

Woord vooraf

Deze masterproef kadert in het behalen van de masteropleiding Industriële Wetenschappen Bouwkunde aan de Universiteit Hasselt. Binnen deze masterproef werd er onderzoek gevoerd naar de 'karakterisatie van kalkhennep als binnenisolatiemateriaal voor verbouwingen'. Deze onderzoeksvraag werd gesteld door Architectengroep Barchi. Tijdens het onderzoek werden er verschillende moeilijkheden ondervonden waarbij deze werden aangepakt met een ingenieursattitude. Het was een lang leerproces waarbij er extra kennis is verworven en waaruit volgt dat het een leuke ervaring was.

Voor het schrijven van deze masterproef werd er ons hulp aangeboden door verscheidene mensen, hiervoor op deze manier onze dankbetuiging. Allereerst willen we onze promotoren bedanken, Prof. dr. ing. Bram Vandoren en Dhr. Peter Vos. Ze hebben er samen mee voor gezorgd dat onze masterproef in de goede richting werd gestuurd. Ook nog een speciale dank aan Dhr. Wim Noblesse van het Technologiecentrum van de universitaire campus in Diepenbeek. Bij hem konden we steeds terecht voor het uitvoeren van de laboproeven. Tot slot ook nog een bedankt aan onze ouders die ons de kans hebben gegeven om verder te studeren.

Inhoudsopgave

Woord vooraf.....	i
Abstract.....	xiii
Abstract in English	xv
Inleiding.....	xvii
1 Literatuurstudie	1
1.1 Aandachtspunten binnenisolatie	1
1.1.1 Koudebruggen	1
1.1.2 Vochtbelasting	1
1.1.3 Luchtinfiltratie en luchtexfiltratie.....	2
1.1.4 Basisregels	3
1.2 Het probleem inwendige condensatie	4
1.2.1 Dampdiffusie	4
1.2.2 Relatieve vochtigheid.....	5
1.2.3 Glaser - methode	5
1.2.4 Voorkomen van condensatie	6
1.2.5 Zomercondensatie.....	7
1.2.6 Capillair actieve systemen	7
1.2.7 WUFI®	9
1.3 Samenstelling kalkhennep	14
1.3.1 Hennepvezel.....	15
1.3.2 Bindmiddel	16
1.3.3 Verschillende samenstellingen kalkhennep	19
1.3.4 Volumieke massa en droogtijd	24
1.3.5 Overzicht	30
1.4 Hygrothermische prestaties van kalkhennep	31
1.4.1 Warmtegeleidingscoëfficiënt	31
1.4.2 Hygrothermische gedrag	34
2 Methodologie	53
2.1 In situ metingen.....	53
2.1.1 Meetmateriaal.....	53
2.1.2 Situering verbouwing 1	56
2.1.3 Situering verbouwing 2	59
2.1.4 Veronderstellingen	61
2.2 Numerieke analyse	63
2.2.1 Aandachtspunten bij implementatie	63
2.2.2 Hygrische prestaties multi-layer composietmaterialen	64
2.2.3 Invloed vloeistofdoorlatendheid van capillair actieve materialen	66

2.2.4	Implementatie in WUFI®	68
2.3	Samendrukbaarheid en densiteit	75
2.3.1	Aanmaak mengsels	75
2.3.2	Drukproeven.....	79
2.4	Absorptietest	80
2.4.1	Test 1: korte absorptietest	80
2.4.2	Test 2: lange absorptietest.....	81
2.5	Capillariteitstest	82
2.5.1	Monsters proef 1	82
2.5.2	Monsters proef 2	82
2.5.3	Proefopstelling	83
2.6	Overzicht	84
3	Resultaten	85
3.1	In situ metingen.....	85
3.1.1	Meetcampagne verbouwing 1.....	85
3.1.2	Meetcampagne verbouwing 2.....	98
3.1.3	Conclusie	100
3.2	Numerieke analyse	101
3.2.1	Wand A.....	101
3.2.2	Wand B.....	105
3.2.3	Wand C.....	109
3.2.4	Conclusie	113
3.3	Drukproeven.....	114
3.3.1	In situ gemaakte monsters.....	114
3.3.2	Geprefabriceerde monsters.....	119
3.3.3	Conclusie	122
3.4	Absorptietesten.....	123
3.4.1	Test 1: korte absorptietest	123
3.4.2	Test 2: lange absorptietest.....	127
3.4.3	Conclusie	130
3.5	Capillariteitstesten.....	131
3.5.1	Proef 1.....	131
3.5.2	Proef 2.....	136
3.5.3	Conclusie	141
4	Discussie.....	143
4.1	Resultaten.....	143
4.1.1	In situ metingen	143
4.1.2	Numerieke analyse	144

4.1.3 Drukproeven.....	145
4.1.4 Absorptietest	146
4.1.5 Capillariteitstest	147
4.2 Beperkingen	149
4.2.1 In situ metingen en numerieke analyse.....	149
4.2.2 Proeven	150
4.3 Vervolgonderzoek.....	151
Besluit	153
Bibliografie	155

Tabellenlijst

Tabel 1: Verhoudingen kalkhennepwand volgens Evrard [10].....	19
Tabel 2: Kalkhennepverhouding volgens Evrard & De Herde [14]	20
Tabel 3: Kalkhennepverhouding volgens Marion Wright [17]	20
Tabel 4: Kalkhennepverhouding volgens CESA [59]	21
Tabel 5: Kalkhennepverhouding A volgens Strandberg-de Bruijn & Johansson [62].....	22
Tabel 6: Kalkhennepverhouding B volgens Strandberg-de Bruijn & Johansson [62].....	22
Tabel 7: Verhoudingen samenstelling [63].....	23
Tabel 8: Densiteit na droogtijd van ieder mengsel en hun standardafwijking σ [33]	25
Tabel 9: Overzichtstabel verschillende parameters testmonsters	30
Tabel 10: Berekende U-waarden kalkhennepwand vs. wand met minerale wol [8]	32
Tabel 11: Relatieve vochtigheid en gemiddeld vochttransport data [61]	43
Tabel 12: Dampdiffusiecoëfficiënt ($\times 10^{-6}$) [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] van menging A en B [62], [69].....	44
Tabel 13: Relatieve vochtigheid [%] na vochtherverdeling [70].....	45
Tabel 14: Watergehalte afhankelijkheid van verschillende parameters [14]	51
Tabel 15: Positionering meetpunten verbouwing 1	57
Tabel 16: Meetcampagne verbouwing 1.....	58
Tabel 17: Meetcampagne verbouwing 2.....	60
Tabel 18: Samenvatting gegevens wand A, B en C	74
Tabel 19: Gewichts- en volumepercentages volgens Leemniscaat	75
Tabel 20: Gewichts- en volumepercentages volgens Marion Wright.....	75
Tabel 21: Gebruikte monsters voor de handmatige test.....	80
Tabel 22: Glasermethode wand A	93
Tabel 23: Glasermethode wand B	95
Tabel 24: Glasermethode wand C	96
Tabel 25: Warmtegeleidingscoëfficiënt Glaser versus WUFI®	97
Tabel 26: Warmteweerstand Glaser versus WUFI®	97
Tabel 27: Warmtegeleidingscoëfficiënt Prohemp [78]	97
Tabel 28: Warmtegeleidingscoëfficiënt uit literatuur.....	97
Tabel 29: Wand A werkelijke versus gesimuleerde data (11u)	102
Tabel 30: Wand A werkelijke versus gesimuleerde data (23u)	103
Tabel 31: Wand B werkelijke versus gesimuleerde data (11u)	105
Tabel 32: Wand B werkelijke versus gesimuleerde data (16u)	106
Tabel 33: Wand B werkelijke versus gesimuleerde data (23u)	107
Tabel 34: Wand C werkelijke versus gesimuleerde data (11u)	109
Tabel 35: Wand C werkelijke versus gesimuleerde data (20u)	110
Tabel 36: Wand C werkelijke versus gesimuleerde data (23u)	111
Tabel 37: Resultaten drukproeven (in situ)	118
Tabel 38: Resultaten drukproeven geprefabriceerde monsters.....	121
Tabel 39: Overzicht korte absorptietest.....	123
Tabel 40: Water absorberende factor	124

Figurenlijst

Figuur 1: Typische warmteverliezen van niet geïsoleerde woningen [1]	xvii
Figuur 2: Kalkhennep als binnenisolatie [15].....	xix
Figuur 3: Doelstellingen masterproef	xx
Figuur 4: Thermo - hygrometer HD 2101.2 [21].....	xxi
Figuur 5: Drukbank [23]	xxiii
Figuur 6: Koudebrug ter hoogte van binnenmuur [24]	1
Figuur 7: Verhinderde droging [24]	2
Figuur 8: Voorkomen luchtinfiltratie, -exfiltratie (links) en luchtcirculatie (rechts) [24]...	3
Figuur 9: Waterdampstroom doorheen gevel [26].....	4
Figuur 10: Glaser methode – dampdichte materialen [4]	5
Figuur 11: Glaser methode - dampopen materialen [4]	6
Figuur 12: Glaser methode - dampopen isolatie met dampscherm [4]	6
Figuur 13: Werking van capillair actieve isolatiesystemen [32]	8
Figuur 14: Verstoorde werking capillair actieve isolatie door luchtlaag [32].....	8
Figuur 15: WUFI® -animatie met minerale wol [9]	10
Figuur 16: WUFI® -animatie met kalkhennep [9]	11
Figuur 17: WUFI®-animatie minerale wol vs. kalkhennep [9]	11
Figuur 18: Isohemp Blokken [37]	14
Figuur 19: Prohemp hennepscheven [6]	15
Figuur 20: Celstructuur houtvezel vergelijkbaar met drinkrietjes [28]	16
Figuur 21: Mortels overeenstemmend met volgende bindmiddelen. a) Luchtkalk, b) kalk/cement verhouding 8:1, c) kalk/cement verhouding 6:3, d) kalk/cement verhouding 4.5:4.5 en e) Hydraulische kalk [17], [49].....	17
Figuur 22: Monster niet aangeduwd (links) en aangeduwd (rechts) [10].....	24
Figuur 23: Evolutie densiteit kalkhennep met Tradical® pf 70 en Chanvribat®.....	24
Figuur 24: Omstandigheden (a=T en b=RV) gedurende eerste maand uitharding [55] ..	27
Figuur 25: Gewichtsverlies van drie mengsels gemeten gedurende eerste maand [55] ..	28
Figuur 26: Wandopbouw minerale wol (links) en kalkhennep (rechts) [8]	31
Figuur 27: Berekende (calc) en gemeten (meas) U-waardes [8]	33
Figuur 28: Gemeten U-waardes over een periode van 14 dagen [8]	33
Figuur 29: Temperatuursverloop lestenenwand met minerale wol vs. kalkhennep [8] ...	34
Figuur 30: Relatieve vochtigheid minerale wol (links) versus kalkhennep (rechts) [8] ...	35
Figuur 31: Macroscopische poreusheid van kalkhennep [14]	36
Figuur 32: Porositeit (links) macroscopische poreusheid (rechts) [10]	36
Figuur 33: Watergehalte in functie van relatieve vochtigheid [9]	39
Figuur 34: Watergehalte kalkhennep "muur" bij verschillende druk [66].....	39
Figuur 35: Drie absorptiegebieden: A) Hygroscopisch absorptie, B) Capillaire condensatie en C) Oververzadigd [10]	40
Figuur 36: Schematische weergave van de beker test [62]	42
Figuur 37: Dampdiffusiecoëfficiënt voor de verschillende RV- niveaus [62]	44
Figuur 38: Schematische weergave van de capillaire wateropname test [70]	45
Figuur 39: Verband tussen tijd ^{1/2} en hoeveelheid geabsorbeerd water [70]	46
Figuur 40: Capillaire wateropname mengsel A (boven) en mengsel B (onder) [62]	47
Figuur 41: Curve fitting vochtabsorptiecoëfficiënt in functie van W _{start} /W _{cap} [62]	48
Figuur 42: Vochtdiffusiviteit DW _{start} /W _{cap} voor mengsels A en B i.f.v. W _{start} /W _{cap}	48
Figuur 43: Vochtdiffusiecoëfficiënt D _v van mengsel A en B i.f.v. W _{start} /W _{cap} [61].....	50
Figuur 44: Vochtdiffusiecoëfficiënt D _v van mengsels A en B [61]	50
Figuur 45: Kalkhennepwand met dikte 25 cm [14].....	52
Figuur 46: Watergehalte wanneer relatieve vochtigheid (binnen) daalt [14].....	52

Figuur 47: Hygro-thermometer met pt100 sensor.....	53
Figuur 48: Weerstation, type TFA klimalogg pro [22]	54
Figuur 49: Verbouwing 1 (links gelijkvloers, rechts verdiep) met posities meetlocaties ..	56
Figuur 50: Locatie A, B en C (van links naar rechts) binnen verbouwing 1	56
Figuur 51: Testopstelling meetcampagne verbouwing 1.....	57
Figuur 52: Inplantingsplan met aanduiding van de kalkhennepwand in de kelder	59
Figuur 53: Testopstelling verbouwing 2	60
Figuur 54: Detail wand A verbouwing 1	61
Figuur 55: Relatieve vochtigheid op de overgang tussen A) metselwerk-mortel en B) mortel-calciumsilicaat (de curves voor het referentiesysteem en systeem met $K=0$ vallen samen) [73]	66
Figuur 56: Relatieve vochtigheid op de overgang tussen A) metselwerk-mortel en B) mortel-calciumsilicaat [73]	67
Figuur 57: Samenstelling wand A	69
Figuur 58: Materiaaleigenschappen Wienerberger solid brick.....	69
Figuur 59: Materiaaleigenschappen kalkhennep.....	70
Figuur 60: Materiaaleigenschappen kalkpleister.....	70
Figuur 61: Oriëntatie	71
Figuur 62: Oppervlaktecoëfficiënten.....	71
Figuur 63: Begincondities	72
Figuur 64: Berekeningsperiode.....	72
Figuur 65: Buitenklimaat	73
Figuur 66: Binnenklimaat	73
Figuur 67: Afwegen en vermengen van de substanties	77
Figuur 68: Kubusvormige mallen zijden 150 mm (links) en 100 mm (rechts)	77
Figuur 69: Los (links) en vast (rechts) verdichten mengsel in de mal	78
Figuur 70: Droogoven	78
Figuur 71: Druk- en buigbank voor het drukken van de monsters [76].....	79
Figuur 72: Onderdompelen van monster in emmer water	80
Figuur 73: a) drijfvermogen balans systeem, b) korf en c) onderdompelen korf	81
Figuur 74: Proefopstelling 1 capillariteit test	83
Figuur 75: Overzicht methodologie	84
Figuur 76: Temperatuur- en relatieve vochtigheid doorheen wand A	87
Figuur 77: Temperatuur- en relatieve vochtigheid doorheen wand B	89
Figuur 78: Temperatuur- en relatieve vochtigheid doorheen wand C	91
Figuur 79: Glaser temperatuursverloop wand A.....	94
Figuur 80: Glaser temperatuursverloop wand B.....	95
Figuur 81: Glaser temperatuursverloop wand C.....	96
Figuur 82: Temperatuur- en relatieve vochtigheid doorheen kelderwand	99
Figuur 83: Beginsituatie wand A op 1/11/2015.....	101
Figuur 84: Wand A op 28/03/2016 om 9u.....	101
Figuur 85: Wand A op 17/10/2016 om 11u.....	102
Figuur 86: Wand A op 17/10/2016 om 23u.....	103
Figuur 87: Watergehalte wand A met a) metselwerk, b) kalkhennep en c) kalkpleister	104
Figuur 88: Wand B op 22/10/2016 om 11u.....	105
Figuur 89: Wand B op 22/10/2016 om 16u.....	106
Figuur 90: Wand B op 21/10/2016 om 23u.....	107
Figuur 91: Watergehalte wand B met a) metselwerk, b) kalkhennep en c) kalkpleister	108
Figuur 92: Wand C op 24/10/2016 om 11u.....	109
Figuur 93: Wand C op 24/10/2016 om 20u.....	110
Figuur 94: Wand C op 24/10/2016 om 23u.....	111
Figuur 95: Watergehalte wand C met a) metselwerk, b) kalkhennep en c) kalkpleister	112

Figuur 96: Beginverloop drukproeven monsters in situ	114
Figuur 97: Eindverloop drukproeven monsters in situ	115
Figuur 98: Weergave test C	116
Figuur 99: Weergave test D	116
Figuur 100: Weergave test E	116
Figuur 101: Weergave test F	117
Figuur 102: Weergave test G	117
Figuur 103: Verloop drukproeven geprefabriceerde monsters	119
Figuur 104: Weergave test H	120
Figuur 105: Weergave test I	120
Figuur 106: Weergave test J	120
Figuur 107: Korte absorptietest - grote kubussen	125
Figuur 108: Korte absorptietest - kleine kubussen	126
Figuur 109: Lange absorptietest S1.5, vaste verdichting	127
Figuur 110: Lange absorptietest S1.1 - Losse verdichting	129
Figuur 111: Begin proef 1, bovenaan van links naar rechts: S1.2, S1.1, S3.2, S3.1 en onderaan van links naar rechts: S3.1, S3.2, S1.1 en S1.2	131
Figuur 112: Midden proef 1, bovenaan van links naar rechts: S1.2, S1.1, S3.2, S3.1 en onderaan van links naar rechts: S3.1, S3.2, S1.1 en S1.2	132
Figuur 113: Einde proef 1, bovenaan van links naar rechts: S1.2, S1.1, S3.2, S3.1 en onderaan van links naar rechts: S3.1, S3.2, S1.1 en S1.2	132
Figuur 114: Hoogte vochtfront, van links naar rechts: S1.2, S1.1, S3.2 en S3.1	133
Figuur 115: S1.1 los	133
Figuur 116: S1.2 vast	134
Figuur 117: S3.1 los	134
Figuur 118: S3.2 vast	135
Figuur 119: Begin proef 2, bovenaan van links naar rechts: S2.1, S4.4, S1.4, Isohemp en onderaan van links naar rechts: Isohemp, S1.4, S4.4 en S2.1	136
Figuur 120: Proef 2 na één uur, bovenaan van links naar rechts: S2.1, S4.4, S1.4, Isohemp en onderaan van links naar rechts: Isohemp, S1.4, S4.4 en S2.1	136
Figuur 121: Midden proef 2, bovenaan van links naar rechts: S2.1, S4.4, S1.4, Isohemp en onderaan van links naar rechts: Isohemp, S1.4, S4.4 en S2.1	137
Figuur 122: Einde proef 2, bovenaan van links naar rechts: S2.1, S4.4, S1.4, Isohemp en onderaan van links naar rechts: Isohemp, S1.4, S4.4 en S2.1	137
Figuur 123: Hoogte vochtfront bij Isohemp (links) en S1.4 (rechts)	138
Figuur 124: S2.1 groot	139
Figuur 125: S4.4 los	139
Figuur 126: S1.4 los	140
Figuur 127: Isohemp	140

Abstract

Architectengroep Barchi stelt de vraag of kalkhennep gebruikt kan worden als binnenisolatiemateriaal bij verbouwingen. Hierbij geeft de Glasermethode aan dat condensvorming optreedt waarbij niet geweten is of dit werkelijk het geval is. Daarnaast wordt kalkhennep voornamelijk handmatig aangebracht waarbij er geen gestandaardiseerde samenstelling en verdichtingswijze voorhanden is waardoor de eigenschappen sterk kunnen variëren.

Deze masterproef heeft als doel om aan te tonen of kalkhennep geschikt is als isolatie aan de binnenzijde van een baksteenmassief en na te gaan dat hierbij condensvorming optreedt tussen de kalkhennep en het metselwerk. Hierbij worden enerzijds de relatieve vochtigheid en temperatuur *in situ* gemeten op verschillende dieptes. Anderzijds worden kalkhennepmonsters, die verschillen in samenstelling en verdichtingswijze, onderworpen aan drukproeven, absorptie- en capillariteitstesten.

De metingen geven aan dat de relatieve vochtigheid 100 % benadert en er hoge temperaturen heersen ter hoogte van de overgang waardoor er geen condensatie zal optreden. De hieruit afgeleide isolerende waardes zijn veel lager dan voorspeld. Daarnaast blijkt dat hoe vaster de verdichting, hoe groter het absorberend vermogen en druksterkte zijn, in tegenstelling tot de capillariteitstest waarbij de samenstelling meer invloed heeft. Deze studie toont aan dat kalkhennep geschikt is als binnenisolatie wanneer het correct uitgevoerd wordt en voldoende kan drogen.

Abstract in English

Architects Group Barchi wants to study whether hemp-lime can be used as inside insulation material for renovations. Hereby, the Glaser method indicates that condensation occurs, whereby is not known whether this is actually the case. Beside, the hemp-lime is mainly applied by hand, in which there is no standardized composition and compaction method available, whereby the properties can vary strongly.

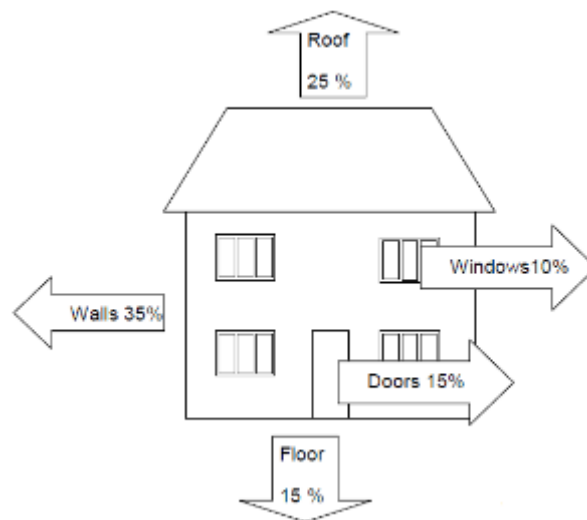
This Master's thesis intends to show that hemp-lime can be used as insulation material on the inside of solid bricks and to verify that condensation occurs between the hemp-lime and masonry. Hereby, the relative humidity and temperature are measured at different depths in the hemp-lime on the one hand. On the other hand, hemp-lime samples, which differ in composition and compaction method, are subjected to pressure, absorption and capillary tests.

The situ measurements indicate that the relative humidity approaches 100 % and high temperatures are present at the transition. Therefore, condensation cannot occur. The obtained insulation values are lower than predicted. In addition, the higher the compaction of the hemp-lime samples, the larger the absorbing capacity and the compressive strength of the samples. This is in contrast to the capillarity, which is mainly influenced by the composition. This study concludes that hemp-lime is suitable as inside insulation material in case of good execution and proper drying is possible.

Inleiding

Situering

Binnen deze masterproef wordt er onderzoek gevoerd naar het gedrag van kalkhennep als binnenisolatiemateriaal voor verbouwingen. Tijdens deze studie worden enkel de gevelwanden van de gebouwschil in beschouwing genomen. Dit aangezien 35 % van de warmteverliezen doorheen de massieve wanden van een klassieke niet geïsoleerde woning plaatsvindt (zie Figuur 1) [1]. Daarom is het *upgraden* van de thermische efficiëntie van deze volle wanden essentieel. Verder heeft kalkhennep als natuurlijk bouw materiaal een positief effect op de broeikasgasbalans [2] en zorgt deze voor gezondere werkomstandigheden op de werf [3].



Figuur 1: Typische warmteverliezen van niet geïsoleerde woningen [1]

Omwille van esthetische redenen is het bij restauraties en renovaties onmogelijk om aan de buitenzijde van de gevelwanden te isoleren. De kalkhennep isolatie wordt rechtstreeks aan de binnenzijde tegen het baksteenmassief aangebracht. Dit heeft als gevolg dat dit botst met de basisregels voor het isoleren van een gebouw. Hierbij dient enerzijds de sterkst isolerende en meest dampopen laag zich te bevinden aan de koude zijde van de gebouwschil [4]. Anderzijds dient de minst isolerende en meest dampdichte laag zich aan de warme zijde van de gebouwschil te bevinden [4]. Wanneer er niet wordt voldaan aan deze basisregels zijn er verhoogde risico's op inwendige condensatie, vorstschade aan het gevelmetselwerk en koudebruggen [4].

Architectengroep Barchi is een architectenbureau dat enkel bouwt op een bio-ecologische manier. Ze maken gebruik van hout, stro en leem, aangevuld met andere ecologische materialen en technieken, zoals kalkhennep [5]. Deze vormt een zeer goede isolator bij bouwmaterialen op basis van hennep [3], [5], [6], [7]. Kalkhennep heeft echter een lagere thermische werking ten opzichte van de traditionele isolatiematerialen met dezelfde isolatiedikte [8]. Daarnaast blijkt uit onderzoek dat kalkhennep de vochtafvoer in de binnenisolatie bevordert en eenmaal het droog is het vocht aan de binnenzijde van de buitenmuur opneemt [9]. Het is dus van belang dat niet enkel de warmtedoorgangscoefficiënt (U-waarde) een rol speelt bij de thermische prestaties van de gebouwschil, maar er moet ook rekening worden gehouden met de vochtregulerende- en warmtebufferende eigenschappen van het materiaal [8], [9].

Door middel van een meetcampagne toegepast op twee bestaande verbouwingen worden de specifieke eigenschappen van kalkhennep verder onderzocht. Hierbij wordt zowel gekeken naar een volledig (≥ 1 jaar) als niet volledige uitgeharde (< 1 jaar) kalkhennepwand [10]. Hiermee kan worden aangetoond dat dit materiaal een goede werking heeft als binnenisolatie.

Probleemstelling

In eerste instantie schrijft Architectengroep Barchi al meerdere jaren kalkhennep voor als binnenisolatie bij verbouwingen. Kalkhennep heeft een dampopen- en capillair-actief gedrag en kan dus warmte bewaren en afstaan wanneer het vocht wordt afgegeven of opgeslagen [9], [11]. Hierdoor ondervinden ze dat het materiaal eerder beperkte risico's heeft die traditionele isolatiematerialen wel met zich meebrengen [4], [11]. De onderzoeksvraag vanuit de architectengroep is of kalkhennep kan gebruikt worden als binnenisolatiemateriaal bij verbouwingen [5].

Een bijkomende problematiek is het gebruik van de Glasermethode. Dit is een nuttige berekening om inzicht te krijgen in het warmte-, lucht- en vochttransport in bouwdelen. Wanneer deze methode wordt toegepast op een bestaande wand met kalkhennep als binnenisolatie geeft deze aan dat er condensatie optreedt in de bouwschil [5]. Uit praktijkvoorbeelden blijkt dat dit niet altijd het geval is [5]. Dit kan mogelijk verklaard worden door de beperkingen van de Glasermethode. De methode is namelijk stationair waarbij de randvoorwaarden constant worden verondersteld, de vochtcapaciteit van de materialen wordt niet in rekening gebracht en enkel dampdiffusie wordt beschouwd [4].

Tot op de dag van vandaag zijn er enkel druksterktes bekend van geprefabriceerde kalkhennepblokken (Isohemp) [12]. De samendrukbaarheid van een *in situ* gevormd mengsel is niet geweten. Hierbij kan de vraag gesteld worden in welke mate de samenstelling van het gevormde mengsel een invloed heeft op de samendrukbaarheid. Tot op heden is er geen gestandaardiseerde samenstelling voorhanden, producenten geven verhoudingen van specimen op basis van praktijkervaring [13].

Tenslotte wordt de kalkhennep rechtstreeks aangebracht tegen de massieve baksteenwand waarbij een perfecte luchtdichte aansluiting gegarandeerd moet worden. Dit kan zowel uitgevoerd worden met geprefabriceerde verlijmde kalkhennepblokken als met een ter plaatste gevormd mengsel. In sommige gevallen is de kwaliteit van de bestaande buitenmuur zo slecht dat de geprefabriceerde kalkhennepblokken geen goede aansluiting garanderen. Hierdoor is er een externe draagstructuur vereist [14], waarbij het aanbrengen van het ter plaatste gevormde mengsel gebeurt tussen houten stijlen die dienen als draagstructuur (zie Figuur 2). Deze kunnen dan gebruikt worden als bevestigingspunten voor de glijbekisting. In het laatste geval wordt de kalkhennep handmatig aangebracht waarbij er geen eenduidige verdichtingswijze voorhanden is en deze dus verschilt van persoon tot persoon. Hierdoor kunnen de eigenschappen van de kalkhennepisolatie zeer sterk beïnvloed worden.



Figuur 2: Kalkhennep als binnenisolatie [15]

Doelstelling

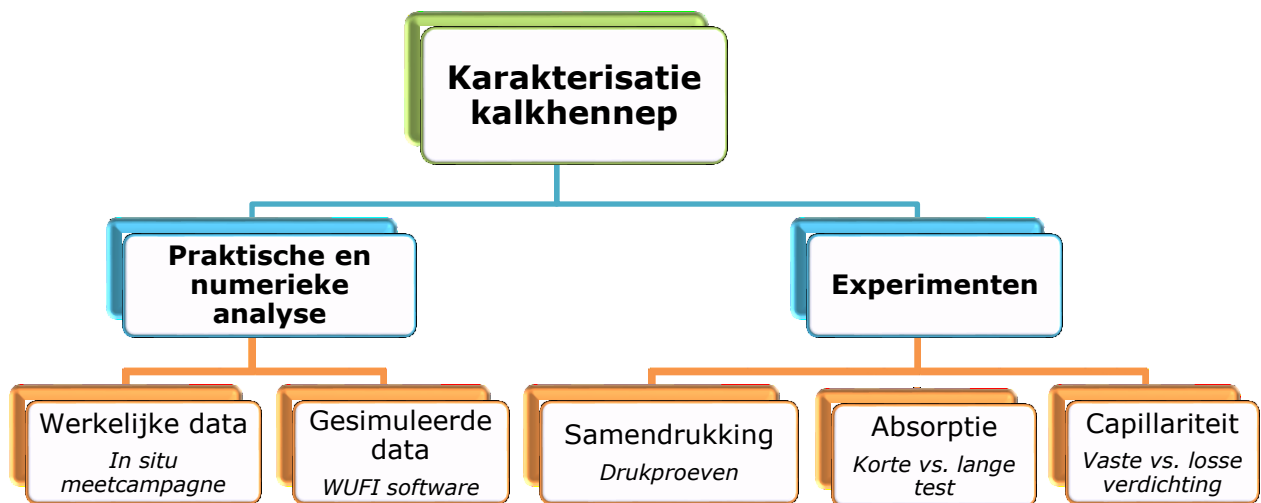
Om aan te tonen dat kalkhennep geschikt is als isolatiemateriaal aan de binnenzijde van een baksteenmassief wordt er een meetcampagne gevoerd bij twee verbouwingen. Hierbij wordt er nagegaan of er condensvorming optreedt in de overgang tussen kalkhennep en metselwerk. De eerste meetcampagne wordt toegepast op een verbouwing van een bestaande schuur waar de kalkhennepwanden net geen jaar staan. Bij de andere meetcampagne gaat het om een verbouwing van een bestaande kelder, hier staan de kalkhennepwanden al langer dan vier jaar. Bij de tweede verbouwing starten de metingen twee weken later dan het einde van de meetcampagne van verbouwing één. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van drie sensoren die de temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) en de relatieve vochtigheid (RV) meten. Dit gebeurt voor drie verschillende isolatiediktes ($\approx 10, 20$ en 30 cm) in de bouwschil van de woning. Hiermee wordt het vocht- en warmtetransport in de bouwschil op drie plaatsen weergegeven, dit door het inlezen van data bekomen gedurende de meetcampagne.

Door de beperkingen van de Glasermethode wordt er gebruik gemaakt van een Duits *softwareprogramma* 'Wärme und feuchte Instationär' (WUFI®) [16]. Hierdoor wordt er geen theoretische benadering (Glaser) gebruikt maar wordt er gebruik gemaakt van een numeriek model (WUFI®). Dit model heeft het voordeel dat het dynamisch karakter van de bouwschil in rekening kan worden gebracht [9]. Hierbij wordt er dus rekening gehouden met slagregen, vloeibaar- en damptransport, capillair gedrag, ... [4]. Daarnaast worden de numerieke resultaten vergeleken met de experimentele data uit de meetcampagne. Hierdoor is het mogelijk om eventuele afwijkingen vast te stellen en te verklaren.

Een bijkomende doelstelling is om de samendrukbaarheid van kalkhennep te bepalen. Hiermee kan dan de bekomen druksterkte van het *in situ* gevormde kalkhennepmengsel vergeleken worden met die van een geprefabriceerde kalkhennepblok (Isohemp). Voor het bepalen van de samendrukbaarheid wordt er gebruik gemaakt van vier verschillende samenstellingen, die worden gedrukt na een drogingsproces van 28 dagen, dit aangezien het bindmiddel dan is uitgehard [10], [17], [18]. Iedere samenstelling verschilt in hoeveelheid additief, hoeveelheid water en bindmiddel, deze bevorderen de uithardingstermijn en de kleefkracht [19], [20]. De samenstelling bepaald de stijfheid van het isolatiemateriaal [5]. Tijdens de proeven wordt de warmtegeleidbaarheid (λ) van de vier mengsels buiten beschouwing gelaten en wordt er enkel gekeken naar de samendrukking van de kalkhennep in functie van de samenstelling en verdichtingswijze. Verder wordt de elasticiteitsmodulus van de monsters niet bepaald wegens te kleine spanningen en te grote vervormingen.

Tenslotte worden er verschillende soorten testen gedaan naar de verdichtingswijze van kalkhennep. Op deze manier wordt er nagegaan hoe dat deze de eigenschappen van de kalkhennep beïnvloed. Er wordt ten eerste een absorptietest uitgevoerd waarbij het absorptievermogen kan worden bepaald op korte termijn en op lange termijn. Vervolgens worden ook nog testen uitgevoerd naar de capillariteit van kalkhennep, dit voor zowel een losse als vaste verdichting.

In Figuur 3 worden de doelstellingen visueel weergegeven. Deze zorgen ervoor dat de karakterisatie van kalkhennep als binnenisolatiemateriaal bij verbouwingen in deze masterproef verklaard kan worden.



Figuur 3: Doelstellingen masterproef

Materiaal en methode

De meetcampagne gebeurt enerzijds door middel van een thermo-hygrometer van Delta Ohm type HD 2101.2 (zie Figuur 4) die verbonden is met een gecombineerde pt100 sensor type HP475AC1R [21]. De sensor kan de absolute vochtigheid, het dauwpunt, de partiële dampdruk, de temperatuur, de mengverhouding, de enthalpie en comfortindex meten [21]. Voor de meetcampagne wordt er een tijdsinterval van 15 minuten gehanteerd om voorgaande parameters op te meten. Dit interval is een realistische waarde omdat de parameters niet per seconden zullen evolueren in de tijd. Daarnaast bevat deze sensor ook een automatische detectie module met een fabriekskalibratie die binnenin al aanwezig is. De meter is een *datalogger* die tot 38 000 meetgegevens kan opslaan in het geheugen en deze erna via een USB-kabel kan verzenden naar een computer [21].



Figuur 4: Thermo - hygrometer HD 2101.2 [21]

De sonde met HP475AC1R-sensor wordt in de kalkhennepwand aangebracht door gaten te voorzien op verschillende locaties in de wand (onderaan t.h.v. plint, onderaan wand, enz.) waar de relatieve vochtigheid en de temperatuur worden gemeten. De gaten worden voorzien op volgende dieptes in de kalkhennepwand:

- boring op volledige diepte, ter hoogte van het contactvlak kalkhennep met metselwerk;
- boring op 2/3 diepte van de isolatiedikte,
- boring op 1/3 diepte van de isolatiedikte.

Anderzijds wordt er ook gebruik gemaakt van een digitaal weerstation WH1080 die beschikt over een binnen- en buitensensor [22]. Deze sensoren worden mee verplaatst afhankelijk van de positie van de sensor in de kalkhennepwand. Hierdoor wordt er rekening gehouden met de oriëntatie van de buitengevel waarbij er variërende buitentemperaturen mee overeenstemmen. De sensoren van het weerstation meten de temperatuur en relatieve vochtigheid zowel in de binnenruimte als in de buitenomgeving. Hiermee wordt het volledige vocht- en warmtetransport doorheen de gebouwschil in kaart gebracht. Dit digitaal weerstation wordt enkel toegepast bij de eerste verbouwing, dit aangezien bij de tweede verbouwing het buitenklimaat niet gemeten kon worden door de aanwezige ondergrond.

Voor de eerste verbouwing gebeuren de metingen op drie verschillende kalkhennepdiktes (10, 22 en 30 cm) die aanwezig zijn in de bouwschil van de woning. De verschillende locaties in de bouwschil zijn van belang om het gedrag van kalkhennep in functie van opstijgend vocht te kunnen analyseren. Dit zou een vertekend beeld kunnen geven van de relatieve vochtigheid. In totaal gaat het om 9 meetpunten, voor elk meetpunt wordt ongeveer 24 uur aan data verzameld. Na deze periode wordt de sensor herstoken naar een volgende diepte. Wanneer dit gebeurd is voor alle meetpunten is de eerste meetcampagne afgelopen. Hierna volgt een tweede meetcampagne die twee weken later van start gaat. Hier worden de metingen uitgevoerd op één kalkhennepdikte (23 cm), dit aangezien de kalkhennep in de kelder ongeveer overal dezelfde dikte heeft. Voor deze kalkhennepdikte worden er drie gaten voorzien met een tussenafstand van telkens 20 cm, dit op de dieptes lijkt hierboven vermeld.

Vervolgens wordt er een numerieke analyse uitgevoerd waarbij er gekozen wordt voor de WUFI® *software*. Dit laat toe om een realistische berekening uit te voeren van een ééndimensionale warmte- en vochttransport in bouwschillen die blootgesteld worden aan natuurlijke weerscomponenten. In eerste instantie worden de verschillende materialen ingegeven met bijbehorende dikte zodat de bouwschil wordt gecreëerd. Daarna wordt het virtueel klimaat gekozen aan de hand van de opgegeven locatie. Binnen dit onderzoek worden enkel de wandopbouw gesimuleerd die tijdens de eerste meetcampagne worden geëvalueerd omdat de ondergrond (kelder) bij de tweede meetcampagne niet kan worden ingegeven. Hierdoor kan er een objectieve vergelijking gemaakt worden tussen experimentele metingen en numerieke simulaties bij de eerste verbouwing.

Hierna worden drukproeven uitgevoerd voor de samendrukbaarheid van de kalkhennepmengsels *in situ* te bepalen. Deze worden uitgevoerd in het Technologiecentrum op de campus te Diepenbeek. Vooraleer de drukproeven worden uitgevoerd, worden er vier verschillende samenstellingen aangemaakt. Deze verschillen in hoeveelheid en type additief (NHL 3.5/ Hempad+), hoeveelheid water (H₂O) en hoeveelheid bindmiddel (Supercalco 97). Daarna worden deze aangebracht in een kubusvormige bekisting zodat deze een afmeting bekomen van 10x10x10 cm³, hier wordt niet naar verdichtingswijze gekeken. De aangemaakte monsters drogen in open lucht gedurende 28 dagen in een ruimte met een gemiddelde temperatuur van 14,80 °C en een relatieve vochtigheid van 68,50 %. Hierna worden de monsters meteen ontkist en gedurende 24 uur in een droogoven (50 °C) geplaatst. Ook worden er drie monsters ($\approx$ 10x10x10 cm³) bekomen die gezaagd worden uit een Isohempblok¹.

¹ De hennep blok bestaat uit 9 % luchtkalk, 11 % hydraulische kalk en voor 80 % uit hennep [35]. Verder wordt deze gegoten, geperst, gehard en in open lucht gedroogd zonder extra warmte-inbreng [35].

Na het aanmaken van de monsters worden deze dan op hun beurt belast door middel van een drukbank (Zie Figuur 5).



Figuur 5: Drukbank [23]

De bekomen druksterktes van de *in situ* mengsels onderling en de Isohemp kubussen kunnen vergeleken worden. Tijdens deze proef wordt er geen rekening gehouden met de warmtegeleidbaarheid van de mengsels, alsook het bepalen van een elasticiteitsmodulus van de monsters.

Tenslotte wordt er onderzocht hoe de verdichtingswijze van de monsters de eigenschappen van de kalkhennep kunnen (negatief) beïnvloeden. Dit wordt ten eerste aangetoond met een absorptietest waarbij het absorberend vermogen van de monsters bepaald wordt. Enerzijds wordt dit op korte termijn getest door middel van een korte onderdompeling (≈ 20 sec.) in een emmerwater. Hierbij worden 9 monsters gebruikt met dezelfde verdichtingswijze die hetzelfde drogingsproces ondergaan als bij de drukproeven. Na het onderdompelen van deze monsters worden ze vervolgens gewogen op verschillende tijdstippen. Het absorberend vermogen wordt bepaald door het droog en nat gewicht in rekening te brengen. Anderzijds wordt dit getest door middel van een lange onderdompeling (≈ 1 week). Hier worden twee monsters met dezelfde samenstelling, maar met verschillende verdichtingswijze getest. Deze worden opeenvolgend getest door middel van een drijfvermogen balans systeem met waterreservoir. Deze test wordt uitgevoerd totdat $\Delta\text{massa} \approx 0.1\%$ (verzadiging), dit om de exacte hoeveelheid aan absorptiegehalte te kunnen bepalen.

Ten tweede wordt dit aangetoond door middel van een capillariteitstest. Hier worden twee dezelfde proeven uitgevoerd die op elkaar volgen. Voor de eerste proef worden twee verschillende samenstelling gebruikt, met telkens twee monsters ($15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$). Bij de tweede proef worden verschillende samenstellingen met verschillende afmetingen gebruikt. De gebruikte monsters worden op tafel geplaatst in ovenschalen die gevuld zijn met evenveel water (ongeveer 1 cm diep). Daarna wordt het water aangelengd met methyleenblauw voor het aankleuren van de kalkhennepmonsters. Vervolgens worden door middel van twee *iPads* met camera gelijktijdige filmrollen gestart. Hierdoor kan de capillariteit (stijghoogte) in de monsters in functie van de tijd weergegeven worden.

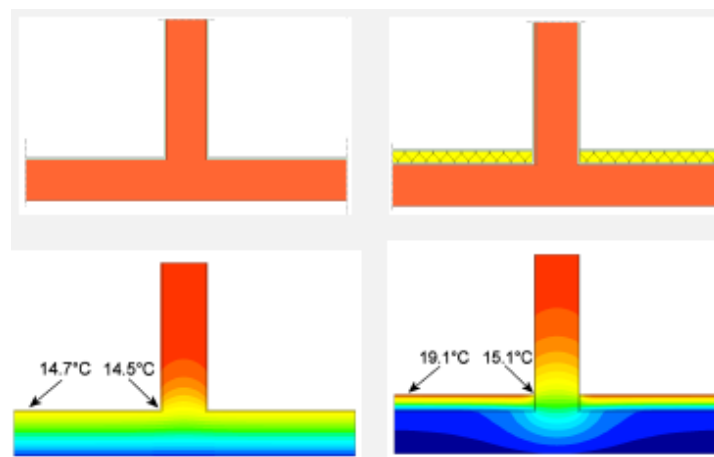
1 Literatuurstudie

1.1 Aandachtspunten binnenisolatie

Bij verbouwingen van massieve dragende muren is het isoleren aan de buitenzijde hiervan meestal niet mogelijk omwille van esthetische redenen [5]. Isoleren aan de binnenzijde van de wanden is een andere mogelijkheid waarbij de traditionele gevelafwerking behouden blijft. Hierbij moeten wel enkele aandachtspunten in acht worden genomen.

1.1.1 Koudebruggen

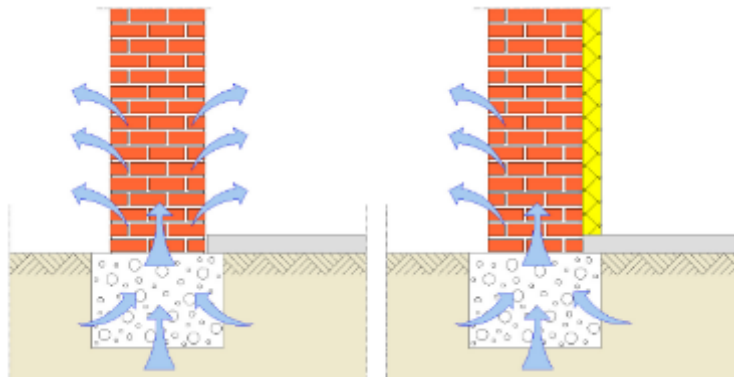
Door het plaatsen van binnenisolatie verandert de bouwfysische prestatie van de gevel bij een massieve buitenmuur uit metselwerk [24], [25]. Zo worden de thermische energieverliezen door de wand gereduceerd maar worden mogelijke koudebruggen extra geprofileerd [24], [25]. Koudebruggen ontstaan op plaatsen waar de isolatielaag onderbroken wordt door een bouwdeel zoals een binnenmuur (zie Figuur 6) of een tussenvloer [24]. Het is ook mogelijk dat de bevestiging van de binnenisolatie door middel van een metalen of houten stijl- en regelwerk een koudebrug kan vormen [24]. Dit gebeurt wanneer het stijl- en regelwerk in direct contact is met het gevelmetselwerk waardoor de warmte gemakkelijk van de binnenruimte naar buiten kan geleiden [24].



Figuur 6: Koudebrug ter hoogte van binnenmuur [24]

1.1.2 Vochtbelasting

Ook moet er voldoende aandacht besteed worden aan de vochtbelasting van de gevels ten gevolge van opstijgend vocht, (slag)regen, inwendige condensatie en eventueel bestaande vochtproblemen [24], [25]. Door de grote vochtbelasting is het noodzakelijk dat de gevel goed moet kunnen drogen [24], [25]. Dit wordt verhinderd door de plaatsing van isolatie aan de binnenzijde van het metselwerk (zie Figuur 7) [24], [25].



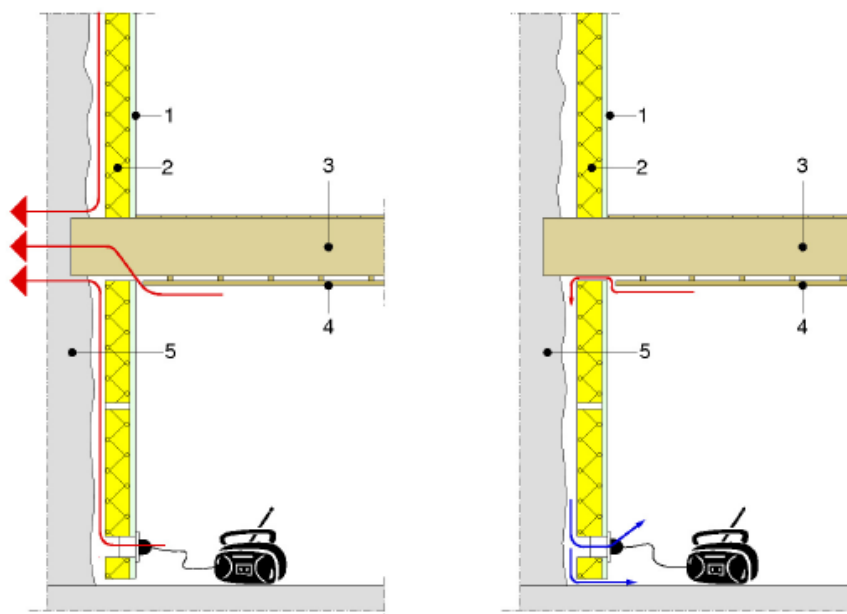
Figuur 7: Verhinderde droging [24]

De isolatie aan de binnenzijde verhindert niet alleen het drogingsproces van het metselwerk maar houdt ook de warmte uit de binnenruimte tegen in de winter [24], [25]. Hierdoor heeft het gevelmetselwerk een lagere temperatuur [24], [25]. Wanneer er geen verwarming aanwezig was voor de verbouwing heeft dit geen invloed op de temperatuur van het gevelmetselwerk. Het verhinderde drogingsproces en de lagere temperatuur van het metselwerk zorgen voor een toename van het vochtgehalte van het metselwerk waardoor het risico op vorstschade en zoutuitbloeiingen in het gevelmetselwerk verhoogt [24], [25].

1.1.3 Luchtinfiltratie en luctexfiltratie

Het is ook van belang om luchtinfiltratie en luctexfiltratie door de bouwschil te voorkomen [24], [25]. Beweging van lucht in luchtsponen kan de isolerende prestaties aanzienlijk verlagen [9]. Er is een verhoogd risico op dergelijke convectiestromingen wanneer de oorspronkelijke gevelmetselwerkwand en het binnenisolatiesysteem niet luchtdicht zijn afgewerkt door bijvoorbeeld het ontbreken van een binnen- of buitenpleister (zie Figuur 8) [24]. Wanneer het bestaande gevelmetselwerk wel voorzien is van een binnen- of buitenpleister en die dus luchtdicht is afgewerkt, spelen deze stromingen een minder belangrijke rol [24], [25].

Ten slotte moet luchtcirculatie tussen het gevelmetselwerk en de isolatie ten allen tijden voorkomen worden [24], [25]. Warme lucht komt door de openingen boven aan de wand vanuit de binnenruimte achter de isolatie, koelt af, en stroomt langs de openingen aan de onderkant weer naar buiten (zie Figuur 8) [24], [25]. Eventueel vindt, door het contact met het koele oppervlak van de bestaande gevel, inwendige condensatie plaatst [25]. Hierbij is de staat van de bestaande gevel zeer belangrijk waarbij de vlakheid van het binnen oppervlak noodzakelijk is om een luchtdichte en performante geïsoleerde gevel te verwezenlijken zonder kieren en luchtsponen [24], [25]. Wanneer de vlakheid van het binnenoppervlak van de gevel niet kan worden gegarandeerd, moet hiermee rekening worden gehouden tijdens de keuze van het isolatiesysteem [24]. Isolatiesystemen waarbij gebruikt wordt gemaakt van elastische en flexibele isolatiematerialen genieten hierbij de voorkeur [24].



1. Binnenafwerking; 2. Thermische isolatie; 3. Houten draagvloer; 4. Plafondafwerking; 5. Metselwerk.

Figuur 8: Voorkomen luchtinfiltratie, -exfiltratie (links) en luchtcirculatie (rechts) [24]

Het verlagen van luchtlekken in de bouwschil leidt tot een verhoging van de effectief aanwezige hoeveelheid waterdamp binnenhuis [8]. Hierdoor verhoogt het risico op oppervlaktecondensatie, inwendige condensatie, slechte luchtkwaliteit, schimmelgroei, schade aan structuur en slecht binnenklimaat [8]. De optredende risico's kunnen beperkt worden door enerzijds het verhogen van de oppervlaktetemperaturen d.m.v. isolatie en anderzijds door het verwijderen van de aanwezige waterdamp d.m.v. mechanische ontvochtiging of door het gebruik van vocht-bufferende, hygrothermische materialen [8]. Maar deze materialen hebben een lagere thermische efficiëntie per dikte dan de gebruikelijke droge uitvoering van dampopen en dampdichte isolatiematerialen [8].

1.1.4 Basisregels

Hogere relatieve vochtigheid en verschillende luchtdrukregimes t.g.v. dampdicht bouwen en ventileren treedt meer op in hedendaagse woningen in vergelijking met oudere gebouwen [25]. Om hiermee rekening te houden en voorgaande besproken risico's te beperken, kunnen enkele basisregels omtrent de toepassing van binnenisolatie in acht worden genomen. De basisregels zijn als volgt:

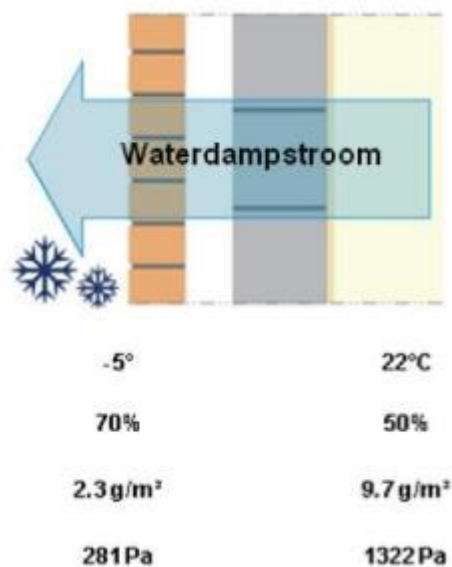
- zo dampopen mogelijke buitenafwerking voor optimale droging [24], [25];
- beperkte regenbelasting door bv. regenafdichting [24], [25];
- gebouw heeft een gezond binnenklimaat, goed functionerende ventilatie, verwarming en klimaatregeling [24], [25];
- een continu luchtscherm met extra aandacht voor het voorkomen van luchtsponen en kieren bij de aansluiting tussen de isolatie en de bestaande gevel [24], [25];
- minimaliseer de penetratie van de vochtigheid binnenhuis doorheen de buitengevel m.b.v. een dampscherm aan de warme zijde van de isolatie [25].

