkertainen ohje veden laadulle on se, että jos vesi on juomakelpoista, se soveltuu myös betonin valmistukseen (Kosomaa ym., 2015, s. 40). Juomavesi on riittävän puhdasta, eikä siinä ole haitallisia epäpuhtauksia, jotka voisivat vaikuttaa betonin ominaisuuksiin. Joissakin tapauksissa voidaan käyttää myös muuta kuin juomavettä, mutta tällöin veden laatu täytyy testata huolellisesti. Liian suolaisen veden käyttö voi aiheuttaa ongelmia betonin kestävyyskannalta. Joissakin tapauksissa on myös mahdollista käyttää meri vettä, koska Itämeren vedessä ei ole liikaa suolaa.

Laatuparametri lujuus-, muodonmuutos-, sekä säilyvyysominaisuuksien kannalta betonille on tärkein sen vesi-sementtisuhde (Punkki & Ojala, 2018, s. 78). Se tarkoittaa veden ja sementin välistä painosuhdetta betonimassaan. Matala v/s-suhde parantaa betonin lujuutta ja vähentää huokoisuutta, mutta tekee massasta jäykempää ja vaikeammin työstettävää. Tämä voi johtaa vaikeuksiin valussa ja huonoon lopputulokseen, jos betonia ei voida kunnolla tiivistää. Korkea v/s-suhde lisää betonin työstettävyyttä ja tekee siitä juoksevampaa, mutta samalla kasvattaa huokoisuutta ja vähentää lopullista lujuutta. Tämä on riski erityisesti rakenteissa, joissa vaaditaan suurta lujuutta ja kestävyyttä.

2.1.4 Lisäaineet

Betonissa käytettävät lisäaineet ovat tärkeä osa betonin koostumusta, sillä ne parantavat sen työstettävyyttä, kestävyyttä ja suorituskykyä eri olosuhteissa (Betonitieto, i.a.-c). Lisäaineet vaikuttavat muun muassa betonin kovettumisnopeuteen, notkeuteen, veden läpäisevyyteen ja säänkestävyyteen. Standardin SFS-EN 934-2 mukaisten lisäaineiden pitää olla CE-merkityjä. Yleisimmät lisäaineet ovat notkistimet, huokostimet, hidastimet ja kiihdyttimet.

Notkistimia käytetään parantamaan betonin työstettävyyttä ja notkeutta ilman, että siihen tarvitaan ylimääräistä vettä (Betonitieto, i.a.-c). Näiden avulla voidaan vähentää veden määrää betonissa, mikä parantaa sen lujuutta ja tiiviyyttä. Notkistavat lisäaineet ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka hajottavat sementtipartikkelin väliset sidokset ja erottelevat ne toisistaan. Tämä parantaa betonin juoksevuuutta ilman, että siihen tarvitsee lisätä vettä. Tämä tapahtuu tyypillisesti kemiallisten reaktioiden kautta, joissa notkistimet muodostavat sähköisiä

vuorovaikutuksia sementtahiukkasten kanssa, mikä auttaa niitä liikkuvuudessaan. Tämän seurauksena saadaan aikaan suurempi notkeus.

Huokostimet lisäävät pienen määrän ilmaa betoniin (Betonitieto, i.a.-c). Tämä parantaa erityisesti betonin säänkestävyyttä ja vähentää halkeilun riskiä jäätymis-sulamissyklin aikana. Huokostimet luovat pieniä suojahuokosia betoniseokseen. Suojahuokosten tulisi olla kooltaan sopivia (ominaispinta-ala $< 25 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$), ja niiden välimatkan tulisi olla riittävän lyhyt (huokosjako $\leq 0,23 \text{ mm}$), jotta ne toimisivat mahdollisimman tehokkaasti ja betoni kestäisi pakkasrasitusta. Suojahuokokset auttavat myös vähentämään betoniin veden imeytymistä, mikä parantaa sen pitkäikäisyyttä. Huokostimien avulla voidaan vähentää kutistumista, joka voisi johtaa halkeiluun kovettumisvaiheessa.

Hidastimet ovat betonissa käytettäviä lisäaineita, jotka hidastavat betonin kovettumisprosessia (Betonitieto, i.a.-c). Hidastimet toimivat kemiallisesti siten, että ne estävät sementin hydratoitumisprosessia, mikä hidastaa betonin kovettumista. Ne voivat myös estää sementtipartikkeleiden keskinäistä reaktiota, mikä vähentää lämpötilan nousua hydratoitumisprosessin aikana. Hidastimia käytetään yleensä 0,2–2 prosenttia sideaineen kokonaismäärästä. Annoksen suuruuteen vaikuttavat esimerkiksi lämpötila, käytetty sementtilaatu, mahdolliset seosaineet sekä se, kuinka pitkä hidastusaika halutaan saavuttaa.

Kiihdyttimet ovat betonin lisäaineita, jotka nopeuttavat betonin kovettumisprosessia (Betonitieto, i.a.-c). Ne ovat hyödyllisiä tilanteissa, joissa halutaan saavuttaa nopeaa kovettumista, parantaa betonin suorituskykyä kylmissä olosuhteissa tai nopeuttaa rakentamista. Ruiskuvaiheessa käytettävien kiihdyttimien on täytettävä standardin SFS-EN 934-5 asettamat vaatimukset.

2.2 Kloridien lähteet Suomessa

Suomessa käytettävä tiesuola on yleensä natriumkloridia tai kalsiumkloridia (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY-keskus), 2024). Tiesuolaa käytetään talvisin jään ja lumen sulattamiseen. Tiesuola päätyy helposti tien läheisyydessä oleviin betonirakenteisiin, kuten siltoihin, alikulkutunneleihin ja tukimuureihin. Lumen ja jään sulamisen seurauksena kloridit kulkeutuvat veden mukana ja tunkeutuvat betoniin.

Meriveden sisältämät kloridit ovat haitallisia betonirakenteille (Salparanta & Kuosa, 2008, s. 82). Erityisesti rannikkoalueilla, satamarakenteissa ja silloissa. Merivesi vaikuttaa merkittävästi betoniin, koska betoni on tekemisissä jatkuvasti kloridien kanssa. Vesisumun mukana kloridit voivat kulkea melko pitkiäkin matkoja ja ulkona olevat kloridit voivat päästä rakennuksien sisälle ja levitä niiden rakenteisiin ilmavirtausten mukana.

