

Eero Haara

KAPILLAARINEN KOSTEUDENNOUSU MAANVASTAISISSA RAKENTEISSA JA JÄLKIKÄTEEN ASENNETTAVAT KAPIL- LAARIKATKOMENETELMÄT

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Professori Matti Pentti
TkT Jukka Lahdensivu
Lokakuu 2021

TIIVISTELMÄ

Eero Haara: Kapillaarinen kosteuden nousu maanvastaisissa rakenteissa ja jälkikäteen asennettavat kapillaarikatkomenetelmät

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: Professori Matti Pentti ja TkT Jukka Lahdensivu

Lokakuu 2021

Kapillaarisen kosteuden haitallisuus maanvastaisille rakenteille on jo pitkään ollut tiedostettu ongelma ja sitä on pyritty ajansaatossa rajoittamaan erilaisilla rakenteisiin tehtävillä käsittelyillä. Vanhojen maanvastaisten rakenteiden korjaamiseen käytettyjen kapillaarikatkokäsittelyjen soveltuvuudet ovat tutkimusten perusteella kohdekohtaisia eikä vielä ole löydetty menetelmää, joka toimisi ongelmitta kaikytyppisissä maanvastaisissa rakenteissa.

Diplomityön tarkoituksena on selvittää kapillaarisuutta rakennusfysikaalisena ilmiönä ja sen vaikutuksesta siirtyvän kosteuden aiheuttamia vaurioita maanvastaisille rakenteille. Lisäksi työssä esiteltiin eri vaihtoehtoja rakenteeseen jälkikäteen asennettavista kapillaarikatkomenetelmistä ja niiden valinnassa huomioitavista asioista.

Eri menetelmien toimivuuteen vaikuttavien seikkojen selvittämiseksi käytiin läpi kirjallisuudesta löytyviä kansainvälisiä tutkimusraportteja ja tieteellisiä julkaisuja. Lisäksi suoritettiin yhteistyönä Sweco Rakennetekniikka Oy:n ja Contesta Oy:n kanssa laboratoriotutkimus, jonka perusteella pyrittiin selvittämään Suomessa käytössä olevien injektointiaineiden toimintaa. Injektointikäsittelyjä varten valmistettiin betonikoekappaleita kahdella eri vesi-sementtisuhteella.

Työssä keskityttiin tutkimaan tarkemmin kemiallisia injektointiaineita ja niiden kapillaarista kosteuden nousua estäviä reaktioita tiili- ja betonirakenteissa. Kemiallisten aineiden asennus tulee suorittaa erilaisilla paineellisilla ja paineettomilla menetelmillä riippuen aineen koostumuksesta sekä injektoitavan rakenteen huokosrakenteesta ja kosteuspitoisuudesta. Paineellisilla menetelmillä toimivan katkon aikaansaaminen on paineettomia menetelmiä nopeampaa. Aineen menekiä on kuitenkin hankalampaa arvioida rakenteessa mahdollisesti olevien onkaloiden takia, koska onkalot täytyvät hallitsemattomasti paineellisesti asennetusta aineesta.

Lisäksi injektointiaineiden liuotin- tai vesipohjaisuudella on suoritettujen kansainvälisten tutkimusten mukaan vaikutus menetelmän valintaan. Vesipohjaisten aineiden on havaittu etenevän vedellä kyllästyneessä rakenteessa paineettomasti asennettuna, kun taas liuotinpohjaisilla aineilla on todettu lopputuloksen olevan vedellä kyllästyneessä rakenteessa paineellisesti asennettuna parempi.

Laboratoriotutkimuksen ja kansainvälisten tutkimusten perusteella todettiin, että jälkikäteen asennettavien kapillaarikatkomenetelmien vaikutukset ovat lähinnä kosteuden nousua hidastavia ja kontrolloivia. Työssä esitettyjen tutkimusten mukaan kosteuden nousu käsittelytasosta ylöspäin kyetään pysäyttämään vain yhtenäisen kapillaarikatkon muodostavilla mekaanisilla menetelmillä. Niiden käyttömahdollisuudet korjauskohteilla ovat kuitenkin hyvin rajalliset. Nämä asiat tulee ottaa huomioon, kun suunnitellaan maanvastaisen rakenteen kapillaarikatkoa osana suurempaa korjauskokonaisuutta.

Avainsanat: kapillaarisuus, korjausrakentaminen, kapillaarikatko, injektointi, maanvastainen rakenne

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Eero Haara: Rising damp in structure in contact with ground and retrofitting treatments against rising damp.

Master of Science Thesis

Tampere University

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural engineering

Examiner: Professor Matti Pentti and D.Sc. (Tech.) Jukka Lahdensivu

October 2021

The harmfulness of the capillary moisture to structures in contact with ground has been an acknowledged problem for a long time and attempts have been made to restrict it with the different handlings of structures in the time escorting. However, according to studies it has been stated that the suitabilities of methods for repairing old structures are target-specifics and a method which would operate without problems in every type of structures exposed to rising damp has not yet been found.

The purpose of the thesis is to clarify capillarity as a building physical phenomenon and damages caused to structures exposed to rising damp. Furthermore, different alternatives of retrofitting methods against rising damp and matters to be observed while choosing the method are presented.

To clarify the points which affect the functionality of the different methods, international research reports and scientific publications were reviewed. Furthermore, a laboratory research which attempt was to clarify the operation of the chemical injection materials used in Finland was performed, in collaboration with Sweco Rakennetekniikka Oy and Contesta Oy. For the chemical injection treatments concrete test specimens were made using two different water-cement ratios.

The focus of the thesis was on examining chemical injection materials and their reactions against rising damp in brick and concrete structures. The installation of chemical injection materials is performed with different pressured and non-pressured methods depending on the composition of the material and substrate's pore structure and moisture content. Compared to non-pressured methods, it is quicker to accomplish the functional horizontal barrier with pressured methods, but more difficult to estimate the consumption of the material because of the possible vacuums in the structure which become uncontrollably full of the material that has been installed by pressure.

Furthermore, according to performed international studies the base material of chemical injection materials plays a role on the choice of the method. It has been noticed that water-based materials installed by non-pressure will spread in saturated structure whereas with solvent-based materials it has been stated that the result will be better in saturated structure when the material is installed by pressure.

According to the laboratory research and international studies it was stated that effects on retrofitting methods against rising damp are mainly slowing down the moisture rise and controlling it. According to the studies that have been presented in this thesis it is possible to completely stop the water from rising above the handling plane only by using a mechanical method that forms constant horizontal barrier. However, their possibilities to use on the renovation sites are very limited. These matters have to be taken into consideration when designing treatment against rising damp as a part of the bigger conservation.

Keywords: capillarity, construction repair, treatment against rising damp, injection, structure in contact with ground

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on laadittu Sweco Rakennetekniikka Oy:lle. Alkuun haluankin kiittää yritystä työn rahoituksesta ja erityisesti ohjaajaani Maija-Kaisa Ojalaa kannustavasta kommentoinnista ja avustuksesta käytännön järjestelyiden kanssa. Ohjaamisesta kuuluvat kiitokset myös läpi työprosessin kärsivällisesti opastaneelle Tampereen yliopiston professori Matti Pentille sekä työn toisena tarkastajana toimineelle tohtori Jukka Lahdensivulle.

Suuri kiitos Constesta Oy:lle laboratoriotutkimuksen mahdollistamisesta ja tärkeästä avustamisesta koejärjestelyissä. Kiitokset myös Swerock Oy:lle, Insinööritoimisto Sulin Oy:lle, Alimex Oy:lle ja Eskon Oy:lle laboratoriotutkimukseen osallistumisesta.

Haluan kiittää Matilda tuesta ja ymmärryksestä kirjoitusprosessin aikana, joka on vaatinut useita arki- ja viikonloppuiltoja. Kiitos Jannelle betonimyllyn lainaamisesta sekä Katriinalle ja Rikulle majoituksen tarjoamisesta Vantaan reissujeni ajaksi. Kiitos koko lähipiirilleni tuesta ja kiinnostuksesta työtäni kohtaan.

Lopuksi haluan kiittää opiskeluaikanani tapaamiani ihmisiä, joiden kanssa olen ystäväystynyt. Teidän ansioistanne ajoittain loputtomaltakin tuntuneen puurtamisen lisäksi viimeisestä kuudesta vuodesta on jäänyt käteen ikimuistoisia kokemuksia niin Suomessa kuin ulkomaillakin.

Tampereella, 20.10.2021

Eero Haara

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen taustaa	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	2
1.3 Tutkimuksen suoritus	2
2. MAANVASTAISTEN RAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA	3
2.1 Ilman suhteellinen kosteus	5
2.2 Hygroskooppinen tasapainokosteus	5
2.2.1 Vesihöyryn diffuusio	6
2.2.2 Pintadiffuusio	7
2.2.3 Kapillaarikondessi	8
2.2.4 Materiaalien hystereesi-ilmiö	9
2.3 Kapillaarisuus	11
2.3.1 Kapillaarinen nousukorkeus	13
2.3.2 Kapillaarinen kosteustasapaino	14
2.3.3 Kapillaariominaisuuksien määrittäminen	15
2.3.4 Kapillaarinen kosteusvirran tiheys	17
2.3.5 Yhdistetty kaasun ja nesteen kulkeutuminen	18
2.3.6 Veden paineenalainen siirtyminen	19
2.4 Kosteuden kapillaarinen nousu rakenteessa	21
2.4.1 Kapillaarinen kosteus betonissa	22
2.4.2 Kapillaarinen kosteus tiilessä	23
3. KAPILLAARISEN KOSTEUDEN AIHEUTTAMAT VAURIOMEKANISMIT	25
3.1 Mikrobivauriot	26
3.2 Raudoitteiden korroosio	27
3.2.1 Karbonatisoitunut betoni	28
3.2.2 Kloridipitoinen betoni	29
3.3 Pakkasvauriot	31
3.4 Suolan kiteytyminen	33
3.4.1 Kiteytymisen vaikutukset	33
3.4.2 Kiteytyminen rakenteen pinnalle	34
3.5 Hydrolyysi	35
3.6 Sulfaatit rakenteessa	36
3.6.1 Ettringiittilaajeneminen	36
3.6.2 Kipsilaajeneminen	37
3.7 Betonin alkali-kiviainesreaktio	37
4. KAPILLAARIKATKON ASENTAMINEN EUROOPASSA	39
4.1 Mekaaniset menetelmät	39
4.2 Injektointimenetelmät	42
4.2.1 Paineellinen menetelmä	42
4.2.2 Parafiinimenetelmä	42
4.2.3 Impulssimenetelmä	43
4.2.4 Monivaihemenetelmä	43

4.2.5	Paineeton menetelmä	44
4.3	Injektointiaineet	45
4.4	Sähkökineettinen menetelmä	47
4.5	Seinän perustuksen tuuletus	49
4.6	Suoritetut tutkimukset	50
4.6.1	Eri menetelmien pitkäaikaisvaikutukset	51
4.6.2	Kosteuspitoisuuden vaikutus injektointiaineiden tehokkuuteen ja leviämiseen	51
4.6.3	Injektointiliuoksen ja kosteuspitoisuuden vaikutukset	52
4.6.4	Matalapaineinjektoinnit silaani-/siloksaanipohjaisilla tuotteilla	52
4.6.5	Injektointiaineiden pitkäaikaisvaikutukset	53
4.6.6	Injektointiaineiden tehokkuus ja leviäminen nestemäisillä ja geelimäisillä aineilla	53
4.6.7	Freeztecq DPC:n toimivuus kevytbetoniharkoissa	55
5.	SUOMESSA KÄYTETYT INJEKTOINTITUOTTEET	56
5.1	Geelimäiset tuotteet	56
5.2	Nestemäiset tuotteet	57
5.3	Kiinteät tuotteet	57
6.	LABORATORIOTUTKIMUS JA TEHDYT HAVAINNOT	59
6.1	Koekappaleet	59
6.1.1	Koko ja määrä	59
6.1.2	Jälkihoito	60
6.1.3	Koekappaleiden käsittely	61
6.2	Vedenimeytyskokeen suorittaminen	65
6.3	Koekappaleiden kosteusolosuhteet	68
6.4	Testitulokset	69
6.4.1	Vertailukappaleet	70
6.4.2	Xypex Concentrate	72
6.4.3	Isophob-K	76
6.4.4	Köster Crisin 76 Concentrate	79
6.4.5	Vandex IC	81
6.4.6	Aquastop	83
6.5	Tulosten arviointi	85
6.5.1	Sementtipohjainen tuote	85
6.5.2	Nestemäiset tuotteet	88
6.5.3	Geelimäiset tuotteet	91
6.6	Yhteenveto laboratoriotutkimuksista	94
7.	YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUKSET	96
7.1	Tutkimusten vertailu	96
7.2	Johtopäätökset	96
7.3	Jatkotutkimukset	97
	LÄHTEET	98
	LIITE A	

KUVALUETTELO

Kuva 1. Yleisimmät rakennuksen sisäiset ja ulkopuoliset kosteuslähteet [3, s. 39].	3
Kuva 2. Maanvastaiseen rakenteeseen maaperästä siirtynyt kosteus ja sen vaikutus rakenteen pinnoitteeseen. [2, s. 167].	4
Kuva 3. Tasapainokosteuskäyrän vaiheet [9, s. 10].	6
Kuva 4. Kosteuden siirtymisen vaiheet suhteellisen kosteuden kasvaessa [9, s. 41].	8
Kuva 5. Hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän periaate [3, s. 349].	10
Kuva 6. Tiilen tasapainokosteuskäyrä [2, s. 104].	10
Kuva 7. Betonin adsorptio- (abs) ja desorptiokäyrät (des) eri vesi-sementtisuhteilla [2, s. 104].	11
Kuva 8. Veteen kastettu putki, jossa vesi kohoaa putken reunamia pitkin kapillaarivoimien vaikutuksesta [9, s. 84].	12
Kuva 9. Kapillaarinen tasapainokosteus kuvattuna huokosalipaineen funktiona [9, s. 29].	14
Kuva 10. Veden imeytymiskokeen muodostama todellinen ja teoreettinen massan muutoksen käyrä ajan neliöjuuren funktiona [9, s. 94].	15
Kuva 11. Tunkeutumiskertoimen määrittäminen veden nousukorkeuden suhteella ajan neliöjuureen [9, s. 94].	16
Kuva 12. Rakenteessa tapahtuva samanaikainen diffuusio ja kapillaarinen imu [4, s. 104].	19
Kuva 13. Tiilen kapillaarinen kosteustasapaino suhteessa etäisyyteen vapaan veden pintaan [2, s. 106].	24
Kuva 14. Kapillaarisen kosteuden kohoaminen rakenteessa ja sen haihtuminen sisäilmaan [2, s. 168].	25
Kuva 15. Puretun seinärakenteen alaojhauspuun kapillaarikosteudesta aiheutunut lahovaurio.	27
Kuva 16. Korroosioaurio kellarikerroksen kapillaarisesti kosteusrasitetussa seinärakenteessa.	28
Kuva 17. Raudoitteen korroosion sähkökemiallinen prosessi [13, s. 109].	29
Kuva 18. Sementin kriittisen kloridipitoisuuden vaihtelu ja siihen vaikuttavat tekijät [15].	30
Kuva 19. Periaatekuva kloridien tunkeutumisesta betoniin [13, s. 114].	31
Kuva 20. Kalsiumkarbonaattia putkikanaalin alapohjan pinnalla [2, s. 140].	35
Kuva 21. Kalsiumkarbonaattia maanvastaisen tiiliseinän pinnassa [29].	35
Kuva 22. Vedeneristelevyn asentaminen sahattuun rakenteeseen [35].	40
Kuva 23. Kromiteräspellin asennus paineilmavasaralla [35].	41
Kuva 24. Monivaiheinjektointin vaiheet porareian tekemisestä injektointiaineen syöttämiseen [35].	44
Kuva 25. Injektointiainesten neljä eri vaikutusperiaatetta [35].	46
Kuva 26. Tasavirtakentän aiheuttama kosteusvirran suunnanmuutos [38].	48
Kuva 27. Periaatekuva seinän perustuksen kuivatuksesta [22].	50
Kuva 28. Tiilirakenteesta porattu lieriönäyte, jossa on keskellä muuraussauma [49].	54
Kuva 29. Koekappale ja porareikä geelimäisten tuotteiden injektointia varten [49].	54
Kuva 30. Xypex Concentrate:n muodostama kiderakenne betonissa pyyhkäisy-elektronimikroskoopilla kuvattuna 500 kertaisena suurennoksena [63].	58
Kuva 31. Betoniasemalla valmisbetonista valetut koekappaleet muoteissa.	60
Kuva 32. Sahattujen koekappaleiden osien mitat, sahauskohdat ja nimeäminen.	62
Kuva 33. Timanttisaha ja sahattu koekappale.	62
Kuva 34. Koekappale sahattuna kuuteen osaan.	62
Kuva 35. Vandex IC:n injektointikohta viiden viikon imeytymisen jälkeen.	63
Kuva 36. Aquastop:n injektointikohta viiden viikon imeytymisen jälkeen.	63
Kuva 37. Xypex Concentrate:n injektointikohta viiden viikon imeytymisen jälkeen.	64
Kuva 38. Isophob-K:n injektointikohta viiden viikon imeytymisen jälkeen.	64
Kuva 39. Köster Crisin 76 Concentrate:n injektointikohta viiden viikon imeytymisen jälkeen.	64
Kuva 40. Koekappaleista sahattujen kappaleiden kuivaus tuuletetussa lämpökaapissa.	65
Kuva 41. Nystyräinen kumiritilä asetettiin imeytysastian pohjalle pitämään kappaleet irti astian pohjasta.	66
Kuva 42. Yhdessä astiassa imeytettiin 12 kappaletta.	67
Kuva 43. Kappaleiden punnitusvaaka.	68
Kuva 44. Koekappaleiden porareikiin asennetut mittapäät.	68
Kuva 45. V/s 0,63 vertailukappaleen painonnousukuvaajat ajan neliöjuuren funktiona.	71
Kuva 46. V/s 0,8 vertailukappaleen painonnousukuvaajat ajan neliöjuuren funktiona.	71
Kuva 47. Vertailukappaleet noin 22 tunnin imeytyksen jälkeen.	72

Kuva 48. Keskiarvokuvaajat Xypex Concenterate -käsiteltyjen v/s 0,63 koekappaleiden tuloksista.	74
Kuva 49. Keskiarvokuvaajat Xypex Concenterate -käsiteltyjen v/s 0,8 koekappaleiden tuloksista.	74
Kuva 50. Kuvaajat Xypex Concenterate -käsiteltyyn ja upotetun v/s 0,63 koekappaleen tuloksista.	75
Kuva 51. Kuvaajat Xypex Concenterate -käsiteltyyn ja upotetun v/s 0,8 koekappaleen tuloksista.	76
Kuva 52. Keskiarvokuvaajat Isophob-K -käsiteltyjen v/s 0,63 koekappaleiden tuloksista.	78
Kuva 53. Keskiarvokuvaajat Isophob-K -käsiteltyjen v/s 0,8 koekappaleiden tuloksista.	78
Kuva 54. Keskiarvokuvaajat Köster Crisin 76 Concentrate -käsiteltyjen v/s 0,63 koekappaleiden tuloksista.	80
Kuva 55. Keskiarvokuvaajat Köster Crisin 76 Concentrate -käsiteltyjen v/s 0,8 koekappaleiden tuloksista.	80
Kuva 56. Keskiarvokuvaajat Vandex IC -käsiteltyjen v/s 0,63 koekappaleiden tuloksista.	82
Kuva 57. Keskiarvokuvaajat Vandex IC -käsiteltyjen v/s 0,8 koekappaleiden tuloksista.	82
Kuva 58. Keskiarvokuvaajat Aquastop -käsiteltyjen v/s 0,63 koekappaleiden tuloksista.	84
Kuva 59. Keskiarvokuvaajat Aquastop -käsiteltyjen v/s 0,8 koekappaleiden tuloksista.	84
Kuva 60. Sementtipohjaisella tuotteella käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden tunnin kohdalta.	86
Kuva 61. Sementtipohjaisella tuotteella käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.	86
Kuva 62. Sementtipohjaisella tuotteella v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden tunnin kohdalta.	87
Kuva 63. Sementtipohjaisella tuotteella v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.	87
Kuva 64. Nestemäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden tunnin kohdalta.	88
Kuva 65. Nestemäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.	89
Kuva 66. Nestemäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden tunnin kohdalta.	89
Kuva 67. Nestemäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.	90
Kuva 68. Geelimäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden tunnin kohdalta.	91
Kuva 69. Geelimäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.	92
Kuva 70. Geelimäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden ensimmäisen tunnin kohdalta.	92
Kuva 71. Geelimäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.	93

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CSH	kalsiumsilikaattihydraatti
RH	suhteellinen kosteus
d	halkaisijan leveys
paino-%	painoprosentti
r	säteen pituus
v/s	vesi-sementtisuhte
°C	celsiusaste
C ₃ A	kalsiumaluminaatti
C ₃ A·3CS·H ₃₂	ettringiitti
Ca(OH) ₂	kalsiumhydroksidi
Ca ²⁺	kalsiumioni
CO ₂	Hiilidioksidi
Cl ⁻	kloridi-ioni
CaSO ₄ · 2 H ₂ O	kipsi
CH ₅ NaO ₃ Si	natrium metyyliisilikonaatti
SO ₄ ²⁻	sulfaatti-ioni
NaOH	natriumhydroksidi
Na ⁺	natriumioni
Mg ²⁺	magnesiumioni
Mg(OH) ₂	magnesiumhydroksidi

1. JOHDANTO

Maanvastaisia rakenteita tarkasteltaessa tulee huomioida niiden kosteustekninen toimivuus kapillaarisen kosteusrasituksen alaisena. Kapillaarinen kosteusrasitus voi aiheutua esimerkiksi kellarin seinän tapauksessa hienorakeisen täyttömaan välityksellä vaakasuunnassa, tai kapillaariselle pohjamaalle perustetun rakennuksen tapauksessa pystysuunnassa kapillaariveden noustessa pohjavedenpinnasta maa-ainesta pitkin ylöspäin. Pohjavesi voi myös luoda suoraan hydrostaattista painetta pohjavedenpinnan alapuolisille rakenneosille. Kapillaaristen voimien vaikutuksesta rakenteeseen imeytynyt vesi nostaa merkittävästi sen kosteuspitoisuutta, mistä voi aiheutua vaurioita rakenteeseen.

1.1 Tutkimuksen taustaa

Kapillaarisen kosteuden haitallisuus on jo pitkään ollut tiedossa ja sen seurauksena rakenteissa tapahtuvaa, jopa useita metrejä korkeaa, kosteuden nousua on pyritty rajoittamaan vuosisatojen kuluessa erilaisilla rakenneratkaisulla. Jälkikäteen asennettavia kapillaarikatkoja on asennettu muurattuihin rakenteisiin 1960-luvulta lähtien. Tuolloin käytössä olleita mekaanisia- ja injektointimenetelmiä on kehitetty nykypäiville asti, mutta niistä löytyy edelleen huomionarvoisia kehityskohtia. Varsinkin kemiallisten injektointiainesten toimintaa on tutkittu kansainvälisesti laajalti ja joitakin yhdenmukaisia päätelmiä on tutkimusten perusteella pystytty muodostamaan, mutta avoimia kysymyksiä aineiden toiminnasta eri asennusmenetelmillä esiintyy edelleen. [1]

Myös Suomessa pystyrakennetta pitkin nousevan kapillaarikosteuden etenemisen estämiseksi tulee korjauskohteissa usein kysymykseen jälkikäteen asennettavien kapillaarikatkojen toteuttaminen kemiallisella injektointimenetelmällä. Injektointiaineiden toiminta perustuu kemiallisiin reaktioihin, joiden seurauksena kapillaarisen kosteuden eteneminen rakenteessa on tarkoitus pysähtyä. Injektointiaineissa ja niiden toimintamekanismeissa on kuitenkin eroja, jotka eivät ole yleisesti tiedossa.

Myös tietoisuutta kapillaarisesta kosteuden noususta rakennusfysikaalisena ilmiönä ja siitä aiheutuvista vauriomekanismeista tulisi parantaa, jotta maanvastaisten rakenteiden kosteusongelmia pystyttäisiin sekä ennaltaehkäisemään että korjaamaan onnistuneesti. Samoin kapillaariveden mukana rakenteeseen kulkeutuvat suolat tulisi huomioida korjausratkaisuja mietittäessä, sillä nekin saattavat olla haitallisia rakenteelle.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Diplomityössä selvitettiin kansainvälisesti käytössä olevat jälkikäteen asennettavat kapillaarikatkomenetelmät ja niiden toimivuuteen vaikuttavat tekijät. Koska käytössä olevista menetelmistä kemiallisten injektointiaineiden käyttäminen korjauskohteilla on yleisintä, tarkasteltiin niitä muita menetelmiä syvällisemmin. Työssä kartoitettiin käytössä olevat injektointiaineet ja perehdyttiin niiden toimintamekanismeihin. Samalla pyrittiin muodostamaan käsitys aineiden leviämisestä ja tehokkuudesta eri injektointiolosuhteissa ja materiaaleissa. Lisäksi työssä käytiin läpi kapillaarisesta kosteudesta rakenteelle aiheutuvia vaurioita. Näistä tarkasteltiin tarkimmin kapillaarisen kosteuden mukana rakenteeseen päätyvien suolojen rakenteelle aiheuttavia vaurioita. Tavoitteena oli selvittää minkälaisia vauriomekanismeja kukin yleisimmistä suolatyypeistä maanvastaisissa rakenteissa tyypillisesti saa aikaan.

Työn sisällön perusteella oli tavoitteena muodostaa kokonaiskäsitys siitä, mihin asioihin maanvastaisissa rakenteissa jälkikäteen asennettavilla kapillaarikatkokorjauksilla pyritään vaikuttamaan, miten korjaukset ovat todellisuudessa onnistuneet ja mitkä asiat niiden tarkoituksenmukaiseen toimivuuteen vaikuttavat. Tätä kautta pystyttiin arvioimaan jälkikäteen asennettavan kapillaarikatkon roolia osana isompaa maanvastaisen rakenteen korjauskokonaisuutta.

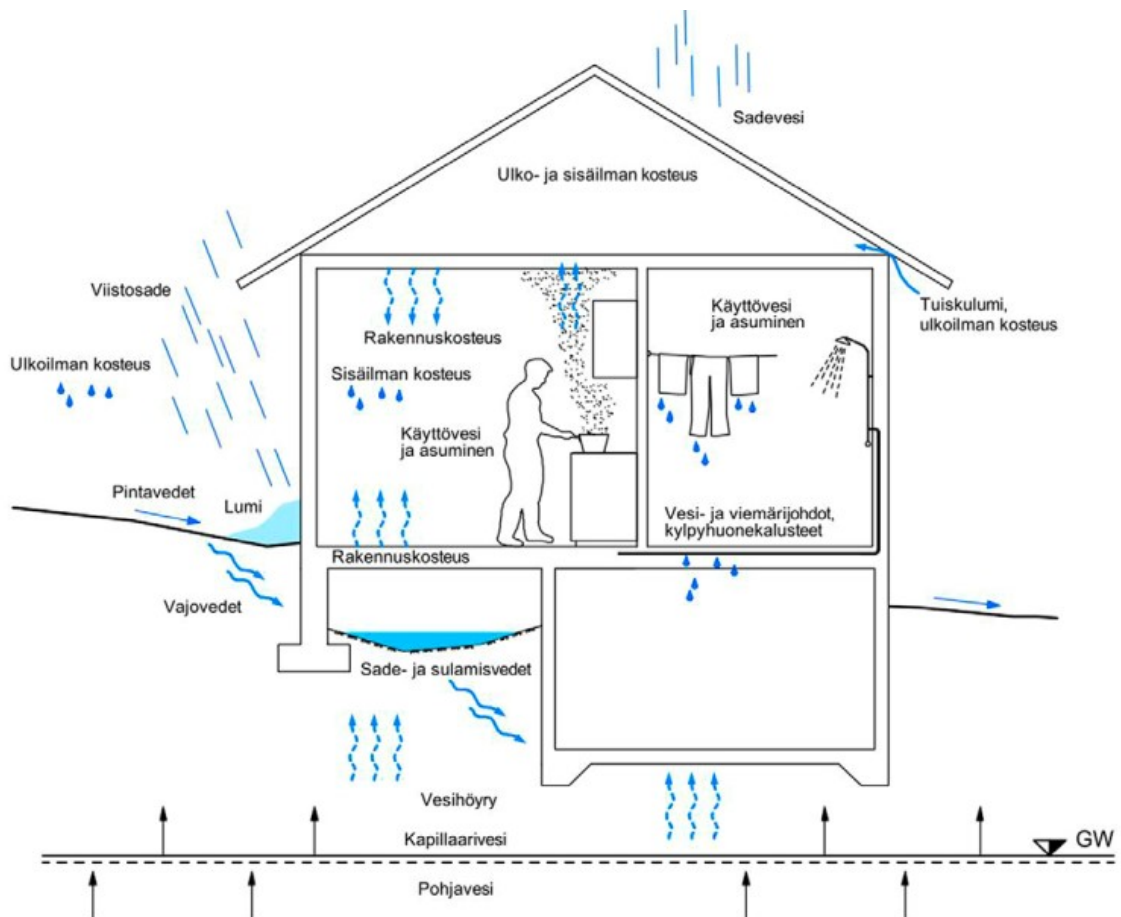
1.3 Tutkimuksen suoritus

Diplomityössä on käyty kirjallisuuden avulla läpi kapillaariseen kosteuden nousuun liittyviä rakennusfysikaalisia ilmiöitä ja sen aiheuttamasta kosteusrasituksesta aiheutuvia vauriomekanismeja. Työtä rajattiin rakenteiden puolesta koskemaan muurattuja ja betonirakenteisia kantavia pilareita ja maanvastaisia seiniä. Lisäksi on perehdytty saatavilla olevaa kansainvälistä kirjallisuutta hyödyntäen Euroopassa käytössä oleviin jälkikäteen asennettaviin kapillaarikatkomenetelmiin. Perusteellinen menetelmien käsittely on rajattu koskemaan kemiallisia injektointeja. Tämä suoritettiin perehtymällä käytössä olevien aineiden ominaisuuksiin ja niiden asennuksessa huomioon otaviin seikkoihin. Tietoa on kerätty perehtymällä kansainvälisiin tutkimuksiin ja ohjeistuksiin sekä tuotevalmistajien tarjoamaan julkiseen dataan.

Kirjallisen analyysin tueksi järjestettiin laboratoriokoe, jolla pyrittiin käytännön tasolla havainnollistamaan Suomessa käytössä olevien injektointiaineiden vaikutuksia kapillaarisesti imeytyneen veden määrään korkean vesi-sementtisuhteen omaavissa betonikoekappaleissa. Tutkimusmenetelmää ja -tuloksia on esitetty työn toiseksi viimeisessä luvussa 6 ja liitteessä A.

2. MAANVASTAISTEN RAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA

Kosteus esiintyy rakennuksissa kolmessa eri olomuodossa: vesihöyrynä, vetenä ja jäänä [2, s. 101]. Kuvassa 1 on esitetty rakennukselle aiheutuvat tyypillisimmät kosteuslähteet, joista aiheutuu rakenteille kosteusrasitusta.



Kuva 1. Yleisimmät rakennuksen sisäiset ja ulkopuoliset kosteuslähteet [3, s. 39].

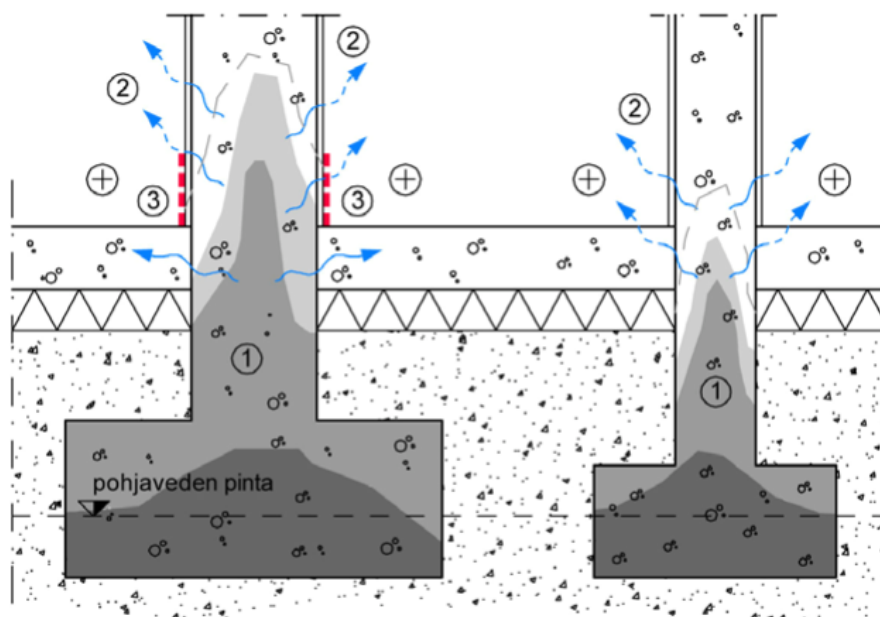
Kosteuden siirtymisen on määritelty tapahtuvan diffuusion, konvektion, kapillaarisen imun, tuulen paineen tai painovoiman vaikutuksesta [4, s. 5]. Maanvastaisten rakenteiden sisällä kosteus siirtyy diffuusiolla ja kapillaarisella imulla. Diffuusion ja kapillaarisen kosteuden aiheuttamaa kosteusrasitusta kohdistuu maanvastaisille rakenteille pohjavedestä ja kosteasta maaperästä (kuva 1). Lisäksi rakennuksesta pois päin johtamattomat pintavedet aiheuttavat rakenteelle rasiitusta vajovetenä (kuva 1), joka imeytyy painovoiman vaikutuksesta maanpinnalta maaperään. Myös rakenteissa tai niiden vierellä kulkevien putkien vuodot aiheuttavat rakennuksen sisäistä kosteusrasitusta. [2, s. 101, 111-112]

Huokosiin rakenteisiin kosteus voi sitoutua neljällä eri tavalla [5, s. 13]:

- Hygroskooppisesti
- Kapillaarisesti
- Kemiallisesti
- Osmoottisesti

Kemiallisesti eli ioni- tai molekyylisidoksella sitoutuneen veden, esimerkiksi kideveden, tulkitaan olevan osa materiaalia, joten sen vaikutus jätetään yleensä pois kostusteknisistä tarkasteluista. Osmoottista eli puoliläpäisevän kalvon läpi kulkevan diffuusion aiheuttamaa kosteuden sitoutumista ilmenee pääasiassa eloperäisissä aineissa. [5, s. 16]

Koska työssä käsiteltävät materiaalit tiili ja betoni eivät sisällä eloperäisiä aineita, keskitytään hygroskooppisesti ja kapillaarisesti tapahtuvaan kosteuden sitoutumiseen. Kuvassa 2 on esitetty tyypillinen tilanne, jossa maanvastaisen seinän tai pilarin välityksellä maaperästä kapillaarisesti kulkeutunut kosteus aiheuttaa vaurioille altistavan kosteusra-
situksen rakenteen osille.



- 1 Maakosteuden imeytyminen kapillaarisesti
- 2 Kosteuden haihtuminen
- 3 Pinnoitteen irtoaminen ja pinnan vaurioituminen

Kuva 2. Maanvastaiseen rakenteeseen maaperästä siirtynyt kosteus ja sen vaikutus rakenteen pinnoitteeseen [2, s. 167].

Siirtyvän kosteuden määrä vaihtelee suuresti ilman suhteellisen kosteuden (ks. alaluku 2.1) mukaan. Esimerkiksi maanvastaisia rakenteita ympäröivissä täyttörakenteissa

(esim. hiekassa, sorassa ja murskeessa) hygroskooppinen tasapainokosteus (ks. alaluku 2.2) on noin 1 painoprosenttia (paino-%) rakenteen painosta, mikä vastaa vesimäärää $15 \dots 20 \frac{kg}{m^3}$. Kapillaarinen tasapainokosteus (ks. alaluku 2.3.2) voi samassa rakennekerroksessa olla kymmeniä kertoja tätä arvoa suurempi eli vesimäärältään välillä $50 \dots 400 \frac{kg}{m^3}$. [6, s. 13–14] Maanvastaisille rakenteille aiheutuvan kosteusrasituksen määrä on siis merkittävästi riippuvainen ympäröivien täyttökerrosten kosteusolosuhteista.

2.1 Ilman suhteellinen kosteus

Ilman suhteellinen kosteus (RH) voidaan määrittää ilman vesihöyryn osapaineen tai kosteuspitoisuuden avulla. Kummassakin tapauksessa arvo jaetaan lämpötilariippuvaisella kyllästyskosteuspitoisuudella kaavojen 2.1 ja 2.2 mukaisesti. [7, s. 30]

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (2.1)$$

tai

$$\varphi = \frac{v}{v_{sat}}, \quad (2.2)$$

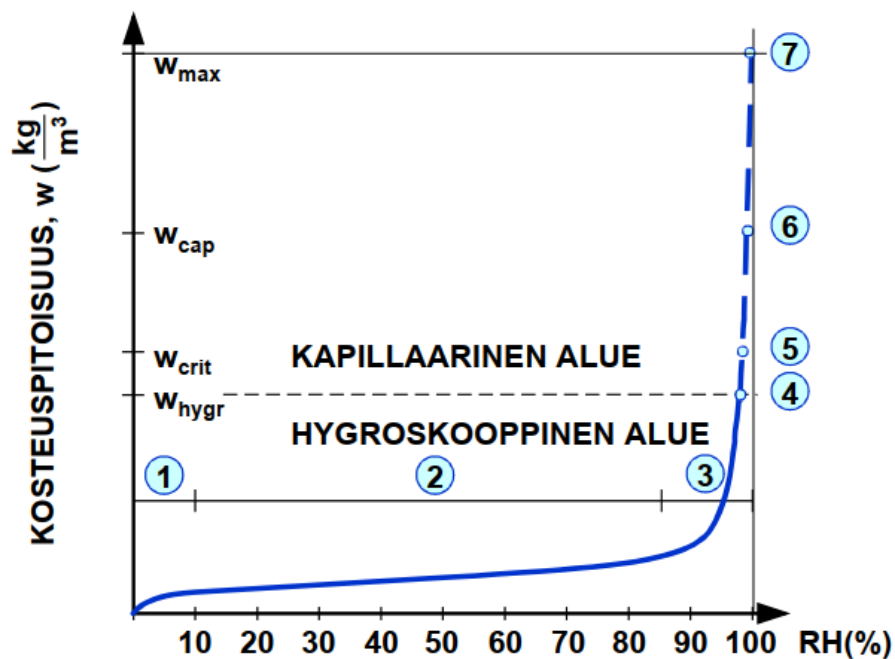
joissa p_v [Pa] on ilmassa vallitseva vesihöyryn osapaine, $p_{v,sat}$ [Pa] on vesihöyryn kyllästysosapaine, v $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ on vesihöyryn kosteuspitoisuus ja v_{sat} $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ on vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus. Suhteellinen kosteus voidaan ilmoittaa myös prosenttilukuna. [8, s. 104]

2.2 Hygroskooppinen tasapainokosteus

Eri materiaalit pystyvät sitomaan kosteutta ja luovuttamaan sitä ympäröivään ilmaan vaihtelevia määriä. Tätä materiaalin kykyä kutsutaan hygroskooppisuudeksi. Materiaaleille on tutkimusten perusteella määritetty hygroskooppisia tasapainokosteuskäyriä, jotka kuvastavat materiaalin kosteuspitoisuuden riippuvuutta ilman suhteelliseen kosteuspitoisuuteen. [2, s. 104]

Pienillä suhteellisen kosteuden arvoilla kosteus sitoutuu rakenteeseen adsorptiolla eli vesimolekyylien kiinnitymisellä huokosten seinämiin niiden pintojen vetovoimien vaikutuksesta [5, s. 13]. Ensin ilmenevän monomolekyylläisen adsorption aikana vesimolekyylit kiinnittyvät huokosseinämään yksimolekyylliseksi kerrokseksi sähköisten sidoksien vaikutuksesta (kuva 3, alue 1). Tätä seuraavassa polymolekyylläisessä

adsorptiossa vesimolekyylikerros kasvaa useampi kerroksiseksi (kuva 3, alue 2). Suhteellisen kosteuden kasvaessa sitoutumista alkaa tapahtua myös kapillaarikondenssilla, jonka vaikutuksesta pienet, halkaisijaltaan (d) alle $0,1 \mu\text{m}$ kokoiset huokokset täyttyvät adsorptiovedestä. Sen alkamishetkenä voidaan pitää kostumisen vaihetta, jossa pienimmät huokokset ovat täysin adsorptiovedestä täyttyneet ja vesi alkaa siirtyä niissä kapillaarisesti (ks. alaluku 2.3). Tasapainokosteuskäyrällä kapillaarikondenssin alkaminen havaitaan käyrän kulmakertoimen eksponenttinaalisena kasvuna (kuva 3, alue 3). [9, s. 14–15]



Kuva 3. Tasapainokosteuskäyrän vaiheet [9, s. 10].

Hygroskooppisen alueen ylärajaksi on määritetty suhteellisen kosteuden arvo $\text{RH} 98 \%$, koska tätä korkeampia suhteellisen kosteuden arvoja ei pystytä saavuttamaan säilyttämällä kappaletta kosteuskammiossa. Kappale saavuttaa tällöin hygroskooppisen kylläystykosteuspitoisuuden w_{hyg} (kuva 3, kohta 4). Kun suhteellinen kosteus on suurempi kuin $\text{RH} 98 \%$, kappaleen katsotaan olevan kapillaarisella alueella ja sen kosteuspitoisuuden määrittäminen vaatii ylipaineessa suoritettuja mittauksia. [9, s. 15]

2.2.1 Vesihöyryn diffuusio

Vesihöyryn diffuusiolla tapahtuva kosteuden siirtyminen aiheutuu vesihöyrypitoisuuden pyrkimyksestä saavuttaa kosteustasapaino ympäröivän ilman kanssa. Vesihöyryn diffuusiosta kosteuden siirtymissuunta on aina suuremmasta vesihöyryn pitoisuudesta tai osapaineesta pienempään päin. [2, s. 113] Tätä kostedensiirtymisen muotoa kutsutaan

myös kaasudiffuusioksi. [9, s. 49] Laskennallisesti vesihöyryn diffuusion aiheuttama kosteusvirran tiheys g_v [$kg/(m^2s)$] voidaan määrittää isotermisessä olosuhteessa eli lämpötilan pysyessä vakiona käyttämällä Fickin lakia (kaavat 2.3 ja 2.4) [8, s. 118].

$$g_v = -\delta_p * \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (2.3)$$

$$g_v = -\delta_v * \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (2.4)$$

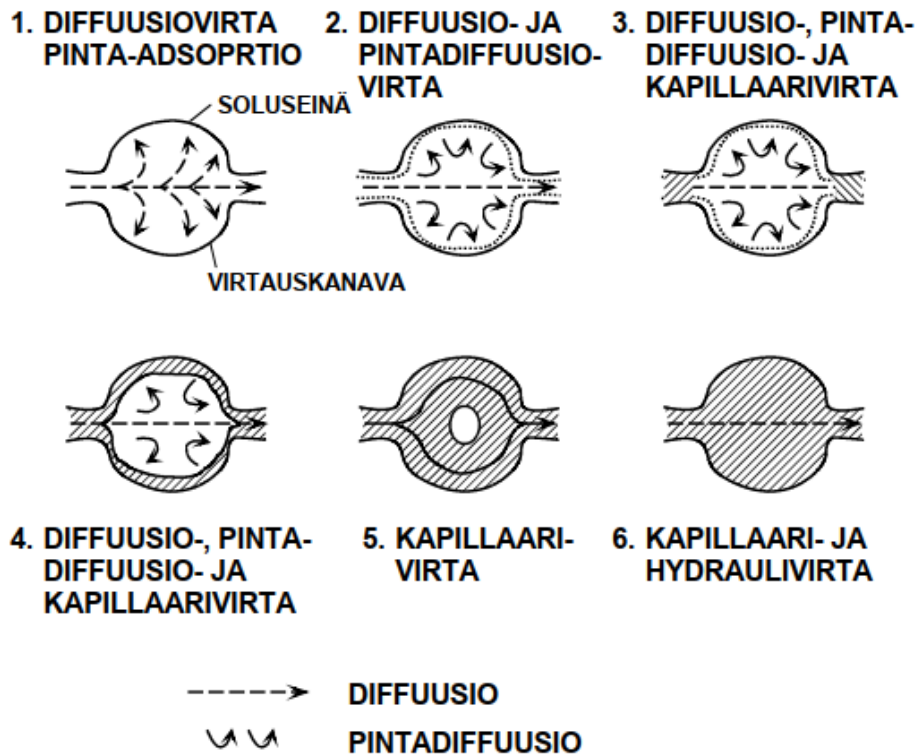
joissa δ_v [m^2/s] ja δ_p [$kg/msPa$] ovat materiaalin vesihöyrynläpäisevyydet, p_v [Pa] on vesihöyryn osapaine, v [kg/m^3] on vesihöyryn kosteuspitoisuus ja x [m] on tarkasteltavan kohdan etäisyys materiaali pinnasta. [4, s. 96]

Vesihöyryn diffuusion siirtämän kosteuden määrä pysyy hygroskooppisella alueella lähes vakiona. Se tulee huomioida rakennusfysikaalisessa tarkastelussa merkittävänä kosteuden siirtäjänä siihen asti, kunnes materiaaliin on muodostunut yhtenäinen kapillaariverkosto ja kosteus liikkuu pääosin nestemäisenä. Hygroskooppisella tasapainokosteuskäyrällä tätä kohtaa kutsutaan kriittiseksi kosteuspitoisuudeksi w_{crit} (kuva 3, kohta 5). [9, s. 49–51]

2.2.2 Pintadiffuusio

Suhteellisen kosteuden kasvaessa siirtyy kosteus yhä enemmän kaasudiffuusion lisäksi pintadiffuusiona. Se voi alkaa jo huokosilman suhteellisen kosteuden ollessa RH 30 % eli silloin, kun uloimpana huokosseinästä olevien vesimolekyylien sidosvoimat huokosen pintaan ovat niin heikot, että molekyylit palaavat takaisin huokosilmaan. Huokosilmassa molekyyli siirtyy pienemmän kosteuspitoisuuden suuntaan ja adsorboituu heti uuteen mahdolliseen kohtaan. [9, s. 110–111]

Kaasudiffuusiosta poiketen pintadiffuusion potentiaalina on kosteuspitoisuus sekä huokosilman suhteellinen kosteus eli ne voivat tietyissä olosuhteissa siirtää kosteutta myös eri suuntiin. Kapillaarivirtauksen ja pintadiffuusion määrittelevät potentiaalit ovat vastavuoroisesti yhtenevät, joten kosteuden suunta on niiden vaikutuksesta aina sama. Vesihöyryn diffuusion, pintadiffuusion ja kapillaarivirran liikettä kasvavissa kosteusolosuhteissa on havainnollistettu Kuva 4. [9, s. 110]



Kuva 4. Kosteuden siirtymisen vaiheet suhteellisen kosteuden kasvaessa [9, s. 41].

Pintadiffuusion määrää on haastavaa mitata, joten sen vaikutus yhdistetään usein laskennassa samaan suuntaan kulkevan kapillaarivirtauksen kanssa. [9, s. 110]

2.2.3 Kapillaarikondessi

Kapillaarikondenssissa vesimolekyylit tiivistyvät huokosen pinnalle muodostaen neste-mäisen kaarevan pinnan. Huokosilman ja kaarevan vedenpinnan välille syntyy paine-ero, jonka vaikutuksesta vesihöyry tiivistyy vedeksi jo suhteellista kyllästyskosteus-pitoisuutta alemmissa kosteuspitoisuuksissa. [4, s. 288]

Huokossäteen r [m] suuruudesta riippuvainen ja kapillaarikondenssin käynnistävä suhteellisen kosteuden arvo φ' pystytään laskemaan Kelvinin lailla kaavalla 2.5.

$$\varphi' = \exp\left(-\frac{2\sigma}{\rho_w R_v T r}\right), \quad (2.5)$$

jossa σ [N/m] on veden pintajännitys, ρ_w [kg/m³] on veden tiheys, R_v [J/(kgK)] on vesihöyryn kaasuvakio (461,5 J/(kgK)) ja T on lämpötila celsiusasteina ilman yksikköä. [8, s. 118] Eräitä huokosen halkaisijoilla ja tällä kaavalla laskettuja suhteellisen kosteuden arvoja on esitetty taulukossa 1.