1.2 Het probleem inwendige condensatie

De toepassing van binnenisolatie botst met de algemene regels voor isoleren [4]. Enerzijds moet de sterkst isolerende en meest dampopen laag zich aan de koude zijde van de bouwschil bevinden [4]. Anderzijds moet de minst isolerende en meest dampdichte laag zich aan de warme zijde van de bouwschil bevinden [4]. Door het niet of beperkt toepassen van de algemene regels van isoleren, verhoogt het risico op inwendige condensatie bij de toepassing van binnenisolatie [4].

1.2.1 Dampdiffusie

Wanneer een bouwschil in aanraking is met lucht waarbij de dampdrukken verschillend zijn aan beide zijden treedt er een dampstroom op doorheen de bouwschil [26]. Het verschil in dampdruk wordt veroorzaakt door een verschil in relatieve vochtigheid (RV) of door een verschil aan temperatuur van de lucht [26]. De stroom zal altijd lopen van de hoogste naar de laagste dampdruk (zie Figuur 9), dit verschijnsel heet waterdampdiffusie [26]. Aangezien een bouwschil zoals bv. muur- en dakconstructies uit meerdere lagen van verschillende materialen bestaan, zal dit verschijnsel per laag verschillend zijn [26].



Figuur 9: Waterdampstroom doorheen gevel [26]

Poreuze materialen nemen vocht op in de poriën "in evenwicht" met de relatieve vochtigheid van de lucht [26]. Hierbij duurt het enige tijd vooraleer het poreuze materiaal de vochtigheid van de lucht bereikt [26]. Tegen dat beide in evenwicht zijn, is de luchtvochtigheid waarschijnlijk weer veranderd waardoor het evenwicht weer verstoord is en het materiaal weer op zoek gaat naar evenwicht [26].

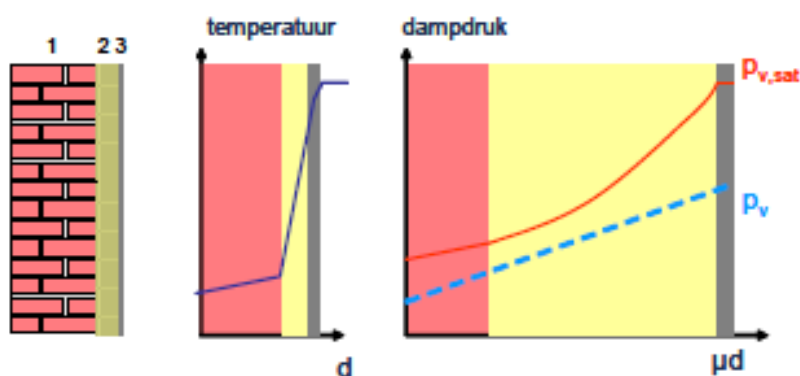
1.2.2 Relatieve vochtigheid

De relatieve vochtigheid geeft de verhouding aan van de hoeveelheid waterdamp die de lucht effectief bevat en de maximale hoeveelheid waterdamp die de lucht kan bevatten. [27]. Lucht kan een bepaalde maximale hoeveelheid waterdamp bevatten in functie van de temperatuur [27]. Voor warme lucht is dat veel en voor koude lucht is dat weinig [27]. Wanneer de luchttemperatuur daalt, kan deze dus minder waterdamp bevatten en stijgt de relatieve vochtigheid voor dezelfde effectieve aanwezige hoeveelheid waterdamp in de lucht [27]. De luchttemperatuur kan blijven dalen tot op een zeker moment dat de relatieve vochtigheid gelijk is 100 % waarbij de maximale hoeveelheid waterdamp bereikt is [24]. De temperatuur waarbij dat gebeurt, wordt het dauwpunt genoemd [24].

1.2.3 Glaser - methode

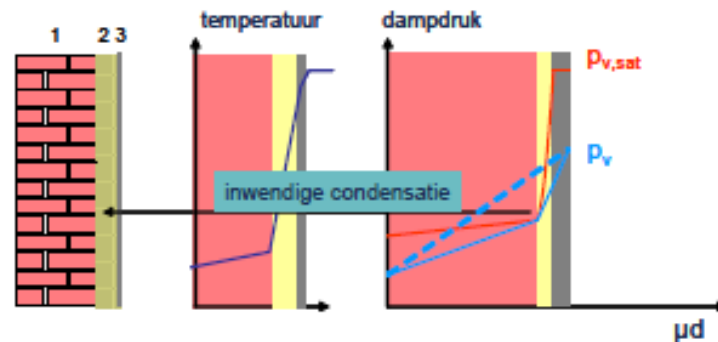
Inwendige condensatie ten gevolge van waterdampdiffusie treedt op als de temperatuur in de gevel door plaatsing van binnenisolatie tot beneden het dauwpunt daalt [24]. De overtollig aanwezige waterdamp die de lucht niet meer kan bevatten, condenseert op de overgang tussen twee lagen [24]. Dit verschijnsel kan worden voorspeld met behulp van de Glaser-methode waarbij de theoretisch berekende dampdruk P_v telkens wordt vergeleken met de verzadigingsdampdruk $P_{v,sat}$ bij de veronderstelde binnen- en buitenklimaatcondities [24].

Alle materialen hebben een bepaalde dampdiffusieweerstand μ (dimensieloos), dit is een materiaaleigenschap die aangeeft in welke mate waterdamp wordt doorgelaten doorheen het materiaal dan door lucht [24]. Meestal wordt de relatieve diffusieweerstand μd -waarde (d = dikte) gebruikt die de weerstand geeft van een materiaallaag [24]. Dampdichte isolatiematerialen zoals PUR, XPS en cellenglas hebben een hoge dampdiffusieweerstand μd en zijn dus dampremmend of volledig dampdicht [26]. Als deze materialen worden toegepast als binnenisolatie vormt inwendige condensatie normaal geen probleem (zie Figuur 10) [26].



Figuur 10: Glaser methode – dampdichte materialen [4]

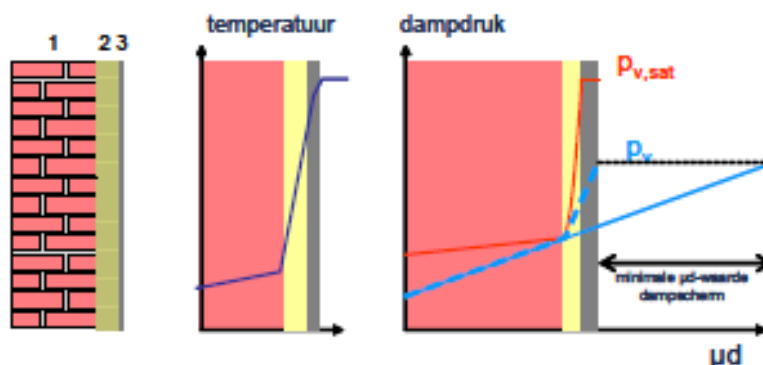
Wanneer dampopen materialen zoals minerale wol of cellulose worden gebruikt als binnenisolatie vormt er zich een risico op inwendige condensatie [4], [8]. Het risico is te wijten aan de lage dampdiffusieweerstand μd van de dampopen materialen [4]. Condensatie treedt op tussen de isolatie en het gevelmetselwerk waar de theoretisch berekende dampdruk (blauwe stippellijn) groter is dan de verzadigingsdampdruk (rode lijn) (zie Figuur 11) [4].



Figuur 11: Glaser methode - dampopen materialen [4]

1.2.4 Voorkomen van condensatie

Inwendige condensatie ten gevolge van waterdampdiffusie kan worden voorkomen door de bouwschil voldoende dampdicht uit te voeren aan de warme zijde van de isolatie [8]. Dit kan door een dampremmend isolatiemateriaal of door een dampopen isolatiemateriaal in combinatie met een dampscherm (zie Figuur 12) te voorzien [8]. Deze oplossingen zouden voldoende moeten zijn wanneer ze perfect worden aangesloten en intact zijn [8]. Echter in de realiteit vormen dampschermen geen perfect afgesloten geheel door: de moeilijke uitvoering ervan, accidentele schade, het toevoegen van leidingen, ... [8], [28], [29]. Naast de keuze voor een voldoende dampdichte bouwschil, is het ook mogelijk om een vochtbufferend, capillairactief isolatiemateriaal te voorzien waarbij het gevormde condensaat onmiddellijk wordt afgevoerd en er zich geen problemen voordoen [4], [8], [30].



Figuur 12: Glaser methode - dampopen isolatie met dampscherm [4]

Het feit dat er condensaat ontstaat in de bouwschil wil in de praktijk nog niet zeggen dat het totaal gevormde condensaat een probleem vormt [24]. Vooraf moet er een geaccepteerde hoeveelheid condensaat worden bepaald dat zich in de winter mag vormen waarbij het in de zomer mogelijk blijft om deze hoeveelheid te laten uitdrogen [24].

1.2.5 Zomercondensatie

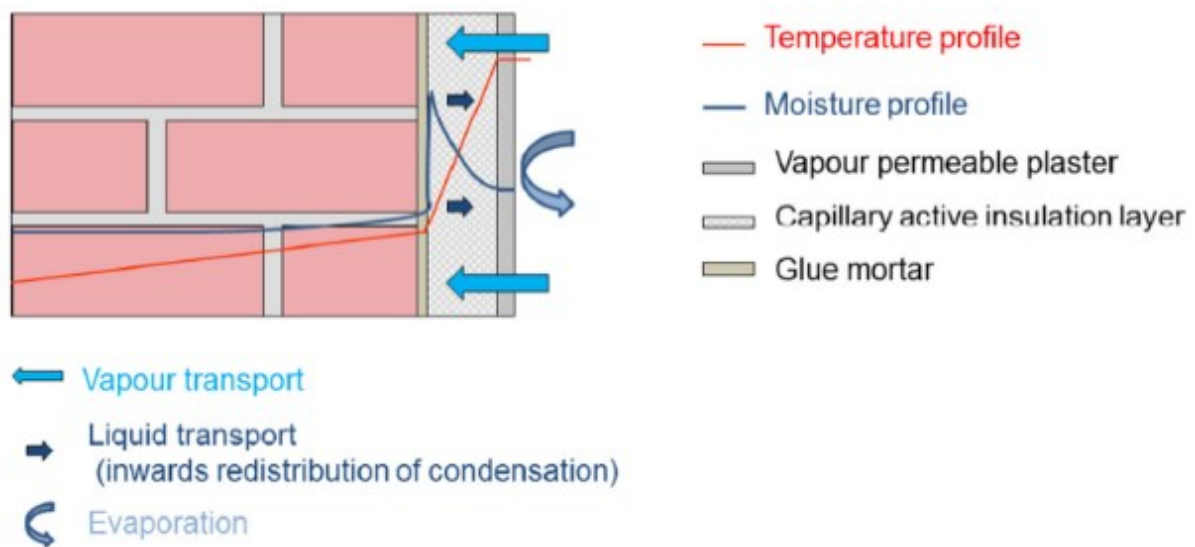
Bij het gebruik van dampopen isolatiematerialen zoals minerale wol en cellulose in combinatie met een dampremmende binnenafwerking kan er zomercondensatie optreden [31]. Zomercondensatie treedt op in de zomer wanneer de temperatuur aan het buitenoppervlak van het metselwerk hoger is dan de temperatuur in de woning [24]. Vochtig metselwerk dat wordt blootgesteld aan bezonning in de zomer veroorzaakt op deze manier een waterdampstroom in de bouwschil die van de buitenomgeving naar de binnenruimte gaat [24]. Condensatie gebeurt op de overgang tussen de isolatie en het dampscherm waarbij het condensaat in het isolatiemateriaal gaat intrekken [24].

Dikwijls is het optreden van zomercondensatie een kortstondig verschijnsel in vergelijking met inwendige condensatie en is ook de hoeveelheid condensaat gering [24]. Wanneer de buitentemperatuur daalt tijdens de nacht is het weer mogelijk dat het condensaat uit de bouwschil droogt [24]. Zomercondensatie kan voorkomen worden door een dampremmend isolatiemateriaal (vb. XPS en PUR) te voorzien i.p.v. een dampopen materiaal of de gevel te voorzien van een regenafdichting zodat de vochtigheid beperkt blijft [24].

1.2.6 Capillair actieve systemen

Het creëren van een volledig luchtdichte bouwschil is een zeer complexe opdracht [32]. Een slechte verbinding en kleine openingen in het luchtscherm beperken de totale capaciteit om de waterdampstroom te onderbreken [32]. Een oplossing voor dit probleem zijn de toepassing van capillair actieve isolatiematerialen [32]. Figuur 13 toont het werkingsprincipe van zo'n isolatiesysteem [32]. De muuropbouw bestaat van links naar rechts uit gevelmetselwerk, een laag mortel of lijm voor aanhechting, isolatie en een dampopen pleisterlaag (leemmortel) als binnenafwerking [32]. Gedurende de winterperiode veroorzaakt de temperatuur- en damp gradiënt een dampstroom naar buiten toe (grote lichtblauwe pijlen), deze stroom wordt mogelijk gemaakt door dampopen materialen toe te passen [32].

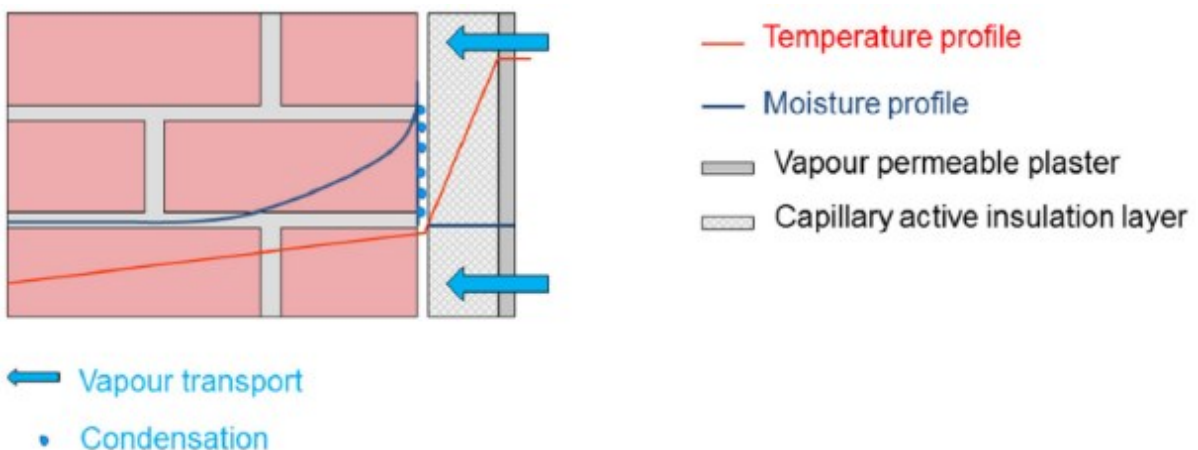
Wanneer de temperatuur tussen de mortel en de isolatie lager is dan het dauwpunt zal er inwendige condensatie optreden [32]. Hoewel een capillair actief isolatiesysteem poriën heeft binnen een bereik van $0,1 - 1 \mu$ die resulteren in een hoge vloeistofgeleiding in het bereik van het capillaire vocht [32]. Het actieve isolatiemateriaal kan het vloeibare water absorberen en herverdelen naar binnen toe in de richting van de binnenruimte (kleine donkerblauwe pijlen) onder invloed van een vloeistofstroom die de inwaartse capillaire drukgradiënt volgt [32]. Het vocht stroomt tot en met de pleisterlaag waar het vervolgens weer kan verdampen in de binnenruimte [32].



Figuur 13: Werking van capillair actieve isolatiesystemen [32]

De hygrothermische eigenschappen van het isolatiemateriaal en de mortel moeten op elkaar worden afgestemd zodat het systeem goed kan functioneren [32]. De reden hiervoor is dat het over-hygroscopische aanwezige vocht zou moeten plaatsvinden tussen de mortel en het isolatiemateriaal [32]. Zo kan het aanwezige vocht capillair getransporteerd worden doorheen de isolatie naar de binnenruimte toe [32]. Om dit mogelijk te maken moet de dampdiffusieweerstand van de mortel groter zijn dan deze van de isolatie terwijl de vloeistofgeleidbaarheid lager moet zijn dan deze van de isolatie [32]. Normaal gezien is de thermische geleidbaarheid van de mortel groter dan deze van de isolatie [32].

Merk op dat er een goed contact moet zijn tussen de originele muurconstructie en het capillair actieve isolatiemateriaal [32]. Deze is van cruciaal belang om de werking ervan te garanderen [32]. In het geval van een discontinue verbinding tussen het metselwerk en de isolatie omwille van luchtlekken of een luchtlaag (zie Figuur 14), kan het eventuele aanwezige gecondenseerde vocht niet geabsorbeerd worden en dus ook niet herverdeeld worden [32].



Figuur 14: Verstoorde werking capillair actieve isolatie door luchtlaag [32]

Ten slotte moet worden opgemerkt, zoals eerder vermeld, dat capillair actieve materialen dikwijls lagere gekarakteriseerde thermische eigenschappen hebben dan de traditionele isolatiematerialen [32]. Bovendien moet er rekening mee worden gehouden dat de thermische geleidbaarheid van deze materialen zeer afhankelijk zijn van het vochtgehalte [32]. Naast de oplossing voor het probleem inwendige condensatie, kunnen deze isolatiematerialen ook een zeer grote hoeveelheid vocht bufferen [32].

1.2.7 WUFI®

Tegenwoordig zijn er niet-stationaire rekenmodellen voor warmte-, lucht- en vochttransport in bouwdelen beschikbaar [4]. De *software* die in enkele onderzoeken werd gebruikt, is de WUFI® *software* [16]. Deze dynamische methode houdt rekening met veranderlijke binnen- en buitencondities en de vochtcapaciteit van de materialen wordt ingerekend [9]. Computersimulaties nemen of kunnen niet alle variabelen in rekening brengen in een bepaalde situatie. Maar deze geven wel een veel betere indicatie van de effectieve thermische prestaties dan lineaire berekeningen (vb. stationaire Glaser methode) [9].

Computersimulaties geven een benadering van de dynamische respons van materialen terwijl metingen van de thermische eigenschappen enkel een grootteorde geven van de gemiddelde prestaties over een langere periode [9]. Dus zelfs simulaties geven geen exacte weergave van de werkelijke resultaten maar ze hebben het voordeel om potentiële pieken, sterktes en zwaktes te identificeren die misschien kunnen worden ervaren door gebouwen blootgesteld aan *real life* condities [9]. Naast de voordelen, heeft de dynamische methode ook een tekortkoming [4]. Namelijk wordt het luchttransport tussen de wand en de isolatie verwaarloosd [4], op deze manier worden luchtlekken aan de vloer en het plafond niet ingerekend.

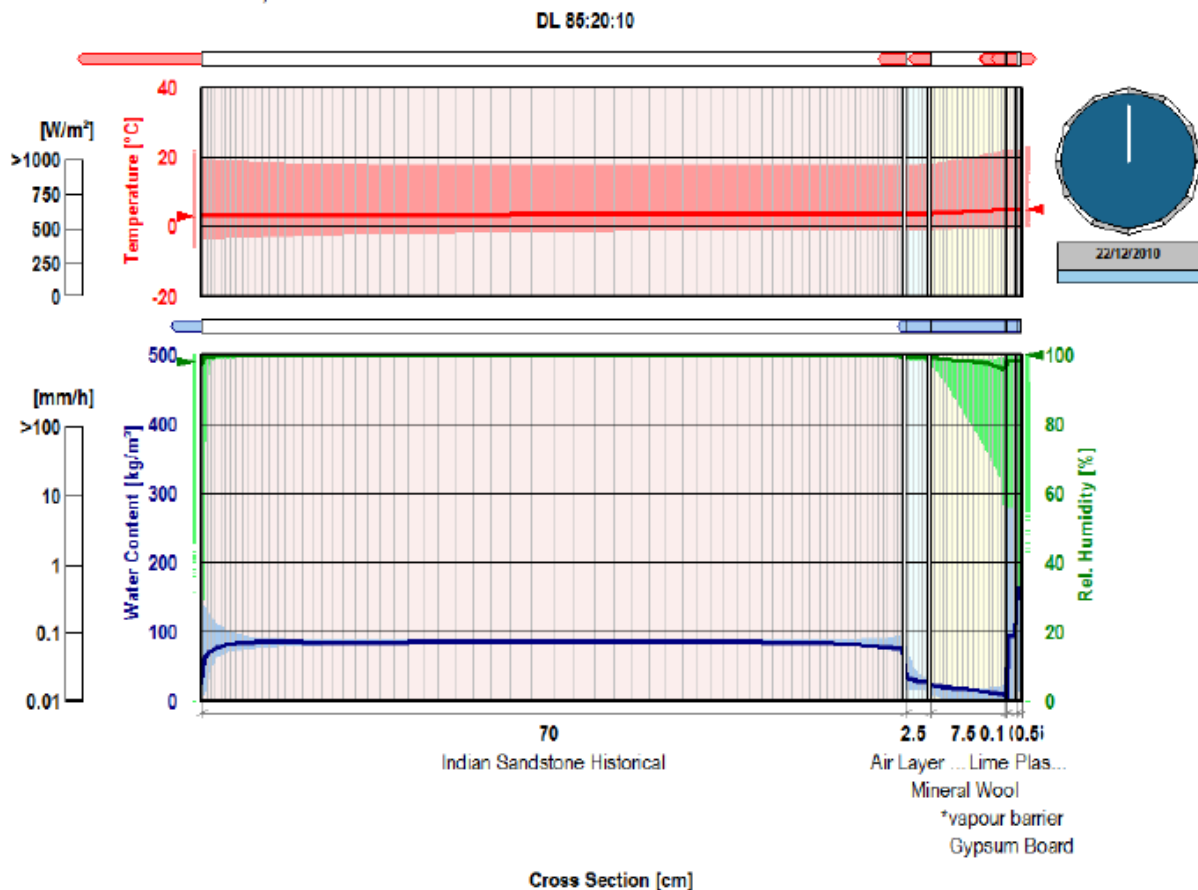
THESIS A.R FLOWER

WUFI® heeft een grote variëteit aan uitkomsten die tonen wat er gebeurt in een bouwschil onder veranderlijke binnen- en buitencondities [9]. Terwijl vele numeriek zijn, worden de meest nuttige uitkomsten bekomen door middel van de animaties [9]. Deze hebben minder focus op precieze *data* en geven een meer kwalitatieve weergave van de warmte- en de vochtstroom [9]. De animaties in deze studie worden gesimuleerd over een periode van één jaar [9]. De interessante tijdstippen tijdens deze periode worden hieronder besproken [9].

Algemene analyse tussen gewone wand met minerale wol versus kalkhennep

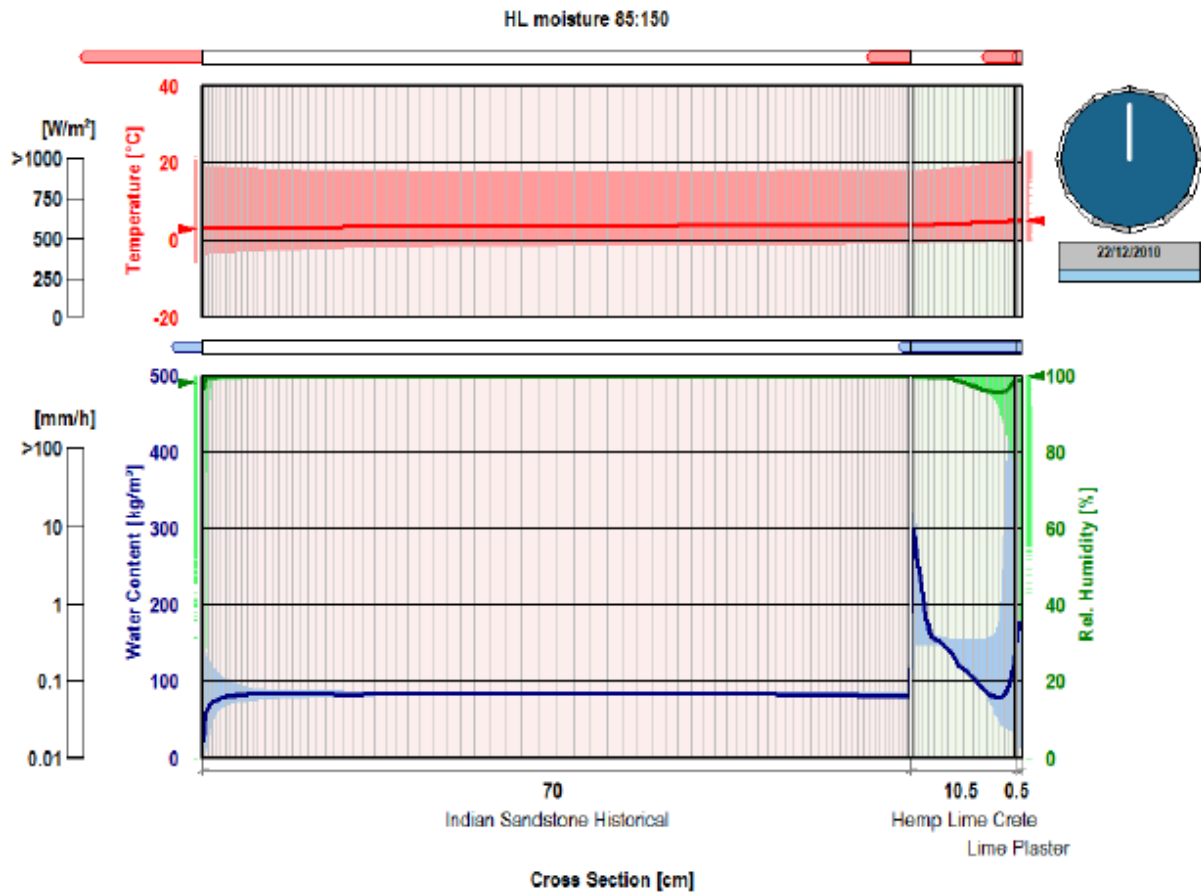
De muuropbouw (zie Figuur 15) van huidig project wordt voorgesteld van links (buiten) naar rechts (binnen) [9]. De opbouw bestaat uit een Indische zandsteen als gevelbekleding, een luchtlaag, minerale wol met dampscherm, gipskartonplaat en een kalkpleisterlaag [9]. In het bovenste diagram (zie Figuur 15) wordt de temperatuur doorheen de bouwschil getoond [9]. De rode lijn toont de effectieve temperatuur in functie van de tijd op een specifiek punt van de bouwschil [9].

Het diagram is aan het einde van de simulatie zoals getoond wordt door de klok [9]. Het roze gebied toont de omvang van de temperatuurschommelingen gedurende de simulatieperiode [9]. Op dezelfde manier wordt in het onderste diagram (zie Figuur 15) de relatieve vochtigheid getoond in het groen [9]. De blauwe lijn toont de aanwezige waterinhoud aan [9]. Boven elk van de twee diagrammen (zie Figuur 15) zijn er twee staven, een rode en een blauwe [9]. De pijlpunten geven de richting aan van de warmte- en de vochtstroom op elk tijdstip gedurende de volledige simulatieperiode [9].



Figuur 15: WUFI® -animatie met minerale wol [9]

De resultaten van de animaties met kalkhennep (zie Figuur 16) zijn gelijklopend met deze van de minerale wol. Er is een zeer kleine verandering in relatieve vochtigheid doorheen het metselwerk hoewel er een kleinere schommeling is in vochtigheid nabij het binnenoppervlak dan bij de minerale wol. Het vochtgehalte in de kalkhennep varieert vrij sterk maar de vochtigheid daalt niet onder de 80 %.

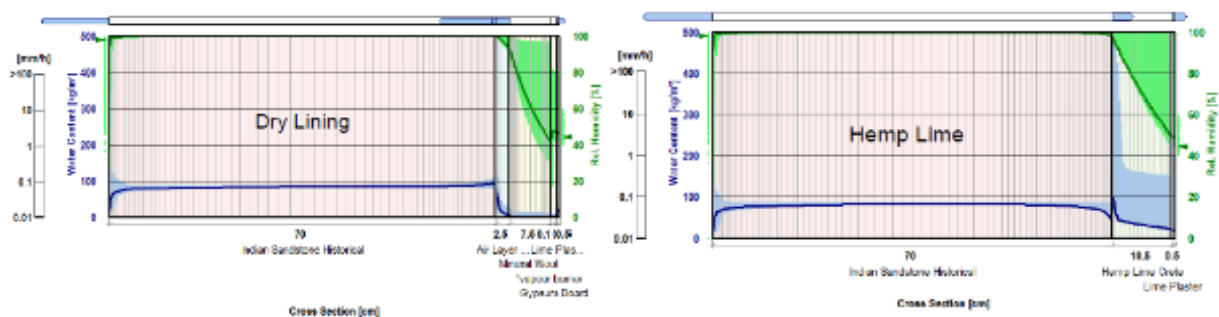


Figuur 16: WUFI® -animatie met kalkhennep [9]

Wat als analyse

a) Verandering binnenklimaat

Bij het veranderen van het binnenklimaat door het te verwarmen, treden er wel verschillen op [9]. De minerale wol behoudt vocht in de wand (zie Figuur 17 - blauwe lijn blijft constant) terwijl de kalkhennep de neiging heeft om het vocht af te voeren (vochtgehalte daalt) [9].



Figuur 17: WUFI®-animatie minerale wol vs. kalkhennep [9]

Veranderingen verwarmd binnenklimaat [9]:

- binnenklimaat: sinuscurve,
- $T_{\text{gem}} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- amplitude $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- maximum dag 3 juni,
- $RV_{\text{gem}} = 50 \%$,
- amplitude 10% ,
- maximum dag 16 augustus.

b) Vochtgehalte muur

Het initieel vochtgehalte van $10,8 \text{ kg/m}^3$ van de massieve muur stijgt bij het plaatsen van natte kalkhennep tegen de muur tot 45 kg/m^3 [9]. RV is zeer hoog ter hoogte van de overgang van de muur en de kalkhennep [9]. Na 18 maanden start de daling van de RV aan de overgang en deze gaat zo in een dalende trend [9].

De minerale wol heeft neiging om vocht op te bouwen in de muur aan het binnenoppervlak en draagt zo bij tot problemen zoals vochtschade terwijl de kalkhennep bijdraagt tot een verlaging van het vochtgehalte na 3 jaar waarbij deze de problemen verlaagt [9].

c) Alternatieve materialen

Bij het veranderen van een metselwerksteen i.p.v. de Indische leisteen verandert het vochtgehalte van 45 naar 30 kg/m^3 (daling van 15 kg/m^3) in 3 jaar bij de minerale wol [9]. Bij de kalkhennep daalt het vochtgehalte naar 15 kg/m^3 en verwijdert het zo 2 keer meer vocht (daling van 30 kg/m^3) [9].

IMPLICATIES

Kalkhennep is zeer effectief voor het transporteren van vocht wanneer het kan “ademen” [9]. Wanneer het wordt gebruikt als binnenisolatiemateriaal moet dit zowel aan de buitengevel als aan de binnenzijde van de muur blootgesteld worden aan enerzijds het buitenklimaat en anderzijds het binnenklimaat [9]. De heersende condities lijken bij te dragen tot abnormale hoge vochtconcentraties op specifieke punten in de muurconstructie [9].

Simulaties tonen aan dat pieken voorkomen op de overgang tussen de isolatie en de andere materialen in de bouwschil [9]. Deze pieken kunnen gaan tot volledige saturatie en oversaturatie van de respectievelijke materialen [9]. De pieken geven een verklaring voor de hoge over satureerde vochtgehaltenes gemeten door de sensoren [9]. Dergelijke pieken treden ook op bij de minerale wol maar waren enkel waargenomen bij de lucht/muur overgang [9].

Onder bepaalde omstandigheden, kunnen pieken ontstaan in de kalkhennep-kalkpleister overgang, deze kunnen beperkt worden door een verlaging van RV in de binnenomgeving [9]. Ook kunnen er pieken ontstaan in de kalkhennep zelf [9]. Zelfs na 10 maanden blijft het vochtgehalte ongewijzigd in het centrum van de kalkhennep [9]. Alleen na de 10 maanden was er een vochtstroom waargenomen in de richting van de kalkpleister [9]. Dus vochttransport en droging van de kalkhennep is niet volgens een uniforme constante stroming maar doet zich progressief voor in de vorm van een golf [9].

De pieken zijn gelokaliseerd, tijdsafhankelijk, over een korte periode en over een kleine afstand [9]. Ze gaan niet ver tot in de hennep en bereiken zeker niet het centrum van de kalkhennepwand [9]. Het tijdstip (tijdsperiode) waarbij de RV daalt onder de 100% aan de overgang tussen kalkpleister en kalkhennep is afhankelijk van de oorspronkelijke beginsituatie (vochtgehalte in de wand) [9].

Bij hoge gemeten RV in de kalkhennep ten gevolge van globale saturatie wordt er verwacht dat de RV zal dalen na ongeveer 18 maanden [9]. Als de hoge RV ten gevolge van lokale saturatie optreedt dan zal de gemeten waarde snel dalen (ongeveer 12 maanden), meestal is dit het geval [9].

Er werd niet onderzocht of deze pieken voor problemen zorgen. Bijkomende vragen over hoe kalkhennep kan ademen zijn:

- hoe het binnenklimaat kan verbeterd worden om vochtpieken te beperken tussen de pleister en de kalkhennep en misschien ook het drogingsproces te bevorderen [9];
- hoe de pieken variëren tussen de overgang van de buitengevel en kalkhennep onder veranderende condities en hoe vorstschade kan worden beperkt [9];
- hoe goed de samenwerking is tussen kalkhennep en andere materialen [9].

CONCLUSIES

De simulatieresultaten toonde aan dat kalkhennep effectief vocht kan afvoeren naar de binnenomgeving van het gebouw en wanneer het uiteindelijk volledig droog was, aanzienlijke hoeveelheden vocht uit de binnenruimte kan opnemen en afvoeren [9]. Aan de andere kant heeft droge minerale wol de neiging om de vochtconcentratie richting het binnenoppervlak van de muur te verhogen [9].

Gezien de beperkte tijdsperiode van de in *situ* verzamelde gegevens (relatief ten opzichte van het drogingsproces), was het niet mogelijk in deze studie om het volledige proces in kaart te brengen [9]. Echter de combinatie van de verzamelde gegevens in *situ* en de simulatieresultaten identificeerde het fenomeen van hoge vochtpieken op de overgang van de kalkhennepisolatie en de andere wandcomponenten [9]. Deze pieken tonen aan hoe de kalkhennep reageert op veranderingen in vochthoeveelheden in de binnenomgeving en hoe het werkt als een effectief vochtbufferend materiaal. Ten slotte toont het ook aan dat het drogingsproces in kalkhennep een golfvormig verloop vertoont [9].

In deze geanalyseerde case traden de pieken op in de leistenenmuur en de kalkpleister aan de binnenzijde van de bouwschil [9]. De pieken overheerste in de tijd onmiddellijk na het aanbrengen van de isolatie [9]. Ze varieerde in de tijd en hun intensiteit nam af na een bepaalde tijdsperiode [9]. Deze studie biedt een kwalitatief inzicht in de aard van deze pieken en de vochtstomen in de kalkhennepisolatie [9].

De verzamelde gegevens bevatten afwijkingen met in het bijzonder relatieve vochtigheden groter dan 100% boven de limieten van de sensoren en WUFI®-simulaties [9]. De combinatie van ongebruikte gegevens en simulaties toonde het potentieel aan van abnormale pieken in vochtgehalte bij de overgang van de kalkhennep en de overige materialen [9]. Deze pieken zijn afhankelijk van de heersende klimaatcondities en tijdsafhankelijk [9]. Ze variëren in duur maar ze hebben de neiging om minder lang te duren aan de overgang met de kalkpleister aan de binnenzijde dan aan de overgang met de buitengevel [9].

1.3 Samenstelling kalkhennep

De toepassing van kalkhennep is een voorbeeld van een vochtbufferend, capillair-actief materiaal [8], [18], [28], [33]. Kalkhennep kan dienstdoen als een isolerend bouw materiaal bestaande uit zuivere natuurlijke producten [34]. Deze bestaan uit hennepvezels, kalk en (eventueel) een additief op basis van natuurlijke mineralen [3], [15]. Het additief verbetert de kleefkracht en versnelt de start van het drogingsproces [3], [20], [17]. Deze producten worden verwerkt met water waardoor de kalkhennep handmatig *in situ* aangebracht wordt in een natte vorm in bekistingen zodat een volledige isolatielaag wordt gecreëerd aansluitend tegen de bestaande muurconstructie. Het isolerend karakter wordt bepaald door de verhouding van hennep en kalk [6]. Door het product in natte vorm aan te brengen wordt een luchtdicht massief bouwdeel verzekerd door de natuurlijke aanhechting van de mengsels en vermindert het de kans op koudebruggen. Beide verbeteren de thermische prestaties naast de stabiele toestand van de berekende U-waarde [8], [9], [10], [28], [35]. Dit doordat er een homogeen geheel gevormd wordt zodat voegen of aansluitingen overbodig zijn [36]. Dit kan onmogelijk bekomen worden met isolatierollen of platen [36].

Daarnaast kan kalkhennep ook verkregen worden in kant-en-klare blokken (zie Figuur 18) die uniek zijn in België (Isohemp) [3], [37]. Deze bestaan uit een evenwichtige mengeling van luchtkalk (9 %), hydraulische kalk (11 %) en hennepscheven (80 %) [12].



Figuur 18: Isohemp Blokken [37]

De blokken worden *in situ* in een droge vorm in halfsteensverband gemetseld met lijm mortel aan de onderzijde en tegen de binnenzijde van een massieve muur uit steen [3]. Het grote voordeel is dat het uitdrogingsproces van het product bij het aanbrengen reeds al voltooid is [3]. Tot de dag van vandaag kunnen de blokken nog niet als drukvast beschouwd worden om te fungeren als een dragende muur [12]. Daarnaast zijn ze wel in beperkte mate isolerend ($\lambda = 0,07 \text{ W/mK}$), toch zal de effectieve isolatiewaarde veel gunstiger aanvoelen dan de cijfers beweren [9], [12]. De kalkhennepblokken zijn verkrijgbaar in diktes gaande van 60 tot 300 mm [37]. Voor een dikte van 300 mm wordt een warmteweerstand (R-waarde) bekomen van $4,28 \text{ W/m}^2\text{K}$, binnen het energieconcept mag dit beschouwd worden als voldoende [12].

Tenslotte mag er niet vergeten worden dat materialen zich anders gedragen in andere omstandigheden, ze passen zich namelijk aan het leven aan [9], [12]. Kalkhennep zal namelijk beter gaan isoleren wanneer de buitentemperatuur afneemt [12]. Echter kunnen deze de warmte beter vasthouden dan traditionele metselwerkwanden [38]. Daarnaast hebben het vochttransport en de faseveranderingen een grote invloed op de thermische prestaties van kalkhennep [18].

1.3.1 Hennepvezel

De milieuprestaties van kalkhennep beginnen bij de hennepcultuur [10]. De hennepvezel groeit als natuurgewas op praktisch iedere ondergrond in circa 100 dagen tot op een hoogte van drie tot vier meter [15]. Hierdoor kan op een relatief korte periode, één hectare ongeveer 8 tot 10 ton aan droge materie opleveren [10]. Dit wil zeggen dat er geen voedselgewassen gekapt moeten worden, dat er enkel lage onderhoudskosten nodig zijn en er geen toevoeging van biociden nodig zijn [3], [10], [15], [39], [40]. Naast de biologische productie kan er ook gekweekt worden via traditionele landbouw [15], [10]. Dit allemaal zorgt ervoor dat hennep zeer positieve milieuprestaties bevat [15], [41] en de dienst kan doen als hernieuwbaar materiaal [40].

Een hennepvezel kan bestaan uit een lange vezel (60-100 cm) of een korte technische vezel (10 – 15 cm) [42]. De meeste lange vezels worden gebruikt in textielproductie, de korte vezels worden gebruikt voor technische toepassingen [34]. Daarnaast speelt het schevengehalte² een belangrijke rol naargelang de toepassing [41]. Wanneer hennep gebruik wordt als isolatiemateriaal is deze vooral interessant door zijn isolerende werking, mechanische resistentie en lage dichtheid [43]. Daarnaast beweert Kymäläinen *et al* [41] uit een studie dat volgende criteria van belang zijn voor het gebruik van hennepvezel als isolatiemateriaal: 1) rotingsgraad, 2) vochtgehalte, 3) hoeveelheid scheven en stof, 4) hygiëne, gemeten a.d.h.v. microbiële dichtheid en as en 5) lengte van de vezel. Ook blijkt dat roten³ een merkwaardige kwaliteitsverbetering tot gevolg heeft [44], [34] maar hierdoor vermindert wel de drukresistentie [41]. Verder beweert Snauwaert *et al* [41] dat het nodig is om de vezels te ontsmetten, dit door de aanwezigheid van micro-organismen die tijdens het roten potentiële allergenen kunnen zijn [45].

Wanneer er naar de thermische geleidbaarheid van hennepscheven (zie Figuur 19) wordt gekeken wordt er een waarde teruggevonden gaande van 0.040 (isolatiewol- en deken) tot 0.054 W/mK (Prohemp) [34], [40], [46]. Daarnaast beschikken ze over een capaciteit die drie tot vijf keer hun eigen gewicht aan water kan opnemen en dan op hun beurt even gemakkelijk terug af kan geven [2], [6], [9], [34], [41]. Ondanks de weinig indrukwekkende warmtegeleidbaarheid is door deze unieke eigenschappen het isolerend vermogen van bouwmaterialen op basis van hennep zeer goed [6], [47].



Figuur 19: Prohemp hennepscheven [6]

² De scheven vormen het houtachtig materiaal rond het merg van de stengel van de hennepplant [6], [34], [41], [41]

³ Na het drogen wordt de hennep blootgesteld aan vocht om de pectine af te breken die de vezels bijeenhoudt [79]

Hennep beschikt over eigenschappen die een hygrothermisch gedrag vertonen [35], [10], [8]. De term hygroscopisch verwijst naar het vermogen van een materiaal om het absorberen, vasthouden en terug vrijlaten van water in dampvorm, dit in direct verband met de relatieve vochtigheid van de lucht ernaast [8]. Daarnaast heeft hennep een zeer gelijkaardig celstructuur (cellulosevezels) als houtvezels van een berk of wilg [10], waarvan het doel is om vocht te transporteren van de steel naar elk plantdeel [8], [17].

Figuur 20 geeft een benaderende analogie weer van het vochtgedrag van houtvezels, dit kan vergeleken worden met drinkkrietjes [28].



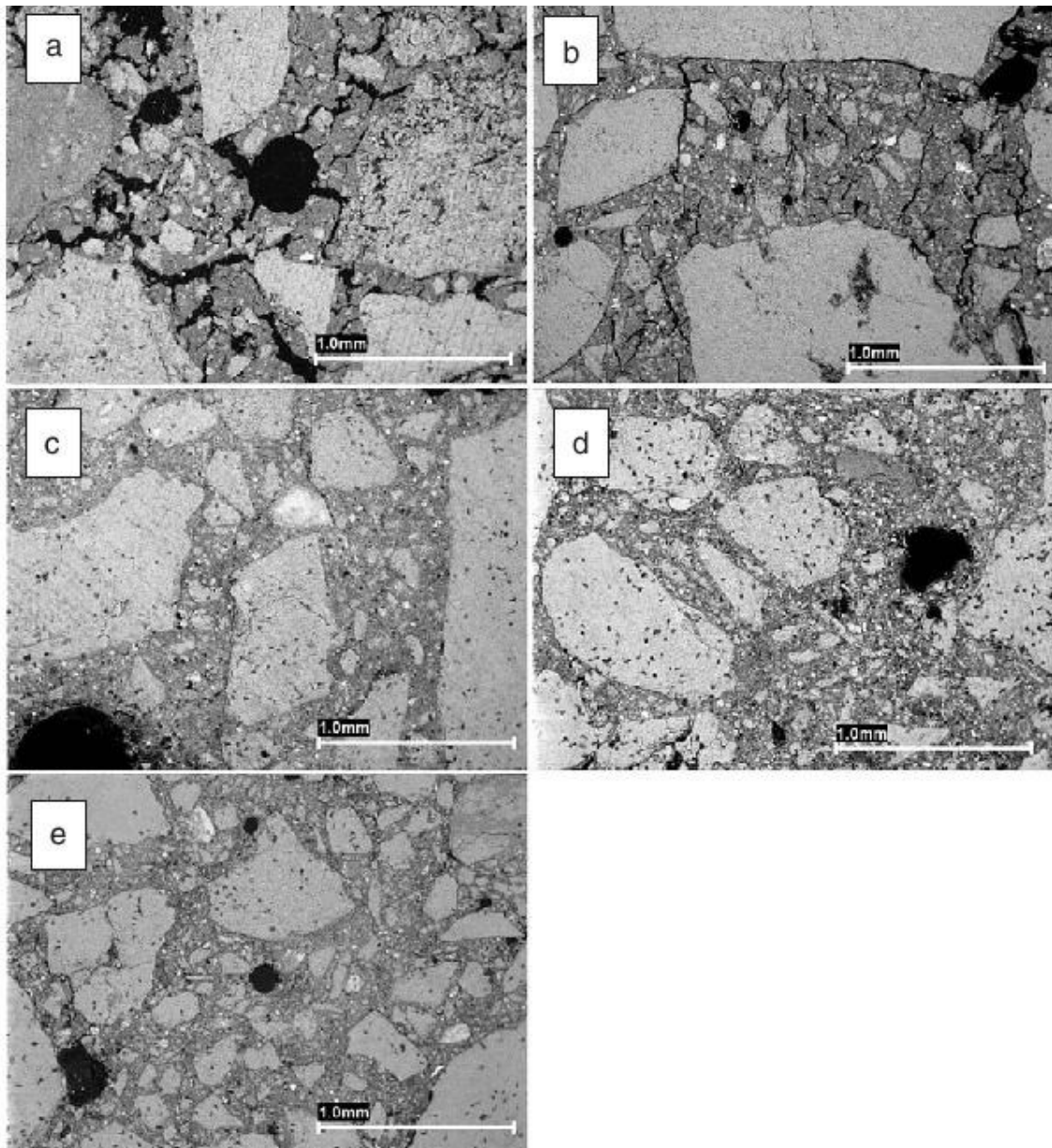
Figuur 20: Celstructuur houtvezel vergelijkbaar met drinkkrietjes [28]

Wanneer hennep afgehakt wordt ziet men aan de blootgestelde structuur dat deze gelijkaardig is aan dat van kopshout [8], [48]. Hierdoor beschikken beide over een vergelijkbaar vochtgedrag [8], [17].

1.3.2 Bindmiddel

Beoefenaars startte met het gebruik van cement als bindmiddel [14]. Hieruit werden maar weinige beslissende resultaten verkregen [14]. De belangrijkste reden hiervoor is dat het langzame carbonatieproces van kalk meer compatibel is met de snelle wateropname van de hennepvezels in vergelijking met de reacties van hydraulische bindmiddelen zoals cement [14]. Enerzijds zorgt de hoge pH-waarde van de kalk ervoor dat de hennepvezels beschermd zijn voor een lange tijd tegen schimmel en bacteriën [14]. De mechanische flexibiliteit laat lichte vervormingen toe zonder dat er scheuren optreden en zorgt voor een goede weerstand tegen schokken [14]. Anderzijds heeft kalk ook een lagere dichtheid en λ -waarde dan cement [14]. Een nadeel is dat kalk met een hoge kwaliteit voor bouwkundige doeleinden moeilijk te vinden zijn [14]. Ook is het chemische transformatieproces vrij traag vergeleken met de huidige verwachtingen op de bouwerven [14]. Daarom wordt er een kleine hoeveelheid hydraulisch- of puzzolanen bindmiddel toegevoegd. Andere specifieke additieven kunnen ook worden toegevoegd om de gewenste eigenschappen te verkrijgen [14]. De Tradical pf 70^R voldoet aan dit speciale bindmiddel ondanks dat het eerst werd ontwikkeld voor het toe te passen bij mortels in oud metselwerk [14].

De impact op het milieu wordt bepaald door het bindmiddel van het mengsel [8], [34]. Dit bindmiddel kan bestaan uit cement houdende- of een puur natuurlijke kalk. Zoals men kan zien op Figuur 21 vertoont luchtkalk (a) een zeer poreuze structuur (zwarte kleuren), de poriën worden namelijk verbonden door fijne scheurtjes [17]. Dit laat toe dat de celstructuur van de hennepvezels openblijft door de omringende lucht [17]. Hierdoor is dit een zeer geschikt bindmiddel voor hennep [10], [14], [41], [17].



Figuur 21: Mortels overeenstemmend met volgende bindmiddelen. a) Luchtkalk, b) kalk/cement verhouding 8:1, c) kalk/cement verhouding 6:3, d) kalk/cement verhouding 4.5:4.5 en e) Hydraulische kalk [17], [49].

De permeabiliteit van een materiaal is niet enkel afhankelijk van de hoeveelheid aanwezige poriën, maar ook van de manier waarop ze gestructureerd zijn [17]. Bijvoorbeeld op Figuur 21 c,d,e ziet u poriën die niet onderling zijn verbonden. Dit heeft als gevolg dat het vocht zich niet vrij kan verplaatsen door de poriën en uiteindelijk erin opgesloten geraakt [17]. Ondanks dat de hydraulische kalk (e) minder goed doorlatend is, wilt dit zeggen dat de porositeit van het bindmiddel nog altijd de hygroscopiciteit van de hennep niet hindert [17], [49].

De natuurlijke kalk kan bestaan uit een hydraulische- of een luchtkalk. Het verschil is dat de luchtkalk verhardt door opname van CO_2 uit de lucht (carbonisatie) en de hydraulische kalk verhardt door opname van water (H_2O) [50]. Door het traag carbonatieproces van de kalk en door de snelle wateropname van de hennepvezels is dit meer geschikt als bindmiddel dan cement [14]. Bovendien is zowel de dichtheid als de thermische geleidbaarheid lager dan die van cement [14].

1.3.2.1 Luchtkalk

Tijdens de productie wordt er bij luchtkalk minder energie opgenomen dan bij cement. Dit omdat het een lagere verbrandingstemperatuur (800 à 900 °C) aan kalksteen heeft [10], [51]. In tegenstelling tot andere materialen beschikt deze echter over een hogere opgenomen energie [51]. De luchtkalk zal tijdens het verbrandingsproces een gedeelte aan koolzuur (CO_2) vrijlaten [9], [17]. Hierdoor kan tijdens de verharding opnieuw CO_2 opgenomen worden [17], [52]. Daarnaast wordt luchtkalk ook wel gebluste- en/of hydraatkalk genoemd [17]. Dit wil zeggen dat deze is gehydrateerd/geblust is met water en dan uithardt over een periode van minstens één jaar [17]. Ook heeft een uitgeharde hydraatkalk een veel fijnere micro-poriënstructuur dan een hydraulisch bindmiddel [17]. Hierdoor is er geen plaats meer voor waterdamp en zouten, deze worden uitgeperst (pompwerking) naar de lucht toe. Daardoor zal deze dus een gebouw actief droog maken en zal de droge wand ook beter isoleren [50]. Daarnaast beschikt een hydraatkalk over twee belangrijke kwaliteiten. Enerzijds beschikt deze over een ductiel gedrag waardoor een lichte vervorming zonder scheuren mogelijk is. Anderzijds heeft deze ook een sterke schimmeldodende en antibacteriële werking, dit door zijn hoge pH-waarde [10], [14].

1.3.2.2 Natuurlijke hydraulische kalk

Hydraulische kalk ontstaat door het verbranden van kalksteen, deze bevatten natuurlijke verontreinigingen of onzuiverheden [51]. Deze komen meestal voor in kalksteen die een hoger kleigehalte bevat [17]. Een verschil in productiemethode met luchtkalk is dat de vereiste temperatuur van verbranding van de kalksteen ongeveer 1200 °C bedraagt, hierdoor komt er een hogere energie vrij [17]. Met andere woorden hoe hydraulischer de kalk des te hoger de CO_2 afdruk [50]. Maar nog steeds is de verbrandingstemperatuur lager dan die van cement [17]. Daarom zijn ze ook van mening om hydraulische kalk te gebruiken in overeenkomst met een luchtkalk, dit omdat er 30 % minder energie vrijkomt dan bij cement [51].