Betonin valmistuksessa käytettävästä vedestä ja lisäaineista voi löytyä klorideja, vaikka Suomessa on tiukat rakennusmääräykset ja standardit valmistusmateriaaleihin (Betoniteollisuus, 2019 s. 86). Teollisuudesta tulevat jätevedet ja uima-altaitten vedet voivat sisältää klorideja.

2.3 Kloridien vaikutus betoniin

Kloridit voivat tunkeutua betoniin ja aiheuttaa korroosiota betoniin upotetuille teräksille (Salparanta & Kuosa, 2008, s. 82). Tavallisesti betoni suojaa terästä sen pinnan korkealla alkali-pitoisuudella. Kloridit kuitenkin hajottavat tämän suojan, joka johtaa terästen ruostumiseen. Teräksen ruostuessa teräksen tilavuus kasvaa, mikä aiheuttaa betonin halkeilua ja voi johtaa betonirakenteen vaurioitumiseen.

Raudoituksen korroosion lisäksi kloridit voivat heikentää betonin kestävyttä pitkällä aikavälillä (Salparanta & Kuosa, 2008, s. 82). Kloridipitoisuus heikentää betonin rakennetta, mikä alistaa sen halkeilulle ja muille rapautumisongelmille. Tämä on erityisen ongelmallista betonirakenteilla, jotka altistuvat runsaalle kosteudelle ja suolalle, kuten sillat ja rannikkoalueilla sijaitsevat rakennukset.

Betonin sisällä kloridit liikkuvat diffuusion avulla, eli ne siirtyvät alueelta, jossa niiden pitoisuus on korkeampi, kohti alhaisempaa pitoisuutta tasoittaakseen väkevyyseroja (Salparanta & Kuosa, 2008, s. 82). Kloridit voivat tunkeutua veden mukana pintaosan kapillaarihuokosiin, jos betoni pääsee välillä kuivumaan. Kloridien tunkeutumiseen betoniin vaikuttaa olennaisesti betonin tiiviys. Tärkein tekijä, joka vaikuttaa tiiviyyteen, on veden ja sideaineen välinen suhde. Tämä suhde määrää, kuinka paljon ja miten yhtenäisesti betoniin muodostuu kapillaarihuokosia, joiden kautta kloridit pääsevät kulkeutumaan betonin sisälle.

2.4 Kloridien aiheuttamien vaurioiden ehkäisy

Kloridien aiheuttamia vaurioita pyritään estämään korkealaatuisella betonilla, joka tiivistetään huolellisesti (Salparanta & Kuosa, 2008, s. 83). Kun tuore betoni tiivistetään, niin betoniin jäänyt ilma ja vesi liikkuvat kohti muotin pintaa. Jos muotti on tiivis eikä päästä vettä läpi, niin betonin pinnalle kerääntyy vettä, mikä nostaa veden ja sideaineen suhdetta. Tämä lisää pintakerroksen huokoisuutta. Jos muottimateriaali imee itseensä vettä betonista niin vesisideaine suhde laskee, mikä tekee pintakerroksesta tiiviimpää ja vähemmän huokoista. Riittävän paksu betonipeite raudoituksen ympärillä hidastaa kloridien tunkeutumista raudoitukseen ja ehkäisee korroosiota.

Betonirakenteita voidaan myös suojata pinnoitteilla tai kyllästysaineilla, jotka estävät kloridien pääsyn betonin sisään (Salparanta & Kuosa, 2008, s. 84). Jälkihoito, joka aloitetaan heti betonoinnin jälkeen ja jossa pinta pidetään kosteana mahdollisimman pitkään, vähentää kapillaarihuokosten muodostumista tehokkaasti. Jälkihoidossa yleensä riittää, että estetään veden haihtuminen betonin pinnalta. Haihtuminen voidaan estää suojapeitteillä tai käyttämällä jälkihoitoaineita. Jälkihoitoaika on yleensä kolme vuorokautta, mutta sitä olisi hyvä jatkaa pitkempään. Korroosion vaurioittamat betonirakenteen voidaan korjata esimerkiksi poistamalla vaurioitunut betoni ja lisäämällä suojakerroksia raudoitukselle.

Kloridien tunkeutumista voidaan ehkäistä estämällä veden pääsy betonin pinnalle rakenteellisilla ratkaisuilla, kuten kallistuksilla ja katoksilla (Betonitieto, i.a.-d). Sideaineen koostumus vaikuttaa kloridien sitoutumiseen ja betonin emäksisyyteen, joka hidastaa korroosiota. Massuunikuona sitoo klorideja hyvin, mutta esimerkiksi sulfaatin kestävä SR-sementtiä ei suositella käytettävän kloridirasitetuissa kohteissa. Erityisesti korkealujuusbetonissa mikrohalkeamat voivat lisätä läpäisevyyttä ja edistää kloridien tunkeutumista. Tämän ehkäisemiseksi tarvitaan huolellinen suunnittelu erityisesti jälkihoidon ja betonin koostumuksen suhteen, koska ulkoinen jälkihoito tehoaa huonosti tiiviiseen betoniin.

3 TESTAUSLAITTEISTO JA KOEKAPPALEET

3.1 Soveltamisala

Tämä menettely koskee kloridien migraatiokertoimen määrittämistä betonista epävakaa tilan migraatiokokeiden avulla (Nordtest method, i.a., s. 1). Menetelmä soveltuu betonisiin koekappaleisiin, jotka ovat valettu muotteihin tai porattuihin koekappaleisiin. Menetelmällä määritetty kloridien migraatiokerroin on mitattavan materiaalin vastuskyvyn mittari kloridien tunkeutumisista vastaan. Tätä epävakaa tilan migraatiokerrointa ei voida suoraan verrata kloridien diffuusiokertoimiin, jotka ovat saatu muilla testimenetelmillä, kuten epävakaa tilan upotustestillä tai vakaa tilan migraatiotestillä. Menetelmällä saadaan tietoa betonin kyvystä vastustaa kloridien tunkeutumista, mikä on olennainen osa betonin pitkäaikaiskestävyyden arviointia erityisesti rakenteissa, jotka altistuvat suolalle.