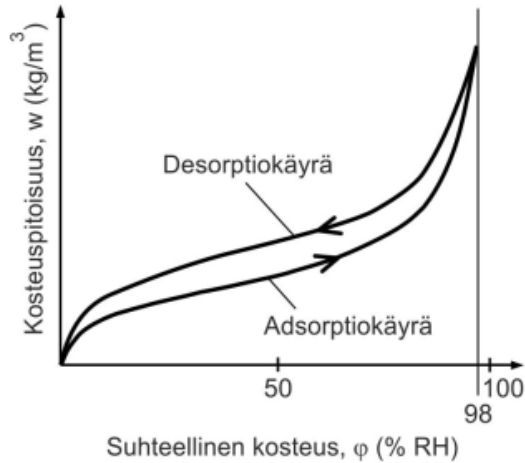
Taulukko 1. Huokosen halkaisijan ja kapillaarikondenssin käynnistymisen suhde [4, s. 291].

d [$* 10^{-9} m$]	φ' [%]
1	10
3	47
10	80
30	93
100	98
300	99,1
1000	99,8

Taulukosta 1 nähdään, että halkaisijaltaan 30 nm tai sitä pienemmät huokokset ovat kaikki täyttyneet vedellä suhteellisen kosteuden ollessa RH 93 %. Esimerkiksi betonin kapillaarihuokokset voivat säteeltään (r) olla $1 * 10^{-8} m$, jolloin kapillaarikondenssi tapahtuu suhteellisen kosteuden ollessa noin RH 90 %. Tulee kuitenkin muistaa, että rakennusmateriaalien huokosrakenne on hyvin monimutkainen eivätkä huokokset ole rakenteeltaan putken tai ympyrän muotoisia. [4, s. 290], [8, s. 118]

2.2.4 Materiaalien hystereesi-ilmiö

Materiaalin hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä (sorptiokäyrä) on erilainen riippuen siitä, onko kyseessä materiaalin kostuminen eli adsorptio vai kuivuminen eli desorptio. Tätä käyrien eroavaisuutta kutsutaan hystereesiksi. Käyrät jakautuvat periaatteeltaan kuvan 5 mukaisesti siten, että materiaalin kosteuspitoisuus säilyy korkeampana desorptiovaiheessa. [3, s. 349]

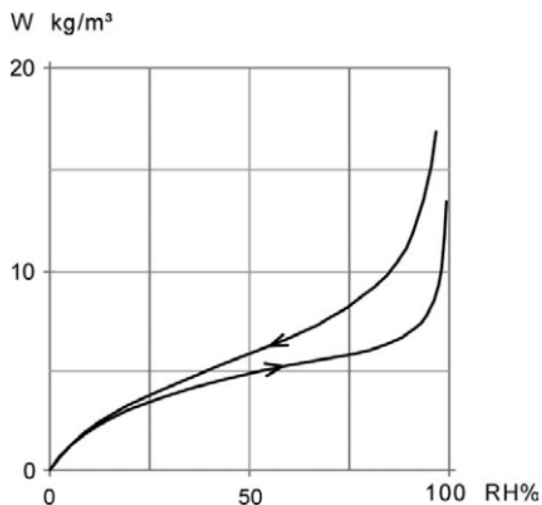


Kuva 5. Hygroσκοoppisen tasapainokosteuskäyrän periaate [3, s. 349].

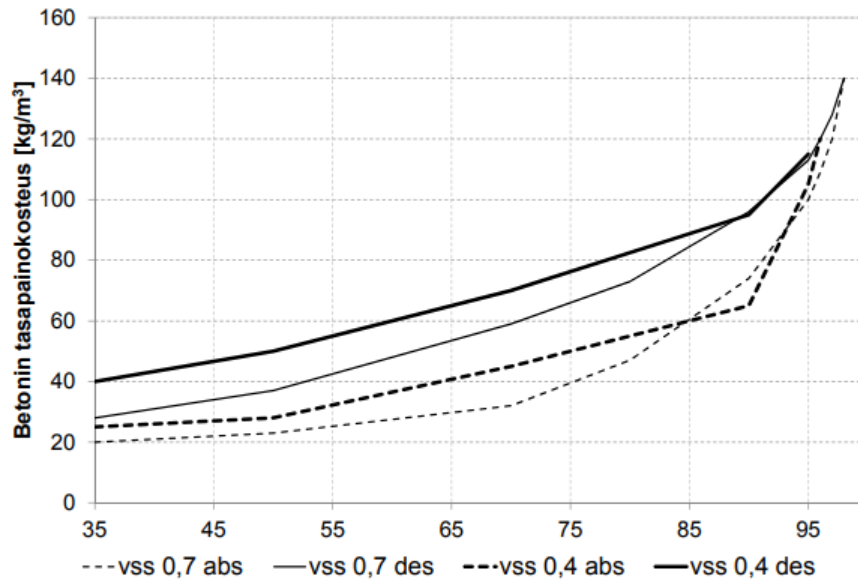
Tasapainokosteuskäyrän muoto määräytyy materiaalin hygroσκοoppisten ominaisuuksien mukaan. Leivon ja Rantalan [5, s. 14] mukaan tarkkaa syytä kuivumisvaiheen korkeammalle kosteuspitoisuudelle hygroσκοoppisella alueella ei tiedetä, mutta osittain sen arvellaan johtuvan seuraavista seikoista:

- Kostuessaan materiaalin huokosiin jää ilmaa, joka poistuu hitaasti veteen liukemalla. Tämä pitää kosteuspitoisuuden adsorptiossa alhaisempana.
- Materiaalin huokosrakenne on sellainen, että kuivuminen tapahtuu desorptiossa merkittävästi adsorptiota pienemmässä ilman suhteellisessa kosteudessa.
- Tasapainokosteuksia määritettäessä käytetään liian lyhyitä tasaantumisaikoja.

Maanvastaisissa rakenteissa käytettyjen betonin ja tiilen tasapainokosteuskäyrät adsorptiossa ja desorptiossa ovat esitettyinä kuvissa 6 ja 7.



Kuva 6. Tiilen tasapainokosteuskäyrä [2, s. 104].



Kuva 7. Betonin adsorptio- (abs) ja desorptiokäyrät (des) eri vesi-sementtisuhteilla [2, s. 104].

Kuvissa 6 ja 7 esitetyt tasapainokosteuskäyrät on laadittu lämpötilalle +23 celciusastetta (°C) ja ne ovat suuntaa antavia, koska kosteuskäyrät muuttuvat lämpötilan mukaan. Betonilla käyrään vaikuttavat myös vesi-sementtisuhte (v/s) sekä osa-aineksien määrät. [2, s. 105] Tasapainokosteuskäyrien perusteella on kuitenkin pääteltävissä, että betoni on näistä ominaisuuksista riippumatta tiiltä hygroskooppisempi materiaali eli siihen sitoutuu enemmän kosteutta tietyssä suhteellisessa kosteudessa.

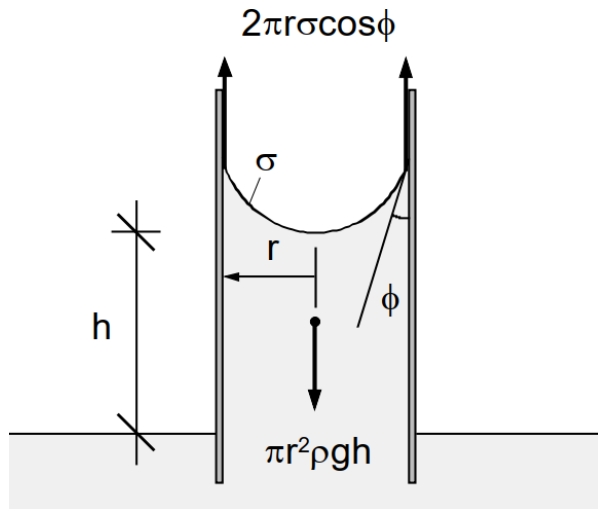
2.3 Kapillaarisuus

Kapillaarisuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä imeä kosteutta itseensä sen ollessa suorassa kosketuksessa vapaan veden kanssa. Tämä tapahtuu materiaalin huokosissa vallitsevan huokosalipaineen avulla, joka aikaansaa materiaalissa kosteutta siirtäviä imuvoimia. Ylöspäin suuntautuvan kapillaarisen imun lisäksi se voi suuntautua myös vaakasuuntaan tai alaspäin. Pystysuuntaisesta siirtymisestä poiketen painovoimalla ei näissä suunnissa ole rajoittavaa vaikutusta kosteuden siirtymiseen. [2, s. 111], [9, s. 98]

Fysikaalisesti kapillaarisuutta kuvataan nesteen pintajännityksen avulla. Nesteen pinta pyrkii aina muodostamaan pienimmän mahdollisen pinta-alan. Tämä selittyy energiaperiaatteella. Molekyyli omaa pienemmän energiamäärän sen ollessa kontaktissa ympäröivien molekyylien kanssa kuin mitä sillä olisi sen ollessa yksinään. Tämän takia kaikkein alhaisin energia vaikuttaa nesteen sisäisissä molekyyleissä. Nesteen pinnalla olevat molekyylit eivät ole täysin toisilla molekyyleillä ympäröityjä, joten ne omaavat suuremman energiamäärän. Koska neste pyrkii minimoimaan totaalienergian määrän, pyrkii se

pitämään nesteen pinnan mahdollisimman pienenä. Tästä aiheutuu nesteen pinnalle pintajännitys σ [N/m]. [8, s. 114] Tätä nesteen sisäistä vetovoimaa kutsutaan koheesioksi [9, s. 17].

Kapillaari-ilmiötä pystytään kuvaamaan parhaiten kuvan 8 mukaisella tilanteella, missä veteen kastetun putken sisällä vesi kohoaa muuta vedenpintaa korkeammalle.



Kuva 8. Veteen kastettu putki, jossa vesi kohoaa putken reunamia pitkin kapillaarivoimien vaikutuksesta [9, s. 84].

Kuvan 8 mukaisesti kapillaari-ilmiössä vedenpinta nousee putkessa kapillaarivoimien aiheuttaman huokosalipaineen avulla. Huokosalipaine muodostuu veden sisäisen koheesion sekä veden ja huokosen pinnan välisen vetovoiman eli adheesion pyrkiessä liikuttamaan vettä huokosen seinämiä pitkin. Tämän seurauksena veden pinta kaareutuu huokosen sisällä muodostaen kaarevan pintajännityksen σ . [9, s. 83] Tätä kaarevaa pinnanmuotoa kutsutaan meniskukseksi [4, s. 99].

Koheesion aiheuttama sisäinen vetovoima pyrkii aina muodostamaan nesteen pinnalle minimipinta-alan. Putkessa olevan veden tapauksessa tämä tarkoittaa sitä, että tasapainotilassa vedenpinta asettuisi tasaisen vaakasuoraksi. Koska vedenpinta kaareutuu kuitenkin meniskukseksi, täytyy ilmanpaineen olla vedenpainetta suurempi. [10, s. 132] Tätä paine-eroa kutsutaan huokosalipaineeksi ja se on suurimmillaan meniskuksen pinnassa. Paine-ero p [Pa] voidaan laskea Laplacen lain kaavalla 2.6, kun tiedetään nesteen pintajännitys ja meniskuksen kaareutumiskulma nesteen ja materiaalin kontaktikohdassa. [4, s. 99]

$$p = \frac{2\sigma}{r} * \cos(\phi), \quad (2.6)$$

jossa r [m] on putken säde, σ [N/m] on nesteen pintajännitys ja ϕ [°] on kaareutumiskulma kontaktikohdassa. Esimerkiksi puhtaan veden pintajännitys on 20 °C lämpötilassa 0,073 N/m. [4, s. 99]

Materiaalit jakautuvat vettä imeviin eli hydrofiilisiin materiaaleihin ja vettä hylkiviin eli hydrofobisiin materiaaleihin. Hydrofiilisillä materiaaleilla veden kaareutumiskulma huokosessa on pienempi kuin 90 ° ja hydrofobisilla materiaaleilla kaareutumiskulma on suurempi kuin 90 °. Jos siis veteen kastetun putken materiaali on hydrofiilinen, kosteus kohoaa putkessa muuta vedenpintaa korkeammalle. Jos putken materiaali on puolestaan hydrofobinen, laskee vedenpinta muuta vedenpintaa alemmalle tasolle. [8, s. 116]

2.3.1 Kapillaarinen nousukorkeus

Koska vesi pyrkii liikkumaan suuremman alipaineen suuntaan, vedenpinta kohoaa putkessa kapillaarisesti. Nousukorkeuden kasvaessa myös putkessa olevan veden massan aiheuttama hydrostaattinen paine kasvaa ja nousu pysähtyy siihen pisteeseen, missä huokosalipaine ja veden hydrostaattinen paine ovat tasapainossa. Muodostetaan tämän perusteella tasapainoyhtälö (kaava 2.7) kuvan 8 voimista. [9, s. 83]

$$\pi r^2 \rho_w g h - 2\pi r \sigma \cos(\phi) = 0, \quad (2.7)$$

jossa ρ_w [kg/m³] on veden tiheys, g [m/s²] on putoamiskiihtyvyyden ja h [m] on veden nousukorkeus.

Normaaleilla rakennusmateriaaleilla meniskuksen ja materiaalin kontaktikulma on lähellä nollaa eli voidaan olettaa, että $\phi = 0$ °C. Kaavasta 2.7 saadaan supistamalla muodostettua kaava 2.8 teoreettiselle kapillaariselle nousukorkeudelle h_{cap} [m]. [4, s. 99–100]

$$h_{cap} = \frac{2\sigma}{gr\rho_w} \quad (2.8)$$

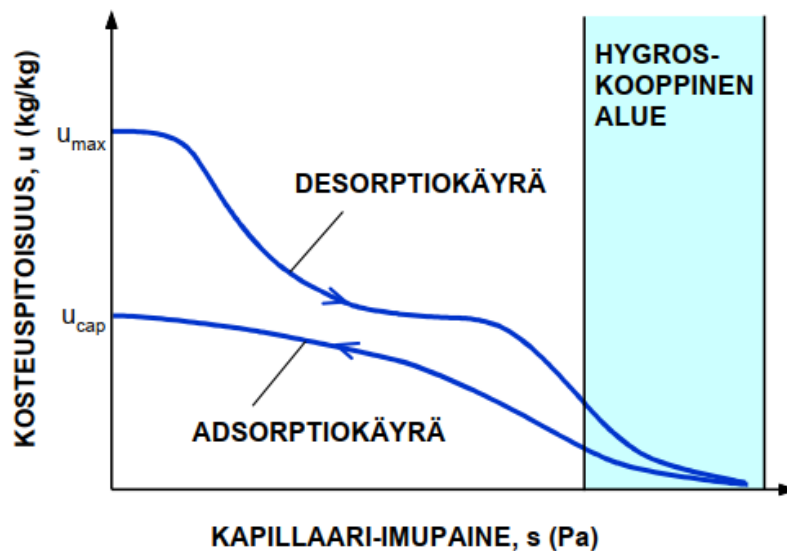
Kuten kaavat 2.6 ja 2.8 osoittavat, huokosalipaine ja kapillaarinen nousukorkeus suurenevät, kun huokosen säde pienenee. Samalla voimistuvat veden siirtymistä vastustavat kitkavoimat. [5, s. 17] Tarkastellaan esimerkiksi kahta suuremman ja pienemmän säteen omaavaa putkea. Kun putkien alapääst kastetaan vapaaseen veteen, alkaa suuremman säteen putkessa vesi nousta nopeammin, koska hidastavat kitkavoimat ovat pienemmät. Ajan kuluessa nousee pienemmän säteen putkessa vesi kuitenkin korkeammalle, koska sen pinnalla vaikuttaa suurempi vettä nostava paine-ero. [9, s. 96]

Todellisuudessa kapillaarinen kosteus nousee harvoin teoreettisen korkeuden tasolle, koska hitaasti nouseva kosteus ehtii haihtumaan rakenteen pinnoilta ennen maksimaa-

lisen nousukorkeuden saavuttamista. Tähän vaikuttaa kuitenkin ennen kaikkea rakenteen paksuus ja pintakäsittelyiden vesihöyrynläpäisevyys. Paksun rakenteen keskellä kapillaarikosteus kykenee etenemään kapeampaa rakennetta korkeammalle, varsinkin jos kosteus ei pääse tiiviin pinnoittaan takia haihtumaan rakenteen reuna-alueilta. Kosteus ei myöskään tässä tapauksessa nouse tasaisesti rakenteen sisällä, koska rakenne koostuu eri kokoisista huokosista, joiden kapillaariominaisuudet poikkeavat toisistaan. [2, s. 112]

2.3.2 Kapillaarinen kosteustasapaino

Kapillaarisella alueella kosteustasapainolla tarkoitetaan kosteuspitoisuutta, jonka materiaali saavuttaa ollessaan kosketuksessa vapaan veden tai kosteuspitoisuudeltaan siihen rinnastettavan kosteudenlähteen kanssa. Tällöin materiaalin vesipitoisuus nousee kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen ja suhteellinen kosteus on lähellä RH 100 %. Materiaalin huokoisuus vaikuttaa vesimäärään, jonka materiaali pystyy kapillaarisesti imemään itseensä. Kuvassa 9 esitetään tasapainokosteuskäyrien avulla materiaalien vedensitomiskykyä kostumis- ja kuivumisvaiheessa niiden ollessa kapillaarisella alueella. Tasapainokosteus voidaan esittää aineen kosteuspitoisuuden suhteena kapillaariseen nousukorkeuteen tai huokosalipaineeseen. [5, s. 15–17]



Kuva 9. Kapillaarinen tasapainokosteus kuvattuna huokosalipaineen funktiona [9, s. 29].

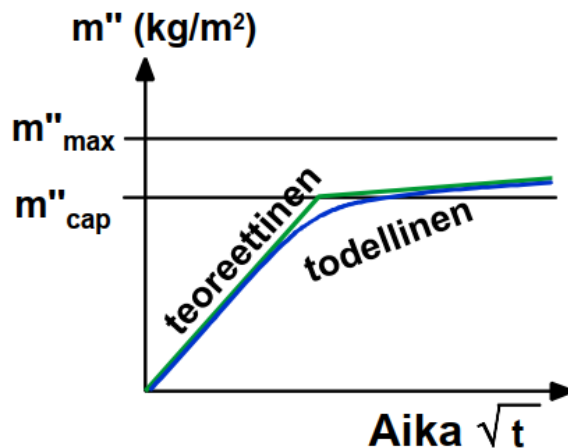
Kuten kuvasta 9 käy ilmi, myös kapillaarisella alueella tasapainokäyrästäön liittyy voimakas hystereesi-ilmiö (ks. alaluku 2.2.4). Syitä tälle on arvioitu olevan materiaalien monimutkaisten kapillaariverkostojen kytkeytyminen toisiinsa ja kapillaarihuokosten säteiden

muutokset. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että absorptio vaiheessa kosteuden eteneminen pysähtyy siihen kohtaan, missä se saavuttaa niin ison huokosen, ettei sen huokosalipaine riitä imemään vettä eteenpäin. Desorptiovaiheessa kapillaariset voimat puolestaan estävät materiaalin pienissä huokosissa olevaa vettä poistumasta ja hidastavat näin materiaalin kuivumista. [5, s. 15]

2.3.3 Kapillaariominaisuuksien määrittäminen

Materiaalin kapillaarisia ominaisuuksia kuvataan veden imeytymiskertoimella (kapillaari-teettikertoimella) $A_w \left[\frac{kg}{m^2 s^{0,5}} \right]$ ja veden tunkeutumiskertoimella $B_w \left[\frac{m}{s^{0,5}} \right]$. Näiden kertoimien avulla materiaalille voidaan määrittää myös kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus $w_{cap} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ ja kapillaarinen nousukorkeus $h_{cap} [m]$.

Imeytymiskerroin kuvastaa materiaaliin imeytyvän veden määrää pinta-alaa kohti tietyn ajan kuluessa. Kerroin saadaan määritettyä laboratoriossa tehtävällä imeytyskokeella, jossa vesiastian asetetun koekappaleen painoa punnitsemalla saadaan ajan neliöjuuren kanssa suoraan verrannollinen veden imeytymiskerroin kuvan 10 mukaisesti. Koekappaleen tulee olla imeytymiskerrointa määrittäessä kapillaarista nousukorkeutta matalampi. [3, s. 352–353]



Kuva 10. Veden imeytymiskokeen muodostama todellinen ja teoreettinen massan muutoksen käyrä ajan neliöjuuren funktiona [9, s. 94].

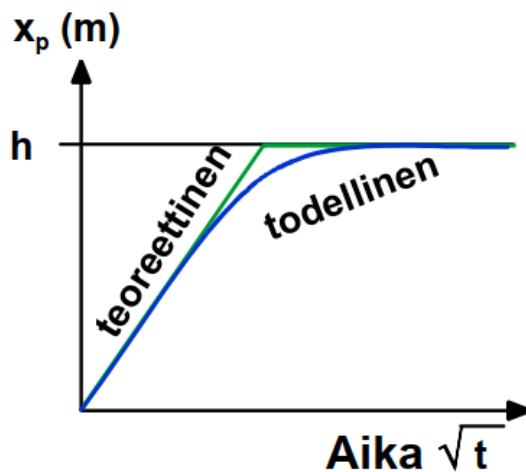
Materiaaliin imeytymiskerroin määritetään käyrän ensimmäisen lineaarisen osan kulmakertoimen perusteella kaavalla 2.9:

$$A_w = m'' / \sqrt{t}, \quad (2.9)$$

missä $m'' \left[\frac{kg}{m^2} \right]$ on materiaaliin imeytyneen veden massan suhde veden kanssa kontaktissa olevaan pinta-alaan ja $t [s]$ on kulunut aika imeytymisen alkamisesta. [7, s. 12]

Veden imeytyskokeen yhteydessä pystytään määrittämään materiaalille myös veden kapillaarinen kyllästyspitoisuus w_{cap} . Sen oletetaan tarkentuvan mittaustuloksista muodostetulla käyrällä kohtaan, jossa koekappaleen painonnousu pysähtyy tai se muuttuu lineaarisesta kasvusta hitaammaksi epälineaariseksi kasvuksi. Materiaalin maksimikosteuspitoisuuden $w_{max} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ selvittäminen vaatii materiaalin keittämistä tai vakuumikyllästyskoetta, jolloin saadaan kaikki materiaaliin jäävät ilmataskut korvattua vedellä. [3, s. 354]

Veden tunkeutumiskertoimen mittaamiseen ei ole standardisoitua menetelmää, mutta se pystytään periaatteen tasolla määrittämään samalla kokeella kuin imeytymiskerroin. Tunkeutumiskerrointa määritettäessä mitataan kappaleeseen imeytyneen veden massan sijaan veden tunkeutumissyvyyttä x_p [m]. Kuvan 11 pystyakselina esitetyn tunkeutumissyvyyden eli nousukorkeuden maksimi-arvoa voidaan tällä mittaustavalla pitää materiaalin kapillaarisena nousukorkeutena h_{cap} .



Kuva 11. Tunkeutumiskertoimen määrittäminen veden nousukorkeuden suhteella ajan neliöjuureen [9, s. 94].

Materiaalin tunkeutumiskerroin määritetään käyrän lineaarisen osan kulmakertoimen perusteella kaavalla 2.10:

$$B_w = x_p / \sqrt{t}, \quad (2.10)$$

missä x_p [m] on veden tunkeutumissyvyys ajanhetkellä t [s], joka on kulunut aika imeytymisen alkamisesta. [3, s. 353]

Tunkeutumiskertoimen ja kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen tällä kokeella edellyttää, että koekappale on kapillaarisen kosteuden maksimiusua korkeampi.

Tunkeutumissyvyyden määrittäminen tietyllä ajanhetkellä vaatii kalliita mittalaitteistoja ja monimutkaisia mittausten menetelmiä. Vaihtoehtoisesti tunkeutumiskertoimen määrittämi-

sessä voidaan hyödyntää kuvan 10 painonnousun kuvaajaa. Tällöin lähtötietoina tarvitaan vain koekappaleen korkeus ja ajanhetki, jolloin vesirintama saavuttaa koekappaleen yläpinnan. Imeytymiskertoimen kuvaajassa tämä ajanhetki tarkoittaa vaihetta, jossa suora saavuttaa kapillaarista kyllästyskosteutta vastaavan imeytymispainon. Syöttämällä nämä tiedot kaavan 2.10, saadaan tuloksena materiaalin tunkeutumiskerroin. [3, s. 353–354] Maanvastaisissa rakenteissa käytettyjen materiaalien kapillaarisia ominaisuuksia on esitetty kohdan 2.4.2 taulukossa 3.

2.3.4 Kapillaarinen kosteusvirran tiheys

Kapillaarisen kosteusvirran tiheys g_{cap} [$kg/(m^2s)$] on mahdollista määrittää materiaalin vedenimeytymiskertoimen A_w (ks. alaluku 2.3.3) avulla kaavalla 2.11 [4, s. 101].

$$g_{cap} = \frac{A_w}{2\sqrt{t}}, \quad (2.11)$$

jossa t [s] on kulunut aika kapillaarisen kosteusvirran syntymisestä. Koska kapillaarivirtaus kasvaa materiaalin kosteuspitoisuuden kasvaessa, on aiheellista määrittää kapillaarisen kosteusvirran tiheys myös siten, että kosteuspitoisuutta käytetään siirtopotentiaalina (kaava 2.12).

$$g_{cap} = -D_w \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (2.12)$$

jossa D_w [m^2/s] on kosteusdiffusiviteetti, w [kg/m^3] kosteuspitoisuus ja x [m] matka kosteusrasitetusta pinnasta. [9, s. 101]

Kosteusdiffusiviteetti (D_w) määrittää materiaalin nopeuden saavuttaa tasapainotila kosteusolosuhteiden muuttuessa. Mitä suurempi kosteusdiffusiviteetin arvo on, sitä nopeammin materiaali saavuttaa kosteustasapainon ympäröivän kosteuspitoisuuden kanssa. [9, s. 101] Se ilmoittaa aikayksikössä stationääritilassa ainekerroksen läpäisevän kosteusmäärän, kun kosteuspitoisuuksien ero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen ja kosteus läpäisee pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen [3, s. 390].

Kosteusdiffusiviteetin arvo koostuu kaikista kosteuden siirtymismuotojen vaikutuksista. Tämän arvon käyttäminen edellyttää, että kosteuden siirtoa on mahdollista kuvata kosteuspitoisuuseron avulla ja materiaalin voidaan olettaa olevan koko ajan hygroskoopissa tasapainotilassa. [3, s. 355]

Kapillaarisella alueella kosteuspitoisuuserojen tasoittumisnopeutta kuvaa kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti ($D_{w,s}$). Sen avulla ilmoitetaan stationääritilassa homogeenisen rakennusmateriaalin läpi kapillaari-imupaineella ja pintadiffuusiolla siirtyvän kosteusvirran

tiheys sekä materiaalin pintojen välisen kosteuspitoisuusgradientin suhde. Laskennallisesti kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti saadaan määritettyä esimerkiksi vähentämällä kosteusdiffusiviteetin arvosta vesihöyryn diffuusiolla siirtyvän kosteuden osuus (kaava 2.13) [3, s. 356, 390].

$$D_{w,s} = D_w - \frac{\delta_{v,0} * v_{sat}}{\xi_{\varphi}}, \quad (2.13)$$

jossa $\delta_{v,0}$ [m^2/s] on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys kuivissa olosuhteissa, v_{sat} [g/m^3] vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus ja ξ_{φ} [kg/m^3] materiaalin kosteuskapasiteetti hygroskooppisella alueella. Kosteuskapasiteetti määritetään hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän kulmakertoimesta. Kaavalla 2.13 määritetty kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin arvo sisältää pintadiffuusion sekä kapillaarisen, painovoimaisen ja paineenalaisen kosteuden siirtymisen. [9, s. 102]

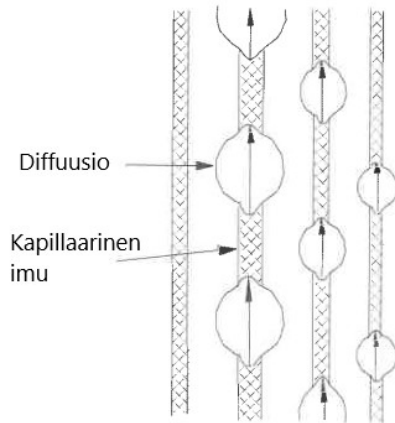
Kirjallisuudesta löytyy useita korrelaatiokaavoja kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin määrittämiseksi, kun muuttujina käytetään veden imeytymiskerrointa A_w ja kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta w_{cap} (ks. alaluku 2.3.3). [11, s. 30]. Esimerkiksi kaava 2.14 on johdettu kapillaarisen kyllästymisen perusteella [12, s. 232]:

$$D_{w,s} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \quad (2.14)$$

Kapillaarisen tasapainokäyrän hystereesistä johtuen myös kosteusdiffusiviteetin arvot ovat erilaisia materiaalin kostuessa ja kuivuesssa [9, s. 104].

2.3.5 Yhdistetty kaasun ja nesteen kulkeutuminen

Yleisesti ottaen kosteus kulkee rakenteessa samanaikaisesti sekä vesihöyryn diffuusion että veden kapillaarisen imun vaikutuksesta (kuva 12). Koska rakenne sisältää useita eri kokoisia huokosia on rakenteessa saman aikaisesti tyhjiä, osittain vedellä kyllästyneitä ja täysin vedellä kyllästyneitä huokosia. [4, s. 102] Näissä huokosissa tapahtuu siis luvun 2.2.2 kuvassa 4 esitettyjä eri kosteuden siirtymistapoja samanaikaisesti.



Kuva 12. Rakenteessa tapahtuva samanaikainen diffuusio ja kapillaarinen imu [4, s. 104].

Koska kosteuden virtauspotentiaali on suuresti riippuvainen kosteuspitoisuudesta, on aiheellista esittää vesihöyryn ja nestemäisen veden siirtymisen yhteisvaikutus summaamalla nämä kaksi kosteusvirran tiheyttä yhteen Fickin lakia hyödyntäen (kaava 2.15).

$$g_{tot} = g_v + g_l \quad (2.15)$$

Vesihöyryllä siirtyvän kosteusvirran tiheyden g_v arvo pystytään isotermisessä tarkastelussa määrittämään vesihöyryn diffuusion kaavoilla 2.3 tai 2.4 ja nestemäisen kosteusvirran tiheyden g_l arvo kaavalla 2.12 käyttämällä kosteusdiffusiviteetin paikalla kapillaarista kosteusdiffusiviteettiä. Tulos on kuitenkin vain likiarvio, koska kosteuden siirtymistä ei pysty reaalitilanteessa jakamaan näin selkeästi kahteen eri vaiheisiin vaan tulokseen vaikuttaa myös kapillaarikondenssi. [4, s. 297]

2.3.6 Veden paineenalainen siirtyminen

Jos rakenteelle aiheutuu kosteusrasitusta kapillaarikosteuden lisäksi ulkoisen vedenpaineen vaikutuksesta, on mahdollista, että kappaleeseen siirtyy kosteutta vielä kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden saavuttamisen jälkeenkin. Laskennallisesti hydrostaattisen paineen aiheuttama veden paine-ero tulee huomioida lisäämällä se huokosalipaineen arvoon [9, s. 99]. Toinen tapa on määrittää ulkoisen paineen aiheuttama kosteusvirtaus g [$kg/(m^2 * s)$] paine-eroon perustuvan Darcyn lain avulla kaavalla 2.16 [4, s. 105].

$$g = \rho_w * \frac{k_w}{\mu} * \frac{\Delta P}{d}, \quad (2.16)$$

Jossa k_w [m^2] on materiaalin permeabiliteetti vedelle, μ on veden dynaaminen viskositeetti, d [m] materiaalikerroksen paksuus ja ΔP [Pa] veden paine-ero materiaalikerroksen eri puolilla.

Veden dynaaminen viskositeetti on esimerkiksi 10 °C lämpötilassa $1,31 \cdot 10^{-3} \text{ N s/m}^2$. [4, s. 105] Eri materiaalien permeabiliteettejä vedelle on lueteltu taulukossa 2.

Taulukko 2. Eri materiaalien permeabiliteettejä [4, s. 106].

Materiaali	k_w [$\cdot 10^{-17} \text{ m}^2$]
Graniitti	0,006–0,03
Betoni v/s 0,5–0,6	0,003–1
Betoni v/s 0,7–0,8	0,1–5
Betoni v/s 1,0–1,2	3–200
Kalkkikivi	20–1500
Tiili	300–3000
Hiekka	3 000 000

Taulukossa 2 esitetyistä arvoista huomataan, että materiaaliominaisuuksilla on suuri vaikutus permeabiliteettien suuruuteen. Taulukon arvojen mukaan esimerkiksi tiili läpäisee huomattavasti betonia enemmän vettä.

Veden paine-ero ΔP saadaan laskettua veden hydrostaattisen paineen kaavasta 2.17:

$$\Delta P = \rho_w g h, \quad (2.17)$$

jossa ρ_w [kg/m^3] on veden tiheys, g [m/s^2] on putoamiskiihtyvyyys ja h [m] on vesikerroksen korkeus materiaalikerroksen toisella puolella. [9, s. 149]

Materiaaliparametrinä voidaan käyttää myös materiaalin sekä nesteen ominaisuudet sisältävää kosteudenjohtavuutta κ_w [$\text{kg}/(\text{m s Pa})$]. Tällöin Darcyn lain kaava 2.16 supistuu kaavan 2.18 muotoon:

$$\kappa_w = \frac{\Delta P}{d}. \quad (2.18)$$

Kosteudenjohtavuus huomioi kaikki muut kosteuden siirtymismuodot paitsi vesihöyryn diffuusion. Kosteudenjohtavuus pysyy siis hygroskooppisella alueella pienenä, koska kosteuden kapillaarinen siirtyminen on vähäistä. [3, s. 355] Veden paineenalaista siirtymistä tapahtuu esimerkiksi pato- ja allasrakenteissa sekä katolle jääneen veden tunkeutuessa vesikatteen rei'istä ja raoista alapuoliseen rakenteeseen [9, s. 148].

2.4 Kosteuden kapillaarinen nousu rakenteessa

Maaperässä on riittävästi veden eri kulkeutumismekanismeja ja kosteuslähteitä pitämään sen suhteellisen kosteuden rakenteen ympärillä lähellä RH 100 %. Jos veden kapillaarista kosteusliikettä maaperässä ei ole estetty, aiheutuu rakenteelle kosteusrasitusta diffuusion lisäksi kapillaarivedestä. Kapillaarivesi on peräisin vapaan veden pinnasta eli maaperää tarkasteltaessa pohjavedestä. Ylöspäin noustessaan vesi etenee pohjaveden pinnasta kapillaarihuokosissa siihen korkeuteen, jossa huokosalipaine on tasapainossa kitkavoimien ja painovoiman aiheuttaman hydrostaattisen paineen kanssa. [5, s. 5, 14, 17] Maaperän kapillaarisen kosteusrasituksen suuruus maanvastaiselle rakenteelle on siis riippuvainen maalajista ja sen kapillaarisuudesta, pohjaveden pinnan korkeudesta ja mahdollisesti asennetun salaojaverkon toimivuudesta [2, s. 111, 112]. Maaperän huokostilassa suhteellisen kosteuden oletetaan olevan kosteusteknisessä tarkastelussa RH 100 % [2, s. 187].

Maanvastaiset rakenteet ovat usein vettä imeviä eli hydrofiilisiä ja vahvasti huokoisia materiaaleja ja ne ovat suorassa yhteydessä maaperään, joka on usein kapillaariveden tai suoraan pohjaveden kyllästämää. Rakenteen sisällä kapillaari-ilmiö näkyy kohoavana kosteutena. [8, s. 116]

Kapillaarisen kosteuden eteneminen edellyttää rakenteelta yhtenäistä huokosverkostoa. Mitä pienempiä huokosia materiaalissa on, sitä suurempi on huokosissa syntyvä huokosalipaine ja siten myös sitä korkeampi kapillaarinen nousukorkeus. [2, s. 112] Taulukossa 3 on esitetty vertailuarvoja eri materiaalien tiheyksistä, veden imeytymiskertoimista ja veden tunkeutumiskertoimista.

Taulukko 3. Kapillaariset ominaisuudet eri materiaaleille [9, s. 95].

Materiaali	Tiheys [kg/m ³]	Kapillaariteettiker- roin, A_w [kg/m ² *s ^{1/2}]	Veden tunkeutumis- kerroin, B_w *10 ⁻³ m/s ^{1/2}
Tiili	1700	0,37	1,4
Tiili	1900	0,09	0,7
Kevytbetoni	500	0,08	0,4
Kalkkihiekkakivi	1800	0,18	0,8
Kalkkihiekkakivi	1900	0,05	0,3
Sementtilaasti	1900	0,03	0,5
Kalkkilaasti	1700	0,25	1
Betoni v/s = 0,3	-	0,010	0,14
Betoni v/s = 0,5	-	0,020	0,17
Betoni v/s = 0,7	-	0,028	0,25
Puut, syyt II	450	0,016	-
Puu, syyt T	450	0,004	-
Hiekka Ø 0,02 mm	-	-	2,4

Taulukon 3 tiedoista nähdään, että tiilellä veden imeytymiskerroin ja tunkeutumiskerroin ovat huomattavasti suurempia kuin sementtiä sisältävillä rakennusmateriaaleilla. Maanvastaisissa seinissä rakennusmateriaalina käytettyjen tiilen ja betonin kapillaarisia ominaisuuksia ja niiden eroavaisuuksia on tarkasteltu seuraavissa alaluvuissa.

2.4.1 Kapillaarinen kosteus betonissa

Betonin huokosrakenne ja tiiviys määräytyvät sen vesi-sementtisuhteen, hydratoitumisasteen, ilmamäärän ja runkoaineen raekoon perusteella [3, s. 275]. Hydratoitumisasteella tarkoitetaan veden ja sementin seoksen eli sementtipastan/-liiman kovettumistasetta. Hydratoitumisen reaktiotuotetta eli kovettunutta sementtipastaa/-liimaa kutsutaan sementtikiveksi. [13]

Kapillaariselle nousulle oleellinen ominaisuus on veden liikkumisen ja jäätyksen mahdollistavien kapillaarihuokosten määrä betonissa. Kapillaarihuokokset muodostuvat betonin sementtikiveen ylimääräisen veden vaikutuksesta ja niiden säteen pituus on noin

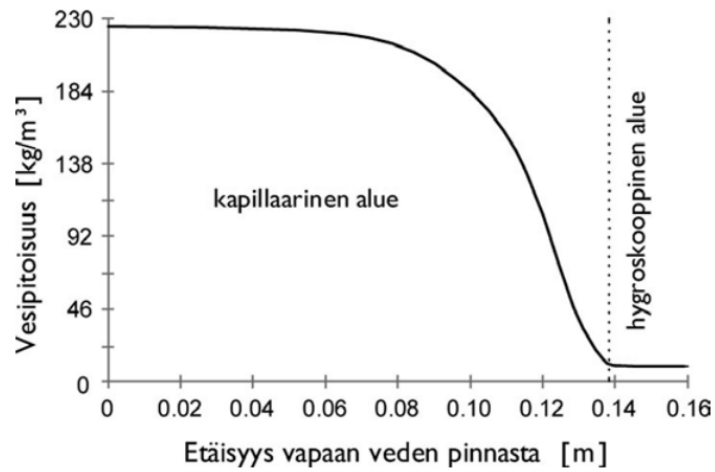
luokkaa $0,1 \mu\text{m}$ – $0,01 \text{ mm}$. Kapillaarihuokosten määrä on sitä suurempi, mitä suurempi betonin vesi-sementtisuhde ja mitä pienempi hydratoitumisaste ovat. [13, s. 81–83]

Esimerkiksi vesi-sementtisuhteeltaan 0,4 olevassa betonissa ei esiinny juuri lainkaan kapillaarihuokosia. Tällaisen betonin työstettävyys ilman notkistimia on huono, joten sen käyttökohteet ovat melko rajatut. Vesi-sementtisuhteella 0,6 betonin työstettävyysominaisuudet pysyvät vielä hyvinä, mutta jatkuvaa kapillaarihuokosverkostoa ei pääse syntymään. [3, s. 275] Vesi-sementtisuhteen ollessa yli 0,7 muodostuu betoniin yhtenäinen kapillaarihuokosverkosto, joka ei koko betonin elinkaarin aikana sulkeudu hydratoitumisen seurauksena [13, s. 83]. Betonin kapillaarisuus riippuu siis vahvasti sen suhteitusominaisuuksista.

2.4.2 Kapillaarinen kosteus tiilessä

Vanhoissa maanvastaisissa rakenteissa paljon käytetyn poltetun tiilen tunnistaa sille tyyppillisestä punaisesta värisävystä. Ne valmistetaan savesta polttamalla ja lisäämällä tiilimassaan hiekkaa. Julkisivutiilien valmistuksessa on tapana lisätä massaan myös sahanpurua, joka uunissa pois palaessaan muodostaa tiileen pakkasenkestävyyttä parantavia suljettuja huokosia. [14]

Poltetun tiilen huokoisuus on tilavuudesta 10–50 % riippuen tiilen polttoasteesta. Korkean polttoasteen tiilillä huokoisuus jää matalaa polttoastetta pienemmäksi ja huokoskoko on suuri. Matalalla polttoasteella pienet kapillaarihuokokset eivät yhdy keskenään muodostaen isompia huokosia. Tällöin myös pieniä kapillaarihuokosia sisältävällä tiilellä kapillaarinen nousukorkeus on suurempi. Suurin osa tiilen huokosista on kapillaarihuokosia ($r = 0,1 \mu\text{m}$ – $0,01 \text{ mm}$), minkä takia sen vedenimukyky ja -nopeus on yleisesti huomattavasti betonia parempi. [3, s. 277] Tiilen kapillaarisen kosteustasapainon kuvaaja on esitetty kuvassa 13.

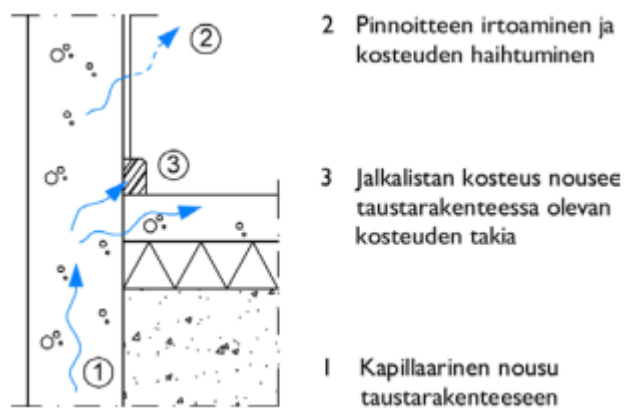


Kuva 13. Tiilen kapillaarinen kosteustasapaino suhteessa etäisyyteen vapaan veden pintaan [2, s. 106].

Kuvasta 13 nähdään, että tiili pystyy imemään kapillaarisella alueella itseensä huomattavasti suuremman määrän vettä verrattuna hygroσκοoppisella alueella tapahtuvaan kosteuden sitoutumiseen.

3. KAPILLAARISEN KOSTEUDEN AIHEUTTAMAT VAURIOMEKANISMIT

Maanvastaisille rakenteille on tyypillistä tilanne, jossa osa rakenteesta on suorassa kosketuksessa jatkuvasti tai ajoittain kosteudesta kyllästyneeseen maaperään ja rakenne jatkuu rakennuksen sisällä olevaan kuivaan ja lämpimään tilaan, jonne rakenteen sisältämä kosteus kykenee haihtumaan. Kosteusolosuhteet ovat siis usein rakenteen eri osissa toisiinsa verrattuna hyvin erilaiset. Tällaista tilannetta ja esimerkkejä sen aiheuttamista ongelmista on kuvattu luvun 2 kuvassa 2 ja alapuolisessa kuvassa 14.



Kuva 14. Kapillaarisen kosteuden kohoaminen rakenteessa ja sen haihtuminen sisäilmaan [2, s. 168].

Kuten kuvan 14 tapauksessa, toimivan kapillaarikatkon lisäksi maanvastaisen rakenteen pinnoitteella on merkittävä rooli rakenteen kuivumisen kannalta. Mitä paremmin pinnoite läpäisee rakenteen sisältä diffuusiolla sisäilmaan pyrkivää vesihöyryä, sitä matalammaksi kapillaarinen nousukorkeus rakenteessa jää. Vesihöyryä huonosti läpäisevät pinnoitteet ovat korkeamman kosteuspitoisuuden takia myös alttiimpia lohkeilulle ja kiinnitysalustastaan irtoilulle. [2, s. 167]

Rakenteisiin voi veden mukana kulkeutua myös useita eri suoloja. Esimerkiksi maassa, järvissä ja joissa esiintyy pieniä määriä kalsiumin ja magnesiumin klorideja, sulfaatteja ja biokarbonaatteja. Näistä pitoisuuksista ei yleensä aiheudu haittaa sementin ainesosille. Tietyissä olosuhteissa ympäristöstä rakenteeseen imeytyvien suolojen määrä on kuitenkin niin suuri, että sillä on vaikutus rakenteen käyttöikänsä. Tämän luvun suolarasituksia käsittelevissä alaluvuissa perehdytään tarkemmin suolassa anioneina toimivien sulfaatti- (SO_4^{2-}) ja kloridi-ionien (Cl^-) vaikutuksiin sementtipitoisissa rakenteissa. [15]

Esimerkiksi betonirakenteiden raudoitteille aiheutuu suuressa kosteusrasituksessa korroosioaurion vaara, jonka syntymistä edesauttavat rakenteissa esiintyvät suolat. Muita maanvastaisissa rakenteissa esiintyviä vaurioita ovat esimerkiksi mikrobivauriot, rapautumiset ja halkeamat. [2], [15]

Koska toimivalla kapillaarikatkolla pystytään vaikuttamaan kapillaarisesti imeytyvän veden ja sen mukanaan kuljettamien aineiden kulkeutumiseen rakenteessa, on sillä merkittävä vaikutus myös tässä luvussa läpikäytävien vauriomekanismien ennaltaehkäisyssä.

3.1 Mikrobivauriot

Rakenteisiin muodostuneiden mikrobikasvustojen on todettu vaikuttavan negatiivisesti sisäilman laatuun ja aiheuttavan altistuneelle terveyshaittoja [16]. Niiden kehittymiselle oleellisia tekijöitä ovat kosteus ja lämpötila. Optimaaliset olosuhteet homeen ja muiden mikrobien kehittymiselle ovat ilman suhteellisen kosteuden ollessa välillä RH 95–99 % ja lämpötilan ollessa välillä +20 – +30 °C. Vähimmäislämpötila mikrobien kasvuun rakenteissa on noin +5 °C ja enimmäislämpötila noin +50 °C. [2, s. 130].

Kapillaarisen kosteuden aikaansaama korkea suhteellinen kosteus yhdessä lämmitettyjen sisätilojen kanssa luovat otolliset olosuhteet mikrobivaurioiden syntymiselle. Esimerkiksi suorassa kosketuksessa maanvastaisen seinän kanssa olevaan puurakenteeseen voi alkaa syntyä lahovauriota ja mikrobikasvustoa. Lahovaurio vaatii kehittyäkseen useamman kuukauden mittaisen korkean kosteuspitoisuuden eli se on vahva viite mikrobivaurion syntymisestä [2, s. 131]. Kosteusolosuhteita heikentää se, jos puurakenne on suojattu sisäpinnastaan huonosti vesihöyryä läpäisevällä kalvolla, esimerkiksi höyrynsulkumuovilla (kuva 15).



Kuva 15. Puretun seinärakenteen alaohjauspuun kapillaarikosteudesta aiheutunut laho-
vaurio.