De term hydraulisch komt van de reactie van de onzuiverheden met water waardoor deze uithardt [53]. Een hydraulisch bindmiddel gaat tijdens het uitdrogen H_2O verdampen, de meegevoerde zouten verdampen niet, maar zij kunnen kristalliseren binnen in het mengsel. Hierdoor zal deze naderhand vocht gaan aantrekken en tegenhouden waardoor deze in de winter kunnen kapotvriezen. De levensduur van de hydraulische kalk is dus beperkter dan deze van hydraatkalk [50].

1.3.2.3 Additief

Kalk kan ook dienen als additief om de gewenste eigenschappen te verbeteren [14], [20]. Deze eigenschappen kunnen gaan over de aanwezigheid van lucht tijdens chemische reacties, waterafstotendheid tot oppervlaktebedekking [14]. Daarnaast verbetert het additief de kleeftkracht en versnelt het de start van het drogingsproces [3], [20], [17]. Hiervoor wordt best een natuurlijke hydraulische kalk gebruikt, dit omdat een hydraatkalk een langere verhardingstijd nodig heeft [17], [50].

Volgens Smith [54] is de *Natural Hydraulic Lime (NHL) 3.5* de meest geschikte voor mortel toepassingen [55], dit aangezien deze ongeveer 12-18 % aan verontreinigingen bevat. De *NHL 3.5* verhardt ongeveer in 15-20 dagen en beschikt over een middelmatige sterkte [17]. Daarnaast toont Wilkinson S [28] aan dat hennep met een verhouding 2:1 – Luchtkalk en hydraulische kalk als bindmiddel geen verschillend vocht buffercapaciteit vertoont dan hennep zonder enig bindmiddel [17].

1.3.3 Verschillende samenstellingen kalkhennep

Zoals hierboven vermeld bestaat kalkhennep uit zuivere natuurlijke producten, die bestaan uit hennepvezels, kalk en een additief op basis van natuurlijke mineralen [15]. Deze producten worden vermengd met water tot een natte vorm ontstaat. Daarnaast wordt het isolerend karakter enerzijds bepaald door de juist verhouding/samenstelling van hennep en kalk [6], [56] en anderzijds door de dichtheid en vakmanschap [56], [57].

1.3.3.1 Tradical Hemcrete - Arnaud Evrard & André De Herde

Dit is een commercieel geproduceerd biocomposiet bouw materiaal van hennep (*Tradical Hemp shiv (HF)*) en kalk (*Tradical Hemp binder (HB)*) dat goedgekeurd is door de *Local Authority Building Control (LABC)* in april 2008 [17]. Hierdoor heeft dit kalkhennep een erkenning als bouw materiaal maar dit wijst enkel op een commercieel product. Echter zijn de milieukeurmerken minder aantrekkelijk als die van een ordinaire hydraatkalk [17].

De *Tradical hemp binder (Tradical pf 70)* is de gepatenteerde luchtkalk dat dienst doet als een pre-geformuleerd bindmiddel [58]. Deze bestaat uit 75 % luchtkalk *CL90S*, 15 % hydraulisch bindmiddel, 10 % puzzolaan bindmiddel en ~ 0,5 % aan additieven [10]. De *Tradical hemp filler (Tradical HF)* is een natuurlijk, ecologisch, geluid en 'ademend' product [58]. Over de juiste verhouding/samenstelling van deze producten is niets terug te vinden.

Uit een studie van Evrard [10] en Evrard & De Herde [14] worden volgende samenstelling (zie Tabel 1 en Tabel 2) teruggevonden voor een kalkhennepwand:

Tabel 1: Verhoudingen kalkhennepwand volgens Evrard [10]

LHM-wall mix	Mass batching		Volumetric batching	
	%mass	[kg] if 20kg of Chanvribat	%vol	[litre] to obtain 1m ³
Chanvribat	17%	20	55%	1010
Tradical pf 70	33%	40	23%	410
Water	50%	60	22%	400
Total	100%	120	100%	1820

☐ Chanvribat
☐ Tradical pf 70
☐ Water



Tabel 2: Kalkhennepverhouding volgens Evrard & De Herde [14]

Kalkhennepverhouding					
	l	kg	m ³	Gewicht [%]	Volume [%]
Chanvribat	1181,82	130,00	1,238	18,57	63,82
Tradical pf 70	352,00	220,00	0,352	31,43	18,14
Water	350,00	350,00	0,350	50,00	18,04
/	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00
	1883,82	700,00	1,940	100,00	100,00

De gewichts- en volumeverhouding van de kalkhennep samenstelling wordt bekomen door rekening te houden met volgende densiteiten⁴:

Tradical pf 70: $\approx 650 \text{ kg/m}^3$ [10]

Chanvribat (hennep): $\approx 110 \text{ kg/m}^3$ [58]

Water: $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$

Voor de proeven begonnen (zie 1.4.2.2 en 1.4.2.3) waren de mengsels 3 jaar geleden aangemaakt waardoor de carbonatie en droging vervolledigd waren.

1.3.3.2 Modece Architects - Marion Wright

In de studie van Marion Wright [17] wordt een samenstelling (zie Tabel 3) gehanteerd die gebaseerd is op praktijkervaring van Architectenbureau *Modece Architects*. Deze hoeveelheden hanteerde ze voor het maken van een kalkhennep wand *in situ*.

Tabel 3: Kalkhennepverhouding volgens Marion Wright [17]

Kalkhennepverhouding					
	l	kg	m ³	Gewicht [%]	Volume [%]
Tradical HF hemp shiv	50,00	5,50	0,046	22,77	64,71
Luchtkalk	10,00	5,40	0,010	22,36	14,12
Water	10,00	10,00	0,010	41,41	14,12
NHL 3.5	5,00	3,25	0,005	13,46	7,06
	75,00	24,15	0,071	100,00	100,00

De gewichts- en volumeverhouding van de kalkhennep samenstelling wordt bekomen door rekening te houden met volgende densiteiten:

Luchtkalk: $\approx 540 \text{ kg/m}^3$ [17]

Tradical® HF hemp shiv: $\approx 110 \text{ kg/m}^3$ [58]

NHL 3.5: $\approx 650 \text{ kg/m}^3$ [59]

Water: $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$

⁴ De densiteit of dichtheid van een stof (vast, vloeibaar of gas) is de massa per volume-eenheid

1.3.3.3 Chaux & enduits de St.-Astier (CESA) & Reynchemie

Het bedrijf CESA (Reynchemie) zijn zowel fabrikant alsook verdeler van natuurlijke kalksoorten en pleisters in 12 landen [60]. Deze fabrikant geeft volgende dosering (zie Tabel 4) aan voor kalkhennep [61].

Tabel 4: Kalkhennepverhouding volgens CESA [59]

Kalkhennep verhouding					
	l	kg	m ³	Gewicht [%]	Volume[%]
Isocanna	100,00	10,50	0,100	13,04	52,36
Batichanvre	56,00	35,00	0,056	43,48	29,32
Water	35,00	35,00	0,035	43,48	18,32
/	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00
	191,00	80,50	0,191	100,00	100,00

De gewichts- en volumeverhouding worden bekomen door rekening te houden met volgende densiteiten:

Batichanvre⁵: $\approx 625 \text{ kg/m}^3$ [59]

Isocanna (hennep): $\approx 105 \text{ kg/m}^3$ [61]

Water: $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$

⁵ Batichanvre is een kant en klaar kalkproduct waarin natuurlijke lucht- en hydraulische kalk verwerkt zit, deze is dan ook perfect afgesteld op de omgeving waarin kalkhennep wordt toegepast [6].

1.3.3.4 Paulien Strandberg-de Bruijn & Peter Johansson

Uit een onderzoekstudie naar het vochttransport van Strandberg-de Bruijn & Johansson worden samenstellingen gehanteerd waarbij ze beslissen om te werken met gekende verhoudingen en inhouden van de bindmiddelen [62]. De kalkhennepratio's zijn experimenteel getest op vlak van werkbaarheid en reproduceerbaarheid [62].

Strandberg-de Bruijn & Johansson maken in Tabel 5 gebruik van een kalk – hennep volumeverhouding 1:2,5 (A) en in Tabel 6 een volumeverhouding van 1:4 (B) [62].

Tabel 5: Kalkhennepverhouding A volgens Strandberg-de Bruijn & Johansson [62]

Kalkhennepverhouding A					
	l	kg	m ³	Gewicht [%]	Volume [%]
Variety Fedora 17	10,67	1,36	0,011	15,38	53,48
Slaked Lime CL90	3,68	1,84	0,004	20,91	18,47
Water	5,00	5,00	0,0050	56,76	25,06
NHL 5	0,49	0,37	0,0005	4,18	2,46
Fly ash (Emineral type B4)	0,11	0,24	0,0001	2,77	0,53
	19,95	8,81	0,020	100,00	100,00

Tabel 6: Kalkhennepverhouding B volgens Strandberg-de Bruijn & Johansson [62]

Kalkhennepverhouding B					
	l	kg	m ³	Gewicht [%]	Volume [%]
Variety Fedora 17	17,08	2,17	0,017	20,42	62,42
Slaked Lime CL90	3,68	1,84	0,004	17,34	13,47
Water	6,00	6,00	0,0060	56,48	21,93
NHL 5	0,49	0,37	0,0005	3,46	1,79
Fly ash (Emineral type B4)	0,11	0,24	0,0001	2,30	0,39
	27,36	10,62	0,027	100,00	100,00

De gewichts- en volumeverhouding worden bekomen door rekening te houden met volgende densiteiten [62]:

Slaked Lime CL90: $\approx 500 \text{ kg/m}^3$

Variety Fedora 17 (hennep): $\approx 127 \text{ kg/m}^3$

NHL 5: $\approx 750 \text{ kg/m}^3$

Water: $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$

Emineral type B4 (Vliegas): $\approx 2300 \text{ kg/m}^3$

Een puzzolaan (vliegas) wordt gebruikt om de verwerkbaarheid van het mengsel te verbeteren, het verminderen van de waterbehoefte en om de reactie van het bindmiddel te verbeteren [62].

1.3.3.5 Camille Magniont et al.

Uit een onderzoekstudie van Magniont *et al.* worden twee typen plantaardige aggregaten (zonnebloempitten en hennepscheven) vergeleken met elkaar op basis van hun resulterende eigenschappen [63]. De samenstelling van de kalkhennep bestaat uit een mineraal bindmiddel (50 % *NHL 5* en 50 % *flash calcined metakaolin (MK)*) en een organische vermenging (1 % *glycerol carbonate (GC)*) [63]. Glycerol is een hernieuwbare grondstof en wordt opgewekt door de chemische omzetting van plantaardige oliën [63]. Daarnaast bestaat het natuurlijk aggregaat uit hennepscheven van Cannhabitat geproduceerd door AgroFibre in Cazerres, France [63].

Tabel 7 geeft de verhoudingen weer van de gebruikte samenstelling (CH = kalkhennep). Ten eerste worden de gewichts- en volumepercentages van hennepscheven weergegeven. Vervolgens wordt het water/bindmiddel (W/B) ratio gegeven en tenslotte wordt de droge bulk densiteit getoond.

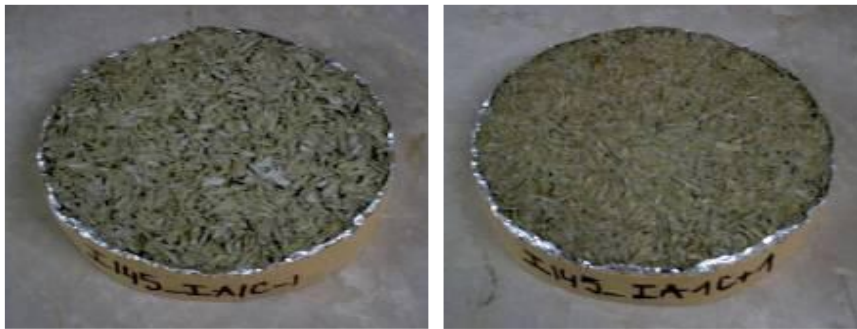
Tabel 7: Verhoudingen samenstelling [63]

Mix	Aggregates (weight %)	Aggregates (volume %)	W/B	Dry bulk density (kg/m ³)
CH10	10	24,10	0,61	924,80
CH25	25	38,40	0,88	630,30
CH32	32	42,10	1,00	533,60

1.3.4 Volumieke massa en droogtijd

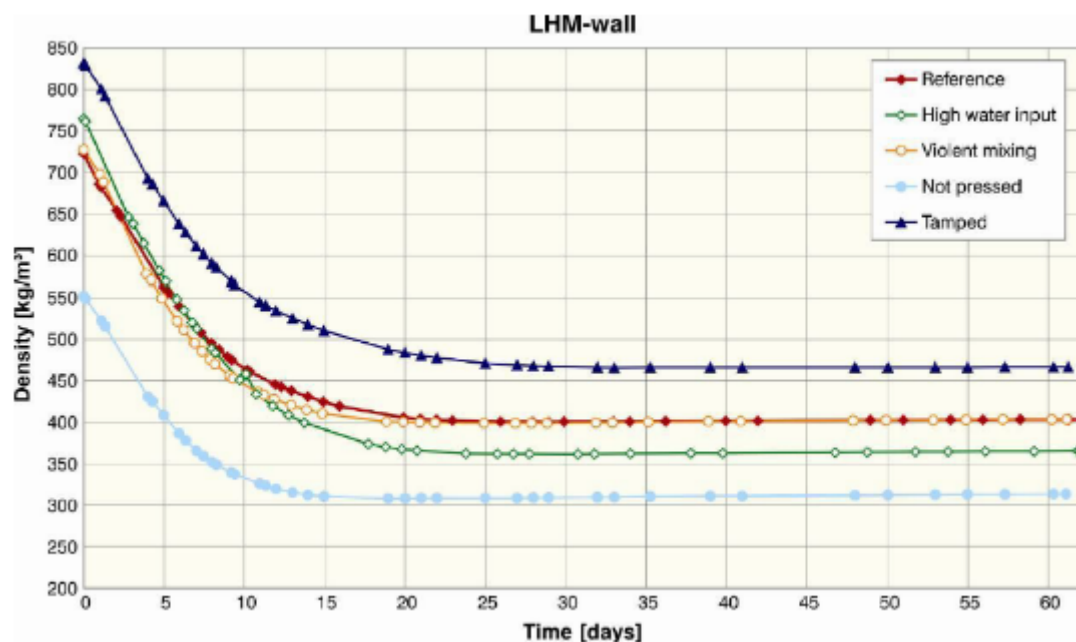
1.3.4.1 Arnaud Evrard

Uit de studie van Evrard [10] blijkt dat een minimum volumieke massa (densiteit) van een cilindrisch monster met diameter 19 cm en dikte 3,5 cm (zie Figuur 22) ongeveer 400 kg/m³ bedraagt en deze waarde wordt bereikt na 29 dagen. De samenstelling van de monsters kan u terugvinden in 1.3.3.



Figuur 22: Monster niet aangeduwd (links) en aangeduwd (rechts) [10]

Verder wordt er een grafiek (zie Figuur 23) weergegeven die de evolutie van de dichtheid van alle verdichtingsmethodes in kaart brengt, deze worden aan de hand van een experiment bepaald [10]. Dit experiment is niet representatief met echte bouwomstandigheden [10]. Namelijk zijn er beperkingen op vlak van geometrische omstandigheden (1 kant droogt maar), de grootte van het monster (veel dunner dan bouwelementen) en de randvoorwaarden (klimaatkamer (RV: 65 % en een T: 23 °C) vs. wind, zon, ...) [10]. Daarnaast is de droogtijd van een wand (30 cm) op de bouwplaats veel langer dan die van een klein monster als hierboven besproken [10].



Figuur 23: Evolutie dichtheid kalkhennep met Tradical® pf 70 en Chanvribat®

Het referentiemengsel werd langzaam met de hand gemengd (3 tot 4 min.) om het bindmiddel goed te vermengen met de hennep. Dan werd het mengsel in een zilverpapier (mal) geplaatst, hierbij werd deze aan de randen goed tegen elkaar gedrukt en in het midden losgelaten. Verder onderzoekt Evrard [10], [33] drie verschillende verdichtingsmethoden. Deze werden op dezelfde manier geproduceerd als het referentiemengsel, enkel de verdichtingsmethode werd gewijzigd. Deze gingen van het "los", "aangestampt" en het "gewelddadig" verdichten van het mengsel [10]. Hieruit blijkt dat het gewelddadig mengen (d.m.v. een trommelmenger) geen aanzienlijk effect heeft (zie Figuur 23) [10], [33]. Echter beweert Evrard dat veel beoefenaars van kalkhennep van mening zijn dat deze niet te lang en te "gewelddadig" mogen gemengd worden, dit omdat het de hennepdeeltjes kan beschadigen [10].

Verder was er ook een samenstelling met een hoge waterverhouding [33] (supplement van 40 %). Hiervan verlaagde de minimum volumieke massa met ongeveer 10 % (362 kg/m³) en de droogtijd verhoogde langzaam (31 dagen) [10]. Hieruit concludeerde hij dat de verdichting een grote invloed heeft op de wateruitstoot en dichtheid [10]. Namelijk hoe sterker het mengsel werd geperst, hoe zwaarder het werd (309 kg/m³ voor "los" en 470 kg/m³ voor "aangestampt") en hoe langzamer het uitdroogde (19 dagen voor "los" en 33 dagen voor aangestampt) [10], [33].

Tabel 8 geeft de dichtheid en standaardafwijking (o.b.v. 3 mengsels) weer van ieder mengsel na het bereiken van hun droogtijd [33].

Tabel 8: Dichtheid na droogtijd van ieder mengsel en hun standaardafwijking σ [33]

Monsters	Droogtijd [dagen]	Dichtheid [kg/m³]	σ [kg/m³]
<i>Referentie</i>	≈ 29	400,66	$\approx 3,84$
<i>Aangestampt</i>	33	466,12	$\approx 6,39$
<i>Los</i>	≈ 19	308,40	$\approx 2,34$
<i>Gewelddadig gemengd</i>	≈ 25	398,21	$\approx 14,90$
<i>Water supplement (40%)</i>	≈ 31	361,72	$\approx 21,49$

Hieruit concludeert Evrard [33] dat volgende parameters een grote invloed hebben op de dichtheid:

- de sterkte van het aanduwen tijdens de uitvoering (verhoogt de dichtheid);
- het snel- en/of gewelddadig mengen heeft verwaarloosbaar effect;
- een hoog watergehalte verlaagt de dichtheid.

Daarnaast is de droogtijd ook langer bij aangeduwde mengsels [33].

1.3.4.2 Paulien Strandberg-de Bruijn & Peter Johansson

In de studie van Strandberg-de Bruijn & Johansson [62] worden samenstellingen geproduceerd door middel van een dwangmenger (Zyklos ZZ 30). Deze samenstellingen (A en B) van de monsters kan u terugvinden in 1.3.3. Na het mengen maken ze monsters door het mengsel handmatig aan te stampen in stalen mallen [62]. Enerzijds worden er cilindrische mallen (lengte 400 mm, Ø 65 mm) gebruikt voor het bepalen van een dampdiffusiecoëfficiënt⁶ d.m.v. een "beker" test (zie 1.4.2) [62]. Anderzijds worden er kubische mallen (100x100x100 mm³) gemaakt voor het bepalen van vochttransport eigenschappen door middel van een capillaire wateropname test (zie 1.4.2) [62]. Het materiaal wordt aangestampt met een houten paal (Ø 40 mm) voor de cilindrische monsters en met een smalle houten balk (45 x 65 mm) voor de kubische monsters [62].

Uit de resultaten blijkt dat er enkele schommelingen zijn door het handmatig aanstampen van de mengsels [62]. Voor beide samenstellingen worden er verschillende monsters op eenzelfde manier gegoten en meteen hierna gewogen [62]. Hieruit kan dan voor elke samenstelling een densiteitsinterval worden bepaald, namelijk 830 - 880 kg/m³ voor mengsel A en 640 - 690 kg/m³ voor mengsel B [62]. Dit door het gewicht van de mallen te wegen voor en na het aanbrengen van het mengsel [62]. Na 2 - 3 dagen worden de monsters uit de mal genomen en worden ze gedurende minimum 3 maanden gehard bij 20 °C en 65 % RV voor de testen worden uitgevoerd [62].

Voor de droge dichtheid te bepalen werden er 10 kubische monsters gebruikt. Deze werden gedroogd in een stoof van 30 °C en 15 % RV en werden hierna opnieuw gewogen. Hieruit bleek dat de droge dichtheid voor mengsel A $\approx 394,8 \text{ kg/m}^3$ bedroeg en voor mengsel B $\approx 298,1 \text{ kg/m}^3$.

1.3.4.3 Anna Arizzi et al.

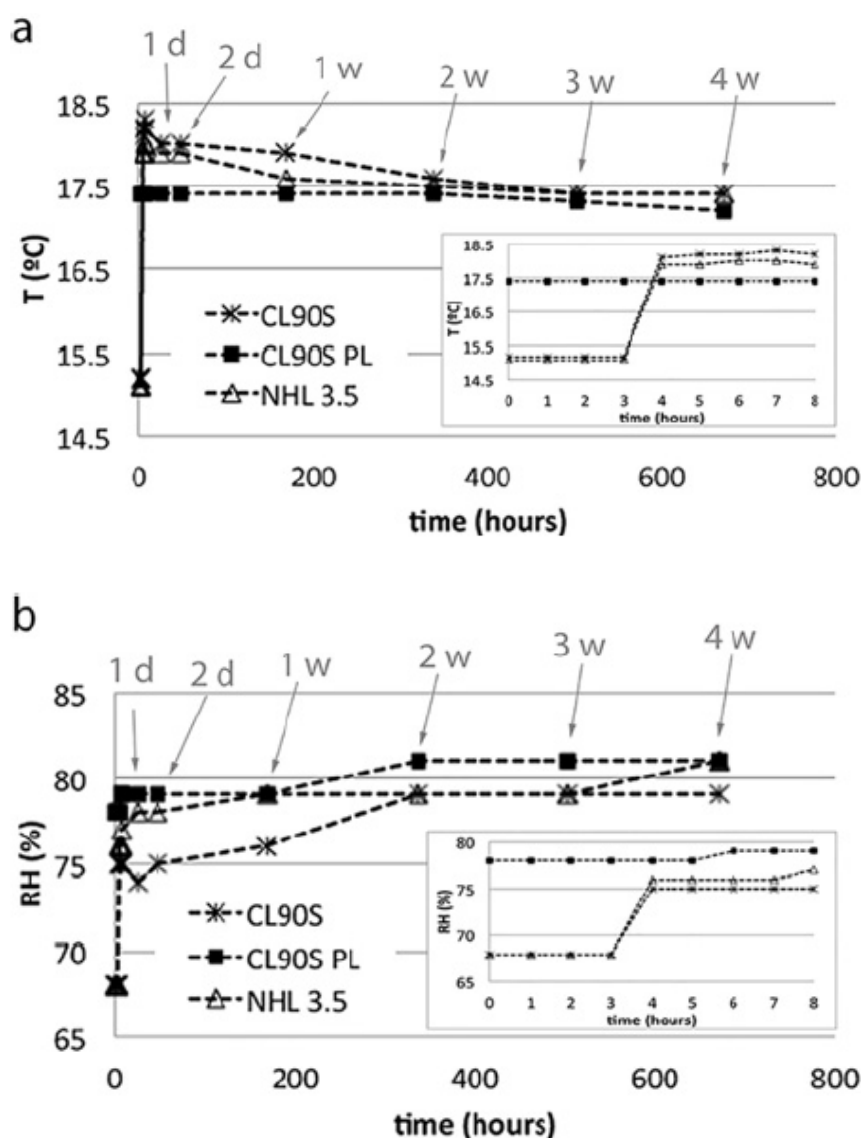
In een studie van Arizzi *et al.* [55] worden geformuleerde bindmiddelen vermeden en in plaats daarvan wordt de voorkeur gegeven aan drie bindmiddelen die veel gebruikt worden bij restauratie werken. Namelijk een natuurlijke hydraulische kalk en een luchtkalk in de vorm van droge gehydrateerde poeder en stopverf⁷ [55]. Het doel van deze studie is om de meest geschikte kalk in combinatie met hennep te bepalen voor toepassingen in nieuwbouw en reparatiewerkzaamheden [55]. Dit deden ze op basis van het hygroscopisch gedrag en de bio-receptivity in aanwezigheid met water.

Er werd gebruik gemaakt van volgende drie bindmiddelen: gebluste kalk in droge poedervorm (CL90-S); gebluste kalk in vorm van stopverf bewaard onder water voor 2 jaar (CL90-S PL); en een natuurlijke hydraulische kalk (NHL 3.5) [55]. Als hennep kozen ze voor *Cannhabitat* geproduceerd door AgroFibre, Euralis (Cazeres, France) [55].

⁶ Deze drukt de massa waterdamp uit dat diffuseert door een materiaal per tijdseenheid en oppervlakte-eenheid onder een vochtgradiënt [81]

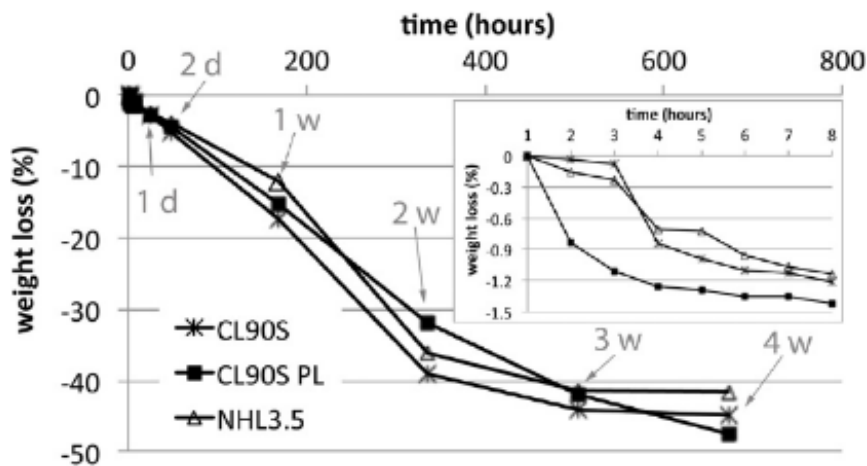
⁷ Verf met een laag bindmiddelgehalte bestemd om onregelmatigheden aan het oppervlak glad te maken

De kalkhennep samenstellingen werden geproduceerd met de hand dit om de technische kwaliteit van het uiteindelijke materiaal te verbeteren [55]. De volumeverhouding kalk:hennep:water bedroeg 3:5:2,5 voor kalkpoeders (CL90-S en NHL 3.5) en voor de stopverf werd hetzelfde volume gehanteerd voor kalk en hennep maar een kleinere hoeveelheid aan water [55]. De voorbereiding van de kalkhennep gebeurde in drie stappen: 1) hennepscheven werden gemengd met de helft van het water; 2) kalk wordt toegevoegd en gemengd met de hennepscheven; 3) het resterende water wordt toegevoegd en alles wordt gemengd. Het mengen gebeurde in een trommelmenger met verticale as en een roterende arm [55]. Daarna werden de mengsels gedurende 3 maanden gehard in omgevingsomstandigheden van 17 °C (temperatuur (T)) en 75 % (relatieve vochtigheid (RV)) [55]. Figuur 24 geeft de omgevingsomstandigheden weer van de eerste maand van het uithardingsproces. Deze verschillen enigszins voor de drie typen bindmiddel, dit omdat ze niet tegelijkertijd maar na elkaar zijn geproduceerd [55]. De kleine inspringing toont het omgevingsomstandigheden van de eerste 8h.



Figuur 24: Omstandigheden ($a=T$ en $b=RV$) gedurende eerste maand uitharding [55]

Men kan waarnemen dat de omgevingsomstandigheden (T en RV) enkel stabiel zijn tijdens het uitharden van de CL90S PL-monsters (zie Figuur 24) [55]. Dit terwijl de andere twee kleine variaties vertonen en dit hierdoor hun drogingsgedrag zal beïnvloeden, dit vooral gedurende de eerste 3 uur [55]. Tijdens deze periode werden de CL90 S en NHL 3.5 monsters blootgesteld aan een lagere T van 2,5 °C en mindere RV van 10 % dan de CL90S PL-monsters [55]. Verder toont Figuur 25 aan dat er gedurende de eerste maand van het uithardingsproces een gewichtsverlies van de drie samenstellingen plaatsvindt, dit ten gevolge van het drogen [55]. De kleine inspringing toont het gewichtsverlies van de eerste 8h.



Figuur 25: Gewichtsverlies van drie mengsels gemeten gedurende eerste maand [55]

In het begin van het droogproces (na ≈ 3 h) bedraagt het gewichtsverlies van CL90 S en NHL 3.5 monsters $\approx 0,1$ %, dit terwijl het gewichtsverlies van CL90 S PL monsters $\approx 1\%$ bedraagt [55]. Vanaf het 4^{de} h bereiken de temperatuur en relatieve vochtigheid een soortgelijke waarden voor de 3 soorten kalkhennep [55]. Hierdoor kan het drogingsgedrag in de volgende dagen beter vergeleken worden [55]. Na 3 tot 4 weken beginnen de CL90 S en NHL 3.5 monsters te stabiliseren, dit terwijl de CL90 S PL monsters nog steeds gewicht verliezen.

Arizzi *et al.* [55] wijzen erop, ondanks de onvergelykbare gewichtsvariaties in het begin van het drogingsproces, dat het type kalk een invloed heeft op het percentage aan waterverlies van het kalkhennep mengsel. De CL90 S PL monsters verliezen meer water hoewel het drogingsproces trager en meer lineair verloopt gedurende de tijd [55]. Verder vertoont het NHL 3.5 mengsel het minste gewichtsverlies (na ≈ 4 weken). Uit deze studie [55] blijkt dat de natuurlijke hydraulische kalk (NHL 3.5) een hoger ademend vermogen en droogsnelheid heeft, een lagere wateropname heeft en een mindere bio-achteruitgang heeft ten opzichte van andere luchtkalken. Deze is dus de meest geschikte in combinatie met hennep voor toepassingen in nieuwbouw en reparatiewerkzaamheden.

1.3.4.4 Camille Magniont et al.

In de studie van Magniont et al. [63] werden samenstellingen geproduceerd door middel van een menger die voldoet aan EN 196-1 [64]. Daarna werd gedurende 3 minuten de verschillende componenten van het bindmiddel gemengd met een water/bindmiddel verhouding van 0,5. Hierna volgde een progressieve samenvoeging van de plantaardige aggregaten (65 % RV) met extra water indien nodig (traag mengen) [63], [64]. Drie mallen van 4x4x16 cm³ werden gevuld in twee handmatige verdichte lagen [63]. Dan werden deze gedurende 48 uur in endogene condities bewaard [63]. Hierna werden de monsters vervolgens gehard voor 28 dagen en opgeslagen in een ruimte (T= 20 °C en RV= 65 %) [63]. De samenstellingen van de monsters kan u terugvinden in 1.3.3.

Tabel 7 in 1.3.3 geeft de droge bulk densiteit weer voor de drie verschillende samenstellingen. Deze bedragen respectievelijk 924,8 (CH10), 630,3 (CH25) en 533,6 (CH32) kg/m³. Naarmate het volumepercentage van de hennepscheven in de samenstelling toeneemt ziet men dat de bulk densiteit afneemt. Echter zijn deze percentages vergeleken met de andere studies aan de lage kant waardoor de densiteit van kalkhennep veel hoger ligt (hoog watergehalte).

1.3.5 Overzicht

Tabel 9 geeft een overzicht van de verschillende besproken parameters uit 1.1.3 en 1.1.4. Het gaat hier om testmonsters die samengesteld werden in binnencondities, dus niet *in situ*.

Tabel 9: Overzichtstabel verschillende parameters testmonsters

Onderzoek	Volume-Verhouding [kalk:hennep:water]	Hennepsoort	Kalksoort	Droogtijd [dagen]	Relatieve vochtigheid [%]	Temperatuur [°C]	VM⁸	Densiteit [kg/m³]
<i>Evrard, A [10], [33]</i>	0,23:0,55:0,22	Chanvribat	Tradical pf 70	≈ 29	65	23	1	≈ 400,66
<i>Evrard, A [10], [33]</i>	0,23:0,55:0,22	Chanvribat	Tradical pf 70	33	65	23	2	≈ 466,12
<i>Evrard, A [10], [33]</i>	0,23:0,55:0,22	Chanvribat	Tradical pf 70	≈ 19	65	23	3	≈ 308,40
<i>Evrard, A [10], [33]</i>	0,23:0,55:0,22	Chanvribat	Tradical pf 70	≈ 25	65	23	4	≈ 398,21
<i>Evrard, A [10], [33]</i>	0,23:0,55:0,22	Chanvribat	Tradical pf 70	≈ 31	65	23	5	≈ 361,72
<i>Strandberg-de Bruijn & Johansson [62]</i>	0,22:0,53:0,25	Variety Fedora 17	CL90/NHL 5/Vliegas	/	15	30	3,4	≈ 394,80
<i>Strandberg-de Bruijn & Johansson [62]</i>	0,16:0,62:0,22	Variety Fedora 17	CL90/NHL 5/Vliegas	/	15	30	3,4	≈ 298,10
<i>Arizzi, A et al [55]</i>	3:5:2.5	Cannhabitat	CL90 - S	≈ 28	79	17.4	4	/
<i>Arizzi, A et al [55]</i>	3:5:2.5	Cannhabitat	NHL 3.5	≈ 28	81	17.2	4	/
<i>Arizzi, A et al [55]</i>	3:5:/	Cannhabitat	CL90 – S PL	≈ 28	82	17	4	/
<i>Magniont et al [63]</i>	Zie 1.3.3	Cannhabitat	NHL 5/ MK/GC	≈ 28	65	20	4	≈ 924,80
<i>Magniont et al [63]</i>	Zie 1.3.3	Cannhabitat	NHL 5/ MK/GC	≈ 28	65	20	4	≈ 630,30
<i>Magniont et al [63]</i>	Zie 1.3.3	Cannhabitat	NHL 5/MK/GC	≈ 28	65	20	4	≈ 533,60

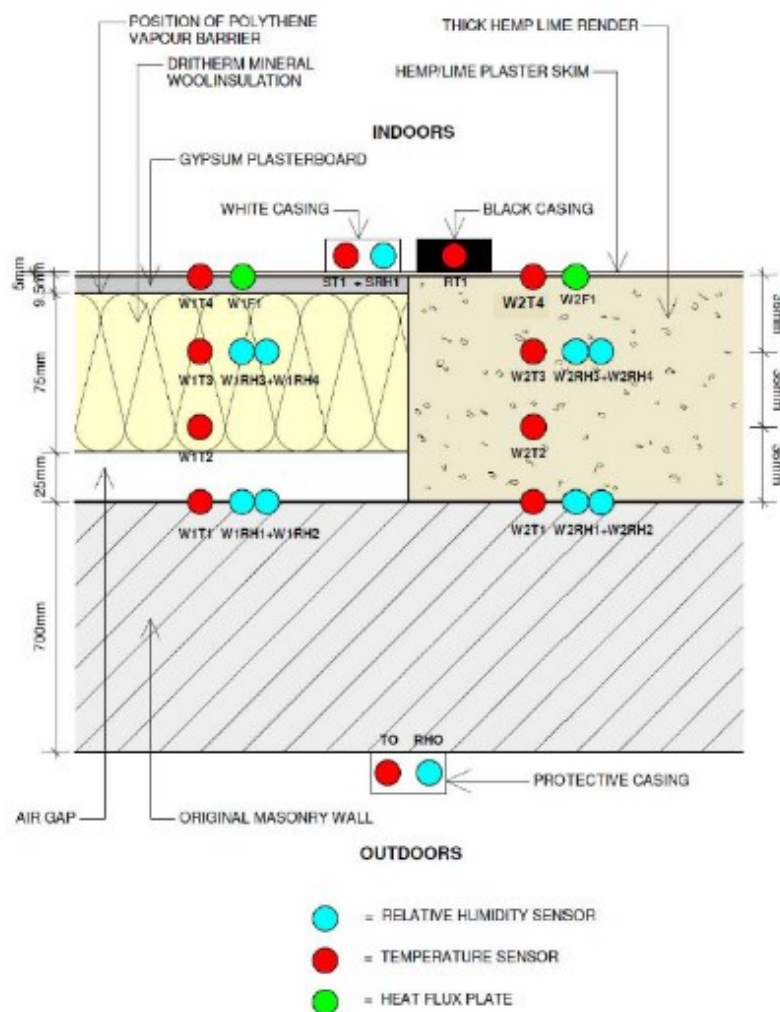
⁸ VM: verdichtingsmethode => 1 = aan randen aangedrukt en midden los, 2 = volledig aangestampt, 3 = los, 4 = gewelddadig mixen en 5 = water supplement verdichten

1.4 Hygrothermische prestaties van kalkhennep

1.4.1 Warmtegeleidingscoëfficiënt

De warmtegeleidingscoëfficiënt of lambda-waarde λ (W/mK) van een materiaal geeft aan hoe goed de warmte geleidt doorheen een materiaal [24]. Hoe lager λ , hoe slechter het materiaal de warmte geleidt en hoe beter het isoleert [24]. Een materiaal met een goede λ -waarde geeft nog niet aan dat het ook effectief goed isoleert [24]. De toestand waarin het materiaal zich bevindt, droog of nat, kan de λ -waarde zeer sterk beïnvloeden [24]. Ook de manier van uitvoering is zeer bepalend voor het goed isoleren [24]. Zo mogen er geen onderbrekingen zijn in de isolatielaag waardoor de warmte kan ontsnappen [24].

De warmtedoorgangcoëfficiënt of U-waarde (W/m²K) van een constructiedeel geeft aan hoeveel warmte er per seconde en per vierkante meter verloren gaat bij een temperatuurverschil van 1°C tussen binnen- en buitencondities [24]. Figuur 26 geeft een voorbeeld van een wandopbouw met enerzijds minerale wol en anderzijds kalkhennep als binnenisolatie met een leistenenmuur als gevelmetselwerk [8]. Voor beide wandopbouwen kan de U-waarde worden berekend aan de hand van de λ -waardes van de verschillende materialen [24].



Figuur 26: Wandopbouw minerale wol (links) en kalkhennep (rechts) [8]

Tabel 10 geeft een voorbeeld van een U-waarde berekening weer tussen een kalkhennepwand en een wand met minerale wol (wandopbouw zie Figuur 26) [8]. Er kan worden geconcludeerd dat de wand met minerale wol een lagere U-waarde heeft dan de kalkhennepwand waardoor deze in theorie beter zou moeten isoleren [26].

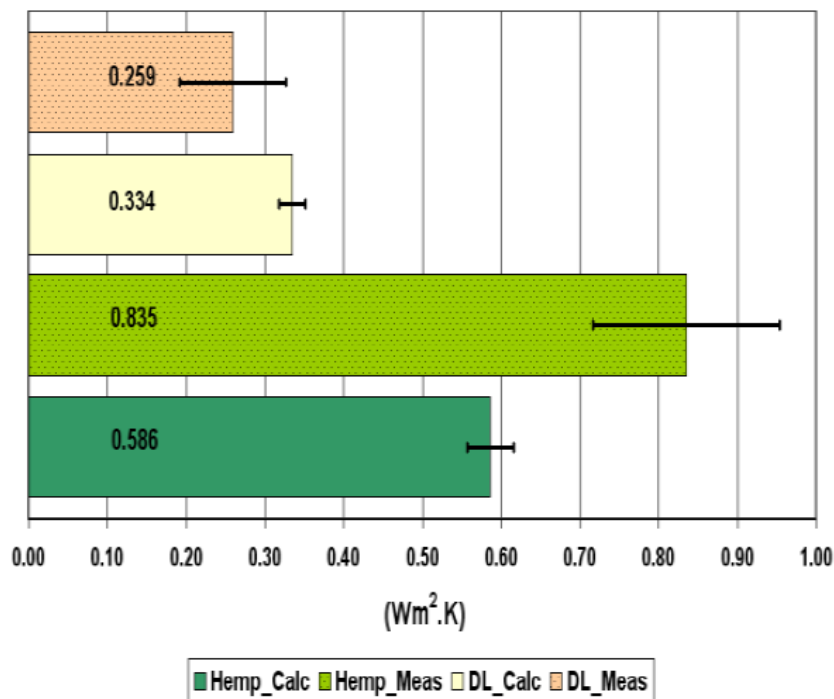
Tabel 10: Berekende U-waarden kalkhennepwand vs. wand met minerale wol [8]

	Hemp (m².K/W)	Dry lining (m².K/W)
Internal Air	0,130	0,130
Plaster	0,015	0,015
Renovation	1,222	2,325
Air Gap	/	0,180
Wall	0,300	0,300
External Air	0,040	0,040
	Hemp Ucalc (W/m².K)	Dry lining Ucalc (W/m².K)
U-Value	0,586	0,334

Een aanzienlijk probleem in het vergelijken van de relatieve prestaties van isolatiematerialen is dat selectie gebeurt op basis van de stabiele toestandsmeting van de U-waarde. Echter werken gebouwen zelden in stabiele toestand. Ze worden constant blootgesteld aan schommelingen in warmte en relatieve vochtigheid, tussen dag en nacht, zon en regen, winter en zomer. In deze constant veranderende condities kan de relatieve prestatie compleet verschillen van de verwachte prestatie aan de hand van de U-waarde metingen.

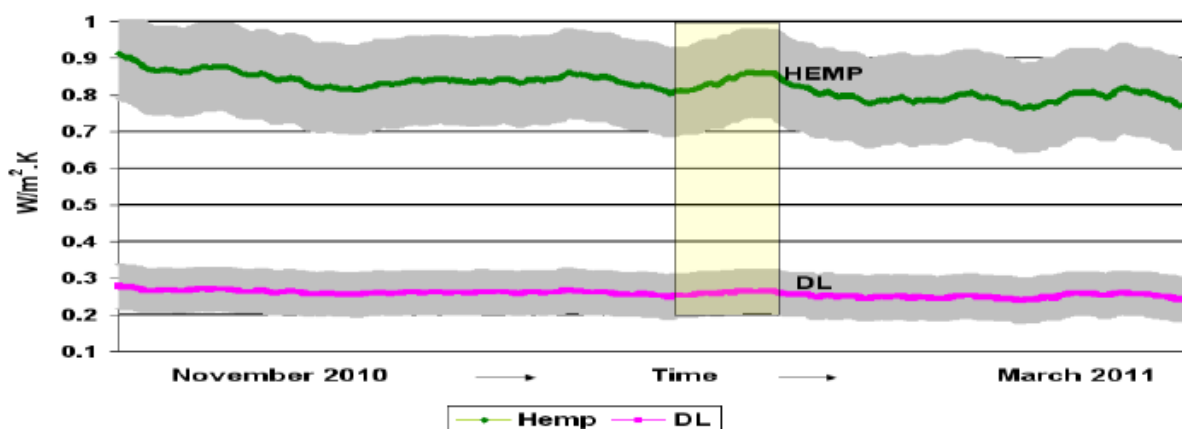
Luchtlekken door slechte uitvoering kunnen luchtcirculatie veroorzaken tussen de originele wand en de isolatie. Deze zorgen ervoor dat de *real* U-waarde sterk kan verschillen van de berekende U-waarde. U-waardes tot 2,5 keer de berekende waardes werden waargenomen voor een muur in 1D door Hens [65].

Er kan een vergelijking worden gemaakt tussen de berekende U-waardes en de gemeten U-waardes *in situ*. Figuur 27 toont aan dat de gemeten U-waarde *in situ* van de wand met minerale wol 22 % lager is dan de berekende waarde [8]. Dit kan enerzijds verklaard worden door het beschouwen van een homogene leistenenmuur en het overschatten van de λ -waardes van het pleisterwerk en de gipsplaten [8]. Het is ook duidelijk dat er een groot verschil is tussen de berekende en de gemeten waardes *in situ* van de kalkhennepwand [8]. Zo werd er een 42 % hogere U-waarde gemeten *in situ* dan berekend. De meest waarschijnlijke reden hiervoor is dat de kalkhennep nog aan het drogen is waardoor de λ -waarde fout werd ingeschat [8]. Zoals eerder vermeld in 1.4.1 wordt de λ -waarde zeer sterk beïnvloedt door de toestand waarin het zich bevindt [24]. De kalkhennep werd verondersteld in droge toestand te zijn bij de berekening maar was nog nat tijdens de meting waardoor de λ -waarde zeer sterk werd onderschat [8].



Figuur 27: Berekende (calc) en gemeten (meas) U-waardes [8]

Om dit verder te onderzoeken werd de U-waarde gemeten *in situ* over een periode van 14 dagen [8]. De U-waarde van de wand met minerale wol blijft relatief constant waarnaast de U-waarde van de kalkhennepwand in dalende lijn gaat gedurende de tijd (zie Figuur 28) [8]. Dit komt overeen met de eerder getrokken conclusies namelijk dat de kalkhennep nog aan het drogen is waardoor de λ -waarde gaat dalen naarmate de kalkhennep meer en meer gaat drogen [8].



Figuur 28: Gemeten U-waardes over een periode van 14 dagen [8]

Deze resultaten hebben grote invloed op het inschatten van de thermische efficiëntie van de materialen [8]. Zoals eerder vermeld kan de stabiele toestand van de berekende U-waarde een zeer grote afwijking geven ten opzichte van de werkelijk gemeten U-waardes *in situ* waardoor de thermische efficiëntie van de materialen zeer fout worden ingeschat [8]. Om de thermische efficiëntie van de kalkhennep goed te kunnen inschatten moet worden gewacht tot het volledig droog is [8].

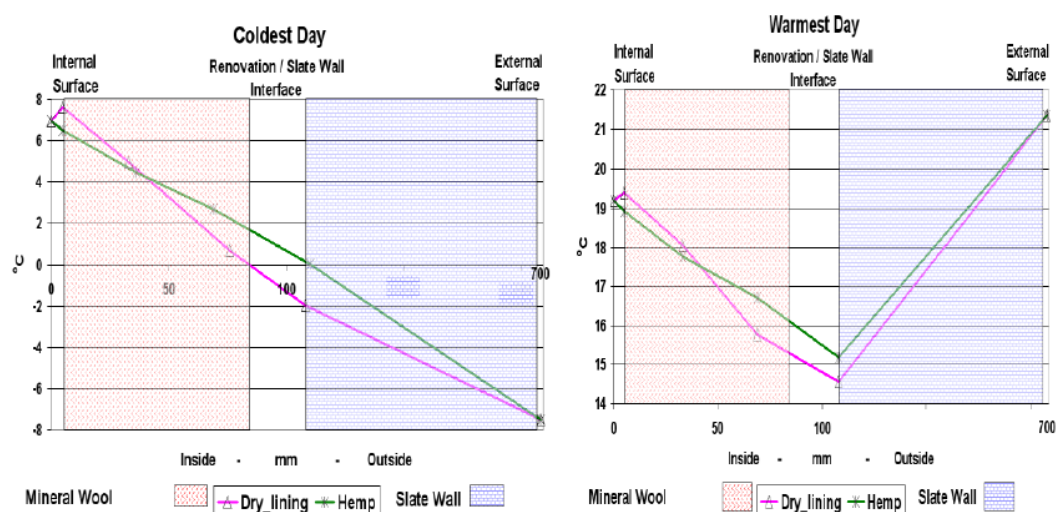
1.4.2 Hygrothermische gedrag

Echter de berekende U-waarde van de isolatie beschrijft niet volledig de dynamisch thermische prestaties van isolatiematerialen [8]. Vocht-bufferende, hygrothermische isolatiematerialen zoals kalkhennep hebben een relatief grote dichtheid en ze kunnen warmte opslaan in hun massa [8]. Hierdoor verbeteren hun thermische prestaties naast de stabiele toestand van de berekende U-waarde [8]. Daarnaast hebben ze ook hygrothermische eigenschappen [8]. Dit wil zeggen dat ze waterdamp uit de lucht kunnen halen op hun bruikbare oppervlak wanneer de relatieve vochtigheid stijgt [8]. Ze hebben een hoge capillariteit waardoor ze de schommelingen in relatieve vochtigheid binnenhuis kunnen bufferen en inwendige condensatie kunnen controleren [8]. Het condensaat dat wordt gevormd, wordt opgenomen in de capillairen en gaat zo naar het warmste oppervlak waar het vocht terug verdampt in de omgeving [8]. Hierdoor is de nood aan een dampscherm overbodig [8].

Er moet hierbij wel rekening worden gehouden met het feit dat deze materialen altijd een bepaalde hoeveelheid vocht opslaan en nooit in volledig droge toestand zullen zijn [8]. De hoeveelheid vocht die ze opslagen wordt gedreven door de schommelingen in relatieve vochtigheid [8]. Hierdoor veranderen hun basis thermische eigenschappen in droge toestand dynamisch afhankelijk van de hoeveelheid opgeslagen vocht [8]. Dus de snelheid waarmee deze materialen warmte kunnen opslagen in hun massa is in een staat van constante beweging. Hoe dit nu de totale thermische prestaties verbetert of verslechtert is onbekend [10], [14], [18].

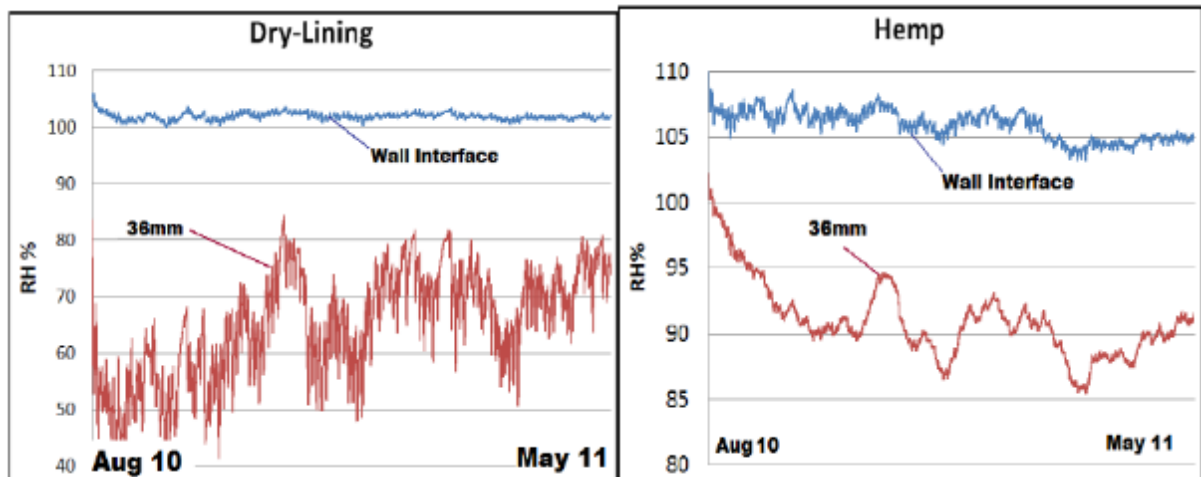
1.4.2.1 Temperatuur en relatieve vochtigheid

Er werd onderzocht gevoerd naar de hygrothermische eigenschappen van kalkhennep waarbij een lestenenwand enerzijds met kalkhennep binnenisolatie en anderzijds met minerale wol werd uitgevoerd. Het temperatuurverloop doorheen de wand met minerale wol is steiler dan doorheen de kalkhennepwand die eerder een homogeen verloop vertoont (zie Figuur 29) [8]. Op de warmste dag zijn de binnen- en buitentemperaturen 5-6°C hoger dan de temperatuur in het centrum van de wand [8]. Hierdoor zal de warmte van binnen- en buitenomgeving in de wand stomen [8].



Figuur 29: Temperatuursverloop lestenenwand met minerale wol vs. kalkhennep [8]

Zowel in de wand met minerale wol als in de kalkhennepwand zal er constant gecondenseerd vocht (blauwe lijn) voorkomen zowel in warme als in koude condities (zie Figuur 30) [8]. Dit werd verwacht in de kalkhennepwand omdat de materialen nog aan het drogen waren [8]. In Figuur 30 is te zien hoe de relatieve vochtigheid begint te dalen bij de 36 mm brede kalkhennepisolatie (rode lijn rechts) [8]. Dit geeft aan dat de kalkhennep aan het oppervlak gedroogd is [8].