Kloridien migraatiokerroin kuvaa, miten kloridi-ionit liikkuvat betonin sisällä (Nordtest method, i.a., s. 1). Epävakaa tilan migraatiokoe on kokeellinen menetelmä, jolla saadaan tietoa kloridien liikkeestä betonissa silloin, kun olosuhteet eivät ole tasapainossa. Tässä kokeessa käytetään epätasapainotilan luomiseen ulkoista sähkökenttää kiihdyttämään kloridi-ionien liikettä, jotta saadaan nopeammin tietoa siitä, miten kloridit käyttäytyvät betonissa.

3.2 Testaukseen tarvittavat reagenssit ja laitteistot

3.2.1 Reagenssit

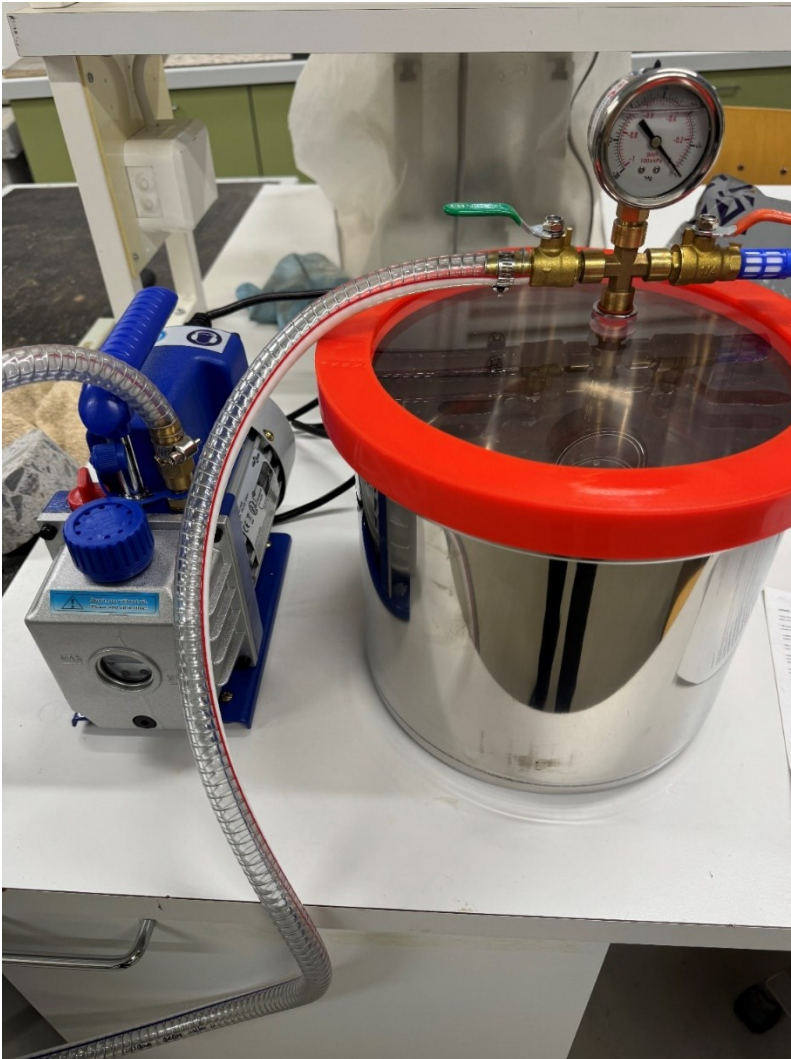
Testauksessa käytettävät reagenssit (Nordtest method, i.a., s. 1) ovat

- Tislattu vesi tai deionisoitu vesi.
- Kalsiumhydroksidi Ca(OH)_2 .
- Natriumhydroksidi NaOH.
- Natriumkloridi NaCl.
- Hopeanitraatti AgNO_3 .

3.2.2 Laitteistot

Esikäsittelyyn tarvittavat tarvikkeet, joita on Kuvassa 1 (Nordtest method, i.a., s. 1) ovat

- Timanttisaha.
- Hiomakone.
- Tyhjiösäiliö.
- Tyhjiöpumppu, jolla on kyky ylläpitää paine alle 50 mbar (5 kPa) tyhjiösäiliössä.



Kuva 1. Tyhjiöpumppu ja tyhjiösäiliö (Hautamäki, 2024).

Migraatiolaitteistoon tarvittavat osat, joita on Kuvassa 2 (Nordtest method, i.a., s. 2) ovat

- silikoniputki, jonka sisä-/ulkohalkaisija on noin 100/115 mm ja putken pituus on noin 150 mm.
- Ruostumattomasta teräksestä olevat letkunkiristimet, jotka ovat sisähalkaisijalta 105–115 mm ja 20 mm leveät.
- Katolyttiastian muovilaatikko.

- Muoviset tuet.
- Katodiksi ruostumattomasta teräksestä valmistettu levy, jossa on reikiä ja on noin 0,5 mm paksu.
- Anodiksi ruostumattomasta teräksestä valmistettu levy, jossa on reikiä ja on noin 0,5 mm paksu.
- Virtalähde, jonka jännitettä voidaan säätää välillä 0–60 V DC tarkkuudella $\pm 0,1$ V.

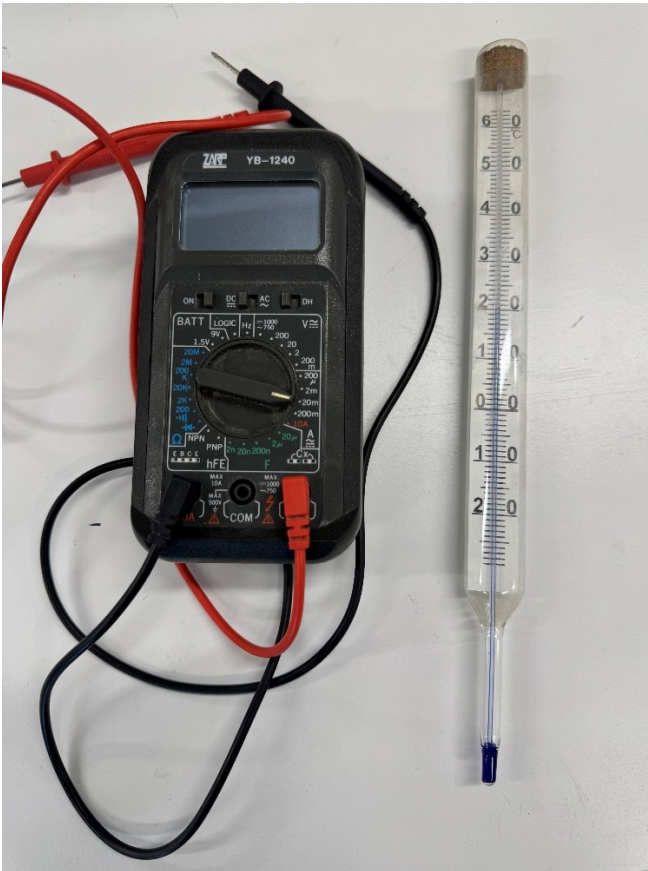


Kuva 2. Migraatiolaitteiston osia (Hautamäki, 2024).