Myös kivirakenteiseen seinään voi muodostua mikrobivaurio, kun olosuhteet ovat kasvustolle otolliset riittävän kauan. Esimerkiksi vanhassa karbonatsoituneessa betonissa, jossa mikrobikasvustolta suojaava alkalisuus on pinnasta vähentynyt, on kasvuston syntyminen mahdollista ilman suhteellisen kosteuden pysyessä pitkään yli RH 90 %. Mikrobikasvua edesauttaa kapillaarikosteuden mukana kulkeutuneet orgaaniset ainekset rakenteen pinnalla. Jos maanvastainen rakenne on tasoitettu ja maalattu vesihöyryä läpäisemättömällä maalilla, syntyy materiaalikerrosten rajapintaan mikrobikasvustoa huomattavasti käsittelemätöntä betonipintaa herkemmin. Tämä johtuu siitä, että tasoitteet ja maalit ovat betonia herkempiä homehtumaan. [2, s. 134–136]

3.2 Raudoitteiden korroosio

Maanvastaisissa betonirakenteissa voi ilmetä merkittäviä raudoitteen korroosiosta aiheutuvia rakenteellisia ongelmia. Korroosion syynä on tällöin kapillaarisen kosteuden, betonin karbonatsoitumisen sekä rakenteessa olevien tai sinne tunkeutuvien kloridien yhteisvaikutus. Korroosionopeus on raudoitteessa suurimmillaan, kun ilman suhteellinen kosteus on noin RH 95 %. Tässä olosuhteessa kosteuspitoisuus on hyvin korkea, mutta huokosissa esiintyy vielä happea. Lisäksi lämpötilan nousulla on kiihdyttävä vaikutus korroosionopeuteen. [13, s. 109–110]

Korroosiolle otolliset olosuhteet voivat toteutua betonirakenteen ollessa kapillaarisen kosteusrasituksen alaisena ja sen lämpimään tilaan rajoittuvan sisäpinnan pinnoitteen ollessa huonosti vesihöyryä läpäisevä. Kuvassa 16 on nähtävillä kapillaarikosteudelle alttiin maanvaraisesti perustetun kellarinseinän raudoitteiden korroosiosta aiheutuvaa halkeilua ja lohkeilua.



Kuva 16. Korroosioaurio kellarikerroksen kapillaarisesti kosteusrasitetussa seinärakenteessa.

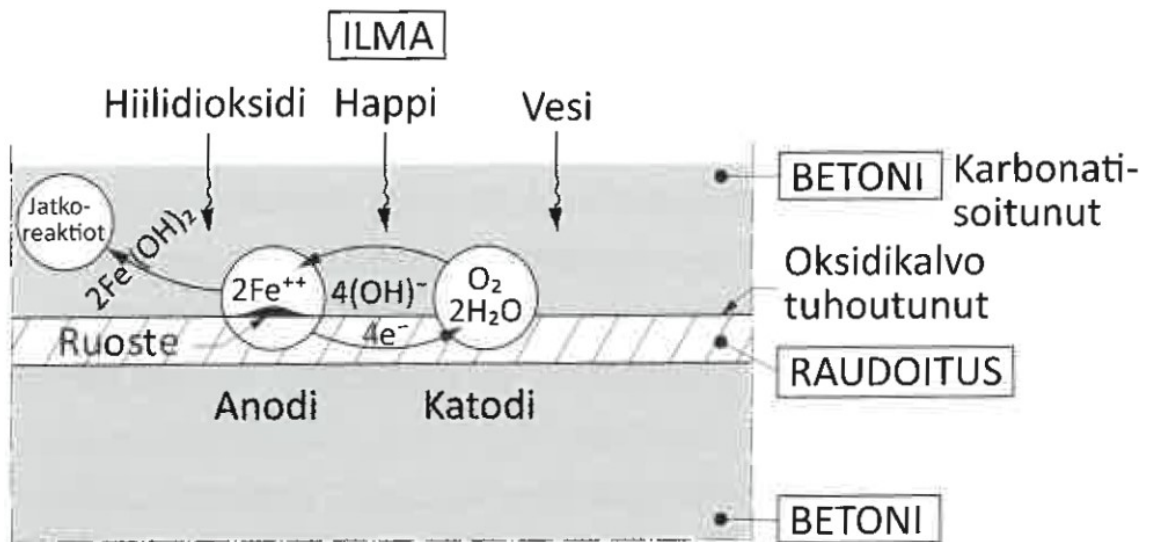
Koska raudoitteen korroosio vaatii kosteuden lisäksi happea, korroosion syntymisille otollisimmat olosuhteet vallitsevat juuri vesirajan yläpuolella sijaitsevissa rakenneosissa, jotka vuoroin kastuvat ja vuoroin kuivuvat. Korroosion vaara kasvaa varsinkin silloin, kun rakenneosa on kosketuksissa kloridipitoisen meriveden kanssa. Raudoitteiden korroosion on katsottu olevan erilainen vaikutukseltaan ja nopeudeltaan riippuen siitä, aiheutuuko raudoitetta suojaavan oksidikalvon häviäminen betonirakenteen karbonatisoitumisen vai suuren kloridipitoisuuden seurauksena. Näitä kahta vauriomekanismia on vertailtu seuraavissa alaluvuissa. [13, s. 110], [15]

3.2.1 Karbonatisoitunut betoni

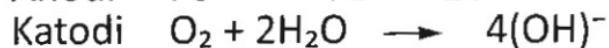
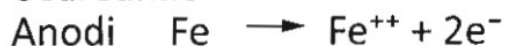
Kapillaarisen kosteuden ja betonin karbonatisoitumisen yhteisvaikutuksesta aiheutuva raudoitteen korroosio on tyypillinen vaurion aiheuttaja betonirakenteessa. Karbonatisoituminen etenee voimakkaimmin, kun rakenteen suhteellinen kosteus on välillä RH 50...60 %. Suuri ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa karbonatisoitumiseen hidastavasti,

koska hiilidioksidi pystyy tunkeutumaan vain betonin ilmatäytteisiin huokosiin. [13, s. 112]

Karbonatisoitumisella tarkoitetaan raudoitusta suojaavan betonin huokosveden emäksisyyden alenemista, joka aiheutuu ilman sisältämän hiilidioksidin (CO_2) tunkeutumisesta betoniin ja sen reagoidessa rakenteen sisällä kalsiumhydroksidien ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ja kalsiumsilikaattihydraattigeelin kanssa. Kun karbonatisoitumisrintama ylittää raudoitteeseen, alkaa raudoitetta suojaava emäksinen oksidikalvo vähitellen häviämään, jolloin happi ja vesi pääsevät reagoimaan raudoitteen pinnalla käynnistäen korroosion. Tässä sähkökemiallisessa prosessissa ruostuva alue eli anodi luovuttaa elektroneja katodille, jolloin anodi hapettuu ja katodi pelkistyy. [13, s. 109] Prosessia on havainnollistettu kuvassa 17 kemiallisten suureiden avulla.



Osareaktiot



Kuva 17. Raudoitteen korroosion sähkökemiallinen prosessi [13, s. 109].

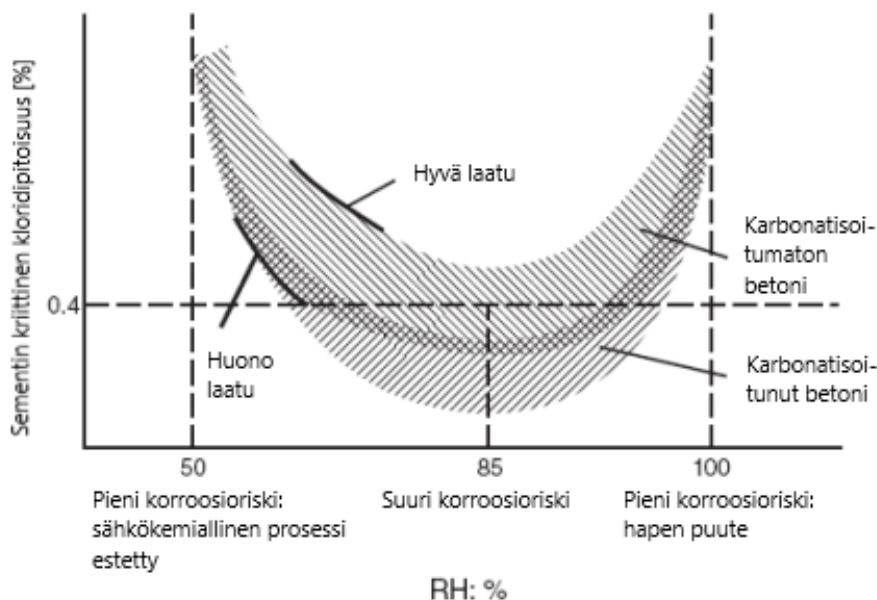
Pelkän karbonisoitumisen aiheuttama korroosio ilmenee yleensä betonissa isommalla pinta-alalla kuin rakenteessa olevien kloridien aiheuttama pistekorroosio, mutta raudoitteiden ruostuminen on pistekorroosiota hitaampaa [13, s. 109].

3.2.2 Kloridipitoinen betoni

Betonirakenteiden raudoitteiden korroosiota kiihdyttävät kloridit. Betonin valmistuksessa klorideja voi päätyä rakenteeseen osana käytettyjä lisäaineita tai epäpuhtaiden kivi-

nesten mukana. Rakenteen elinkaaren aikana klorideja päätyy betoniin yleisimmin merivedestä tai suolauksen seurauksena. [15] Niitä esiintyy kuitenkin myös pohjaveden mukana [17, s. 11].

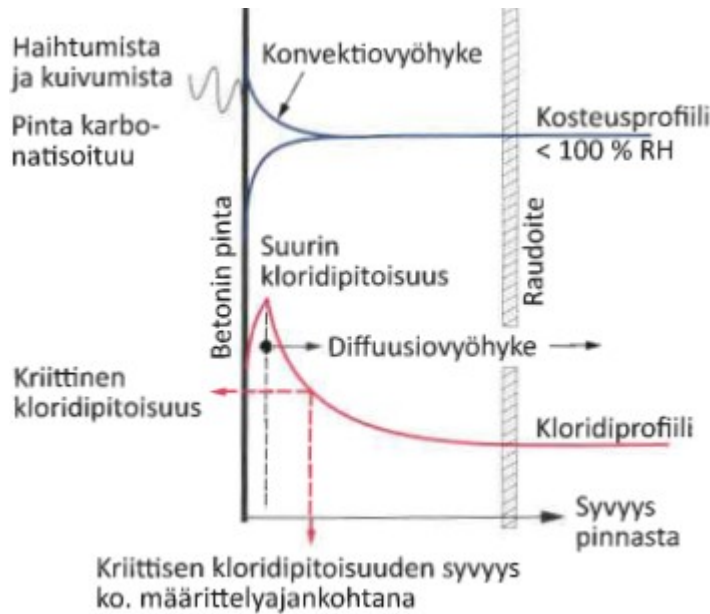
Normaalilla seostuksella valmistetulla betonilla sementin kriittisenä kloridipitoisuutena, joka käynnistää raudoitteen korroosion, pidetään 0,4 %. Betonin kokonaispainoon verrattuna kriittisenä kloridipitoisuutena pidetään puolestaan noin 0,03...0,07 paino-%. Tavanomaisille teräksille kriittisen kloridipitoisuuden arvo on puolestaan välillä 0,05...0,07 paino-%. Kuten kuva 18 osoittaa, kriittinen kloridipitoisuus riippuu kuitenkin todellisudessa karbonatisoitumisasteesta, betonin laadusta ja suhteellisesta kosteudesta. [15], [18, s. 21]



Kuva 18. Sementin kriittisen kloridipitoisuuden vaihtelu ja siihen vaikuttavat tekijät [15].

Betonia korroosiolta suojaavan emäksisyyden katoamisen takia karbonisoitumisen ja kloridipitoisuuden yhteisvaikutus on raudoitteelle erityisen haitallinen jo alhaisillakin kloridipitoisuuksilla. Haitallista vaikutusta lisää sementin aiemmin sitomien kloridien vapautuminen huokosvedeen karbonisoitumisen seurauksena. [13, s. 111, 115]

Kloridit kulkeutuvat rakenteeseen vesihöyryn tai kapillaarihuokosiin tunkeutuvan veden mukana. Rakenteen sisällä kloridit siirtyvät syvemmälle diffuusion eli kloridien pitoisuuserojen vaikutuksesta. Diffuusion aiheuttaman kloridipitoisuuden suuruus pienenee tasaisesti rakenteen pinnalta syvemmälle siirryttäessä. Tämän takia on oleellista selvittää mikä on raudoitteen korroosiolle altistava kriittinen kloridipitoisuus ja kuinka syvälle rakenteeseen kloridipitoisuus säilyy tätä suurempana. [13, s. 114–115] Kuva 19 selventää raudoitteen sijainnin merkitystä kriittisen kloridirasituksen todennäköisyyteen.



Kuva 19. Periaatekuva kloridien tunkeutumisesta betoniin [13, s. 114].

Kriittisempää kloridipitoisuutta suuremmat pitoisuudet saavat raudoituksessa aikaan pistekorrosiota. Kun betoniin ja teräksen pinnalle tunkeutuvat kloridi-ionit poistavat raudoitetta suojaavan oksidikalvon, teräs altistuu hapen ja veden aikaan saamalla korroosiolle. Anodi on pistekorrosiossa tyypillisesti pieni alue verrattuna katodiin, joten ruostuminen tapahtuu paikallisesti. [13, s. 109] Kloridikorrosiossa syntyvät korroosiotuotteet ovat karbonatisoitumisen seurauksena syntyviä tuotteita liukoisempia betonin huokosveteen, minkä takia kloridikorrosio voi edetä pitkälle ennen kuin se on aistinvaraisesti havaittavissa. [18, s. 21] Anodin ruostumisen seurauksena sen tilavuus voi kasvaa reaktiossa syntyvistä korroosiotuotteista riippuen jopa kuusinkertaiseksi, joka aiheuttaa betoniin halkeilua, lohkeilua ja sisäisiä säröjä [15].

Betonin tiiveydellä ja sen pintahalkeamilla on todettu olevan merkittävä vaikutus kloridien tunkeutumisenopeuteen. [13, s. 115], [15], [19]. Conciatori et al. [20] tutkimuksen mukaan erot betonin permeabiliteetissä eli läpäisevyydessä eivät kuitenkaan pitkällä aikavälillä vaikuta merkittävästi siihen, paljonko klorideja imeytyy rakenteeseen. Merkittävämpinä tekijöinä pidetään vallitsevia sääolosuhteita ja kloridirasituksen määrää. Tutkimuksessa suoritettujen pitkäaikaisseurantojen mukaan rakenne saavuttaa maksimikloridipitoisuuden 20 mm–40 mm syvyydellä pinnasta kymmenen vuoden kuluessa valmistuksesta.

3.3 Pakkasvauriot

Kapillaarihuokosessa oleva vapaa vesi laajenee jäätyessään noin 9 tilavuusprosenttia, joka aiheuttaa huokosverkostoon ylipainetta. Rakenne vaurioituu, jos jäätyminen aiheut-

tama tilavuuden kasvu ei pääse vapaasti tapahtumaan, tai jos jään kiteytymispaine huokosissa ylittää sementtikiven vetolujuuden. [13, s. 116] Jäätymisreaktioista voi aiheutua rakenteelle sisäisiä ja ulkoisia vaurioita, jotka näkyvät kivirakenteessa tyypillisesti rakenteen pinnan halkeiluna ja lohkeiluna. Vauriot ovat sitä todennäköisempiä, mitä suurempi rakenteen kosteuspitoisuus on ja mitä vähemmän suuria ilmatäytteisiä huokosia se sisältää. [21]

Jos kapillaarihuokosissa oleva vesi on puhdasta eikä veden alijäähtymistä huomioida, se jäätyy välittömästi lämpötilan tippuessa 0 °C alapuolelle. Alijäähtymisellä tarkoitetaan huokosveden kykyä pysyä jäätymättömänä muutaman celsiusasteen jäätymispisteen alle olevassa lämpötilassa. Alijäähtyminen on sitä suurempaa, mitä pienempi huokonen on kyseessä. Kapillaarihuokosissa alijäähtymistä tapahtuu muun muassa huokosissa vallitsevan huokosveden voimakkaan pintajännityksen takia. Myös huokosvedessä olevilla liuenneilla kemikaaleilla, esimerkiksi suoloilla, on jäätymislämpötilaa alentava vaikutus. Huokosvedessä oleva kemikaalipitoisuus kasvaa jäätymisen edetessä, mikä hidastaa huokosveden totaalista jäätymistä. Esimerkiksi normaalissa betonissa kapillaarihuokosveden jäätymislämpötilana pidetään noin -3...-4 °C. [13, s. 117–118], [21, s. 15–17]

Geelihuokosia suurempien kapillaarihuokosten pitoisuus materiaalissa ja niihin kapillaarisesti siirtyvän veden määrä vaikuttavat eniten materiaalin pakkasenkestävyyteen. Kapillaarihuokosissa tapahtuvaa pakkasrapautumista voidaan betonin valmistuksessa ehkäistä lisähuokostamalla betonia käyttämällä huokoistavia lisäaineita. Niiden vaikutuksesta betoniin muodostuu halkaisijaltaan 0,01...0,05 mm suuruisia suojahuokosia, jotka eivät täyty kapillaarivedestä. Kapillaarihuokosten jäätyessä paisuva jääkide purkautuu vedellä täyttymättömiin suojahuokosiin, joissa se pystyy vapaasti paisumaan aiheuttamatta rakennetta vaurioittavaa painetta. [13, s. 118]

Pakkasvaurio tulee maanvastaisten rakenteiden osalta kysymykseen esimerkiksi perusmuureissa, joissa rakenteen ulkoilmaan rajoittuva pinta on kapillaarikosteudesta kostunut. Tässä tapauksessa kapillaarihuokosissa jäätyvä vesi aiheuttaa rakenteeseen pakkasrapautumaa eli sisäistä halkeilua ja lohkeilua [13, s. 116]. Rapauksen seurauksena rakenteen läpäisevyys kasvaa ja haitalliset aineet pääsevät helpommin käynnistämään esimerkiksi raudoitteiden korroosion.

3.4 Suolan kiteytyminen

Suolan on määritelty tarkoittavan molekyyleistä koostuvaa yhdistettä, jossa molekyylit ovat kiinteässä olomuodossa pakkaantunut kiteiksi, mutta erottuvat toisistaan vesiseoksessa [17, s. 11]. Rakenteissa esiintyy yleisesti noin 50 eri suolalajia ja niillä on tyypillisesti hyvin erilaiset fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet [1]. Suolat kykenevät kulkeutumaan rakenteessa vain veden tai vesihöyryn mukana eli korkea suolapitoisuus maanvastaisessa rakenteessa on selkeä merkki rakenteessa olevasta tai siinä olleesta suuresta kosteuspitoisuudesta [22].

Sulfaattien (ks. alaluku 3.6) kiteytymistä pidetään suolatyypeistä rakenteille vaarillisimpina, mutta myös karbonaattien kiteytymisen on havaittu vaurioittavan rakennetta. Sen sijaan muiden suolojen kuten nitraattien ja kloridien kiteytymisellä ei katsota olevan suurta vaikutusta rakenteen vaurioitumiseen, mutta ne voivat vaikuttaa haitallisesti rakenteen ominaisuuksiin muilla tavoin. [23]

3.4.1 Kiteytymisen vaikutukset

Rakenteeseen tunkeutunut suola muuttaa rakenteen kosteusteknistä käyttäytymistä. Kun suola kiinnittyy huokosen pintaan, se pienentää huokosen kokoa ja vahventaa näin rakenteen kapillaarista imua. Rakenteen suolapitoisuus vaikuttaa myös yleisesti materiaalin hygroskooppisuuteen lisäten sen kosteuden varastointikykyä. [22][24]

Rakenteen kuivumiskykyyn suolalla on todettu olevan vaikutus siten, että esimerkiksi tiilen kuivuminen matalassa ilman suhteellisessa kosteudessa tapahtuu suolaliuksella kyllästettynä paljon hitaammin kuin puhtaalla vedellä kyllästettynä. Tämä johtuu kosteuden siirtymistä estävän suolan kiteytymisen muodostumisesta lähelle materiaalin kuivumispintaa. Lisäksi rakenteen sisällä kiteytyvät suolat aiheuttavat paisuessaan vaurioille altistavia jännityksiä. [25]

Matalassa ilman suhteellisessa kosteudessa suolan kiteytyminen rakenteen pintaan muodostaa pintakerrostuman, joka on läpäisevyydeltään vähäinen. Suuremmassa ilman suhteellisessa kosteudessa puolestaan suurempi osa rakenteen sisällä olevasta suolasta kulkeutuu rakenteen pintaan ja kiteytyy hauraammaksi kerrokseksi, jonka läpäisevyys ei vaikuta rakenteen pinnan läpäisevyyteen yhtä merkittävästi. Tämä tarkoittaa siis sitä, että mitä kuivempaan ilmaan suolapitoinen kosteus haihtuu, sitä tiiviimmän kerroksen suolan kiteytyminen muodostaa ja sitä enemmän rakenteellisesti haitallista kiteytymistä tapahtuu rakenteen sisällä. [25]

Käytännössä maanvastaisissa rakenteissa suolan kiteytymisen vaurioittamisaste riippuu siis rakenteen pintaan kapillaarisesti kulkeutuvan veden ja pinnasta haihtuvan kosteuden

suhteesta. Jos suoloja kapillaarisesti kuljettavan veden määrä on suurempi kuin kosteuden haihtumisaste rakenteen pinnalta, ei rakenteen pinnalle muodostuva suolan kiteytyminen vaurioita rakennetta. Jos suolapitoisen veden siirtyminen huokosverkostossa on hitaampaa kuin rakenteesta haihtuvan kosteuden määrä, voi suolan kiteytyminen tapahtua rakenteen sisällä ja aiheuttaa näin rakenteen rapautumista. [15]

Suolan kerrostuminen tapahtuu yleensä rakenteen osassa, jossa kosteusolosuhteet muuttuvat siten, että kosteus ei enää kulkeudu nestemäisenä kapillaarivoimien vaikutuksesta vaan diffuusiolla vesihöyrynä. Koska suolat eivät pysty kulkeutumaan rakenteessa vesihöyryn mukana, ne kerrostuvat muodostaen tiiviin pinnan rakenteeseen. Kun suola kiteytyy tässä rintamassa, sen tilavuus kasvaa ja aiheuttaa näin jännityksiä rakenteen sisällä, jotka voivat johtaa rakenteen vaurioitumiseen. [22]

Kun huokosilman suhteellisessa kosteudessa tapahtuu muutoksia, voi rakenteessa oleva kiteytynyt suola liueta uudelleen huokosveteen ja kiteytyminen toistua useita kertoja. Tämän seurauksena syntyneet jännitykset voivat osaltaan kuluttaa rakennetta pitkällä aikavälillä. [26]

Olosuhteet, joissa suolan kiteytyminen johtaa rakenteen halkeiluun ja pettämiseen, ovat kuitenkin yhä tutkimuksen alaisia [27]. Kiteytymisen vaurioittavuuteen tiedetään kuitenkin vaikuttavan materiaalin huokosrakenne, suolan tyyppi ja liukoisuus sekä ympäristön lämpötila- ja kosteusolosuhteet [22].

3.4.2 Kiteytyminen rakenteen pinnalle

Erityisesti Portland sementtiä sisältävien rakenteiden tapauksessa suolan kiteytyminen kyetään havaitsemaan kalsiumkarbonaattimuodostumana (CaCO_3) rakenteen pinnalla. Kiteytymisen saa aikaan Portland sementin sisältämien alkalien, natriumin ja kaliumin kulkeutuminen veden mukana rakenteen pintaan ja niiden reagoiminen ilman hiilidioksidin kanssa muodostaen kuvien 20 ja 21 mukaista kalsiumkarbonaattia. [28]



Kuva 20. Kalsiumkarbonaattia putkika-
naalin alapohjan pinnalla [2, s. 140].



Kuva 21. Kalsiumkarbonaattia tiiliseinän
pinnassa [29].

Kalsiumkarbonaattia voi muodostua myös rakenteen pintaan kapillaarisen kosteuden mukana kulkeutuneista suoloista. Tätä maanvastaisten rakenteiden sisäpinnassa usein näkyvää valkoista kidettä kutsutaan myös ”kalkkihärmeeksi” ja se antaa osviittaa rakenteessa olevasta tai olleesta suuresta kosteuspitoisuudesta. [2, s. 139] Ulkoisen kosteusrasituksen aiheuttaman kiteytymisen lisäksi kalsiumkarbonaatti näkyy usein rakenteissa, joissa on hiljattain käytetty uusia laasteja tai tasoitteita [23]. Lisäksi rakenteen pinnan rapautumista saattaa aiheutua hydratoitumisen seurauksena, kun muurauslaasti tai huokoinen betoni altistuu hydratoituville suoloille kuten natriumsulfaatille ja natriumkarbonaatille, jotka ovat yleisimmät suolat muurauslaasteissa. [15]

3.5 Hydrolyysi

Sumun tai vesihöyryn tiivistymisestä muodostuva puhdas vesi ja sateesta tai sulavasti lumesta/jäästä muodostuva pehmeä vesi eivät joko sisällä ollenkaan kalsiumioneja (Ca^{2+}) tai niiden kalsiumpitoisuus on hyvin pieni. Kun nämä vedet ovat kosketuksissa rakenteen kanssa, ne pyrkivät muodostamaan kemiallisen tasapainon hydrolyysillä eli irrottamalla sementtikivistä kalsiumpitoisia ainesosia. Tasapainon saavuttamisen jälkeen hydrolyysi pysähtyy. Jos rakenne kuitenkin altistuu jatkuvasti virtaavalle tai paineenalaiselle pehmeälle vedelle, olosuhteet mahdollistavat jatkuvan hydrolyysin. Teoriassa jatkuva hydrolyysi suodattaisi kaiken kalsiumhydroksidin sementtikivistä, mistä seuraisi merkittävä rakenteen lujuuden menetys. [13, s. 132], [15]

Hydrolyysin aiheuttama kalsiumhydroksidin poistuminen rakenteesta näkyy suolan kiteytymisen tapaan tutkittaessa rakennetta aistinvaraisesti. Kalkkipitoinen uutosvesi reagoi ilmassa olevan hiilidioksidin kanssa muodostaen myös hydrolyysin tapauksessa rakenteen pinnalle valkokiteistä kalsiumkarbonaattia (Kuva 20 ja Kuva 21). [13, s. 132], [15]

3.6 Sulfaatit rakenteessa

Sementtikiveä kemiallisesti vaurioittavia suoloja ovat sulfaatit. Poikkeuksellisen korkeat pitoisuudet pohjavedessä aiheutuvat yleensä magnesium-, kalium- ja natriumsulfaateista. Lisäksi maatalousalueiden maaperästä ja vedestä löytyy tyypillisesti korkeita ammoniumsulfaatti pitoisuuksia. [15] Sulfaatit päätyvät rakenteeseen usein ympäristöstä esimerkiksi rakenteen ollessa kosketuksessa vanhan merenpohjan tai kiisupitoisen maan kanssa. Sulfaatit voivat olla lähtöisin myös betonin valmistuksessa käytetystä kiviaineksesta. Sementti itsessään sisältää aina pieniä määriä sulfaatteja. [13]

Rakenteiden, joiden toinen puoli on altis vedelle ja toinen puoli on avoin kosteuden haihtumiselle, on tutkittu olevan haavoittuvaisempia sulfaattihyökkäykselle kuin rakenteiden, joiden kaikki sivut ovat alttiita vedelle. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi sisäpinnastaan vesihöyrylle avoimissa kellarin seinissä ja maanvaraisissa alapohjissa esiintyvät sulfaatit ovat kriittisempiä kuin perustuksissa ja betonipaaluissa esiintyvät sulfaatit. [15] Klorideja ja sulfaatteja sisältävän meriveden rasittaessa rakennetta kloridit voivat puolestaan toimia sulfaattivaurioita ehkäisevänä tekijänä [13, s. 133].

Eriyisesti betonin alhainen läpäisevyys eli permeabiliteetti korostuu suojauduttaessa betoniin tunkeutuvilta sulfaateilta. Sopivan alhainen läpäisevyys saavutetaan riittävän pakulla rakenteella, matalalla vesi-sementtisuhteella sekä betonin huolellisella tiivistämisellä ja jälkihoidolla. Lisäsuojaa sulfaattien aiheuttamaa ettringiittilaajenemista vastaan voidaan saada käyttämällä sulfaatin kestävää portlandsementtiä, joka sisältää alle 5 prosenttia kalsiumaluminaattia (C_3A). Kalsiumaluminaattipitoisuutta säätelemällä saadaan luotua kestävyyttä ettringiittilaajenemista vastaan, mutta sillä ei pystytä estämään kipsilaajenemista ja suolan kiteytymisestä (ks. alaluku 3.4) aiheutuvia vaurioita [30].

3.6.1 Ettringiittilaajeneminen

Kovettuneessa rakenteessa tapahtuva ettringiittilaajeneminen voi aiheutua joko rakenteen sisäisten tai rakenteeseen imeytyneiden ulkoisten sulfaattien vaikutuksesta. Sulfaattien lisäksi reaktion tapahtuminen edellyttää pitkäaikaista ja korkeaa kosteusrasitusta. [13, s. 134]

Ettringiittilaajenemisvaurion aiheuttavassa kemiallisessa reaktiossa sulfaatti-ionit (SO_4^{2-}) reagoivat sementtikiven kalsiumhydroksidin ($Ca(OH)_2$) ja kalsiumaluminaatti-hydraattien (C_3A) kanssa muodostaen ettringiittiä ($C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32}$). Reaktion lopputuotteena muodostuva ettringiittimineraali kiteytyy ilmatäytteisten huokosten seinämille, jonka seurauksena, reaktion voimakkuudesta riippuen, huokosten tilavuus joko pienenee

tai ne kiteytyvät täysin umpeen. Tämä voi aiheuttaa rakennetta rikkovaa painetta ja heikentää rakenteen pakkasenkestävyyttä, jolloin se altistuu pakkasrapautumiselle (ks. alaluku 3.3). [15] Ettringiittilaajenemisen aiheuttamat vauriot ovatkin hyvin samankaltaiset pakkasrapautumisen kanssa ja näiden kahden ilmiön erottaminen toisistaan vaurion aiheuttajana vaatii laboratoriotutkimuksia. [13, s. 134]

3.6.2 Kipsilaajeneminen

Sulfaatti-ionien reagoidessa sementtikiven kalsiumhydroksidin (Ca(OH)_2) kanssa, muodostuu reaktiossa myös kalsiumsulfaattia eli kipsiä ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$). Riippuen sulfidiliuoksen kationin tyypistä (natrium (Na^+), magnesium (Mg^{2+}), saattaa hyökkäys muuttaa myös sementin hydrataatiotuotteena muodostuvan kalsiumsilikaattihydraatin (CSH) kipsiksi. [15]

Natriumsulfaattihyökkäyksen muodostaman kipsin sivutuotteena muodostuu alkalista natriumhydroksidia (NaOH). Alkalisuus on oleellisessa osassa CSH:n stabiliteetin säilyttämisessä, joten natriumhydroksidi pystyy korvaamaan kalsiumhydroksidin eikä siten vaikuta sementtikiven stabiilisuuteen negatiivisesti. [15]

Jos rakenne on myös magnesiumsulfaattihyökkäyksen kohteena, muodostuu sivutuotteena magnesiumhydroksidia (Mg(OH)_2), joka on matala-alkalinen ja liukenematon hydroksidi. Sen vaikutuksesta systeemin alkalisuus laskee ja CSH menettää stabiilisuuttaan, koska kalsiumhydroksidit poistuvat. Tämä altistaa myös CSH:n sulfaattihyökkäykselle ja muuttaa sen kipsiksi. Tästä reaktiosta aiheutuu ensin tapahtuvan pH-arvon alenemisen myötä sementtikiven jäykkyyden ja lujuuden menetystä, mistä seuraa rakenteen laajenemista ja halkeilua. Tämän takia magnesiumsulfaattihyökkäystä voidaan pitää vaikutukseltaan vakavimpana sulfaattina betonin pitkäikäisyyden kannalta. [15]

3.7 Betonin alkali-kiviainesreaktio

Alkali-kiviainesreaktiolla tarkoitetaan sementtikiven alkalisuudesta johtuvaa betonin kiviaineksen paisumista, joka voi aiheuttaa rakenteen rapautumista. Reaktion toteutumiseksi on määritelty kolme seuraavaa ehtoa, joiden tulee toteutua: [31]

- Betonin alkalipitoisuuden on oltava korkea
- Kiviaineksen on sisällettävä reaktiivista piidioksidia
- Betonin kosteuspitoisuuden on oltava riittävän korkea ($\text{RH} > 80 \%$).

Betonin ominaisuuksista ja olosuhteista riippuen reaktion ilmenemiseen voi kulua aikaa kahdesta jopa viiteenkymmeneen vuoteen [32, s. 90]. Alkali-kiviainesreaktio jakautuu

kolmeen luokkaan, joista yleisin on alkali-piiksidireaktio ja sen on myös todettu olevan luokista ainoa, joka aiheuttaa betonin kiviaineksen paisumista [31].

Alkali-piiksidireaktio perustuu kemialliseen reaktioon, jossa sementtipastan alkalinen natrium- ja kaliumhydroksidipitoinen huokosvesi ja kiviaineksen reaktiiviset piiksidit reagoivat muodostaen hygroskooppista geeliä, joka paisuu imiessään vettä. Paisumisen seurauksena betonissa ilmenee halkeilua ja rapautumista, mikä vaikuttaa rakenteen käyttöikään ja altistaa sen muiden hajottavien prosessien etenemiselle. [31], [33]

Tärkeimpiä betonin reaktioon vaikuttavia ominaisuuksia ovat käytetty kiviaines, sementti sekä mahdolliset lisä- ja seosaineet. Ympäristön olosuhteista merkittävimmät tekijät ovat rakenteelle aiheutuva kosteusrasitus, vallitseva lämpötila ja rakenteeseen tunkeutuvien alkalisten suolojen määrä. [31], [33]

4. KAPILLAARIKATKON ASENTAMINEN EUROOPASSA

Maanvastaisten rakenteiden kapillaarisen kosteuden nousun estämiseksi on listattu kolme yleisintä tapaa. Kosteuslähteen yläpuolelle voidaan asentaa suurihuokoista materiaalia, injektoida rakenteeseen vettä hylkivää ainetta tai muodostaa rakenteeseen huokoisia sisältämätön kerros. [12, s. 207] Jälkikäteen asennettavista menetelmistä tulee kyseeseen rakenteen muuttaminen vettä hylkiväksi tai vettä läpäisemättömäksi. Lisäksi on kehitelty elektro-osmoosiin perustuvia sähkökineettisiä menetelmiä sekä rakenteen alapäätä tuulettavia menetelmiä, joita on tarkasteltu alaluvuissa 4.4 ja 4.5.

Euroopassa kehitetyt jälkikäteen asennettavan kapillaarikatkon asennusmenetelmät ovat kohdennettu pääsääntöisesti tiilirakenteisille maanvastaisille seinille. Tämä johtuu siitä, että kellareiden kantavat maanvastaiset seinät on Keski-Euroopassa valmistettu lähes yksinomaan muuraamalla. Esimerkiksi suuri enemmistö Euroopan historiallisten keskusten rakennuksista on muurattu tiilestä [34, s. 11].

4.1 Mekaaniset menetelmät

Euroopassa käytetty jälkikäteen asennettavan kapillaarikatkon mekaaninen menetelmä on ns. muurinsahaus (saks. Mauersägeverfahren, eng. wall cutting). Tällä menetelmällä tiilirakenne sahataan vaakasuunnassa koko poikkileikkauksen matkalta poikki. [1], [35]

Pehmeille ja puolikoville seinille, esimerkiksi tiili- ja hiekkakiviseinille, käytetään sahaukseen liikuteltavia ketjusahoja. Kovemille luonnonkivimuurauksille, kuten basaltille ja graniitille, sahauksessa käytetään timanttivaijeria. Kun sahaus tehdään muuraussauman kohdalta, se voidaan suorittaa kuivamenetelmällä. Jos sahattavassa rakenteessa ei ole yhtenäistä vaakasaumaa, pitää sahaus suorittaa vesijäähdyttämällä samalla sahanterää tai vaijeria. [35]

Kun rakenne katkaistaan sahaamalla koko poikkileikkauksen mitalta, on sahausmatkaa rajoitettu maksimissaan 1 metriin kerrallaan. Sahattuun rakoon työnnetään kapillaarikatkona toimiva kuvan 22 mukainen vedeneristelevy.



Kuva 22. Vedeneristelevyn asentaminen sahattuun rakenteeseen [35].

Levyn tulee olla kulutusta, painetta ja kemikaaleja kestävä ja materiaaleina käytetään joko muovia, bitumipäällysteistä alumiini- tai lyijylevyä tai korroosion kestävä ruostumatonta terästä. Suosituimpia levymateriaaleja ovat 1,2–2 mm paksut lasikuituvahvisteiset muovilevyt ja HD polyeteenilevyt. Levysten saumakohtat limitetään yhtenäisen katkon muodostamiseksi. [1], [35]

Levyn asennuksen jälkeen vahvistetaan rakennetta ja levyn kiinnitystä sahauksen kohdalta lyömällä rakenteen ja levyn väliin koko seinärakenteen läpi puristuslujuudeltaan vähintään 50 N/mm^2 olevat kiilalaatat 15–25 cm päähän toisistaan. Laattoja asennettaessa pitää huomioida, että erityisesti bitumipäällysteiset levyt eivät vaurioidu kiillauksen vaikutuksesta. Kiilojen väliin jäävät aukot täytetään injektoimalla ne täyteen esimerkiksi sementtilaastilla, joka on sulfaatteja kestävä. Tällöin laastiin ei pääse muodostumaan rakennetta vaurioittavaa ettringiittiä ja kipsiä (ks. alaluku 3.6). Rakenteen poikkileikkauksen sahaaminen edellyttää, että myös rakenteessa pystysuunnassa kulkevat teräkset ja talotekniikka joudutaan katkaisemaan. Tämän takia menetelmä ei sovellu kaikkiin esimerkiksi historiallisesti merkittäviin ja suojeltuihin kohteisiin. [35]

Jos mekaanisen kapillaarikatkon asentaminen halutaan suorittaa kahden työvaiheen sijaan yksittäisenä työvaiheena, on vaihtoehtona tehdä kapillaarikatko muurinsahausmenetelmän sijaan kromiteräspeltimenetelmällä (saks. Chromstahlblechverfahren). Tällä menetelmällä aaltomuotoiltu ruostumaton kromiteräslevy asennetaan rakenteen läpi jatkuvaan muuraussaumaan paineilmavasaralla, jonka iskunopeus on 1200–1500 lyöntiä minuutissa (kuva 23).



Kuva 23. Kromiteräspellin asennus paineilmavasaralla [35].

Levyt tulee olla limitettynä kahden aallon verran jatkuvan kapillaarikatkon muodostumisen varmistamiseksi. Jos muurauksen kloridipitoisuus on suuri, käytetään kromiteräksen sijasta levyissä haponkestävää kromi-nikkeli- tai kromi-nikkeli-molybdeeniterästä. Koska menetelmästä aiheutuu tärinää rakenteeseen, tulee sen käytöstä syntyvät mahdolliset muodonmuutokset ja stabiilisuuden menetykset tutkia tarkasti ennen menetelmän käyttöönottamista. Koska muuraussauman tulee olla yhtenäinen koko rakenteen poikkileikkauksen läpi ja rakenteessa ei saa kulkea pystysuuntaista talotekniikkaa, ei myöskään kromiteräspeltimenetelmää voida yleensä käyttää suojelluissa ja historiallisesti merkittävissä rakennuksissa. [35]

Injektointimenetelmään verrattuna näissä mekaanisissa menetelmissä esiintyy rakenteessa enemmän voimien uudelleenjakautumista ja muodonmuutoksia. Lisäksi kumpakaan mekaanisista menetelmistä ei voida käyttää, jos katkaistavaan rakenteenosaan kohdistuu vaakasuuntaisia voimia, joista aiheutuisi poikkileikkauksen katkettua kriittisiä muodonmuutoksia. [35] Mekaanisen kapillaarikatkon asentamisesta aiheutuvia muodonmuutoksia on pyritty välttämään asentamalla katko siten, että muurausta puretaan rakenteen alapäästä ja muurataan uudelleen umpeen katkon asentamisen jälkeen [36].

Mekaanisten menetelmien on todettu olevan toimimattomia, kun kapillaarikatko altistuu vedenpaineelle. Tämä johtuu siitä, että levyjen välisiä limittäisi liitoksia ei saada koskaan täysin tiiviiksi, jolloin paineenalaisesti nouseva vesi pääsee liitosten raoista pidemmälle rakenteeseen. [1]

4.2 Injektointimenetelmät

Injektointimenetelmät eli ns. kemialliset menetelmät jakautuvat kolmeen eri asennustapaan: paineettomaan ja paineelliseen injektointiin sekä näiden yhdistelmään. Kolmannen asennustavan menetelmiin kuuluvat injektoinnit, jotka voidaan asentaa joko paineellisenä tai paineettomana tai niiden asennus ei sovi suoraan kumpaankaan kategoriaan. Tällaisia injektointimenetelmiä ovat esimerkiksi impulssi- ja parafiinimenetelmät sekä monivaiheinjektoinnit. [35]

4.2.1 Paineellinen menetelmä

Paineellista injektointimenetelmää pidetään toimivana ratkaisuna erityisesti silloin, kun rakenteen kosteuspuiteisuus on suuri (reilusti yli 80 %) tai se on täysin kapillaarisesti kylästynyt. Paineellisesti injektoitu aine tunkeutuu huokosiin työntäen veden mennessään pois huokosista ja täyttää samalla huokokset, joihin vesi ei pääse kapillaarivoimien vaikutuksesta tunkeutumaan. Muurauksen poikkileikkauksen tulisi olla sellainen, että aine ei pääse virtaamaan kontrolloimattomasti esimerkiksi rakenteen sisällä oleviin onkaloihin. Sen takia paineellista injektointimenetelmää käytettäessä tulee tarvittaessa suorittaa esiinjektointi sementti suspensiolla, joka täyttää rakenteen suuret tyhjiötilat. Porareikä tulisi porata alaviistoon siten, että se läpäisee vähintään yhden muurauslaastisauman tai vaakasuuntaisesti porattaessa siten, että porareikä tehdään muurauslaastisauman kohdalle. Reiän syvyys tulee olla 5 cm lyhyempi kuin seinän poikkileikkauksen paksuus. Aine asennetaan paineellisesti rakenteeseen porareikä suuaukolle asennettavan takaiskuventtiilillä varustetun suutinosan läpi. [35]

Paineen luomiseen käytetään korkeapaineruiskuja, mäntäpumppuja, kierukkapuristimia ja polvinivelpuristimia. Paineellisella injektointimenetelmällä voidaan saavuttaa tehokas injektointiaineen jakautuminen ilman pysyviä haittoja rakenteeseen, kunhan rakenteen puristuskestävyys on riittävä. [35]

4.2.2 Parafiinimenetelmä

Parafiinimenetelmällä seinärakennetta lämmitetään ensin lämmitystangoilla siihen asti, että porareikien läheisyydessä ei esiinny merkittävää kosteutta. Samaan aikaan rakenteen lämmittämisen kanssa lämmitetään parafiini nesteeksi, joka kaadetaan välittömästi lämmitystankojen poistamisen jälkeen porareikiin. Nestemäistä parafiinia lisätään porareikiin vähintään kahden tunnin ajan. Parafiinin injektointi voidaan tehdä joko paineettomasti tai paineellisesti. Parafiini täyttää kuivuneet huokokset kapillaarivoimien vaikutuksesta ja muodostaa kovettuessaan jäähtymisen seurauksena vaakasuuntaisen kosteutta

läpäisemättömän kerroksen, joka pystytään havaitsemaan seinän alentuneen kosteuspitoisuuden lisäksi myös rakenteen tummentuneena pintana. [35]

Lämpötiloilla on todettu olevan merkittävä vaikutus parafiinin imeytymisnopeuteen. Mitä alhaisempi sulamislämpötila ja mitä korkeampi työskentelylämpötila parafiinilla on, sitä alhaisempi on aineen viskositeetti ja sitä nopeammin se täyttää huokosrakenteen. [37] Rajoituksia menetelmän käytölle asettaa esimerkiksi rakenteessa mahdollisesti oleva bitumisively, joka voi kärsiä rakennetta lämmitettäessä. Tasainen lämmittäminen voi muutenkin osoittautua hankalaksi esimerkiksi rakenteen ulkonurkissa ja hyvin lämmöneristetyissä rakenteissa. [38]

4.2.3 Impulssimenetelmä

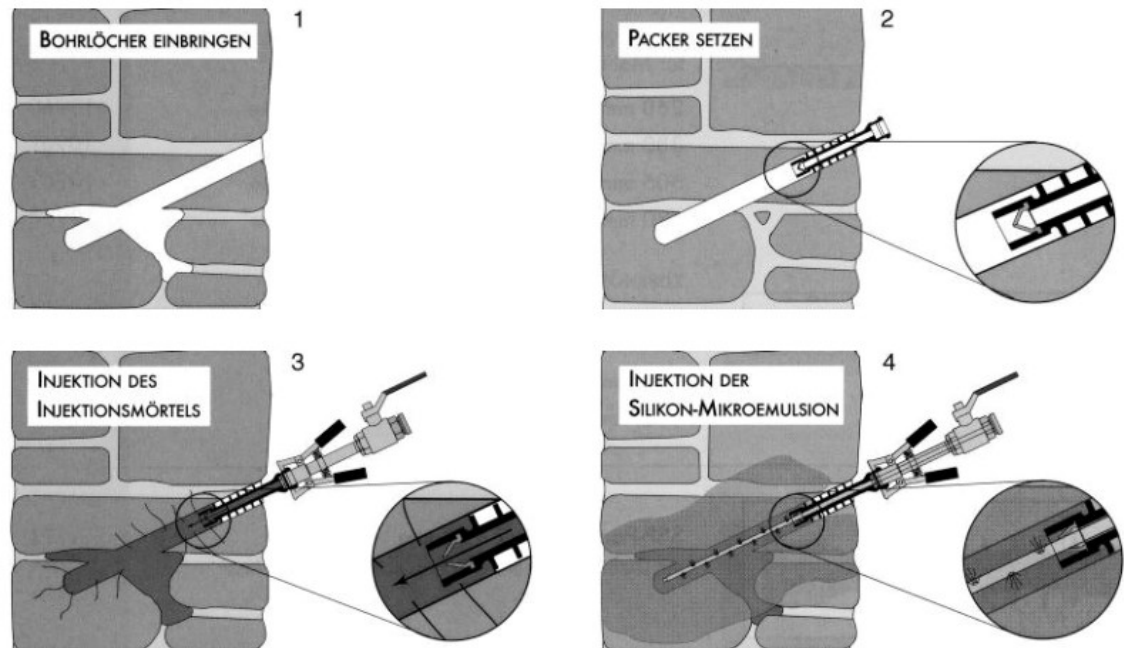
Impulssimenetelmällä porareikiin ruiskutetaan tasaisin väliajoin silikonimikroemulsiota. Injektointiaineen ruiskutusta säädellään elektronisella ohjauksella. Injektointiaine syötetään pulssilaitteesta rakenteeseen rei'itetyn ruiskutusputken läpi, jolloin varmistetaan, että aine jakautuu tasaisesti rakenteen poikkileikkaukseen. Rei'itettyjen ruiskutusputkien takia ei ole myöskään tarpeellista suorittaa esi-injektointia tyhjiöiden täyttämiseksi.