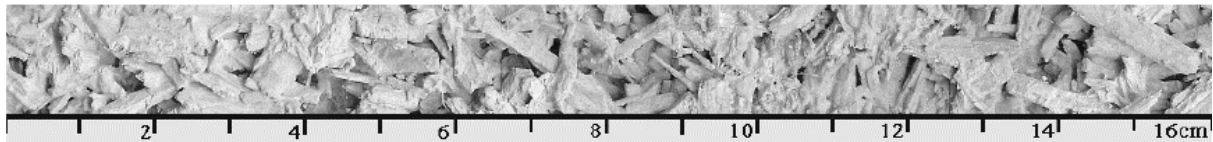


Figuur 30: Relatieve vochtigheid minerale wol (links) versus kalkhennep (rechts) [8]

Echter dat de constructie van de wand met minerale wol droog was en ondanks het dampscherm was de relatieve vochtigheid constant gelijk aan 100 % tussen de minerale wol en de lestenenwand (zie Figuur 30 – blauwe lijn) [8]. Gedurende de volledige periode van de metingen tot zover wordt het vocht uit de lestenenwand getrokken in de isolatie [8]. De condities achter de minerale wol waren zoals verwacht en het aanwezige vocht kan niet terug verdampen in de binnenruimte [8]. Bij de toepassing van kalkhennep als binnenisolatie kan het aanwezige vocht wel terug verdampen in de binnenruimte [8]. Hierbij is het wel eerst noodzakelijk dat het vocht in de brede lestenenmuur kan penetreren tot bij de kalkhennepisolatie om te ontsnappen [8]. Het vocht dat kan penetreren in de lestenenmuur heeft wel een verhoogd risico op vorstschade van de lesteen, inwendige rot en schimmelgroei tot gevolg [8].

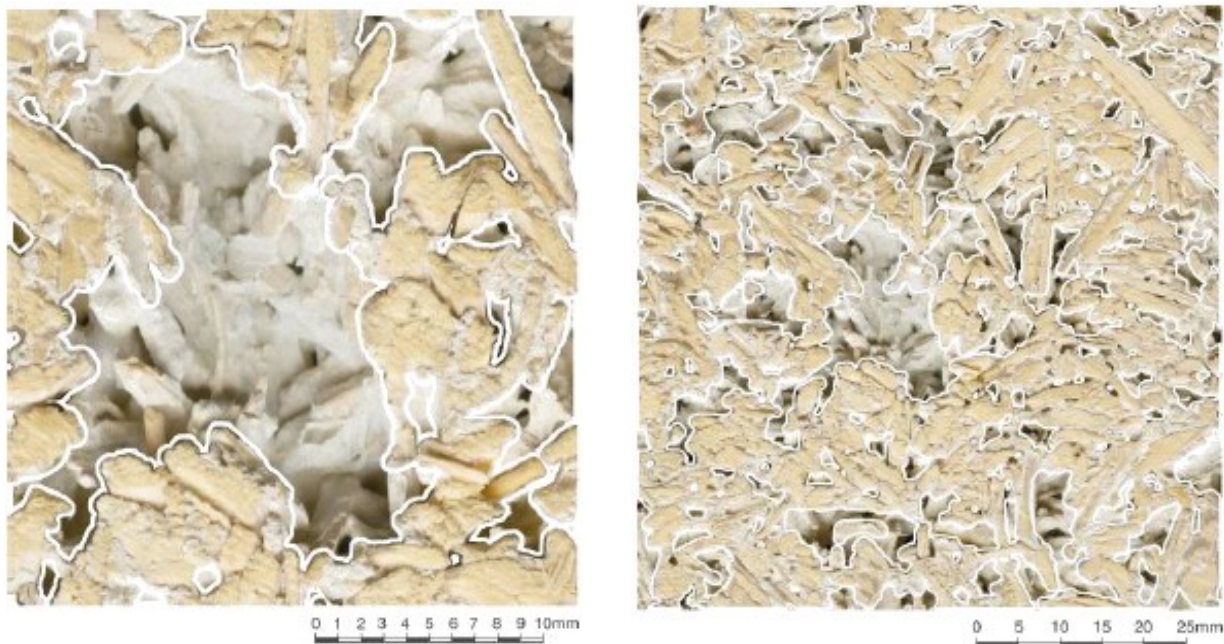
1.4.2.2 Porositeit

Uit een studie van Evrard & De Herde [14] werd de droge toestand van de monsters (samenstelling zie 1.3.3) bekomen door ze te plaatsen in een oven (40 °C), dit tot het gewichtsverlies kleiner was als 0,1 % gedurende 24 uren. De gemiddelde droge densiteit bedroeg 480 kg/m³ (zie Tabel 14) [14]. Door middel van een helium pycnometer werd de totale porositeit van 71,1 % gemeten op deze droge monsters [14]. Met deze waarde is het niet mogelijk om de microscopische en macroscopische poreusheid (~1 mm) te definiëren (zie Figuur 31) [14].



Figuur 31: Macroscopische poreusheid van kalkhennep [14]

Uit een volgende studie van Evrard [10] blijkt dat de poriën 1 mm tot een paar centimeter groot kunnen zijn (zie Figuur 32) [10]. De poriën zijn als het ware onderling verbonden, namelijk openen de grote poriën in de kleinere poriën (poriën in hennepdeeltjes: 10 µm), dit komt door de porositeit van de kalk als bindmiddel (poriën: 1 µm) [10].



Figuur 32: Porositeit (links) macroscopische poreusheid (rechts) [10]

Verder mag een representatief volume element (RVE) van een kalkhennep wand niet kleiner zijn dan 100 cm^3 (kubussen met zijden $> 4,7 \text{ cm}$) om specifieke poriën en overige deeltjesverdeling in rekening te brengen [10]. Dit gebaseerd op een visuele analyse volgens Figuur 32 (rechts). In sommige experimenten waren de monsters kleiner dan RVE. Maar om een gemiddelde densiteit (ρ_s) van een vast deel van kalkhennep te bepalen vormt de grootte van het monster geen probleem, aangezien de verhouding van hennep en de volumematrix constant beschouwd mag worden [10]. Het resultaat was $\rho_s = 1660 \text{ kg/m}^3$ [10]. De totale droge porositeit $\psi_0 [\%_{\text{vol}}]$ wordt berekend (1) door ρ_s te beschouwen als referentie droge dichtheid [10] :

$$\psi_0 = 100 \times \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_s}\right) \quad (1)$$

De droge densiteit werd gemeten op 10 droge monsters ($38,5 \text{ cm}^3 < \text{RVE}$) en bedroeg 480 kg/m^3 [10]. De referentiewaarde voor de kalkhennep is gegeven door (2) [10]:

$$\rho_0 = \rho - \omega \quad (2)$$

Met ω : het watergehalte (kg/m^3)

ρ_0 bedraagt ongeveer 440 kg/m^3 . Hierdoor bedraagt ψ_0 ongeveer $73 \%_{\text{vol}}$. Wanneer de waarde vergeleken wordt uit een studie van Cerezo [66] met een waarde van de open porositeit $\psi_a = 77 \%$ (luchtdruk meting in een zuiger), ziet men dat deze ongeveer overeenkomen [10].

1.4.2.3 Absorptie en vochttopslag

Natuurlijke isolatiematerialen kunnen in het algemeen vocht absorberen en een hoger vochtgehalte vasthouden dan handgemaakte isolatiematerialen [9]. Natuurlijke materialen ademen bij opname en afgaven van vocht in harmonie met de bouwstructuur die wordt blootgesteld aan interne en externe schommelingen in temperatuur en relatieve vochtigheid [9]. Het is analoog met het verschil tussen een *shirt* vervaardigd uit katoen en een uit nylon [9]. Nylon heeft een zeer lage vochtabsorptie [9].

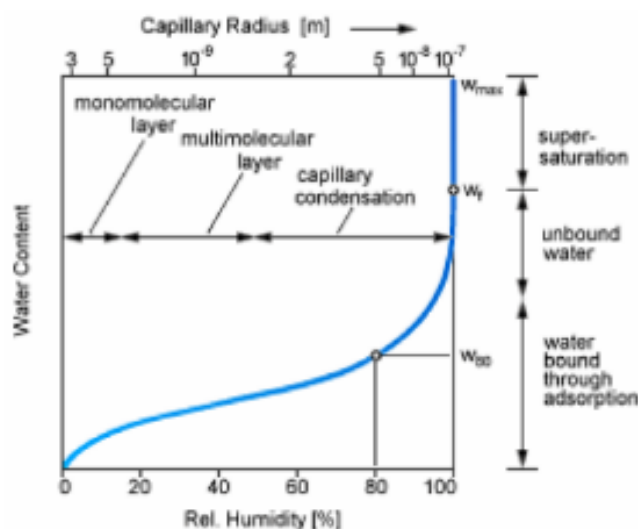
Drie belangrijke factoren worden beweerd door producenten die zorgen voor een betere prestaties van natuurlijke isolatiematerialen:

- ze hebben een betere aansluiting op metselwerk waarbij luchtlekken en luchtcirculatie worden vermeden [9];
- de lagere thermische diffusiviteit zorgt ervoor dat ze meer tijd nodig hebben om een constant warmtetransport te bekomen (evenwicht) [9];
- ze hebben een hoge warmteopslagcapaciteit waardoor ze veel warmte kunnen opslaan, dit kan nog versterkt worden door hun vochtabsorptievermogen [9].

Drie verschillende absorptie gebieden kunnen gedefinieerd worden volgens Evrard & De Herde [10], [14]. Het eerste gebied ontstaat wanneer de relatieve vochtigheid laag is en hierdoor het vochttransport in het materiaal (2) progressief geabsorbeerd wordt aan het poriënoppervlak [67]. Dit gebeurt eerst in de grote poriën en hierna door de gehele poreuze structuur (3) [67]. Dit verschijnsel heet "hygroscopische adsorptie" (zie Figuur 35 A) [10], [14].

Hygroscopische absorptie werd onderzocht door droge monsters (~20 gram) te plaatsen in verschillende klimaatkamers (23 °C) met een relatieve vochtigheid gaande van 32 % tot 93 % [14]. Zoals verwacht nam de massa toe bij een toenemend watergehalte. Het watergehalte was in evenwicht wanneer de gemeten massawinst gedurende 24 uren kleiner was dan 0,1 % van het droge monster [14]. De tijd tot stabilisatie van het watergehalte was behoorlijk lang, meestal meer dan twee weken voor dunne of gebroken monsters [14]. Bij relatieve vochtigheden van 32, 50, 65, 80 en 93 % kwamen respectievelijke watergehaltes van ongeveer 15, 22, 31, 36 en 45 kg/m³ overeen (zie Figuur 33).

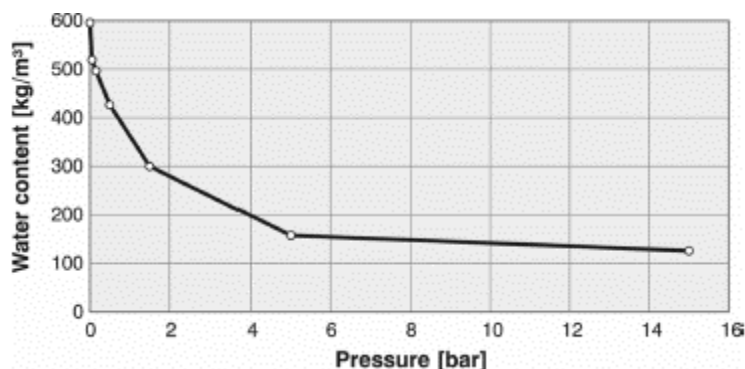
Het tweede gebied begint wanneer "capillaire condensatie" overwegend wordt t.o.v. tot het hygroscopisch fenomeen (zie Figuur 35 B). Dit is op plaatsen waar de hellingen van de isothermen veel sneller beginnen te stijgen, meestal rond een relatieve vochtigheid van 80 % en dit gaat verder tot volledige verzadiging ($RV = 100 \%$) (zie Figuur 33) [10], [14].



Figuur 33: Watergehalte in functie van relatieve vochtigheid [9]

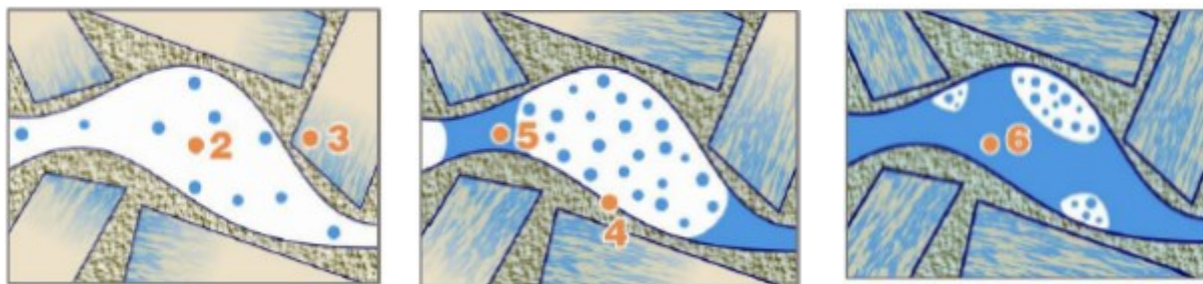
Bij dit onderzoek werd een waarde van 93 % gevonden, vanaf dan wordt de stijging van de waterinhoud lineair verondersteld gaande van 93 % tot 100 % [14]. Twee andere verschijnselen treden tegelijkertijd op met absorptie: oppervlaktediffusie (4) en capillaire condensatie (5) [10]. Uit een verder onderzoek van Evrard & De Herde [68] wordt het watergehalte van het "muur" mengsel in het capillaire gebied bij 23° C door middel van een drukplaat bepaald. Figuur 34 geeft voor een verschillende druk van respectievelijk: 0,05; 0,15; 0,5; 1,5; 5 en 15 bar de watergehalten van respectievelijk: 520, 497, 427, 300, 158 en 126 kg/m³ weer [68]. Door middel van Kelvin's wet kan elke druk gekoppeld worden aan een gelijkwaardige relatieve vochtigheid (respectievelijk: 99,996; 99,989; 99,963; 99,889; 99,631 en 98,897 %) [68]. Deze absorptiecurve van een muur mengsel kan gedefinieerd en gebruikt worden in WUFI® simulaties [68].

Hieruit kan geconcludeerd worden dat het watergehalte lineair stijgt vanaf 99 % RV ($w: 158 \text{ kg/m}^3$) tot vrije verzadiging ($RV: 100 \%$) [14]. Uit dit onderzoek blijkt dat een hoog watergehalte van 596 kg/m³ (zie Tabel 14) gehanteerd mag worden voor vrije verzadiging aan het "muur" mengsel [14]. Dit is gemeten door de monsters onderwater te plaatsen totdat hun massa stabiel werd [14].



Figuur 34: Watergehalte kalkhennep "muur" bij verschillende druk [66]

Tenslotte volgt het derde gebied namelijk het “oververzadigd gebied” (zie Figuur 35 C). Dit gebied wordt meestal niet in rekening gebracht in de bouwfysica [14]. Echter kan er worden aangenomen dat het maximaal watergehalte (vermoedelijk 711 kg/m^3 in deze studie) bereikt wordt wanneer alle poriën gevuld zijn met ongebonden water (6) [10], [14].



Figuur 35: Drie absorptiegebieden: A) Hygroscopisch absorptie, B) Capillaire condensatie en C) Oververzadigd [10]

1.4.2.4 Opslagparameters

Vocht in een wandconstructie kan de thermische capaciteit verhogen van het element door het verstrekken van warmtebuffering bij stijgende en dalende temperaturen [9]. Tegelijkertijd kan bijkomende latente warmte optreden als gevolg van fasetransformaties bijvoorbeeld bij het condenseren van waterdamp tot waterdruppels waarbij latente warmte verloren gaat [9]. Daarentegen kan het vocht ook verdampen aan het oppervlak van de wand waarbij latente warmte wordt opgenomen [9]. Dus de impact van vocht op de hygrothermische eigenschappen van de wandconstructie kan zeer complex zijn [9]. Dit is het geval bij natuurlijke materialen die grote volumes water kunnen absorberen [9].

Uit de studie van Evrard & De Herde werd de Thermische capaciteit (c) gemeten in een omgeving waar geen warmte werd uitgewisseld (adiabatisch proces) [14]. De monsters werden gedroogd en verwarmd tot 100 °C en ze werden daarna in water gelegd (kamertemperatuur 22 °C) [14]. De thermische capaciteit van water, de watermassa, de massa van het monster en de meting van de resulterende temperatuur laat toe om de thermische capaciteit van het monster te bepalen [14]. De gemiddelde waarde van een droog monster was 1550 J/kgK [14].

De helling van de isotherm van de absorptie wordt hygrische capaciteit (ξ_ϕ) genoemd [14]. In het hygroscopische gebied is de isotherm met een temperatuur van 23 °C van de absorptie bijna lineair [14]. De hygrische capaciteit heeft dan een waarde van 10,2% [14].

1.4.2.5 Vochttransport

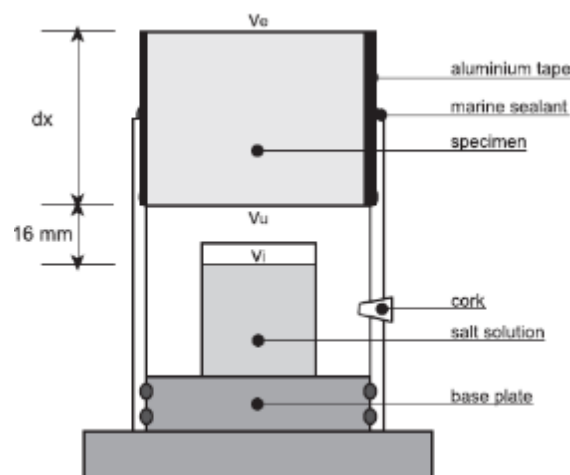
In de studie van Evrard & De Herde werd de waterdampdoorlatendheid van de monsters gemeten met een droge beker (RV = 3 % in de beker en 50 % in de kamer) en een natte beker (RV = 93 % in de beker en 50 % in de kamer) [14]. Resultaten zijn respectievelijk een coëfficiënt van de dampdiffusieweerstand μ_s die gelijk is aan 4,84 (-) en de dampdiffusie μ die gelijk is aan 4,51 (-) [14].

De waterabsorptiecoëfficiënt A werd gemeten waarbij een waarde van $7,5 \cdot 10^{-2}$ (kg/m²·s^{1/2}) werd gevonden [14]. Het vloeistoftransport in kalkhennep wordt verondersteld een bepaalde tijdsafhankelijkheid te hebben in vergelijking met materialen zoals hout, cellulair beton en klei [14].

In de studie van Strandberg de Bruijn & Johansson [62] verklaren ze om een hygrische gedragsmodel te creëren omdat wanden blootgesteld worden aan slagregen. Voor het bepalen van vochttransport eigenschappen passen ze een "beker"- en capillaire wateropname test toe in hun onderzoek [62]. De "beker" test verstrekt gegevens over de vochttransport eigenschappen tot 95 % RV, terwijl de capillaire wateropname test eigenschappen vaststelt bij hogere RV [62].

"Beker" test

De “beker” test werd uitgevoerd om een dampdiffusiecoëfficiënt te bepalen voor kalkhennep materialen [62]. Deze testen werden uitgevoerd op monsters die gedroogd werden vooraleer de test begon, dit zodat ze tijdens het testen onderhevig waren aan absorptie. Cilindrische monsters (samenstelling zie 1.3.3) met een diameter van 65 mm en een dikte van 500 mm werden bereid. Voor 99,6 % van de hennepscheven bedroeg de maximale lengte 32 mm [62]. De dikte van het monster bedroeg minimum 1,5 keer de maximale lengte van de hennepscheef, dit om te voorkomen dat de hennepscheef zich over de hele breedte kon verspreiden [62]. De kalkhennepmonsters werden langs de zijanten afgedicht met aluminium tape (zie Figuur 36) en werden dan voor 3 maanden bewaard (65 % RH en 20 °C) [62].



Figuur 36: Schematische weergave van de beker test [62]

Het snijden van de aluminium tape gebeurde door middel van een steenhouwer. Na het aanbrengen van de tape aan de zijanten konden de monsters gedurende 2 weken drogen in een oven (30 °C) [62]. Eens de monsters opgedroogd waren konden ze gemonteerd worden in de beker [62].

Ter hoogte van het grensvlak tussen het monster en de beker werd een dubbele laag watervaste kit aangebracht, dit om een luchtdichte verbinding te verzekeren (zie Figuur 36 [62]). Hierna werden ze gedurende 10 dagen in een klimaatkamer (54 % RV) geplaatst om de kit te laten drogen en te harden [62]. Echter is het de bedoeling om de monsters boven een 33 % zoutoplossing te plaatsen. Daarnaast was het ook aangewezen om deze in de klimaatkamer te plaatsen om de relatieve vochtigheid in de monsters op een lager niveau te houden [62]. Dit zodat bij de start van de test de RV in het monster de RV van de klimaatkamer niet overschrijdt [62]. Hierna werden vier identieke bekertjes per menging voorbereid, dit resulteerde in een totaal van 40 bekertjes. Het verzadigd zout werd in een houder geplaatst binnenin de beker (zie Figuur 36) [62].

De keuze van zoutoplossing bepaalt de RV [62]. De verschillende verzadigde zoutoplossingen werden gemengd met gedeïoniseerd water [62]. Het bovenste gedeelte van de beker die aan de zijkant een luchtgat heeft om lucht te kunnen laten ontsnappen werd op de basis gemonteerd [62]. Tenslotte werd in het luchtgat een kurk gezet om luchtlekkage tijdens de testen te vermijden [62]. Vanaf de start van het experiment werden de bekens regelmatig gewogen om de variaties in gewicht in de tijd te kunnen bepalen [62].

De vochtstroom g [$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$] doorheen het monsters kon berekend worden (interval 16-48^e dag vanaf start) als (3) [62]:

$$g = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} \quad (3)$$

Het vochttransport binnen dit interval werd hetzelfde beschouwd over het gehele interval, hoewel er sommige schommelingen waren opgetreden [62]. Tabel 11 geeft resultaten weer van het vochttransport per relatieve vochtigheid.

Tabel 11: Relatieve vochtigheid en gemiddeld vochttransport data [61]

RH _i [%]	Mix	Moisture flow g [$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$]	RH _e [%]	RH _u [%]
33.1	A	$-3.36 \pm 0.26 \cdot 10^{-7}$	54.4	34.4
64.5	A	$3.85 \pm 0.84 \cdot 10^{-7}$	54.0	63.1
75.5	A	$4.49 \pm 0.31 \cdot 10^{-7}$	54.0	73.8
85.1	A	$6.66 \pm 0.66 \cdot 10^{-7}$	54.0	82.6
94.6	A	$7.78 \pm 0.20 \cdot 10^{-7}$	54.0	91.7
33.1	B	$-3.71 \pm 0.34 \cdot 10^{-7}$	54.9	34.3
64.5	B	$4.43 \pm 0.53 \cdot 10^{-7}$	54.0	62.8
75.5	B	$5.05 \pm 0.41 \cdot 10^{-7}$	54.3	73.2
85.1	B	$7.25 \pm 0.37 \cdot 10^{-7}$	54.3	81.9
94.6	B	$9.27 \pm 0.52 \cdot 10^{-7}$	54.3	91.1

De dampdiffusiecoëfficiënt D_v [$m^2\ s^{-1}$] werd berekend op basis van de eerste wet van Fick (4) [62]:

$$g = -D_v \frac{dv}{dx} \quad (4)$$

Waarbij g de totale vochtstroom is doorheen zowel het monster als de luchtlaag tussen de zoutoplossing en het monster en dv is het verschil in vochtgehalte over de dikte van het monster (zie Figuur 36) [62]. De dampdiffusiecoëfficiënt D_v kon berekend worden a.d.h.v. de vochtstromingsweerstand $Z_{material}$ van g (5) [62]:

$$g = \frac{v_i - v_e}{\sum Z} = \frac{v_i - v_e}{Z_{material} + Z_{air}} \Rightarrow Z_{material} = \frac{v_i - v_e}{g} - Z_{air} \quad (5)$$

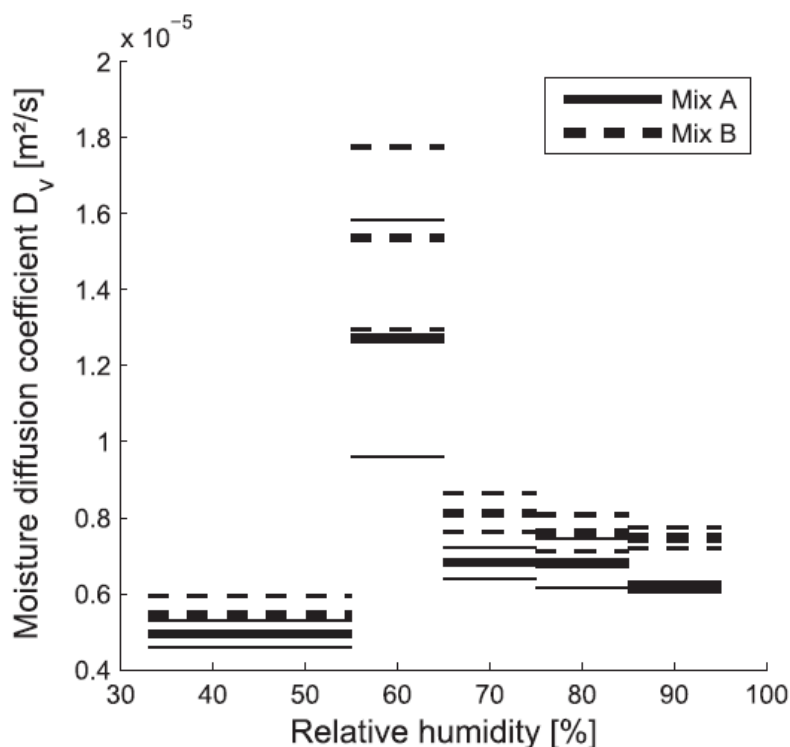
Z_{air} van de luchtlaag tussen het monster en de zoutoplossing werd berekend als (6) [62]:

$$Z_{air} = \frac{dx_{air}}{D_v} \quad \text{met } D_v = 25 \cdot 10^{-6}\ m^2\ s^{-1} \quad (6)$$

De dampdiffusiecoëfficiënt van het materiaal, $D_{v,material}$ werd berekend als (7) [62]:

$$D_v = \frac{dx}{Z_{material}} \quad (7)$$

De dampdiffusiecoëfficiënt werd berekend over alle bekertjes en het gemiddelde werd berekend over de vier identieke bekertjes (per menging) per RV-niveau [62]. De resultaten worden weergegeven in Figuur 37 waarbij de dikke lijnen het gemiddelde voorstellen en de dunne lijnen stellen de standaarddeviatie voor. Menging A en B tonen een gelijkaardig gedrag. Het interval van 54-63 % RV wekt af ten opzichte van de andere tijdstippen en had ook een grote standaarddeviatie [62].



Figuur 37: Dampdiffusiecoëfficiënt voor de verschillende RV- niveaus [62]

Vanaf het interval 63-73 % RV, daalt het dampdiffusiecoëfficiënt lichtjes [62]. Dit kan te maken hebben dat kalkhennep een zeer grote hoeveelheid hennep bevat [62]. Deze zwellen en zetten uit bij een toenemende RV, hierdoor belemmert dit de porositeit in het capillair gebied [62]. Daarnaast is kalkhennep een zeer poreus materiaal en kan er zich vocht fixatie voordoen op poreuze wanden bij een hogere RV [62]. Dit zou leiden tot toenemend vocht op deze poreuze wanden zonder dat de poriën volledig gevuld worden [62]. In plaats van een verhoogd vochttransport zou dit resulteren tot een vermindering van het damptransport doorheen de poriën [62].

Het dampdiffusiecoëfficiënt van kalkhennep is vergelijkbaar met andere bouwmaterialen uit literatuur van Nevander & Elmarsson (zie Tabel 12) [62], [69]. Een bedekking op basis van kalk en vuurhout hebben een lagere vocht permeabiliteit dan kalkhennep, dit geeft aan dat een groot deel van het vochttransport plaatsvindt ter hoogte van de overgang tussen hennep en kalk [62].

Tabel 12: Dampdiffusiecoëfficiënt ($\times 10^{-6}$) [$m^2 s^{-1}$] van menging A en B [62], [69]

Interval	Mix A	Mix B	Lime-based render ^a	Timber (spruce) ^a	Cellular concrete (400 kg m^{-3}) ^a
35–95% RH	4.9–12.7	5.4–15.4	1–2.5	0.2–3.5	3.5–6.4

^a Nevander and Elmarsson (1994).

Capillaire wateropname test

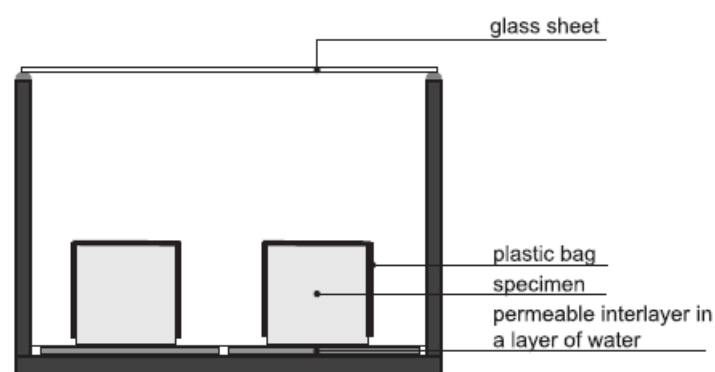
Binnen deze test werd elk monster geconditioneerd naar een individuele hoeveelheid aan geabsorbeerd water [62]. Door deze hoeveelheid werden de monsters capillair verzadigd (voor de proef startte) en veranderde het gewicht in de tijd, met andere woorden het vochttransport werd waargenomen [62]. Tien kubische monsters (100 mm^3) werden gebruikt per mengsel. De methode van de test werd beschreven door Johansson [70].

De verzadigde monsters werden gedroogd bij 30°C totdat ze een bepaalde hoeveelheid geabsorbeerd water bereikte t.o.v. het capillaire verzadigingspunt, variërend van 10 - 100 % [70]. Hierna werd het monster in een plastic zak geplaatst die verzegeld werd [70]. Vervolgens werd deze nog eens in verzegelde plastic zak geplaatst [70]. Daarna werd deze verzegelde zak in een klimaatdoos geplaatst waarvan de RV bijna 100 % bedroeg, dit gedurende minimaal 8 weken [70]. Dit zodat de vochtherverdeling kon plaatsvinden, deze werd beoordeeld na 16 en 31 dagen [70]. De mengsels werden geroerd en 5 monsters per mengeling werden willekeurig gekozen en hiervan werd de RV bepaald (zie Tabel 13) [70].

Tabel 13: Relatieve vochtigheid [%] na vochtherverdeling [70]

	Reference specimen A	Reference specimen B
Redistribution time (days)	16	31
Top	97.0	92.0
Centre	98.0	92.5
Bottom	98.0	94.5
Upper corner	95.0	92.5
Lower corner	98.0	92.5

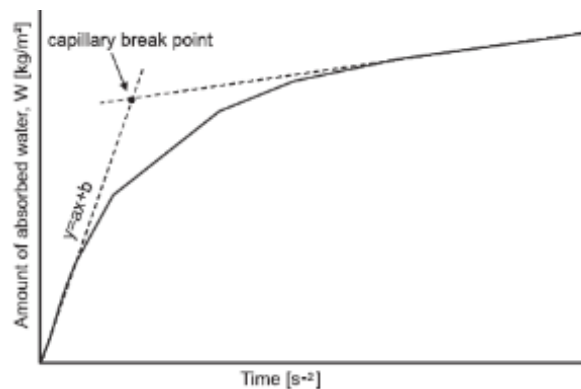
Na 8 weken werden de monsters uit de buitenste plastic zak genomen, de binnenste zak werd verplaatst over het monster zodanig dat één oppervlak blootgesteld werd [70]. Meteen hierna volgde het experiment [70]. Eén exemplaar per keer werd in contact gebracht met water in de houder (zie Figuur 38).



Figuur 38: Schematische weergave van de capillaire wateropname test [70]

Onderaan de houder werd een permeabele tussenlaag voorzien om het monster continue te voorzien van water zonder een al te hoge waterstand [70]. Het waterniveau moest te allen tijde lager zijn dan niveau van de plastic zak rond het monster [70]. Door een kleine ruimte tussen monster en zak kon er een theoretische verdamping plaatsvinden tijdens het experiment [70].

Bij de start van de test waren de tijdsintervallen kort, maar deze werden geleidelijk langer [70]. Hierdoor kon de doos na 1 uur dicht en moest deze alleen open voor het wegen van de monsters (opgenomen door een klok) [70]. Dit zorgde ervoor dat verdamping van de zijde van het monster tijdens het experiment beperkt bleef [70]. Voor de monsters gewogen werden deze op een vochtige doek geplaatst om eventueel vrij water aan het oppervlak te verwijderen [70]. Na ongeveer 12 dagen werden de testen afgerond en werden de monsters uit de plastic omhulling gehaald en geplaatst in een verwarmde kamer (15 % RV en 30 °C) [70]. De plastic omhulling werden ook hierin geplaatst. Na 28 dagen drogen werd de plastic omhulling gewogen en werd het gewicht hiervan afgehouden van het gewicht van het monsters tijdens de capillaire wateropname test [70]. Na 36 dagen drogen bij een equivalent van 15 % RH en 30 °C werden de monsters uit de verwarmde ruimte gehaald en werden ze vervolgens gewogen [70]. Het verband tussen de vierkantswortel van de tijd en de hoeveelheid geabsorbeerd water is weergegeven in Figuur 39 [62].



Figuur 39: Verband tussen $t^{1/2}$ en hoeveelheid geabsorbeerd water [70]

Bij de start heeft elk monster een individuele hoeveelheid geabsorbeerd water, W_{start} [$kg\ m^{-2}$] [62]. Kalkhennep is geen homogeen materiaal en daarom wordt de hoeveelheid geabsorbeerd water in het begin beschreven als een fractie van de capillaire hoeveelheid geabsorbeerd water W_{cap} [$kg\ m^{-2}$] [62]. Zoals Figuur 39 weergeeft is dit het snijpunt (capillair breekpunt) tussen de helling van het eerste deel van de curve (capillaire zuiging) en van het twee deel (Na capillaire zuiging) van de curve [62].

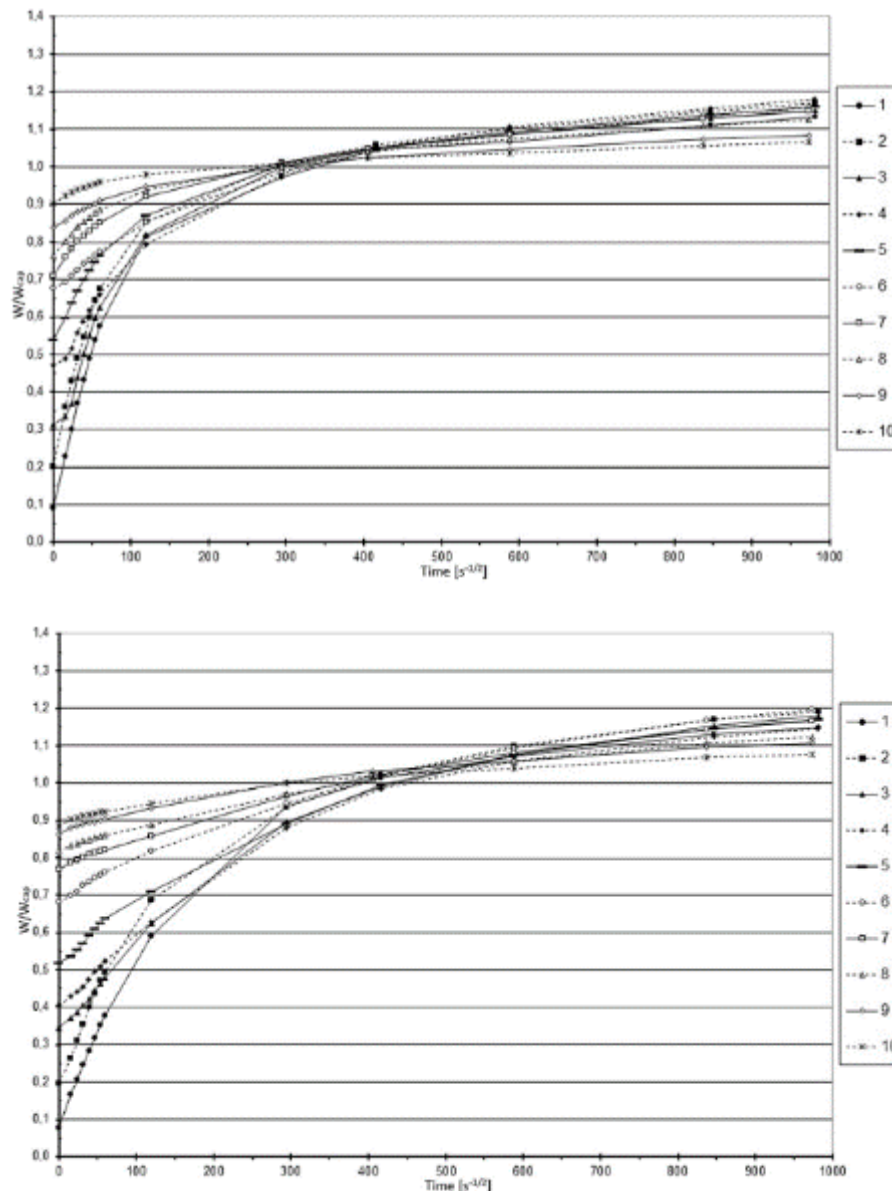
De helling van het eerste gedeelte kan worden beschreven als a in de vergelijking: $y = ax + b$. De vochtabsorptiecoëfficiënt, A [$kg\ m^{-2}\ s^{-1/2}$] kan beschreven worden als een functie van de hoeveelheid geabsorbeerd water en de vierkantswortel van de tijd t (8) [62]:

$$A = \frac{\Delta W}{\sqrt{t}} \Rightarrow A_{W_{start}} = \frac{W - W_{start}}{\sqrt{t}} \quad (8)$$

Als de hoeveelheid opgenomen water uitgedrukt werd als een fractie van de capillaire verzadigingspunt, kan de vochtabsorptiecoëfficiënt ook berekend worden als (9) [70]:

$$A_{W_{start} / W_{cap}} = \frac{\left(\frac{W}{W_{cap}} - \frac{W_{start}}{W_{cap}} \right)}{\sqrt{t}} \quad (9)$$

De vochtabsorptiecoëfficiënt werd voor elk monsters bepaald en de resultaten van de capillaire wateropname test voor mengsels A en B worden weergegeven in Figuur 40 [62].



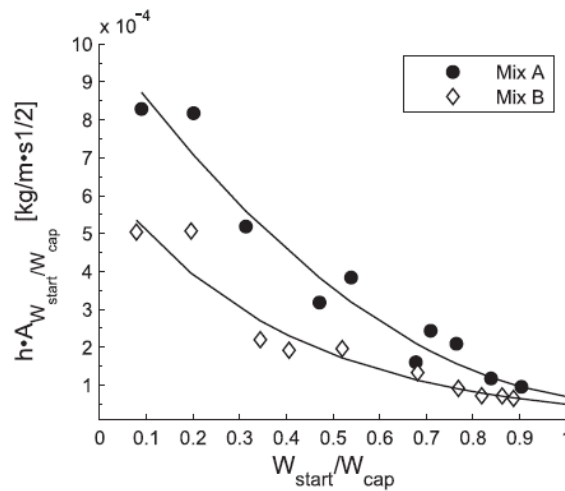
Figuur 40: Capillaire wateropname mengsel A (boven) en mengsel B (onder) [62]

Er mogen geen kruisende lijnen voorkomen in Figuur 40, toch volgen sommige monsters dit patroon niet. Slechts één monster werd gebruikt per W_{start} / W_{cap} , hierdoor zijn er afwijkingen t.o.v. de norm [62].

Voor de evaluatie van de vocht diffusiviteit werd er een kromme opgesteld voor beide mengsels [62]. De monsters beschikken over een uniforme doorsnede waardoor de verhouding tussen volume vochtgehalte w [kg m^{-3}] en de hoeveelheid geabsorbeerd water W [kg m^{-2}] kan beschreven worden als (10) [62]:

$$W = w \cdot h \quad (10)$$

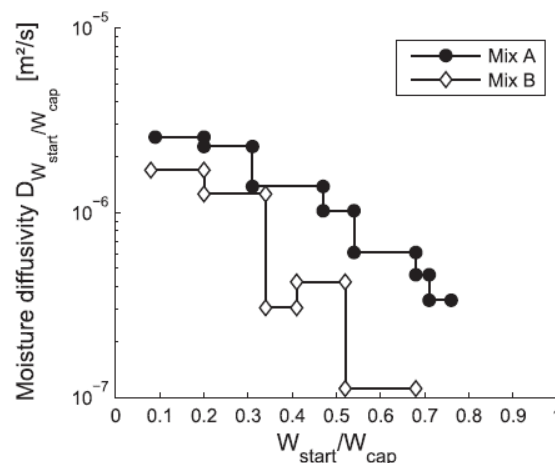
Om de uitvoerdata van de computerprocedure te kunnen uitdrukken, moest de vocht diffusiviteit D_w [$m^2 s^{-1/2}$] uitgedrukt worden als de vochtabsorptiecoëfficiënt $h \cdot A_{W_{start}/W_{cap}}$ [$kg m^{-1} s^{-1/2}$] [62]. Door middel van *curve fitting* (zie Figuur 41) kon de vocht diffusiviteit D_w voor de intervallen tussen de verschillende oorspronkelijke vochtgehalte geëvalueerd worden m.b.v. een computerprogramma JAM-KAP. De computerprocedure is in detail beschreven door Arfvidsson en Janz [71]. *Curve fitting* werd toegepast om het verband tussen de absorptiecoëfficiënt en de aanvankelijke hoeveelheid geabsorbeerd water vast te stellen [62]. De vochtdiffusiviteit kan hieruit worden berekend als de gemiddelde waarde tussen de aanvankelijke hoeveelheid geabsorbeerd water en bijhorend absorptiecoëfficiënt [62].



Figuur 41: Curve fitting vochtabsorptiecoëfficiënt in functie van W_{start}/W_{cap} [62]

Vochttransport eigenschappen over het volledige vochtbereik

Om de totale vochttransport eigenschappen te weten te komen werden de resultaten van de beker- en capillaire wateropname test gecombineerd [62]. Dit aangezien de monsters in de capillaire wateropname test ook onderhevig waren aan absorptie [62]. Figuur 42 geeft de resultaten van $D_{W_{start}/W_{cap}}$ van de capillaire wateropname test weer [62].



Figuur 42: Vochtdiffusiviteit $D_{W_{start}/W_{cap}}$ voor mengsels A en B i.f.v. W_{start}/W_{cap}

Voor het plotten van de resultaten van de capillaire wateropname test als functie van de relatieve vochtigheid (i.p.v. W_{start} / W_{cap}) werd de absorptie isotherm gehanteerd. Eerst werd W_{start} / W_{cap} uitgedrukt als W_{start} voor elk monsters, dit door het te vermenigvuldigen met het vochtgehalte bij capillaire verzadiging (11) [62]:

$$\frac{W_{start}}{W_{cap}} \cdot W_{cap} = W_{start} \quad (11)$$

Een bijkomende capillaire wateropname test was noodzakelijk om het vochtgehalte bepalen bij capillaire verzadiging W_{cap} [$kg\ m^{-3}$], dit voor vier identieke monsters per mengsel [62]. Het gemiddelde vochtgehalte bij capillaire verzadiging bedroeg voor mengsel A $\approx 370\ kg\ m^{-3}$ en voor B $\approx 315\ kg\ m^{-3}$ [62]. De *curve fitting* van de absorptie isotherm (w, φ) werd bekomen d.m.v. computerprogramma *MATLAB* 7.12.0 en de vereenvoudigde *Hailwood-Horrobin* vergelijking (12) [62]:

$$w = \frac{\varphi}{(a + b\varphi + c\varphi^2)} \quad (12)$$

Hierdoor was het mogelijk om een waarde voor φ te berekenen voor iedere W_{start} [62]. Het dampgehalte v [$kg\ m^{-3}$], kan bepaald worden a.d.h.v. de RV (13) [62]:

$$\varphi \cdot v_{\sigma} = v \quad (13)$$

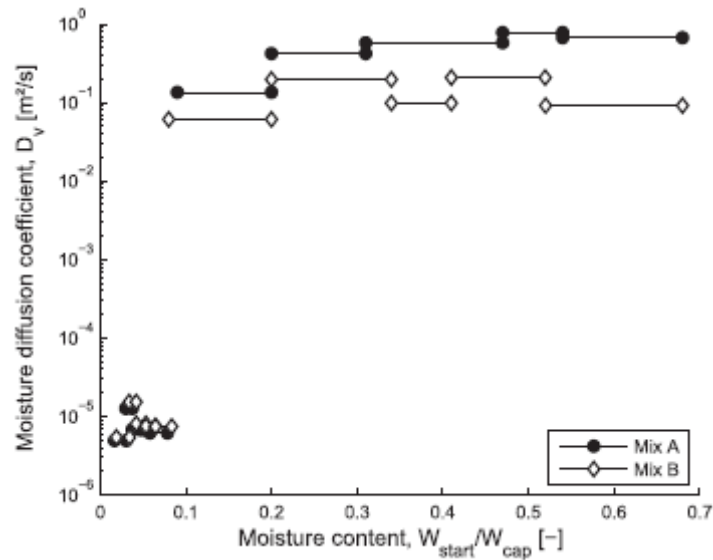
D_v is afgeleid van D_w door de helling van de absorptie (14) [62]:

$$\begin{aligned} D_v \cdot \frac{dv}{dx} &= D_w \cdot \frac{dw}{dx} \\ D_v &= D_w \cdot \frac{dw}{dx} \cdot \frac{dx}{dv} = D_w \cdot \frac{dw}{dv} \end{aligned} \quad (14)$$

Waarbij $\frac{dw}{dv}$ bepaald werd door de helling van de absorptie isotherm te delen door de verzadigingsdampdruk (15) [62]:

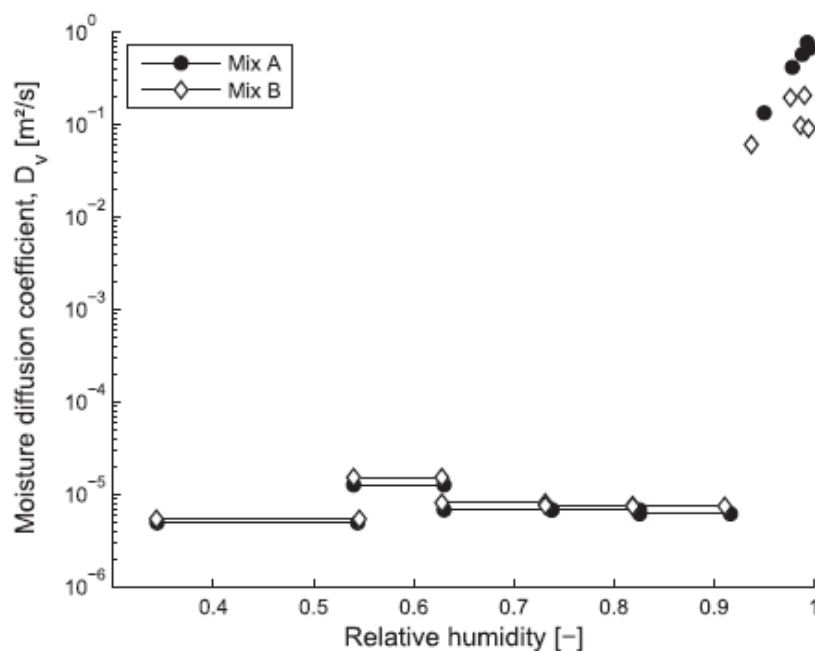
$$\frac{dw}{dv} = \frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{1}{v_s} \quad (15)$$

Wanneer de resultaten voor D_v werden uitgezet (zie Figuur 43), werd er vastgesteld dat bij hogere RV de waarden toenemen [62]. De resultaten van D_v van de capillaire zuigingstest lagen in een hoger RV-bereik ($> 95\%$), dit terwijl die van beker test in het lagere RV-bereik lagen (33 - 95 %) [62].



Figuur 43: Vochtdiffusiecoëfficiënt D_v van mengsel A en B i.f.v. W_{start}/W_{cap} [61]

Bij een $RV > 95\%$ zal een groot deel van de poriën gevuld worden met water, dit zal het vochttransport bevorderen [62]. Daarnaast is de helling van de adsorptie-isotherm bij een hoge RV kritisch wanneer D_v afgeleid wordt van D_w (zie vgl. 14 en 15) [62]. Figuur 44 geeft het vochtdiffusiecoëfficiënt D_v voor beide mengsels weer over het volledige vochtbereik [62].



Figuur 44: Vochtdiffusiecoëfficiënt D_v van mengsels A en B [61]

Bij een hogere RV zijn de waarden van de vochttransport eigenschappen enigszins hoger bij mengsel A dan voor mengsel B (zie Figuur 44), terwijl het omgekeerd is bij een lagere $RV (< 95\%)$ [62].

1.4.2.6 Warmtetransport

De warmtegeleidingscoëfficiënt λ wordt gebaseerd op een ander onderzoek van Cerezo & Arnaud [72]. Totdat nieuwe metingen worden uitgevoerd, wordt λ gelijk genomen aan 0,11 W/mK voor droge monsters [72]. Deze waarde stijgt lineair met de relatieve vochtigheid tot het maximale watergehalte met een stijging van 1,515 % per extra toegevoegd percentage van de massa is bereikt [14]. Tabel 14 geeft de tijdsafhankelijkheid ervan weer in functie van het watergehalte alsook twee nuttige thermische parameters [14]. De eerste is de thermische diffusiviteit α [m^2/s], deze wordt berekend door middel van de ratio (16) [14]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (16)$$

Met:

- thermische opslagcapaciteit c in Wh/m²K,
- soortelijke dichtheid ρ in kg/m³.

De tweede en laatste parameter is de thermische "effusiviteit" ξ_{ff} [$J/m^2K \cdot s^{1/2}$] deze wordt berekend door middel van de ratio (17) [14]:

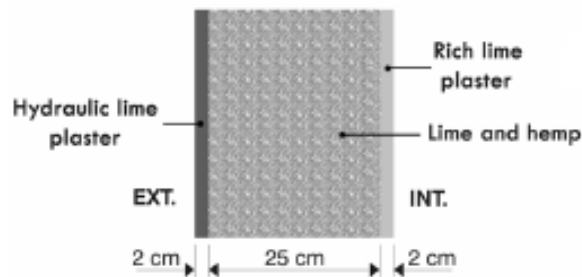
$$\xi_{ff} = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (17)$$

Tabel 14: Watergehalte afhankelijkheid van verschillende parameters [14]

RH [%]	w [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	α [10 ⁻⁷ m ² /s]	ξ_{ff} [J/m ² K ^{1/2} s]
0	0	480	1550	0,11	1,48	286
32	15,24	495,24	1631	0,115	1,43	305
50	22,31	502,31	1667	0,118	1,41	314
65	30,78	510,78	1708	0,121	1,38	325
80	36,48	516,48	1735	0,123	1,37	332
93	45,40	525,40	1777	0,126	1,35	343
100	596	1076	3005	0,317	0,98	1012

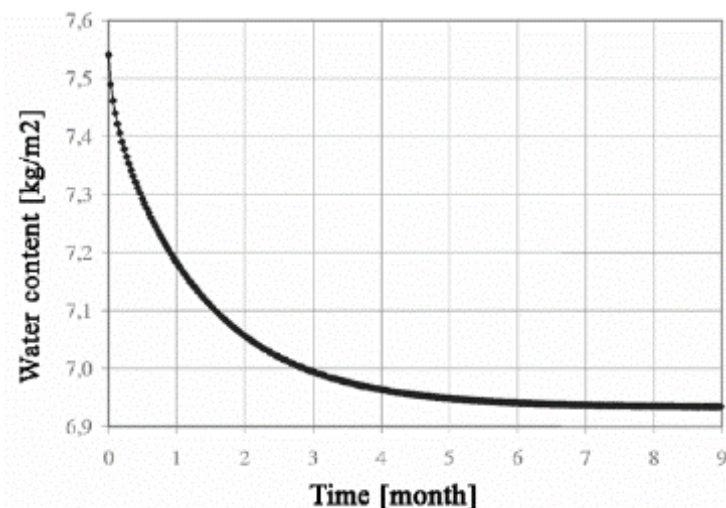
1.4.2.7 Hygrische schok

Deze case werd gedefinieerd om aan te tonen dat het hygrische evenwicht veel trager wordt bereikt dan het thermische evenwicht en dat materialen kunnen bijdragen aan het reguleren van de relatieve vochtigheid van de binnenlucht [14]. De begincondities waren een relatieve vochtigheid van 80 % in de buitenomgeving en 50 % in de binnenomgeving met een lineaire verdeling doorheen de 25 cm elementen van plaatmateriaal (zie Figuur 45) [14]. Vanaf de eerste stap verlaagde de relatieve vochtigheid aan de binnenzijde tot 40 % [14]. De randvoorwaarden omtrent temperatuur waren constant in de tijd en vastgelegd op 20°C [14]. Het thermische effect dat wordt veroorzaakt door vochttransport zal worden besproken in toekomstig onderzoek [14].