Arvojen mittaamiseen tarvittavat tarvikkeet, joita on Kuvassa 3 (Nordtest method, i.a., s. 2) ovat

- Ampeerimittari, joka näyttää virran ± 1 mA tarkkuudella.
- Lämpömittari, joka näyttää lämpötilan ± 1 °C tarkkuudella.
- Välineet koekappaleen halkaisemiseen.

- Suihkepullo.
- Työntömitta, joka näyttää $\pm 0,1$ mm tarkkuudella.



Kuva 3. Yleismittari ja lämpötilamittari (Hautamäki, 2024).

3.3 Koekappaleet

Kappaleet täytyy olla lieriömäisiä koekappaleita, joiden halkaisija tulee olla 100 mm ja paksuus 50 mm (Nordtest method, i.a., s. 2). Koekappaleet saadaan valetuista tai poratuista kappaleista, joiden vähimmäispituus tulee olla 100 mm.

Jos koekappaleena käytetään porakappaletta, niin porakappaleen täytyy olla halkaisijalta 100 mm (Nordtest method, i.a., s. 2). Porakappaleesta täytyy uloin kerros poistaa, joka tulee olla 10–20 mm paksu (kuva 4). Seuraavaksi porakappaleesta leikataan 50 ± 2 mm paksu koepala, jonka uloin kerros altistetaan kloridiliuokselle.

Jos käytetään $\varnothing 100 \times 100$ mm valettua betonikappaletta, niin kappaleen keskeltä leikataan 50 ± 2 mm paksu palanen koekappaleeksi (Nordtest method, i.a., s. 2). Koekappaleen pääty, joka on lähimpänä valupintaa, altistetaan kloridiliuokselle.

Jos käytetään \varnothing 100 x 200 mm valettua betonikappaletta, niin kappale leikataan keskeltä kahteen osaan, jolloin saadaan kaksi \varnothing 100 x 100 mm betonikappaletta (Nordtest method, i.a., s. 2). Yhden betonikappaleen keskeltä leikataan 50 ± 2 mm paksu palanen koekappaleeksi. Koekappaleen pääty, joka on lähimpänä alkuperäisen betonikappaleen katkaisukohtaa, altistetaan kloridiliuokselle.

Porakappaleet ja valetut betonikappaleet halkaistaan timanttisahalla (Nordtest method, i.a., s. 2). Koekappaleiden paksuudet tulee mitata työntömitalla 0,1 mm tarkkuudella ja kirjata mitaustulos ylös.



Kuva 4. Porakappale menossa sahaukseen (Hautamäki, 2024).

3.4 koekappaleiden esikäsitteleminen

Sahauksen jälkeen koekappaleiden pinnat hiotaan tasaiseksi ja huuhdellaan (Nordtest method, i.a., s. 2). Ylimääräinen vesi koekappaleesta pyyhitään pois ja annetaan kuivua pinnalta. Pinnalta kuivaneet koekappaleet asetetaan tyhjiösäiliöön siten, että molemmat päädyt koekappaleista altistuvat. Tyhjiösäiliön ilmanpaine vähennetään 10–50 mbar alueelle muutamassa minuutissa tyhjiöpumpulla. Tyhjiössä ylläpidetään alipaine kolmen tunnin ajan ja säiliö täytetään tyydytetyllä $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -liuoksella. Kaikki koekappaleet tulee olla upotettuina (kuva 5). Liuoksen lisättyä säiliössä pidetään vielä paine tunnin ajan, jonka jälkeen säiliöön voidaan päästä ilmaa. Koekappaleet säilytetään liuoksessa 18 ± 2 tuntia.

Tyydytetyllä $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -liuoksella tarkoitetaan liuosta, jossa kiinteää kalsiumhydroksidia eli sammutettua kalkkia on liuotettu tislattuun tai deionisoituun veteen niin paljon, että liuoksessa on saavutettu sen liukoisuusraja tietyssä lämpötilassa (Nordtest method, i.a., s. 2). Liuos on tyydytetty silloin, kun kalsiumhydroksidi ei enää liukene veteen, vaan jää kiinteäksi aineeksi liuoksen pohjalle.



Kuva 5. Koekappale kalsiumhydroksidiliuoksessa alipaineistetussa tyhjiösäiliössä (Hautamäki, 2024).

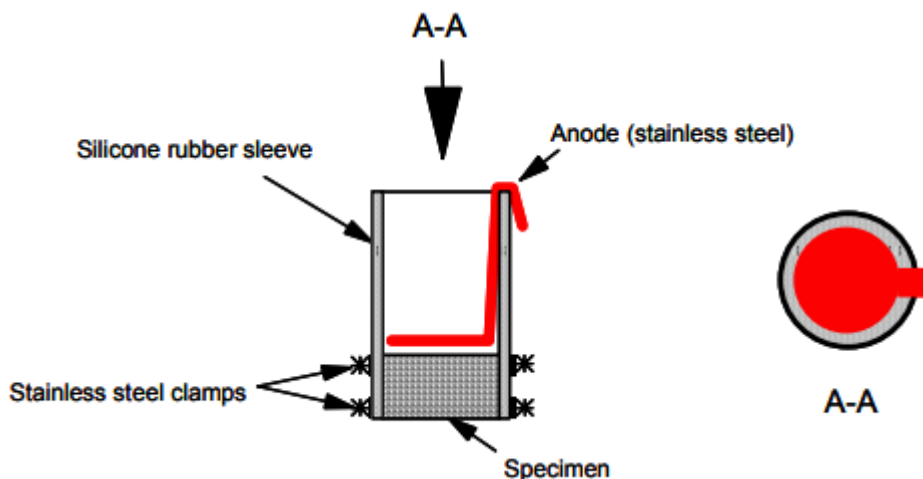
3.5 Katolyytti ja anolyytti

Katolyyttiliuos tulee olla noin 2 N NaCl, eli 10 % natriumkloridiliuosta (100 g NaCl + 900 g vettä) (Nordtest method, i.a., s. 2). Anolyyttiliuos tulee olla noin 0,3 N NaOH tislatussa tai deionisoidussa vedessä (noin 12 g NaOH + 1000 g vettä). Liuokset tulee säilyttää 20–25 °C lämpötilassa. Natriumkloridina voidaan käyttää vuorisuolaa ja natriumhydroksidina lipeää.