Injektointimenetelmässä esiintyy eroavaisuuksia impulssiajassa, injektointiajassa ja injektointien välisessä tauossa. Veteen sekoittuneena hienojakoisen ja stabiilin koostumuksensa säilyttävän silikonimikroemulsion takia menetelmää voidaan käyttää myös kapillaarisesti kyllästyneissä rakenteissa. [35]

4.2.4 Monivaihemenetelmä

Kyllästyneen rakenteen injektioimisen onnistumisen varmistamiseksi on laadittu myös monivaiheinjektointi (kuva 24), jonka periaatteena on jakaa menetelmä kolmeen osaan. Tämän menetelmän avulla voidaan injektoida myös onkaloisia- sekä monikerroksisia muurauksia. Ensimmäisessä osassa porareikien kautta rakenteeseen suoritetaan esi-injektointi mikrohuokoisella sementti suspensiolla. Sen jälkeen syötetään rakenteeseen paineellinen injektointiaine, joka on yleensä silikonimikroemulsio. Injektoinnin jälkeen suoritetaan vielä kolmas osa menetelmästä, joka on jälki-injektointi alkalisella injektointiaineella. Monivaiheinjektoinnin haittapuolena on pitkä ajankäyttö. Fysikaalista kuivumista voidaan nopeuttaa asentamalla rakenteeseen lämmitys- ja kuivatuslaitteistoa. Monivaiheinjektointi on kehitelty 1900-luvun loppupuolella vastalauseena epäilyksiin injektointien toimivuudesta onkaloisessa ja korkean kosteuspitoisuuden omaavissa muurauk-

sisä. Se luo mielikuvan, että esi-injektointi ja injektointin aktivointi jälki-injektointilla olisivat tarpeellisia työvaiheita aina injektointia suoritettaessa, mikä ei kuitenkaan kaikissa tapauksissa pidä paikkaansa. [35]



Kuva 24. Monivaiheinjektointin vaiheet porareiän tekemisestä injektointiaineen syöttämiseen [35].

Monivaiheinjektointin toimivuutta on pyritty varmistamaan kehittämällä märkä-märkämenetelmä, jossa sementtisuspension sekaan laitetaan terästanko, joka poistetaan sementin ollessa vielä kuivumatonta. Tällöin esi-injektointiin jää selkeä kanaali injektointiaineen syöttämiseksi. Märän sementin korkea emäksisyys voi kuitenkin olla haitallista silikonimikroemulsiolle, joka alkaa kontaktissa korkean emäksisyyden omaavan materiaalin kanssa hyytelöityä, jolloin se ei kykene etenemään pidemmälle rakenteeseen. [35]

4.2.5 Paineeton menetelmä

Paineettomassa injektointimenetelmässä aineen annetaan imeytyä rakenteeseen painovoiman ja kapillaaristen voimien vaikutuksesta. Tuotteen tulee täten olla veteen sekoitettava ja matalan viskositeetin omaava. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi silikonaatit, silaanit, silikonimikroemulsiot ja lämmitetyt parafiinit. Injektointireikien etäisyys toisistaan riippuu rakennusmateriaalista ja aineen imeytymiskyvystä, mutta se saa olla minimissään 10 cm ja maksimissaan 15 cm. Tarvittavan porareiän keskiarvohalkaisija on melkein 20 mm. Paineettomien injektointien haittapuoli Frösselin [35] mukaan on, että sen jakautumista ei tapahdu lähes ollenkaan rakenteen kosteuspistoisuuden ollessa reilusti yli 80

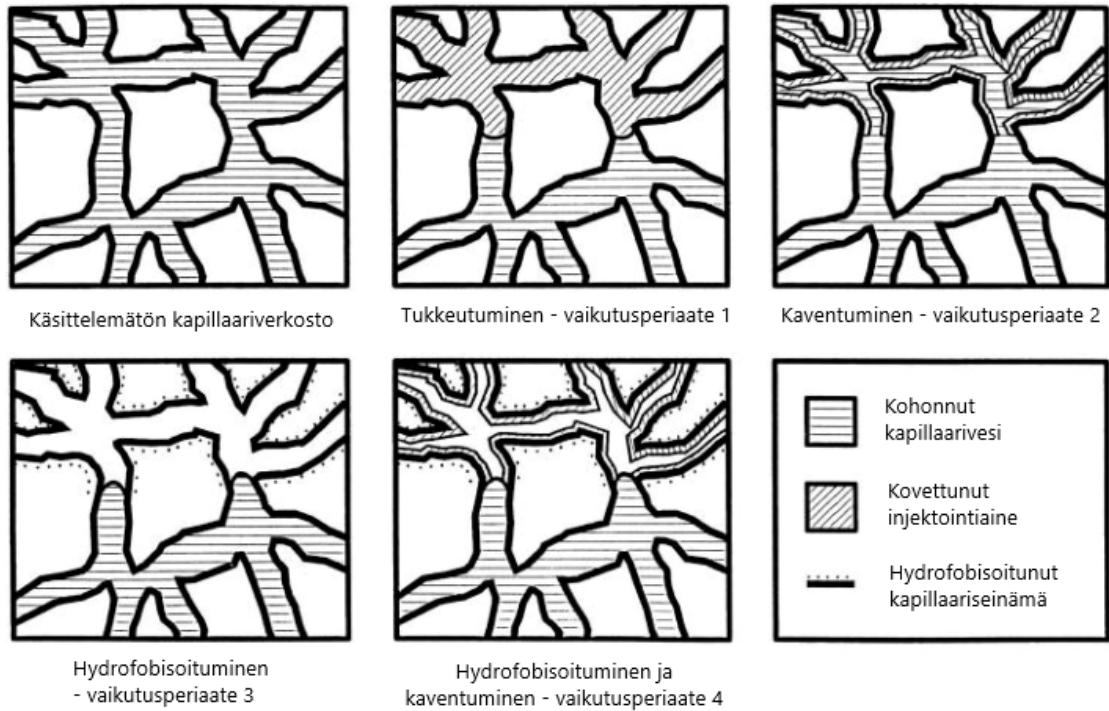
%. Tällöin menetelmä vaatisi siis rakenteen kosteuspitoisuuden alentamista ennen injektoinnin aloittamista.

4.3 Injektointiaineet

Injektointiaineen toimivuus perustuu sen tunkeutumiseen riittävän syvälle mineraalipitoiseen rakennusmateriaaliin sekä sen kykyyn muodostaa kosteudennousua estävä reaktio riippumatta rakennusmateriaalin kosteus- ja suolapitoisuudesta. Näiden kahden päätaivoitteen täyttymiseksi tulee aineen toiminnassa pyrkiä neljään seuraavaan perusasiaan:

- Injektointiaineen ja rakennusmateriaalin välinen rajapintajännityksen tulee olla huokosveden ja rakennusmateriaalin rajapintajännitystä alhaisempi, jolloin rakenne täyttyy tehokkaammin injektointiliuoksesta kuin vedestä.
- Injektointiaineen viskositeetin tulee olla mahdollisimman alhainen, jotta se kykenee etenemään rakenteen pienimpiinkin huokosiin.
- Injektointiaineen tiheyden tulee olla mahdollisimman alhainen, koska sen leviämisenopeus on sitä nopeampi, mitä pienempi aineen tiheys on verrattuna veden tiheyteen.
- Injektointiaineen sitoutumisreaktion on oltava riippumaton huokosveden haihtumisesta esimerkiksi rakenteen kuivuessa. [39]

Injektointiaineiden toimivuudesta on oleellista selvittää, ovatko ne toiminnaltaan fysikaalisesti kuivuvia vai kemiallisesti reagoivia. Kuvassa 25 on esitetty kuvien avulla injektointiaineiden toimintaperiaatteet. Fysikaaliset reaktiot muokkaavat huokosten kokoa ja kemialliset reaktiot muokkaavat huokosten kapillaarikäyttäytymistä.



Kuva 25. Injektointiaineiden neljä eri vaikutusperiaatetta [35].

Kuvassa 25 on vasemmassa ylänurkassa kuvattu vaakaviivatäytöllä käsittelemättömässä huokosverkostossa kohonnut kapillaarivesi. Ensimmäisessä vaikutusperiaatteessa fysikaalinen huokosverkoston tukkeutuminen injektointiaineen kovettumisella on kuvattu vinoviivatäytöllä. Toisessa vaikutusperiaatteessa huokosverkoston kapenemista on kuvattu huokosseinämille kovettuvalla injektointiaineella. Kolmannen vaikutusperiaatteen kemiallisessa reaktiossa huokosseinämistä tulee vettä hylkiviä ja nämä seinämät on kuvattu pisteviivalla. Neljännessä vaikutusperiaatteessa injektointiaineen toiminta on sekä fysikaalinen että kemiallinen eli reaktiossa aine kovettuu huokosen seinämille ja tekee niistä samalla vettä hylkiviä. [35]

Seuraavien injektointiaineiden toiminta perustuu fysikaaliseen reaktioon, jonka seurauksena huokokset tukkiutuvat tai kaventuvat [35][40]:

- Alkalisilikaatit
- Orgaaniset hartsit
- Parafiinit (ks. alaluku 4.2.2)

Alkalisilikaatteja on käytetty jo pitkään injektointiaineena porareikiin. Niiden vaikutuksen on kuitenkin havaittu heikkenevän rakenteen kuivussa, jolloin silikaattigeeli kutistuu ja vesi pääsee jälleen nousemaan kapillaariverkostossa. Lisäksi korkea alkalisen pitoisuuden on havaittu lisäävän suolarasitusta rakenteelle. [35]

Hartsien nopean reagoitajan ja suuren viskositeetin takia ne asennetaan yleensä paineellisella menetelmällä. Yleisimpiä käytetyistä hartseista ovat epoksihartsit. Niiden ongelmana on aineen kovettumisesta seuraava haitallisen suuri rakenteen lujuus. [35]

Seuraavien injektointiaineiden toiminta perustuu kemialliseen reaktioon, jonka seurauksena huokosseinämät muodostuvat vettä hylkiviksi [35][40]:

- Silikonaatit
- Silikonimikroemulsiot
- Silaanit ja pienmolekyyliset siloksaanit

Koska silikonaattien kemiallinen reaktio vaatii toimiakseen hiilidioksidia, saa rakenteen kosteuspitoisuus olla maksimissaan vain 50 % ja muurauksen paksuus maksimissaan 50 cm. Lisäksi alkalipitoisten silikonaattien kemiallisen reaktion sivutuotteena syntyy suojoja, jotka lisäävät entisestään rakenteen hygroskooppisuutta. [35]

Silikonimikroemulsion ainesosat ovat huomattavasti normaaleja emulsioita pienempiä, joten ne ovat ihanteellisia injektointiaineiksi. Silikonimikroemulsio ei sisällä alkaaleja tai liuottimia ja niiden reaktioissa ei synny muita rakenteelle haitallisia sivutuotteita. Paineellisesti injektoituina sen toimivuutta voidaan pitää injektointiaineista varminpana. Silaani- ja siloksaaniemulsioiden kehittäminen silikonimikroemulsiosta on mahdollistanut valumattoman injektoinnin asentamisen paineettomasti vaakasuuntaan porattuun reikään. [35]

Seuraavien injektointiaineiden toiminta perustuu fysikaaliseen ja kemialliseen reaktioon, jonka seurauksena huokosseinämät kapenevat ja muodostuvat vettä hylkiviksi [35][40]:

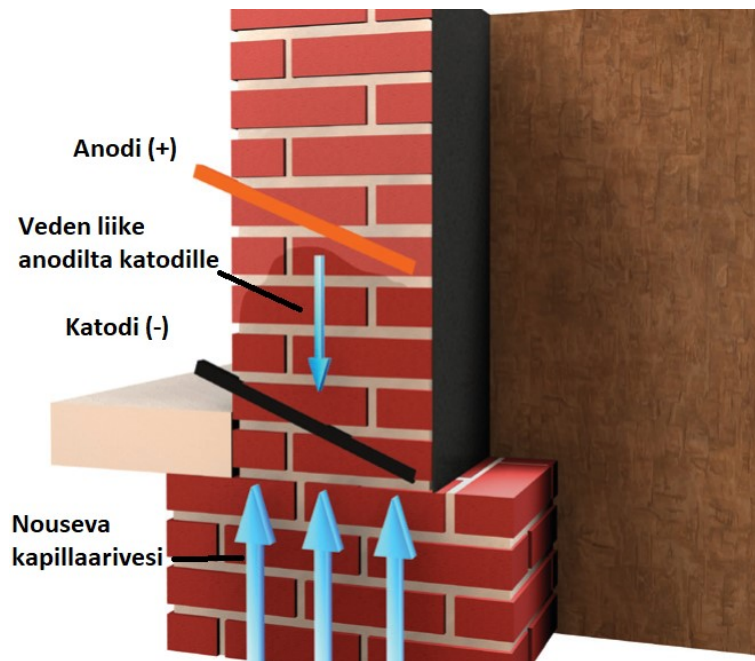
- Silikaattien ja silikonaattien yhdistelmätuotteet
- Osa orgaanisista hartseista

Yhdistelmätuotteiden toiminta perustuu yhteisvaikutukseen, jossa ensin silikaattien aikaansaama huokosten kaventuminen alentaa rakenteen kosteuspitoisuutta. Tämä mahdollistaa silikonaattien kemiallisen reaktion syntymisen, missä huokosten pinnat muuttuvat vettä hylkiviksi. [35]

4.4 Sähkökineettinen menetelmä

On jo kauan tiedostettu, että vettä ja muita sähköä johtavia nesteitä pystytään siirtämään sähköenergian avulla huokoisessa materiaalissa. Tämä perustuu potentiaalieroon, joka syntyy huokoisen materiaalin läpi kulkeutuvasta nesteestä. Kun rakenteeseen luodaan

tasavirtakenttä, jossa ylempänä rakenteessa on positiivisesti varautunut anodi ja alempana negatiivisesti varautunut katodi, siirtyy vesi rakenteessa negatiivisesti varautuneen katodin suuntaan kuvan 26 mukaisesti. [35][38]



Kuva 26. Tasavirtakentän aiheuttama kosteusvirran suunnanmuutos [38].

Tällaista sähkökentän aiheuttamaa veden siirtymistä kutsutaan myös elektro-osmoosiksi. Sen saavat aikaan sähköisessä kaksoiskerroksessa olevat ionit, jotka pyrkivät tasapainottamaan varauksen siirtymällä negatiivisesti varautuneen katodin suuntaan kuljettaen mukanaan vesimolekyylejä.

Elektro-osmoosi häiriintyy kuitenkin suuren suolapitoisuuden aikaansaaman, tasavirtakentän ulkopuolella olevan, huokosveden suuren sähkönjohtavuuden takia. Sähkövirta kulkee ensisijaisesti tämän huokosveden kautta ja elektro-osmoosin vaikutus jää vähäiseksi. Tämän takia elektro-osmoosi on merkittävä vain vähäisen suolapitoisuuden omaavissa rakenteissa, jolloin myös huokosveden sähkönjohtavuuden luova ionipitoisuus pysyy maltillisena. Kapillaarisen kosteusrintaman alentamisen lisäksi sähkökineettisillä menetelmillä voidaan pyrkiä vähentämään rakenteen haitallisen korkeaa kloridipitoisuutta ohjaamalla klorideja rakenteen pintaan sähkövirran avulla. [1]

Elektrolyyttien luomiseen käytetään ruostumattomia sähkönjohtimia, jotka on valmistettu metallipäällysteisistä titaniuntangoista, -teipeistä tai -hiloista. Elektrolyytti asennetaan noin 3 cm syvyiseen, rakenteeseen jyrskittyyn loveen ja täytetään elektrolyytin ja rakenteen väliin jäävät raot sähkönjohtavalla laastilla. Elektrolyytti suojataan mekaaniselta rasitukselta sähkönjohtavalla tasoitteella. Tasavirtakenttään luodaan vähintään 1,23 ja enintään 24 voltin jännite riittävän potentiaalieron luomiseksi. [35]

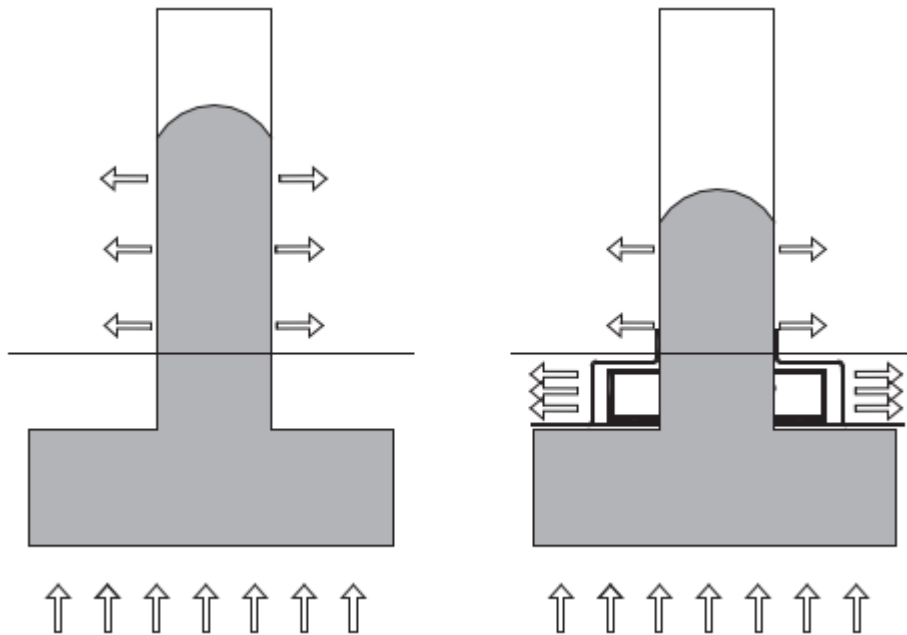
Rakenteessa olevat muut metalliosat aiheuttavat hajavirtaa ja hankaloittavat täten menetelmän toimivuutta. Jos metalliosia ei pystytä eristämään siten, että ne eivät aiheuta haittaa tasavirtakenttään, ei menetelmää voida käyttää. Tämän takia se on suunnattu muuratuille rakenteille eikä sitä voida hyödyntää teräsbetonirakenteissa. Sähkökineettistä menetelmää käytettäessä ei metalliosia saa kiinnittää rakenteeseen myöskään jälkikäteen. Rakenteen ionikonsentraatio tulee myös olla alhainen, jotta potentiaaliero pääsee muodostumaan. [35]

Kapillaarista kosteusrintamaa koskeva ongelma sähkökineettisessä menetelmässä muodostuu rakenteen kuivuessa. Märkä rakenne johtaa hyvin sähköä, mutta kuiva rakenne on sähkönjohtavuudeltaan heikko. Kun korkeammalla rakenteessa oleva anodi kuivuu, muuttuu sähkövirta liian heikoksi kyetäkseen painamaan kapillaarista kosteusrintamaa alaspäin. Tällöin rakenne pääsee jälleen kastumaan kohoavasta kapillaarikosteudesta, kunnes anodi on jälleen riittävän kostea voimakkaamman tasavirran muodostumiseksi. Tämä saa aikaan sen, että kapillaarinen kosteusrintama vaihtelee jatkuvasti ylemmän ja alemman elektrodin välillä ja tämän vaihtelun tasaamiseksi tulisi jännitystä säädellä jatkuvasti. [38]

Tasavirtakentän luomisen lisäksi kapillaarista kosteuden nousua pyritään estämään sähkömagneettista- tai radioteknologiaa hyödyntämällä. Näiden menetelmän periaatteena on vapauttaa kapillaariveden ja -huokosseinämän välillä vaikuttava sähköinen varaus lähettämällä heikkoa energiaa rakenteeseen. Vapautumisen jälkeen vesimolekyylit liikkuvat painovoiman suuntaan tai haihtuvat rakenteen pinnalta. Näillä menetelmillä ei kuitenkaan ole Saksassa rakennusteknillistä hyväksyntää ja virallinen taho on varoittanut niiden haittavaikutuksista. [35]

4.5 Seinän perustuksen tuuletus

Seinärakenteen perustuksien kohdalle on alettu myös asentamaan tuuletuskalustoa rajoittamaan seinässä tapahtuvaa kapillaarista kosteuden nousua. Tuuletus suoritetaan luonnollisella ilmanvaihdolla tai koneellisesti käyttäen ilmanvaihtolaatikoita tai -putkia siten, että perustuksen vierellä ohjataan kulkemaan rakennetta kuivattavaa ilmaa. [1] Periaatetta on havainnollistettu kuvassa 27, jossa vasemmalla näkyy kapillaarinen kosteusrintama ennen kuivatusta ja oikealla kosteusrintama aktiivisen kuivatuksen aikana.



Kuva 27. Periaatekuva seinän perustuksen kuivutuksesta [22].

Tuuletuksen vaikutus kapillaariseen kosteuden nousuun riippuu merkittävästi kuivatettavan rakenteen paksuudesta. Esimerkiksi kahden portugalilaisen teknillisen yliopiston [41] suorittaman tutkimuksen mukaan vaikutus 100 cm paksun seinän kapillaarisen nousukorkeuteen oli 49 % heikompi kuin vastaava tuuletus 20 cm paksulla seinällä.

Järjestelmää voidaan käyttää silloin, kun sen asennus tapahtuu pohjaveden pinnan yläpuolelle. Kuivatusjärjestelmässä mahdollisesti tapahtuvaa kondensaatiota pyritään hallitsemaan käyttämällä hygrosäädelyjä mekaanisia ilmanvaihtolaitteita, joiden asetukset estävät kyllästyskosteuspitoisuuden mahdollistavan ilman pääsyn kuivatusjärjestelmään. Järjestelmää käytettäessä tulee myös huomioida rakenteessa olevat suolat, jotka kulkeutuvat kuivumisen yhteydessä rakenteen pintaan ja kiteytyvät mahdollisesti rakenteen kuivumista haittaavaksi kerrokseksi [22]. Kuivatusjärjestelmiä testaavien tutkimusten tulokset ovat olleet lupaavia, mutta jatkotutkimusta vaaditaan esimerkiksi suojojen kiteytymisen vaurioittavuusasteen ja kapillaarisen kosteusrintaman laskun arvioimiseksi tarkemmin. [1]

4.6 Suoritetut tutkimukset

Kapillaarista kosteuden nousua on tutkittu jo 1970-luvulta lähtien monella eri tutkimusmenetelmällä, mutta niiden vertailu on haastavaa. Esimerkiksi kemiallisia injektointeja käsittelevissä tutkimuksissa on eroja käytettyjen koekappaleiden koossa, materiaa-

leissa, tutkituissa kosteus- ja suolapitoisuuksissa sekä tutkimustulosten arviointimenetelmissä. [1], [42] Seuraavissa alaluvuissa on käyty läpi tutkimuksia, joissa kemialliset kapillaarikatkoinjektiot ovat olleet mukana.

4.6.1 Eri menetelmien pitkäaikaisvaikutukset

Itävallassa 2007 julkaistussa tutkimuksessa vertailtiin eri jälkikäteen asennettavien kapillaarikatkomenetelmien toimivuutta korjauskohteilla suoritettujen tutkimusten perusteella. Objektiiivisuuden säilyttämiseksi tutkimukseen valittiin julkisia instituutiota ja hyväksytyjä tutkimusvälineistöjä ja rakentajia. Neljässä kymmenessä vuosina 1980–1997 korjatussa kohteessa suoritettiin kosteus- ja suolapitoisuuden mittauksia huomioiden rakenteiden historia ja korjaustyyppi. Kohteisiin oli suoritettu kapillaarista kosteudennousua estäviä korjauksia mekaanisilla menetelmillä, injektointimenetelmillä ja sähkökineettisillä menetelmillä. [43]

Tutkimustulosten perusteella näistä kolmesta menetelmästä kaikki korjauskohteet huomioituna tehokkain vaikutus saatiin aikaan mekaanisilla menetelmillä. Injektointimenetelmillä saavutettu vaikutus oli suhteellisen vähäinen ja sähkökineettisillä menetelmillä lähes olematon. Injektointi- ja sähkökineettisten menetelmien vaikutukset jäivät tutkimuksen mukaan siis kauas tyydyttävästä tasosta. Mekaanisten menetelmien tapauksessa tutkimustulosten perusteella yllättävän ongelmallisiksi osoittautuivat yksikerroksisten katkaisujen liitoskohdat varsinkin seinien nurkka-alueilla. [43]

4.6.2 Kosteuspitoisuuden vaikutus injektointiaineiden tehokkuuteen ja leviämiseen

Vuonna 2007 homogeeniselle muuratulle rakenteelle suoritettussa eri injektioaineiden toimivuutta ja leviämistä testaavassa tutkimuksessa Balak [44] toteaa, että rakenteen alhaisella kosteuspitoisuudella on yleisesti positiivinen vaikutus injektointiaineiden leviämiseen. Tutkimuksen mukaan injektoinnin tehokkuus osoittautui ongelmalliseksi rakenteen kosteuspitoisuuden ollessa 50 % ja tehottomaksi vaakasuuntaisen kapillaarikatkon luomiseen, kun kosteuspitoisuus oli 80 %. Tutkimuksen kolmesta eri testatusta rakenteen kosteuspitoisuudesta 20 % oli olosuhteiltaan tehokkain. Injektoinnin onnistumisen varmistamiseksi olisi siis tutkimuksen mukaan parasta alentaa rakenteen kosteuspitoisuus alle 20 % ja pitää kosteuspitoisuus alhaisena injektoinnin jälkeen käyttämällä lämmityssauva- tai mikroaaltotekniikka.

Tutkimuksessa suoritettiin kokeita sekä kohteella että laboratorioissa, jolloin pystyttiin tarkemmin tarkastelemaan aineiden vaikutusta ja leviämistä. Injektointeja suoritettiin sekä

paineellisena että paineettomasti. Mukana olleista Itävallassa yleisesti käytetyistä injektointiaineista kokeiden perusteella tehokkain leviäminen tapahtui silikonaatilla ja paras kosteudennousua estävä vaikutus oli paineettomasti injektoidulla alkalimetyylisilikonaatilla. Tutkimustulosten perusteella suositeltiin porareikien välisen etäisyyden kaventamista sekä injektointien suorittamista vähintään kahteen eri tasoon. [44]

4.6.3 Injektointiliuoksen ja kosteuspitoisuuden vaikutukset

Vuonna 2011 julkaistussa hollantilaisessa tutkimuksessa Lubelli et al. [45] toteaa, että suurin merkitys kemiallisen injektoinnin leviämisen ja tehokkuuden kannalta on injektointiliuoksella ja rakenteen kosteuspitoisuudella. Testatuista stearaatti-, siloksaani-, silikonaatti-, silaani- ja mikroemulsiot tuotteista tasaisimmin tiilessä levisivät silaani-/siloksaanituotteet ja ne myös vähensivät eniten kapillaariveden nousua rakenteessa.

Vesipohjaiset tuotteet kykenivät tutkimuksen mukaan tunkeutumaan painovoimaisesti myös vedellä täyttyneisiin huokosiin, kun taas orgaaniset liuotinpohjaiset tuotteet esim. isoparafiinit eivät kyenneet sekoittumaan veteen kyllästyneissä huokosissa. Tulosten pohjalta todettiin, että riittävän leviämisen aikaansaamiseksi vedellä kyllästyneissä rakenteissa orgaaniset liuotinpohjaiset tuotteet tulisi injektoida paineellisesti. Nestemäisillä tuotteilla todettiin olevan huomattavasti geelimäisiä tuotteita nopeampi imeytymisaika, koska geelimäisten tuotteiden tulee nesteytyä ennen kuin ne voivat imeytyä kapillaarisesti rakenteeseen.

Tutkimuksessa todettiin myös, että Hollannissa vuonna 2008 markkinoilla olleista tuotteista suurin osa oli toiminnaltaan vettä hylkiviä tai ne yhdistivät hylkivyyden ja huokosen täyttö ominaisuudet. Lisäksi suuri osa tuotteista oli vesipohjaisia, koska näiden katsottiin olevan orgaanisia liuotinpohjaisia tuotteita ympäristöystävällisempiä. [45]

4.6.4 Matalapaineinjektioinnit silaani-/siloksaanipohjaisilla tuotteilla

Italiassa vuosina 2015–2017 suoritetussa tutkimuksessa suoritettiin matalapaineinjektioinnit silaani-/siloksaanipohjaisilla tuotteilla sekä vanhaan tiiliseiniin että muurattuihin koekappaleisiin. Vanhaan tiilirakenteeseen suoritettujen injektointien vaikutukset tarkastettiin 13 ja 25 kuukauden kuluttua käsittelystä. Koekappaleet pidettiin 16 kuukautta alapäästään kastettuna suolaliuokseen, jossa oli 5 paino-% natriumkloridia (NaCl). Injektioinnit suoritettiin koekappaleisiin kolme kuukautta suolaliuokseen asettamisen jälkeen ja vaikutus tarkastettiin 6 ja 13 kuukauden kuluttua käsittelystä. [46][47]

Sekä vanhassa rakenteessa että uusissa koekappaleissa tehokkaimmaksi tuotteeksi osoittautui orgaaninen liuotinpohjainen silaani/siloksaani. Tutkimuksen perusteella liuotinpohjaiset aineet vaikuttivat siis vesipohjaisia tuotteita tehokkaammin matalapaineellisesti asennettuina. [46][47]

4.6.5 Injektointiaineiden pitkäaikaisvaikutukset

Pitkäaikaista vaikutusta käsittelevä tutkimus julkaistiin Italiassa vuonna 2005. Siinä paineellisesti ja painovoimaisesti asennettujen kemiallisten injektointiaineiden vaikutusta kapillaariseen kosteuden nousuun tutkittiin 12 vuoden aikana. Koetta varten rakennettiin kaksikymmentä seinää suuren suojan alle. Kahdeksan seinää tehtiin 25 cm paksuista savitiilistä ja kaksitoista seinää kevyistä kalkkipitoisista kivistä (tufa), jotka olivat joko 5 mm, 35 mm tai 25 mm paksuisia. Seinät rakennettiin rauta-altaisiin, joita täytettiin kahden viikon välein ominaisuuksiltaan alueen pohjavettä mukailevalla vedellä. [48]

Tutkimuksessa mukana olleista silaaneista, siloksaaneista, silikonaateista, silikaateista ja silikonaatti-silikaateista tehokkaimmiksi tuotteiksi pitkällä aikavälillä kummallakin asennusmenetelmällä osoittautuvat silaanit. Niillä käsiteltyjen seinien vedenimu oli vähäisintä ja vähiten riippuvaista vuodenajan mukaan vaihtelevista ympäristön olosuhteista. Silaanien lisäksi muista aineista pelkästään painovoimaisesti asennettu siloksaani osoittautui tehokkaaksi kapillaarikatkoksi usean vuoden aikavälillä. Tuotteiden vesi- tai liuotinpohjaisuudesta ei ollut raportissa mainintaa. [48]

4.6.6 Injektointiaineiden tehokkuus ja leviäminen nestemäisillä ja geelimäisillä aineilla

Hollannissa vuonna 2013 julkaistussa tutkimuksessa valmistettiin koekappaleita kalkkimenttilaastilla muuratuista savitiilistä. Koekappaleisiin injektointiin painovoimaisesti viisi eri nestemäistä ja kolme geelimäistä tuotetta siten, että myös muurauslaastin vaikutusta pystyttiin huomioimaan tuloksissa. [49]

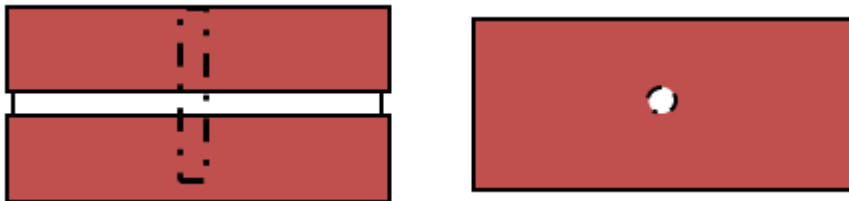
Nestemäisten tuotteiden injektointia varten porattiin tiilirakenteesta lieriönäytteitä siten, että lieriön keskelle jäi muuraussauma (kuva 28). Porattuihin koekappaleisiin imeytettiin vettä siihen asti, että niiden kosteuspitoisuus oli 50 % kyllästyskosteuspitoisuudesta. Halutun kosteuspitoisuuden saavuttamisen jälkeen aineet injektointiin painovoimaisesti toiseen tiilenkappaleeseen. 24 tunnin painovoimaisen injektoinnin jälkeen koekappaleiden annettiin kuivua kolme viikkoa huoneolosuhteissa. [49]



Kuva 28. Tiilirakenteesta porattu lieriönäyte, jossa on keskellä muuraussauma [49].

Kuivumisen jälkeen suoritetuissa vedenimeytyksissä havaittiin, että vesipohjaiset tuotteet vaikuttivat tiilessä kummallakin puolella muurauslaastia, mutta orgaanisen liuotinpohjaisen siloksaanin tapauksessa aineen leviäminen oli pysähtynyt muurauslaastin kohdalle. Tämän arvioitiin johtuneen siitä, että liuotinpohjainen tuote ei pystynyt tunkeutumaan tiheimmän huokosverkoston ja siten suuremman kosteuspitoisuuden omaavan muurauslaastin läpi kapillaaristen voimien avulla, koska muurauslaastin huokokset olivat vedellä kyllästyneitä. Vesipohjaiset tuotteet puolestaan pystyivät sekoittumaan huokosveden sekaan ja kulkeutumaan muurauslaastin läpi diffuusion vaikutuksesta. [49]

Geelimäisten tuotteiden injektointia varten koekappaleisiin tehtiin keskelle porareikä (kuva 29) ja ne pidettiin joko kuivana tai kyllästettiin täysin vedellä.



Kuva 29. Koekappale ja porareikä geelimäisten tuotteiden injektointia varten [49].

Injektoinnin jälkeen vedellä kyllästetyistä kappaleista osan annettiin kuivua ja osan kuivuminen estettiin. Aineiden annettiin imeytyä näissä olosuhteissa kolme kuukautta, jonka jälkeen koekappaleet kuivattiin ja niillä suoritettiin vedenimeytyskoe. Tuloksista huomattiin, että paras tehokkuus ja leviäminen saavutettiin vedellä kyllästetyissä kappaleissa, jotka pystyivät kuivumaan vapaasti injektoinnin jälkeen. Kuivissa koekappaleissa aineen vaikutus oli vähäisempää ja leviämien muutaman senttimetrin luokkaa. Koko imeytymi-

sen ajan täysin kyllästyneenä pidetyissä kappaleissa vaikutus oli lähes olematonta verrattuna käsittelemättömän kappaleen tuloksiin ja aineen asennusta varten poratussa reiässä oli edelleen havaittavissa geelimäistä tuotetta. [49]

Geelin aktiiviset osat voivat reagoida halutulla tavalla vain silloin, kun geelin emulgaattorin misellit hajoavat ja tuotteesta tulee nestemäistä. Tutkimuksen mukaan näin ei tapahdu veden ollessa läsnä, jolloin aine ei pääse leviämään. Kun kyllästynyt koekappale alkoi kuivumaan, aineen emulgaattori hajosi ja aine alkoi levitä kuivuvan veden mukana rakenteeseen. Kuivassa koekappaleessa aineen leviämisen katsottiin tapahtuvan vain kapillaaristen voimien vaikutuksesta, minkä ei katsottu aineen vähäisen määrän takia olevan yhtä tehokas leviämistapa kuin kuivuvan veden mukana tapahtuvan leviämisen. [49]

Kokeessa käytetyistä geelimäisesti silaani- ja oligomeerisistä siloksaanipohjaisista tuotteista parhaimman leviämisen kuivuvassa rakenteessa sai aikaan silaanipohjainen tuote. Tuotteen suurella vesipitoisuudella arvellaan olleen positiivinen vaikutus verrattuna muihin geelimäisiin tuotteisiin. [49]

4.6.7 Freeztec DPC:n toimivuus kevytbetoniharkoissa

Slovakiassa vuonna 2014 julkaistussa Struhárován [50] tutkimuksessa tarkasteltiin Freeztec DPC (ks. alaluku 5.3) järjestelmällä toteutetun kapillaarikatkon vaikutusta kolmen eri höyrykarkaistusta kevytbetoniharkoista ("siporex") tehdyn seinän kapillaariseen kosteudennousuun. Kaksi harkkotyypeistä oli lentotuhkapohjaisia ja yksi tyyppi oli hiekkapohjainen. Käsiteltyjen seinien tuloksia verrattiin samasta materiaalista valmistettujen vertailuseinien tuloksiin.

Tutkimuksen mukaan parhaat tulokset Freeztec DPC:lla käsiteltynä saatiin, kun kevytbetonissa käytettiin pohjamateriaalina hiekkaa. Huonoin tulos saatiin lentotuhkapohjaisessa muurauksessa, jonka kevytbetonissa oli suurin huokoisuus eli eniten kapillaarihuokosia ja karkein pintarakenne. Hiekkapohjaisessa harkkomuurauksessa kosteudennousu saatiin kokonaan pysäytettyä, mutta myös muissa rakenteissa havaittiin injektointiaineen vaikutus. Tutkimuksen tuloksena pystyttiin toteamaan Freeztec DPC:n toimivan kapillaarisen kosteudennousun estävänä kerroksena sitä paremmin, mitä pienempi huokoisuus ja tasaisempi laatu rakenteella on. [50]

5. SUOMESSA KÄYTETYT INJEKTOINTITUOTTEET

Suomen markkinoilla esiintyy kapillaarikatkon injektointituotteita, jotka on tarkoitettu käytettäväksi tuotetietojen mukaan joko pelkästään muuratuissa rakenteissa, sekä muuratuissa- että betonirakenteissa ja pelkästään betonirakenteissa. Tässä luvussa on esitetty saatavilla olevia tietoja näiden tuotteiden ominaisuuksista ja asennustavoista. Niiden toimintaperiaatteet pohjautuvat alaluvun 4.3 sisällön mukaisesti huokosen täyttämiseen, kaventamiseen tai muuttamiseen vettä hylkiväksi. Suuri osa tuotteista vaikuttaisi tulevan Suomeen Keski-Euroopasta ja erityisesti Saksasta.

5.1 Geelimäiset tuotteet

Suomessa esiintyviä geelimäisen koostumuksen omaavia tuotteita ja niiden ominaisuuksia on listattu taulukossa 4 saatavilla olevien teknisten tietojen perusteella [51]–[55].

Taulukko 4. Geelimäisen koostumuksen omaavien injektointituotteiden tekniset tiedot.

Tuote	Tuotepohja	Asennus	Vaikutus	Käyttökohde
Weber.tec 946	Silaani	Paineeton /matalapaineellinen	Vettä hylkivä	Muuratut
Vandex IC	Silaani/siloksaani mikroemulsio	Paineeton	Vettä hylkivä	Muuratut, betoni
Aquastop	Silaani	Paineeton	Vettä hylkivä	Muuratut
PC®Aquadry Gel	Silaani/siloksaani	Paineeton	Vettä hylkivä	Muuratut, betoni
KÖSTER Crisin Cream	Harts/silaani	Paineeton	Vettä hylkivä	Muuratut

Taulukossa 4 esitetyt tuotteet ovat teknisten tietojen perusteella ominaisuuksiltaan hyvin yhteneviä. Niitä yhdistää esimerkiksi vaikutusmekanismi, liuotteettomuus ja silaani/siloksaani tuotepohja sekä vesiohenteisuus. Kaikki tuotteet asennetaan vaakasuuntaiseen porareikään pääasiallisesti paineettomalla asennusmenetelmällä käyttäen massapuristinta. Injektointiaineella täytettävän porareian halkaisijan vaatimus vaihtelee tuotteesta riippuen 12–16 mm välillä ja reikien keskinäinen etäisyys 80–120 mm välillä. Betonirakennetta injektoitaessa tulee porareikien väli olla muurattujen rakenteiden porareikien väliä tiheämpi. Porareian syvyyden tulee tuotteesta riippuen olla 2–5 cm koko seinän paksuutta lyhyempi, jotta aine vaikuttaa koko poikkileikkauksessa. Tuotteille suoritettujen sertifikaattitutkimusten perusteella niiden on yleisesti todettu toimivan rakenteen ollessa korkeassa (RH 95 %) kosteuspitoisuudessa.

5.2 Nestemäiset tuotteet

Suomessa esiintyviä nestemäisen koostumuksen omaavia tuotteita ja niiden ominaisuuksia on listattu taulukossa 5 saatavilla olevien teknisten tietojen perusteella [56]–[58].

Taulukko 5. Nestemäisen koostumuksen omaavien injektointituotteiden tekniset tiedot.

Tuote	Tuotepohja	Asennus	Vaikutus	Käyttökohde
Weber.tec 940E	Vesiohenteinen sili-konimikroemulsio	Matalapaineellinen	Vettä hylkivä	Muuratut
KÖSTER Crisin 76 Concentrate	Liuotteeton synteettinen hartsi	Paineeton	Supistava /vettä hylkivä	Muuratut, betoni
Isophob-K	Polymeeri liuotettu parafiiniöljyyn	Paineeton/matalapaineellinen	Vettä hylkivä	Muuratut, betoni

Taulukossa 5 esitetyt tuotteet ovat tuotevalmistajien mukaan liuottimia sisältämättömiä ja vettä matalamman viskositeetin omaavia. Niiden asennus tapahtuu alaviistoon porattuihin porareikiin, joiden halkaisijat ovat tuotteesta riippuen 12–18 mm välillä ja keskinäisen etäisyydet 100–250 mm välillä. Tuotevalmistajien antamien tietojen mukaan aineet toimivat tehokkaana kapillaarikatkona myös hyvin kosteissa rakenteissa, joissa seinärakenteen suhteellinen kosteus on \geq RH 95 %. Weber.tec 940E:ä käytettäessä on kuitenkin suositeltu, että rakenteen suhteellinen kosteus on injektointia aloitettaessa alle RH 95 % [59].

5.3 Kiinteät tuotteet

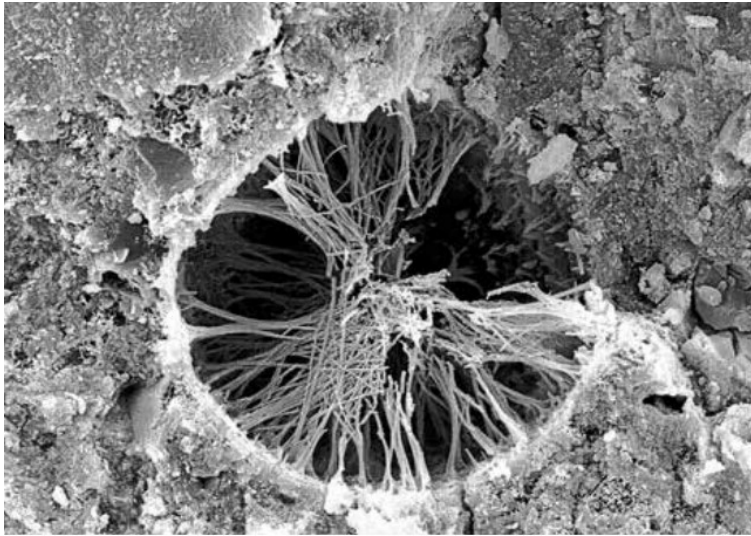
Suomessa esiintyviä kiinteän koostumuksen omaavia tuotteita ja niiden ominaisuuksia on listattu taulukossa 6 saatavilla olevien teknisten tietojen perusteella [50], [60], [61].

Taulukko 6. Kiinteän koostumuksen omaavien injektointituotteiden tekniset tiedot.

Tuote	Tuotepohja	Asennus	Vaikutus	Käyttökohde
Freeztec DPC	Natrium metyyliisilikonaatti	Paineeton	Vettä hylkivä	Muuratut
Xypex Concentrate	Aktiiviset kemikaalit, Portland sementti, hienojakoinen hiekka	Paineeton	Tukkiva	Betoni
Vandex VIM	Aktiiviset kemikaalit, Portland sementti, kvartsihiekka	Paineeton	Tukkiva	Muuratut

Freeztec DPC järjestelmässä käytetään jäädytettyä vettä ja natrium metyyliisilikonaatin ($\text{CH}_5\text{NaO}_3\text{Si}$) liuosta sisältäviä puikkoja, joiden pituus on 210 mm ja halkaisija 20 mm. Puikot asennetaan muurauslaastin kohdalle porattuihin halkaisijaltaan 22 mm reikiin, joista aine leviää sulaessaan muuraukseen. Puikkojen imeytys tulee suorittaa neljä kertaa 12 tunnin sisällä, jolloin rakenne ei pääse imeytyksien välissä kuivumaan. [50], [62]

Xypex Concentrate sekoitetaan veden kanssa juoksevaksi ennen asennusta tuotevalmistajan ohjeen mukaan. Kemiallisessa reaktiossa seoksen aktiiviset kemikaalit imeytyvät rakenteeseen ja reagoivat kosteuden sekä sementin hydrataatiossa muodostuneiden sivutuotteiden (kalsiumhydroksidi, mineraalisuolat, mineraalioksidit, hydratoitumattomat ja osin hydratoituneet sementin osat) kanssa aiheuttaen katalyyttisen reaktion. Sen tuloksena betoniin muodostuu veteen sekoittumaton kiderakenne (kuva 30), joka täyttää rakenteen huokokset, halkeamat ja muut tyhjiöt eli toimii fysikaalisena esteenä veden kulkeutumiselle rakenteessa. [63]



Kuva 30. Xypex Concentrate:n muodostama kiderakenne betonissa pyyhkäisyelektronimikroskoopilla kuvattuna 500 kertaisena suurennoksena [63].

Xypex voidaan asentaa joko porakatkona tai sivelykäsittelyinä:

- Porakatko asennetaan vinoon porattuun halkaisijaltaan 22–25 mm reikään, jonka syvyys ulottuu n. 20 mm päähän rakenteen toisen puolen pystypinnasta.
- Sively asennetaan rakenteen pinnalle sivelemällä tai ruiskuttamalla siten, että käsittelyn paksuus on hieman alle 1,25 mm. Sivelykäsittely vaatii asennusolosuhteista riippuvaa jälkihoitoa tuotevalmistajan ohjeistuksen mukaan. [60]

Asennettava alusta tulee kostuttaa vedellä mieluiten jo asennusta edeltävänä päivänä, koska reaktion toiminta vaatii rakenteessa olevaa vettä. [64]

Vandex VIM on myös veteen sekoitettava sementtipohjainen tuote. Aineen toiminta perustuu reaktioon, jossa sen aktiiviset kemikaalit reagoivat rakenteessa olevien suolojen ja kosteuden kanssa muodostaen huokosia tukkivia kiteitä. Se asennetaan suppilolla varustetulla putkella tai laastipumpulla noin 30 asteen kulmaan porattuun porareikään, joka ulottuu vähintään 5 cm päähän rakenteen vastakkaisesta pinnasta. [61]

6. LABORATORIOTUTKIMUS JA TEHDYT HA-VAINNOT

Injektointiaineiden toiminnan selventämiseksi suoritettiin kirjallisen tutkimuksen lisäksi laboratoriokoe, jossa tutkittiin viiden eri Suomessa käytössä olevan injektointiaineen vaikutusta kahden eri betonilaadun vedenimukykyyn. Samalla saatiin parempi käsitys aineiden toimivuudesta betonissa, kun aineiden pääpaino on ulkomaisten lähteiden mukaan selkeästi muuratuissa rakenteissa.

6.1 Koekappaleet

Laboratoriotutkimukset suoritettiin itsevalmistetuille korkean vesi-sementtisuhteen betonikappaleille. Betonivaluissa tähdättiin vesi-sementtisuhteiden 0,7 ja 0,8 saavuttamiseen, jolloin kaikille koekappaleille muodostuisi saatavilla olevan tutkimustiedon mukaan yhtenäinen kapillaariverkosto [3, s. 275], [13, s. 83].

Kokeella pyrittiin toteamaan eri kapillaarisen vedennousun katkaisevien injektointituotteiden käyttäytymistä ja leviämistä kahdella eri vesi-sementtisuhteella valmistetulla betonilaadulla. Eri vesi-sementtisuhteista johtuu myös koekappaleiden eroavaisuudet

- lujuudessa
- huokosrakenteessa
- yhtenäisen kapillaariverkoston muodostumisessa.

Pienemmän vesi-sementtisuhteen betoni valmistettiin Swerockin betoniasemalla valmistetusta C25/30 lujuuden betonista, jonka vesi-sementtisuhteeksi saatiin betoniasemalla kuivatusmenetelmällä määritettäessä 0,63. Koekappaleiden tiivistys suoritettiin sauvatäryttimellä. Korkean vesi-sementtisuhteen 0,8 betoni valmistettiin diplomityön tekijän toimesta kuivabetonista betonisekoittajalla sekoittamalla ja käsin tiivistämällä.