Figuur 45: Kalkhennepwand met dikte 25 cm [14]

Figuur 46 toont aan dat er bij een verlaging van de relatieve vochtigheid van 50 % naar 40 % in de binnenomgeving een hygrische schok optreedt [14]. Na ongeveer 9 maanden is de waterinhoud in evenwicht en daarna blijft deze constant onder dezelfde omstandigheden [14]. Wanneer de waterinhoud constant blijft, is er een permanente dampstroming gelijk aan $0,5 \text{ g/m}^2$ per uur die optreedt doorheen de kalkhennep (zie Figuur 45) van links naar rechts (zonder pleisterwerk) [14].



Figuur 46: Watergehalte wanneer relatieve vochtigheid (binnen) daalt [14]

Om de exacte hoeveelheid vocht te beoordelen, die doorheen de kalkhennep naar de binnenomgeving stroomt over een bepaalde tijdsperiode, moet hierbij de vochtstroom gaande vanuit het rechtse oppervlak naar de binnenomgeving verlaagd worden met de stroom die binnenkomt vanuit de binnenruimte gedurende de bepaalde tijdsperiode [14]. In dit geval werd deze stroom benaderd door het gewichtsverlies van het element gedurende de tijdsperiode [14]. Negen maanden na de hygrische schok trad er een stroming op van 600 g/m^2 naar de binnenomgeving [14]. Na 3 maanden werd deze 550 g/m^2 , 91,7 % van de uiteindelijke waarde [14].

Kalkhennep heeft een zeer specifiek gedrag omwille van zijn lage dampdiffusieweerstand gecombineerd met een heel uitgesproken hygroscopische opname [14].

2 Methodologie

In dit hoofdstuk worden de methoden met hun overeenstemmende apparatuur/*software* voor de verschillende metingen en experimenten toegelicht. Verder worden de veronderstellingen per methoden ook toegelicht. De uiteindelijke bevindingen worden uitgelegd bij de resultaten.

2.1 *In situ* metingen

Er worden in *real-life* metingen uitgevoerd op kalkhennepwanden, dit wordt toegepast op twee verbouwingen. Voor elke verbouwing wordt er data verzameld door middel van sensoren. Het feit dat deze metingen gebaseerd worden op een *real-life* scenario met eigen klimatologische omstandigheden en bouwkenmerken kunnen de bekomen resultaten van deze studie alleen gebruikt worden om andere experimenten te ondersteunen en/of te verbeteren.

2.1.1 Meetmateriaal

Voor verbouwing 1 (zie 2.1.2) wordt er zowel gebruik gemaakt van een hygro-thermometer met sensor alsook van een weerstation. Voor verbouwing 2 (zie 2.1.3) wordt enkel gebruik gemaakt van de hygro - thermometer met sensor omwille van het feit dat de metingen plaatsvinden in een kelder waarvan de buitenwand zich bevindt onder de grond. Hierdoor heerst er vrijwel een constante temperatuur en relatieve vochtigheid aan de buitenzijde.

2.1.1.1 Hygro - thermometer en sensor

De hygro - thermometer type HD 2101.2 van Delta Ohm (zie Figuur 47) wordt gebruikt tijdens de meetcampagne. Dit een draagbaar meetinstrument met een groot LCD-scherm. Deze is verbonden met een Pt100 sensor type HP475AC1R. Dit is een gecombineerde (%RV en T) sonde uit roestvrijstaal ($\lambda=15$ W/mK) met $\varnothing$ 14 x 480 mm als afmeting [21].



Figuur 47: Hygro-thermometer met pt100 sensor

Pt verwijst naar het metaal platina waarvan de weerstandsdraad in een Pt100 van gemaakt is, het getal 100 verwijst naar een weerstand van 100 ohm die de sensor heeft bij 0 °C. Hierdoor is deze het meest geschikt voor dit experiment omwille van de gevoeligheid bij een lagere temperatuur (< 50 °C) en het platina corrosiebestendig is [17].

Met de sensor wordt tijdens het experiment de relatieve vochtigheid en de temperatuur gemeten, dit door deze in contact te brengen met het kalkhennepmengsel. De temperatuur wordt gemeten door middel van penetratie, hierdoor moet de tip van de sonde waar de sensor gehuisvest is minstens 60 mm diep aangebracht worden in de wand. De vochtigheidssensor is een capacitieve sensor.

Het meetbereik van de sensor bedraagt 0 % tot 100 % (nauwkeurigheid: 1,5+1,5 % van de gemeten waarde) aan relatieve vochtigheid en -40 °C tot +180 °C (nauwkeurigheid: 0,3 °C) aan temperatuur. Daarnaast bevat deze sensor type HP475AC1R ook een automatische detectie module met een fabriekskalibratie die binnenin aanwezig is. Deze zijn gekalibreerd in een laboratorium op 23 °C bij 75 %RV, 33 %RV en 11,4 %RH.

Tijdens de meetcampagne wordt een tijdsinterval van 15 minuut gehanteerd om de vochtigheid en temperatuur in de kalkhennepwand te *loggen*. Hierdoor kan het warmte- en vochtgedrag in de kalkhennepwand vrij nauwkeurig geanalyseerd worden. De gemeten parameters worden door middel van een *datalogger*, welke geïntegreerd is in de hygro – thermometer, in het geheugen opgeslagen. Dit geheugen kan tot 38 000 waarden aan data opslaan. Op het einde van de meetcampagne wordt de bekomen data overgebracht van het instrument (USB 2.0 poort) naar een PC via een kabel (CP23). Deze data wordt dan uitgelezen op PC door middel van geïnstalleerde DeltaLog9 *software*.

2.1.1.2 Weerstation

Verder wordt er ook gebruik gemaakt van een digitaal weerstation type *TFA KlimaLogg Pro* (zie Figuur 48) die beschikt over een binnen- en buitensensor [22]. Dit geeft de mogelijkheid om de temperatuur en de luchtvochtigheid binnen en buiten te registreren en actief te bewaken.



Figuur 48: Weerstation, type TFA klimalogg pro [22]

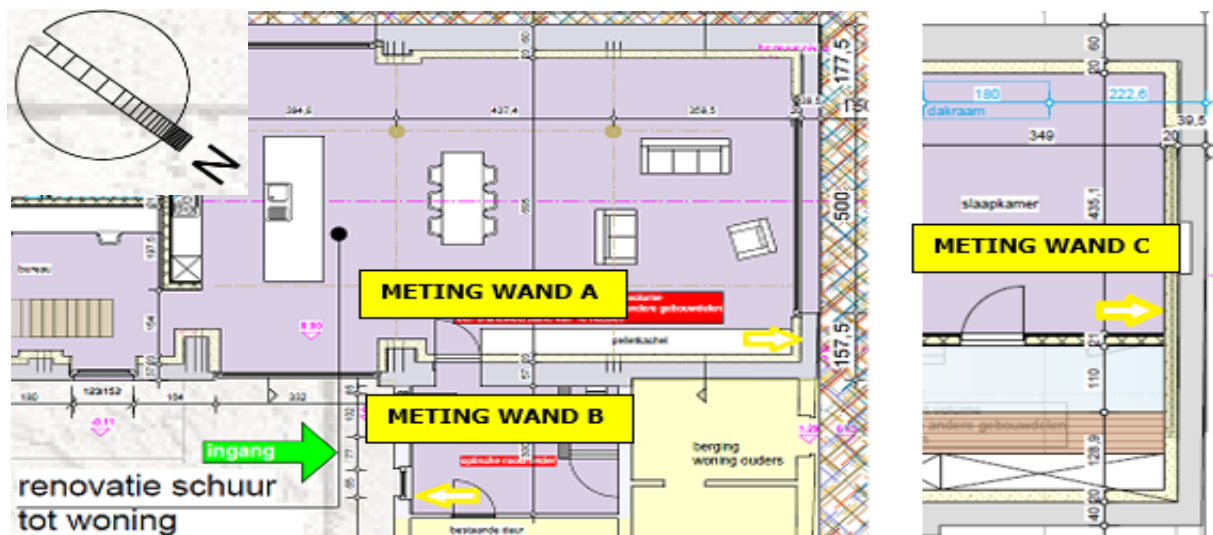
Er geldt een meetrange van 0°C tot $+50^{\circ}\text{C}$ (nauwkeurigheid: $\approx 0,1^{\circ}\text{C}$) voor de temperatuur en van 1 % tot 99 % (nauwkeurigheid: $\approx 3\%$) aan relatieve vochtigheid. De registratie van de temperatuur en luchtvochtigheid zowel binnen als buiten gebeurt volgens een interval van 15 minuten. Het maximale zendbereik van de buitenzender is 100 m (in het vrije veld).

Het weerstation kan tot 50 000 gegevensbestanden opslaan en overzetten op PC door middel van een draadloze USB-stick. Op het toestel zit een USB-knop waardoor de synchronisatie van de gegevens met de PC-*software* kan gestart worden.

De binnen- en buitensensoren worden mee verplaatst afhankelijk van de positie van de Pt100 sensor in de kalkhennepwand. Hierdoor wordt er rekening gehouden met de oriëntatie van de buitengevel met overeenstemmende variërende buitentemperaturen. Hiermee kan het volledige vocht- en warmtetransport doorheen de gebouwschil in kaart gebracht worden.

2.1.2 Situering verbouwing 1

Het gaat hier om een verbouwing waarbij een bestaande schuur gelegen te Lanaken, België gerenoveerd werd. Binnen deze verbouwing werden de bestaande buitenmuren aan de binnenzijde geïsoleerd met kalkhennep. Deze kalkhennepwanden staan net geen jaar, waardoor deze eventueel nog niet volledig zijn uitgehard. Op Figuur 49 worden de drie locaties (gele pijlen) weergegeven waar metingen worden uitgevoerd. Op deze locaties verschilt de kalkhennepwand in dikte. Metingen op wand A en B worden op het gelijkvloers uitgevoerd, de meting op wand C vindt plaats op het verdiep.



Figuur 49: Verbuwing 1 (links gelijkvloers, rechts verdiep) met posities meetlocaties

Testopstelling en meetcampagne

De HP475AC1R- sensor wordt in de kalkhennepwanden aangebracht door gaten te voorzien op drie verschillende locaties (zie Figuur 50) waar de kalkhennepwanden verschillen in isolatiedikte binnen de verbouwing.



Figuur 50: Locatie A, B en C (van links naar rechts) binnen verbouwing 1

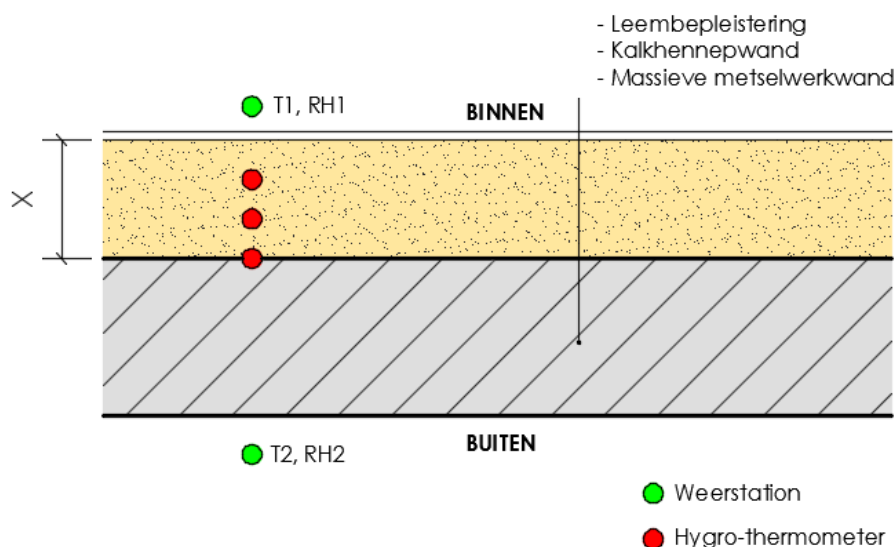
Zie Tabel 15 voor de positionering van de meetpunten in verbouwing 1.

Tabel 15: Positionering meetpunten verbouwing 1

	Dikte	Locatie	Boven afgewerkt vloerpeil	Gevelpositie
Wand A	30 cm	Inkom - Gelijkvloers	30 cm	Noordwest
Wand B	10 cm	Living - Gelijkvloers	80 cm	Zuidoost
Wand C	22 cm	Slaapkamer - Verdieping	3 cm (plinthoogte)	Noordwest

Voor iedere locatie worden drie gaten (zie Figuur 51) voorzien met volgende dieptes in de kalkhennepwand:

- boring op 1/3 diepte ($= 1/3 \cdot x$) van de isolatiedikte,
- boring op 2/3 diepte ($= 2/3 \cdot x$) van de isolatiedikte,
- boring op volledige diepte ($= x$), ter hoogte van het contactvlak kalkhennep-metselwerk.



Figuur 51: Testopstelling meetcampagne verbouwing 1

Op deze drie dieptes wordt dan de relatieve vochtigheid en de temperatuur gemeten (zie rode stippen op Figuur 51). De verschillende locaties in de bouwschil zijn van belang om het gedrag van kalkhennep in functie van het opstijgend vocht te kunnen analyseren. Dit kan anders een vertekend beeld geven van de relatieve vochtigheid.

Doordat er maar gebruik kan gemaakt worden van één sensor gedurende de meetcampagne moest de sensor telkens van positie worden "herstoken". In totaal gaat het om 9 meetpunten, voor elk meetpunt wordt gedurende een bepaalde periode data verzameld (zie Tabel 16). Na deze periode wordt de sensor verplaatst naar de volgende diepte of locatie. Wanneer dit gebeurd is voor de 9 meetpunten, is de meetfase voor deze verbouwing afgelopen.

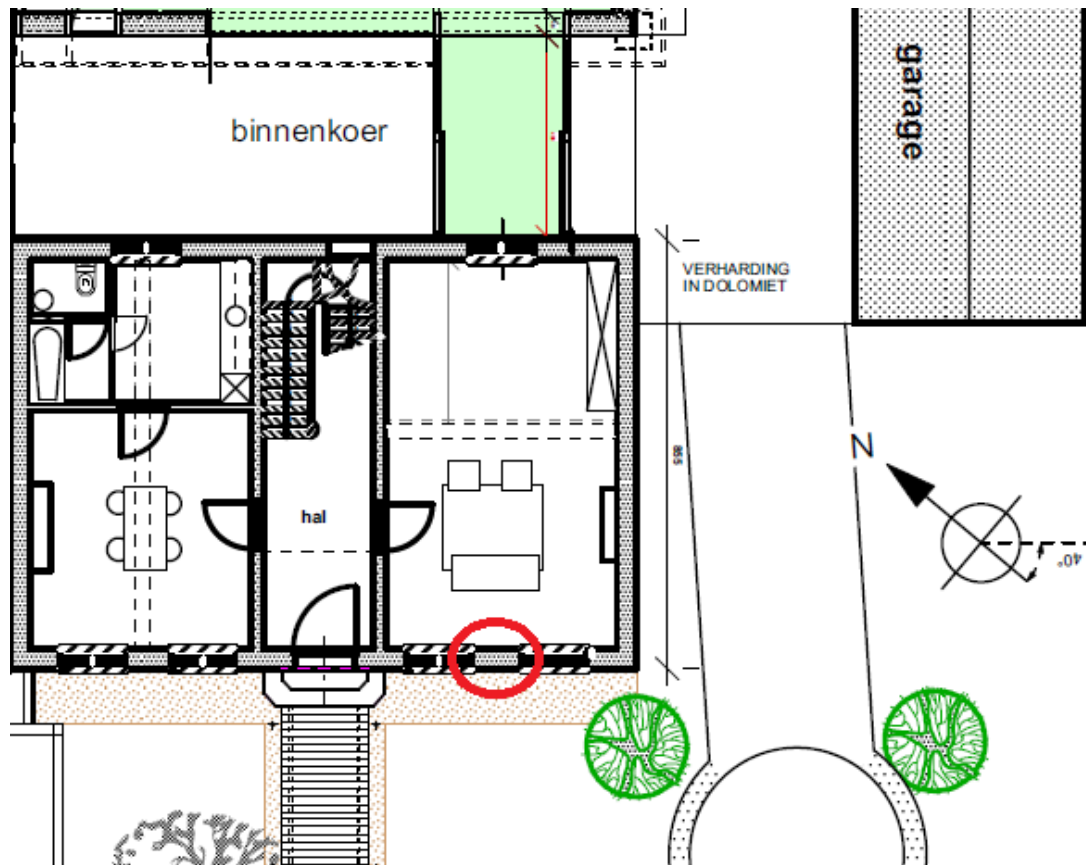
Tabel 16: Meetcampagne verbouwing 1

Gedetailleerde meetcampagne RV en °C - Verbouwing 1						
KH wand	Plaatsingsdiepte	Diepte [cm]	Begintijdstip	Begindatum	Eindtijdstip	Einddatum
A	volledige LH-dikte	30,0	09:16h	17/10/2016	07:02h	18/10/2016
A	2/3 LH-dikte	20,0	07:03h	18/10/2016	18:11h	18/10/2016
A	1/3 LH-dikte	12,0	18:12h	18/10/2016	07:29h	19/10/2016
A	1/3 LH-dikte	10,0	07:30h	19/10/2016	07:08h	21/10/2016
B	2/3 LH-dikte	6,7	07:11h	21/10/2016	16:09h	22/10/2016
B	volledige LH-dikte	10,0	16:10h	22/10/2016	08:21h	24/10/2016
B	acclimatiseren*	0,0	08:22h	24/10/2016	22:44h	24/10/2016
C	1/3 LH-dikte	5,0	22:45h	24/10/2016	20:14h	25/10/2016
C	2/3 LH-dikte	10,0	20:16h	25/10/2016	20:52h	26/10/2016
C	volledige LH-dikte	22,0	20:53h	26/10/2016	11:21h	2/11/2016
C	acclimatiseren*	0,0	11:22h	2/11/2016	19:25h	5/11/2016

Zoals Tabel 16 weergeeft is het begin- en eindtijdstip van ieder meetpunt verschillend, dit wegens het onregelmatig 'hersteken' van de sensor. Ook kan er opgemerkt worden dat er in totaal meer dan 9 meetpunten zijn, dit vanwege het acclimatiseren* van de sonde met het binnenklimaat. Hierdoor kan de bekomen data van de sensor op dit tijdstip vergeleken worden met de overeenstemmende data bekomen met het weerstation.

2.1.3 Situering verbouwing 2

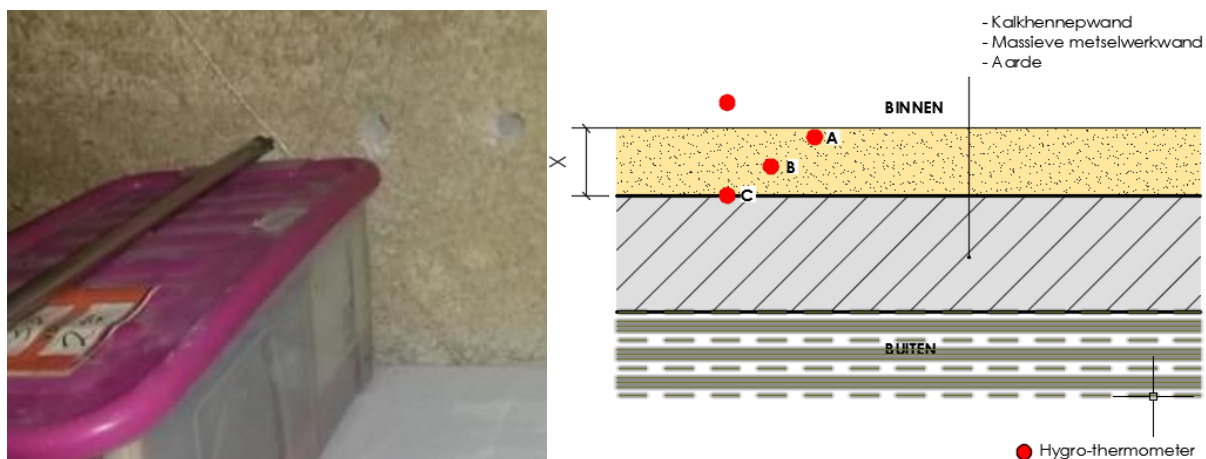
Bij deze verbouwing gelegen te Riemst werd in december 2011 de binnenzijde van een kelder geïsoleerd met kalkhennep (zie Figuur 52 rode cirkel). Hierdoor staan deze kalkhennepwanden ongeveer vijf jaar en zijn deze dus met andere woorden volledig uitgedroogd. Dit doordat in de kelder een verwarmingsinstallatie aanwezig is. De dikte van de kalkhennepwanden varieert tussen 20 en 25 cm.



Figuur 52: Inplantingsplan met aanduiding van de kalkhennepwand in de kelder

Testopstelling en meetcampagne

De sonde met aan het uiteinde de sensor wordt in de kalkhennepwand aangebracht op drie verschillende dieptes die ongeveer plaatsvinden op dezelfde locatie in de kelder (zie Figuur 53). Diepte A bevindt zich op 8 cm, diepte B op 14 cm en diepte C op 23 cm. De locatie van deze metingen bevindt zich 85 cm lager ten opzichte van het maaiveld buiten. De kelderwand bevindt zich onder de zuid-westgevel, met ander woorden de gevel die het sterkst belast is door slagregen.



Figuur 53: Testopstelling verbouwing 2

In totaal ging het dus om drie meetpunten, voor elk meetpunt wordt gedurende een bepaalde periode data verzameld (zie Tabel 17). Na deze periode wordt de sensor verplaatst naar de volgende diepte.

Tabel 17: Meetcampagne verbouwing 2

Gedetailleerde meetcampagne RV en °C - Verbouwing 2						
Gat	Plaatsingsdiepte	Diepte in cm	Begintijdstip	Begindatum	Eindtijdstip	Einddatum
A	1/3 LH-dikte	8,0	16:00h	17/11/2016	21:42h	19/11/2016
B	2/3 LH-dikte	14,0	21:43h	19/11/2016	7:53h	22/11/2016
C	volledige LH-dikte	23,0	7:54h	22/11/2016	22:28h	23/11/2016
/	acclimatiseren*	0,0	22:29h	23/11/2016	14:14h	24/11/2016

Zoals Tabel 17 weergeeft is het begin- en eindtijdstip van ieder meetpunt verschillend, dit wegens het onregelmatig 'hersteken' van de sensor. Na het laatste meetpunt (diepte C) wordt de sonde uit het gat gehaald en kan deze acclimatiseren met het binnenklimaat. Hierdoor kan het binnenklimaat in kaart gebracht worden gedurende deze meetperiode. Aangezien tijdens deze meetcampagne er geen weerstation gebruikt wordt, kan het buitenklimaat niet gemeten worden.

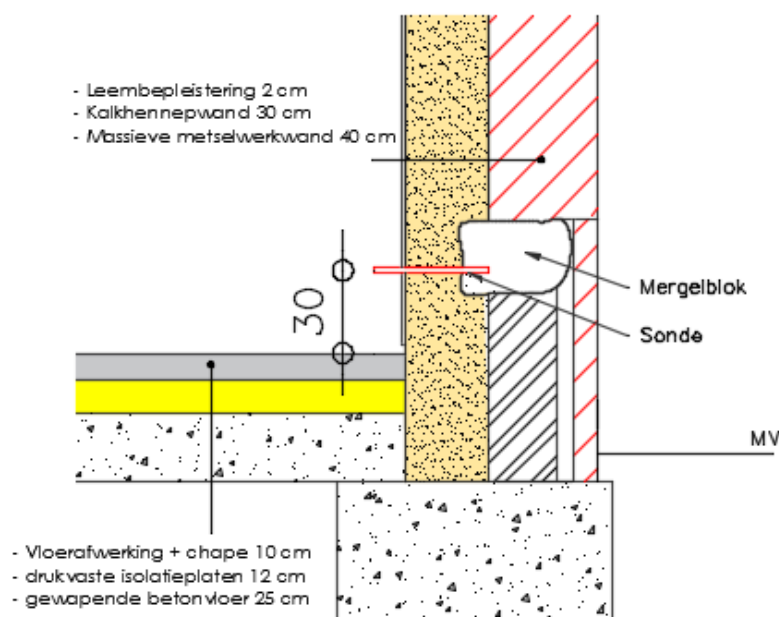
2.1.4 Veronderstellingen

Tijdens de metingen zijn er verschillende beperkingen die hieronder worden toegelicht. Hierbij worden er verschillende veronderstellingen en aannames gemaakt.

2.1.4.1 Positionering meetpunt

In het algemeen zijn de meettechnieken met relatieve vochtigheidssensoren gebrekkig om het volledige werkingsprincipe van capillair actieve materialen aan te tonen [73]. Bij het gebruik van deze sensoren tussen de overgang van het metselwerk met de kalkhennepisolatie moet er enige voorzichtigheid worden genomen bij de plaatsing zodat er geen storingen veroorzaakt worden tijdens het meten [73].

Bij verbouwing 1, wand A op volledige diepte bevindt de sonde zich ter hoogte van resterende mergelblokken (zie Figuur 54). Dit bestaat voor 98% uit koolzure kalk en 2% uit andere bestandsdelen (voornamelijk zand) [74]. Hierdoor heeft deze een waterabsorberend vermogen. Aangezien de mergel, via ondermetselde betonblokken, rechtstreeks in contact is met de ondergrond, kan er vermoedelijk opstijgend vocht opgenomen worden. Verder is er ook geen waterdichting voorzien aan de funderingsaanzet.



Figuur 54: Detail wand A verbouwing 1

2.1.4.2 Penetratie meetsonde

De meetsonde ($\varnothing$ 14 mm) wordt in voorgeboorde gaten in de kalkhennep gestoken. Deze voorgeboorde gaten worden zo klein mogelijk voorzien ($\approx \varnothing$ 14 mm) tijdens de meetcampagnes. Hierbij treedt er telkens een onvermijdelijke speling op tussen de sonde en de voorgeboorde openingen. Hierdoor kan een te grote speling zorgen voor incorrecte resultaten doordat de sensor (uiteinde sonde) rechtstreeks in contact staat met de binnenomgeving en de kalkhennep maar deels in rekening wordt gebracht.

2.1.4.3 Gevelpositie

In België heersen er voornamelijk stevige zuidelijke en westelijke winden waardoor de gevels georiënteerd in deze windrichting meer onderhevig zijn aan slagregen. Voor de eerste meetcampagne zijn de drie wanden beperkt onderhevig aan slagregen, terwijl bij de tweede meetcampagne de kelderwand georiënteerd is naar het zuidwesten. Hierdoor zal de ondergrond aan de kelderwand zeer nat worden en kan deze de kelderwand mogelijk bevochtiging. Vermoedelijk is er geen waterkering aangebracht tegen de buitenkant van de kelderwand onder het maaiveld waardoor het vocht niet tegengehouden en afgevoerd wordt.

2.1.4.4 Hersteken meetsonde

Zoals eerder vermeld (2.1.2 - Testopstelling en meetcampagne) kan er maar gebruikt gemaakt worden van één meetsonde met sensor gedurende de meetcampagne. Om op verschillende dieptes in de kalkhennep te meten, moest de sonde in de loop der tijd herstoken worden.

Bij de eerste meetcampagne wordt bij wand A de sonde van volledige diepte naar 1/3^{de} diepte herstoken. Hierbij wordt er dus eerst een gat geboord tot op volledige diepte van de kalkhennep. Hierna wordt bij de 2^{de} meting de sonde 10 cm teruggetrokken in dezelfde opening. Hierdoor kan zowel het binnen- als het buitenklimaat zich acclimatiseren in de voorgeboorde opening gedurende de eerste meting van wand A. Dit heeft mogelijk tot gevolg dat bij het terugtrekken van de sonde er gelijkaardige meetresultaten worden gemeten, ondanks dat de sonde zich op andere positie bevindt in de kalkhennep. Voor de meting op 10 cm diepte wordt hetzelfde principe toegepast en kan hetzelfde probleem zich mogelijk herhalen.

Voor wanden B en C van de eerste meetcampagne wordt er eerst van 1/3^{de} diepte naar volledig diepte gemeten. Hierbij wordt de opening stapsgewijs dieper geboord waardoor de negatieve beïnvloeding van de metingen eerder beperkt blijft.

Bij de tweede meetcampagne worden er drie gaten voorgeboord (zie Figuur 53) op hetzelfde tijdstip en wordt gestart met het gat op 1/3^{de} diepte. Na een periode van twee dagen wordt de sonde telkens herstoken naar het volgende gat. Hierdoor kunnen de tweede (48 u) en de derde (96 u) opening die vooraf gerealiseerd worden, acclimatiseren met het binnenklimaat voordat de metingen hier gestart worden. Dit kan tot gevolg hebben dat de metingen negatief beïnvloed worden.

Aangezien de metingen volgen op elkaar in de tijd door het hersteken van de meetsonde kunnen de bekomen resultaten van éénzelfde wand en verschillende wanden niet met elkaar vergeleken worden. Om een aanvaardbaar overzicht van één wand te maken en verschillende wanden te kunnen vergelijken, wordt er verondersteld dat het klimaatverloop gedurende één dag binnen de periode van de meetcampagne hetzelfde blijft.

2.2 Numerieke analyse

De *real-life* metingen uit vorig hoofdstuk worden gesimuleerd met behulp van het *softwareprogramma* WUFI®. Op deze manier kunnen de experimentele metingen vergeleken worden met gesimuleerde data zodat eventuele afwijkingen bij de experimenten snel gevonden kunnen worden. Zo kan er ook gekeken worden of de gesimuleerde data een goed beeld geeft van de werkelijke situatie.

Dit hoofdstuk begint met een opsomming van een aantal aandachtspunten en vragen bij het gebruik van de *software* uit eerdere studies. Daarna wordt er een analyse gemaakt van *multi-layer* composietmaterialen waarbij al enkele vragen worden beantwoord. Vervolgens wordt er dieper ingegaan op de vloeistofdoorlatendheid van capillair actieve materialen. Tenslotte volgt de werkelijke implementatie van de verschillende cases in de WUFI® -*software*.

2.2.1 Aandachtspunten bij implementatie

Een betrouwbare implementatie van de fysische fenomenen is van zeer groot belang om een betrouwbare numerieke studie te bekomen [73]. In dit hoofdstuk worden een aantal aandachtspunten besproken.

Ten eerste wordt de vraag gesteld of de vereenvoudiging van een gevelmetselwerk wand tot een homogene *metselwerklayer* gerechtvaardigd is voor de studie van de hygrothermische prestaties van het capillair actief isolatiemateriaal [73]. Bijkomend moet ook de invloed van het contact tussen de verschillende materialen bij de overgangen (metselwerk-mortel, mortel-isolatie en isolatie en pleisterlaag) gekend zijn. Dit is meestal een natuurlijk contact waarbij beide materialen in contact zijn met elkaar terwijl er geen continuïteit is van de poriënstructuur [73]. Dit heeft tot gevolg dat een overgangsweerstand ontstaat bij de overgang van de materialen [73].

In alle vereenvoudigde modellen zijn de binnencondities afhankelijk van de hygrothermische prestaties van de materialen [73]. De HVAC-voorzieningen zijn meestal constant en worden ingegeven als constante randvoorwaarden [73].

Overzicht en vragen

- a) In België zijn de meeste renovaties gekarakteriseerd door dunne metselwerkmuren (29 cm of minder) en een niet-gecontroleerd binnenklimaat (RV) [73]. Gewoonlijk wordt er geen oppervlakteafwerking voorzien wat kan leiden tot een hogere relatieve vochtigheid als de metselwerk wand is blootgesteld aan regen gedreven door wind [73]. In welke mate beïnvloeden de afmetingen en de randvoorwaarden de hygrothermische prestaties van capillair actieve isolatiematerialen [73]?
- b) Ook wordt een ideaal contact beschouwd tussen de materialen [73]. In realiteit is er altijd wel een bepaalde overgangsweerstand [73]. Deze vertraagt het vochttransport doorheen de overgang van de materialen en dus beïnvloedt dit ook de hygrothermische prestaties van capillair actieve isolatiematerialen [73]. Mogen deze overgangsweerstanden tussen de materialen verwaarloosd worden [73]?

- c) In numerieke simulaties wordt de gevelmetselwerkmuur beschouwd als een homogene *layer* uit bakstenen [73]. Maar is deze vereenvoudiging van het metselwerk tot een enkelvoudige bakstenen *layer* gerechtvaardigd [73]? Hebben de mortelvoegen en de hydraulische mortel een invloed op het voorspelde vochttransport in de metselwerkmuur die wordt blootgesteld aan klimaatcondities [73]?
- d) Zoals eerder vermeld kan binnenisolatie het koudebrugeffect vergroten [73]. Wordt er rekening gehouden met de lagere temperaturen in de hoeken van de binnenruimtes [73]?

2.2.2 Hygrische prestaties multi-layer composietmaterialen

Vochttransport in een *multi-layer* samengestelde bouwschil kunnen afwijken van het vochttransport doorheen de combinatie van de enkelvoudige materialen [73]. Deze afwijking geeft een vertraging van het vochttransport doorheen de bouwschil [73].

2.2.2.1 Baksteen – mortel composiet

In het algemeen hebben mortels een lagere capillaire absorptie dan keramische bakstenen [73]. De homogene bakstenen *layer* is daardoor dus sneller verzadigd [73]. De verzadiging van een enkelvoudige baksteen gebeurde sneller dan deze van een composiet bestaande uit bakstenen en mortel [73]. Eens het vochtfront de mortelvoegen bereikte, vertraagde het vochttransport [73].

Vervolgens zorgt de overgangsweerstand tussen de mortel en de bakstenen voor een vertraging van het vochttransport [73]. Dus bij de vereenvoudiging van de gevelmetselwerkwand tot een homogene enkelvoudige bakstenen *layer* wordt er een overschatting gemaakt van de vochtstroom doorheen de wand [73].

Echter bij realistische (variërende) klimaatcondities die bestaan uit afwisselend regen en droge periodes, moet ook rekening gehouden worden met de vochttopslagcapaciteiten en de vloeistofdoorlatendheid [73]. De binnenafwerking bepaalt hoofdzakelijk de vochtbufferingcapaciteiten van een bouwschil [73]. Bijkomend is de behuizing in de binnenruimte (boeken, tapijten, ...) van groter belang dan de opbouw van de bouwschil [73]. Bij bakstenen en mortels is de vloeistofdoorlatendheid afhankelijk van de hoeveelheid vocht [73].

Bij metselwerk blootgesteld aan variërende klimaatcondities treedt er slechts een klein verschil op tussen de vochtstroom doorheen de homogene bakstenen *layer* en de baksteen-mortel composiet [73]. De overgangsweerstand tussen de mortel en de baksteen is verwaarloosbaar [73]. Dus voor normale toepassingen is de vereenvoudiging van een metselwerkwand tot een homogene bakstenen *layer* gerechtvaardigd [73].

Potentiële scheuren veroorzaakt door hygrische spanningen tussen de mortel en de bakstenen worden bij deze studie (1D) verwaarloosd [73]. Door de winddruk en gravitatiekrachten kunnen deze scheuren zorgen voor een extra weg waar het vocht kan doorstromen [73]. Voor deze gevallen worden simulaties in 2D of 3D aangeraden [73].

2.2.2.2 Hydraulische overgang tussen baksteen en isolatiemateriaal

Deze overgang is van veel groter belang dan deze van de overgang tussen de mortel en baksteen van de gevelmetselwerk wand (a) [73]. In tegenstelling tot a komt bij deze de vochtstroom niet enkel van de regenbelasting maar ook van de dampstroom vanuit de binnenomgeving en eventueel ook inwendige condensatie dat een vochtstroom kan veroorzaken [73]. Deze overgang wordt onderzocht om onrealistisch hoge vochtstromen in een bouwschil met een capillair actief materiaal te vermijden [73].

Een imperfect contact zorgt voor een overgangsweerstand tussen de baksteen en het isolatiemateriaal wat de vochtstroom vertraagt [73]. Bij *real* klimaatcondities mag deze overgangsweerstand verwaarloosd worden omdat deze een beperkte invloed heeft op de hygrothermische prestaties van de bouwschil [73].

De regenbelasting op het buitenoppervlak kan resulteren in een vochtfront dat de warme zijde van de isolatie kan bereiken [73]. Als het vocht het capillair actieve isolatiemateriaal kan bereiken, verlaagt de thermische weerstand van het isolatiemateriaal [73]. Bijkomend door de capillaire krachten kan het vocht herverdeeld en afgevoerd worden richting de binnenruimte [73]. Hierdoor ontstaat er dus een hogere relatieve vochtigheid in de binnenruimte [73].

In de numerieke analyse wordt een eventuele afwezigheid van contact tussen de isolatie en de bakstenen verwaarloosd [73]. Door een eventuele ontkoppeling kan het aanwezige vocht niet herverdeeld worden door het isolatiemateriaal en zal het vocht geabsorbeerd worden door de bakstenen [73].

Een eventuele extra mortel tussen de bakstenen en de isolatie voor de hechting van de isolatie met het gevelmetselwerk zorgt voor een extra dampweerstand wat resulteert in minder condensatie [73]. Bijkomend zorgt deze mortel ook voor een deelse opname van het eventuele gecondenseerde vocht [73]. De rest van het gecondenseerde vocht wordt herverdeeld naar de binnenomgeving toe [73].

2.2.2.3 Conclusies

Dus voor beide overgangen (baksteen-mortel en baksteen-isolatie) kan worden geconcludeerd dat een overgangsweerstand moet worden in rekening gebracht worden bij constante wintercondities om acceptabele numerieke resultaten te verkrijgen die kunnen vergeleken worden met experimentele resultaten [73].

Echter wanneer *multi-layer* composietmaterialen worden blootgesteld aan realistische (variërende) klimaatcondities, die bestaan uit afwisselende droge en natte periodes, heeft de overgangsweerstand een verwaarloosbare invloed op de hygrothermische prestaties van de bouwschil [73]. Ook voor de baksteen-mortel composiet wordt geconcludeerd dat de vereenvoudiging tot een homogene bakstenen *layer* is toegestaan [73].

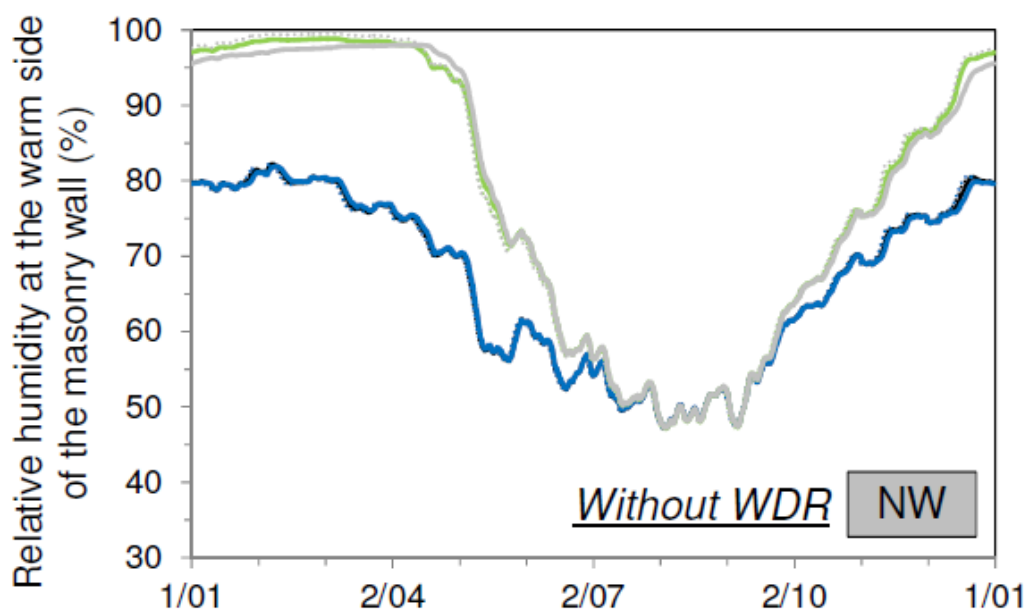
2.2.3 Invloed vloeistofdoorlatendheid van capillair actieve materialen

De invloed van de vloeistofdoorlatendheid van de mortel (aanhechting) en calciumsilicaat (capillair actief) wordt onderzocht, enerzijds exclusief regen en anderzijds inclusief regen.

2.2.3.1 Exclusief door wind gedreven regen

Figuur 55 toont de invloed van de vloeistofdoorlatendheid van de mortel en het calciumsilicaat wanneer regen niet in rekening wordt gebracht [73]. Het vocht wordt capillair getransporteerd door het calciumsilicaat (actief materiaal) en dus wordt het overhygroscopische gebied in de mortel (voor aanhechting) niet bereikt [73]. Vanaf het ogenblik dat het vloeistoftransport wordt geblokkeerd, gaat de relatieve vochtigheid aan de warme zijde van het metselwerk stijgen gedurende het stookseizoen [73]. Het verloop is vergelijkbaar met dat van de dampopen isolatiematerialen [73]. De lagere relatieve vochtigheid aan de warme zijde van het metselwerk gedurende het stookseizoen in vergelijking met de dampopen materialen zijn te wijten aan een hogere dampdiffusieweerstand van het capillair actieve materiaal (calciumsilicaat) en vooral de mortel [73]. Ook de vochtbufferingcapaciteiten van het actieve materiaal en de mortel spelen hierbij een rol, hierdoor treden er minder abrupte pieken op in relatieve vochtigheid en is het verloop gelijkmatiger [73].

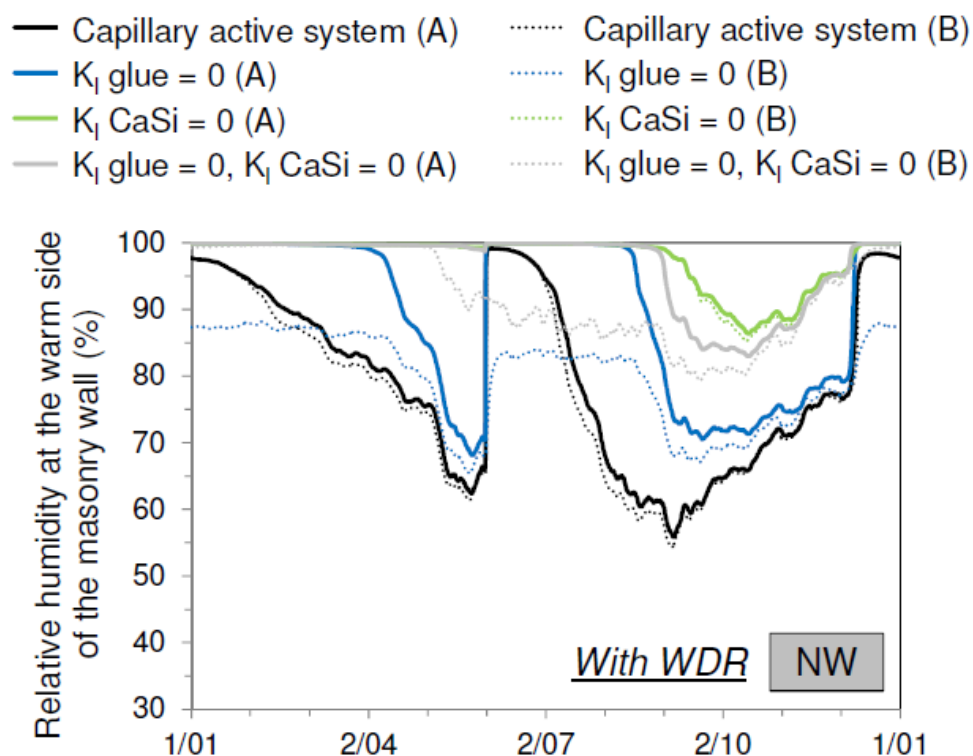
- | | |
|--|--|
| — Capillary active system (A) | Capillary active system (B) |
| — $K_l \text{ glue} = 0$ (A) | $K_l \text{ glue} = 0$ (B) |
| — $K_l \text{ CaSi} = 0$ (A) | $K_l \text{ CaSi} = 0$ (B) |
| — $K_l \text{ glue} = 0, K_l \text{ CaSi} = 0$ (A) | $K_l \text{ glue} = 0, K_l \text{ CaSi} = 0$ (B) |



Figuur 55: Relatieve vochtigheid op de overgang tussen A) metselwerk-mortel en B) mortel-calciumsilicaat (de curves voor het referentiesysteem en systeem met $K = 0$ vallen samen) [73]

2.2.3.2 Inclusief door wind gedreven regen

Het gedrag wanneer de regen wel in rekening wordt gebracht, wordt getoond in Figuur 56 [73]. Wanneer de vloeistofdoorlatendheid van de mortel (aanhechting) op nul wordt gezet, kan de regen dat de overgang tussen het metselwerk en de mortel (aanhechting) (A) bereikt, niet meer door het calciumsilicaat capillair transporteren [73]. Hierdoor wordt de relatieve vochtigheid tussen het metselwerk en de mortel (aanhechting) (A) bijna gelijk aan 100 % [73]. Op de overgang tussen de mortel en het capillair actieve materiaal (B) veroorzaakt de regen een lagere relatieve vochtigheid in vergelijking met hetzelfde systeem zonder regen [73]. Hoewel een piek in regenval steeds resulteert in een stijging van de relatieve vochtigheid (ongeveer 87 % RV in vergelijking met ongeveer 80 % RV) [73]. Na een regenperiode zal de daling in relatieve vochtigheid op de overgang trager optreden doordat het drogen naar buiten toe moeilijker wordt [73]. Een soortgelijk gedrag wordt gevonden in geval van een slecht contact tussen het metselwerk en de isolatie [73].



Figuur 56: Relatieve vochtigheid op de overgang tussen A) metselwerk-mortel en B) mortel-calciumsilicaat [73]

Wanneer alleen de vloeistofdoorlatendheid van het calciumsilicaat op nul wordt gezet, kan de regen de overgang tussen de mortel en het calciumsilicaat (B) bereiken [73]. Het vocht kan zich daarna niet herverdelen naar binnen toe omwille van geen vloeistofdoorlatendheid van het calciumsilicaat [73]. Dus de relatieve vochtigheid tussen het zowel het metselwerk en mortel (A) als tussen de mortel en het calciumsilicaat (B) benadert de 100 % [73].

Wanneer zowel de vloeistofdoorlatendheid van de mortel en het calciumsilicaat op nul worden gezet, bereikt de relatieve vochtigheid tussen het metselwerk en de mortel (A) 100 % gedurende dezelfde periode wanneer enkel de vloeistofdoorlatendheid van het calciumsilicaat op nul werd gezet [73]. Het vocht afkomstig van de regen kan enkel naar binnen toe getransporteerd worden in dampvorm [73]. Dus de relatieve vochtigheid blijft hoog voor een langere periode [73]. Omdat het vocht niet capillair kan getransporteerd worden naar binnen toe, zal er een lagere relatieve vochtigheid optreden tussen de mortel en het calciumsilicaat (B) dan bij het geval waarbij enkel de vloeistofdoorlatendheid van het calciumsilicaat op nul werd gezet [73].

Het uitdrogingsproces begin september treedt sneller op door een kleinere hoeveelheid gebufferde vocht in de mortel en het calciumsilicaat [73]. Gedurende het stookseizoen zal de relatieve vochtigheid tussen de mortel en het calciumsilicaat (B) de 100 % benaderen [73]. Dit is vergelijkbaar met het gedrag dat werd gevonden bij de dampopen minerale wol isolatie [73].

2.2.3.3 Conclusie

De materiaaleigenschappen van de isolatiematerialen zijn bepalend voor de prestaties met in het bijzonder de vloeistofdoorlatendheid van de isolatie [73]. De analyse van de vloeistofdoorlatendheid van het capillair actieve materiaal toont het belang aan van een goed contact tussen de isolatiemateriaal en de metselwerkwand [73]. De capillaire krachten in het isolatiemateriaal zijn voldoende om vocht ten gevolge van inwendige condensatie af te voeren [73].

De prestaties van capillair actieve materialen zijn gevoeliger voor kleine aanpassingen aan de bouwschil zoals bijvoorbeeld binnenafwerking, diktes enzoverder [73]. Ook door wind gedreven regen kan de werking van een capillair actief materiaal verstoren [73]. Wanneer geen door wind gedreven regen wordt ingerekend, treedt er inwendige condensatie op zoals voorspeld met de Glaser-methode bij traditionele isolatiematerialen [73]. Wanneer er een capillair actief isolatiemateriaal wordt toegepast is dit niet meer het geval en is deze methode te beperkt [73].

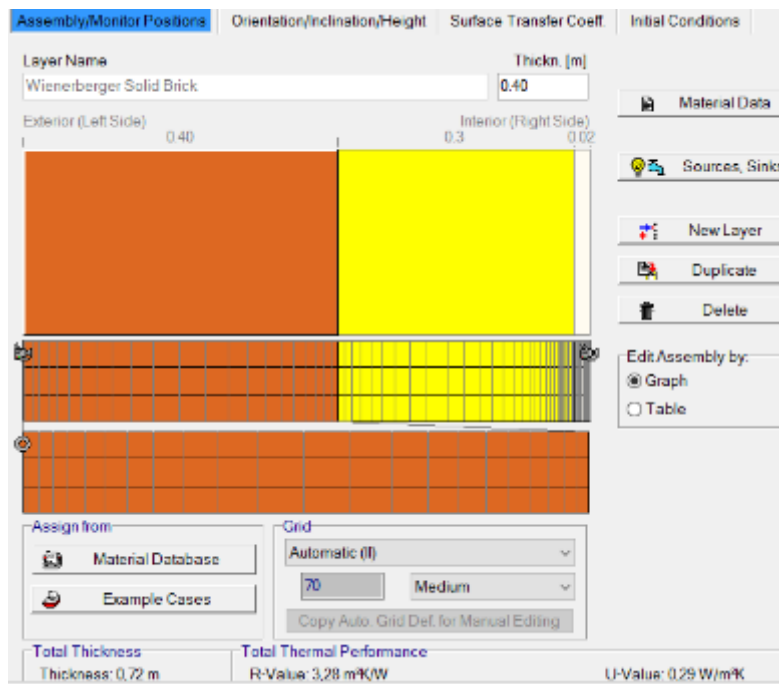
2.2.4 Implementatie in WUFI®

In dit hoofdstuk wordt besproken hoe de verschillende wanden uit verbouwing 1 zijn ingegeven in de WUFI® -*software*. Per wand wordt telkens hetzelfde stappenplan doorlopen om tot de uiteindelijke resultaten te komen.

Stappenplan wand A

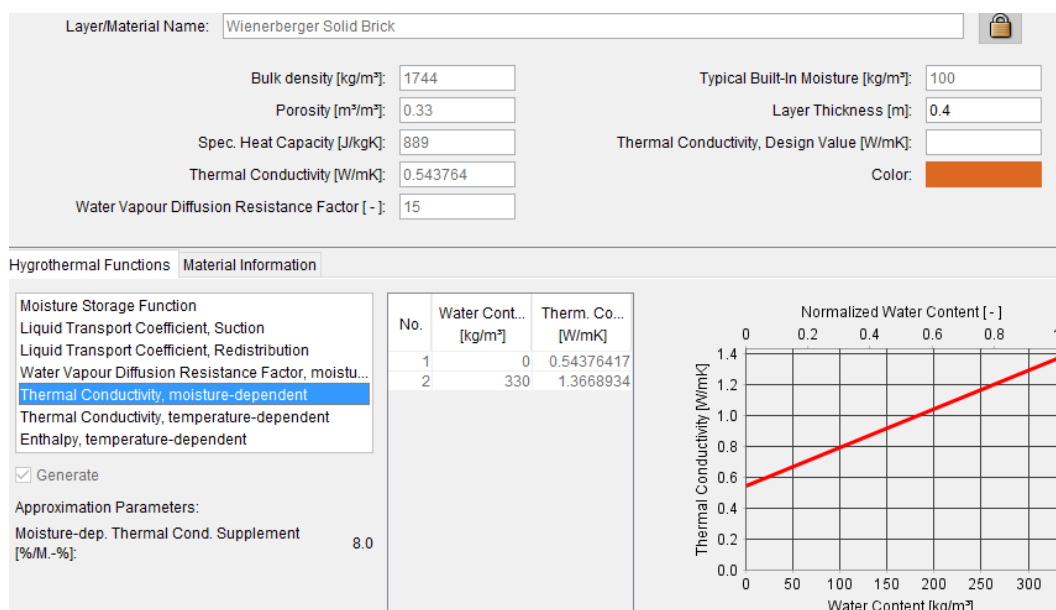
a) Component – samenstelling

De samenstelling van wand A (zie Figuur 57) uit verbouwing 1 bestaat uit metselwerk (40 cm), kalkhennep (30 cm) en een kalkpleister (2 cm). Er werd gekozen voor de kalkpleister omdat leempleisterwerk niet beschikbaar was in de *materialendatabase*.