4 TESTAUSMENETELMÄ

4.1 Testauksen valmistelu

Koekappaleiden esikäsitteilyn jälkeen koekappale laitetaan silikoniputken sisään ja kiinnitetään putken päähän kahdella ruostumattomalla teräksellä valmistetulla letkunkiristimellä (Nordtest method, i.a., s. 3). Mahdolliset raot silikoniputken ja koekappaleen välissä voidaan tiivistää silikoniitiivisteellä. Silikoniputkeen lisätään 300 ml anolyttiliuosta 0,3 M NaOH koekappaleen päälle. Anolyttiliuokseen upotetaan ruostumattomasta teräksestä valmistettu rei'itetty levy, joka toimii anodina (kuvio 1).

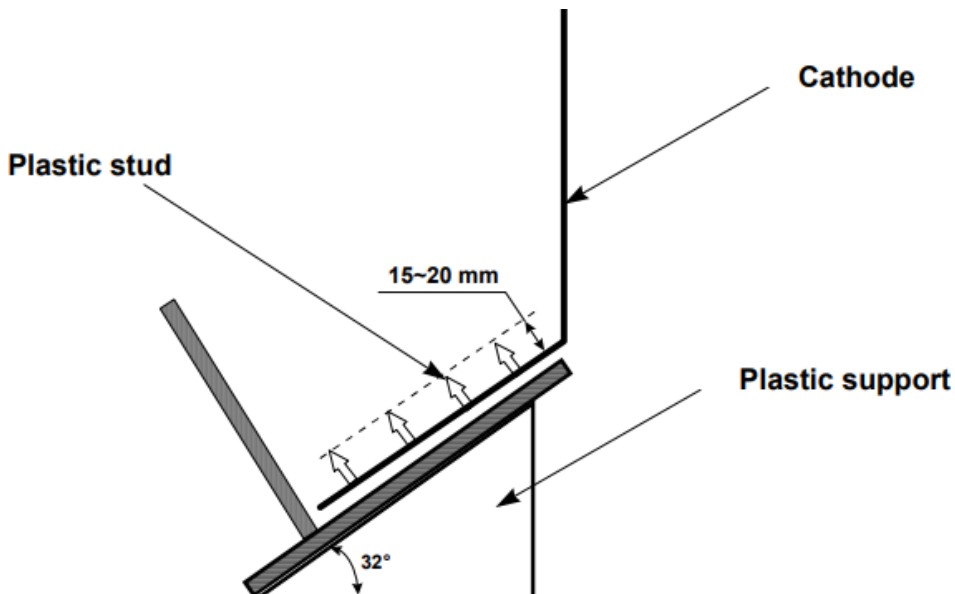


Kuvio 1. Koekappaleen asettelu silikoniputkeen (Nordtest method, i.a., s. 6).

Katolyttiastianana toimii muovilaatikko, jossa on muovinen tuki silikoniputkelle (Nordtest method, i.a., s.3). Laatikko täytetään 10 % NaCl -liuoksella. Muovinen tuki pitää laitteen noin 32° kulmaan, jotta vapautuvat kaasut pääsevät vapaasti nousemaan koekappaleen alta pois. Muoviselle tuelle laitetaan ruostumattomasta teräksestä valmistettu rei'itetty levy siten, että muovin ja levyn väliin jää liuokselle tilaa. Levyn päälle laitetaan silikoniputki koekappaleineen siten, että koekappaleen ja levyn välissä on 15–20 mm tilaa (kuvio 2). Katodi liitetään virtalähteen negatiiviseen napaan ja anodi positiiviseen napaan (kuva 6).



Kuva 6. Koekappale migraatiotestissä (Hautamäki, 2024).



Kuvio 2. Muovisten tukien ja katodin asettelu (Nordtest method, i.a., s. 5).

4.2 Testaus

Koekappaleiden ollessa paikoillaan laatikossa käynnistetään virtalähde, johon on asetettu 30 V jännite (Nordtest method, i.a., s. 3). Koekappaleesta mitataan alkuvirta ja säädetään jännitettä tarvittaessa (taulukko 1). Säädön jälkeen mitataan uudelleen alkuvirran arvo ja valitaan sopiva testiaika alkuvirran mukaan (kuva 7). Käytettävä jännite ja alkuvirta tulee kirjata ylös.

Testin alussa tulee ottaa anolyyttiliuoksesta lämpötila ja kirjata ylös. Testauksen lopussa mitataan uudestaan virta ja anolyyttiliuoksen lämpötila ja kirjataan ylös.

Taulukko 1. Testijännite ja testausaika betonikappaleille, joissa on normaali sideainepitoisuus (Nordtest method, i.a., s. 8).

| Alkuvirta (mA), kun jännite 30V | Säädön jälkeen käytettävä jännite (V) | Uusi mahdollinen alkuvirta I_0 | Testin kesto tunteina (t) |
|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| $I_0 < 5$ | 60 | $I_0 < 10$ | 96 |
| $5 \leq I_0 < 10$ | 60 | $10 \leq I_0 < 20$ | 48 |
| $10 \leq I_0 < 15$ | 60 | $20 \leq I_0 < 30$ | 24 |
| $15 \leq I_0 < 20$ | 50 | $25 \leq I_0 < 35$ | 24 |
| $20 \leq I_0 < 30$ | 40 | $25 \leq I_0 < 40$ | 24 |
| $30 \leq I_0 < 40$ | 35 | $35 \leq I_0 < 50$ | 24 |
| $40 \leq I_0 < 60$ | 30 | $40 \leq I_0 < 60$ | 24 |
| $60 \leq I_0 < 90$ | 25 | $50 \leq I_0 < 75$ | 24 |
| $90 \leq I_0 < 120$ | 20 | $60 \leq I_0 < 80$ | 24 |
| $120 \leq I_0 < 180$ | 15 | $60 \leq I_0 < 90$ | 24 |
| $180 \leq I_0 < 360$ | 10 | $60 \leq I_0 < 120$ | 24 |
| $I_0 \geq 360$ | 10 | $I_0 \geq 120$ | 6 |



Kuva 7. Jännitteen ja sähkövirran määrä (Hautamäki, 2024).