6.1.1 Koko ja määrä

Koekappaleet valettiin 300 mm korkeaan ja ulkohalkaisijaltaan 110 mm leveään PVC-viemäriputkeen, joka oli tulpattu alapäästään vanerilla (kuva 31). Vanerin päälle muotin pohjalle asennettiin muovi vaneriin imeytyvän kosteuden minimoimiseksi. Viemäriputken seinämän paksuus on 3,4 mm, joten koekappaleiden halkaisijaksi tuli 103,6 mm. Kappaleiden kovettumisen seurauksena eri vesi-sementtisuhteisissa koekappaleissa tapahtui

eri suuruinen kutistuminen, joten muottien purkamisen jälkeen kappaleet sahattiin saman pituisiksi. 0,8 vesi-sementtisuhteen kappaleiden kutistuma oli pituussuunnassa noin 20–30 mm. Tämän jälkeen koekappaleiden pituudeksi muodostui n. 270 mm.



Kuva 31. *Betoni-asemalla valmisbetonista valetut koekappaleet muoteissa.*

Kappaleita valettiin yhteensä 24 eli 12 kappaletta yhtä betonilaatua kohden (kuva 31). Kokeessa käytettäviä injektointituotteita oli viisi eli injektointi voitiin suorittaa yhdellä tuotteella kahteen saman vesi-sementtisuhteen omaavaan kappaleeseen, jolloin saatiin rinnakkaisia tuloksia verrattaviksi. Yksi koekappaleista yhtä betonilaatua kohden jätettiin käsittelemättä verrattavaksi käsiteltyjen koekappaleiden tuloksiin.

Lisäksi jäi yksi varakappale yhtä betonilaatua kohden. Näille kahdelle koekappaleelle päätettiin suorittaa sementtipohjainen injektointi ja upottaa kappaleet imeytymisen ajaksi veteen, jolloin pystyttiin tarkastelemaan myös imeytymisolosuhteiden vaikutusta aineen tehokkuuteen ja leviämiseen.

6.1.2 Jälkihoito

Tuominen toteaa diplomityössään [11, s. 133], että betonin jälkihoidolla on merkittävä vaikutus kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen ja veden imeytymiskertoimeen. Lyhyellä jälkihoitoajalla nämä arvot voivat olla kaksinkertaiset verrattuna normaalilla jälkihoidolla saataviin arvoihin. Myös koekappaleen muodon on huomattu vaikuttavan kapillaarisia ominaisuuksia määrittävän tutkimuksen tuloksiin. Koekappaleiden jälkihoidosta

huolehdittiin suojaamalla muottien yläpäästä muovilla ja riittävästä kovettumisajasta huolehdittiin pitämällä kappaleet muotissa injektointiajakohtaan asti eli kuukauden päähän valmistuksesta.

6.1.3 Koekappaleiden käsittely

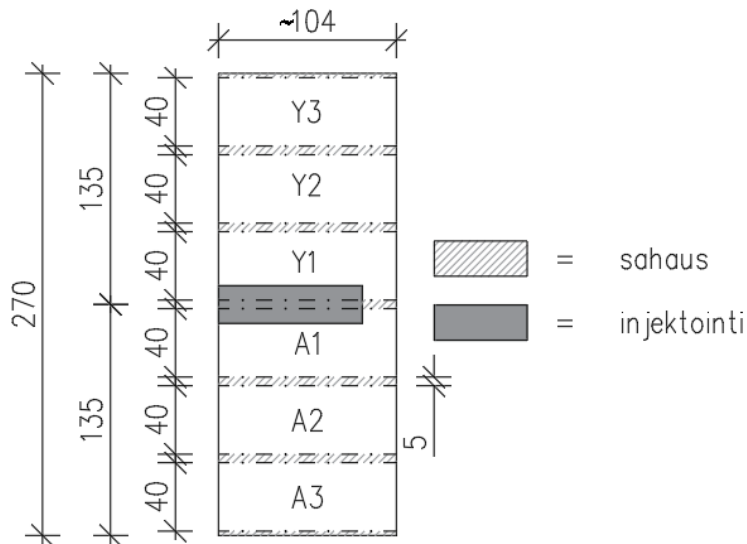
Tutkimuksessa käytettiin viittä eri paineettomalla injektointimenetelmällä asennettavaa tuotetta. Injektointi suoritettiin kullakin tuotteella vaakasuoraan märän kappaleen keskelle. Tuotteet ja niiden edellyttämät porareian halkaisijat ja pituudet sekä tuotevalmistajien ohjeelliset menekit 100 mm paksulle betonirakenteelle on kirjattu taulukossa 7. Tuotteet löytyvät myös luvun 5 taulukoista.

Taulukko 7. Injektointituotteet ja niiden asennusohjeistus.

Tuote	Koostumus	Porareian halkaisija	Porareian pituus	Menekki 100 mm rakenteelle
Vandex IC	Geelimäinen	12 mm	80 mm	n. 140 ml/m
Aquastop	Geelimäinen	12 mm	80 mm	n. 120 ml/m
Xypex Concentrate	Kiinteä	22 mm	80 mm	n. 750 g/m
Isophob-K	Nestemäinen	12 mm	60 mm	n. 850 ml/m
Köster Crisin 76 Concentrate	Nestemäinen	14 mm	50 mm	n. 400 ml/m

Taulukossa 7 esitettyjen tuotenimien ensimmäistä kirjainta on käytetty tuotetunnuksena tutkimuksen raportoinnissa.

Kun käsittelyt oli suoritettu tuotevalmistajien ohjeiden mukaisesti, aineiden annettiin vaikuttaa viiden viikon ajan. Tähän aikaan sisältyi viikko rakenteeseen imeytymiselle ja neljä viikkoa rakenteessa leviämiselle. Tilassa, jossa koekappaleet olivat injektointiaineiden imeytymisen ja tutkimuksen aikana, mitattiin ilman olosuhteiksi lämpötila 21,7 °C ja suhteellinen kosteus RH 35,40 %. Lisäksi kaksi varakappaleiksi tarkoitettua Xypex Concentrate-käsiteltyä kappaletta pidettiin aineen imeytymisen ajan eli viisi viikkoa veteen upotettuna. Tämän jälkeen koekappaleet sahattiin kuvan 32 mukaisiin osiin.



Kuva 32. Sahattujen koekappaleen osien mitat, sahauskohdat ja nimeäminen.

Sahausten tuloksena yhdestä koekappaleesta tuli 6 osaa, joista keskenään vertailukelpoisia olivat tietyltä etäisyydeltä injektointikohdasta sahatut osat. Kuvassa 32 nimettyjen koekappaleiden osista siis keskenään rinnakkaisia ovat samalla numerolla merkityt kappaleet. Kirjaintunnuksella Y tarkoitetaan kappaleita injektointikohdan yläpuolelta ja tunnuksesta A tarkoitetaan kappaleita injektointikohdan alapuolelta. Sahaus suoritettiin kuvassa 33 näkyvällä timanttisahalla runsaalla vedensyötöllä. Timanttisahan laikan paksaus oli noin 5 mm.



Kuva 33. Timanttisaha ja sahattu koekappale.



Kuva 34. Koekappale sahattuna kuuteen osaan.

Sahattut kappaleet olivat kuvan 34 tapaan paksuudeltaan noin 40 mm. Myös käsittelemättömille kappaleille suoritettiin samat sahauskset, jotta saatiin tilavuudeltaan yhtenevät

vertaiskappaleet. Alla on esitetty kuva koekappaleen poikkileikkauksesta jokaisen tutkimuksessa käytetyn tuotteen injektoinnin kohdalta.



Kuva 35. Vandex IC:n injektointikohta viiden viikon imeytymisen jälkeen.



Kuva 36. Aquastop:n injektointikohta viiden viikon imeytymisen jälkeen.



Kuva 37. Xypex Concentrate:n injektointikohta viiden viikon imeytymisen jälkeen.



Kuva 38. Isophob-K:n injektointikohta viiden viikon imeytymisen jälkeen.



Kuva 39. Köster Crisin 76 Concentrate:n injektointikohta viiden viikon imeytymisen jälkeen.

Geelimäisistä tuotteista Aquastop:n juoksevampi koostumus Vandex IC:n koostumukseen verrattuna on nähtävissä myös kuvista 35 ja 36. Aquastop on nesteytynyt imeytymisajan kuluessa, mutta Vandex IC:n injektoinnista oli vielä jäänyt näkyviä jäännöksiä porareikään. Kuvassa 37 pystytään porareiästä selkeästi erottamaan kovettunut sementtipohjainen Xypex Concentrate. Nestemäisistä tuotteista (kuva 38 ja kuva 39) ei porareikiin jäänyt silmällä havaittavia jäännöksiä. Kappaleissa tapahtuneita kemiallisia reaktioita ei pystytty poikkileikkauksista aistinvaraisesti havaitsemaan.

6.2 Vedenimeytyskokeen suorittaminen

Laboratoriotutkimuksessa sovellettiin standardin SFS-EN 772-11 ”Muurauskappaleiden testimenetelmiä. Osa 11: betoniharkkojen, höyrykarkaistujen kevytbetoniharkkojen sekä keinokivi- ja luonnonkivimuurauskappaleiden kapillaarisen vedenimukyvyn ja poltettujen tiilien vedenalkuimunopeuden määrittäminen” ohjeistusta vedenimukertoimen määrittämiselle sekä standardin SFS-EN ISO 15148 ”Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water absorption coefficient by partial immersion” ohjeistusta vedenimukertoimen määrittämiselle. Tämä standardi on määritetty tilanteeseen, jossa materiaaliin kohdistuu hetkellisesti suuri kosteusrasitus [65]. Koska tutkimukseen käytettävä aika oli rajallinen, päädyttiin käyttämään tätä standardia pidempiaikaista suurta kosteusrasitusta käsittelevien standardien sijasta.

Viiden viikon aineiden imeytymisajan ja sahauksien jälkeen kappaleet kuivattiin tuuletetavassa lämpökaapissa lämpötilassa $105 \pm 5 \text{ °C}$ kappaleen vakiomassaan $m_{dry,s}$ [66].



Kuva 40. Koekappaleista sahattujen kappaleiden kuivaus tuuletetussa lämpökaapissa.

Tavanomaiseksi betonin käyttöalueen korkeimmaksi lämpötilaksi on määritelty +200 °C. Tätä alhaisemmissa lämpötiloissa betonissa ei ilmene merkittävää ominaisuuksien heikkenemistä. [13, s. 120]

Kappaleet poistettiin lämpökaapista jäähtymään noin 2,5 tuntia ennen imeytyksen aloittamista. Ennen imeyttämisen aloitusta punnittiin kappaleiden kuivapainot. Kuivatuksen ja kuivapainon punnitsemisen välissä kappaleista poistettiin porareikiin jääneet injektointiaineet, etteivät ne aiheuttaneet virhettä tutkimustuloksiin.

Kuivauksen ja kuivapainon punnituksen jälkeen kappaleet upotettiin veteen 5 ± 2 mm syvyydelle kuvan 41 mukaisen nystyräisen kumiritilän päälle. Sen tarkoitus oli pitää kappaleet irti imeytysastian pohjasta siten, että mahdollisimman suuri osa kappaleen pohjan pinta-alasta olisi veden kanssa kosketuksissa. Veden pinnan korkeutta seurattiin säännöllisesti ja vettä lisättiin tarvittaessa. Öiden ajaksi koeastiat suojattiin muovilla veden haihtumisen minimoimiseksi.



Kuva 41. Nystyräinen kumiritilä asetettiin imeytysastian pohjalle pitämään kappaleet irti astian pohjasta.

Yhteensä 144 kappaletta jaettiin imeytystä varten kahteen erään siten, että tutkittiin 72:ta kappaletta kerrallaan viidessä imeytysastiassa, jolloin yhteen astiaan tuli 12 kappaletta (kuva 42). Imeytysastioiden vedet vaihdettiin ensimmäisen ja toisen erän imeytyksien välissä.

Standardissa SFS-EN ISO 15148 ehdotettujen punnitusaikojen ja imeytyspaikan normaaleihin työskentelytunteihin rajoittuneiden ajankäyttömahdollisuuksien pohjalta valittiin punnitukset suoritettavaksi 1, 2, 4, 6 ja 23,5 h kuluttua imeytyksen aloittamisesta [65].

Koska yhden kappaleen kuivaamiseen, punnitsemiseen ja takaisin asettamiseen tuli varata aikaa 30 sekuntia, aloitettiin kappaleiden imeytykset 30 sekunnin aikaväleillä. Tällöin kappaleet saatiin punnittua tarkasti halutulla imeytymisajalla ja kappaleet olivat SFS-EN ISO 15148 määritelmän mukaisesti alle minuutin ilman vesikosketusta. Koska punnitsemiseen käytettiin vain yhtä vaakaa (kuva 43) punnitusten vertailtavuuden säilyttämiseksi, olisi koekappaleita pystytty punnitsemaan aikaisintaan 36 minuuttia kappaleen imeytyksen aloittamisesta.



Kuva 42. Yhdessä astiassa imeytettiin 12 kappaletta.

Määritetyn ajan kuluttua kappale poistettiin vedestä ja imeytymätön vesi pyyhittiin kappaleen märiltä pinnoilta kostealla sienellä. Tämän jälkeen kappaleen paino punnittiin 0,01 g tarkkuudella, jolloin saatiin paino veden imeytymisen jälkeen $m_{s0,s}$.



Kuva 43. Kappaleiden punnitusvaaka.

Punnitukset pyrittiin suorittamaan kello 8–17 välisenä aikana, minkä takia viimeisin punnitus suoritettiin standardin SFS-EN ISO 15148 määrittelemän 24 tunnin imeytyksen sijaan 23,5 tunnin kohdalla.

6.3 Koekappaleiden kosteusolosuhteet

Injektointiolosuhte määritettiin vertailukappaleiden keskeltä porareikämittauksella siten, että kappaleet olivat muotissa ylä- ja alapäästä muovilla peitettyinä (kuva 44).



Kuva 44. Koekappaleiden porareikiin asennetut mittapäät.

Olosuhdemittauksen tulokset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Injektointiolosuhteet porareikämittauksien perusteella.

Kohde	Lämpötila	Suhteellinen kos- teus RH	Absoluuttinen kosteus
Sisäilma	18,28 °C	15,62 %	5,49 [g/m ³]
v/s 0,63	17,77 °C	95,29 %	14,48 [g/m ³]
v/s 0,8	17,99 °C	96,70 %	14,89 [g/m ³]

Olosuhdemittausten suorittamiseen jälkeen Rakennustieto RTS julkaisi uuden ohjekortin betonin suhteellisen kosteuden mittaamiselle [67], jonka mukaan mittapäiden tasaantumisaajan tulisi olla vähintään 1 tunti totuudenmukaisen mittaustuloksen saamiseksi. Mittaushetkellä hallussa olleen tiedon mukaan mittapään annettiin tasaantua noin 45 minuuttia, joten todelliset kosteusolosuhteet saattoivat olla mittaushetkellä taulukon 8 arvoja suurempia.

Kuudelle kappaleelle kuivatuksen seurantamittauksessa määritettyjen märkäpainojen ja vakiopainojen perusteella määritettiin kappaleiden keskiarvollinen kosteuspitoisuus painoprosentteina ennen koneellisen kuivatuksen aloittamista. Tulokseksi saatiin noin 6 paino-%, kun laskennassa käytettiin kaavaa:

$$paino - \% = 100\% * \frac{m_{wet} - m_{dry,s}}{m_{dry,s}}, \quad (6.1)$$

missä m_{wet} [g] on kappaleen paino märkänä ennen kuivatuksen aloittamista ja $m_{dry,s}$ [g] on kappaleen vakiopaino kuivatuksen lopussa [47]. Kosteuspitoisuus oli luonnollisesti suurempi injektoinnin jälkeen veteen upotetuista koekappaleista sahatuilla kappaleilla, joilla ei ollut mahdollisuutta kuivua huoneilmaan ennen kuivaamista.

Samojen kappaleiden punnitustulosten perusteella vesihöyryä siirtyi diffuusiolla ilmasta kappaleisiin kuivatuksen ja imeytyksen aloituksen välissä keskiarvollisesti noin 300 mg.

6.4 Testitulokset

Testitulokset taulukoitiin punnituksen yhteydessä kokeen aikana. Tulosten havainnollistamiseksi esitettiin veden imeytymisestä johtunut kappaleiden painonnousu taulukoinnin lisäksi kuvaajien avulla. Kuvaajat muodostettiin kappaleiden keskiarvollisesta painonnoususta ajan neliöjuuren funktiona. Keskiarvotulokset laskettiin samalta etäisyydeltä in-

jektointikohdan ylä- tai alapuolelta sahattujen rinnakkaisten kappaleiden tuloksista. Käsiteltyjen kappaleiden keskiarvotulosten kuvaajat sijoitettiin samaan käyrästöön vertailukappaleiden kuvaajien kanssa siten, että samassa käyrästössä esitettiin injektointikohdalta sahattujen kappaleiden (Y1 ja A1) ja noin 40 mm etäisyydeltä sahattujen kappaleiden (Y2 ja A2) kuvaajat. Noin 80 mm päästä injektointikohdasta sahattujen kappaleiden kuvaajia ei käsiteltyille kappaleille muodostettu, koska aineiden tehokas leviäminen käy tutkimustuloksista ilmi jo kahden lähimmän etäisyyden kappaleista.

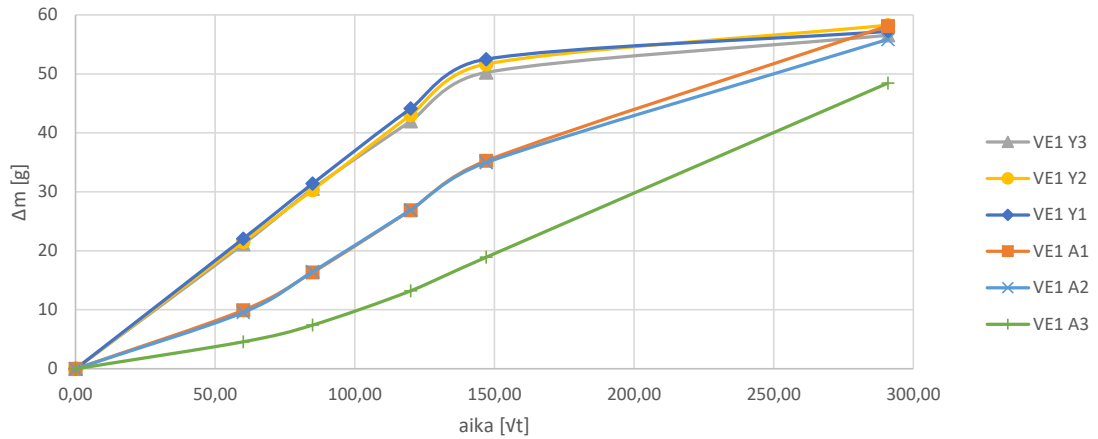
6.4.1 Vertailukappaleet

Taulukossa 9 on esitetty grammoina kappaleiden painonnousu jokaiselta punnitussajakohdalta. Kappaleet on merkitty kuvan 32 mukaisesti. V/s 0,63 vertailukappale on nimetty tunnuksella VE1 ja v/s 0,8 vertailukappale tunnuksella VE2.

Taulukko 9. Vertailukappaleiden painonnousu kokeen aikana.

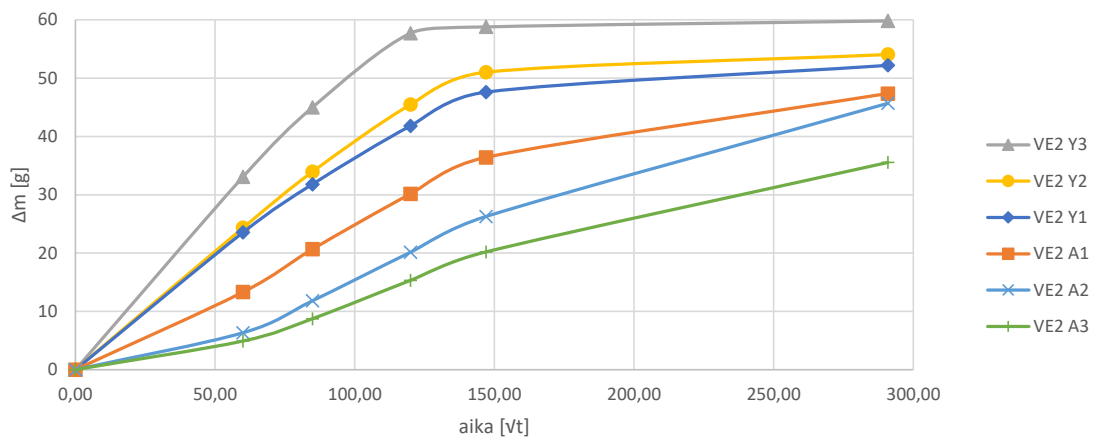
Vertailu	1 h [g]	2 h [g]	4 h [g]	6 h [g]	23,5 h [g]
VE1 Y3	21,14	30,53	41,99	50,26	56,57
VE1 Y2	21,53	30,29	43,03	51,66	58,26
VE1 Y1	22,07	31,4	44,13	52,5	57,21
VE1 A1	9,93	16,35	26,89	35,26	58,11
VE1 A2	9,56	16,46	26,94	34,96	55,84
VE1 A3	4,59	7,42	13,23	18,91	48,43
VE2 Y3	33,09	45	57,73	58,8	59,82
VE2 Y2	24,34	33,95	45,49	51,03	54,07
VE2 Y1	23,55	31,81	41,83	47,61	52,2
VE2 A1	13,31	20,66	30,15	36,41	47,36
VE2 A2	6,33	11,81	20,16	26,28	45,7
VE2 A3	4,91	8,74	15,33	20,21	35,56

Kun tulokset syötettiin painonnousun (Δm) kuvaajaan ajan neliöjuuren funktiona, saatiin vertailukappaleille muodostettua kuvan 45 ja 46 mukaiset kuvaajat.



Kuva 45. *V/s 0,63 vertailukappaleen painonnousukuvaajat ajan neliöjuuren funktiona.*

Kuvan 45 kuvaajista on erotettavissa vertailukappaleen olevan sitä hitaammin vettä imevä, mitä lähemmäksi koekappaleen pohjaa sahauspinta sijoittuu. Injektointikohdan yläpuolisten kappaleiden huomataan saavuttaneen kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden jo kuuden ensimmäisen tunnin kohdalla imeytyksen aloittamisesta. Alin kappale A3 ei puolestaan kuvaajan perusteella saavuttanut kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta kokeen aikana.



Kuva 46. *V/s 0,8 vertailukappaleen painonnousukuvaajat ajan neliöjuuren funktiona.*

Kuvan 46 kuvaajista on erotettavissa vielä selvemmin myös kuvassa 45 havaittu sahauksen sijainnin vaikutus vedenimukykyyn. Trendiä selittää tiiviimpi rakenne koekappaleen alapäässä sinne pakkautuneen kiviaineksen vaikutuksesta, kun vettä painavammat kiviaines ja sementti painuivat muotissa pohjalle ennen betonin kovettumista. Tämän seurauksena myös kapillaarihuokosten määrä oli pienempi koekappaleen alaosissa. [13, s. 76, 86]

Kuvan 46 mukaan v/s 0,8 vertailukappaleen ylin kappale Y3 saavutti kapillaarisen kylästyskosteuspitoisuuden jo neljän tunnin kuluttua imeytyksen alkamisesta. Noin 22 tunnin kuluttua imeytyksen aloittamisesta osassa vertailukappaleiden pinnoista oli silmämääräisesti havaittavissa kappaleen kyllästyminen vedellä (kuva 47).



Kuva 47. Vertailukappaleet noin 22 tunnin imeytyksen jälkeen.

Kun verrataan kuvan 47 havaintoja kuvien 45 ja 46 kuvaajiin huomataan, että kaikki silmin nähden pinnastaan kosteat kappaleet eivät kuitenkaan ole punnitustulosten mukaan imeneet eniten vettä. Aistinvaraisten havaintojen pohjalta ei voida siis tehdä suoraa johtopäätöstä kappaleen kyllästymisestä tai kyllästymättömyydestä. Esimerkiksi kappaleet VE2 Y3 ja VE2 Y2 ovat kuvan 46 kuvaajien mukaan kapillaarisesti kyllästyneitä, mutta kuvassa 47 ei näiden kappaleiden pinnalla näy merkkejä kyllästymisestä.

6.4.2 Xypex Concentrate

Xypex Concentrate injektointiin yhteensä kuuteen koekappaleeseen: neljään huoneilmassa imeytyneeseen ja kahteen injektoinnin jälkeen veteen upotettuun koekappaleeseen. Taulukoissa 10 ja 11 on esitetty grammoina kappaleiden painonnousu jokaiselta punnitusajankohdalta. Huoneilmassa säilytetyt Xypex Concentrate -käsittellyt kappaleet on nimetty kirjaimella X ja veteen upotetut kappaleet kirjainyhdistelmällä Xu. Tunnuksilla X1, X3 ja X1u merkityt kappaleet ovat vesi-sementtisuhteeltaan 0,63 ja tunnuksilla X2, X4 ja X2u merkityt kappaleet ovat vesi-sementtisuhteeltaan 0,8.

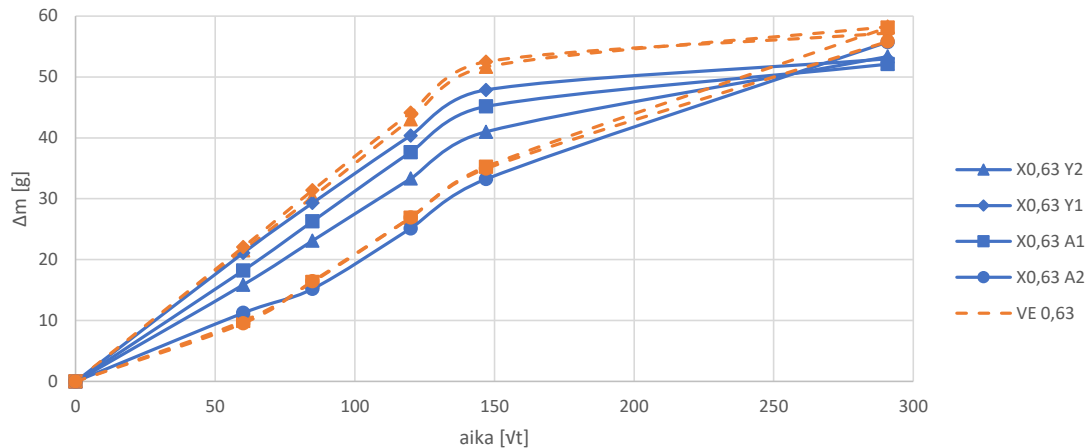
Taulukko 10. Xypex Concenterate:lla käsiteltujen kappaleiden painonnousu kokeen aikana.

Tunnus	1 h [g]	2 h [g]	4 h [g]	6 h [g]	23,5 h [g]
X1 Y3	17,37	23,83	32,15	38,23	47,48
X1 Y2	18,95	26,75	37,11	44,79	52,59
X1 Y1	21,94	30,1	40,99	48,15	52,58
X1 A1	21,11	29,5	40,71	47,8	52,44
X1 A2	11,69	12,91	22,06	29,87	54,92
X1 A3	9,29	15,26	26,32	35,18	54,86
X2 Y3	41,54	55,34	62,21	62,74	63,71
X2 Y2	24,91	33,24	43,55	49,78	54,66
X2 Y1	22,97	30,82	40,27	45,96	50,79
X2 A1	19,23	27,27	36,76	42,1	48
X2 A2	8,21	15,14	23,51	29,83	46,18
X2 A3	3,02	7,68	14,89	20,14	36,3
X3 Y3	17,34	24,41	33,73	40,49	48,84
X3 Y2	12,81	19,49	29,53	37,21	54,12
X3 Y1	20,25	28,49	39,76	47,56	53,34
X3 A1	15,34	23,1	34,6	42,51	51,76
X3 A2	10,81	17,5	28,21	36,57	56,52
X3 A3	11,23	17,77	28,05	36,55	55,71
X4 Y3	38,77	49,69	56,85	57,95	58,78
X4 Y2	25,09	33,04	42,71	48,29	53,61
X4 Y1	20,71	28,98	38,89	44,75	49,9
X4 A1	15,32	22,18	30,8	36,97	47,05
X4 A2	9,63	15,34	22,62	28,22	45,89
X4 A3	5,24	9,41	15,73	20,56	36,87

Taulukko 11. Upotettujen ja Xypex Concenterate:lla käsiteltujen kappaleiden painonnousu kokeen aikana.

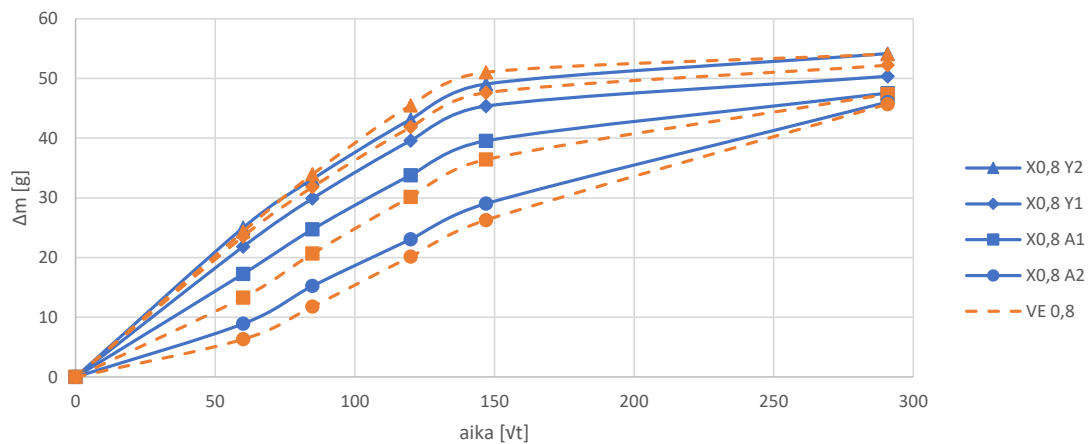
Tunnus	1 h [g]	2 h [g]	4 h [g]	6 h [g]	23,5 h [g]
X1u Y3	16,78	25,23	37,47	46,09	58,6
X1u Y2	11,53	18,3	28,73	36,69	56,66
X1u Y1	15,27	23,07	34,52	42,54	55,15
X1u A1	11,76	18,3	28,17	36,44	54,81
X1u A2	3,89	6,34	10,63	14,68	40,25
X1u A3	3,42	5,66	13,11	16,09	43,4
X2u Y3	25,93	35,01	45,88	51,5	54,35
X2u Y2	18,21	25,32	34,8	41,58	50,77
X2u Y1	16,41	23,05	32,42	39,33	49,34
X2u A1	10,01	15,82	24,78	31,31	46,33
X2u A2	3,93	6,99	13,1	18,48	42,1
X2u A3	2,72	4,94	9,14	13,33	34,27

Tulosten esittämiseen kuvaajien avulla on käytetty rinnakkaisten tulosten keskiarvoa. Tämä tarkoittaa sitä, että v/s 0,63 koekappaleiden X1 ja X3 punnitustuloksista ja v/s 0,8 koekappaleiden X2 ja X4 punnitustuloksista laskettiin keskiarvot ja laskennan tuloksista muodostettiin kuvaajat ajan neliöjuuren funktiona injektointikohdalta ja 40 mm etäisyydeltä injektointikohdasta saatuista kappaleista. Keskiarvokuvaajat on esitetty kuvissa 48 ja 49 yhtenäisellä viivalla ja vertailukappaleiden kuvaajat katkoviivalla.



Kuva 48. Keskiarvokuvaajat Xypex Concentrate -käsitellyjen v/s 0,63 koekappaleiden tuloksista.

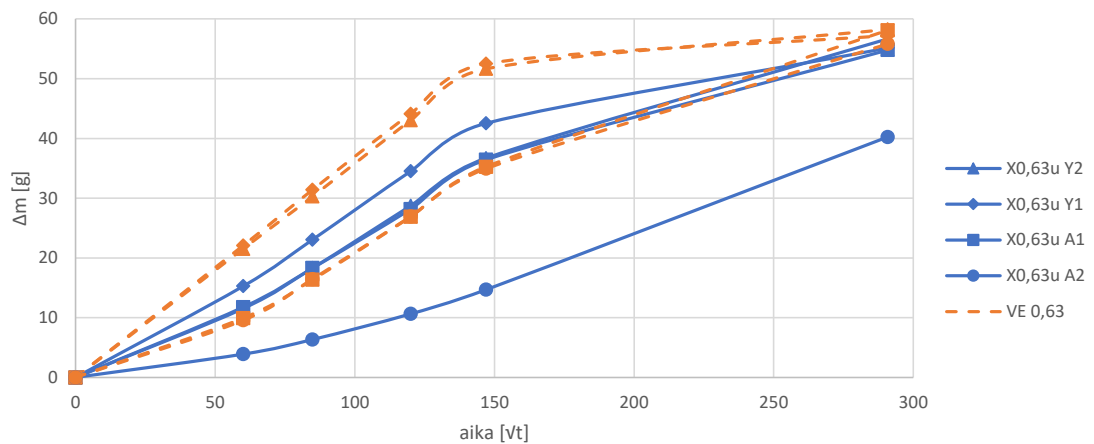
Kuvan 48 keskiarvokuvaajista nähdään, että veden imeytyminen on ollut v/s 0,63 tapauksessa käsitellyissä kappaleissa kokeen alussa voimakkainta Y1 ja A1 kappaleissa. 6–23,5 tunnin välillä imeytyksen aloittamisesta kappaleet A2 imivät keskiarvollisesti kuvaajien perusteella voimakkaimmin vettä, koska muut kappaleet olivat saavuttaneet kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden jo varhaisemmassa vaiheessa. Erot vertailukappaleiden tuloksiin olivat kokeen aikana ja sen lopussa vähäisiä.



Kuva 49. Keskiarvokuvaajat Xypex Concentrate -käsitellyjen v/s 0,8 koekappaleiden tuloksista.

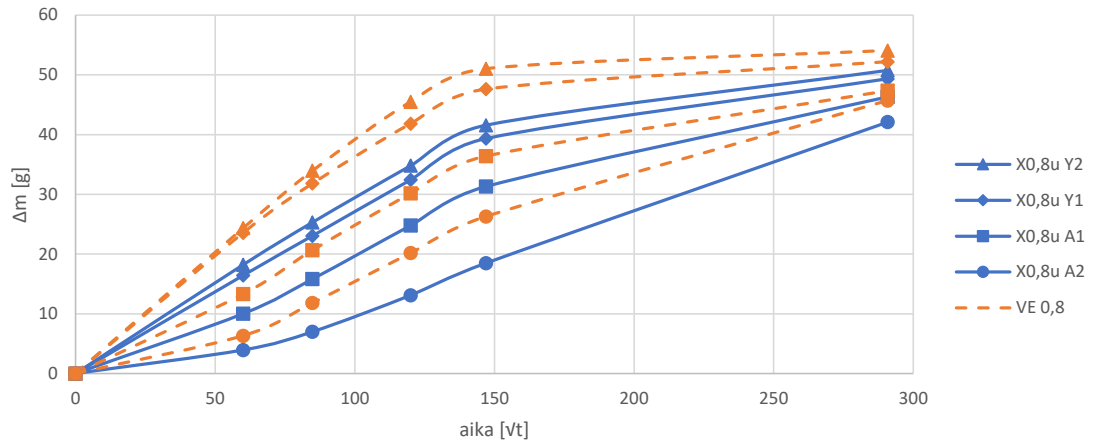
Kuvan 49 käsiteltyjen kappaleiden keskiarvokuvaajat ovat lähes identtiset vertailukappaleen kuvaajien kanssa. Myös v/s 0,8 tapauksessa 6–23,5 tunnin välillä imeytyksen aloittamisesta kappaleet A2 imivät kuvaajien perusteella keskiarvolla keskiarvolla voimakkaimmin vettä, koska muut kappaleet olivat saavuttaneet kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden jo varhaisemmassa vaiheessa. Käsiteltyjen ja vertailukappaleiden välille kokeen aikana muodostuneet erot olivat lähes olemattomia.

Injektoinnin jälkeen veteen aineen imeytymisen ajaksi upotetuista koekappaleista sahattujen kappaleiden painonnousut ajan neliöjuuren funktiona on esitetty kuvissa 50 ja 51.



Kuva 50. Kuvaajat Xypex Concentrate -käsitellyn ja upotetun v/s 0,63 koekappaleen tuloksista.

Kuvan 50 kuvaajista havaitaan, että vedenimu oli ensimmäisen kuuden tunnin aikana selkeästi vähäisintä kappaleessa A2. Myös kokeen lopussa tältä etäisyydeltä sahattu kappale oli imenyt vertailukappaleen tulosta vähäisemmän määrän vettä, kun taas muiden käsiteltyjen kappaleiden keskiarvoinen painonnousu kokeen lopussa oli vertailukappaleiden kanssa lähes yhtenevää. Kappale A2 ei ollut kuvaajan kulmakertoimen perusteella vielä saavuttanut kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta kokeen loppuun mennessä.



Kuva 51. Kuvaajat Xypex Concentrate -käsittelyn ja upotetun v/s 0,8 koekappaleen tuloksista.

Kuvan 51 kuvaajat asettuivat pystysuunnassa vertailukappaleen tapaan järjestykseen kappaleiden sahaus sijaintien perusteella. Kaikissa tapauksissa käsiteltyihin kappaleisiin tapahtunut vedenimeytyminen oli hieman vähäisempää kuin vertailukappaleilla, mutta kokeen lopussa painonnousujen erot pienentyivät lähes merkityksettömiksi. Myös v/s 0,8 tapauksessa kokeen lopussa 23,5 tunnin kuluttua aloituksesta kappale A2 ei vielä ollut kuvaajan kulmakertoimen perusteella saavuttanut kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta, mutta sen painonnousu oli tässä tapauksessa lähellä vertailukappaleen painonnousua.

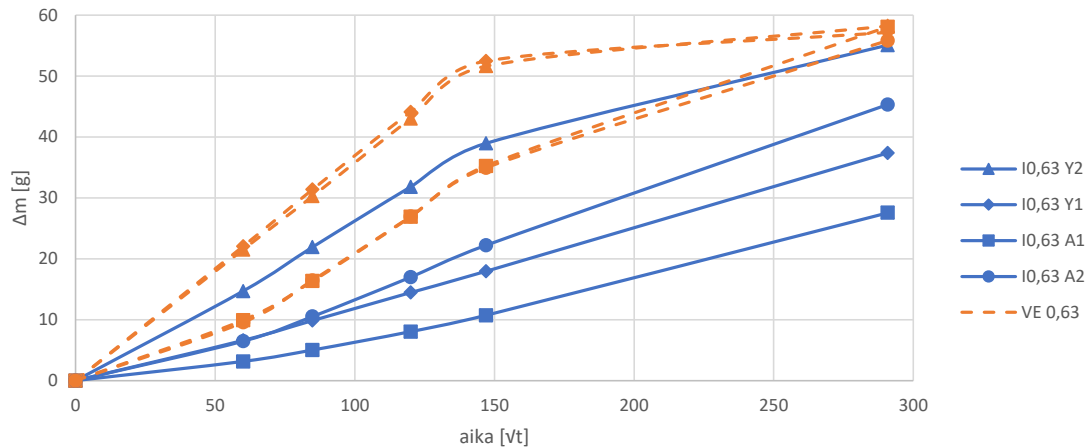
6.4.3 Isophob-K

Isophob-K injektointiin yhteensä neljään koekappaleeseen eli kahteen v/s 0,63 ja kahteen v/s 0,8 koekappaleeseen. Taulukossa 12 on esitetty grammoina kappaleiden painonnousu jokaiselta punnitusajankohdalta. V/s 0,63 kappaleet on nimetty tunnuksilla I1 ja I3 ja v/s 0,8 kappaleet tunnuksilla I2 ja I4.

Taulukko 12. *Isophob-K:lla käsiteltyjen kappaleiden painonnousu kokeen aikana.*

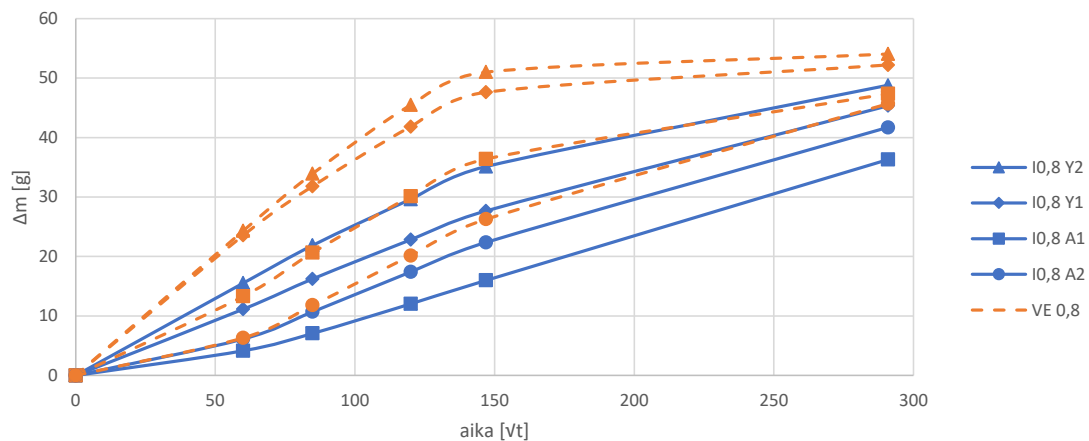
Tunnus	1 h [g]	2 h [g]	4 h [g]	6 h [g]	23,5 h [g]
I1 Y3	20,22	28,95	40,55	47,88	52,27
I1 Y2	15,43	22,83	33,07	40,4	55,48
I1 Y1	7,18	10,57	15,25	18,87	39,55
I1 A1	4,05	6,32	9,77	12,44	29,61
I1 A2	7,42	11,62	17,71	22,5	43,16
I1 A3	7,44	11,68	18,53	23,98	44,05
I2 Y3	26,49	36,8	49,59	55,85	58,19
I2 Y2	17,86	24,7	33,3	39,23	51,45
I2 Y1	11,53	16,6	23,28	28,48	46,29
I2 A1	5,64	8,85	13,61	17,22	34,34
I2 A2	8,27	12,89	19,51	24,4	42,43
I2 A3	4,68	8,78	15,46	20,18	35,47
I3 Y3	19,36	28,27	40,27	48,16	53,87
I3 Y2	13,98	21,03	30,57	37,52	54,69
I3 Y1	6,03	9,14	13,67	17,03	35,22
I3 A1	2,25	3,73	6,33	9,02	25,52
I3 A2	5,52	9,43	16,26	21,94	47,52
I3 A3	4,2	7,94	15,12	20,92	45,05
I4 Y3	29,88	41,47	53,78	57,8	59,62
I4 Y2	13,2	19,06	25,98	31,04	46,15
I4 Y1	10,77	15,88	22,38	26,87	44,41
I4 A1	2,68	5,3	10,49	14,78	38,28
I4 A2	4,01	8,52	15,33	20,37	41,01
I4 A3	1,96	4,93	10,95	15,67	34,85

Taulukon 12 punnitustuloksista on muodostettu edellisen alaluvun 6.4.2 mukaisesti rinnakkaisten punnitustulosten keskiarvokuvaajat, jotka ovat esitettyinä ajan neliöjuuren funktiona kuvissa 52 ja 53 yhtenäisellä viivalla. Vertailukappaleiden kuvaajat on esitetty katkoviivalla.



Kuva 52. Keskiarvokuvaajat Isophob-K -käsiteltyjen v/s 0,63 koekappaleiden tuloksista.

Kuvan 52 keskiarvokuvaajista havaitaan, että veden imeytyminen oli keskiarvillisesti vähäisintä injektoinnin kohdalta saatuissa kappaleissa Y1 ja A1. Kuvaajien perusteella käsitellyistä kappaleista Y2 kappaleet saavuttivat kokeen aikana kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden. Muiden käsiteltyjen kappaleiden kuvaajien perusteella kyllästyskosteuspitoisuutta ei kappaleissa saavutettu. Näihin kappaleisiin vesi imeytyi kuvaajien lineaarisemman muodon perusteella vertailukappaleita hitaammin ja niiden painonnousut kokeen lopussa jäivät vertailukappaleiden painonnousuja vähäisemmiksi.



Kuva 53. Keskiarvokuvaajat Isophob-K -käsiteltyjen v/s 0,8 koekappaleiden tuloksista.

Kuvan 53 keskiarvokuvaajat mukailevat vertailukappaleiden kuvaajien tapaan kappaleiden tiiveyden mukaista järjestystä. Yleisesti kappaleiden hidastunut painonnousu näkyy käsiteltyjen kappaleiden keskiarvokuvaajissa lineaarisempänä muotona vertailukappaleiden kuvaajiin verrattuna. Kuvaajan perusteella käsitelty A1 kappaleet eivät saavuttaneet kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta kokeen aikana. Kokeen lopussa käsiteltyjen kappaleiden ja vertailukappaleiden erot painonnousuissa olivat kuitenkin v/s 0,8 tapauksessa kuvaajien perusteella supistuneet v/s 0,63 tapauksista pienemmiksi.

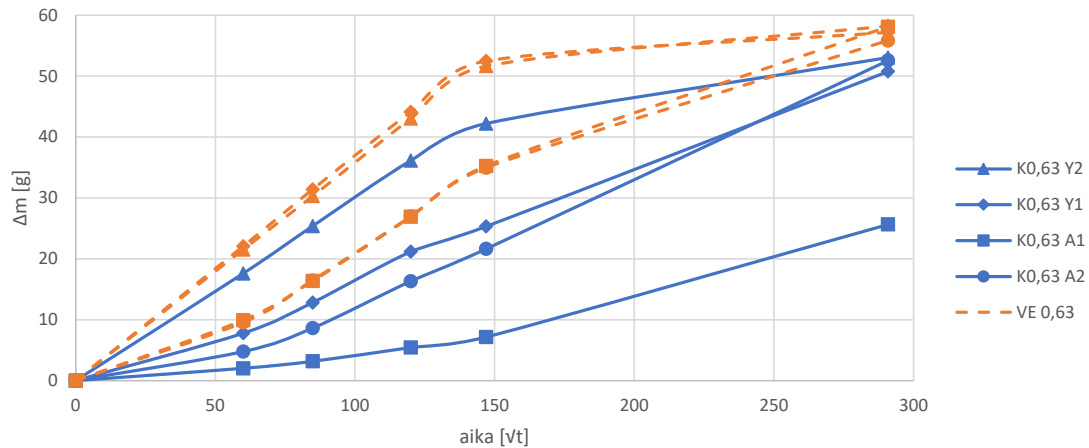
6.4.4 Köster Crisin 76 Concentrate

Köster Crisin 76 Concentrate injektoitiin yhteensä neljään koekappaleeseen eli kahteen v/s 0,63 ja kahteen v/s 0,8 koekappaleeseen. Taulukossa 13 on esitetty grammoina kappaleiden painonnousu jokaiselta punnitusajankohdalta. V/s 0,63 kappaleet on nimetty tunnuksilla K1 ja K3 ja v/s 0,8 kappaleet tunnuksilla K2 ja K4.

Taulukko 13. Köster Crisin 76 Concentrate:lla käsiteltyjen kappaleiden painonnousu kokeen aikana.