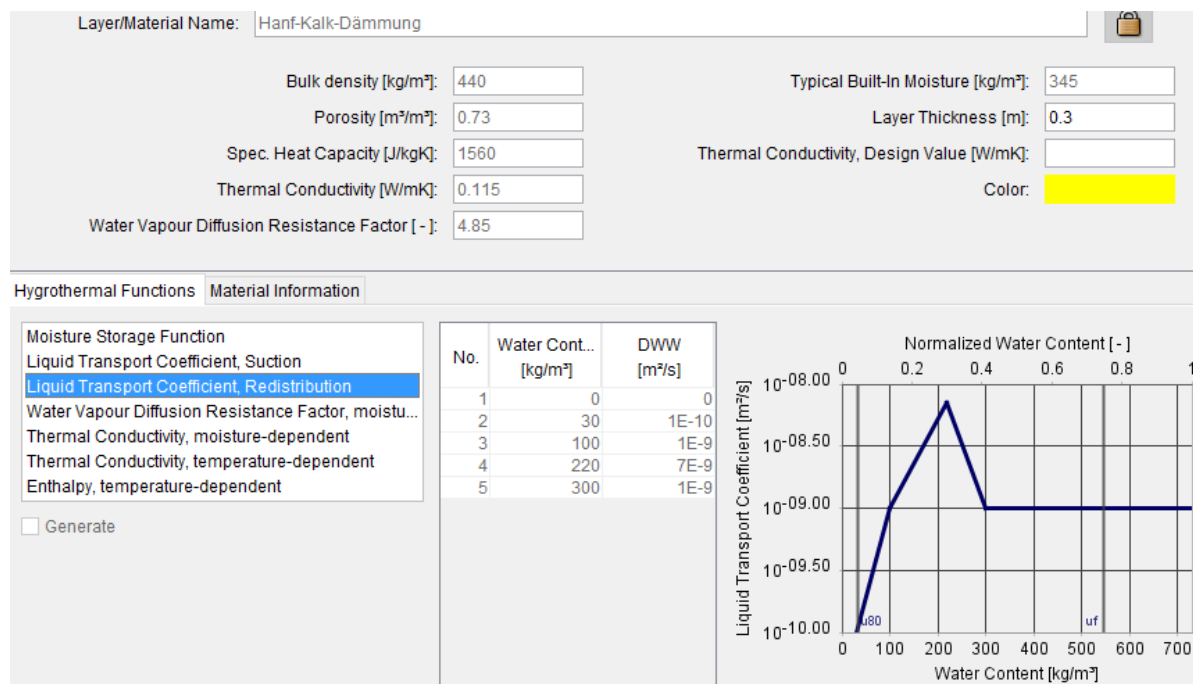
Figuur 57: Samenstelling wand A

Voor het metselwerk werd gekozen voor de Wienerberger *solid brick* (zie Figuur 58). Deze heeft een lage waterdampdiffusieweerstand en is dus dampopen (15).



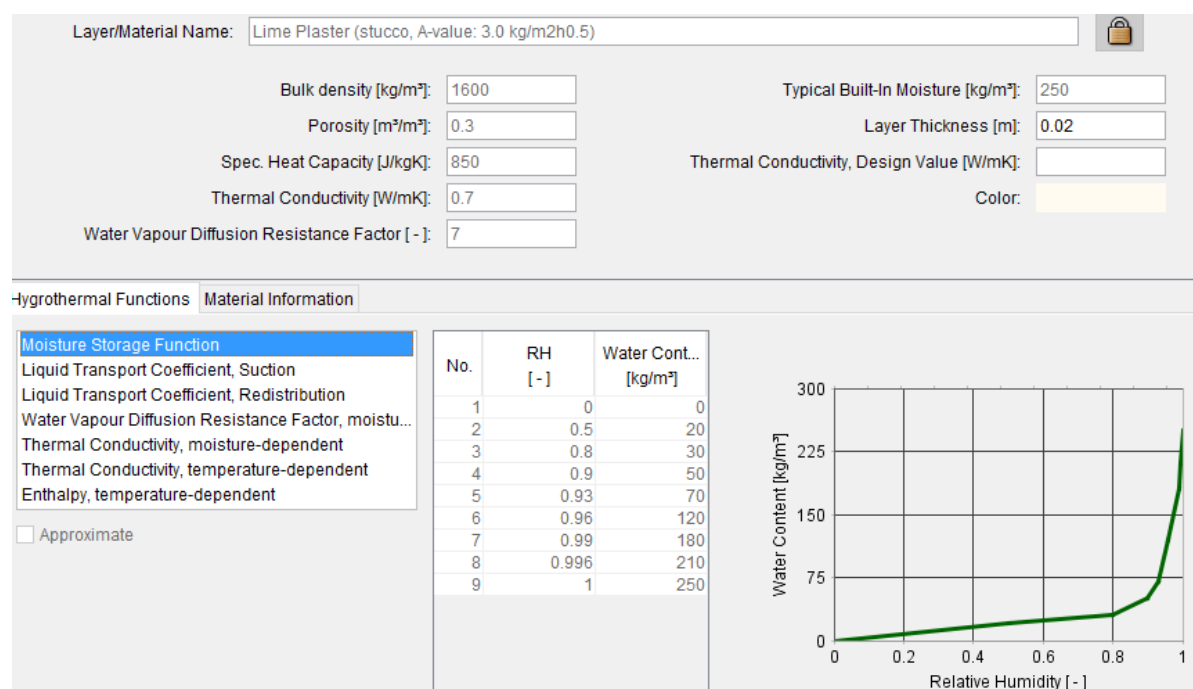
Figuur 58: Materiaaleigenschappen Wienerberger solid brick

De eigenschappen van de kalkhennep worden weergegeven in Figuur 59. Op onderstaande figuur wordt ook weergegeven dat de vloeistofdoorlatendheid afhankelijk is van de hoeveelheid vocht in de kalkhennep.



Figuur 59: Materiaaleigenschappen kalkhennep

Tenslotte worden de materiaaleigenschappen van de kalkpleister weergegeven (zie Figuur 60). In onderstaande figuur wordt ook de vochttopslagcapaciteiten weergegeven in functie van de relatieve vochtigheid.



Figuur 60: Materiaaleigenschappen kalkpleister

b) Component – oriëntatie

Wand A is georiënteerd in noordwestelijke richting en wordt verondersteld loodrecht op het grondvlak te staan (zie Figuur 61).

Assembly/Monitor Positions | Orientation/Inclination/Height | Surface Transfer Coeff.

Orientation: North-West

Inclination: 90

Building Height/Driving Rain Coefficients

☐ Rain load calculation according to ASHRAE Standard 160

R1 [-] 0

R2 [s/m] 0.07

Note: Rain Load = Rain * (R1 + R2 * Wind Velocity)

Short Building, height up to 10 m

Figuur 61: Oriëntatie

c) Component – oppervlakte overgangscoefficienten

Er wordt rekening gehouden met de overgangscoefficienten van een verticale wand. Namelijk 1/25 voor het buitenoppervlak en 1/8 voor het binnenoppervlak (zie Figuur 62). Er werd geen coating voorzien en er is geen absorptie van kortgolvlige radiatie.

Assembly/Monitor Positions | Orientation/Inclination/Height | Surface Transfer Coeff. | Initial Conditions

Exterior Surface (Left Side)

Heat Resistance [m²K/W] 0.0526 External Wall

includes long-wave radiation parts [W/m²K] 6.5

wind-dependent ☐

Sd-Value [m] --- No coating

Note: This setting does not affect rain absorption

Short-Wave Radiation Absorptivity [-] --- No absorption/emission

Long-Wave Radiation Emissivity [-] ---

Explicit Radiation Balance ☐ Note: This option takes radiative cooling due to long-wave emission into account. Sensitive cases may require sufficiently accurate counter-radiation data in the weather file.

Ground Short-Wave Reflectivity [-] 0.2 Standard value

Adhering Fraction of Rain [-] 0.7 Depending on inclination of component

Interior Surface (Right Side)

Heat Resistance [m²K/W] 0.125 (External Wall)

Sd-Value [m] --- No coating

Figuur 62: Oppervlaktecoëfficiënten

d) Component – begincondities

Bij de begincondities (zie Figuur 63) wordt er rekening gehouden met een verschillend initieel vochtgehalte van de verschillende delen van de bouwschil. Het programma geeft zelf typische vochtgehalten aan de materialen. Namelijk 100 kg/m³ voor de Wienerberger bakstenen, 345 kg/m³ voor de kalkhennep en 250 kg/m³ voor de kalkpleister.

Assembly/Monitor Positions	Orientation/Inclination/Height	Surface Transfer Coeff.	Initial Conditions
Initial Moisture in Component ☐ Constant Across Component ☒ In each Layer			
Assign Typical Built-In Moisture		Initial Temperature in Component [°C] 20	
Initial Water Content in Different Layers			
No.	Material Layer	Thickn. [m]	Water Content [kg/m³]
1	Wienerberger Solid Brick	0.4	100.0
2	Hanf-Kalk-Dämmung	0.3	345
3	Lime Plaster (stucco, A-value: 3.0 kg/m²h0.5)	0.02	250.0

Figuur 63: Begincondities

e) Berekeningsperiode

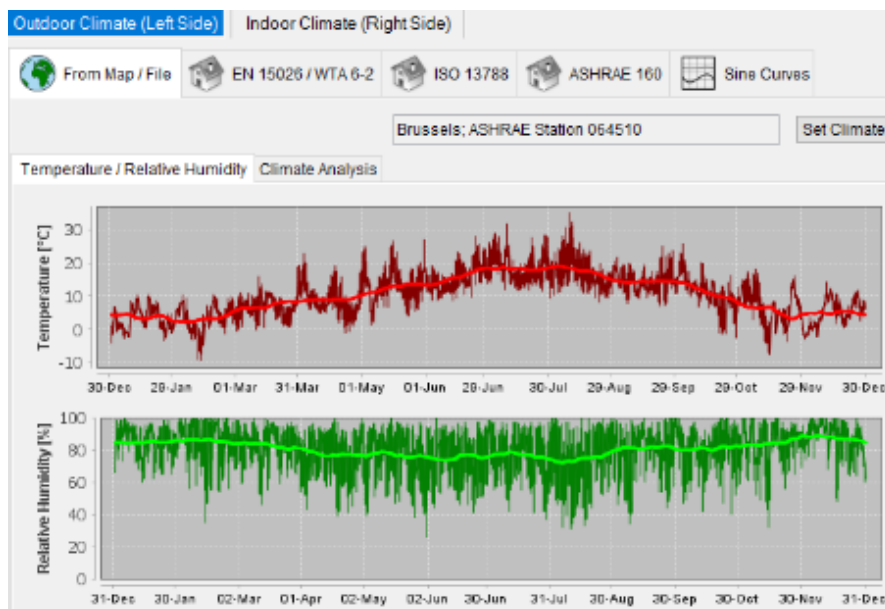
De berekeningsperiode (zie Figuur 64) wordt genomen vanaf de plaatsing van de wanden tot na het uitvoeren van de metingen. Deze periode wordt geschat te beginnen op 1 november 2014 tot 1 november 2016.

Calculation Period / Profiles		Numerics	
Start & End / Profiles			
Calculation	Profiles	Date	Hour
Start	Profile 1	1-11-2015	00:00:00
End	Profile 2	1-11-2016	00:00:00
		1-12-2016	00:00:00
Time Steps [h]		1	

Figuur 64: Berekeningsperiode

f) Buitenklimaat (linkerzijde)

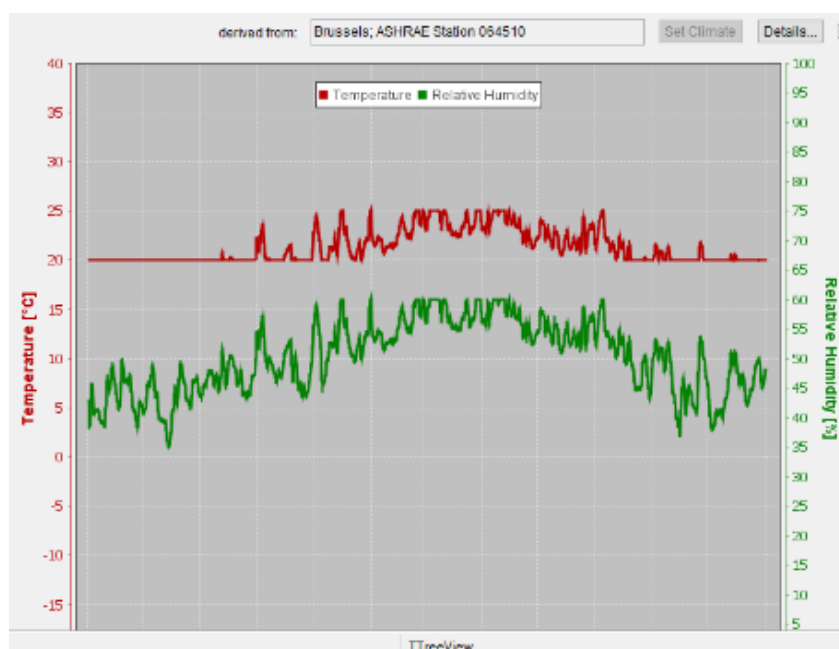
Voor het simuleren van het buitenklimaat in België kan er gekozen worden uit 3 mogelijkheden. Namelijk Oostende, Brussel en Saint Hubert. Er wordt gekozen voor Brussel (zie Figuur 65) omdat deze temperaturen het meeste overeenstemmen met de gemeten temperaturen aan de buitenzijde van de woning.



Figuur 65: Buitenklimaat

g) Binnenklimaat (rechterzijde)

Het binnenklimaat wordt door het programma zelf gegenereerd en afgeleid van het gekozen buitenklimaat (zie Figuur 66).



Figuur 66: Binnenklimaat

Het stappenplan voor wand B en wand C zijn identiek aan deze van wand A. De verschillen tussen de wanden zijn naar dikte van de kalkhennep en de oriëntatie toe (zie Tabel 18).

Tabel 18: Samenvatting gegevens wand A, B en C

Wand	A	B	C
<i>Metselwerk</i>	<i>Wienerberger solid brick (40 cm)</i>		
<i>Kalkhennep</i>	30 cm	10 cm	22 cm
<i>Kalkpleister</i>	<i>Stucco kalkpleister (2 cm)</i>		
<i>Oriëntatie</i>	noord-west	zuid-west	noord-west

In de gehanteerde *softwareversie* worden ééndimensionale simulaties weergegeven. Hierbij kan er geen rekening worden gehouden met de hoogte waarop de sensoren in realiteit worden gestoken in de wanden. Ook hoeken in binnenruimtes worden genegeerd. Daarnaast kan de vochtproductie in de ruimte zelf niet worden gekozen. Tenslotte worden ook luchtinfiltratie en exfiltratie (zie 1.1.3) niet in rekening gebracht.

2.3 Samendrukbaarheid en densiteit

2.3.1 Aanmaak mengsels

Binnen dit onderzoek worden mengsels aangemaakt op 19 oktober, dit volgens vier verschillende samenstelling, namelijk:

- samenstelling 1: volgens Leemniscaat⁹ met beperkte hoeveelheid additief (NHL 3.5);
- samenstelling 2: volgens Leemniscaat zonder additief (meer supercalco 97);
- samenstelling 3: volgens Marion Wright¹⁰, met een grote hoeveelheid additief (NHL 3.5) en water;
- samenstelling 4: volgens Leemniscaat, met een beperkte hoeveelheid additief (Hempad+, Wolf Jordan [20]).

Samenstellingen 1,2 en 4 volgens het Leemniscaat worden aangemaakt op basis van gewichts- en volumepercentages volgens Tabel 19.

Tabel 19: Gewichts- en volumepercentages volgens Leemniscaat

	Gewicht	Volume
<i>Prohemp</i>	39,13 %	79,40 %
<i>Supercalco 97</i>	27,17 %	12,25 %
<i>H₂O</i>	32,61 %	7,94 %
<i>NHL 3.5/ Hempad+</i>	1,09 %	0,41 %

Voor samenstelling 2 wordt de hoeveelheid aan NHL 3.5 dat wegvalt bij opgeteld met de hoeveelheid aan Supercalco 97. Enkel voor samenstelling 4 wordt Hempad+ gebruikt zoals hierboven vermeld.

Samenstelling 3 volgens Marion Wright wordt aangemaakt op basis van gewichts- en volumepercentages volgens Tabel 20 (zie ook 1.3.3 – Modece Architects - Marion Wright).

Tabel 20: Gewichts- en volumepercentages volgens Marion Wright

	Gewicht	Volume
<i>Prohemp</i>	22,77 %	64,71 %
<i>Supercalco 97</i>	22,36 %	14,12 %
<i>H₂O</i>	41,41 %	14,12 %
<i>NHL 3.5</i>	13,46 %	7,06 %

⁹ Het Leemniscaat is een bedrijf dat werkt met materialen die 100 % bio-ecologisch zijn, verder zijn ze gespecialiseerd in het bezetten en decoreren met leem, kalk, hennep en stro [13].

¹⁰ Marion Frances Wright was een studente aan de Universiteit van Oost-Londen en behaalde een master in de architectuur [17]. In haar masterproef voerde ze een onderzoekende vergelijking tussen kalkhennep en minerale wol.

De gewichts- en volumeverhouding worden bekomen door rekening te houden met volgende densiteiten:

Supercalco 97 ¹¹ :	$\approx 540 \text{ kg/m}^3$ [17]
Prohemp ¹² :	$\approx 110 \text{ à } 120 \text{ kg/m}^3$ [36]
NHL 3.5 ¹³ :	$\approx 650 \text{ kg/m}^3$ [75]
Water:	$\approx 1000 \text{ kg/m}^3$

2.3.1.1 Volgorde van aanmaak samenstelling

Voor het aanmaken van iedere samenstelling wordt dezelfde procedure gehanteerd. De volgorde van deze procedure wordt verduidelijkt aan de hand van volgend stappenplan:

- a) Afwegen van de hennep door middel van een weegschaal tot op 0,1 gr. nauwkeurig (zie Figuur 67 links);
- b) Correcte hoeveelheid hennepvezels plaatsen in een metselkuip;
- c) Afwegen van het water door middel van een weegschaal tot op 0,1 gr. nauwkeurig;
- d) Ongeveer 1/2 van de hoeveelheid afgewogen water aanbrengen in de metselkuip;
- e) Handmatig vermengen van de hennep met het aangebrachte water (≈ 3 min.);
- f) Afwegen van de hydraat- en hydraulische kalk door middel van een weegschaal tot op 0,1 gr. nauwkeurig;
- g) Beide kalken aanbrengen en handmatig vermengen met het voorlopige mengsel (≈ 3 min.);
- h) Resterend water aanbrengen en de toegevoegde substanties gedurende 5 minuten handmatig vermengen tot één (samenhangend) geheel (zie Figuur 67 rechts).

¹¹ SuperCalco 97 van Carmeuse is een hydraatkalk speciaal voor kalkhennepbouw [83].

¹² Prohemp® is een natuurlijk isolatieproduct van het Belgisch bedrijf ChanvrEco dat innoveert in de sector van duurzaam bouwen [34].

¹³ "De witte puur natuurlijke hydraulische kalk van Saint-Astier wordt geproduceerd door het branden en blussen van een uitzonderlijke krijt- en silicahoudende kalksteen, zonder enige toevoeging" [75]



Figuur 67: Afwegen en vermengen van de substanties

2.3.1.2 Bekisting en verdichtingsmethode

Na de aanmaak van de samenstelling worden deze handmatig in kubusvormige mallen aangebracht. Deze zijn vervaardigd uit plastic (polyethyleen) en beschikken over een ontkistingsgat met stop, dit zodat door middel van luchtcompressie het specimen achteraf makkelijk uitgehaald kunnen worden. Vooraleer het mengsel aangebracht wordt in de mal wordt er binnenin een plasticfolie aangebracht. Aangezien deze mallen voornamelijk geschikt zijn voor beton (zeer vaste materie), zorgt het plastic ervoor dat de kalkhennep (eerder losse materie) later makkelijker ontkist kunnen worden.

Er worden twee types kusvormige mallen gebruikt tijdens dit onderzoek, namelijk kubussen met zijdes van 100 mm (type C232 van Macben [23]) en 150 mm (type C230 van Macben [23]) (zie Figuur 68).



Figuur 68: Kubusvormige mallen zijden 150 mm (links) en 100 mm (rechts)

De mengsels worden handmatig in de mal en binnen de plasticfolie aangebracht. Aangezien er tot op heden nog geen verdichtingsmethode bestaat voor kalkhennep wordt het mengsel op eigen manier verdicht. Er wordt binnen dit onderzoek onderscheid gemaakt tussen het 'los' en 'vast' verdichten (zie Figuur 69) van het mengsel in de mal, namelijk:

- los wilt zeggen dat het mengsel aangebracht wordt in grotere lagen (≈ 2 à 3 cm) en zeer lichtjes (vingers) aangedrukt wordt aan de kanten en in het midden;
- bij het vast verdichten wordt het mengsel in kleinere lagen (≈ 1 cm) aangebracht en intenser aangedrukt (vingers en vuist) aan zowel de kanten als in het midden.



Figuur 69: Los (links) en vast (rechts) verdichten mengsel in de mal

2.3.1.3 Droogproces

Na het aanbrengen en verdichten van de mengsels in de kubusvormige mallen worden deze monsters gedroogd in open lucht in een ruimte waar de temperatuur gemiddeld $14,80^{\circ}\text{C}$ en de relatieve vochtigheid $68,50\%$ bedraagt. Deze droogperiode vindt plaats in de herfst, namelijk van de maand oktober (19/10) tot november (16/11) en duurt 28 dagen tot de drukproef. Na deze 28 dagen droogtijd worden de monsters ontkist en gedurende 24 uur in een droogoven (zie Figuur 70) op 50°C geplaatst.



Figuur 70: Droogoven

2.3.1.4 Densiteit

Nadat de monsters gedroogd worden in de droogoven kunnen de drukproeven starten. Vooraleer deze starten wordt een densiteit (kg/m^3) per monster en uiteindelijk per type kalkhennep samenstelling bepaald. Dit door elke monster afzonderlijk te wegen (kg) en de gekende volumes (m^3) per type mal vast te stellen.

2.3.2 Drukproeven

Voor de drukproeven wordt een druk- en buigbank van *Matest* type C090-03N gebruikt (tot 150 kN). Deze beschikt over een gemotoriseerde pomp met automatische sturing via het *Servo-Plus evolution unit* (zie Figuur 71) [76]. Verder voldoet deze aan de EN NBN en NEN- normen: ISO 7500 [76].



Figuur 71: Druk- en buigbank voor het drukken van de monsters [76]

Voor de druktest worden volgende parameters ingegeven:

- snelheid: 0,020 kN/sec.,
- startbelasting: 0,080 kN,
- stopbelasting: 90 %,
- oppervlakte: 10000 mm^2 .

Verder kan de verplaatsing visueel (wegens geen sensor) bepaald worden na het drukken van de monsters indien er geen breuk plaatsvond. Daarnaast wordt de elasticiteitsmodulus van de monsters niet bepaald wegens kleine spanningen en te grote vervormingen van de monsters.

2.4 Absorptietest

Voor het bepalen van het absorptiegehalte van de samenstellingen worden er twee testen uitgevoerd. De eerste test is een korte absorptietest toegepast op verschillende samenstellingen en verschillende groottes van kubussen, de tweede test is een langere test uitgevoerd op één samenstelling met telkens kleine kubussen.

2.4.1 Test 1: korte absorptietest

Voor de korte absorptietest worden dezelfde samenstellingen (aanmaakdatum: 19/10) aangehouden als die voor de samendrukbaarheid (zie 2.3.1). De gebruikte monsters ondergingen dezelfde droogprocedure (28 dagen) als uitgelegd in 2.3.1 - Droogproces. Voor deze test worden er 9 monsters gebruikt (zie Tabel 21). Nadat deze uit droogoven komen worden deze droog gewogen.

Tabel 21: Gebruikte monsters voor de handmatige test

Samenstelling	Monster	Afmeting [cm]
1	5	10 x 10 x 10
2	1	15 x 15 x 15
2	5	10 x 10 x 10
3	1	15 x 15 x 15
3	5	10 x 10 x 10
4	2	15 x 15 x 15
4	3	10 x 10 x 10
4	4	10 x 10 x 10
4	5	10 x 10 x 10

De test bestaat eruit om ieder monster om de beurt gedurende 20 seconde lang onder water te dompelen in een emmer (zie Figuur 72). Hierna worden om de 10,15, 60, 180 (3u), 1440 (24u), 9858 (≈ 164 u of ≈ 7 dagen) en 11320 (≈ 189 u of ≈ 8 dagen) minuten de monsters om de beurt in dezelfde volgorde gewogen.



Figuur 72: Onderdompelen van monster in emmer water

2.4.2 Test 2: lange absorptietest

Voor deze test worden er twee monsters ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) op 18 november aangemaakt van samenstelling 1 (S1.5 - vast en S1.1- los). Het eerste monster dat deze test ondergaat is vast verdicht, het tweede monsters is los verdicht (uitleg zie 2.3.1 - Bekisting en verdichtingsmethode). Voor aanvang van de test hebben deze monsters 5 dagen gedroogd ($T_{\text{gem}}: \approx 14,80 \text{ }^\circ\text{C}$ en $RV_{\text{gem}}: \approx 68,50 \%$) en worden deze hierna gedurende 24 uren gedroogd in een droogoven ($T: 75 \text{ }^\circ\text{C}$).

Nadat deze uit droogoven komen, worden deze droog gewogen en startte de test op 24 november. Vervolgens wordt het eerste monster in een korf ($\varnothing 200 \text{ mm}$) met maaswijdte 3,35 mm geplaatst (zie Figuur 73 b). Op het monster wordt een ballast (2003 gram) geplaatst om het opdrijven tegen te gaan. Hierna wordt deze aan de haak van het drijfvermogen balans systeem gehangen (zie Figuur 73 a). Vanaf nu kan er computergestuurd een Excel geactiveerd worden die het gewicht om de minuut uitleest. Na de start van de gewichtsmeting wordt door middel van een in hoogte verstelbaar platform het waterreservoir omhooggehaald (zie Figuur 73 c) en het monster onder water gedompeld.



Figuur 73: a) drijfvermogen balans systeem, b) korf en c) onderdompelen korf

Deze test wordt uitgevoerd totdat $\Delta \text{massa} \approx 0,1 \%$. Dit om de exacte hoeveelheid aan absorptiegehalte te kunnen bepalen.

Het tweede monster onderging dezelfde methode als hierboven uitgelegd, alleen start deze test op 30 november.

2.5 Capillariteitstest

Voor deze test worden twee identieke proeven uitgevoerd, maar telkens met verschillende monsters. De eerste proef wordt uitgevoerd met monsters van samenstelling 1 en 3 om een vergelijking te kunnen maken tussen het Leemniscaat en Marion Wright. Bij de tweede test worden monsters hergebruikt om de test te herhalen en deze te kunnen vergelijken met de eerste test.

2.5.1 Monsters proef 1

Voor de eerste proef worden vier verschillende monsters ($15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$) aangemaakt op 16 november en drogen deze gedurende 7 dagen in open lucht. Hierna, op 23 november, worden deze gedurende 24 uren gedroogd in een droogoven ($T: 75 \text{ }^\circ\text{C}$). De vier monsters hebben volgende samenstelling:

- samenstelling 1: losse verdichting (S1.1),
- samenstelling 1: vaste verdichting (S1.2),
- samenstelling 3: losse verdichting (S3.1),
- samenstelling 3: vaste verdichting (S3.2).

2.5.2 Monsters proef 2

Voor de tweede proef wordt één monsters van samenstelling 1 (S1.4-los) aangemaakt op 18 november en droogt deze gedurende 5 dagen in open lucht. Hierna, op 23 november, worden deze gedurende 24 uren gedroogd in een droogoven ($T: 75 \text{ }^\circ\text{C}$). Twee monsters (S2.1 – $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ en S4.4 – $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) van de eerste absorptietest worden gerecupereerd voor het uitvoeren van deze proef. Het vierde monster ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) wordt bekomen van een Isohemp¹⁴ blok. Deze is bij aanmaak geperst en gehard geweest waardoor deze zeer vast verdicht en droog was.

¹⁴ De hennep blok bestaat uit 9 % luchtkalk, 11 % hydraulische kalk en voor 80 % uit hennep [37]. Verder wordt deze gegoten, geperst, gehard en in open lucht gedroogd zonder extra warmte-inbreng [37].

2.5.3 Proefopstelling

Figuur 74 geeft de proefopstelling weer voor proef 1, voor proef 2 geldt dezelfde opstelling. De vier monsters per proef worden telkens in een bijhorende ovenschaal op tafel geplaatst.



Figuur 74: Proefopstelling 1 capillariteit test

Elke ovenschaal per monster wordt gevuld met evenveel water (≈ 1143 g) en de hoogte van de waterstand wordt per schaal opgemeten. Hierna wordt het water aangelengd met methyleenblauw, dit is een kleurstof voor het aankleuren van het kalkhennepmengsel.

Om de capillariteit van ieder mengsel in kaart te brengen, wordt er gebruik gemaakt van camera materiaal (*iPad* met opzetlens). Aan iedere kant van de tafel wordt een camera op statief geplaatst (zie Figuur 74). Hierna wordt door middel van de applicatie *iMotion* op de *iPad* gelijktijdig een filmrol gestart.

Proef 1 start op 24 november om 11:40 u en eindigt op 25 november om 12:15 u (≈ 24 u later). Hierna start proef 2 op 25 november om 13:55 u en eindigt deze op 30 november om 11:15 u (≈ 117 u later).

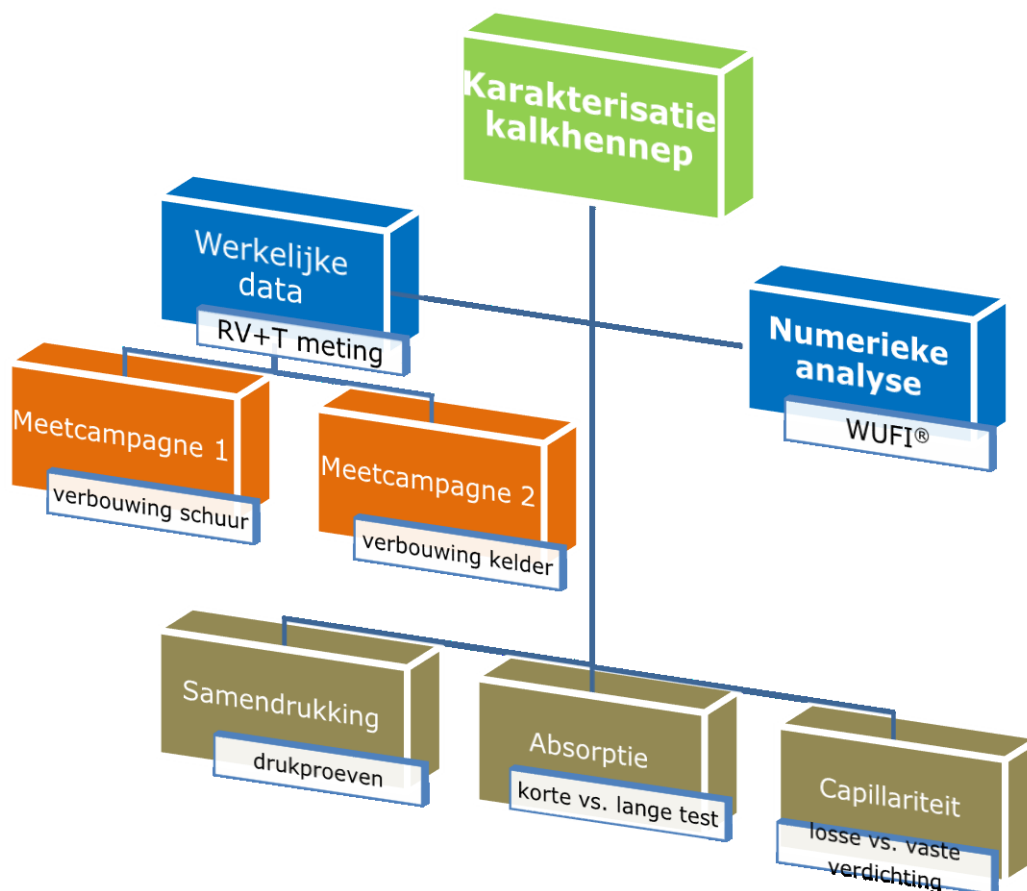
2.6 Overzicht

Figuur 75 geeft het overzicht weer van het onderzoek. Het onderzoek begint met het verzamelen van werkelijke data aan de hand van *in situ* metingen. Hierbij wordt er enerzijds een meetcampagne gevoerd op een verbouwing van een bestaande schuur en anderzijds een bijkomende meetcampagne op een verbouwing van een bestaande kelder.

Vervolgens wordt een numerieke analyse uitgevoerd met behulp van WUFI®. Op deze manier kan de werkelijke data vergeleken worden met gesimuleerde data. Hierdoor is het mogelijk om eventuele afwijkingen vast te stellen en te verklaren.

Hierna zijn er drukproeven uitgevoerd op zelfgemaakte monsters die verschillen in samenstelling om zo de samendrukbaarheid van kalkhennep te onderzoeken. Hierbij wordt er geen rekening gehouden met verdichtingswijze van de monsters.

De overgebleven monsters van de drukproeven zijn getest op absorptie. Deze worden gebruikt voor het absorberend vermogen te bepalen op korte tijd (≈ 20 sec.). Verder worden er nieuwe monsters aangemaakt bestaande uit dezelfde samenstelling, maar verschillend in verdichtingswijze (zie 2.3.1). Hiervan worden er twee gebruikt om het absorberend vermogen te bepalen op lange tijd ($\approx$ één week). De andere monsters worden gebruikt voor de capillariteitstest waarbij er een vergelijking wordt gemaakt tussen de verdichtingswijze.



Figuur 75: Overzicht methodologie

3 Resultaten

3.1 *In situ* metingen

Zoals uitgelegd in 2.1 zijn er metingen uitgevoerd op twee verbouwingen waarvan de kalkhennepwanden verschillen in uitdrogingstijd. De metingen gebeurd door middel van een hygro-thermometer waarvan de sensor aangebracht wordt op verschillende dieptes in de wand.

Binnen dit hoofdstuk worden de resultaten van het temperatuur- en relatieve vochtigheid verloop in de kalkhennepwanden per verbouwing weergegeven aan de hand van grafieken. Ook wordt het binnen- en buitenklimaat in rekening gebracht in de grafiek (enkel verbouwing 1). Aangezien de sonde niet doorheen de buitenmuur (metselwerk) geraakt, kan het verloop hier niet in kaart worden gebracht.

Doordat de metingen gebaseerd worden op een *real-life* scenario met eigen klimatologische omstandigheden en bouwkenmerken kunnen de bekomen resultaten van deze studie alleen gebruikt worden om andere experimenten te ondersteunen en/of te verbeteren.

3.1.1 Meetcampagne verbouwing 1

Binnen deze verbouwingen worden de resultaten van drie kalkhennepwanden besproken die variëren in isolatiedikte en positie (zie ook 2.1.2). Voor iedere isolatiedikte worden er op drie verschillende dieptes de relatieve vochtigheid en temperatuur gemeten gedurende een bepaalde periode.

Zoals uitgelegd in 2.1.2 moet de sonde herstoken worden, hierdoor wordt de data per diepte op een opeenvolgend tijdstip gemeten per wand (zie meetcampagne). In volgende grafieken wordt het tijdsverschil in datum per wand verwaarloosd (aanneme). Dit aangezien er op hetzelfde tijdstip per dag voor iedere meting weinig verschil zal zijn in temperatuur en relatieve vochtigheid.

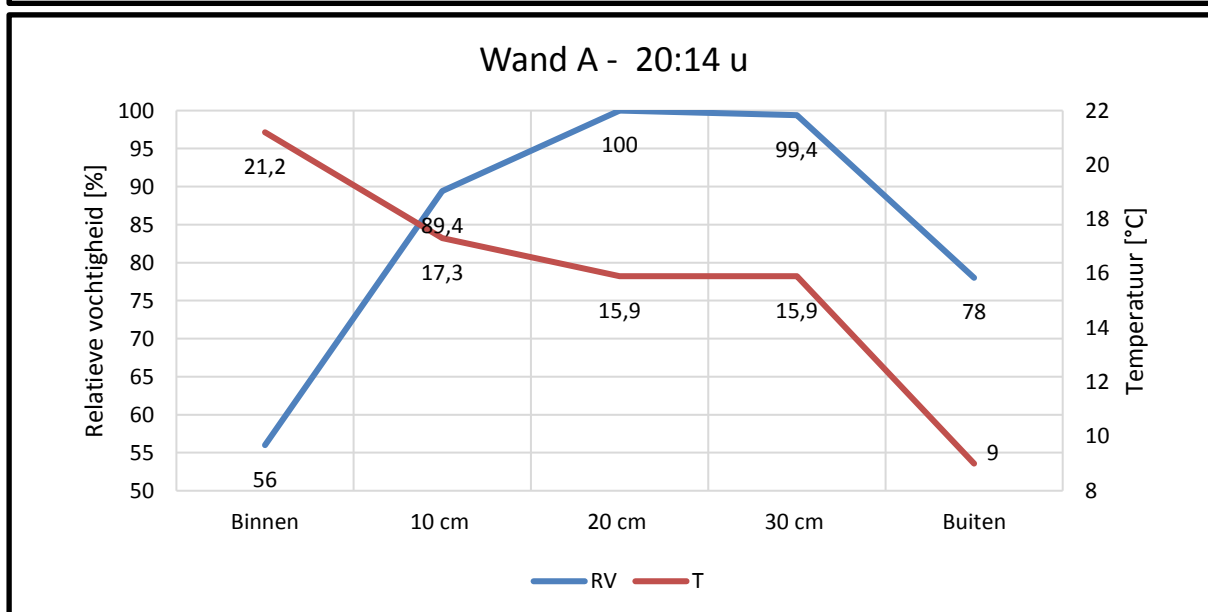
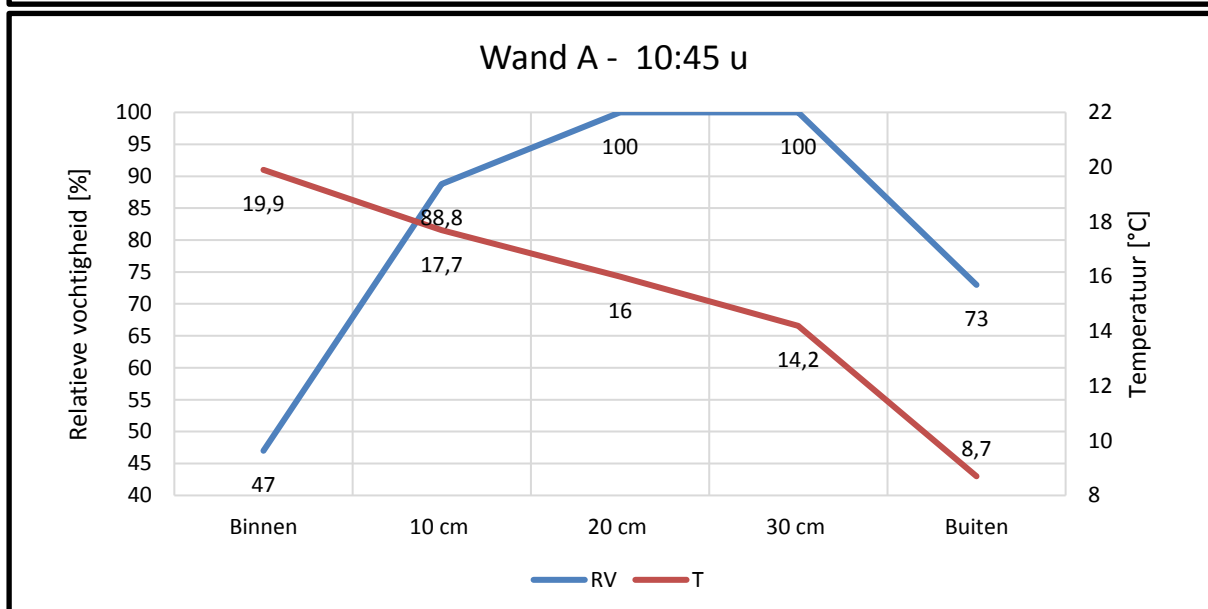
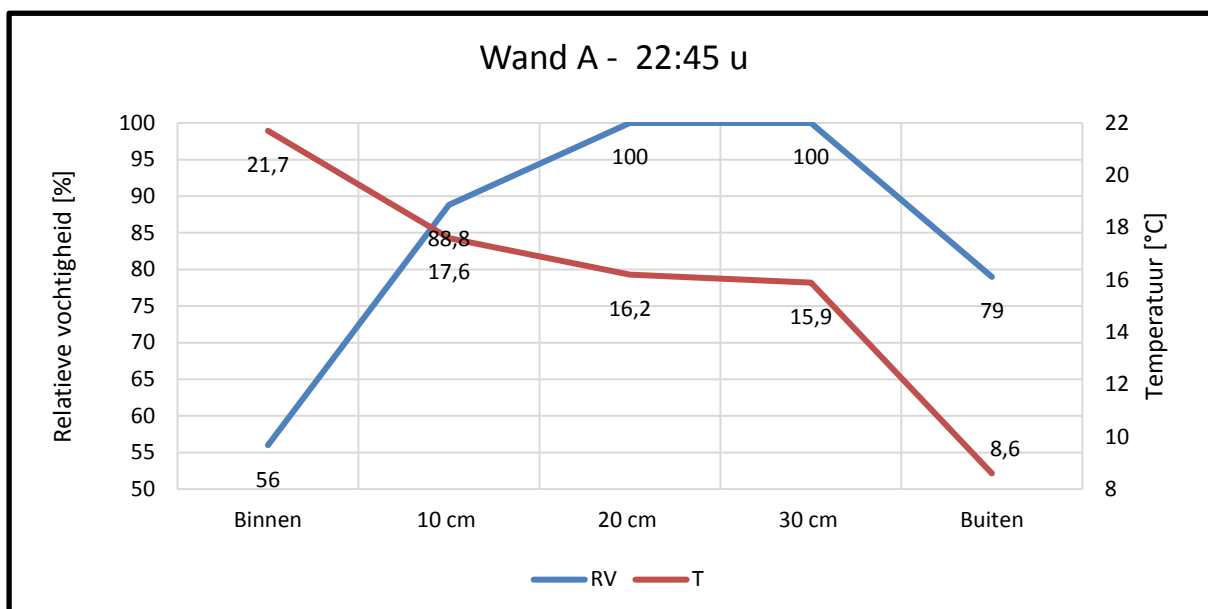
3.1.1.1 Wand A – 30 cm (Meetperiode: 17/10/2016 t.e.m. 21/10/2016)

Het temperatuur- en relatieve vochtigheid verloop binnen deze wand wordt bepaald op drie verschillende tijdstippen, namelijk op 22:45 u, 10:45 (12 u later) en op 20:14 ($\approx$ 21,5 u later). Deze tijdstippen zijn uiteenlopend om zo het verschillend klimaat doorheen de dag in rekening te brengen.

Figuur 76 geeft de resultaten van het temperatuur- en relatieve vochtigheid verloop weer in een grafiek doorheen wand A op de drie bovenvermelde tijdstippen (metselwerkwand verwaarloosd). Voor deze kalkhennepwand worden er metingen uitgevoerd op 10, 20 en 30 cm diepte zoals de grafieken weergeven.

Figuur 76 geeft weer dat de relatieve vochtigheid (RV - blauwe lijn) op de drie tijdstippen in de binnenomgeving (47 tot 56 %) beduidend lager is dan in de kalkhennepwand (88,8 tot 100 %) zelf. Hoofdzakelijk ter hoogte van een diepte van 20 tot 30 cm in de isolatie ontstaat er 100 % RV in de kalkhennep. De vochtigheid buiten schommelt tussen 73 en 79 % voor de drie tijdstippen en is dus ook lager als deze in de kalkhennepwand.

De temperatuur (T - rode lijn) binnen schommelt tussen 19,9 en 21,7 °C voor drie tijdstippen. De drie grafieken vertonen op een diepte van 10 cm gelijkaardige temperaturen ($\approx 17,5$ °C). Voor grafiek a en c is het temperatuurverloop vanaf 20 cm in de kalkhennepwand quasi constant (≈ 16 °C). Grafiek b vertoont eerder een lineair verloop doorheen de wand, gaande van 17,7 °C (10 cm diepte) tot 14,2 °C (30 cm diepte). De metingen van deze wand lopen van 17/10/2016 tot en met 21/10/2016, gedurende deze periode heerst er door de dag een buitentemperatuur van 8 à 9 °C.



Figuur 76: Temperatuur- en relatieve vochtigheid doorheen wand A

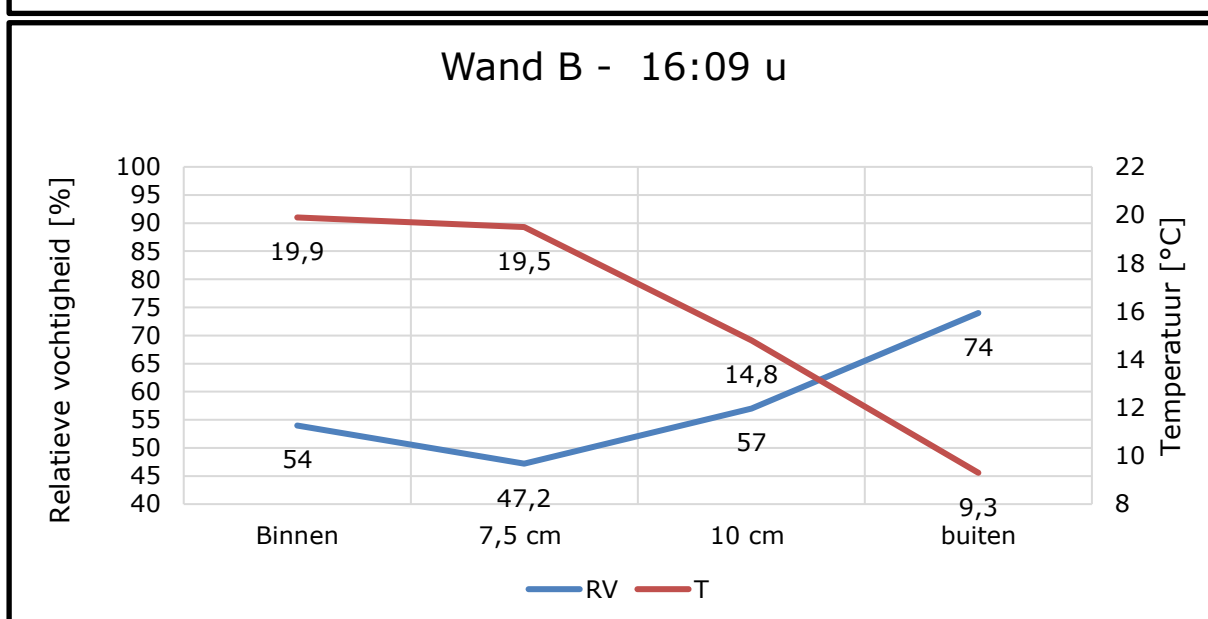
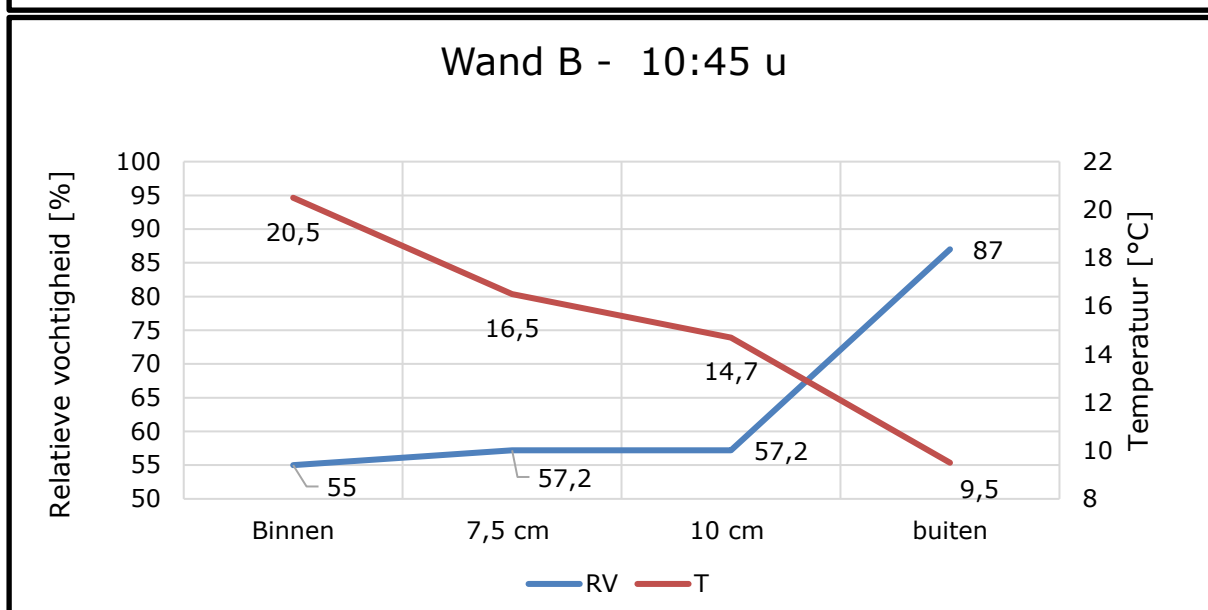
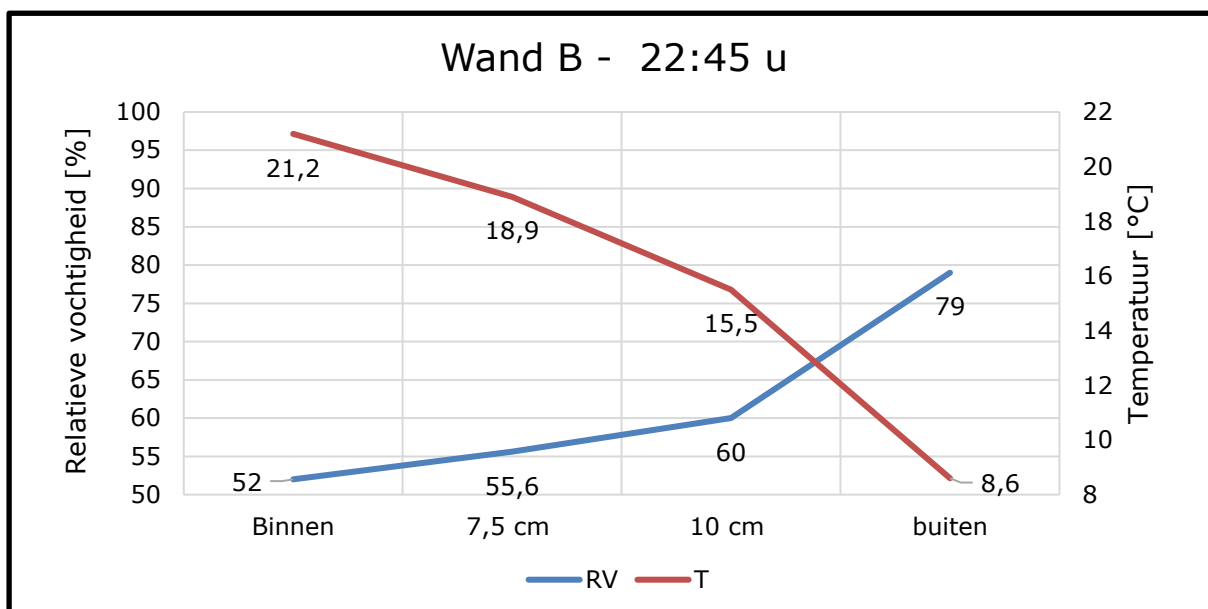
3.1.1.2 Wand B – 10 cm (Meetperiode: 21/10/2016 t.e.m. 24/10/2016)

Voor deze wand wordt het temperatuur- en relatieve vochtigheid verloop bepaald op drie verschillende tijdstippen, namelijk op 22:45 u, 10:45 (12 u later) en op 16:09 ($\approx$ 17,5 u later). Deze tijdstippen zijn uiteenlopend om zo het verschillend klimaat doorheen de dag in rekening te brengen.