4.3 Kloridien tunkeutumissyvyyden mittaaminen

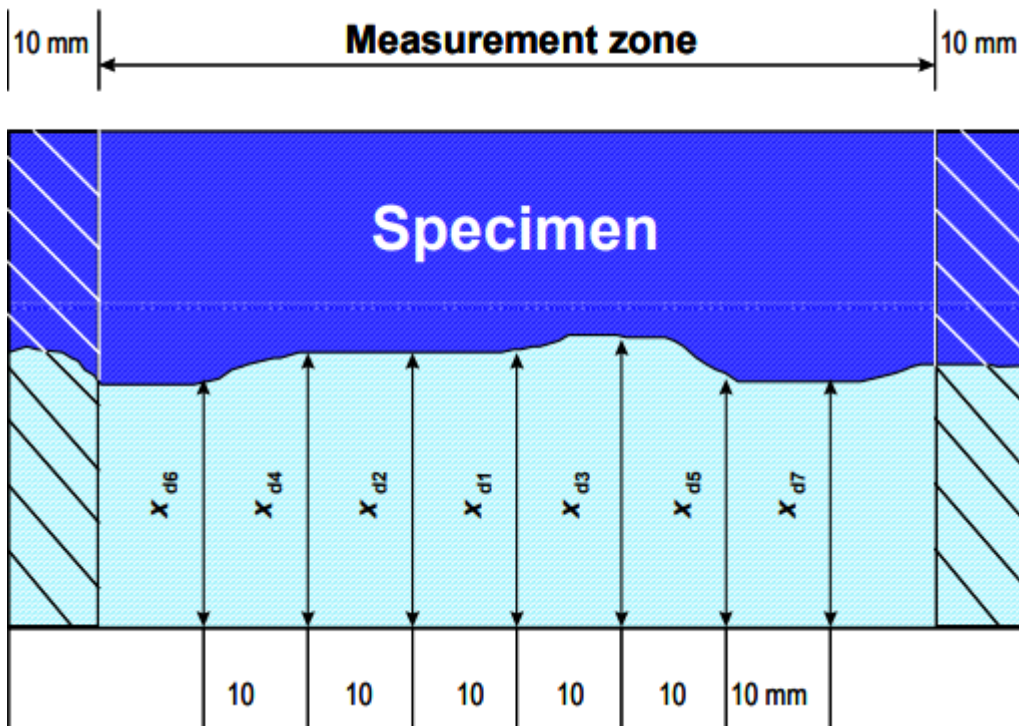
Koekappaleet tulee ottaa pois testauslaitteistosta päinvastaisella järjestyksellä, kuin laittaessa testauslaitteistoon (Nordtest method, i.a., s. 3). Koekappaleet huuhdellaan hanavedellä ja niistä pyyhitään ylimääräinen vesi pois pinnoilta. Koekappaleet halkaistaan keskeltä kahteen osaan. Koekappaleesta valitaan se osa, jossa halkeama on kohtisuoraan päätyypintoihin verrattuna tunkeutumissyvyyden mittaamista varten. Halkaistulle pinnalle suihkutetaan 0,1 M hopeanitraattiliuosta. Valkoinen hopeakloridisaostuma tulee selvästi näkyviin halkaisukohdan noin 15 minuutin kuluttua (kuva 8).



Kuva 8. Valkoinen hopeakloridisaostuma (Hautamäki, 2024).

Tunkeutumissyvyys mitataan 0,1 mm tarkkuudella (Nordtest method, i.a., s. 3). Tunkeutumissyvyys mitataan siten, että halkaisukohdan molemmista päistä otetaan aluksi 10 mm matka, jota ei oteta huomioon. Rajasta, jota ei oteta huomioon niin, siitä syvyyden mittaus tehdään 10 mm välein ja näin tulisi normaalisti saada seitsemän eri mittauskohtaa tunkeutumissyvyyksille (kuvio 3). Jos runkoaine esimerkiksi iso kivi on estänyt selvästi tunkeutumisen, niin

mittaus kohta siirretään lähimpään kohtaan, jossa runkoaine ei estä tunkeutumista. Nämä kohdat voidaan jättää kuitenkin kokonaan huomioimatta, jos kappaleessa on yli viisi hyväksyttyä mittauskohtaa. Tunkeutumissyvyyttä ei oteta huomioon, jos se poikkeaa merkittävästi muitten syvyyksien keskiarvosta ja kohdassa ilmenee selvästi vikaa. Virhekohta tulee kuitenkin huomioida ja raportoida.



Kuvio 3. Tunkeutumissyvyyksien mittaaminen (Nordtest method, i.a., s. 7).

4.4 Kaavat

Testauksesta saatujen arvojen avulla lasketaan tulokset seuraavien kaavojen avulla (Nordtest method, i.a., s. 3).

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

missä

$$E = \frac{U-2}{L} \quad (2)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (3)$$

missä

| | |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| D_{nssm} | epävakaan tilan siirtymiskerroin m^2/s |
| z | ionin varauksen itseisarvo, kloridin kohdalla $z = 1$ |
| F | Faradayn vakio, $F = 9,648 \times 10^4 \text{ J}/(\text{V}\cdot\text{mol})$ |
| U | käytetyn jännitteen itseisarvo V |
| R | kaasuvakio, $R = 8,314 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$ |
| T | Alkulämpötilan ja loppulämpötilan keskiarvo anolyttiliuoksessa K |
| L | näytteen paksuus m |
| x_d | tunkeutumissyvyyksien keskiarvo m |
| t | testin kesto sekunteina |
| erf^{-1} | virhefunktion käänteisfunktio |
| c_d | kloridipitoisuus, millä väri muuttuu portlandsementtibetonissa $c_d \approx 0,07 \text{ N}$ |
| c_0 | kloridipitoisuus katolyttiliuoksessa, $c_0 \approx 2 \text{ N}$ |