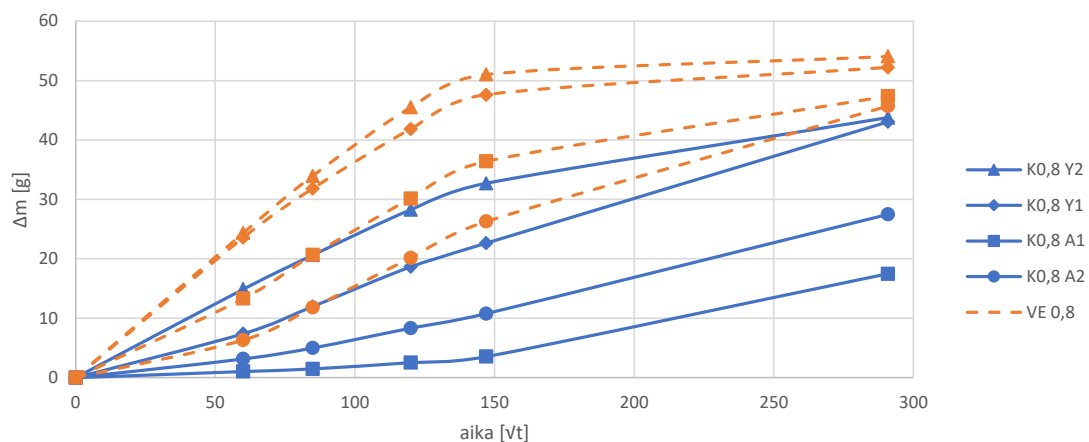
Tunnus	1 h [g]	2 h [g]	4 h [g]	6 h [g]	23,5 h [g]
K1 Y3	18,67	26,4	36,9	42,78	52,29
K1 Y2	17,22	24,78	35,55	41,63	52,09
K1 Y1	7,38	11,95	20,1	25,15	48,71
K1 A1	2,62	3,99	6,76	8,78	28,64
K1 A2	4,33	7,72	14,87	19,98	50,44
K1 A3	7,25	12,21	20,38	25,35	50,2
K2 Y3	13,12	17,72	23,73	27,13	37,11
K2 Y2	16,07	22,06	30,12	34,55	46,62
K2 Y1	5,69	9,36	15,22	18,94	42,88
K2 A1	1,12	1,65	2,9	4,19	20,54
K2 A2	2,73	5,63	12,01	16,43	44,74
K2 A3	6,81	12,73	21,51	27,08	58,1
K3 Y3	16,63	23,28	32,08	37,03	48,53
K3 Y2	17,97	25,96	36,7	42,78	53,99
K3 Y1	8,19	13,69	22,23	25,49	52,82
K3 A1	1,41	2,33	4,11	5,53	22,66
K3 A2	5,2	9,52	17,78	23,26	54,68
K3 A3	6,12	10,49	18,06	23,04	53,89
K4 Y3	14,48	20,7	29,31	34,2	47,17
K4 Y2	12,41	17,54	24,53	28,56	41,43
K4 Y1	5,17	8,94	14,75	18,44	39,35
K4 A1	0,94	1,3	2,17	2,88	14,42
K4 A2	1,02	1,87	4,18	6,25	25,14
K4 A3	0,76	1,2	2,65	4,05	18,93

Taulukon 13 punnitustuloksista on muodostettu luvun 6.4.2 mukaisesti rinnakkaisten punnitustulosten keskiarvokuvaajat, jotka ovat esitettyinä ajan neliöjuuren funktiona kuvissa 54 ja 55 yhtenäisellä viivalla. Vertailukappaleiden kuvaajat on esitetty katkoviivalla.



Kuva 54. Keskiarvokuvaajat Köster Crisin 76 Concentrate -käsiteltyjen v/s 0,63 koekappaleiden tuloksista.

Kuvasta 54 erottuu injektointikohdalta ja sen alapuolelta sahattujen kappaleiden Y1, A1 ja A2 keskiarvokuvaajat, joiden lineaarisista muodoista on nähtävissä hidastanut vedenimeytyminen vertailukappaleisiin verrattuna. Kappaleisiin A1 keskiarvollisesti kokeen lopussa imeytynyt vesimäärä jäi myös selvästi muihin kappaleisiin imeytynyttä määrää vähäisemmäksi.



Kuva 55. Keskiarvokuvaajat Köster Crisin 76 Concentrate -käsiteltyjen v/s 0,8 koekappaleiden tuloksista.

Kuvan 55 perusteella myös v/s 0,8 tapauksessa vedenimeytyminen on ollut hitainta injektointikohdalta ja sen alapuolelta sahattuihin kappaleisiin, mikä näkyy käsiteltyjen kappaleiden kuvaajien lineaarisempänä muotona vertailukappaleiden kuvaajiin verrattuna. Injektointikohdan alapuoliset kappaleet eivät kuvaajien perusteella saavuttaneet kyllästyskosteuspitoisuuttaan kokeen aikana. Merkittävin ero käsiteltyjen kappaleiden keskiarvoisen painonnousun ja vertailukappaleen painonnousun välillä oli injektointikohdan alapuolisissa A1 kappaleissa, joissa vedenimeytyminen oli kuvaajien perusteella vähäisintä.

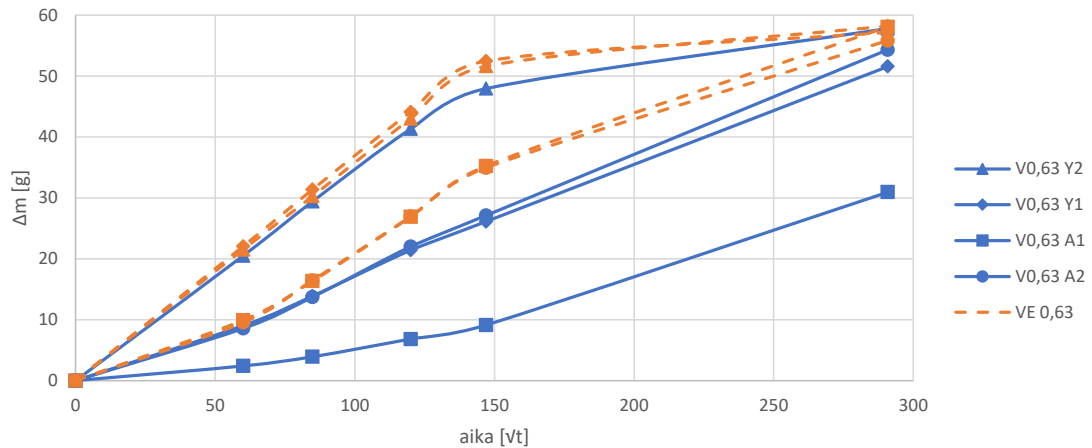
6.4.5 Vandex IC

Vandex IC injektoitiin yhteensä neljään koekappaleeseen eli kahteen v/s 0,63 ja kahteen v/s 0,8 koekappaleeseen. Taulukossa 14 on esitetty grammoina kappaleiden painonnousu jokaiselta punnitusajankohdalta. V/s 0,63 kappaleet on nimetty tunnuksilla V1 ja V3 ja v/s 0,8 kappaleet tunnuksilla V2 ja V4.

Taulukko 14. Vandex IC:llä käsiteltyjen kappaleiden painonnousu kokeen aikana.

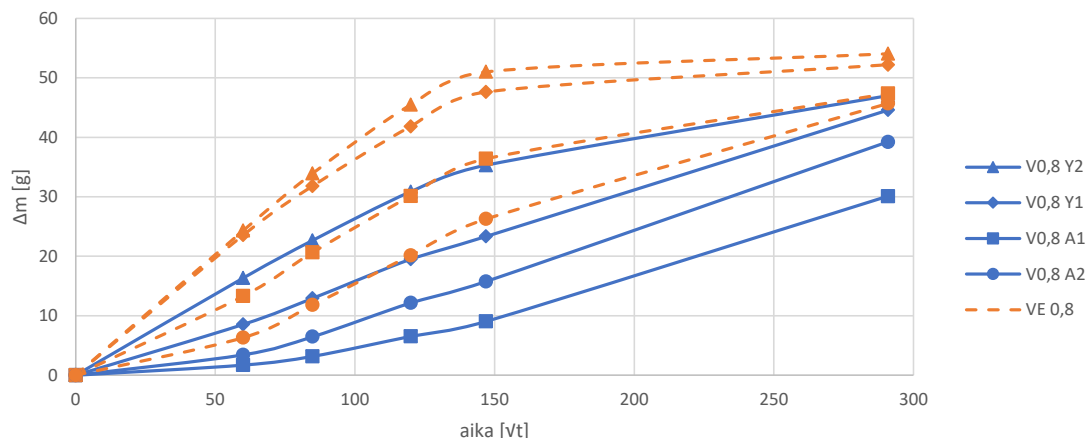
Tunnus	1 h [g]	2 h [g]	4 h [g]	6 h [g]	23,5 h [g]
V1 Y3	22,27	31,04	42,75	49,31	57,11
V1 Y2	21,22	30,21	42,38	49,39	59,79
V1 Y1	6,37	10,29	17,08	21,46	52,68
V1 A1	2,7	4,24	6,96	9,01	29,65
V1 A2	9,25	14,87	23,98	29,47	55,11
V1 A3	6,33	10,43	18,06	23,04	49,75
V2 Y3	23,47	32,18	41,91	45,53	49,28
V2 Y2	17,42	23,98	32,17	36,45	46,17
V2 Y1	7,8	11,88	18,13	21,85	42,6
V2 A1	2,12	4,08	8,22	11,06	32
V2 A2	3,94	7,44	13,29	16,84	38,19
V2 A3	2,57	5,5	11,96	15,9	35,08
V3 Y3	17,43	25,14	35,71	41,61	51,86
V3 Y2	19,8	28,64	40,28	46,52	55,85
V3 Y1	11,67	17,48	25,75	30,79	50,5
V3 A1	2,11	3,59	6,71	9,24	32,25
V3 A2	7,87	12,58	20,03	24,75	53,55
V3 A3	9,96	15,76	24,57	29,85	56,58
V4 Y3	10,58	15,22	21,71	25,32	40,97
V4 Y2	15,27	21,35	29,56	34,17	47,82
V4 Y1	9,3	14	20,91	24,83	46,57
V4 A1	1,29	2,27	4,85	7,03	28,19
V4 A2	2,93	5,5	11,04	14,7	40,29
V4 A3	12	21,21	32,41	39,28	59,55

Taulukon 14 punnitustuloksista on muodostettu luvun 6.4.2 mukaisesti rinnakkaisten punnitustulosten keskiarvokuvaajat, jotka ovat esitettyinä ajan neliöjuuren funktiona kuvissa 56 ja 57 yhtenäisellä viivalla. Vertailukappaleiden kuvaajat on esitetty katkoviivalla.



Kuva 56. Keskiarvokuvaajat Vandex IC -käsiteltyjen v/s 0,63 koekappaleiden tuloksista.

Kuvan 56 keskiarvokuvaajista erottuu injektointikohdalta sahatut kappaleet Y1 ja A1, joissa painonnousu oli kuvaajien perusteella vertailukappaleiden painonnousua vähäisempää. Varsinkin injektointikohdan alapuoliset A1 kappaleet imivät vettä selvästi pienemmän määrän ja ne eivät keskiarvokuvaajan kulmakertoimen perusteella saavuttanut kyllästyskosteuspitoisuutta kokeen loppuun mennessä.



Kuva 57. Keskiarvokuvaajat Vandex IC -käsiteltyjen v/s 0,8 koekappaleiden tuloksista.

Kuvan 57 perusteella myös v/s 0,8 tapauksessa injektointikohdasta sahattujen kappaleiden Y1 ja A1 keskiarvokuvaajissa näkyy kappaleiden hidas vedenimeytyminen kuvaajien lineaarisena muotona. Myös noin 40 mm päästä injektointikohdasta sahattujen Y2 ja A2 kappaleisiin tapahtunut vedenimeytyminen oli kuvaajien perusteella vertailukappaleisiin kohdistunutta vedenimeytymistä hitaampaa. Käsiteltyjen kappaleiden kuvaajista vain kappaleiden Y2 kuvaajasta oli selkeästi havaittavissa kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden saavuttaminen kokeen aikana. Merkittävimmin hidastunut keskiarvollinen vedenimeytyminen on havaittavissa A1 kappaleissa.

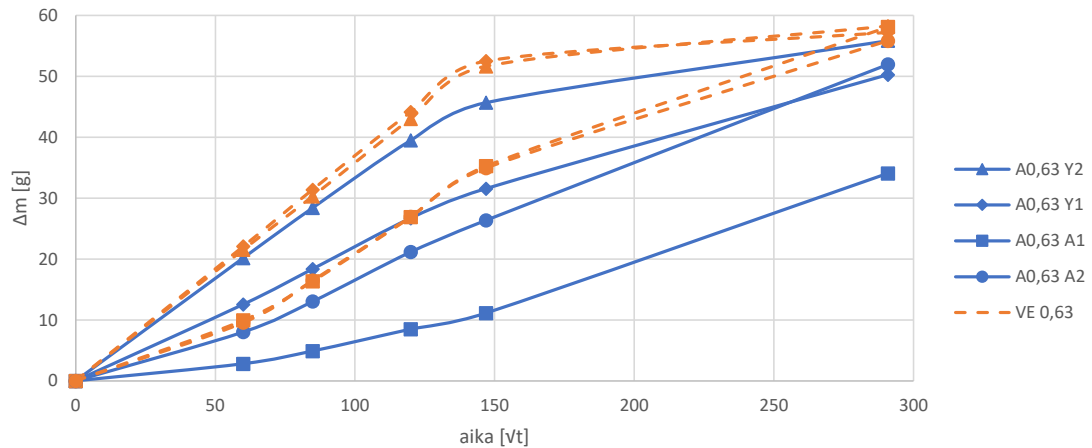
6.4.6 Aquastop

Aquastop injektointiin yhteensä neljään koekappaleeseen eli kahteen v/s 0,63 ja kahteen v/s 0,8 koekappaleeseen. Taulukossa 15 on esitetty grammoina kappaleiden painonnousu jokaiselta punnitusajankohdalta. V/s 0,63 kappaleet on nimetty tunnuksilla A1 ja A3 ja v/s 0,8 kappaleet tunnuksilla A2 ja A4.

Taulukko 15. *Aquastop:lla käsiteltyjen kappaleiden painonnousu kokeen aikana.*

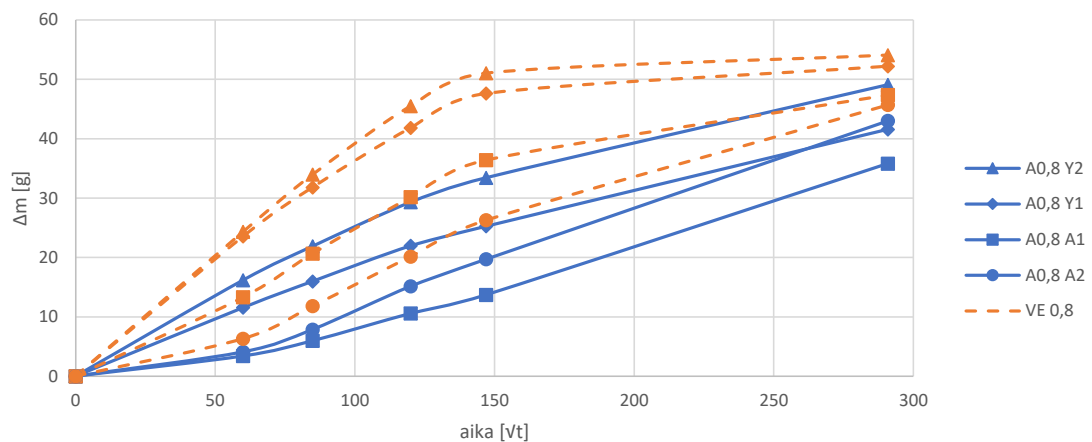
Tunnus	1 h [g]	2 h [g]	4 h [g]	6 h [g]	23,5 h [g]
A1 Y3	18,72	26,42	37,23	43,45	51,56
A1 Y2	19,29	27,35	38,3	44,4	54,77
A1 Y1	10,97	15,41	21,76	25,41	45,97
A1 A1	3,57	6,01	10,24	13,35	40,31
A1 A2	11,04	17,54	27,39	33,14	53,47
A1 A3	6,96	11,88	19,77	24,5	47,03
A2 Y3	32,38	42,85	53,9	56,97	58,55
A2 Y2	14,5	19,5	26,32	30,19	48,06
A2 Y1	10,17	14,06	19,18	22,06	38,09
A2 A1	1,65	2,72	5,26	7,44	28,17
A2 A2	3,93	7,61	14,52	18,82	41,92
A2 A3	3,8	7,41	13,27	16,64	34
A3 Y3	17	26,07	38,27	45,48	53,86
A3 Y2	21,07	29,45	40,69	46,97	56,93
A3 Y1	14,14	21,33	31,66	37,72	54,56
A3 A1	2,05	3,79	6,74	8,92	27,82
A3 A2	5	8,52	14,95	19,61	50,46
A3 A3	7,78	13,22	21,84	27,22	50,22
A4 Y3	31,27	42,88	55,11	58,36	61,42
A4 Y2	17,87	24,26	32,3	36,64	50,1
A4 Y1	12,93	17,89	24,74	28,43	45,07
A4 A1	5,15	9,21	15,89	19,96	43,45
A4 A2	4,26	8,13	15,79	20,57	44,07
A4 A3	1,56	3,23	8,09	11,7	34,45

Taulukon 15 punnitustuloksista on muodostettu luvun 6.4.2 mukaisesti rinnakkaisten punnitustulosten keskiarvokuvaajat, jotka ovat esitettyinä ajan neliöjuuren funktiona kuvissa 58 ja 59.



Kuva 58. Keskiarvokuvaajat Aquastop -käsiteltyjen v/s 0,63 koekappaleiden tuloksista.

Kuvan 58 keskiarvokuvaajista erottuu selkeimpänä injektointikohdalta sahattujen kappaleiden kuvaaja A1, jonka perusteella näissä kappaleissa oli kokeen aikana muita kappaleita hitaampi painonnousu ja kokeen lopussa imeytyneen veden määrä oli selvästi vertailukappaleen painonnousua vähäisempää. Myös kappaleiden Y1 keskiarvokuvaajasta on havaittavissa hidastunut vedenimeytyminen vertailukappaleen kuvaajaan verrattuna, mutta ero painonnousussa kokeen lopussa oli kuvaajien perusteella käsiteltyjen ja vertailukappaleen välillä pieni.



Kuva 59. Keskiarvokuvaajat Aquastop -käsiteltyjen v/s 0,8 koekappaleiden tuloksista.

Kuvan 59 keskiarvokuvaajien mukaan kaikilla esitetyistä käsitellyistä kappaleista oli vertailukappaleita hitaampi painonnousu kuvaajien lineaarisemman muodon perusteella. Isoin ero käsiteltyjen ja vertailukappaleen välille on kuvaajien perusteella muodostunut injektointikohdalta sahattuihin Y1 ja A1 kappaleisiin. Kappaleiden A1 keskiarvokuvaajan kulmakertoimen perusteella kappaleet eivät saavuttaneet kapillaarista kyllästyskosteuspiitoisuutta kokeen loppuun mennessä.

6.5 Tulosten arviointi

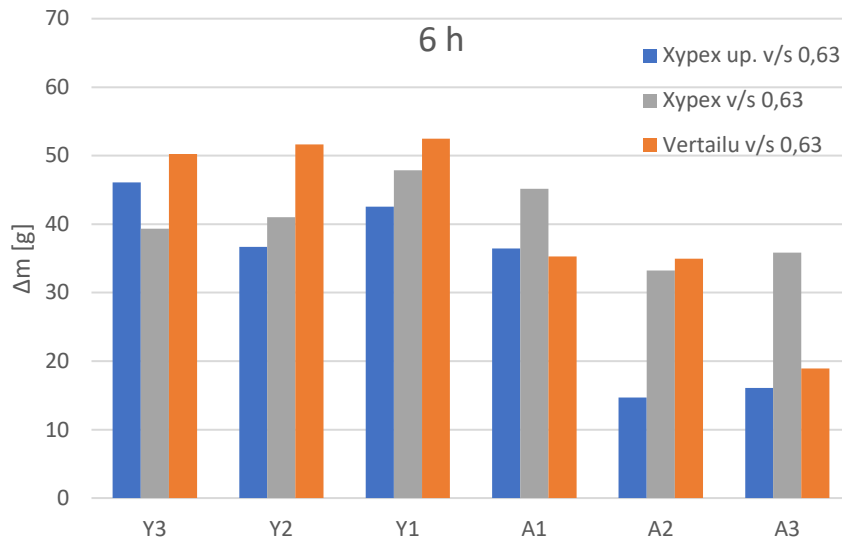
Osassa sahatuista kappaleista pystyttiin silmämääräisesti ja tulosten perusteella havaitsemaan kapillaarinen kyllästyminen ensimmäisen kuuden tunnin imeytymisen jälkeen, mikä on havaittavissa myös kappaleiden kuvaajien kulmakertoimen pientymisenä. Tämän takia tulosten arvioinnissa keskityttiin kommentoimaan kappaleiden painonnousua kuuden ensimmäisen tunnin ajalta ja kokeen aikana saavutettua kokonaista painonnousua. Kuuden tunnin kohdalta saatiin tietoa injektointiaineen vaikutuksesta kappaleen kapillaarikyllästymisen nopeuteen ja kokeen lopusta vaikutuksesta kappaleen painonnousuun pidemmällä aikavälillä.

Injektoitujen koekappaleiden ja käsittelemättömien vertailukappaleiden painonnousua verrattiin kuuden tunnin ja 23,5 tunnin imeytystulosten perusteella muodostettujen pylväsdiagrammeihin avulla. Tulosten arvioimiseksi laskettiin kahdesta rinnakkaiskappaleesta luvun 6.4 esitystavan mukaisesti keskiarvotulokset ja näitä verrattiin vertailukappaleiden tuloksiin.

Seuraavissa alaluvuissa esitetään vertailtavia tuloksia pylväsdiagrammien avulla siten, että käsiteltyjen ja koostumukseltaan samantyylisten kappaleiden tulosten viereen on muodostettu samalta kohdalta sahatun vertailukappaleen tulosten pylväsdiagrammi. Kappaleet on nimetty kuvan 32 mukaan. Tarkempi yksittäisen injektointiaineen kappaleiden painonnousun kehitys suhteessa vertailukappaleisiin on esitetty kuvaajien ja pylväsdiagrammien avulla liitteessä A.

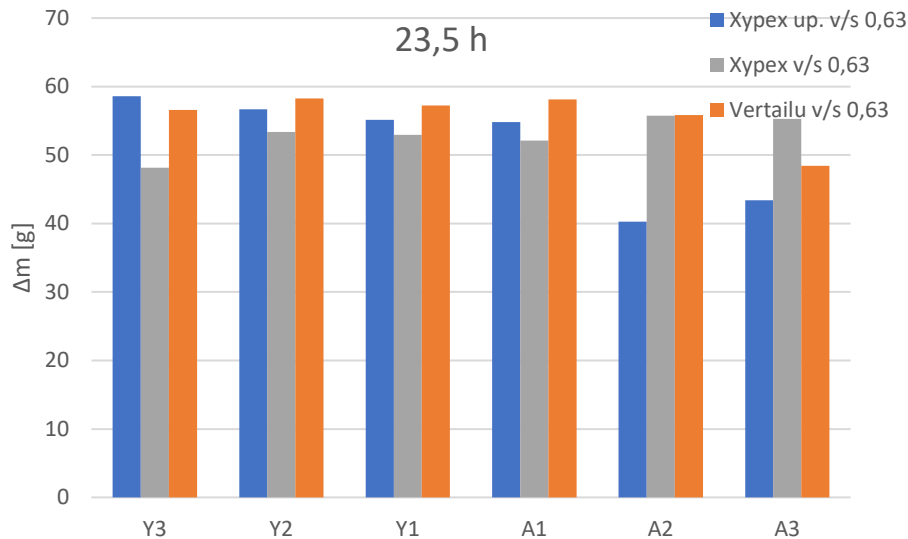
6.5.1 Sementtipohjainen tuote

Kuvissa 60–63 on sementtipohjaisella Xypex Concentrate:lla käsiteltyjen koekappaleiden keskiarvollisen painonnousun tulokset asetettu pylväskaavioon samalta kohdalta sahattujen vertailukappaleiden tulosten kanssa. Etualla näkyy upotettujen kappaleiden punnitustulokset.



Kuva 60. Sementtipohjaisella tuotteella käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden tunnin kohdalla.

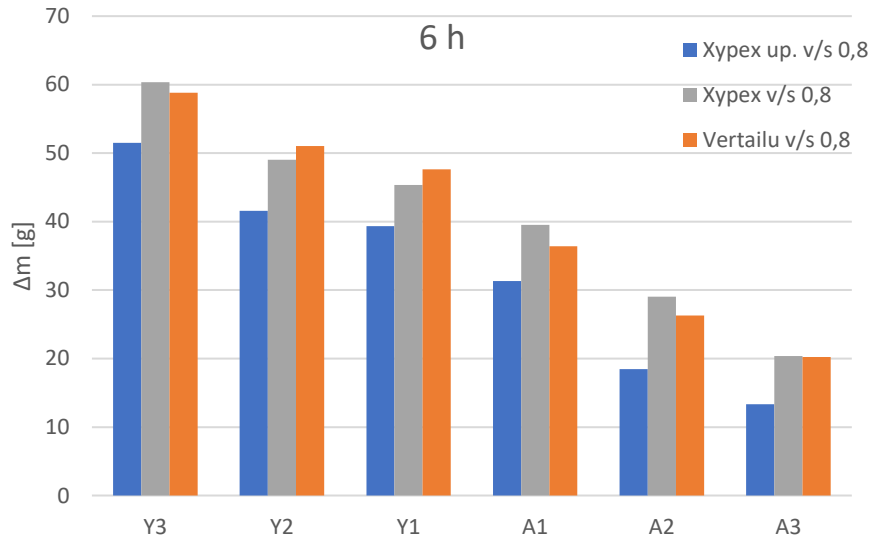
Kuvan 60 perusteella käsiteltyjen kappaleiden vedenimu on vertailukappaleisiin nähden keskiarvollisesti vaihtelevaa kuuden ensimmäisen tunnin kohdalla. Selkein ero vertailukappaleiden tuloksiin ilmeni injektointikohdan alapuolisissa upotetuissa kappaleissa A2 ja A3. Samalta kohdalta sahattuissa, mutta upottamattomissa kappaleissa ei havaittu keskiarvollisesti hidastunutta veden imeytymistä.



Kuva 61. Sementtipohjaisella tuotteella käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.

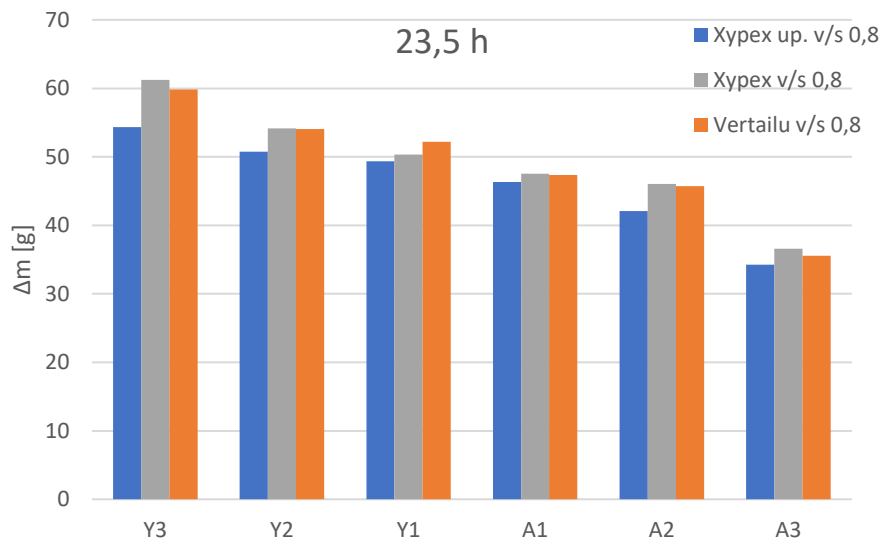
Kuvan 61 perusteella kokeen lopussa erot ovat vähentyneet ja pylväät muistuttavat selkeämmin toisiaan. Injektointikohdan ylä- ja alapuolisissa Y1 ja A1 kappaleissa erot vertailukappaleen tuloksiin olivat käsitellyissä kappaleissa vähäisiä. Myös kokeen lopussa

selkein ero muihin samalta kohdalta sahattuihin kappaleisiin esiintyi upotetuissa kappaleissa A2 ja A3. Tämän ei voi kuitenkaan suoraan olettaa johtuvan aineen huokosia tukkivasta kiteytymisestä, koska injektoinnin kohdalla tätä reaktiota ei ole tuloksien perusteella havaittavissa.



Kuva 62. Sementtipohjaisella tuotteella v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden tunnin kohdalta.

Kuvan 62 perusteella v/s 0,8 tapauksessa on erotettavissa suuruusjärjestykseltään yhtenäinen vedenimeytyminen käsiteltyihin kappaleisiin ja vertailukappaleisiin, mutta upotetuilla kappaleilla vedenimeytyminen on hitaampaa. Erot ovat kuitenkin kauttaaltaan vähäisiä vertailukappaleiden ja käsiteltyjen kappaleiden välillä.



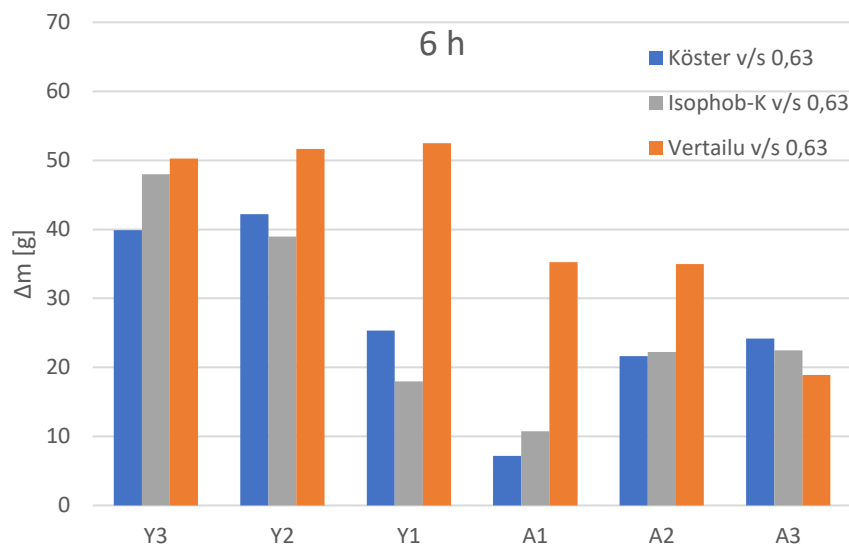
Kuva 63. Sementtipohjaisella tuotteella v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.

Kuvan 63 perusteella tämä ero on tasoittunut ja vedenimeytyminen on molemmissa käsitellyissä kappaleissa lähes yhteneväistä vertailukappaleiden tulosten kanssa eikä suurta eroa ole kokeen lopussa muodostunut.

Vaikutus jää kummassakin vesi-sementtisuhteen tapauksessa kokonaisuudessaan vähäiseksi eikä selkeää aineen vaikutusta pystytä havaitsemaan. Selkeää eroa huoneilmassa kuivuneiden ja veteen upotettujen kappaleiden vedenimukykyjen välille ei myöskään koeajan puitteissa syntynyt. Käsiteltyjen kappaleiden vedenimeytyminen oli molemmissa vesi-sementtisuhte tapauksissa lähes yhtenäistä vertailukappaleiden kanssa, varsinkin injektoinnin kohdalta sahatuissa kappaleissa. Tuloksista voidaan yleisesti päätellä, että viiden viikon imeytymisaika esitetyillä koejärjestelyillä ei ole ollut riittävä sementtipohjaisen aineen tehokkaan huokosia tukkivan kiteytymisen muodostumiseen.

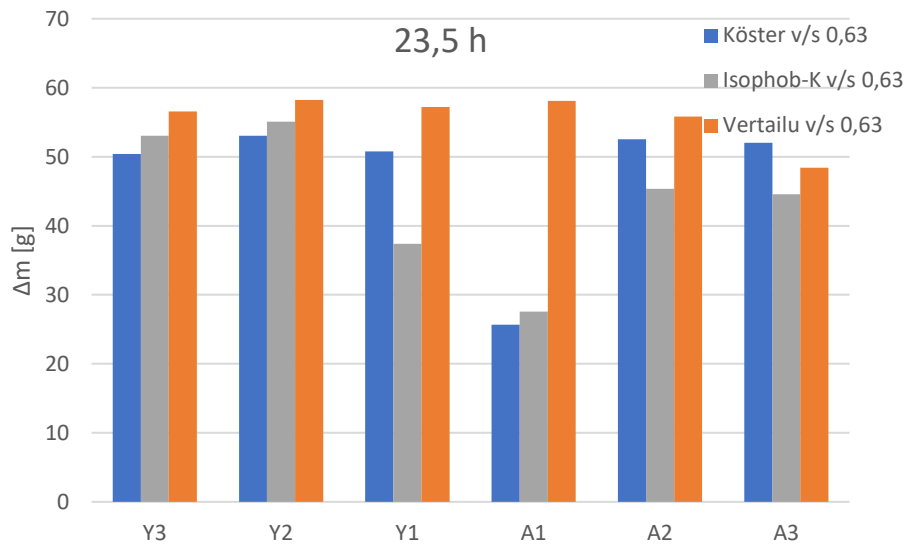
6.5.2 Nestemäiset tuotteet

Kuvissa 64–67 on nestemäisillä tuotteilla (Köster Crisin 76 Concentrate ja Isophob-K) käsiteltyjen koekappaleiden keskiarvollisen painonnousun tulokset asetettu pylväskaa-vioon samalta kohdalta sahattujen vertailukappaleiden tulosten kanssa.



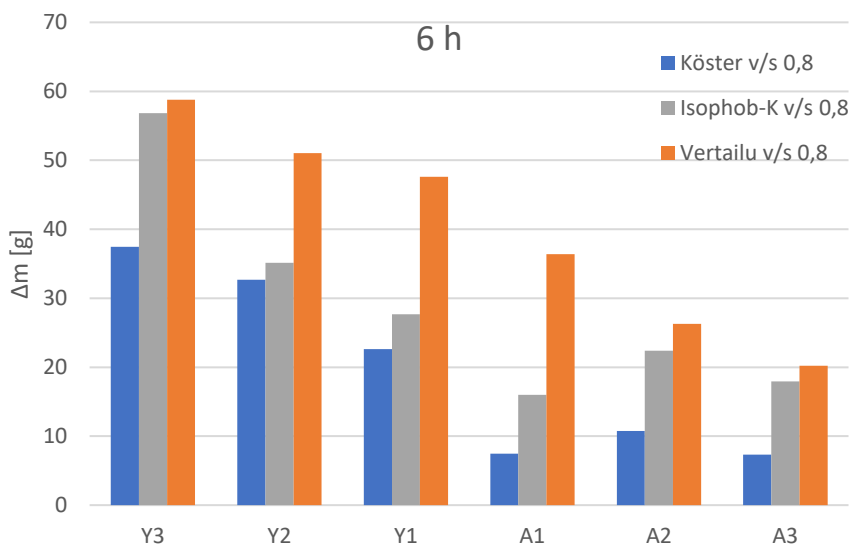
Kuva 64. Nestemäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden tunnin kohdalta.

Kuvan 64 perusteella v/s 0,63 tapauksessa kuuden ensimmäisen tunnin aikana vesi imeytyi keskiarvollisesti uloimpia kappaleita lukuun ottamatta keskiarvollisesti hitaammin käsiteltyihin kappaleisiin kuin vastaavalla kohdalta sahattuihin vertailukappaleisiin. Varsinkin injektointikohdalta sahatuissa kappaleissa ero oli selkeä.



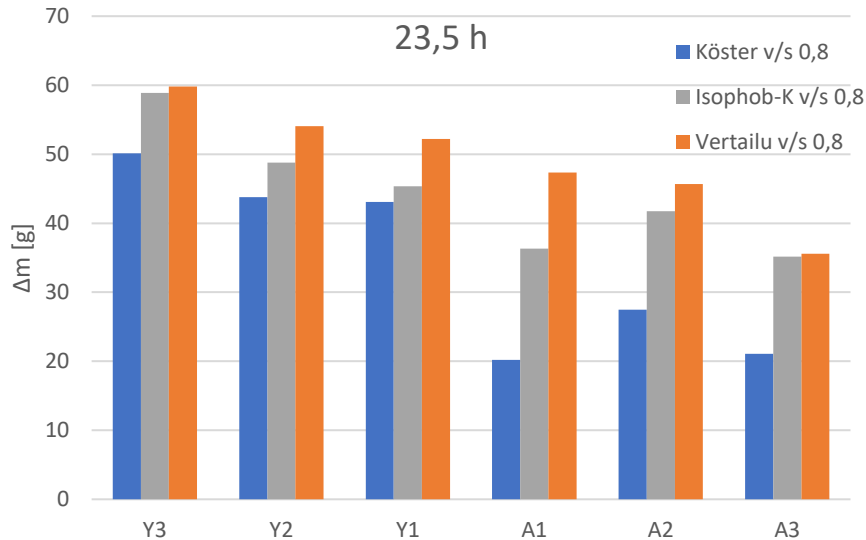
Kuva 65. Nestemäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.

Kuvan 65 perusteella myös lopullinen vaikutus painonnousuun oli selkeimmin havaittavissa injektointikohdalta sahatuissa kappaleissa, joista alapuoliset A1 kappaleet olivat keskiarvillisesti imeneet molempien aineiden tapauksessa alle puolet vertailukappaleen imemästä vesimäärästä. Isophob-K:lla käsitellyistä kappaleista myös injektointikohdalta sahatut ylemmät Y1 kappaleet olivat keskiarvillisesti imeneet vettä havaittavan määrän vertailukappaleita vähemmän. Aineen leviäminen vaikutti olevan hieman vahvempaa alaspäin, sillä eroa vertailukappaleen tuloksiin oli keskiarvillisesti havaittavissa myös kappaleissa A2.



Kuva 66. Nestemäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden tunnin kohdalta.

Kuvan 66 perusteella myös v/s 0,8 tapauksessa kummallakin aineella käsiteltyjen kappaleiden keskiarvoinen painonnousu kuuden ensimmäisen tunnin aikana oli erityisesti injektoinnin kohdalta sahatuissa kappaleissa keskiarvallisesti vertailukappaleita hitaampaa.



Kuva 67. Nestemäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.

Kuvan 67 perusteella kokeen lopussa erot olivat osittain kaventuneet, mutta silti havaittavissa pylväitä vertailemalla. Isoin keskiarvoinen ero kummankin injektointiaineen kappaleiden ja vertailukappaleiden vedenimun välillä tapahtui tälläkin vesi-sementtisuhteella injektointikohdalta sahatuissa A1 kappaleissa.

Köster Crisin 76 Concentrate:lla käsitellyt kappaleet imivät keskiarvallisesti kaikissa kappaleissa kolmesta tarkastellusta tapauksesta vähiten vettä kokeen aikana. Tämä ero oli merkittävin A1 kappaleissa, mutta myös muissa injektointikohdan alapuolisissa kappaleissa A2 ja A3 imeytyneen veden määrä kokeen lopussa oli selvästi kolmesta tapauksesta vähäisintä.

Yleisesti voidaan tutkimustulosten mukaan todeta, että molempien vesimenttisuhteiden tapauksessa nestemäisten injektointiaineiden viiden viikon mittaisella imeytymisellä näyttäisi olevan vaikutus kappaleen vedenimunopeuteen. Kokeen lopussa vaikutuksen havaittiin olevan keskiarvallisesti suurinta injektointikohdalta sahatuissa kappaleissa, erityisesti alapuolisissa A1 kappaleissa. Aineiden leviämisestä oli havaittavissa viitteitä myös noin 40 mm päässä injektointikohdasta.

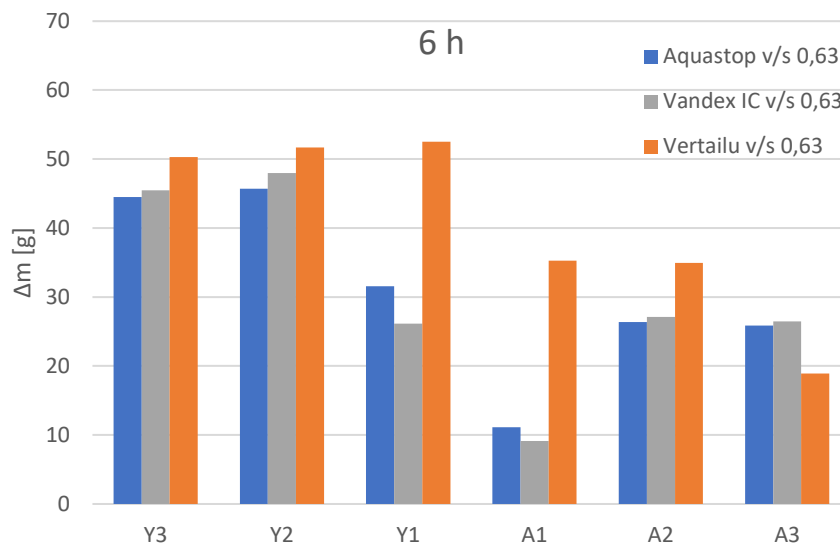
Isophob-K:n parafiiniöljyyn liuotettujen polymeerien huokosia pinnoittava hydrofobinen kalvo muodostui tutkimustulosten perusteella keskiarvallisesti hieman tehokkaammin v/s

0,63 koekappaleisiin. Selkeää käsitystä voimakkaammasta leviämisuunnasta ei kuitenkaan tutkimustulosten perusteella kyetty tällä tuotteella muodostamaan.

Köster Crisin 76 Concentrate:n synteettisen hartsin aikaansaama huokosten supistuminen ja hydrofobisoituminen tapahtui tutkimustulosten perusteella puolestaan tehokkaammin v/s 0,8 koekappaleissa. Tällä vesi-sementtisuhteella pystyttiin tuloksista päättämään aineen voimakkaampi leviäminen injektointikohdasta alaspäin ja leviämisen etenemisestä oli tuloksissa merkkejä myös noin 80 mm injektointikohdasta alaspäin.

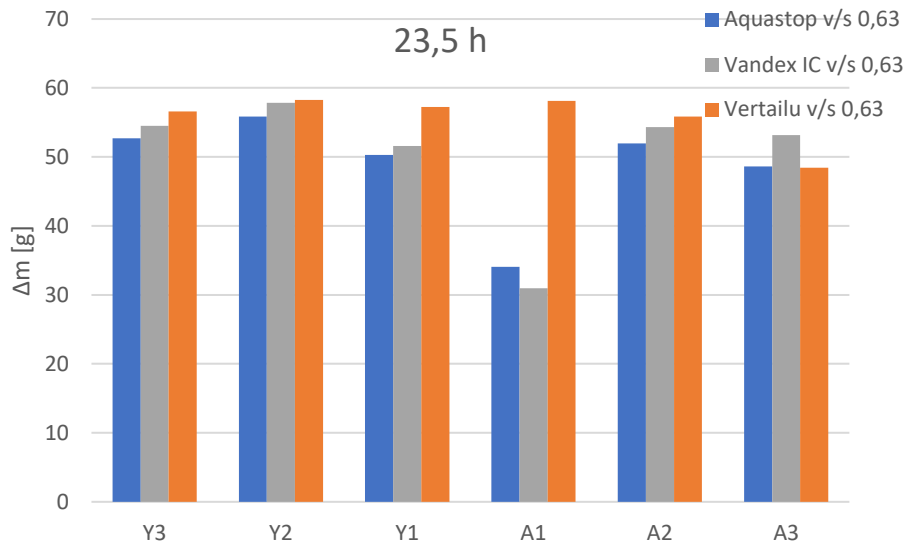
6.5.3 Geelimäiset tuotteet

Kuvissa 68–71 on geelimäisillä tuotteilla (Vandex IC ja Aquastop) käsiteltyjen koekappaleiden keskiarvollisen painonnousun tulokset asetettu pylväskaavioon samalta kohdalta sahattujen vertailukappaleiden tulosten kanssa.



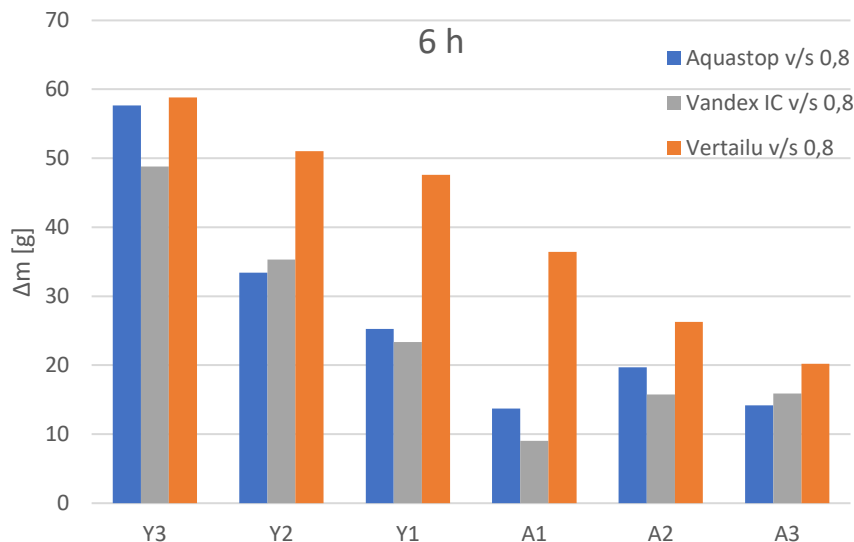
Kuva 68. Geelimäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden tunnin kohdalta.

Kuvan 68 perusteella v/s 0,63 tapauksessa kuuden ensimmäisen tunnin aikana kummallakin käsittelyllä aineella vesi oli injektoinnin kohdalta sahatuissa Y1 ja A1 kappaleissa imeytynyt keskiarvollisesti hitaammin käsiteltyihin kappaleisiin kuin vertailukappaleisiin.



Kuva 69. Geelimäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,63 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.

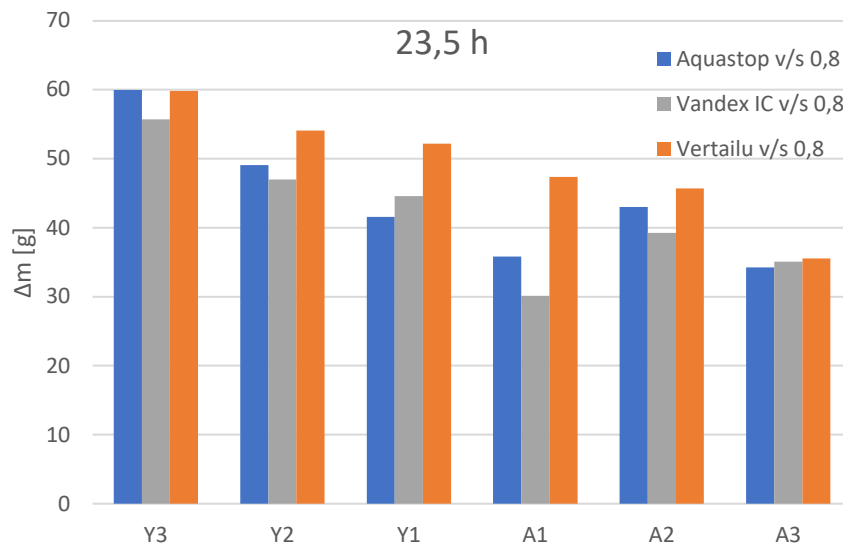
Kuvan 69 perusteella kokeen loppuun mennessä tämä ero tasoittui injektioonin yläpuolisissa kappaleissa Y1 keskiarvillisesti vähäiseksi, mutta alapuolisten kappaleiden A1 painonnousu jäi kokeen lopussakin keskiarvillisesti noin puoleen vertailukappaleen painonnoususta. Geelimäisten tuotteiden välillä erot imeytyneen veden määrässä A1 kappaleissa olivat kokeen lopussa keskiarvillisesti lähes olemattomia (alle 5 g).



Kuva 70. Geelimäisillä tuotteilla käsiteltyjen v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kuuden ensimmäisen tunnin kohdalta.

Kuvan 70 perusteella v/s 0,8 tapauksessa kuuden ensimmäisen tunnin aikana vesi imeytyi kaikissa tapauksissa keskiarvillisesti hitaammin käsiteltyihin kappaleisiin kuin vastaavalta kohdalta sahattuihin vertailukappaleisiin. Ainoa poikkeus oli Aquastop:lla käsi-

teltujen Y3 kappaleiden keskiarvotulos, joka oli samaa suuruusluokkaa vertailukappaleen tuloksen kanssa. Suurimmat erot imeytymisnopeuksissa vertailukappaleisiin nähden ilmenivät injektointikohdalta sahatuissa kappaleissa.