In Figuur 77 worden de resultaten van het temperatuur- en relatieve vochtigheid verloop doorheen wand B op de drie bovenvermelde tijdstippen weergegeven (metselwerkwand verwaarloosd). Voor deze kalkhennepwand worden er metingen uitgevoerd op 7,5 en 10 cm diepte zoals de grafieken weergeven.

Figuur 77 geeft weer dat de relatieve vochtigheid (RV - blauwe lijn) voor grafiek a en b een gelijkaardig verloop kent. Namelijk neemt de vochtigheid lineair toe van binnen ($\approx$ 52 tot 55 %) naar een kalkhennepdikte van 10 cm ($\approx$ 57 tot 60 %), hierna stijgt deze voor beide sterk tot buiten (79 % voor a en 87 % voor b). Grafiek c toont een terugval in vochtigheid ter hoogte van een kalkhennepdikte van 7,5 cm ($\approx$ 47 %), hierna volgt een matig lineair verloop naar buiten tot 74 % relatieve vochtigheid. Op volledige kalkhennepdiepte (10 cm) schommelt de vochtigheid ongeveer rond 57 % voor de drie tijdstippen. Dit is op gelijkaardige diepte ten opzichte van wand A en C zeer laag.

De temperatuur (T - rode lijn) binnen is vrijwel constant voor de drie tijdstippen, deze varieert tussen 19,9 en 21,2 °C. Grafiek a en c vertonen op een diepte van 7,5 cm vrijwel dezelfde temperatuur ($\approx$ 19 °C), dit terwijl grafiek b eerder een lagere temperatuur (16,5 °C) vertoont. Verder is het temperatuurverloop gelijkaardig voor de drie grafieken, op volledige kalkhennepdikte (10 cm) schommelt de temperatuur tussen de 14,7 en 15,5 °C. Buiten heerst er een temperatuur van 8,5 à 9,5 °C.



Figuur 77: Temperatuur- en relatieve vochtigheid doorheen wand B

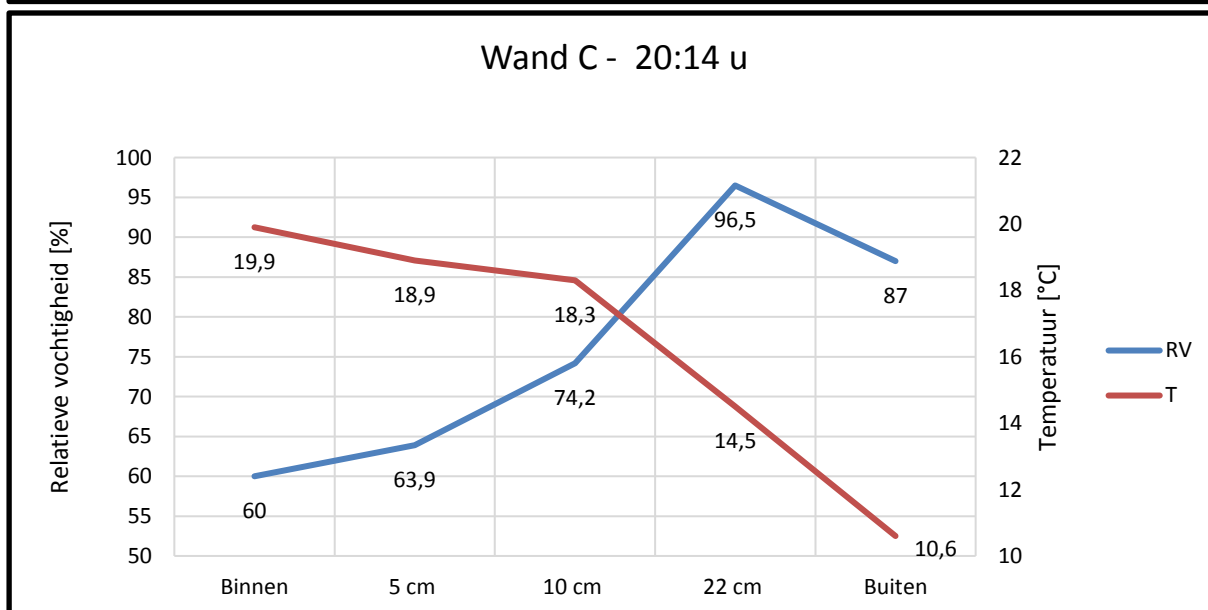
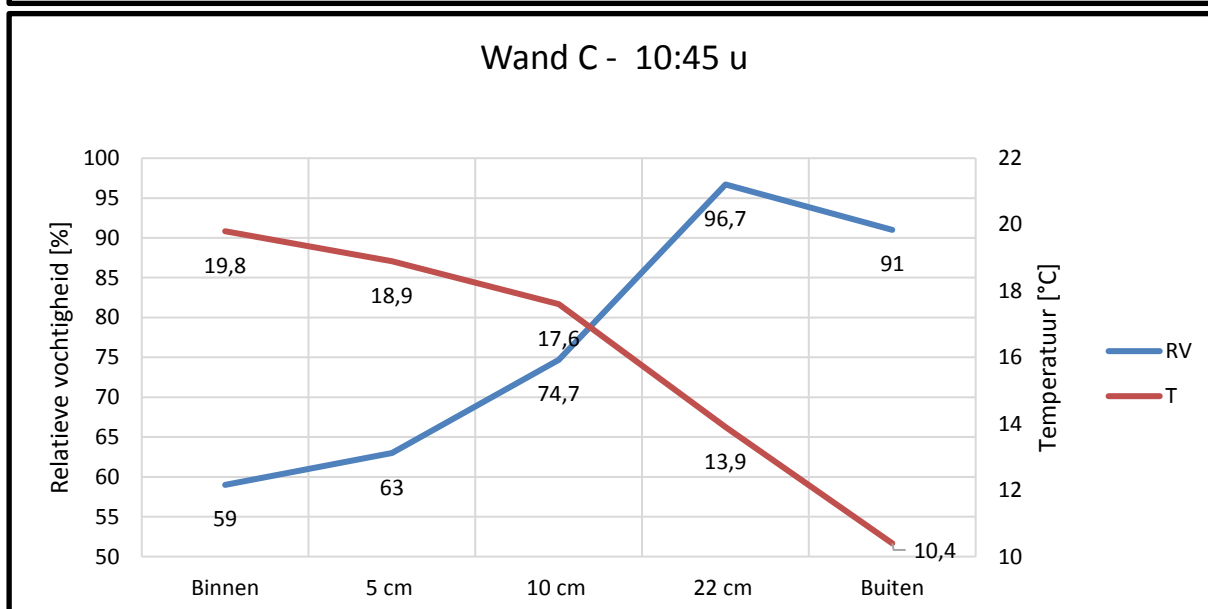
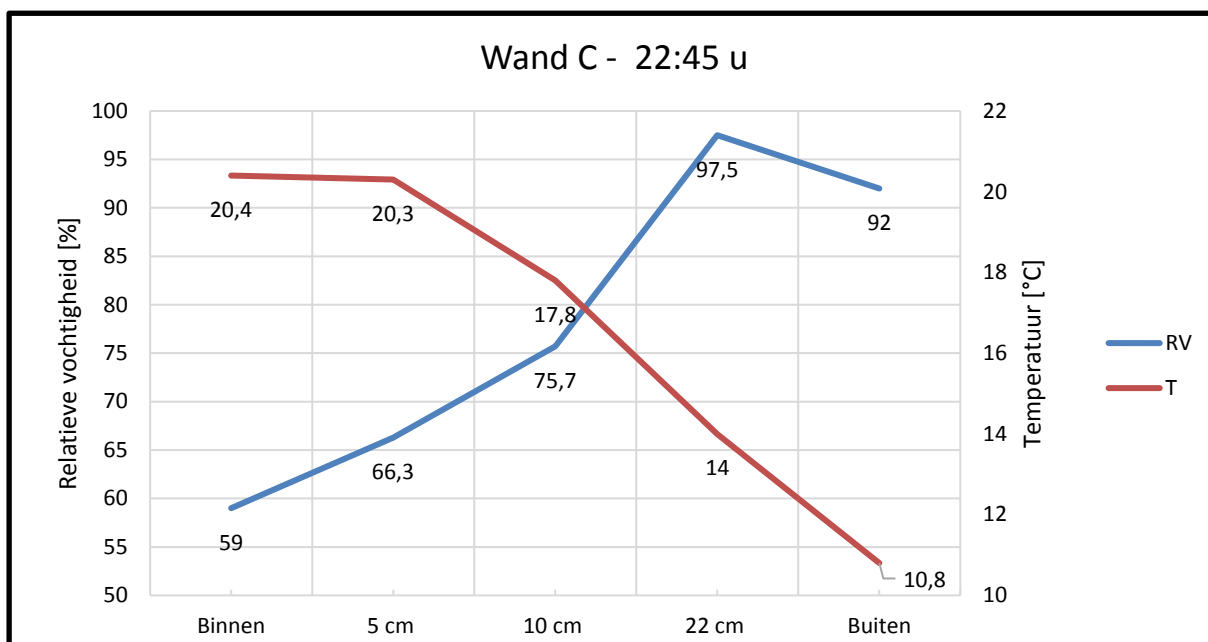
3.1.1.3 Wand C – 22 cm (Meetperiode: 24/10/2016 t.e.m. 2/11/2016)

Bij wand C zijn de tijdstippen (22:45 u, 10:45 en 20:14) voor het bepalen van de temperatuur- en relatieve vochtigheid verloop hetzelfde als die van wand A.

Figuur 78 geeft de resultaten weer van het temperatuur- en relatieve vochtigheid verloop doorheen wand C op de drie bovenvermelde tijdstippen (metselwerkwand verwaarloosd). Voor deze kalkhennepwand worden er metingen uitgevoerd op 5, 10 en 22 cm diepte zoals de grafieken weergeven.

Figuur 78 geeft weer dat de relatieve vochtigheid (RV - blauwe lijn) voor de drie grafieken een gelijkaardig verloop kent. Namelijk stijgt de vochtigheid sterk vanbinnen ($\approx 60\%$) tot op volledige kalkhennepdikte (22 cm) (96,5 tot 97,5 %), hierna daalt deze lichtjes tot buiten (91 en 92% voor b en a, 87 % voor c). Op kalkhennepdieptes van 5 en 10 cm worden respectievelijk vochtigheden van $\approx 64\%$ en $\approx 75\%$ gemeten voor de drie tijdstippen.

De temperatuur (T – rode lijn) binnen is vrijwel constant voor de drie tijdstippen, deze varieert tussen 19,8 en 20,4 °C. Het temperatuurverloop voor de drie grafieken is gelijkaardig, op dieptes van 5, 10, en 22 cm komen respectievelijke temperaturen van ongeveer 18,9 (a = 20,3 °C), 18 en 14 °C weer. De buitentemperatuur bedraagt in deze periode ongeveer 10,5 °C.



Figuur 78: Temperatuur- en relatieve vochtigheid doorheen wand C

3.1.1.4 Warmtegeleidbaarheid verbouwing 1

In dit hoofdstuk wordt de Glasermethode toegepast op de drie wanden uit de eerste verbouwing. Met behulp van deze methode kan de warmtegeleidingscoëfficiënt van kalkhennep worden berekend aan de hand van het warmtetransport. Het warmtetransport door middel van geleiding wordt empirisch bepaald volgens de eerste wet van Fourier, ook wel de geleidingswet genoemd [77]. Voor 2 punten op een kleine afstand d van elkaar wordt dit:

$$q = \lambda \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{d} \quad (18)$$

Met:

- q : de warmtestroomdichtheid door geleiding in het materiaal tussen de punten 1 en 2 in W/m^2 ;
- λ : de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal in W/mK ;
- θ_1 en θ_2 : de temperatuur in de punten 1 en 2 in $^{\circ}C$;
- d : de afstand tussen de punten 1 en 2 in m.

Uit bovenstaande formule volgt dat de warmtestroomdichtheid in elk punt van de wand constant is in grootte, richting en zin. Vervolgens kan de warmteweerstand R [m^2K/W] worden gedefinieerd als de verhouding tussen d en λ waaruit volgt dat:

$$q = \frac{\theta_i - \theta_e}{\sum_{t=1}^n R_t} \quad (19)$$

Met:

- q : de warmtestroomdichtheid door geleiding in het materiaal tussen de binnen- en buitenomgeving in W/m^2 ;
- θ_i en θ_e : de temperatuur in de binnen- en buitenomgeving in $^{\circ}C$;
- R_t : de totale warmteweerstand van de bouwschil in m^2K/W .

Wanneer een samengestelde wand wordt beschouwd bestaande uit verschillende lagen, kan de voorgaande formule worden omgevormd tot:

$$q = \frac{|\theta_e - T_{gem}|}{R_e + R_{mw}} \quad (20)$$

Met:

- q : de warmtestroomdichtheid door in het materiaal tussen de binnen- en buitenomgeving in W/m^2 ;
- $T_{gemeten}$ en θ_e : de temperatuur op de overgang tussen metselwerk en kalkhennep- en de temperatuur in de buitenomgeving in $^{\circ}C$;
- R_e en R_{mw} : de warmteweerstand van de overgang tussen buitenomgeving en het metselwerk en de warmteweerstand van het metselwerk in m^2K/W .

Tenslotte kunnen we formule 19 en 20 gelijkstellen aan elkaar en de gemeten temperatuur afzonderen zodat volgt dat:

$$T_{gem} = \theta_e + \frac{(\theta_i - \theta_e) \cdot (R_e + R_{mw})}{\sum_{t=1}^n R_t} \quad (21)$$

Met:

- $T_{gemeten}$: de temperatuur op de overgang tussen metselwerk en kalkhennep;
- θ_i en θ_e : de temperatuur in de binnen- en buitenomgeving in °C;
- R_e en R_{mw} : de warmteweerstand van de overgang tussen buitenomgeving en het metselwerk en de warmteweerstand van het metselwerk in m²K/W;
- R_t : de totale warmteweerstand van de bouwschil in m²K/W.

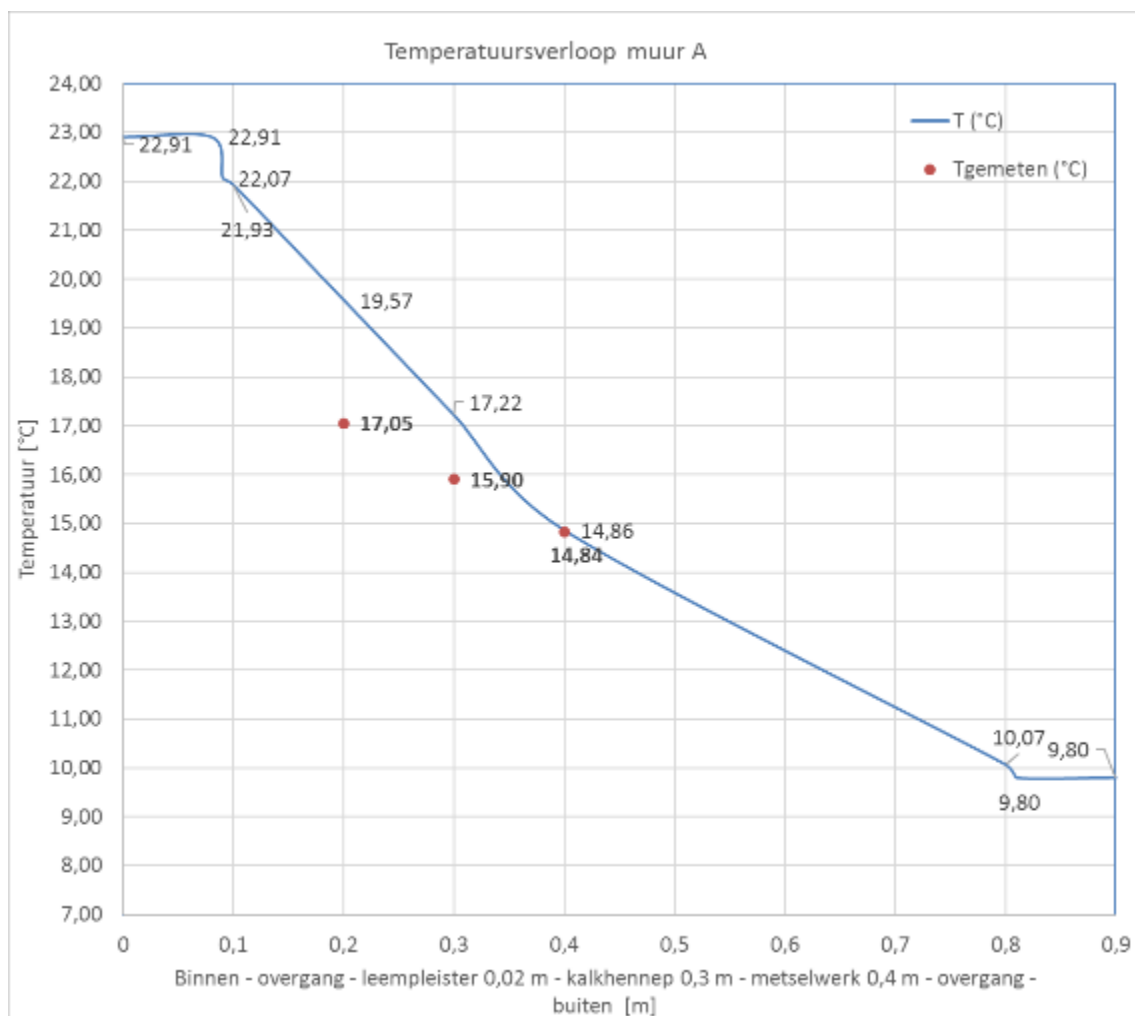
Bepalen van de warmtegeleidbaarheid – wand A

Aan de hand van de gemeten binnen-, buitentemperatuur en de temperatuur op de overgang tussen de kalkhennep en het metselwerk kan de warmtegeleidingscoëfficiënt worden afgeleid (zie Tabel 22, λ -waardes komen uit WUFI). Deze wordt door interpolatie bepaald totdat de berekende temperatuur overeenkomt met de gemeten temperatuur op de overgang tussen de kalkhennep en het metselwerk ($14,86 \approx 14,84$ °C). Met deze gevonden waarde van 0,29 W/mK worden dan de andere temperaturen berekend in de kalkhennep zelf. Tenslotte kunnen deze waardes worden vergeleken met de gemeten waardes in de kalkhennep. Er is hierbij duidelijk op te merken dat de berekende waardes van respectievelijk 19,57 en 17,22 °C niet overeenkomen met de gemeten waardes van respectievelijk 17,05 en 15,90 °C.

Tabel 22: Glasermethode wand A

Glasermethode					
Constructie	h, λ (W/mK)	d (m)	R (m²K/W)	T (°C)	$T_{gemeten}$ (°C)
binnen				22,91	22,91
overgang - leempleister	8		0,13	22,07	
leempleister- kalkhennep	0,91	0,02	0,02	21,93	
kalkhennep 10 cm diep	0,29	0,10	0,35	19,57	17,05
kalkhennep 20 cm diep	0,29	0,10	0,35	17,22	15,90
kalkhennep 30 cm diep	0,29	0,10	0,35	14,86	14,84
metselwerk - overgang	0,56	0,40	0,71	10,07	
buiten	25		0,04	9,80	9,80

De berekende waarden en gemeten waarden worden weergegeven in Figuur 79. De gemeten waarden zijn opvallend lager dan deze berekent met de Glasermethode.



Figuur 79: Glaser temperatuursverloop wand A

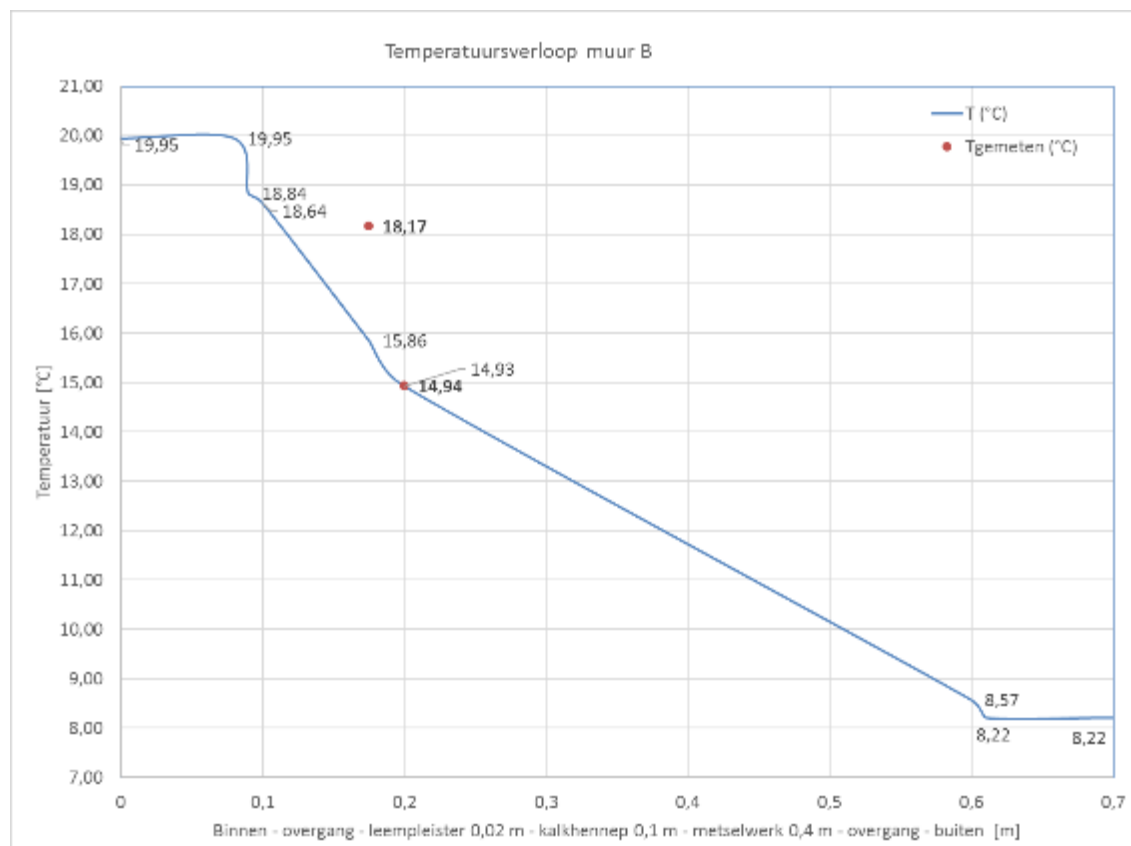
Bepalen van de warmtegeleidbaarheid – wand B

Op dezelfde manier kan ook bij wand B de warmtegeleidingscoëfficiënt bepaald worden door interpolatie tot de berekende en gemeten temperatuur op de overgang tussen de kalkhennep en het metselwerk overeenstemmen ($14,93 \approx 14,94$ °C) (zie Tabel 23). Met deze gevonden waarde van $0,24$ W/mK wordt dan de andere temperatuur berekend in de kalkhennep zelf. Tenslotte kan ook deze waarde weer worden vergeleken met de gemeten waarde in de kalkhennep. Er is ook hier weer duidelijk op te merken dat de berekende waarde van $15,86$ °C niet overeenkomt met de gemeten waarde van $18,17$ °C.

Tabel 23: Glasermethode wand B

Glasermethode					
Constructie	h, λ (W/mK)	d (m)	R (m ² K/W)	T (°C)	T _{gemeten} (°C)
binnen				19,95	19,95
overgang - leempleister	8		0,13	18,84	
leempleister - kalkhennep	0,91	0,02	0,02	18,64	
kalkhennep 7,5 diep	0,24	0,075	0,31	15,86	18,17
kalkhennep 10 cm diep	0,24	0,025	0,10	14,93	14,94
metselwerk - overgang	0,56	0,40	0,71	8,57	
Buiten	25		0,04	8,22	8,22

De berekende waarden en gemeten waarden van wand B worden weergegeven in Figuur 80. De gemeten waarde is bij wand B opvallend hoger dan deze berekent met de Glasermethode, dit in tegenstelling tot wand A waar de gemeten waarde lager is.



Figuur 80: Glaser temperatuursverloop wand B

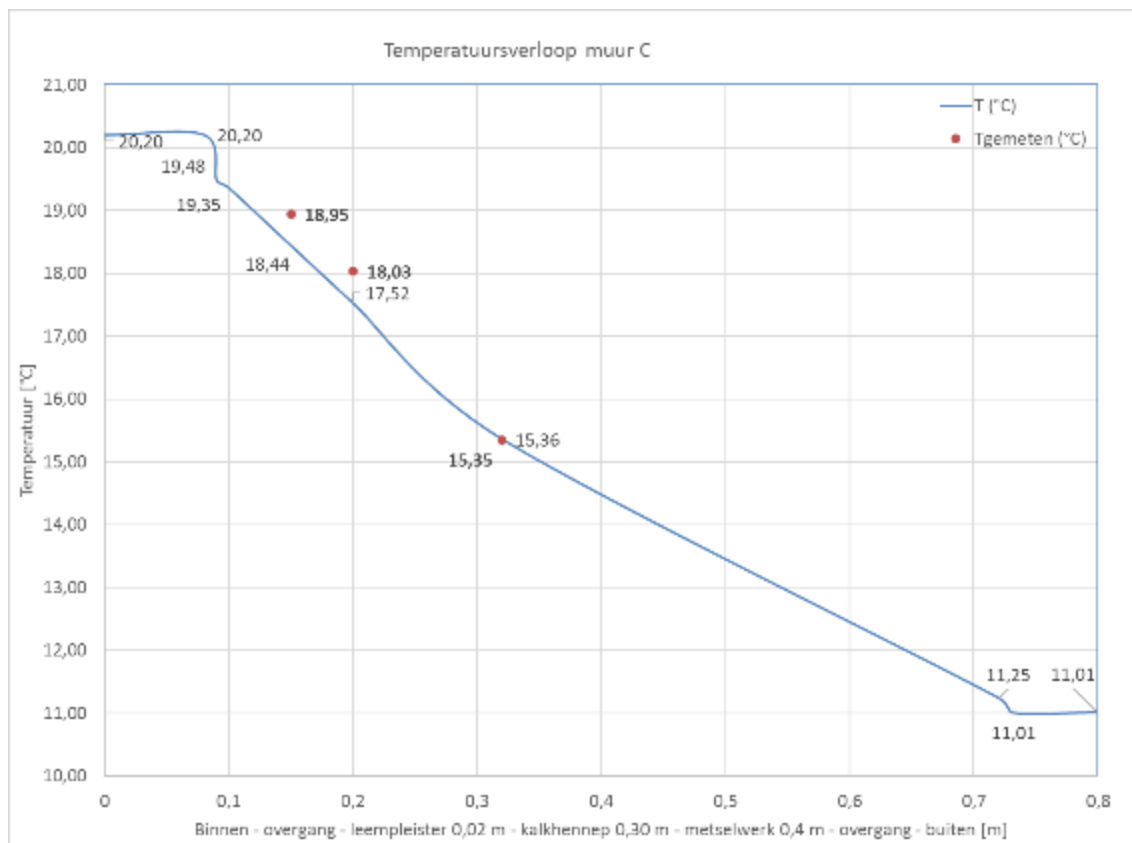
Bepalen van de warmtegeleidbaarheid – wand C

Op dezelfde manier kan ook bij wand C de warmtegeleidingscoëfficiënt bepaald worden door interpolatie ($15,36 \approx 15,35$ °C) (zie Tabel 24). Hierbij wordt een waarde van 0,32 W/mK gevonden. Er is hier, in tegenstelling tot de vorige wanden, duidelijk op te merken dat de berekende waarden van respectievelijk 18,44 en 17,52 °C goed overeenkomen met de gemeten waarden van respectievelijk 18,95 en 18,03 °C

Tabel 24: Glasermethode wand C

Glasermethode					
Constructie	h, λ (W/mK)	d (m)	R (m ² K/W)	T (°C)	T _{gemeten} (°C)
binnen				20,20	20,20
overgang - leempleister	8		0,13	19,48	
leempleister - kalkhennep	0,91	0,02	0,02	19,35	
kalkhennep 5 cm diep	0,32	0,05	0,16	18,44	18,95
kalkhennep 10 cm diep	0,32	0,05	0,16	17,52	18,03
kalkhennep 22 cm diep	0,32	0,12	0,38	15,36	15,35
metselwerk - overgang	0,56	0,40	0,71	11,25	
Buiten	25		0,04	11,01	11,01

De berekende waarden en gemeten waarden van wand C worden weergegeven in Figuur 81. De gemeten waarden bij wand C komen opvallend goed overeen met deze berekend met de Glasermethode, dit in tegenstelling tot wand A en wand B waar de gemeten waarden respectievelijk lager en hoger zijn.



Figuur 81: Glaser temperatuursverloop wand C

Vergelijking parameters Glaser versus WUFI®

Ten eerste wordt de warmtegeleidingscoëfficiënt vergeleken (zie Tabel 25). Hierbij kan worden opgemerkt dat de berekende waardes hoger zijn dan deze uit de *software*.

Tabel 25: Warmtegeleidingscoëfficiënt Glaser versus WUFI®

λ (W/mk) kalkhennep	Wand A	Wand B	Wand C
GLASER	0,29	0,24	0,32
WUFI	0,115	0,115	0,115

Ten tweede wordt de totale warmteweerstand vergeleken (zie Tabel 26). Hierbij kan worden opgemerkt dat de berekende waardes opvallend lager zijn dan deze uit de *software*.

Tabel 26: Warmteweerstand Glaser versus WUFI®

R_{tot} (m²K/W)	Wand A	Wand B	Wand C
GLASER	1,95	1,32	1,59
WUFI	3,28	1,59	2,60

Vervolgens kunnen deze waardes ook eens worden vergeleken met de warmtegeleidingscoëfficiënt van prohemp (zie Tabel 27). Hierbij kan er opgemerkt worden dat deze in grote mate verschillen met de gehanteerde waarde in de EPB-productgegevens databank.

Tabel 27: Warmtegeleidingscoëfficiënt Prohemp [78]

Merk	Product	Diktes (m)	λ_i (W/mK)	Erkenningsdatum
Chanvreco	Prohemp	0,1 – 0,5	0,054	10/10/2015 – 10/10/2017

Tenslotte worden er in Tabel 28 geleidingscoëfficiënten opgesomd uit andere studies. Hierbij zijn de coëfficiënten sterk afhankelijk van de samenstelling, verdichting en globale dichtheid van de kalkhennepwand. Zo hebben de wanden met een lage dichtheid een betere isolatiewaarde. Er is ook hier weer een groot verschil waar te nemen tussen de berekende waardes en de bekomen waardes uit andere studies.

Tabel 28: Warmtegeleidingscoëfficiënt uit literatuur

Onderzoeker	Densiteit (kg/m³)	λ_i (W/mK)
Cerezo [66]	200	0,06 – 0,10
Cerezo [66]	450	0,10 – 0,13
Pilkington [79]	463	0,072-0,099

3.1.2 Meetcampagne verbouwing 2

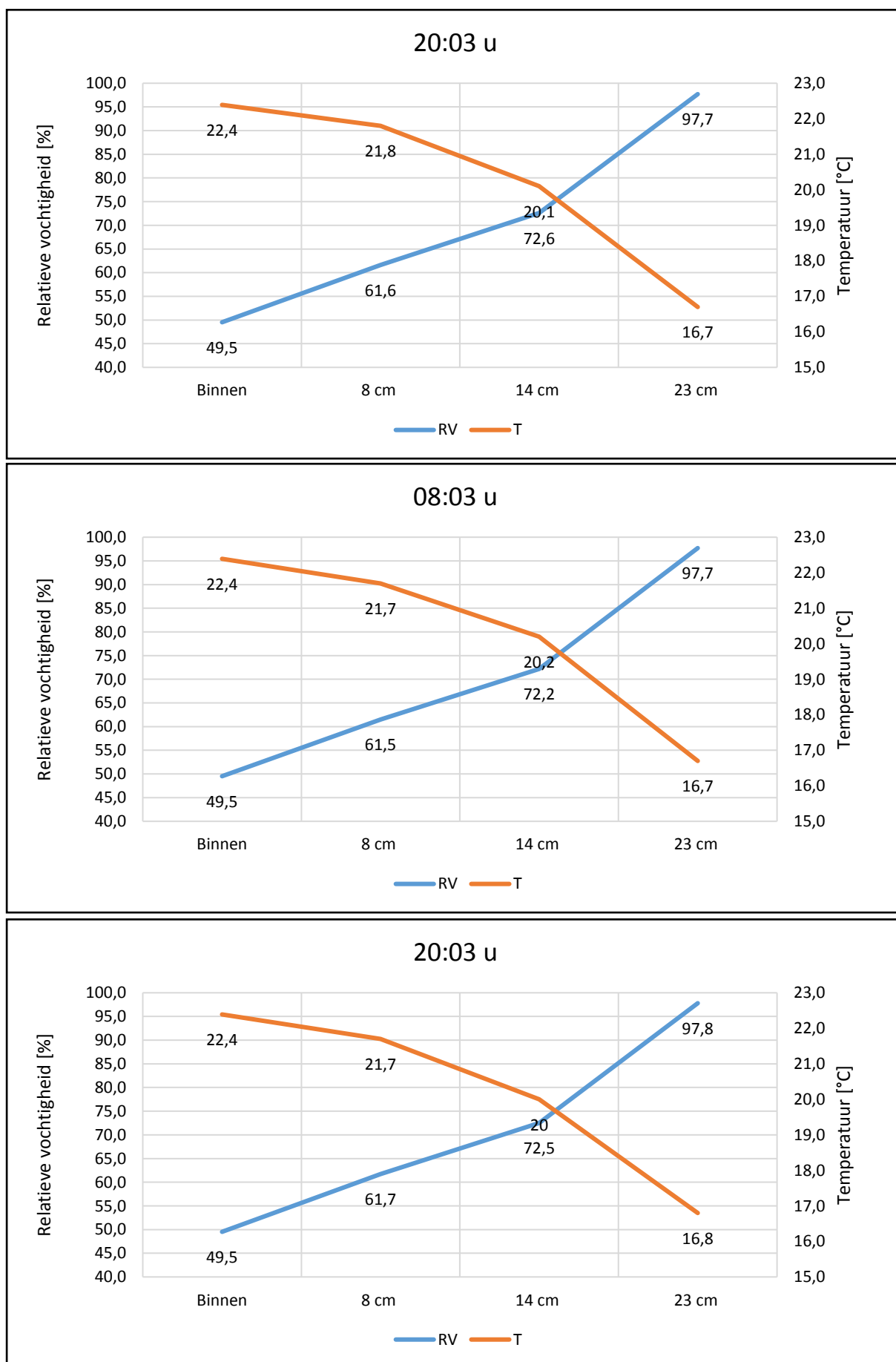
Binnen deze verbouwingen worden de resultaten van één kalkhennepwand besproken (zie ook 2.1.3). Ook hier worden dezelfde aannames gemaakt als bij verbouwing 1. Verder is het binnenklimaat constant, dit aangezien deze ruimte dient als verwarmingsruimte. Na de meting op volledig diepte wordt het binnenklimaat in rekening gebracht door de sonde te laten acclimatiseren (zie 2.1.3 – meetcampagne). Het buitenklimaat kan niet in rekening worden gebracht doordat de metingen plaatsvinden onder het maaiveld.

Kelder – 23 cm (Meetperiode: 17/11/2016 t.e.m. 23/11/2016)

Bij deze kelderwand worden op drie tijdstippen (20:03 u op 17/11, 08:03 u en 20:03 u op 18/11) de temperatuur- en relatieve vochtigheid verloop bepaald (zie Figuur 82). Voor deze kalkhennepwand worden er metingen uitgevoerd op 8, 14 en 23 cm diepte zoals de grafieken weergeven.

Figuur 82 geeft weer dat de relatieve vochtigheid (RV - blauwe lijn) voor de drie grafieken hetzelfde verloop kent. Namelijk neemt de vochtigheid vanbinnen (49,5 %) lineair toe tot op een kalkhennepdikte van 14 cm ($\approx 72,5$ %). Hierna stijgt deze tot op een kalkhennepdikte van 23 cm (97,7 %).

De temperatuur (T – oranje lijn) binnen en doorheen de kalkhennepwand kent eveneens hetzelfde verloop voor de drie tijdstippen. Deze neemt namelijk af vanbinnen (22,4 °C) tot op volledige kalkhennepdiepte (23 cm). De temperaturen op 8, 14 en 23 cm diepte bedragen respectievelijk $\approx 21,7$, ≈ 20 en $\approx 16,7$ °C.



Figuur 82: Temperatuur- en relatieve vochtigheid doorheen kelderwand

3.1.3 Conclusie

Er kan uit de metingen van verbouwing 1 vastgesteld worden dat de relatieve vochtigheid in de binnenomgeving beduidend lager is dan in de kalkhennepwand zelf. Wand B vertoont voor de drie tijdstippen een gelijkaardig verloop voor zowel de relatieve vochtigheid als de temperatuur. Hierbij is er een lichte afwijking merkbaar bij grafiek c (16:09 u) waarbij de knik zich minder diep in de isolatie voordoet.

Wand C kent net zoals wand B een gelijkaardig verloop voor de drie tijdstippen. Maar in dit geval treedt de knik telkens op dezelfde plaats op, namelijk in het midden van de kalkhennep (10 cm). Verder is de buitentemperatuur gestegen boven de 10 °C en kan er een opmerkelijk hogere relatieve vochtigheid (>90 %) waargenomen worden in de buitenomgeving. Bij wand A is er een afwijking merkbaar waarbij de maximale relatieve vochtigheid (overflow) in de kalkhennep overschreden wordt. Dit doet zich voor vanaf een diepte van 20 cm tot op de volledige diepte van 30 cm.

Verder kan er opgemerkt worden dat de temperaturen op de overgang tussen het metselwerk en de kalkhennep voor de drie wanden hoog en vergelijkbaar zijn (13,9 – 15,9 °C). Dit ondanks dat de isolatiediktes gaan van 10, 22 tot zelfs 30 cm. Hierbij valt er ook op dat de temperatuurdaling tussen de binnenruimte en het metselwerk ligt tussen 5,1 en 6,4 °C wat laag is voor de toegepaste isolatiediktes.

Warmtegeleidingscoëfficiënten van respectievelijk 0,29; 0,24 en 0,32 W/mK worden met behulp van de Glasermethode gevonden voor respectievelijk wand A, wand B en wand C bij de eerste verbouwing. Vervolgens zijn de gemeten temperaturen in wand A, van respectievelijk 17,05 en 15,90 °C, opvallend lager dan de berekende temperaturen van respectievelijk 19,57 en 17,22 °C. In tegenstelling tot wand A, is de gemeten temperatuur in wand B (18,17 °C) opvallend hoger dan de berekende waarde, (15,86 °C). Tenslotte kan opgemerkt worden dat de gemeten temperaturen (respectievelijk 18,95 en 18,03 °C) in wand C goed overeenkomen met de berekende waardes (respectievelijk 18,44 en 17,52 °C). Dit in tegenstelling tot de vorige wanden waarbij de waardes niet overeenkomen.

Wanneer de parameters uit de Glasermethode worden vergeleken met deze uit de *software*, kan er opgemerkt worden dat deze sterk van elkaar verschillen. Zo zijn de berekende warmtegeleidingscoëfficiënten hoger dan deze uit de *software* en zijn de berekende warmteweerstanden beduidend lager dan deze uit de *software*. Ook is er een opmerkelijk verschil tussen enerzijds de berekende λ -waardes en anderzijds de gehanteerde waarde in de EPB-databank en andere studies.

Uit de metingen voor verbouwing 2 is de relatieve vochtigheid- en het temperatuurverloop voor de drie tijdstippen identiek, dit is te wijten aan het constant binnen en buitenklimaat dat er heerst. De knik vindt hier plaats op een isolatiediepte van 14 cm. Verder zijn de relatieve vochtigheden op volledige kalkhennepdiepte zeer hoog ($\approx 97,7\%$).

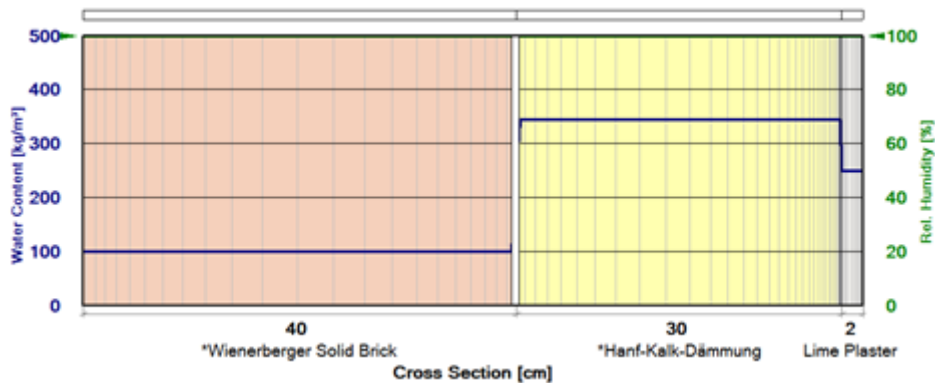
Wanneer de resultaten van de vier wanden vergeleken worden met elkaar kan er opgemerkt worden dat, ter hoogte van de overgang tussen de kalkhennep en het metselwerk, de relatieve vochtigheid bij wand B veel lager (57 tot 60 %) is dan bij de andere wanden. Bij deze benadert de relatieve vochtigheid 100 % (96,5 tot 100 %). Verder kan wand C van verbouwing 1 vergeleken worden met de wand van verbouwing 2, dit aangezien de vergelijkbare dikte. Hierbij is op te merken dat de relatieve vochtigheden op hetzelfde tijdstip in de kalkhennep lager zijn voor de wand van verbouwing 2 maar hoger zijn op de overgang tussen de kalkhennep en het metselwerk (97,7 i.p.v. 96,5 % – 97,5 %).

3.2 Numerieke analyse

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de WUFI®-simulaties weergegeven. Om de resultaten zo overzichtelijk mogelijk weer te geven worden enkel de opmerkelijke waarnemingen van de volledige simulaties weergegeven. De drie wanden uit verbouwing 1 zijn gesimuleerd, de wand uit de tweede verbouwing kon niet gesimuleerd worden omdat de buitencondities van de ondergrond niet kunnen worden ingegeven in de *software*. Deze resultaten worden vergeleken met de werkelijke data van de meetcampagne.

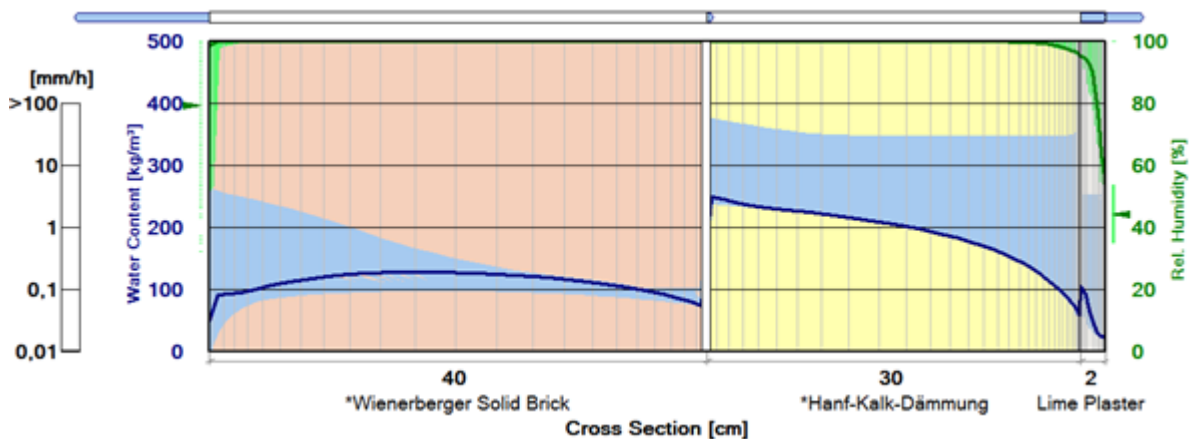
3.2.1 Wand A

Figuur 83 geeft de beginsituatie van wand A weer. De initiële vochtgehaltenes in de verschillende materialen zijn zoals ingegeven in 2.2.4. Deze worden door de *software* zelf aangenomen.



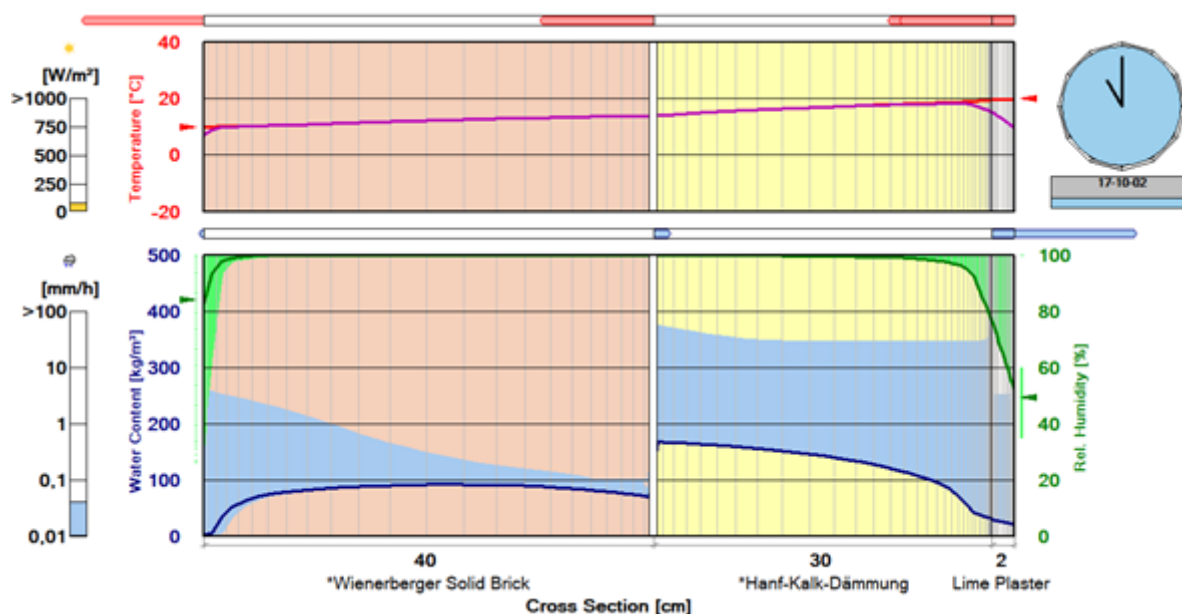
Figuur 83: Beginsituatie wand A op 1/11/2015

Figuur 84 toont de situatie op 28/03/2016 om 9 uur in de ochtend. De kalkhennep en het pleisterwerk zijn gedroogd ten opzichte van de beginsituatie. Het metselwerk is in het centrum vochtiger geworden door de regenval in de winterperiode. De relatieve vochtigheid (zie groene lijn) gaat doorheen het pleisterwerk volgens een sterk dalende lijn richting binnenruimte.



Figuur 84: Wand A op 28/03/2016 om 9u

Figuur 85 toont de situatie op 17/10/2016 om 11 uur in de voormiddag. Dit is het eerste tijdstip waarop een overzicht van wand A is gemaakt met de werkelijke data. Het bovenste diagram geeft het temperatuursverloop weer doorheen de bouwschil. In het balkje onder het zonnetje is af te lezen dat de zon lichtjes aan het stralen is ($<100 \text{ W/m}^2$). Dit zorgt ervoor dat het metselwerk aan de buitenzijde kan drogen (zie blauwe lijn). Ook is er duidelijk een verschil in relatieve vochtigheid af te lezen ten opzichte van de vorige situatie. Zo is de vochtigheid in het pleisterwerk zeer sterk gedaald en dit gaat verder in de kalkhennep waar een klein stuk droging vertoont. Voornamelijk blijft de kalkhennep volledig verzadigd en wordt er een RV van 100 % aangegeven.



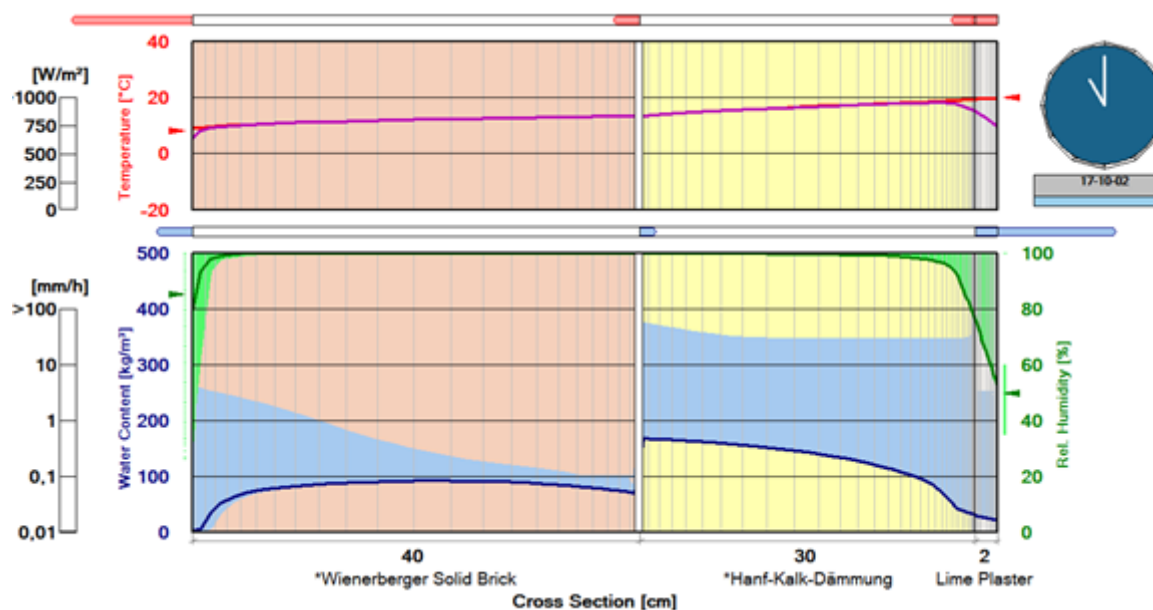
Figuur 85: Wand A op 17/10/2016 om 11u

Tabel 29 geeft de werkelijke data versus de gesimuleerde resultaten. De gesimuleerde temperaturen komen goed overeen. De relatieve vochtigheden in het centrum van de bouwschil komen ook goed overeen maar terwijl de *software* aangeeft dat de kalkhennep over bijna de volledige lengte volledig verzadigd is, geeft de werkelijke dat aan dat deze tot een grotere diepte is gedroogd.

Tabel 29: Wand A werkelijke versus gesimuleerde data (11u)

WAND A 11u	T in °C (meting)	T in °C (WUFI®)	RV in % (meting)	RV in % (WUFI®)
Buiten	8,7	Oké	73	83
Kalkhennep (30 cm)	14,2	Oké	100	100
Kalkhennep (20 cm)	16	Oké	100	100
Kalkhennep (10 cm)	17,7	Oké	88,8	96
Binnen	19,9	Oké	47	52

Figuur 86 toont de situatie op 17/10/2016 om 23 uur. Het temperatuursverloop en de relatieve vochtigheid zijn vergelijkbaar met deze van de voormiddag.