Koska

$$\text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2 \times 0,07}{2}\right) = 1,28, \quad (4)$$

voidaan käyttää yksinkertaistettua kaavaa

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (5)$$

missä

| | |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|
| D_{nssm} | epävakaan tilan siirtymiskerroin $\times 10^{-12} \text{ m}^2/s$ |
| U | käytetyn jännitteen itseisarvo V |
| T | alkulämpötilan ja lopputilan keskiarvo anolyttiliuoksessa $^{\circ}C$ |
| L | näytteen paksuus mm |
| x_d | tunkeutumissyvyyksien keskiarvo mm |
| t | testin kesto tunteina |

Laskelmista saatu epävakaan tilan siirtymiskerroin, tarkoittaa kloridien migraatiokerrointa betonissa (Nordtest method, i.a. s. 3). Kerroin kuvaa betonin kykyä vastustaa kloridi-

ionien tunkeutumista sähkökentän vaikutuksen alaisena. Suuri kerroin osoittaa sen, että kloridit pääsevät enemmän liikkumaan betonissa. Kloridien suuri liike tarkoittaa sitä, että betoni on huokoista ja ei vastusta hyvin kloridien tunkeutumista. Pieni kerroin osoittaa sen, että betoni on tiivistä ja vastustaa hyvin kloridien tunkeutumista.

5 TULOKSET

Tämän opinnäytetyön tuloksena rakennettiin Seinäjoen ammattikorkeakoulun rakennustekniikan laboratoriolle laitteisto, millä voidaan määrittää kloridien migraatiokerroin betonista epävakaaassa tilassa. Laitteistoon laadittiin käyttöohjeet ja turvallisuusohjeet.

Laitteisto kasattiin sen jälkeen, kun tarvittavat osat oli löydetty ja muokattu laitteistoon sopivaksi. Laitteistolle tehtiin koetestaus. Koetestauksessa käytettiin vanhasta rappukäytävän elementistä porattua porakappaletta. Porakappaleesta leikattiin koepala, jonka sahauksen ja hiennon jälkeen paksuudeksi saatiin 49,6 mm. Koekappale oli kalsiumhydroksidiliuoksessa 19,5 tuntia. Migraatiolaitteistossa koekappale oli 24 tuntia ja jännitteenä käytettiin 30 V. Anolyyttiliuoksen lämpötilan keskiarvoksi mitattiin 20,5 °C. Kloridien tunkeutumissyvyyksien mitoista kuusi oli kelvollisia ja yhdestä kohtaa iso kivi esti kloridien tunkeutumisen. Tunkeutumissyvyyksien keskiarvoksi saatiin 29,8 mm. Epävakaan tilan siirtymiskertoimeksi saatiin $13,895 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

6 POHDINTA JA YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli rakentaa Seinäjoen Ammattikorkeakoulun rakennustekniikan laboratoriolle NT BUILD 492 -mukainen laitteisto ja tehdä sillä koetestaus. Aluksi oli tärkeä perehtyä ja lisätä ymmärrystä siitä, miten kloridit vaikuttavat betoniin. Viimeisenä tavoitteena oli laatia testausmenetelmään helppolukuiset käyttöohjeet jatkoa varten. Käyttöohjeet sisältävät testauksen kulkuvaiheen ja toimintamenetelmät jokaiseen vaiheeseen. Käyttöohjeen loppuun on laadittu pienimuotoiset turvallisuuteen liittyvät seikat.

Opinnäytetyön tekijällä ja yrityksellä ei ollut alussa paljoa tietoa kyseisestä laitteistosta ja testausmenetelmästä. Työ jouduttiin aloittamaan alusta saakka ja ensimmäinen vaihe oli tutustua testausmenetelmään. Perehtyminen testausmenetelmään vei paljon aikaa ennen kuin alkoi hahmottamaan testausmenetelmän kulun ja sen vaiheet. Välillä törmättiin laitteiston ja osien hankkimisessa siihen, että kaikkia tarvittavia asioita ei ole helposti saatavissa, joten päädyttiin soveltamaan ja tekemään vastaavia osia.

Laitteiston rakentamisen ohessa opinnäytetyön kirjoittaminen oli suhteellisen helppoa, kun oli ymmärtänyt testausmenetelmän. Työn tekeminen oli opettavainen, koska täytyi perehtyä asioihin, jotka eivät ole tyypillisintä asiaa rakennusinsinöörille. Työtä tehtäessä ymmärsi, että tietämys eri aloilta on todella tärkeää.

Yhteenvetona voidaan todeta, että yritys sai käyttöönsä laitteiston, jolla voidaan määrittää kloridien migraatiokerroin betonista epävakaa tilan avulla sekä testausmenetelmään ja laitteistoon tarvittavat käyttö- ja turvallisuusohjeet. Opinnäytetyö antoi sen tekijälle silmiä avaavan kokemuksen ja laajalta rintamalta uutta tietoa.

LÄHTEET

- Betoniteollisuus. (2019). *Paaluinfo*. https://betoni.com/wp-content/uploads/2019/02/BET1901_86-87.pdf
- Betoniteollisuus. (i.a.). *Betoni rakennusmateriaalina: valmistus*. <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/>
- Betonitieto. (i.a.-a). *Sementti*. <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/sementti.html>
- Betonitieto. (i.a.-b). *Hydrataatio*. <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/hydrataatio.html>
- Betonitieto. (i.a.-c). *Lisäaineet*. <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/lisaaaineet.html>
- Betonitieto. (i.a.-d). *Kloridien tunkeutuminen betoniin*. <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/betonin-sailyvyys/kloridien-tunkeutuminen-betoniin.html>
- Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY-keskus). (14.08.2024). *Talvihoito*. https://www.ely-keskus.fi/talvihoito/-/categories/14249?p_r_p_resetCur=true&p_r_p_categoryId=14249#ely-region-selection
- Nordtest method. (i.a.). *NT BUILD 492*. <https://salmanco.com/wp-content/uploads/2018/10/NT-Build-492.pdf>
- Kosomaa, S., Mattila, J., & Tepponen, P. (2015). *Betoni: Mitä betoni on?* https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502_38-43.pdf
- Punkki, J., & Ojala, T. (2018). *Betoni: Vesi-sementtisuhte 100 vuotta*. https://betoni.com/wp-content/uploads/2018/03/BET1801_78-83.pdf
- Salparanta, L., & Kuosa. (2008). *Betoni: Kloridien tunkeutumisen pienentäminen betoniin*. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/10/BET0803-s-82-87.pdf>

LIITTEET

Liite 1. Käyttöohjeet

Liite 1. Käyttöohjeet

Käyttöohjeet kloridien migraatiokertoimen mittaamiseen

Kappaleiden halkaisija 100 mm ja vähimmäispituus 100 mm

Porakappale = Leikkaa uloin kerros pois 10–20 mm, tämän jälkeen leikkaa reilu 50 mm paksuinen koepala. Koekappaleen uloin kerros altistetaan kloridiliuokselle.