Kuva 71. Geelimäisillä tuotteilla käsiteltujen v/s 0,8 kappaleiden keskiarvotulokset suhteessa vertailukappaleiden tuloksiin kokeen lopussa.

Kuvan 71 perusteella lopullinen vedenimeytyminen oli useissa käsitellyistä kappaleista keskiarvollisesti vertailukappaleita vähäisempää, mutta erot olivat yleisesti kaventuneet vähäisiksi. Tästä poikkesi injektointikohdan alapuoliset A1 kappaleet, jotka olivat imeetneet vettä kokeen lopussa selkeästi erotettavasti vertailukappaleen imemää määrää vähemmän.

Kahdesta tutkitusta geelimäisestä ja silaanipohjaisesta aineesta kiinteämmän koostumuksen omaavan Vandex IC:n voitiin yleisesti tulosten perusteella todeta imeytyneen voimakkaammin huokoisempaan v/s 0,8 betoniin ja vaikuttaneen näissä koekappaleissa selvemmin myös noin 40 mm etäisyydellä injektointikohdasta. Vaikutus kappaleiden painonnousuun pysyi tällä etäisyydellä kuitenkin jokaisessa tapauksessa alle 10 g:ssa. Voimakkaampaa leviämisseuntaa ei myöskään tulosten perusteella pystytty päättämään.

Juoksevamman koostumuksen omaavan Aquastop:n vaikutus oli v/s 0,63 tapauksessa keskiarvollisesti hyvin yhtenäinen Vandex IC:n vaikutuksen kanssa. V/s 0,8 koekappaleiden tapauksessa aineiden välillä syntyi hieman suuremmat keskiarvolliset erot, mutta tehokkuus oli tässäkin tapauksessa aineiden välillä pääpiirteittäin yhtenevää. Tuotteiden tulosten välillä ei siis muodostunut selkeää eroa, vaikka koekappaleeseen viiden viikon aikana imeytyneen injektointiaineen määrässä oli injektointikohdalta otettujen kuvien 35 ja 36 mukaan eroa.

Molempien vesi-sementtisuhteiden tapauksissa Aquastop:n vaikutus näkyi keskiarvollisesti selvemmin injektointikohdan alapuolisissa A1 kappaleissa, mutta näitä etäämmällä injektointikohdasta aineen imeytymistä ei pystytty selkeästi erottamaan, koska keskiarvolliset erot olivat vertailukappaleiden tuloksiin nähden alle 10 g luokkaa.

Kuuden tunnin kohdalta imeytyksen aloituksesta muodostetuista pylväsdiagrammeista käy kuitenkin ilmi, että riippumatta koekappaleen vesi-sementtisuhteesta molemmilla tuotteilla on ollut vedenimeytymistä hidastava vaikutus vähintään 40 mm etäisyydellä injektointikohdasta.

6.6 Yhteenveto laboratoriotutkimuksista

Laboratoriotutkimusten tuloksissa havaittiin käsiteltyihin kappaleisiin imeytyneen veden vähäisempi määrä verrattuna käsittelemättömiin vertailukappaleisiin imeytyneen veden määrään. Tuloksissa on siten näkyvillä viitteitä injektointiaineiden aiheuttamista fysikaalisista ja kemiallisista reaktioista koekappaleiden huokosrakenteissa. Niiden seurauksena huokokset joko kaventuivat ja tukkiutuivat ja/tai niiden pinnat muuttuivat vettä hylkiviksi ja estivät näin osaltaan veden imeytymistä. Reaktioiden vaikutukset eivät kuitenkaan kokeen aikana olleet kokonaisvaltaisia, koska useissa tapauksissa aineilla oli kappaleisiin lähinnä kapillaarista kosteuden nousua hidastava vaikutus ja aineiden leviäminen ei yleisesti vaikuttanut yltävän uloimpiin, noin 80 mm päästä injektointikohdasta sahattuihin kappaleisiin.

Hydrofobisilla eli vettä hylkivillä tuotteilla selkein vaikutus kappaleiden vedenimukykyyn oli odotettavasti havaittavissa injektointikohdalta sahattuissa kappaleissa. Näistä injektointikohdan ylä- ja alapuolisista kappaleista hydrofobinen injektointiaine vaikutti tehokkaammin alapuolisen kappaleen vedenimukykyyn. Vaikka hidastunutta veden imeytymistä havaittiin myös noin 40 mm päässä injektointikohdasta sahattuissa kappaleissa, nousi näiden kappaleiden imemä vesimäärä lähes kaikissa tapauksissa kokeen lopussa lähelle vertailukappaleiden tasoa. Injektointiaineille ei pystytty kokeen perusteella määrittelemään yleistä voimakkaampaa leviämisuuntaa injektointikohdasta pidemmälle, koska suunta vaihteli riippuen koekappaleen vesi-sementtisuhteesta. Erot imeytyneen veden määrässä olivat muutenkin vähäisiä injektointikohdan ylä- ja alapuolisissa kappaleissa, kun näitä määriä verrattiin vastaavilta kohdilta sahattuihin vertailukappaleisiin imeytyneen veden määrään.

Suurempi vaikutus kahden eri vesi-sementtisuhteen välillä vaihteli injektointiainekohtaisesti. Vaikutuserot suhteiden välillä jäivät kokeessa muutenkin yleisesti melko pieniksi,

joten tutkimuksen mukaan betonin huokosrakenteella ei ilmennyt olevan merkittävää vaikutusta injektointiaineiden tehoon tai leviämiseen. Tutkimuksella huomattiin kuitenkin, että tuotteet, joiden pääasialliset injektointikohteet ovat muuratut rakenteen, pystyivät muuttamaan myös betonirakenteen kosteusteknistä käyttäytymistä. Betonirakenteiden erilaisella huokosrakenteella tiilirakenteisiin verrattuna saattoi kuitenkin tulosten perusteella olla merkitystä aineiden vaikutukseen ja leviämisenopeuteen, koska tuloksissa ei saatu näkymään aineiden tehokasta leviämistä koko koekappaleen alueelle. Toisaalta kokeessa käytettyjen koekappaleiden suuri huokoisuus saattoi asettaa haasteita esimerkiksi sementtipohjaiselle aineelle, jonka toiminta perustuu huokosten tukkimiseen.

Kuten tutkimustuloksista ja aineiden aistinvaraisesta imeytymisen tarkastelusta kävi ilmi, tuotteiden kemiallisten reaktioiden syntyemiselle ja aineen leviämislle vaadittavassa ajassa on eroja. Jotta injektointiaineiden leviäminen olisi ollut voimakkaampaa, olisi todennäköisesti tarvittu viittä viikkoa pidempi imeytysaika. Sementtipohjaisen tuotteen tapauksessa tehokkaamman reaktion aikaansaamiseksi olisi koekappaleiden kosteuspiitoisuuden pitänyt mahdollisesti olla jo injektointiaessa vieläkin suurempi. Tällöin olisi varmistettu kemiallisessa reaktiossa katalyyttinä toimivan veden riittävä määrä.

Koekappaleiden kuivaamisella tuuletetussa kaapissa ja korkeassa lämpötilassa ei pitäisi olla vaikutusta betoniin, mutta sillä saattoi kuitenkin olla negatiivinen vaikutus aineiden reaktioiden toimivuuteen. Vaikka tuotevalmistajien mukaan rakenteen kuivumisella ei ole vaikutusta aineen toimintaan, niitä ei todennäköisesti ole suunniteltu käytettäväksi yli 100 °C lämpötiloissa, joissa huokosveden kiehumispistelämpötila ylittyy.

Nestemäisten injektointiaineiden tapauksessa paineellisella injektointimenetelmällä olisi voitu saada aikaiseksi tehokkaampi vaikutus. Varsinkin parafiiniöljypohjaisen Isophob-K:n injektointi olisi todennäköisesti toiminut paremmin, koska orgaanisten liuotinpohjaisten aineiden on kansainvälisten tutkimusten mukaan todettu toimivan suurissa kosteuspiitoisuuksissa tehokkaammin paineellisesti injektoituina.

7. YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUKSET

Jälkikäteen maanvastaiseen rakenteeseen asennettavan kapillaarikatkon toteutukseen löytyy useita ratkaisuja. Tässä työssä käytiin eri vaihtoehtoista läpi mekaanisia-, injektointi-, sähkökineettisiä- ja tuuletusmenetelmiä. Muita menetelmiä tarkemmin keskityttiin käymään läpi injektointimenetelmillä toteutettavia kapillaarikatkovaihtoehtoja ja niiden toimintaperiaatteita. Lisäksi tarkasteltiin kapillaarikosteudesta ja sen mukana rakenteeseen kulkeutuneista suoista rakenteelle aiheutuvia vaurioita.

7.1 Tutkimusten vertailu

Luvussa 6 esitettyjen laboratoriotutkimuksen tulosten mukaan viiden viikon mittaisen aineen imeytymisajan jälkeen vedenimua ei saatu yhdessäkään tapauksessa täysin estettyä, mutta aineiden vaikutus näkyi tuloksissa hidastuneena vedenimeytymisenä. Tutkimustulokset ovat siltä osin yhteneviä aiemmin suoritettujen kansainvälisten tutkimuksien (ks. alaluku 4.6) kanssa. Työssä esitellyissä kansainvälisissä tutkimuksissa todettiin eri kemiallisten tuotteiden toimivuuden olevan vaihtelevaa, eikä yhdenkään tuotteen todettu muuttavan rakennetta täysin vettä läpäisemättömäksi pitkänkään vaikutusajan jälkeen.

Lisäksi aiemmin laadituissa kansainvälisissä tutkimuksissa on ilmennyt paineettomasti asennettavassa injektointiratkaisuissa paremmaksi valinnaksi orgaanisten liuotinpohjaisten aineiden sijaan vesipohjaisten aineiden käyttäminen, koska nämä kykenevät sekoittumaan huokosveden sekaan ja etenemään näin kapillaarisesti kyllästyneessäkin rakenteessa. Tästä väitteestä poiketen laboratoriotutkimuksessa ei esiintynyt aineiden vaikutuksissa suurta ja selkeää eroa nestemäisten vesipohjaisen ja orgaanisen parafiiniöljypohjaisen aineen välillä. Tilanne olisi voinut olla toinen, jos koekappaleiden kosteuspiitoisuus olisi pidetty korkeana estämällä niiden kuivuminen aineiden imeytymisen ajan. Suurten erojen syntymiselle olisi mahdollisesti myös tarvittu viittä viikkoa pidempi vaikutusaika. Ylipäätään ympäristölle haitallisten liuotinpohjaisten tuotteiden myynti vaikuttaa Suomessa loppuneen ja tuotteet ovat pääsääntöisesti vesipohjaisia.

7.2 Johtopäätökset

Kapillaarikatkoinjektoinnit tulisi tutkimuksen perusteella liittää osaksi suurempaa korjausratkaisujen kokonaisuutta, eikä käyttää vain yksittäisenä korjausmenetelmänä kapillaarista kosteudenousua vastaan. Koska toimivan injektoidun kapillaarikatkon vaikutus ei

ole välitön vaan sen muodostuminen vaatii aikaa, on korjauskokonaisuuden onnistumisen edellytyksenä kohteeseen sopivan injektoinnin valitsemisen lisäksi, että maanvastaisen rakenteiden kuivuminen on varmistettu hyvin vesihöyryä läpäisevillä sisäpuolisilla pinnoitteilla. Toimivan pinnoitteen ansioista kosteus pääsee haihtumaan rakenteen pinnalta eikä sen pitoisuus näin kerry haitallisen suureksi rakenteen sisällä. Kellarin seiniä mietittäessä rakenteen tulee olla ulkopuolelta lämmöneristetty ja vaakasuuntainen kapillaarikosteuden eteneminen rakenteeseen tulee olla estetty mekaanisella vedeneristeellä. Tällöin seinärakenne pysyy lämpimämpänä ja ilman suhteellinen kosteus rakenteessa matalampana. Rakenteen sisältä kuivumisen yhteydessä kulkeutuvia ja rakenteen pintaan kiteytyviä suoloja voidaan kontrolloida käyttämällä pinnoitteena suolanke- räyslaasteja, joiden tulee myös olla vesihöyryä läpäiseviä.

Toimivimman jälkikäteen asennettavan kapillaarikatkon toteuttamistavan valitsemiseksi tulee tutustua rakenteessa vallitseviin olosuhteisiin ja sen huokosrakenteeseen. Kemialliset injektointiaineet vaikuttavat tutkimuksen perusteella olevan monikäyttöisimpiä, koska niitä voidaan hyödyntää sekä muuratuissa että betonirakenteissa. Oleellista on huokosrakenteesta ja kosteuspitoisuudesta riippuen määrittää injektoinnille joko paineeton tai paineellinen asennusmenetelmä. Asennusmenetelmällä ja käytetyllä aineella sekä niiden yhteensopivuudella on myös oleellinen vaikutus tehokkaan kapillaarikatkon muodostumiseen vaadittavaan aikaan.

7.3 Jatkotutkimukset

Jatkotutkimustarvetta tämän työn tulosten perusteella jäi mm. kapillaarisen kosteuden nousun kehittymisen seuraamisesta pidemmällä aikavälillä, pidemmän aineiden imeytymisajan jälkeen ja korkeammilla koekappaleilla, jolloin kapillaarinen kyllästyminen ei tapahtuisi vertailukappaleissa ensimmäisen 24 tunnin aikana ja muodostuvat erot olisivat mahdollisesti selkeämpiä. Samalla voitaisiin testata paineellisesti ja paineettomasti asennettavien injektointiaineiden toiminnallisia eroja sekä mahdollisia aineiden käyttäytymiseroja tiili- ja betonirakenteiden välillä.

Käytännön tuloksia voitaisiin kerätä myös korjauskohteilta, joissa injektoidut aineet ovat päässeet vaikuttamaan jo useamman vuoden ajan, jolloin saataisiin osviittaa aineiden pitkäaikaiskäyttäytymisestä eri injektointiolosuhteissa. Kapillaarikatkojen yhteistoimintaa eri pinnoitteiden kanssa olisi myös mielekästä tutkia, koska ne muodostavat kohteissa korjauskokonaisuuden. Sähkökineettisten ja seinän alaosan tuuletukseen perustuvien menetelmien mahdollinen yleistymisen Suomessa synnyttää myös lisätutkimustarpeen.

LÄHTEET

- [1] E. Franzoni, Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge, *Construction & building materials*, vol. 54, 2014, s. 123–136, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.054.
- [2] J. Holmström, K. Nieminen, M. Pitkäranta, Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus, Helsinki: Ympäristöministeriö, 2016, 234 s.
- [3] RIL 225-1-2014 Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2014, 500 s.
- [4] C.-E. Hagentoft, *Introduction to Building Physics*, Lund: Studentlitteratur, 2001, 442 s.
- [5] V. Leivo ja J. Rantala, Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 2002, 106 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-2011041510698>
- [6] V. Leivo ja J. Rantala, Maanvastaisten alapohjarakenteiden lämpö ja kosteus, Helsinki: Rakennusteollisuuden kustannus RTK, 2006, 59 s.
- [7] V. P. De Freitas *et al.*, Heat, air and moisture transfer terminology: Parameters and concepts, Internatio, FEUP edições, 2012, 50 s.
- [8] M. Pinterić, *Building Physics: From physical principles to international standards*, University of Maribor, 2017, 256 s.
- [9] J. Vinha, RTEK-3511 Rakennusfysiikka, Luentomoniste 2011, osa 2, Tampereen teknillinen yliopisto / Rakennustekniikan laitos, 2011, 246 s.
- [10] H. Butt ja M. Kappl, *Surface and Interfacial Forces (2nd Edition): 5. Capillary Forces*, Weinheim: Wiley-VCH, 2018, s. 131–166, Saatavissa: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CY8DA1/surface-interfacial-forces>.
- [11] E. Tuominen, Laastien ja betonien kapillaarisuusominaisuuksien määrittäminen vapaan veden imeytyskokeella, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos, 2016, 141 s., Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-201604283886>
- [12] H. Hens, *Building physics: heat, air and moisture, fundamentals and engineering methods with examples and exercises*, 2nd edition, Berliini: Ernst & Sohn, 2012, 315 s.

- [13] BY 201 Betonitekniiikan oppikirja 2018, kuudes päivitetty painos, Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry, 2018, 568 s.
- [14] Poltetut tiilet, Rakennustietosäätiö RTS, RT-103281, 2020, 8 s.
- [15] P. D. P. Kumar Mehta ja P. D. Paulo J. M. Monteiro, Durability, Concrete: microstructure, properties, and materials, 4th edition, New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [16] Mikrobien terveyshaitat, Sisäilmayhdistys, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.5.2021) <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Terveysvaikutukset/Mikrobien-terveyshaitat>.
- [17] P. Russell, Efflorescence and the Discoloration of Concrete, First edition, Boca Raton, FL: CRC Press, 2014, 56 s.
- [18] J. Lahdensivu, I. Weijo, K. Ruuska-Jauhijärvi, ja H. Pyy, Betonijulkisivun kuntotutkimus 2019 , 4. päivitetty painos, Helsinki: BY-Koulutus Oy, 2019, 136 s.
- [19] H.-L. Wang, J.-G. Dai, X.-Y. Sun, ja X.-L. Zhang, Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration, Construction & building materials, vol. 107, 2016, s. 216–225. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.002.
- [20] D. Conciatori, H. Sadouki, ja E. Brühwiler, Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete, Cement and concrete research, vol. 38, no. 12, 2008, s. 1401–1408. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.06.006>.
- [21] M. Pigeon ja R. Pleau, Durability of Concrete in Cold Climates, First edition, Boca Raton, FL: CRC Press, 2014, s. 212.
- [22] J. M. P. Q. Delgado, A. S. Guimarães, V. P. De Freitas, I. Antepará, V. Kočí, and R. Černý, Salt Damage and Rising Damp Treatment in Building Structures, Advances in materials science and engineering, vol. 2016, 2016, s. 1–13. doi: 10.1155/2016/1280894.
- [23] H. Siedel, Salt efflorescence as indicator for sources of damaging salts on historic buildings and monuments: a statistical approach, Environmental earth sciences, vol. 77, no. 16, 2018, s. 1–20. doi: 10.1007/s12665-018-7752-4.
- [24] M. Koniorczyk ja M. Wojciechowski, Influence of salt on desorption isotherm and hygral state of cement mortar - Modelling using neural networks, Construction and Building Materials, vol. 23, no. 9, 2009, s. 2988–2996. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.05.001.
- [25] S. Gupta, H. P. Huinink, M. Prat, L. Pel, ja K. Kopinga, Paradoxical drying of a

- fired-clay brick due to salt crystallization, *Chemical Engineering Science*, vol. 109, 2014, s. 204–211. doi: 10.1016/j.ces.2014.01.023.
- [26] B. Lubelli, R. P. J. Van Hees, ja H. J. P. Brocken, Experimental research on hygroscopic behaviour of porous specimens contaminated with salts, *Construction and Building Materials*, vol. 18, no. 5, 2004, s. 339–348. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.02.007.
- [27] K. Ma, Y. Xie, G. Long, ja J. Huang, Experimental study on salt solution ingress into concrete under capillary siphon effect, *Advanced materials research*, vol. 150–151, 2011, s. 788–791. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.150-151.788.
- [28] C. Dow ja F. P. Glasser, Calcium carbonate efflorescence on Portland cement and building materials, *Cement and concrete research*, vol. 33, no. 1, 2003, s. 147–154. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00937-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00937-7).
- [29] Efflorescence - Designing Buildings Wiki, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.4.2021) <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Efflorescence>.
- [30] Environmental Deterioration of Materials, *Environmental Deterioration of Materials*. 2007, doi: 10.2495/978-1-84564-032-3.
- [31] Päivittyvä ohje betonin alkali-kiviainesreaktion hallitsemiseksi, Suomen Betoniyhdistys ry, 2021, 55 s. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.10.2021) https://issuu.com/betoniyhdistys/docs/akr_pa_ivittyva_ohje_24.6.2021.
- [32] V. Valutie, Alkalikiviainesreaktio ja sen vaikutukset betonirakenteisiin, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto / Rakennustekniikan laitos, 2020, 96 s. Saatavissa <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202004213443>
- [33] H. Pyy, E. Holt, ja M. Ferreira, Esitutkimus alkalikiviainesreaktiosta ja sen esiintymisestä Suomessa, VTT, 2012, 27 s. Saatavissa https://julkaisut.vayla.fi/sillat/bts2011_akr_report_fin.pdf.
- [34] M. Como, Statics of Historic Masonry Constructions, Vol. 5, Cham: Springer International Publishing AG, 2016, 649 s.
- [35] F. Frössel, Nachträgliche Horizontalabdichtung gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit, *Mauerwerk-Kalender 2009*, Berliini, Saksa: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 2009, s. 397–429. doi: 10.1002/9783433600306.ch9.
- [36] P. Lopez-Arce, E. Doehne, J. Greenshields, D. Benavente, ja D. Young, Treatment of rising damp and salt decay: the historic masonry buildings of

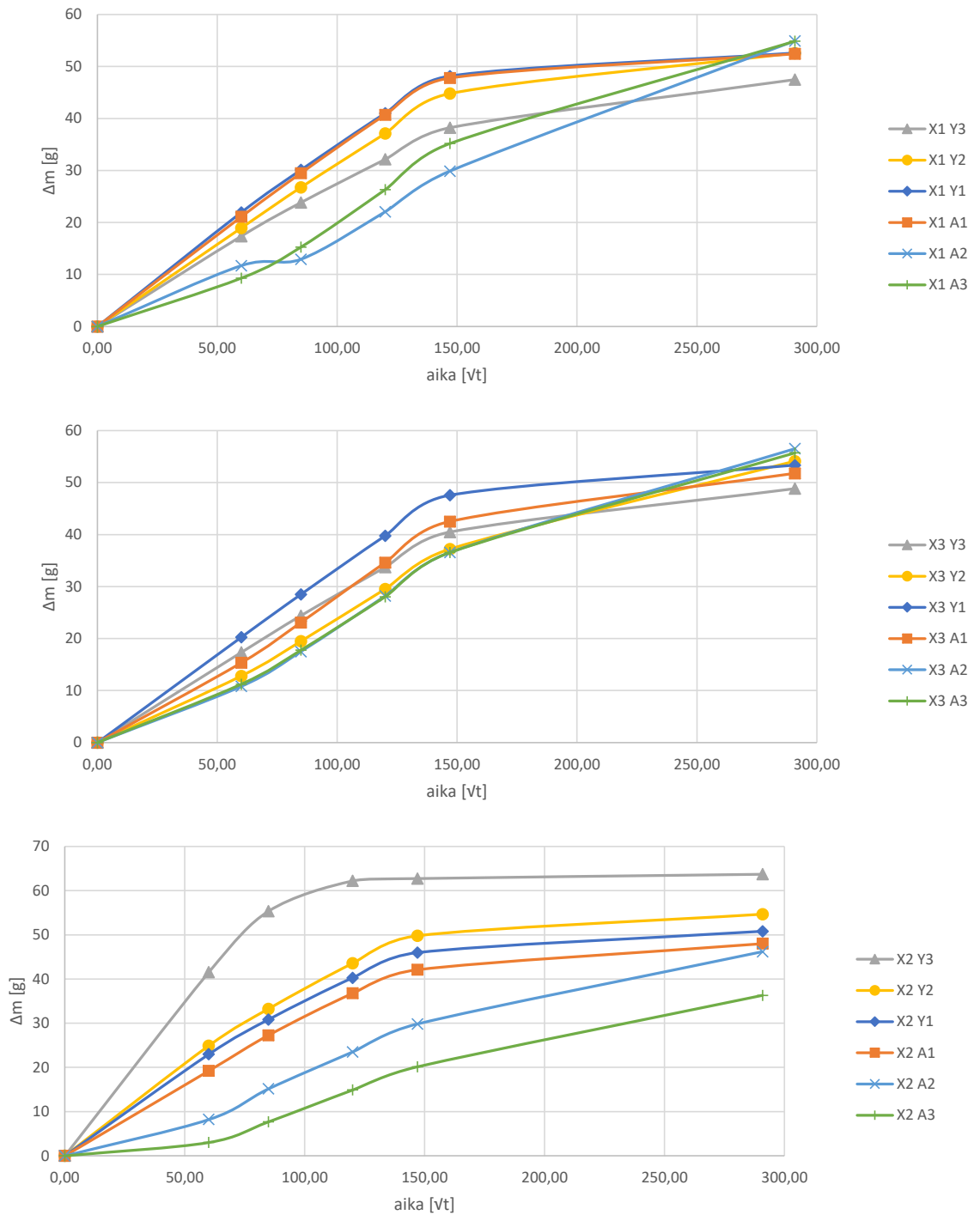
- Adelaide, South Australia, *Materials and structures*, vol. 42, no. 6, 2009, s. 827–848. doi: 10.1617/s11527-008-9427-1.
- [37] J. Dreyer ja C. Hecht, Paraffin Wax - An Ecological Water Repellent Agent, *Proc. Hydrophobe II*, 1998, s. 35–48. Saatavissa: http://www.hydrophobe.org/pdf/zurich/II_04.PDF
- [38] Isophob-K Infomappe, Hydro Chemie Süd GmbH & Co. KG, verkkoaineisto, 12 s. Saatavissa (viitattu 5.2.2021) <https://isophob.de/pages/xzFt9zeYSk5KjigSBwYW/Umkn8ZuasAyd3vJqvxez>
- [39] D. Fischer ja U. Wirringa, Wirkung mit Winkel, 2009, 11 s. Saatavissa: https://www.koster.eu/de_en/prodid-95-2410/crisin+76+concentrate.html.
- [40] J. Weber ja V. Hafkesbrink, WTA-Merkblatt 4-10: Injektionsverfahren mit zertifizierten Injektionsstoffen gegen kapillaren Feuchtetransport, Bauwerksabdichtung in der Altbausanierung, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, s. 911–939.
- [41] I. Torres ja V. P. de Freitas, The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings, *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 8, 2010, s. 1331–1339. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.004.
- [42] B. Lubelli, R. P. J. van Hees, ja J. Bolhuis, Effectiveness of methods against rising damp in buildings: Results from the EMERISDA project, *Journal of cultural heritage*, vol. 31, no. Supplement, 2018, s. 15–S22. doi: 10.1016/j.culher.2018.03.025.
- [43] C. Simlinger, Erfolgskontrolle nachträglicher Maßnahmen gegen aufsteigende Feuchtigkeit, *Mauerwerk*, vol. 11, no. 2, 2007, s. 87–92. doi: 10.1002/dama.200700310.
- [44] M. Balak, Injektionsverfahren zur nachträglichen Abdichtung von Mauerwerk – neueste Erkenntnisse, vol. 11, 2007, s. 81–86. doi: 10.1002/dama.200700308.
- [45] B. Lubelli, R. P. J. van Hees, ja A. Hacquebord, Experimental study of the distribution of chemical products against rising damp in substrates with different water saturation degrees, *Construction and Building Materials*, vol. 40, 2013, s. 891–898. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.062.
- [46] A. Sardella, P. De Nuntiis, ja A. Bonazza, Efficiency evaluation of treatments against rising damp by scale models and test in situ, *Journal of cultural heritage*, vol. 31, 2018, s. S30–S37. doi: 10.1016/j.culher.2018.03.020.

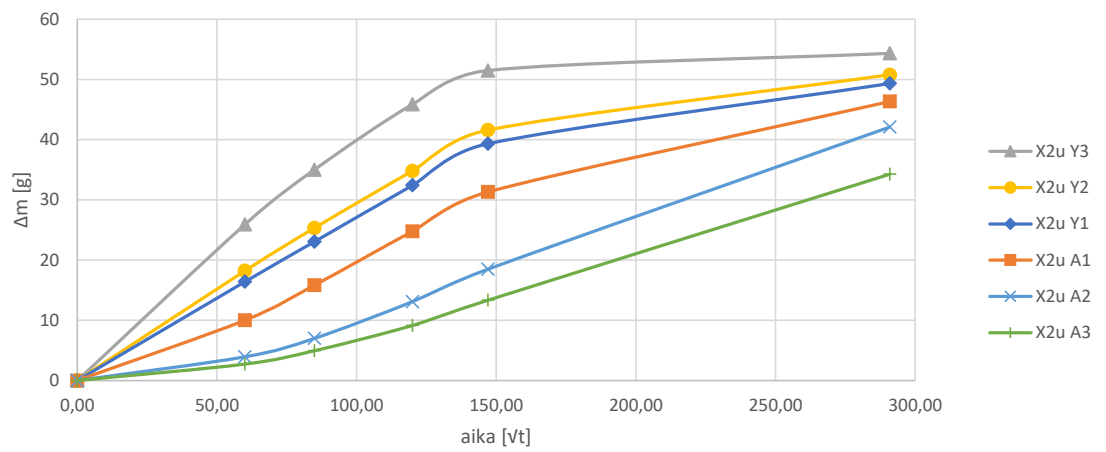
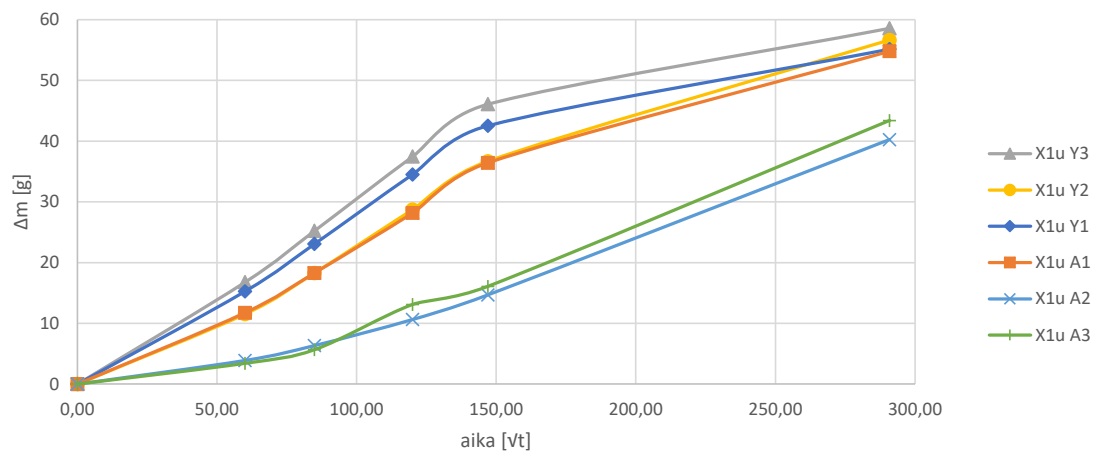
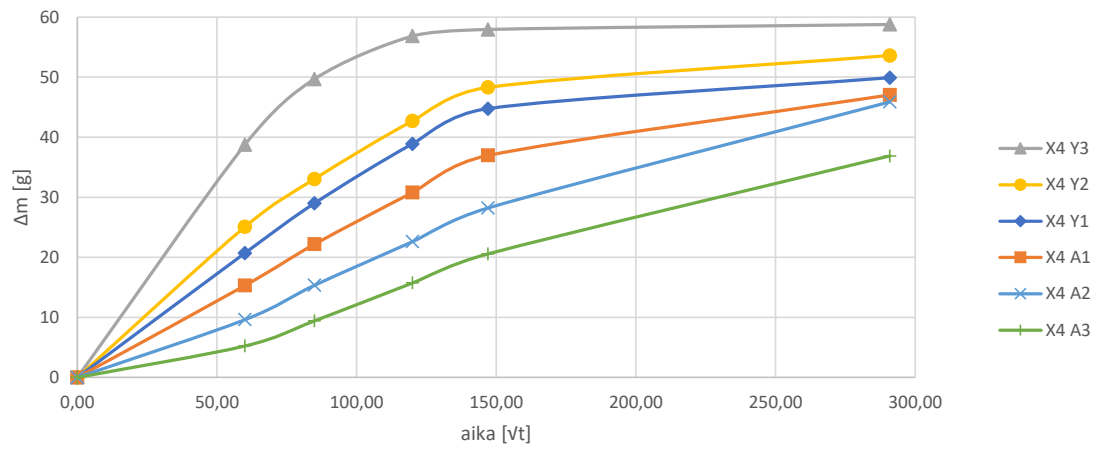
- [47] A. Sardella, P. De Nuntiis, M. Rizzo, C. Giosuè, F. Tittarelli, ja A. Bonazza, In situ performance evaluation of chemical injections against rising damp: A case study in Italy, *Measurement : journal of the International Measurement Confederation*, vol. 130, 2018, s. 128–136 doi: 10.1016/j.measurement.2018.08.011.
- [48] G. Alfano, C. Chiancarella, E. Cirillo, I. Fato, ja F. Martellotta, Long-term performance of chemical damp-proof courses: Twelve years of laboratory testing, *Building and environment*, vol. 41, no. 8, 2006, s. 1060–1069. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.04.017.
- [49] A. Hacquebord, B. Lubelli, R. van Hees, ja T. Nijland, Evaluation of Spreading and Effectiveness of Injection Products against Rising Damp in Mortar/Brick Combinations, *Procedia chemistry*, vol. 8, 2013, s. 139–149 doi: 10.1016/j.proche.2013.03.019.
- [50] A. Struhárová, Chemical grouting method and its effectiveness for protection of autoclaved aerated concrete masonry, *Advanced materials research*, vol. 923, no. 2014, 2014, s. 112–116 doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.923.112.
- [51] Technical Datasheet Silane-based injection cream for the subsequent horizontal Technical Datasheet, Saint-gobain Weber GmbH, 2019. Saatavissa: https://export.de.weber/pdf/tm/weber.tec.946_EN_11.11.2019.pdf.
- [52] Vandex-korjausmenetelmät: muurattujen rakenteiden kapillaarikatko, suolankeräysrappaus ja lämmöneristysrappaus. Rakennustietosäätiö RTS, RT-38597, 2014.
- [53] Aquastop technical data sheet, TPH Bausysteme, 2015. Saatavissa: https://www.tph-bausysteme.com/downloads/TD_AQUASTOP_en.pdf.
- [54] “PC ® Aquadry Gel, Semtu Oy, 2016. Saatavissa: <https://www.semtu.fi/application/files/5015/2189/4639/PC-Aquadry-Gel-esite.pdf>.
- [55] Köster Crisin Cream, Köster Bauchemie Ag, 2017. Saatavissa: https://koster.fi/files/tds/files/fi_fi/TechDataSheet_M_278_KÖSTER_Crisin_Cream_fi_fi_2017-09-06_120425.pdf.
- [56] Technical Datasheet weber.tec 940 E, Saint-gobain Weber GmbH, 2018. Available: https://export.de.weber/pdf/tm/weber.tec.940_E_EN_29.05.2018.pdf.
- [57] KÖSTER Crisin 76 Concentrate, Köster Bauchemie Ag, 2019. Saatavissa: https://www.koster.fi/files/tds/files/fi_fi/TechDataSheet_M_279_KÖSTER_Crisin_76_Concentrate_fi_fi_2019-01-31_153130.pdf.

- [58] Hydrophobierende Injektions-Sperre, Hydro Chemie Süd GmbH & Co. KG, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 5.2.2021): <https://isophob.de/pages/xzFt9zeYSk5KjigSBwYW/Umkn8ZuasAyd3vJqvxez>
- [59] Kapillaarikatkon injektointi, Saint-Gobain Finland Oy, 2019. Saatavissa: <https://www.fi.weber/files/fi/2019-05/Kapillaarikatkon-injektointi-Ratkaisukortti.pdf>.
- [60] Xypex Concentrate, Xypex Chemical Corporation, 2016. Saatavissa: [https://www.xypex.com/docs/default-source/product-data-library/product-data-\(aus\)/\(a4-aus\)-concentrate.pdf?sfvrsn=dfc31ce3_18](https://www.xypex.com/docs/default-source/product-data-library/product-data-(aus)/(a4-aus)-concentrate.pdf?sfvrsn=dfc31ce3_18).
- [61] Vandex VIM -injektointilaasti, Muottikolmio Oy, 2016. Saatavissa: <http://www.muottikolmio.fi/wp-content/uploads/2016/03/Vandex-VIM.pdf>.
- [62] Freeztec tekninen esite, Insinööritoimisto Sulin Oy, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 23.8.2021): [https://www.sulinoy.fi/files/FREEZTEQ tekninen esite.pdf](https://www.sulinoy.fi/files/FREEZTEQ_tekninen_esite.pdf).
- [63] The World Standard in Concrete Waterproofing by Crystallization, Chemical Corporation Xypex, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 8.3.2021) <https://www.xypex.com/about/no-equal>.
- [64] Xypex Concentrate -tuotteen tiedot, Insinööritoimisto Sulin Oy, 2017. Saatavissa: [https://www.xypex.com/docs/default-source/product-data-library/product-data-\(finland\)/2017-08-concentrate-\(a4\)-finland.pdf?sfvrsn=86d0269_0](https://www.xypex.com/docs/default-source/product-data-library/product-data-(finland)/2017-08-concentrate-(a4)-finland.pdf?sfvrsn=86d0269_0).
- [65] SFS-EN ISO 15148: Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water absorption coefficient by partial immersion, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2003, 13 s.
- [66] SFS-EN 772-11: Muurauskappaleiden testimenetelmiä. Osa 11: Betoniharkkojen, höyrykarkaistujen kevytbetoniharkkojen sekä keinokivi- ja luonnonkivimuurauskappaleiden kapillaarisen vedenimukyvyyn ja poltettujen tiilien vedenalkuimunopeuden määrittäminen, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012, 11 s.
- [67] Betonin suhteellisen kosteuden mittausta, Rakennustietosäätiö RTS, RT-103333, 2021, 29 s.

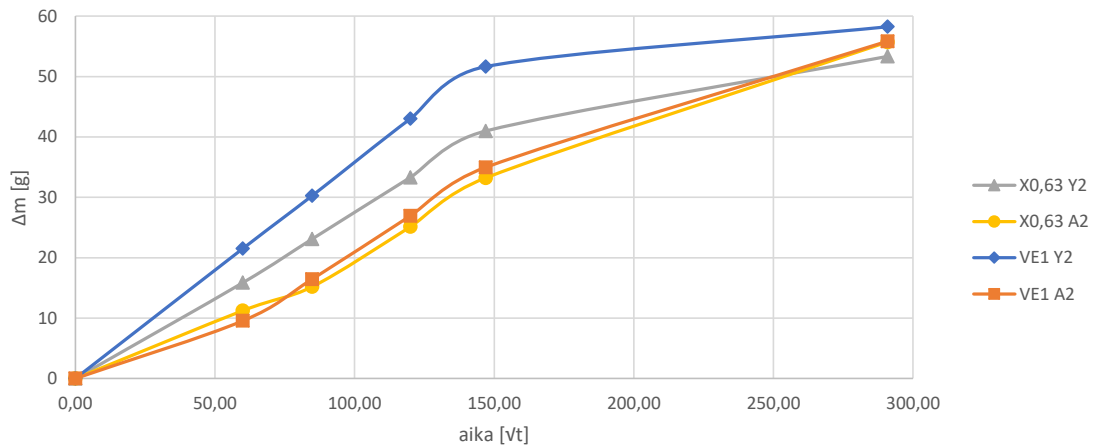
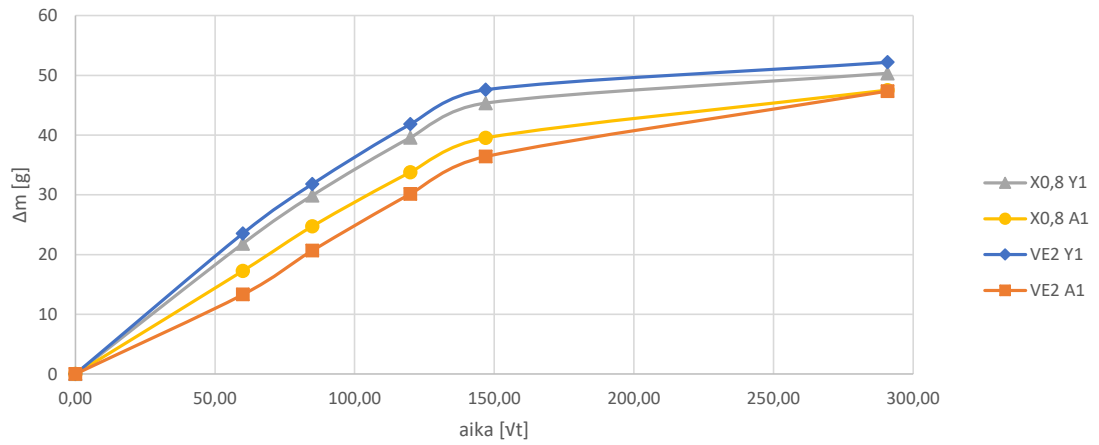
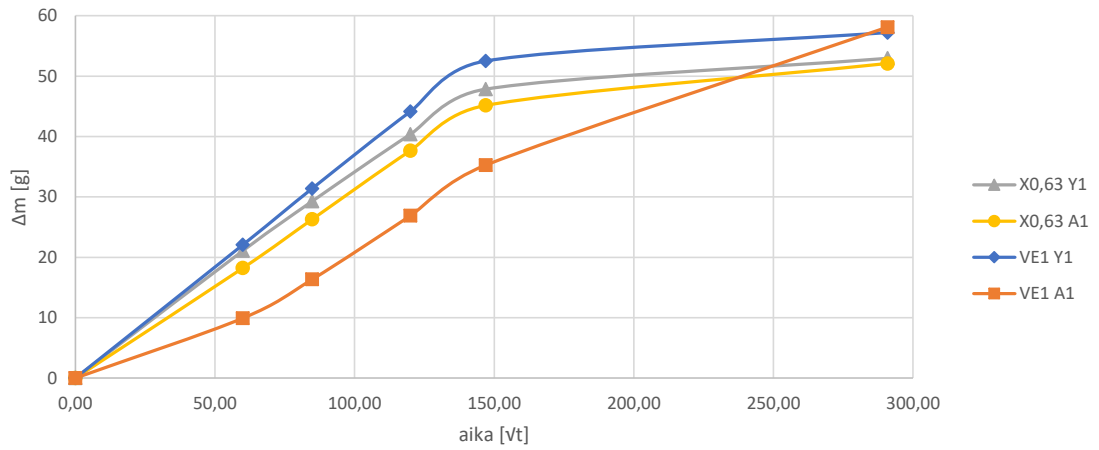
LIITE A:

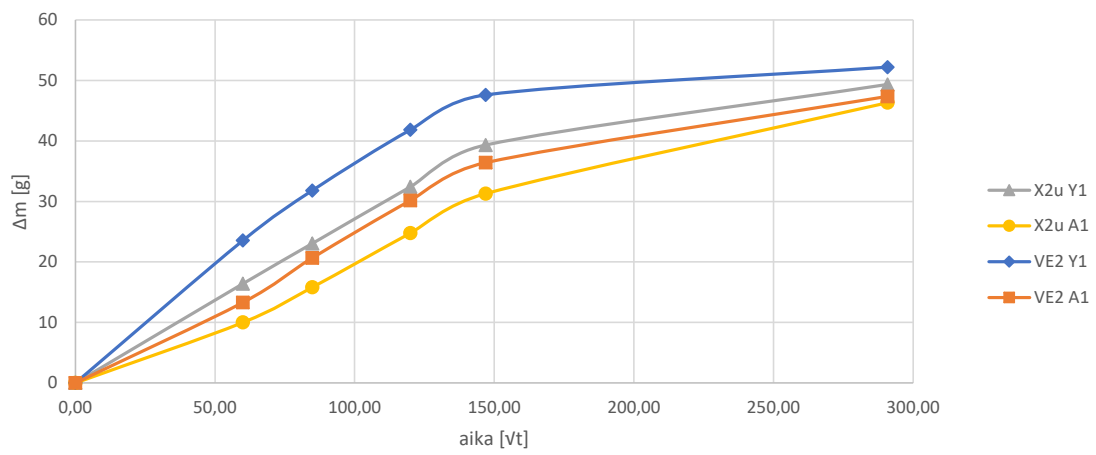
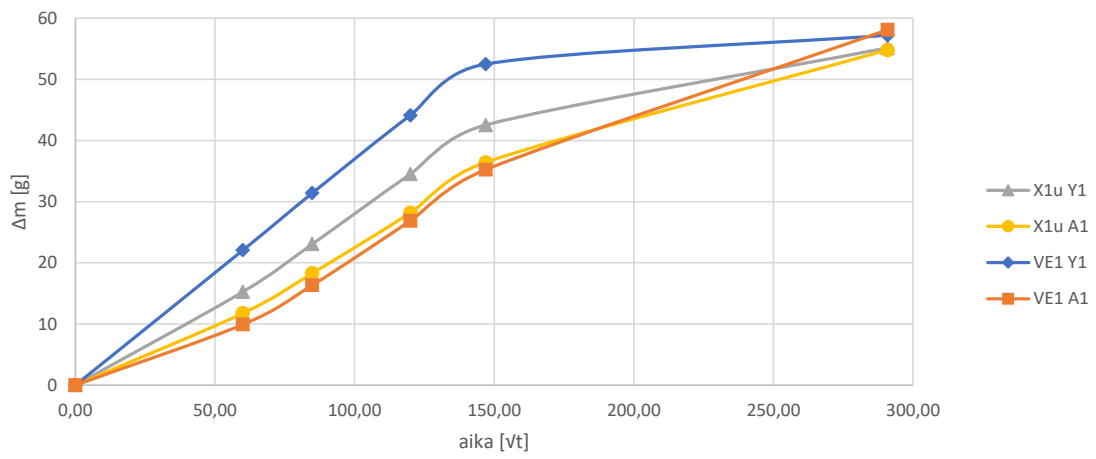
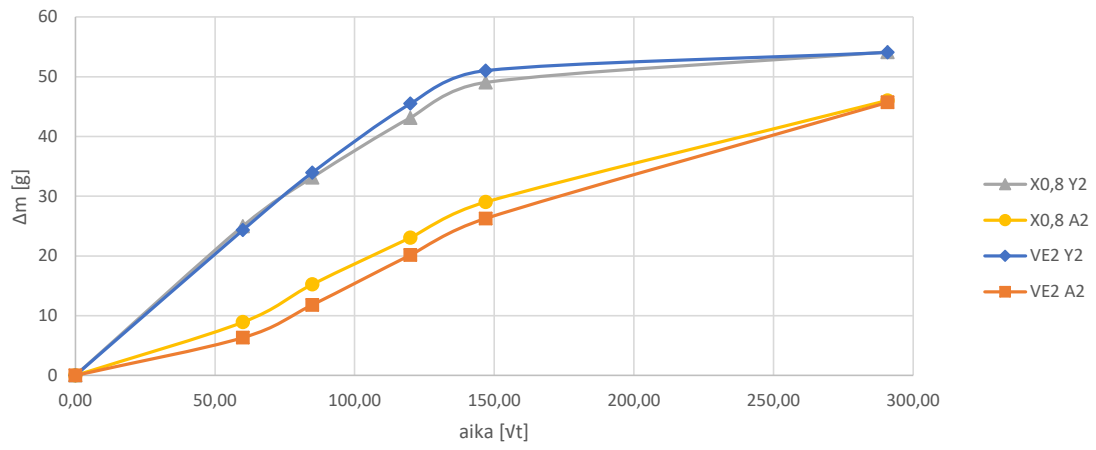
Xypex Concentrate