Valettu 100 mm pitkä = Leikkaa keskeltä reilu 50 mm paksuinen koepala. Koekappaleen pääty, joka on lähimpänä valupintaa, altistetaan kloridiliuokselle.

Valettu 200 mm pitkä = Leikkaa keskeltä kahtia. Leikkaa toisesta kappaleesta reilu 50 mm paksuinen koepala. Pinta, joka on lähimpänä katkaisukohtaa, altistetaan kloridiliuokselle.

Hio koekappaleet ja huuhtelee. paksuus 50 ± 2 mm. Mittaa paksuus ja kirjaa ylös.

Aseta koekappaleet tyhjiösäiliöön siten, että molemmat päädyt koekappaleista altistuvat

Vähennä ilmanpaine tyhjiösäiliössä 30–50 mbar alueelle ja pidä paine 3 tuntia.

HUOM! LIUOKSIEN LÄMPÖTILA PITÄÄ OLLA 20-25 °C

Lisää tyydytetty kalsiumhydroksidiliuos (noin 1,7 g Ca(OH)_2 + 1000 g akkuvesi) (sammuttettu kalkki) säiliöön siten, että koekappaleet peittyvät kokonaan.

Pidä alipaine vielä tunnin ajan, jonka jälkeen voi päästää ilmaa säiliöön. Anna koekappaleiden olla liuoksessa 18 ± 2 tuntia.

Laita migraatiolaatikkoon katolyttiliuos (10 % natriumkloridiliuos) (100 g NaCl + 900 g hana-vesi) (vuorisuolaa).

Asettele muovituet laatikkoon, joitten päälle asettelet katodisiivilät.

Laita koekappale silikoniputken sisälle päähän ja kiristä letkunkiristimillä, laita anodisiivilä koeputken sisälle.

Asettele silikoniputket koekappaleineen katodisiivilöiden päälle.

Kaada silikoniputkeen 300 ml anolyttiliuos (0,3 N natriumhydroksidiliuos) (noin 12 g NaOH + 1000 g akkuvettä) (lipeä)

Mittaa anolyttiliuoksen lämpötila ja kirjaa ylös.

Aseta virtalähteen plus-napa anodiin ja miinus-napa katodiin.

Säädä alkujännitteeksi 30 V, ja mittaa virta ja säädä tarvittaessa jännitettä taulukon mukaan.

| Alkuvirta (mA), kun jännite 30V | Säädön jälkeen käytettävä jännite (V) | Uusi mahdollinen alkuvirta I_0 | Testin kesto tunteina (t) |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| $I_0 < 5$ | 60 | $I_0 < 10$ | 96 |
| $5 \leq I_0 < 10$ | 60 | $10 \leq I_0 < 20$ | 48 |
| $10 \leq I_0 < 15$ | 60 | $20 \leq I_0 < 30$ | 24 |
| $15 \leq I_0 < 20$ | 50 | $25 \leq I_0 < 35$ | 24 |
| $20 \leq I_0 < 30$ | 40 | $25 \leq I_0 < 40$ | 24 |
| $30 \leq I_0 < 40$ | 35 | $35 \leq I_0 < 50$ | 24 |
| $40 \leq I_0 < 60$ | 30 | $40 \leq I_0 < 60$ | 24 |
| $60 \leq I_0 < 90$ | 25 | $50 \leq I_0 < 75$ | 24 |
| $90 \leq I_0 < 120$ | 20 | $60 \leq I_0 < 80$ | 24 |
| $120 \leq I_0 < 180$ | 15 | $60 \leq I_0 < 90$ | 24 |
| $180 \leq I_0 < 360$ | 10 | $60 \leq I_0 < 120$ | 24 |
| $I_0 \geq 360$ | 10 | $I_0 \geq 120$ | 6 |

Säädettyäsi jännitteen oikein, kirjaa jännite, virta ja testin kesto ylös.

Testin lopussa mittaa virta ja anolyttiliuoksen lämpötila ja kirjaa ylös.

Ota koekappaleet pois migraatiolaitteistosta ja huuhtelee ne hanavedellä.

Halkaise koekappaleet keskeltä kahtia.

Suihkuta 0,1 M hopeanitraattiliuosta (noin 17 g AgNO₃ + 1000 g akkuvettä) halkaistulle pinnalle.

Mittaa kloridien tunkeutumissyvyydet (valkoinen saostuma) siten, että jätät molemmista päistä 10 mm pois ja lasket syvyydet 10 mm välein. Pitäisi saada 7 mittaustulosta.

huom! Jos tunkeutumissyvyys on jostain syystä häiriintynyt älä ota sitä huomioon, kuitenkin minimissään täytyy saada 5 mittaustulosta.

Laske migraatiokerroin seuraavasti:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right)$$

missä

| | |
|------------|----------------------------------------------------------------------|
| D_{nssm} | epävakaan tilan siirtymiskerroin $\times 10^{-12}$ m ² /s |
| U | käytetyn jännitteen itseisarvo V |
| T | alkulämpötilan ja lopputilan keskiarvo anolyyttiliuoksessa °C |
| L | näytteen paksuus mm |
| x_d | tunkeutumissyvyyksien keskiarvo mm |
| t | testin kesto tunteina |

lähde: Nordtest method NT BUILD 492

TURVALLISUUSOHJEET!

Perehdy timanttisahan ja hiomakoneen käyttöön!

Käytä sahattaessa ja hioessa kuulosuojaimia, suojalaseja ja käsineitä!

Perehdy käytettäviin liuoksiin ja kemikaaleihin!

Ole äärimmäisen tarkka liuoksien käsittelyssä. Kun käsittelet liuoksia, käytä aina suojalaseja ja käsineitä!

Muista liuoksien ja kemikaalien oikeaoppinen säilyttäminen!

Älä koske migraatiotestin aikana liuoksiin tai siivilöihin. Sähköiskun vaara!

Halkaistaessa koekappaletta käytä käsineitä ja suojalaseja!