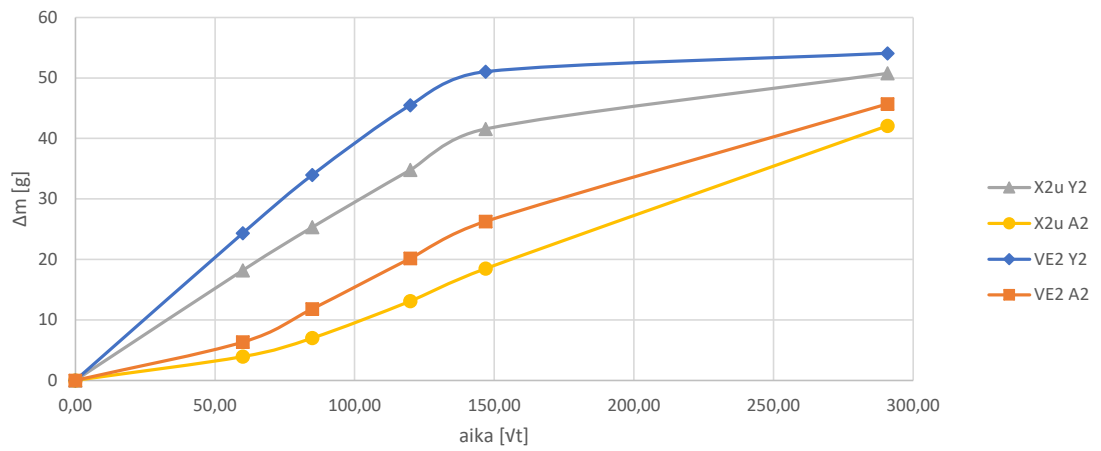
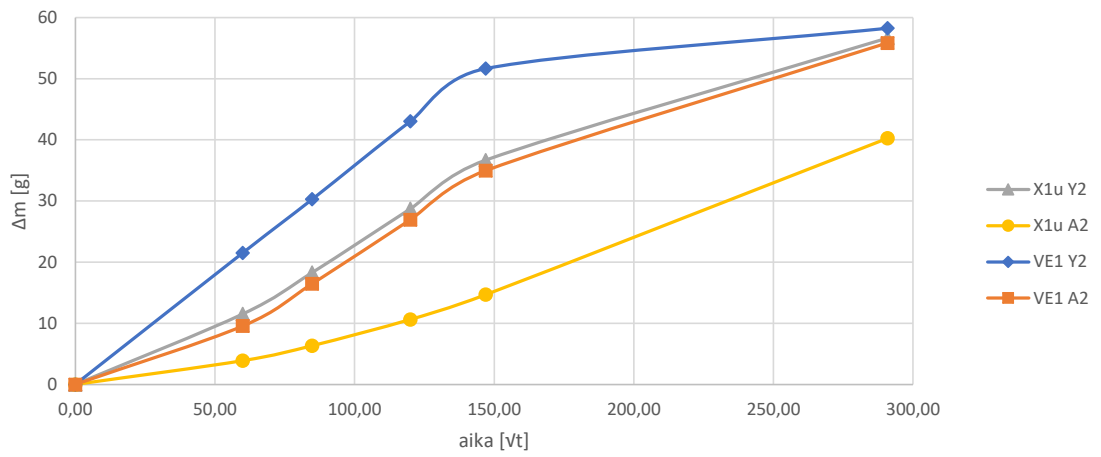




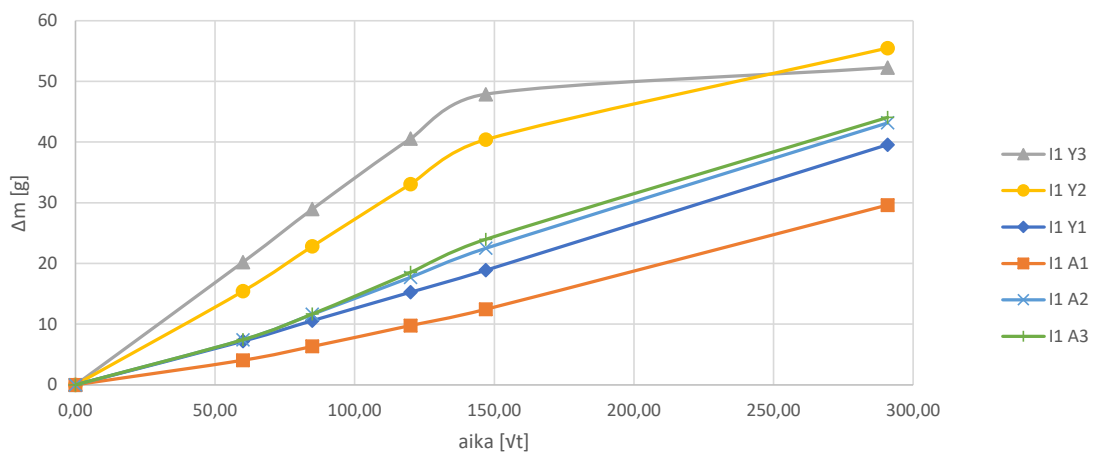
Xypex Concentrate vertailu

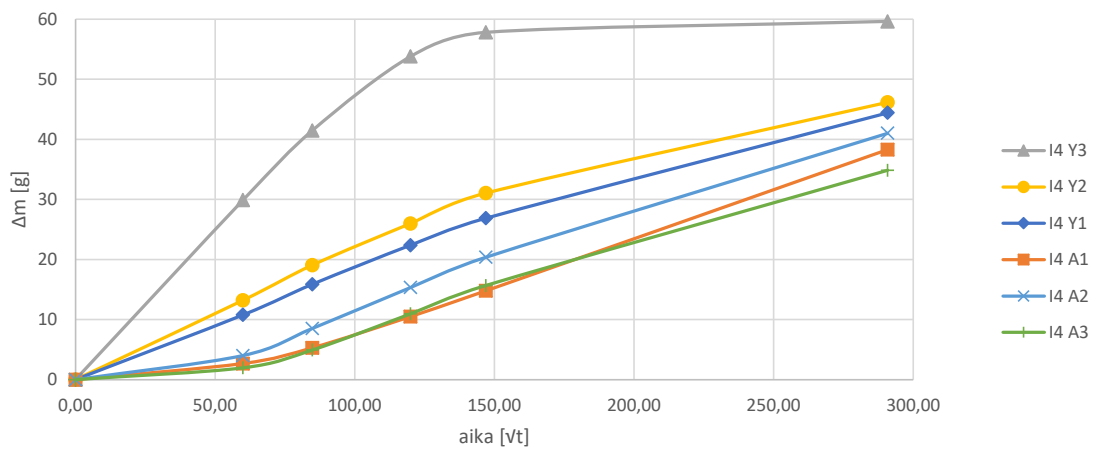
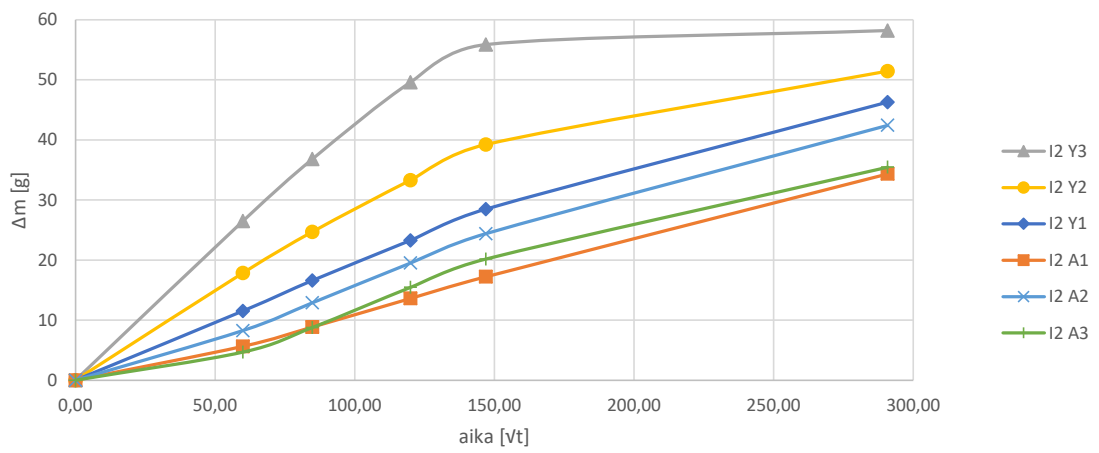
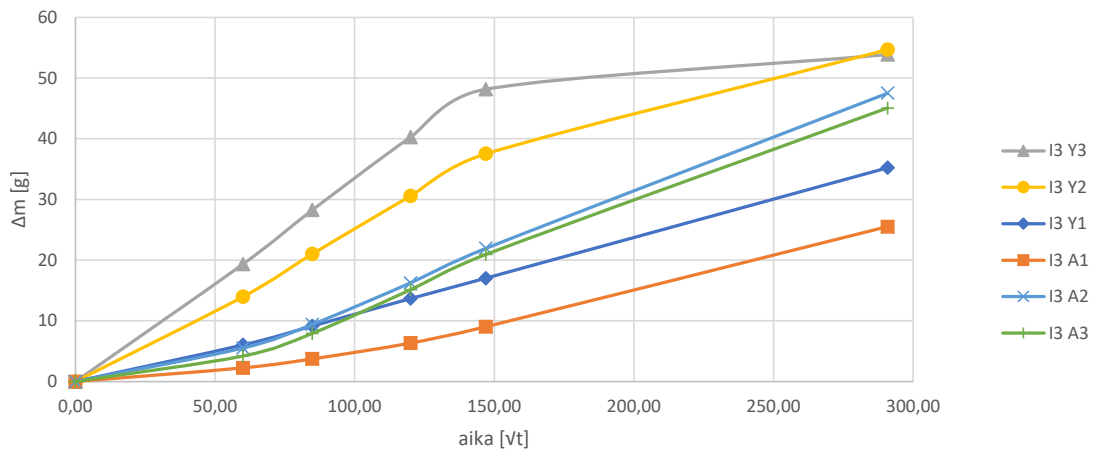




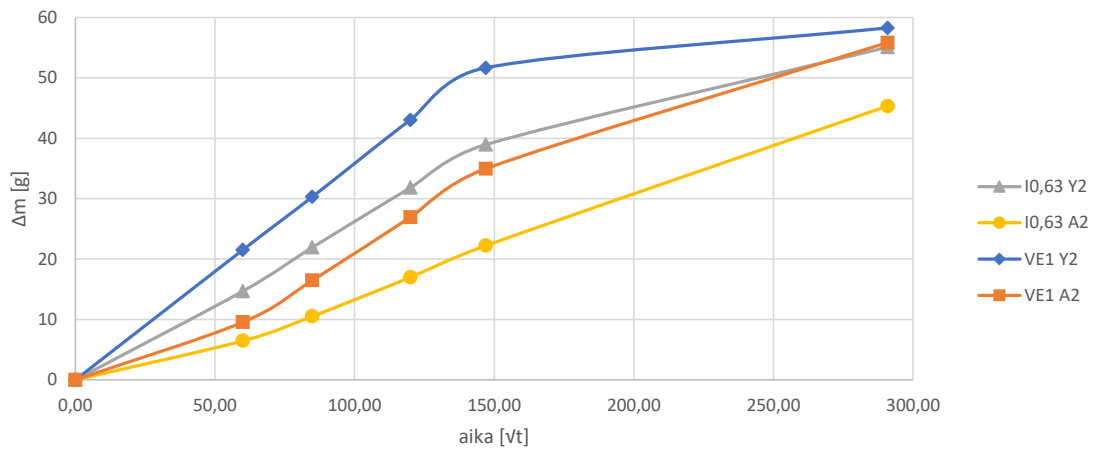
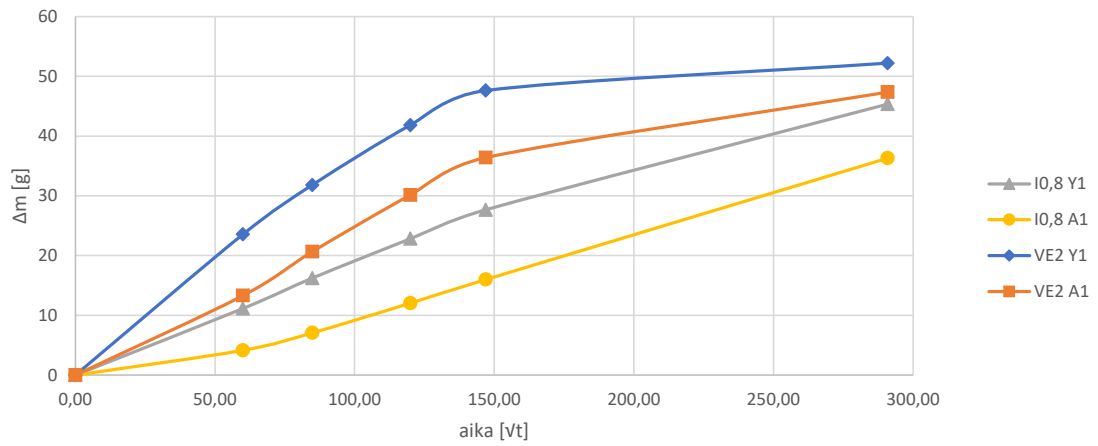
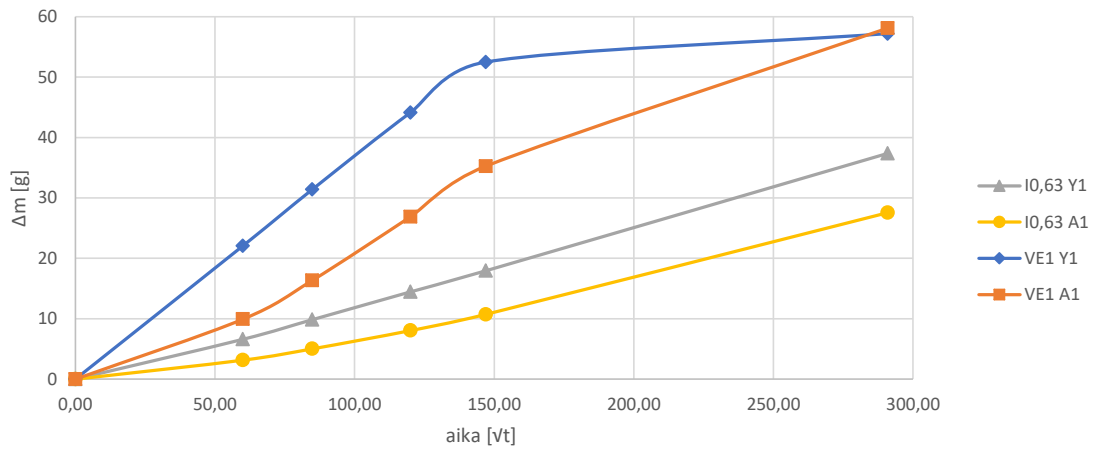


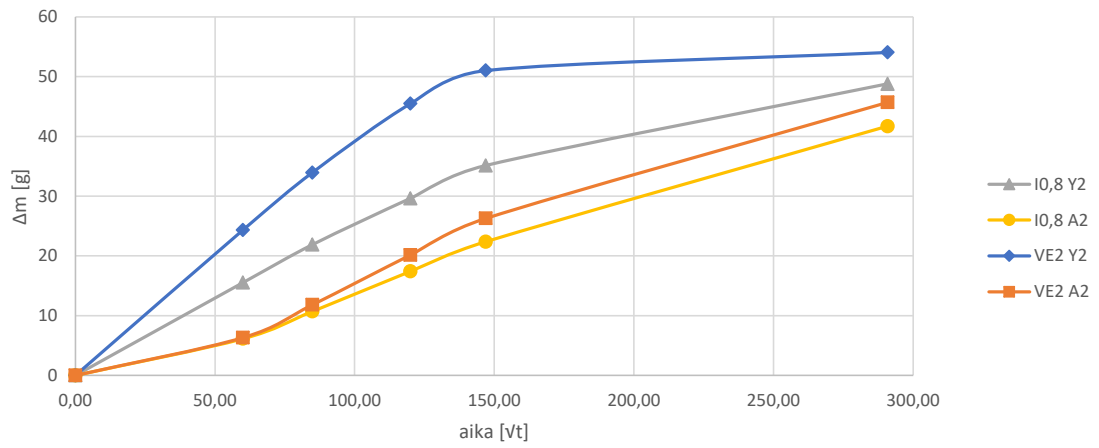
Isophob-K tulokset



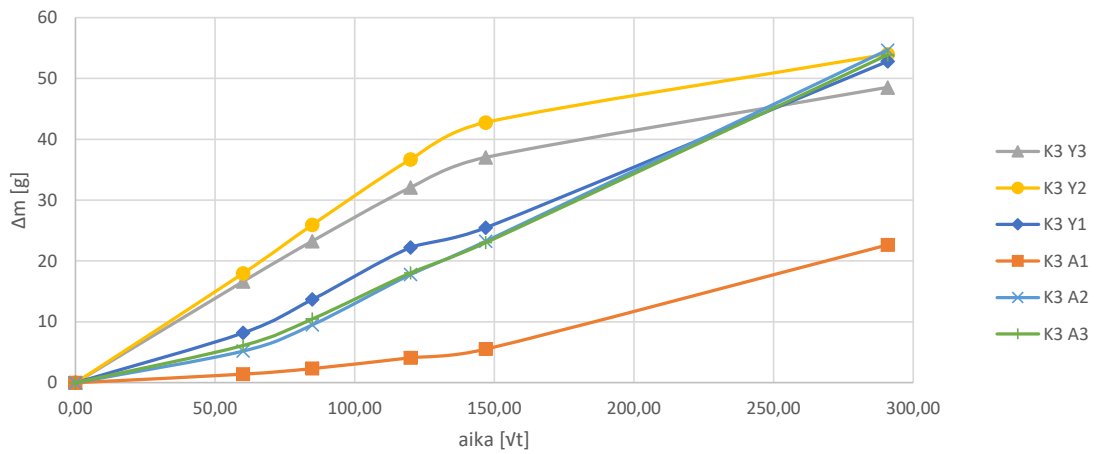
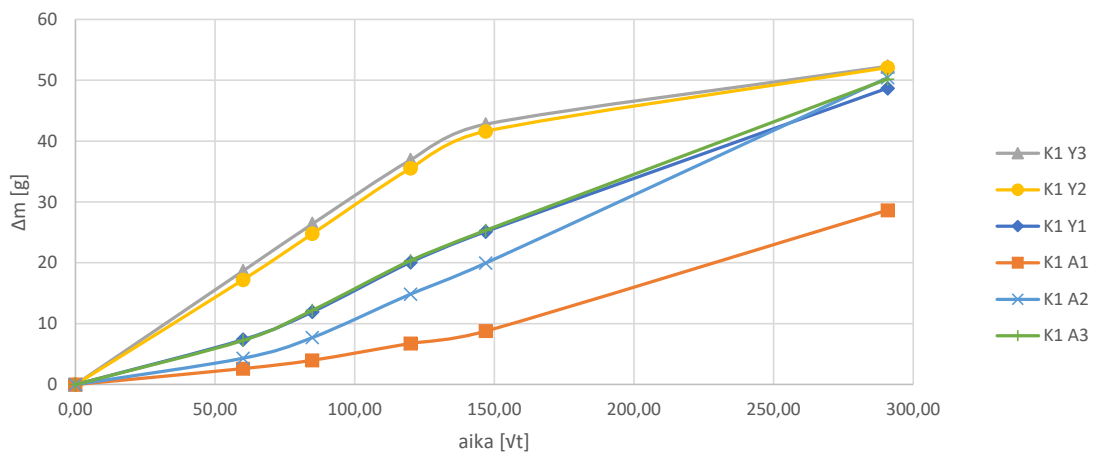


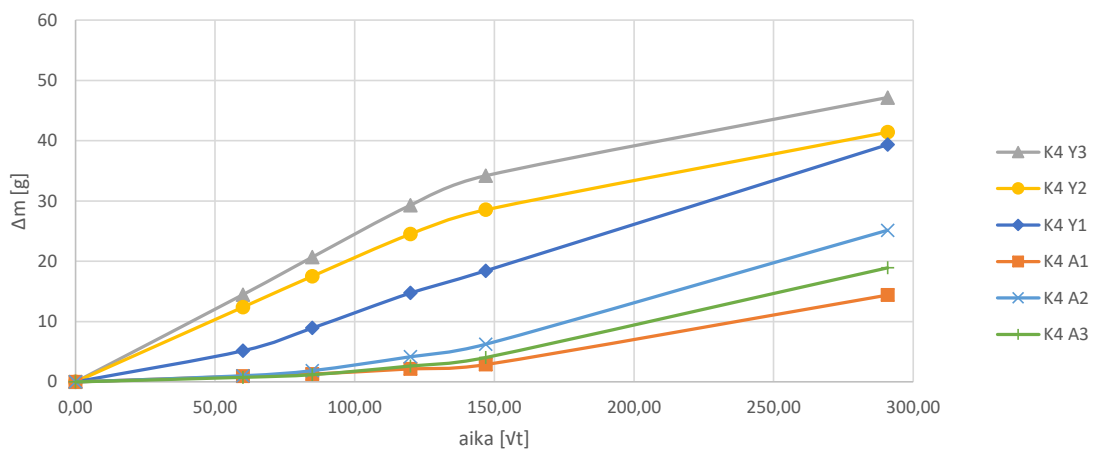
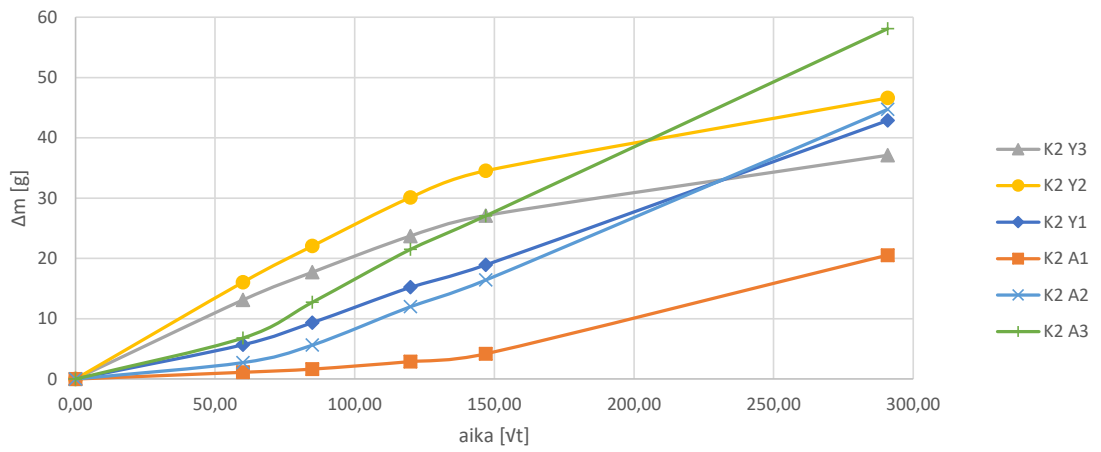
Isophob-K vertailu



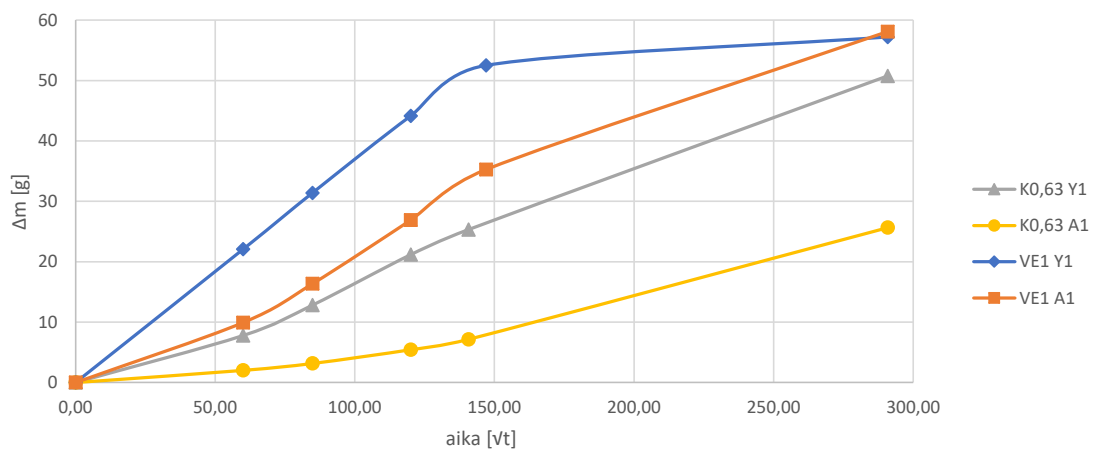


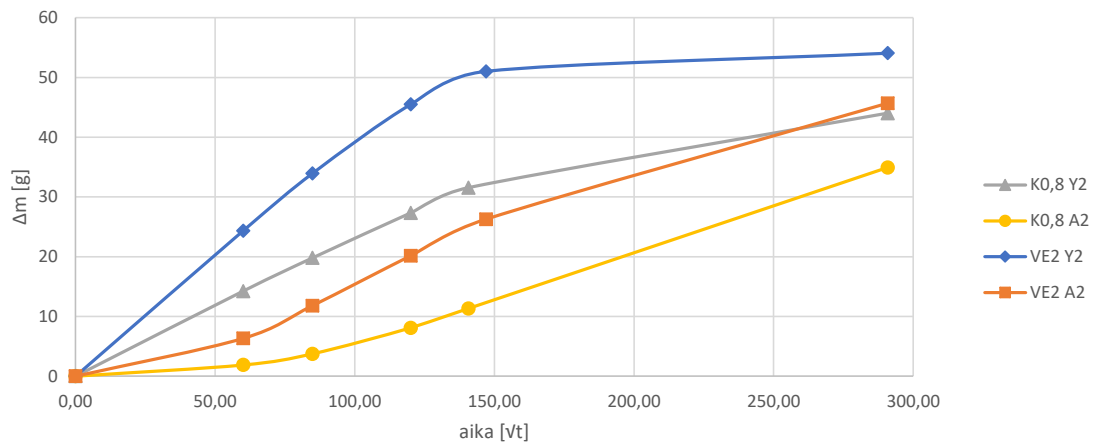
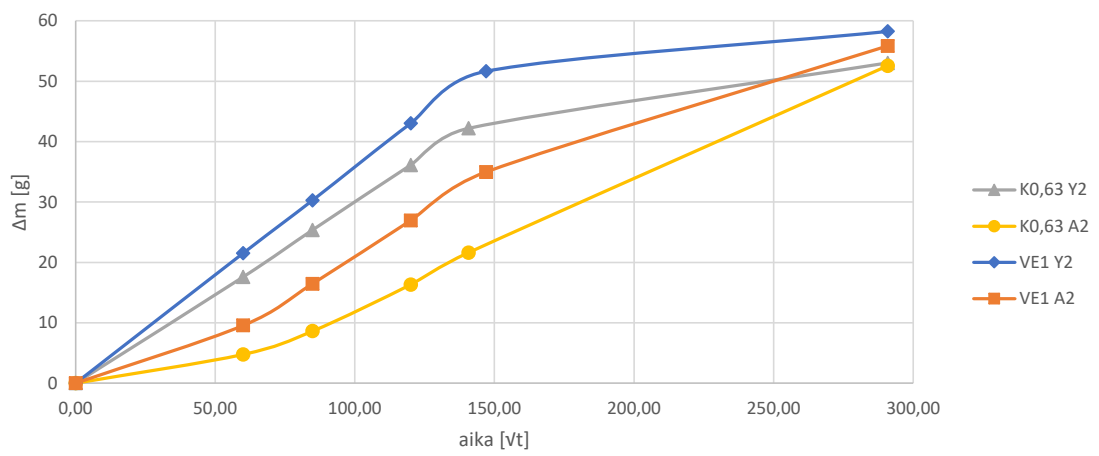
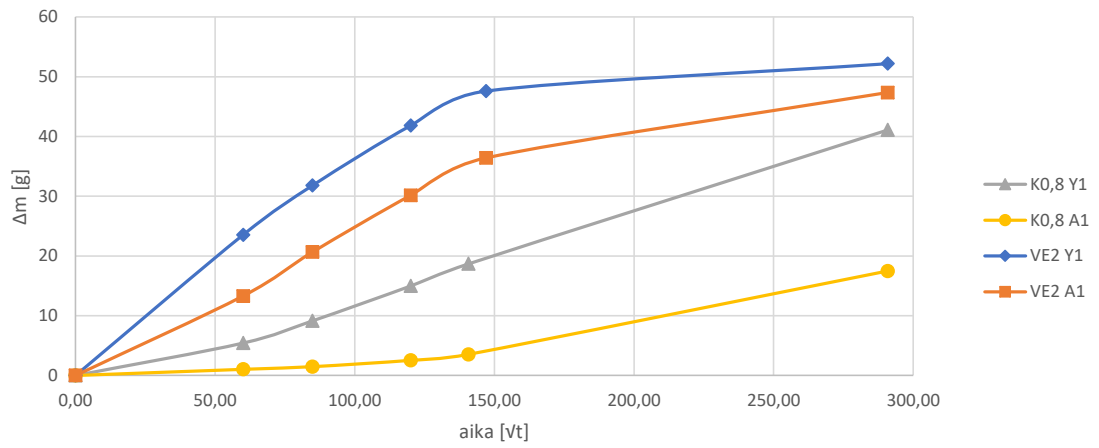
Köster Crisin 76 Concentrate tulokset



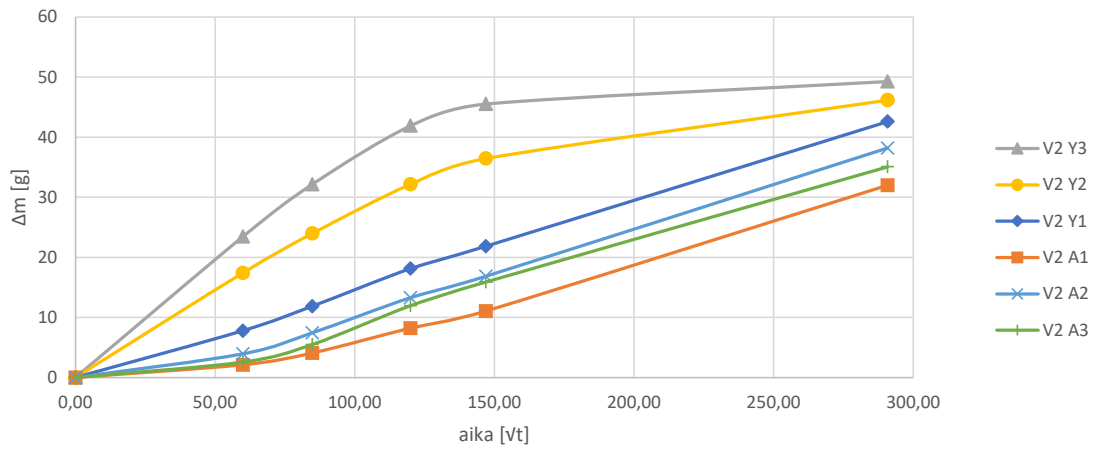
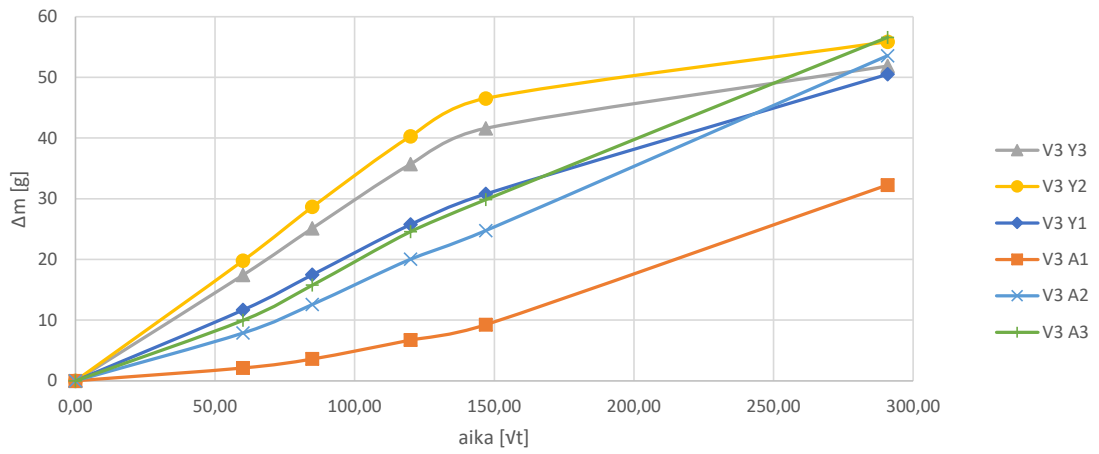
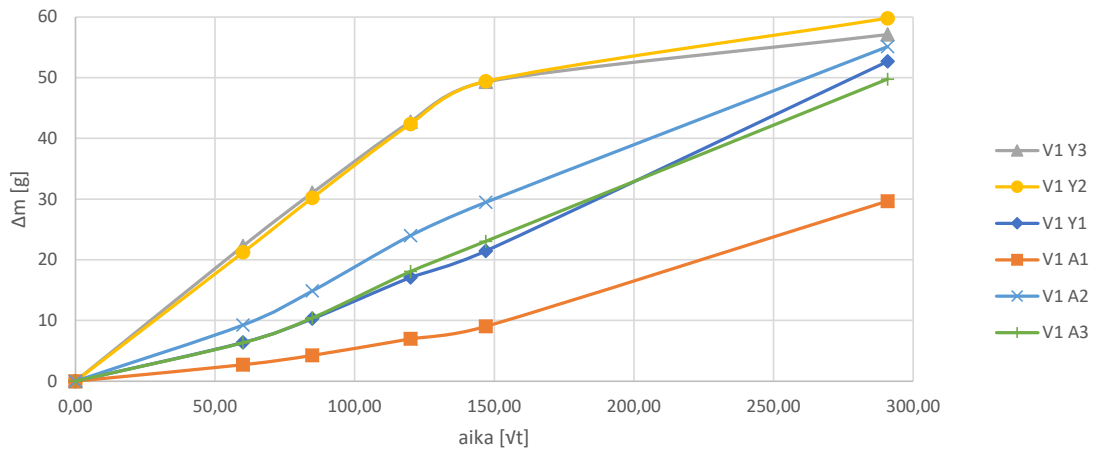


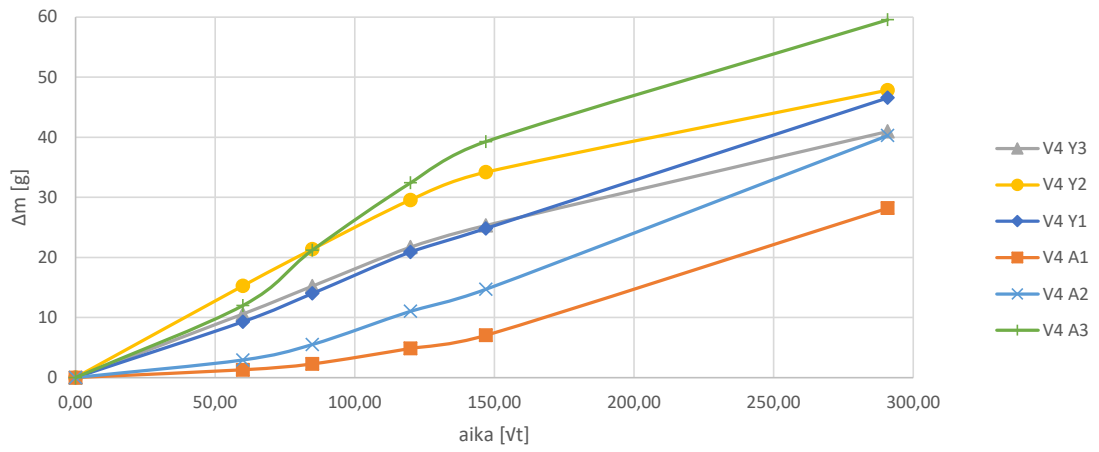
Köster Crisin 76 Concentrate vertailu



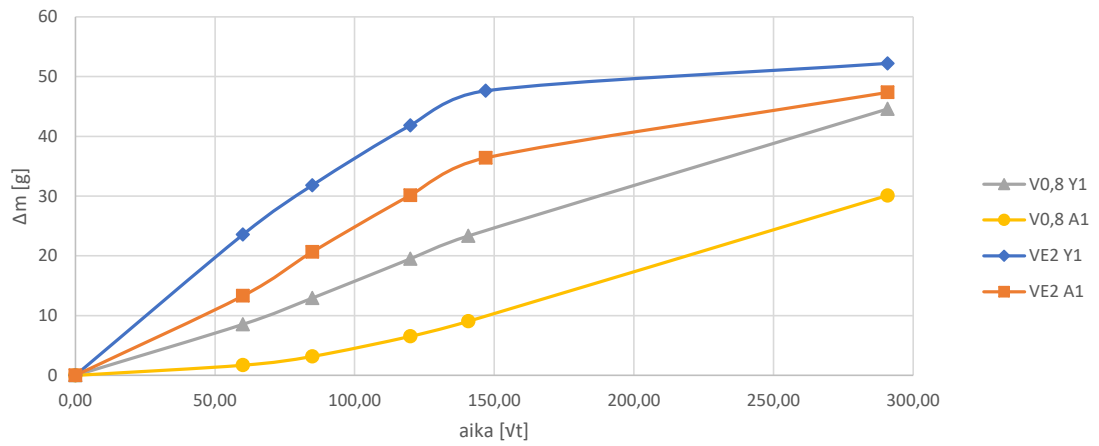
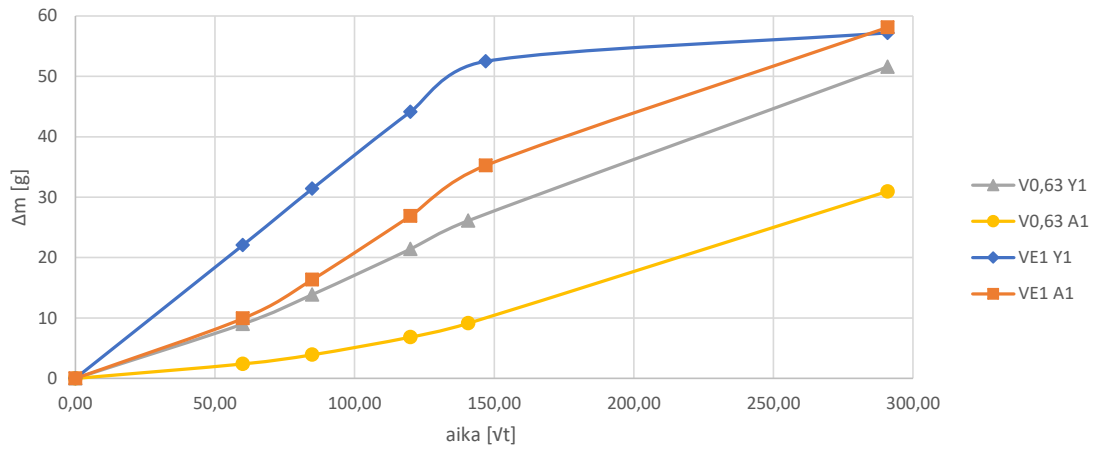


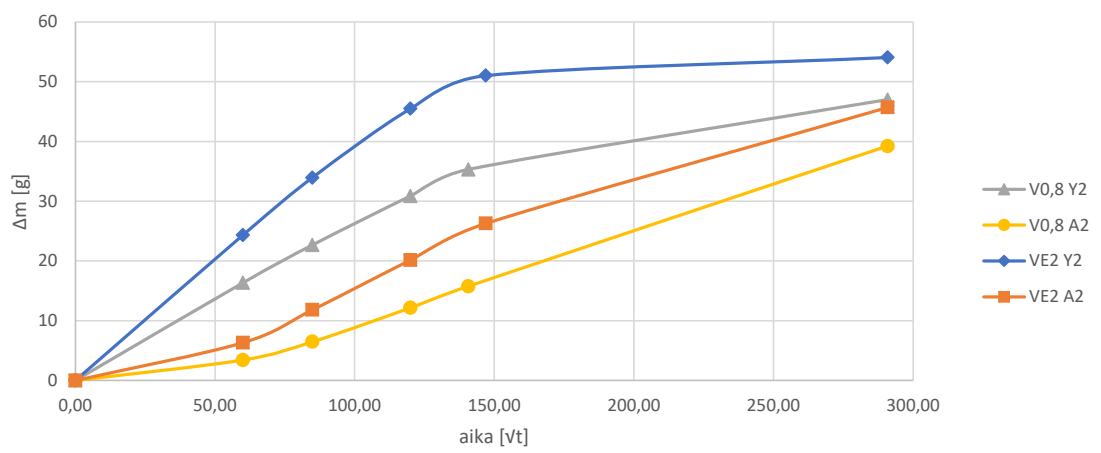
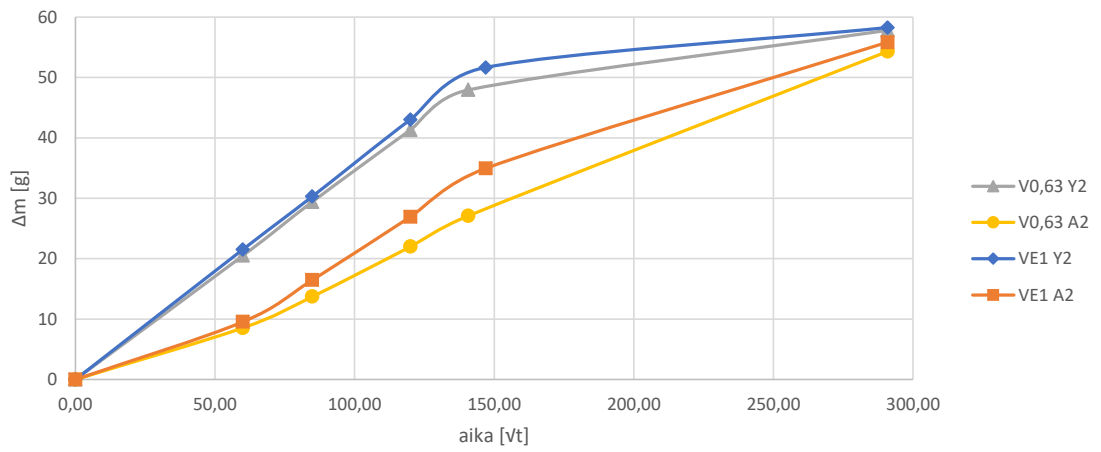
Vandex IC tulokset



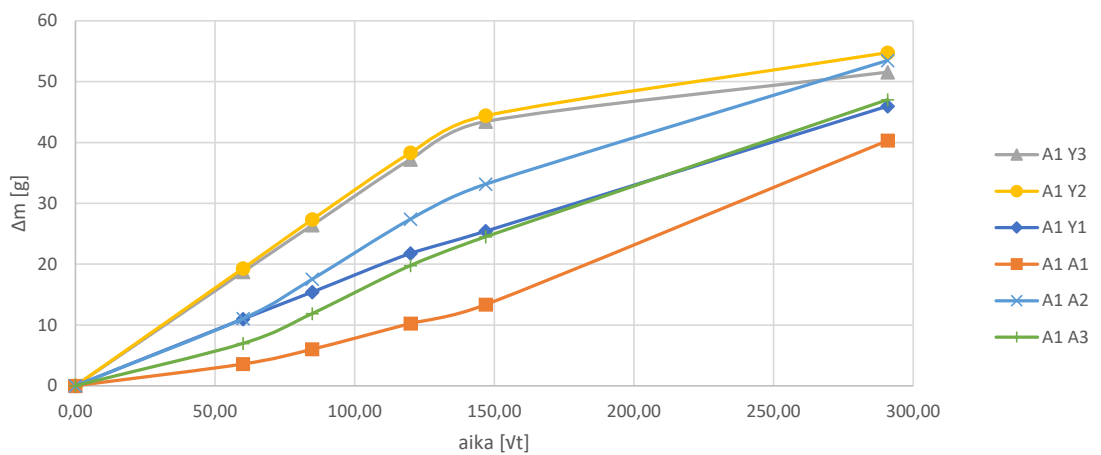


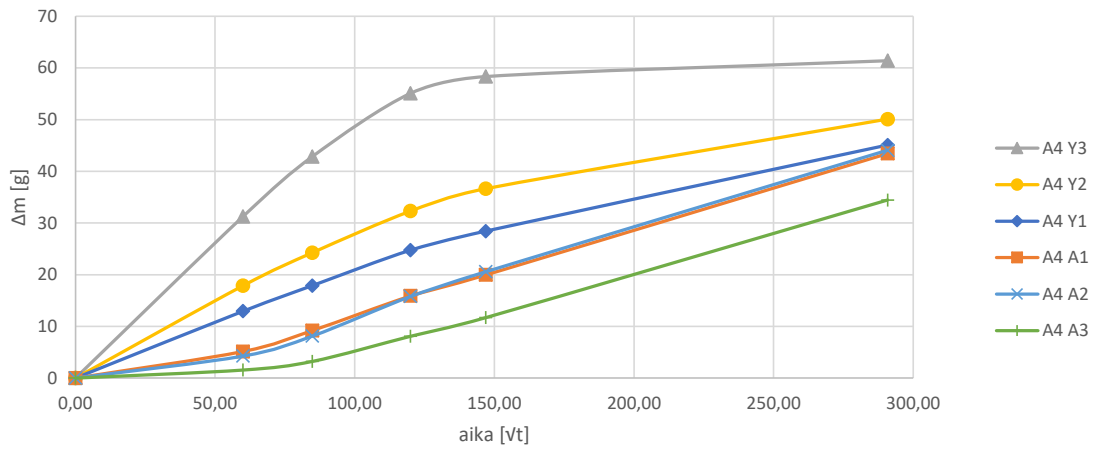
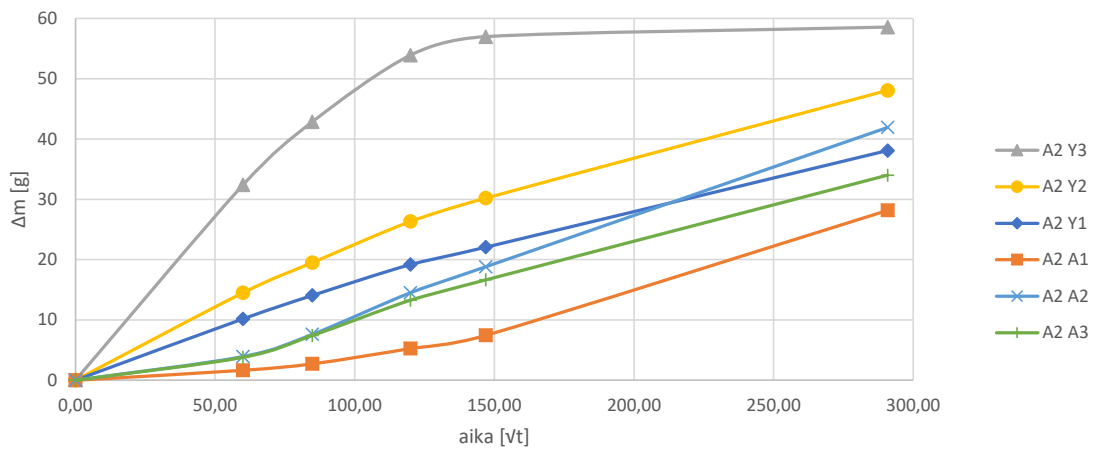
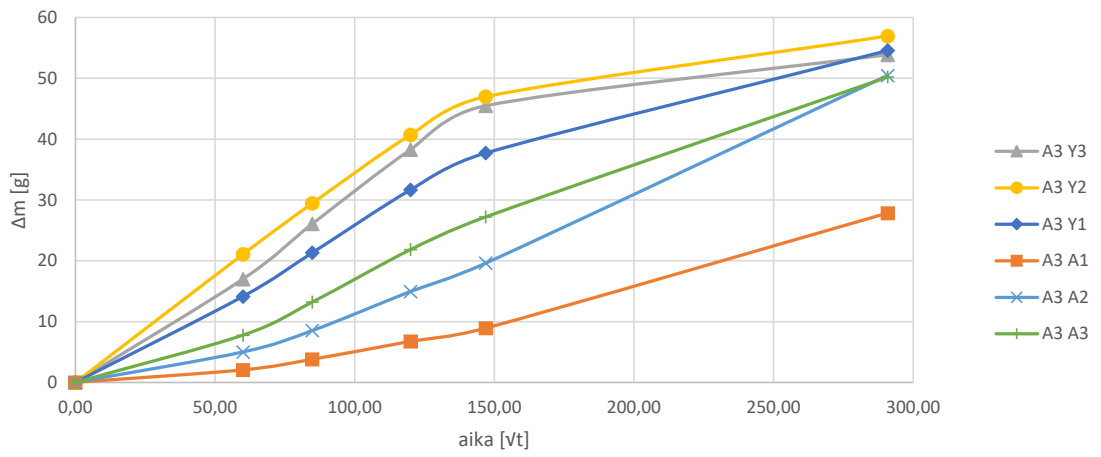
Vandex IC vertailu





Aquastop tulokset





Aquastop vertailu