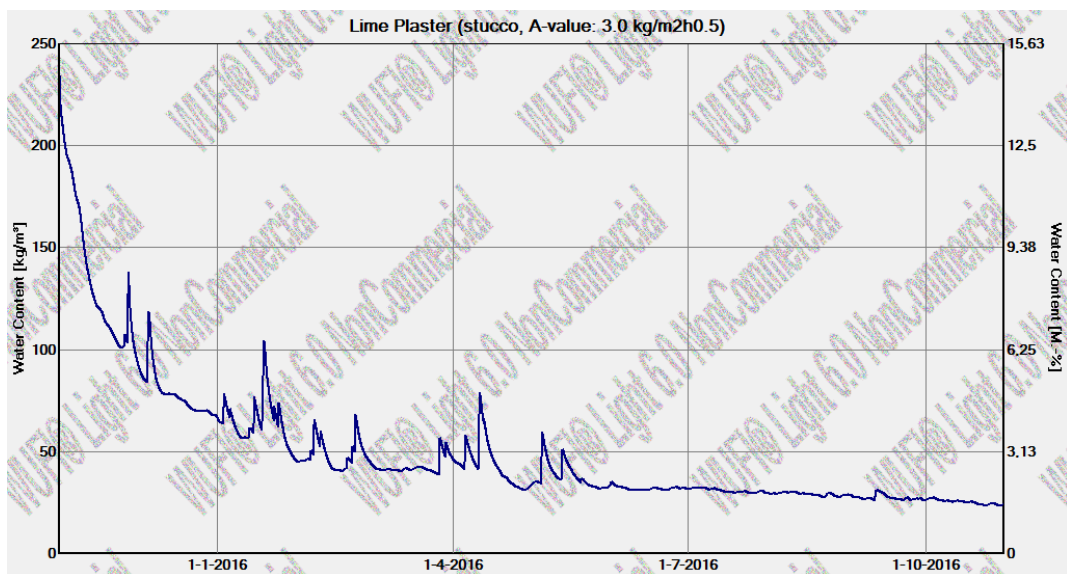
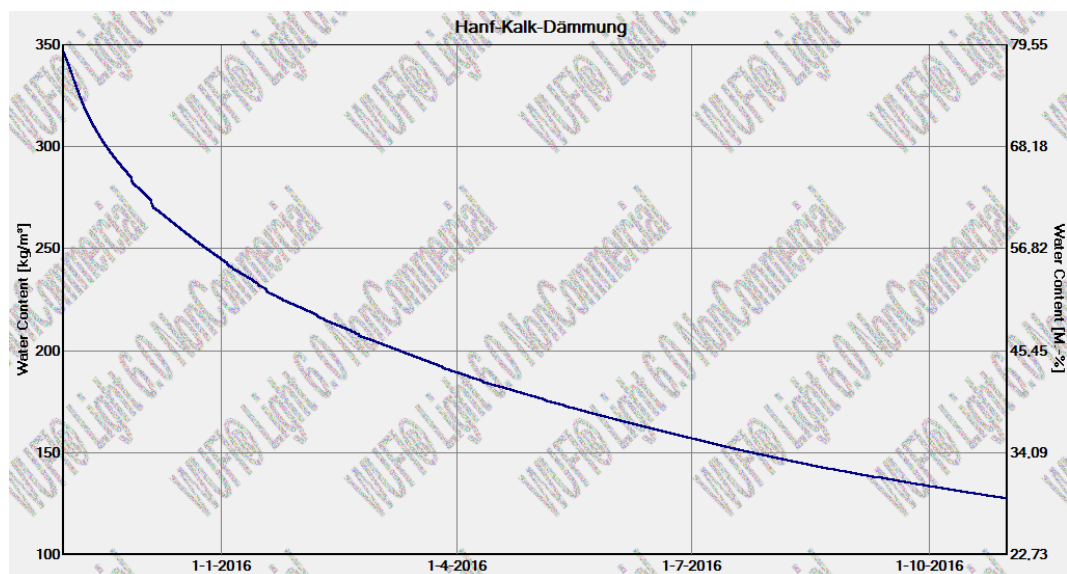
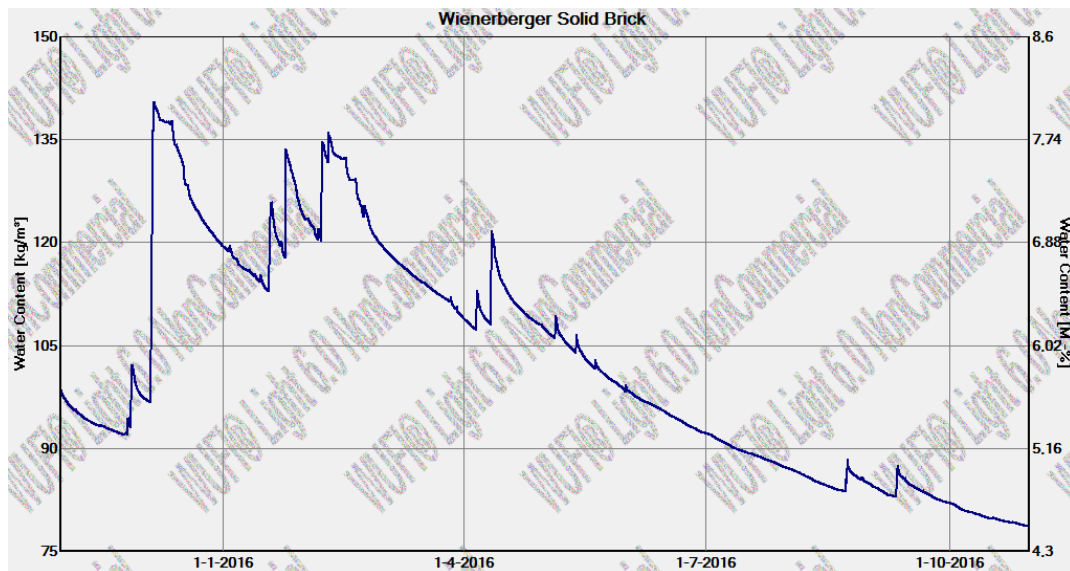
Figuur 86: Wand A op 17/10/2016 om 23u

De werkelijke temperaturen komen goed overeen aan de buitenzijde van de bouwschil met de gesimuleerde temperaturen (zie Tabel 30). Aan de binnenzijde van de bouwschil zijn er kleine verschillen merkbaar. De relatieve vochtigheden komen goed overeen in het centrum en aan de uiteindes van de bouwschil. Er is wel op te merken dat in werkelijkheid de kalkhennep tot op een grotere diepte is gedroogd.

Tabel 30: Wand A werkelijke versus gesimuleerde data (23u)

WAND A 23u	T in °C (meting)	T in °C (WUFI®)	RV in % (meting)	RV in % (WUFI®)
Buiten	8,6	Oké	79	83
Kalkhennep (30 cm)	15,9	Oké	100	100
Kalkhennep (20 cm)	16,2	Oké	100	100
Kalkhennep (10 cm)	17,6	Niet oké	88,8	96
Binnen	21,7	Niet oké	56	52

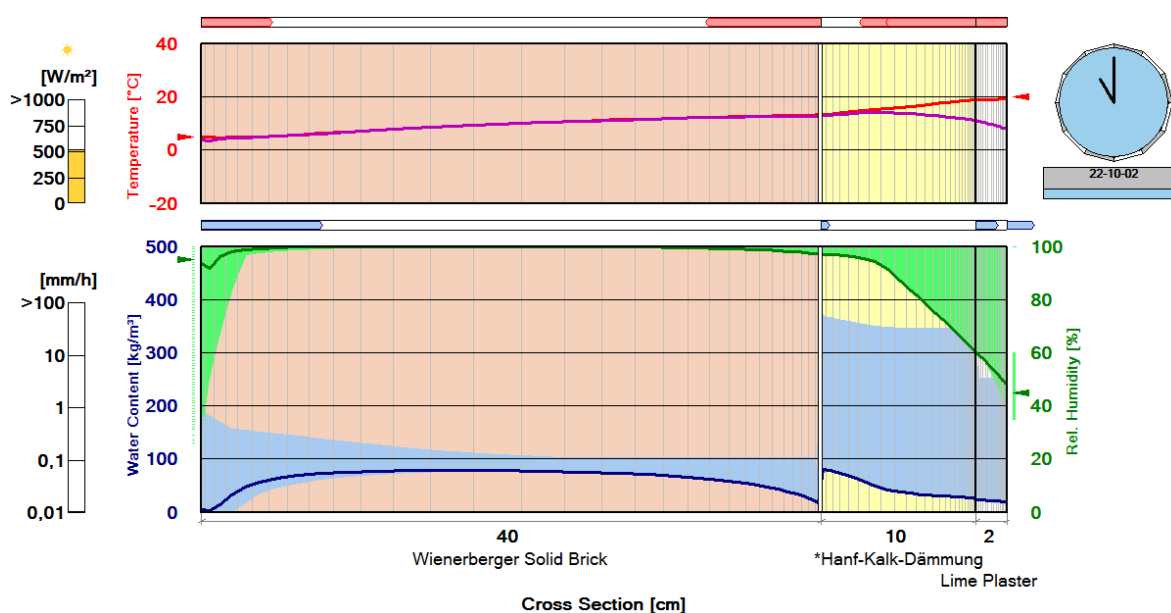
Figuur 87 geeft het watergehalte weer van de materialen van wand A gedurende de simulatieperiode lopende van 1/11/2015 tot 1/11/2016. Merk op dat het metselwerk gedurende de winterperiode zeer vochtig wordt en dat het vochtgehalte in de loop van de zomer in dalende lijn gaat om exact één jaar later een lager vochtgehalte te hebben bereikt dan het initiële. Er is ook op te merken dat de kalkhennep in het begin snel droogt en dat vanaf 1/04/2016 het vochtgehalte zeer gelijkmatig daalt volgens de tijd. Het pleisterwerk heeft initieel een hoog vochtgehalte maar dit daalt zeer snel in het begin. Vervolgens doen er zich enkele pieken voor in vochtgehalte waarna het vochtgehalte in evenwicht is.



Figuur 87: Watergehalte wand A met a) metselwerk, b) kalkhennepe en c) kalkpleister

3.2.2 Wand B

De beginsituatie van wand B is dezelfde als wand A (zie Figuur 83) waarbij enkel de dikte van de kalkhennep verschillend is. Figuur 88 toont de situatie op 22/10/2016 om 11 uur in de voormiddag. Dit is het eerste tijdstip waarop een overzicht van wand B is gemaakt met de werkelijke data. In het balkje onder het zonnetje is af te lezen dat de zon sterk aan het stralen is ($>500 \text{ W/m}^2$). Dit zorgt ervoor dat het metselwerk aan de buitenzijde kan drogen (zie blauwe lijn). Ook is er duidelijk een verschil in relatieve vochtigheid af te lezen ten opzichte van de beginsituatie. Zo is de vochtigheid in het pleisterwerk zeer sterk gedaald en dit gaat verder in de kalkhennep waar de volledige doorsnede droging vertoont. Merk hierbij op dat de relatieve vochtigheid kleiner is dan 100 % bij de overgang tussen de kalkhennep en het metselwerk.



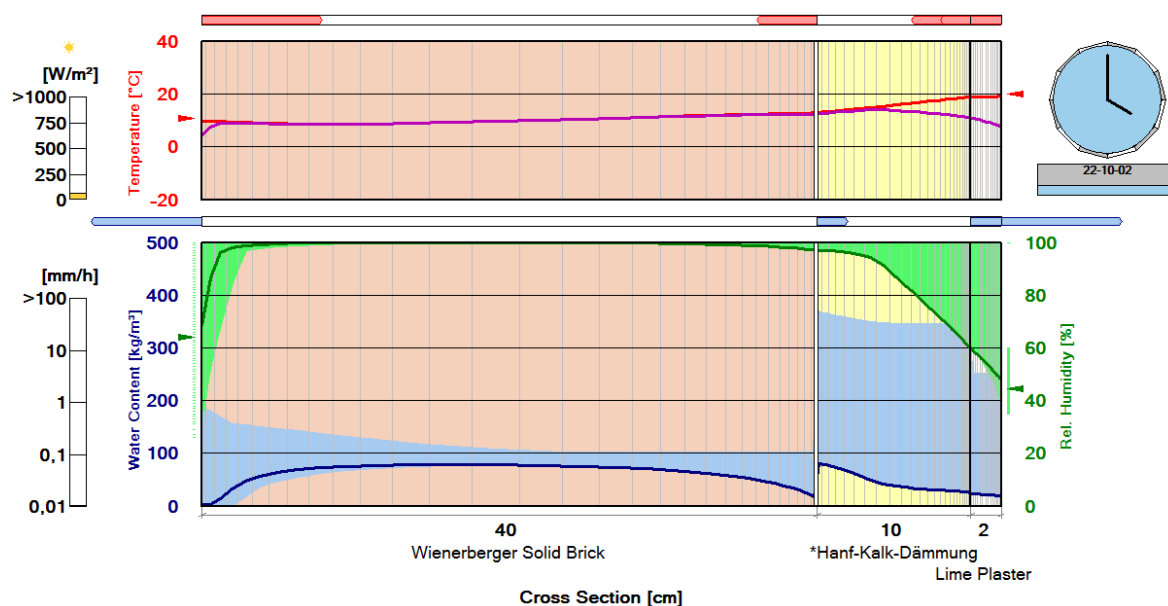
Figuur 88: Wand B op 22/10/2016 om 11u

Tabel 31 geeft de werkelijke data versus de gesimuleerde resultaten voor wand B. De gesimuleerde temperaturen komen goed overeen met uitzondering van de buitentemperatuur. De relatieve vochtigheden aan de zijkanen van de bouwschil wijken relatief af in tegenstelling tot de relatieve vochtigheden in het centrum van de bouwschil waar dat er grote afwijkingen kunnen geconstateerd worden.

Tabel 31: Wand B werkelijke versus gesimuleerde data (11u)

WAND B 11u	T in °C (meting)	T in °C (WUFI®)	RV in % (meting)	RV in % (WUFI®)
Buiten	9,5	Niet oké	87	95
Kalkhennep (10 cm)	14,7	Oké	57,2	98
Kalkhennep (7,5 cm)	16,5	Oké	57,2	92
Binnen	20,5	Oké	55	48

Figuur 89 toont de situatie van wand B op 22/10/2016 om 16u. Er is enkel een verschil in relatieve vochtigheid op te merken aan de buitengevel omdat de zon niet meer zo hard ($<100 \text{ W/m}^2$) aan het schijnen is.



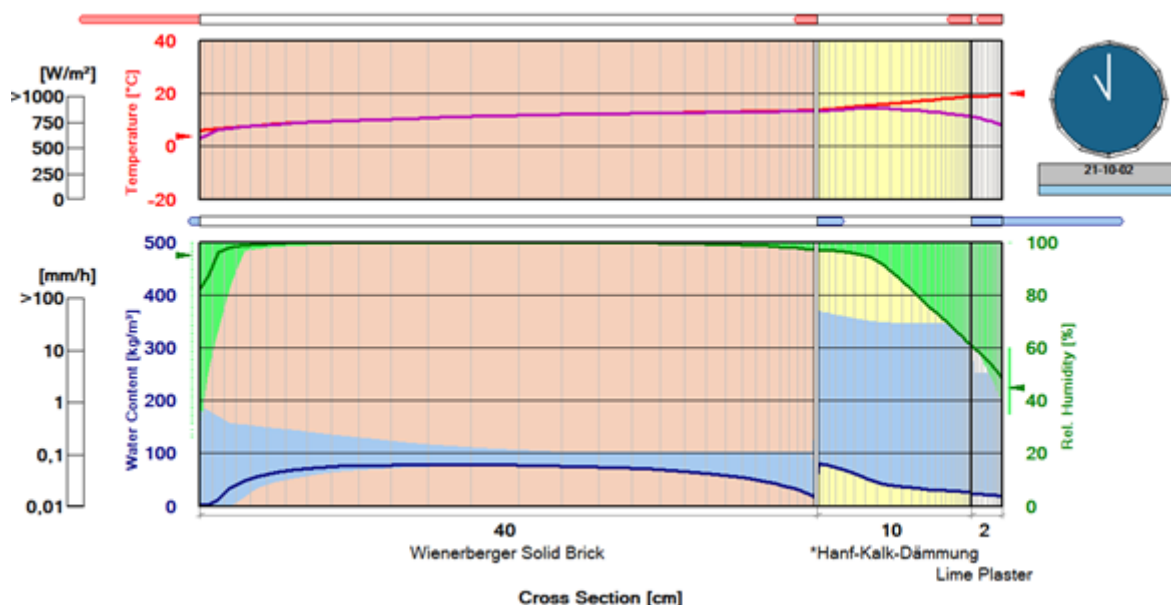
Figuur 89: Wand B op 22/10/2016 om 16u

Tabel 32 toont aan dat er weer veel verschillen zijn in zowel temperatuur als in relatieve vochtigheid tussen de gesimuleerde en de werkelijke data. Ook hier kan er weer opgemerkt worden dat de kalkhennep in praktijk veel droger is dan in de simulaties.

Tabel 32: Wand B werkelijke versus gesimuleerde data (16u)

WAND B 16u	T in °C (meting)	T in °C (WUFI®)	RV in % (meting)	RV in % (WUFI®)
Buiten	9,3	Oké	74	63
Kalkhennep (10 cm)	14,8	Oké	57	98
Kalkhennep (7,5 cm)	19,5	Niet oké	47,2	92
Binnen	19,9	Oké	54	48

Figuur 90 toont de situatie van wand B op 21/10/2016 om 23u. Er is enkel een verschil in relatieve vochtigheid op te merken aan de buitengevel omdat de zon niet meer zo hard ($<10 \text{ W/m}^2$) aan het schijnen is.



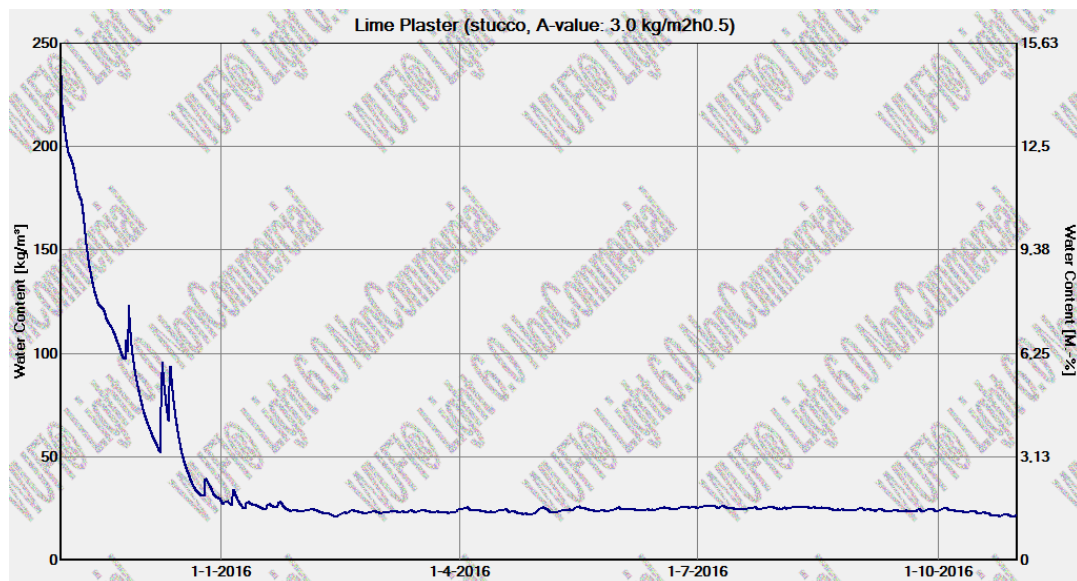
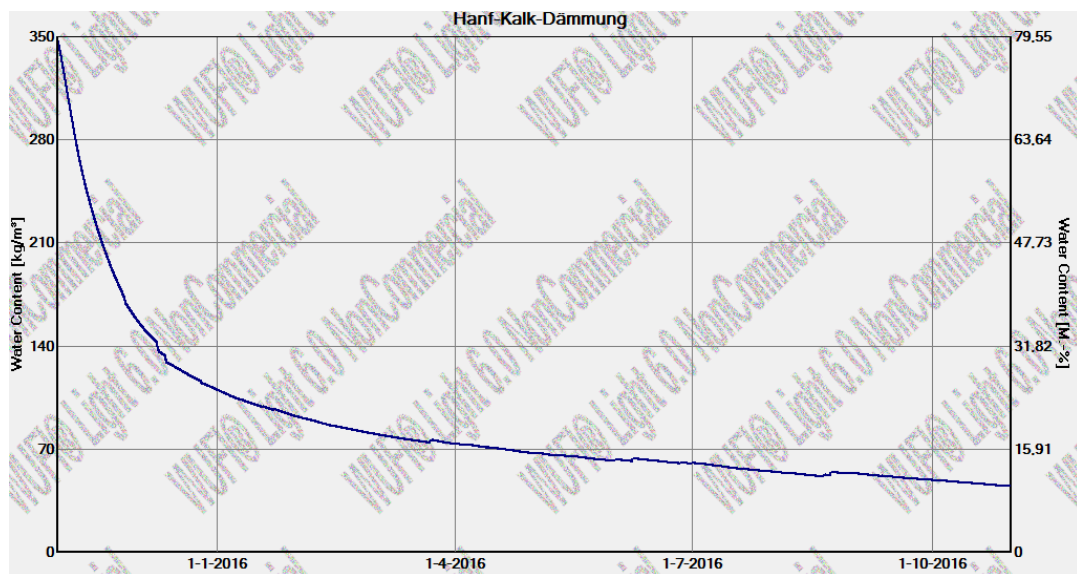
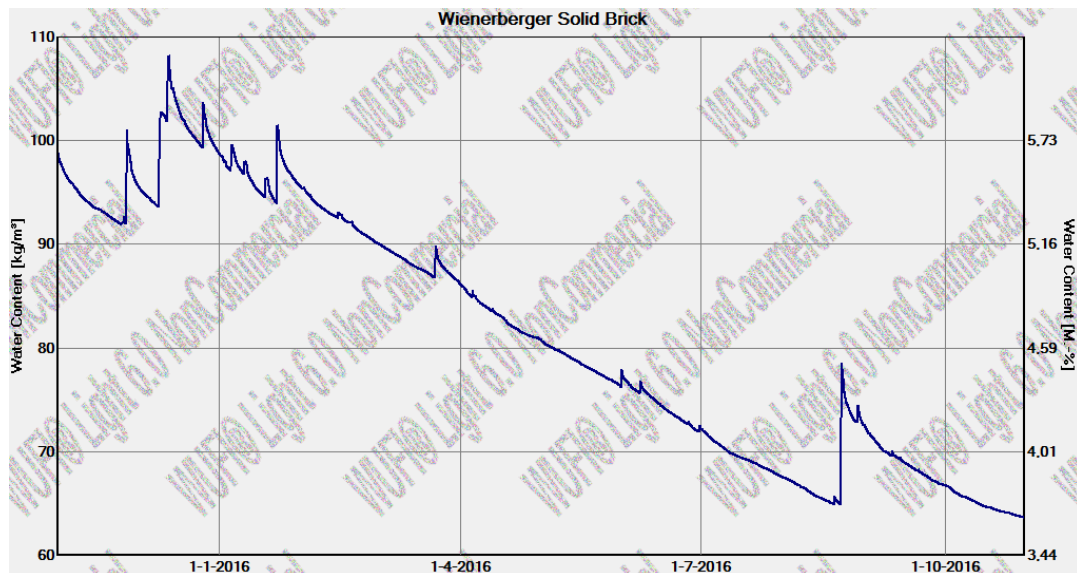
Figuur 90: Wand B op 21/10/2016 om 23u

Tabel 33 toont aan dat er weer veel verschillen zijn in zowel temperatuur als in relatieve vochtigheid tussen de gesimuleerde en de werkelijke data. Ook hier kan er weer opgemerkt worden dat de kalkhennep in praktijk veel droger is dan in de simulaties.

Tabel 33: Wand B werkelijke versus gesimuleerde data (23u)

WAND B 23u	T in °C (meting)	T in °C (WUFI®)	RV in % (meting)	RV in % (WUFI®)
Buiten	8,6	Oké	79	82
Kalkhennep (10 cm)	15,5	Oké	60	98
Kalkhennep (7,5 cm)	18,9	Niet oké	55,6	92
Binnen	21,2	Niet oké	52	48

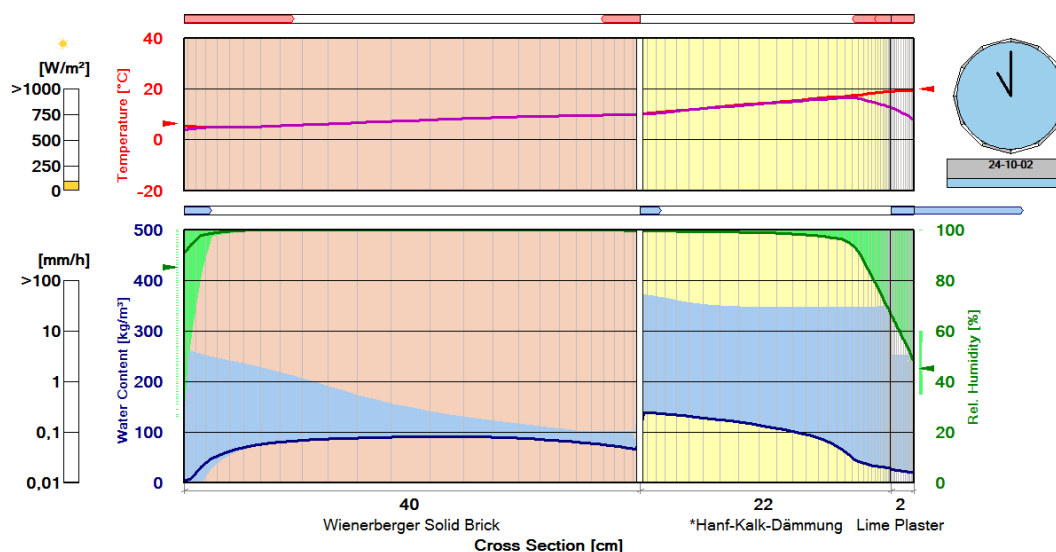
Figuur 91 geeft het watergehalte weer van de materialen uit wand B gedurende de simulatieperiode lopende van 1/11/2015 tot 1/11/2016. Merk op dat het metselwerk gedurende de winterperiode zeer vochtig wordt en dat het vochtgehalte in de loop van de zomer in dalende lijn gaat om exact één jaar later veel een lager vochtgehalte te hebben bereikt dan het initiële. In de maand augustus is er ook nog een piek in vochtigheid merkbaar. Er is ook op te merken dat de kalkhennep in het begin zeer snel droogt en dat vanaf 1/01/2016 het vochtgehalte zeer gelijkmatig daalt volgens de tijd. Het pleisterwerk heeft initieel een hoog vochtgehalte maar dit daalt zeer snel in het begin. Vervolgens doen er zich maar drie of vier pieken voor in vochtgehalte waarna het vochtgehalte vrij snel in evenwicht is.



Figuur 91: Watergehalte wand B met a) metselwerk, b) kalkhennep en c) kalkpleister

3.2.3 Wand C

De beginsituatie van wand C is vergelijkbaar met deze van wand A en wand B (zie Figuur 83) waarbij enkel de dikte van de kalkhennep verschillend is. Figuur 92 toont de situatie op 24/10/2016 om 11 uur in de voormiddag. Dit is het eerste tijdstip waarop een overzicht van wand C is gemaakt met de werkelijke data. In het balkje onder het zonnetje is af te lezen dat de zon aan het stralen is ($<200 \text{ W/m}^2$). Het verloop van de relatieve vochtigheid (zie groene lijn) en het watergehalte (zie blauwe lijn) zijn vergelijkbaar met wand A. Met andere woorden de daling van de relatieve vochtigheid vindt plaats in het rechtse deel van de kalkhennep.



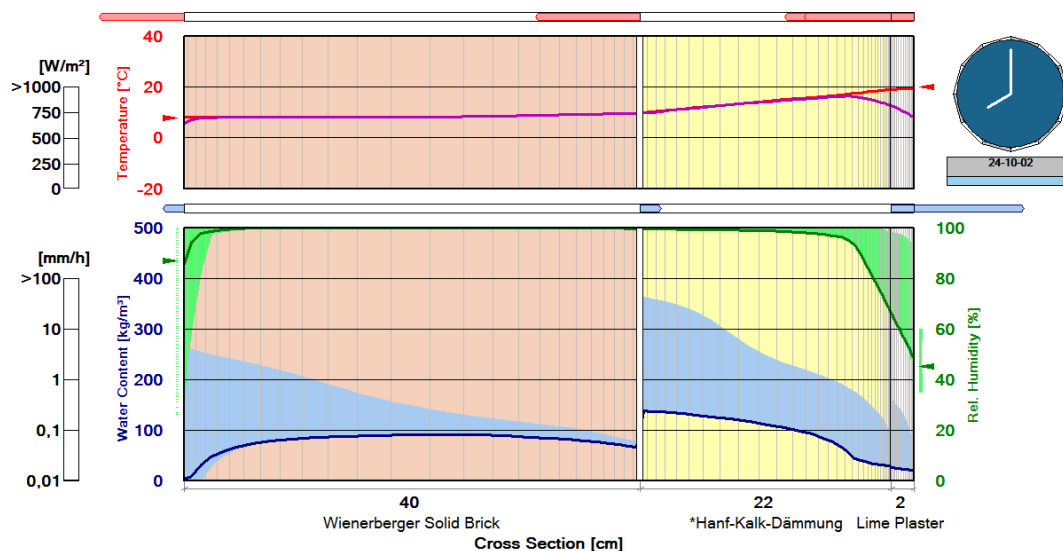
Figuur 92: Wand C op 24/10/2016 om 11u

Tabel 34 geeft de werkelijke data versus de gesimuleerde resultaten voor wand C. De gesimuleerde temperaturen komen goed overeen met uitzondering van de temperaturen aan de koude zijde van de isolatie. De relatieve vochtigheden aan de zijkanten van de bouwschil wijken relatief af in tegenstelling tot de relatieve vochtigheden in het centrum van de bouwschil waar dat er grote afwijkingen kunnen geconstateerd worden. Hierbij zijn de relatieve vochtigheden gemeten in de kalkhennep opvallend lager dan de gesimuleerde waarden.

Tabel 34: Wand C werkelijke versus gesimuleerde data (11u)

WAND C 11u	T in °C (meting)	T in °C (WUFI®)	RV in % (meting)	RV in % (WUFI®)
Buiten	10,4	Niet oké	91	92
Kalkhennep (22 cm)	13,9	Niet oké	96,7	100
Kalkhennep (10 cm)	17,6	Oké	74,7	98
Kalkhennep (5 cm)	18,9	Oké	63	90
Binnen	19,8	Oké	59	50

Figuur 93 toont de situatie van wand C op 24/10/2016 om 20u. Het diagram is vergelijkbaar met het vorige, er is enkel een licht gestegen buitentemperatuur en geen stralende zon meer merkbaar.



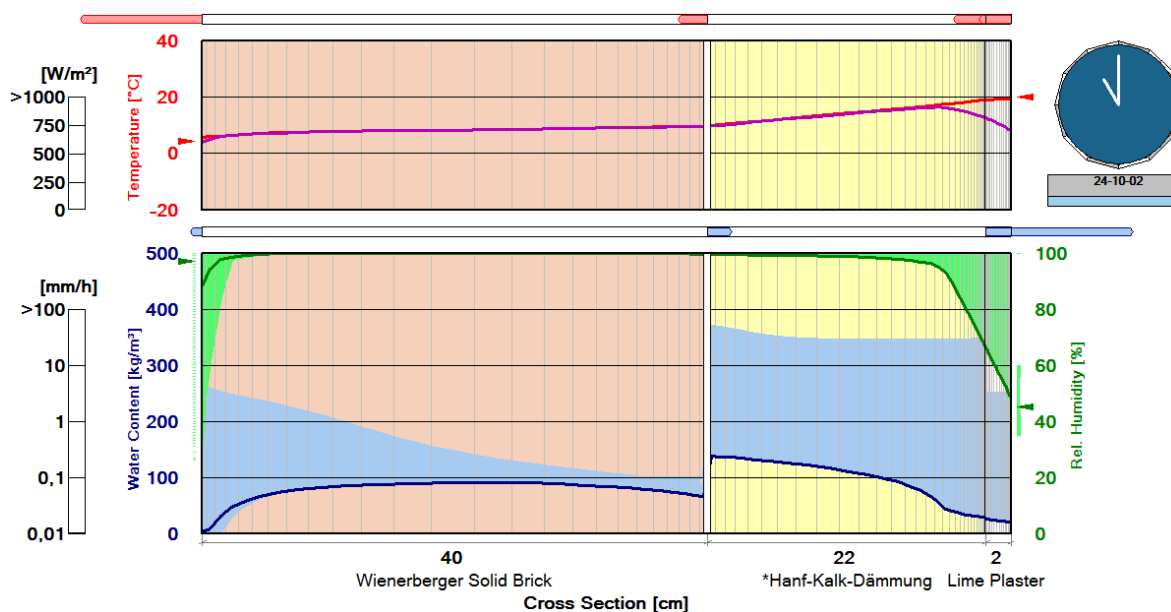
Figuur 93: Wand C op 24/10/2016 om 20u

Tabel 35 geeft de werkelijke data versus de gesimuleerde resultaten voor wand C. Merk op dat de verschillen en overeenkomsten tussen de metingen en de simulaties dezelfde zijn als bij de vorige situatie om 11u in de voormiddag.

Tabel 35: Wand C werkelijke versus gesimuleerde data (20u)

WAND C 20u	T in °C (meting)	T in °C (WUFI®)	RV in % (meting)	RV in % (WUFI®)
Buiten	10,6	Niet oké	87	88
Kalkhennep (22 cm)	14,5	Niet oké	96,5	100
Kalkhennep (10 cm)	18,3	Oké	74,2	98
Kalkhennep (5 cm)	18,9	Oké	63,9	90
Binnen	19,9	Oké	60	50

Figuur 94 toont de situatie van wand C op 24/10/2016 om 23u. Het diagram is vergelijkbaar met het vorige.



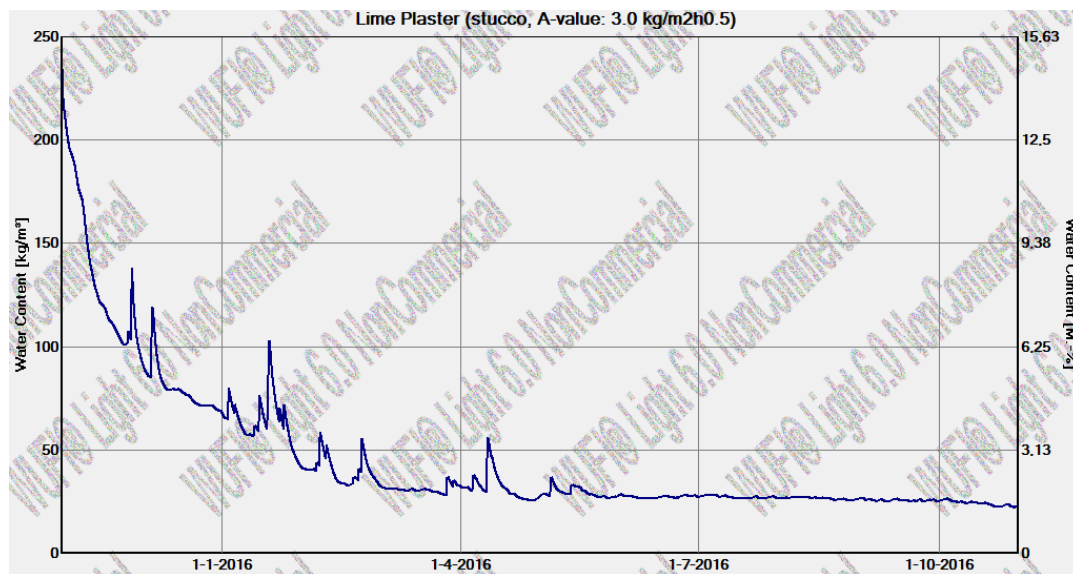
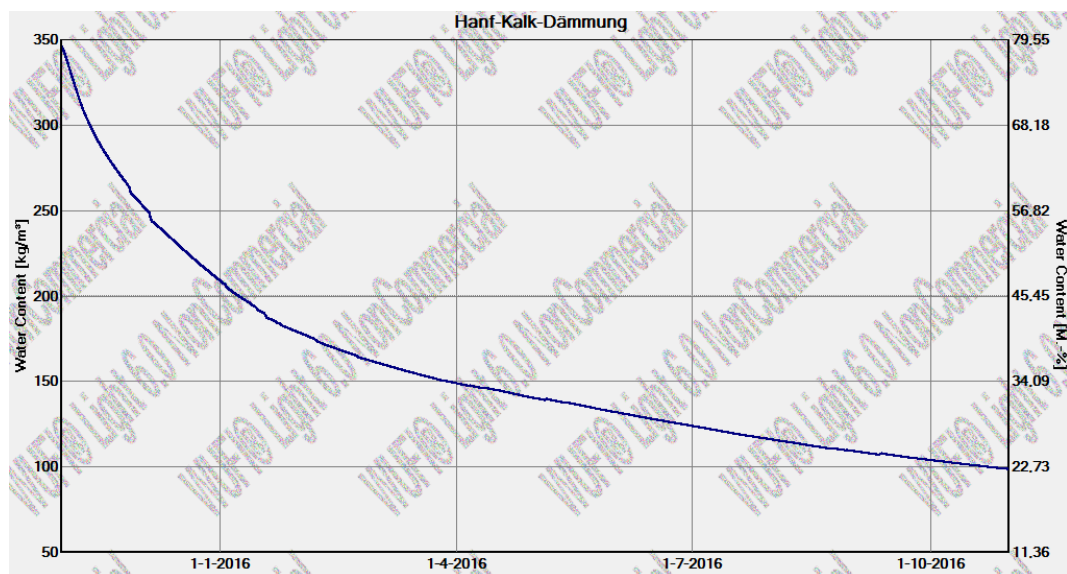
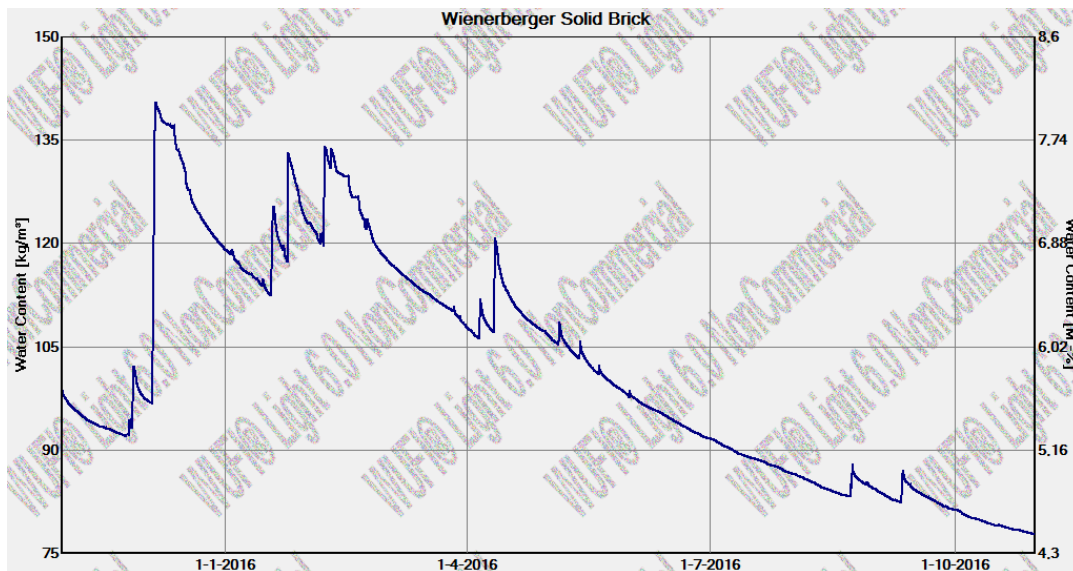
Figuur 94: Wand C op 24/10/2016 om 23u

Tabel 36 geeft de werkelijke data versus de gesimuleerde resultaten voor wand C. Het temperatuursverloop in vorige situaties komt vrij goed overeen maar in huidige situatie zijn er duidelijke verschillen merkbaar tussen de gemeten en de gesimuleerde waardes. Merk op dat de relatieve vochtigheden bij de simulaties constant blijven in tegenstelling tot de metingen waarbij er wel kleine verschillen merkbaar zijn gedurende één dag.

Tabel 36: Wand C werkelijke versus gesimuleerde data (23u)

WAND C 23u	T in °C (meting)	T in °C (WUFI®)	RV in % (meting)	RV in % (WUFI®)
Buiten	10,8	Niet oké	92	92
Kalkhennep (22 cm)	14	Niet oké	97,5	100
Kalkhennep (10 cm)	17,8	Niet oké	75,8	98
Kalkhennep (5 cm)	20,3	Niet oké	66,3	90
Binnen	20,4	Niet oké	59	50

Figuur 95 geeft het watergehalte weer van de materialen van wand C gedurende de simulatieperiode lopende van 1/11/2015 tot 1/11/2016. Merk op dat het metselwerk, de kalkhennep en het pleisterwerk een vergelijkbaar verloop vertonen in vochtgehalte dan deze van wand A. Er is duidelijk waar te nemen dat huidige situatie, waarbij een dikte van 22 cm kalkhennep wordt geplaatst, gelijklopend is met deze van wand A met een kalkhennepdikte van 30 cm.



Figuur 95: Watergehalte wand C met a) metselwerk, b) kalkhennep en c) kalkpleister

3.2.4 Conclusie

Bij de drie wanden A, B en C wordt het metselwerk na plaatsing vochtiger door weersomstandigheden. Er kan verder ook opgemerkt worden dat het metselwerk gedurende de winterperiode zeer vochtig wordt en deze in de zomer kan drogen. Na een periode van één jaar heeft deze een lager vochtgehalte bereikt dan het initiële vochtgehalte.

Voor wand A (30 cm) en C (22 cm) blijft het watergehalte hoog ter hoogte van de overgang tussen metselwerk en kalkhennep. De relatieve vochtigheid blijft hier gelijk aan 100% gedurende de simulatieperiode. Vervolgens daalt het watergehalte doorheen de kalkhennep naar de binnenomgeving toe. Tenslotte daalt de relatieve vochtigheid ter hoogte van het pleisterwerk zeer steil tot 50 % in de binnenomgeving. Het watergehalte bereikt hier een evenwicht na een periode van een half jaar.

Na verloop van tijd daalt de relatieve vochtigheid niet enkel in het pleisterwerk maar ook gedeeltelijk in de kalkhennep. Het watergehalte doorheen de kalkhennep daalt zeer snel in de beginfase en na een periode van een half jaar daalt deze lineair met de tijd. Ondanks deze daling blijft de relatieve vochtigheid deels 100 % doorheen de doorsnede gedurende de simulatieperiode van één jaar.

Voor wand B (10 cm) kan er opgemerkt worden dat de relatieve vochtigheid ter hoogte van de overgang kleiner is dan 100 %. Het verloop van de relatieve vochtigheid in de kalkhennep verloopt veel minder steil. Verder daalt het watergehalte in de eerste twee maanden zeer steil, vanaf twee maanden is er een lineaire daling merkbaar.

Wanneer de gesimuleerde data vergeleken wordt met de *in situ* metingen kan er algemeen geconcludeerd worden dat:

- de temperaturen in de bouwschil en binnenomgeving goed overeenkomen (nauwkeurigheid: +/- 1 °C);
- de temperaturen in de buitenomgeving afwijken (1 °C tot 5 °C);
- bij de simulaties bedraagt de relatieve vochtigheid op de overgang 100 % voor isolatiediktes van 22 en 30 cm, terwijl deze 96 % bedraagt voor een dikte van 10 cm;
- de metingen geven een relatieve vochtigheid op de overgang aan van respectievelijk 96,7 % en 57,2 % voor isolatie diktes van 22 en 10 cm ;
- de relatieve vochtigheid blijft in de simulaties tussen 90 – 100 % over het grotendeel van de doorsnede van de kalkhennep met diktes van 22 en 30 cm;
- de relatieve vochtigheden voor de metingen vertonen veel lagere waarden in de richting van de binnenomgeving dan deze van de simulaties.

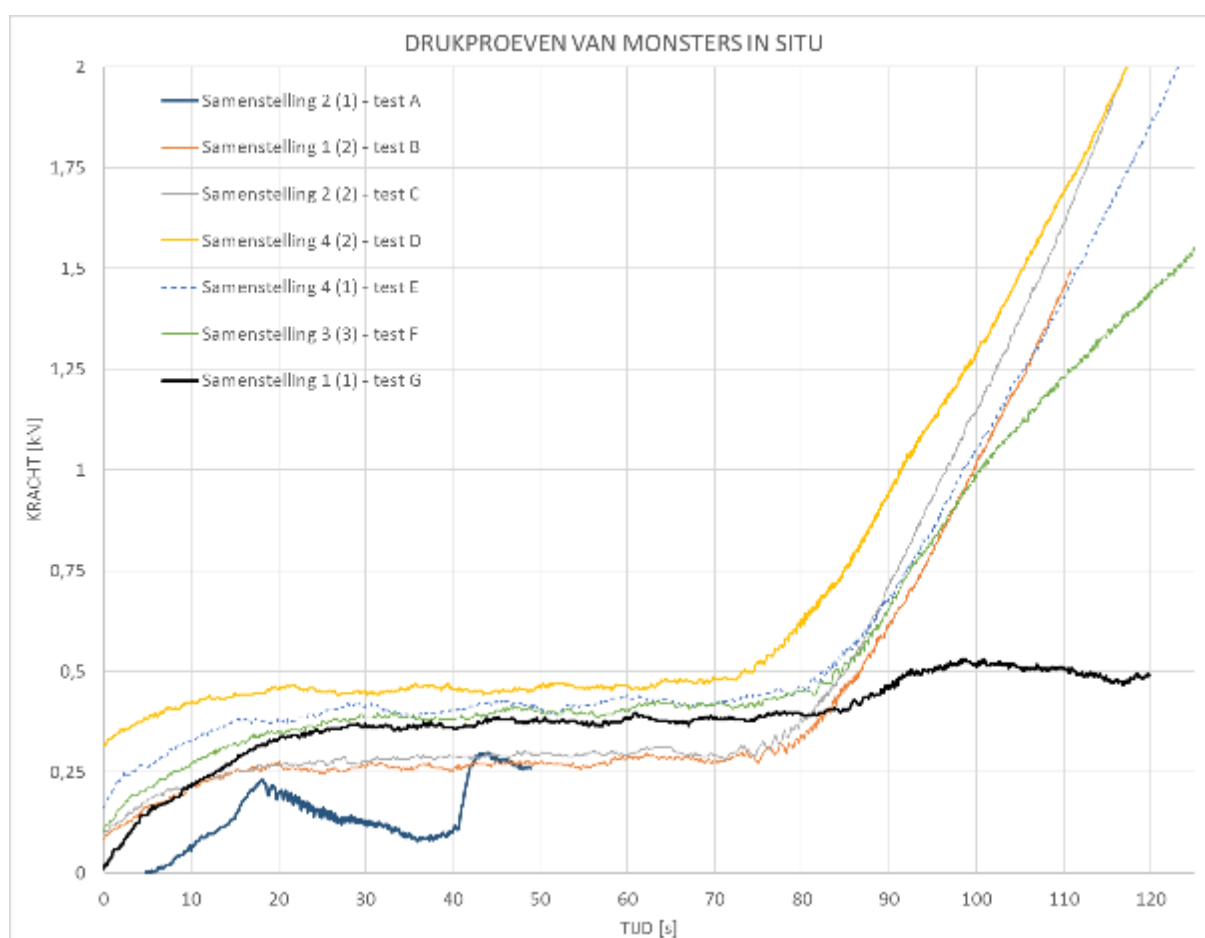
3.3 Drukproeven

De resultaten, die worden bekomen na het uitvoeren van een aantal drukproeven op verschillende kalkhennepkubussen, worden in dit hoofdstuk weergegeven en verder in detail besproken. Eerst worden er enkele drukproeven uitgevoerd op *in situ* gemaakte monsters (zie 3.3.1) en daarna worden ook drie geprefabriceerde monsters (zie 3.3.2) gedrukt. Ten eerste wordt telkens het verloop weergegeven waarna vervolgens enkele foto's worden getoond en ten slotte volgt een samenvatting van de verkregen resultaten.

3.3.1 In situ gemaakte monsters

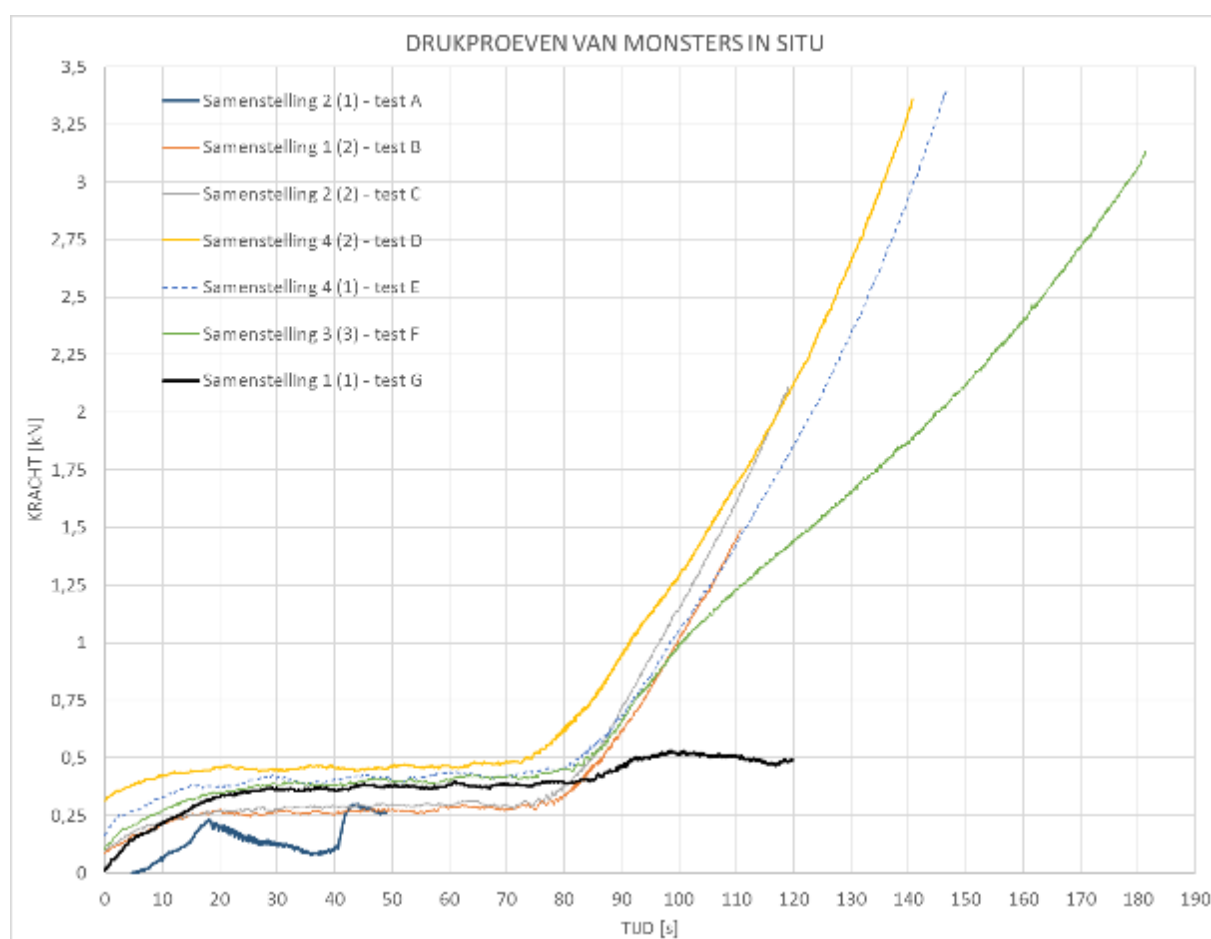
3.3.1.1 Verloop

Figuur 96 toont het beginverloop van de drukproeven van de monsters gemaakt *in situ*. Test A met het eerste monster van samenstelling 2 (lichtblauwe volle lijn) vertoont een afwijkend verloop in het begin van de proef. In de tijdsperiode gaande van 17 sec. tot en met 37 sec. is er een dalend verloop en vanaf 37 sec. is er plotseling een opmerkelijke stijging op te merken die duurt tot 43 sec. waarbij de maximale kracht van het monster wordt gemeten namelijk 0,40 kN. De andere testen vertonen een gelijkaardig verloop in het begin tot ongeveer 80 sec. Vanaf dan vertonen alle monsters met uitzondering van test G (zwarte lijn) met het eerste monster van samenstelling 1 (grote kubus) een relatief recht evenredig stijgend verloop tot ze hun maximale kracht bereiken.



Figuur 96: Beginverloop drukproeven monsters *in situ*

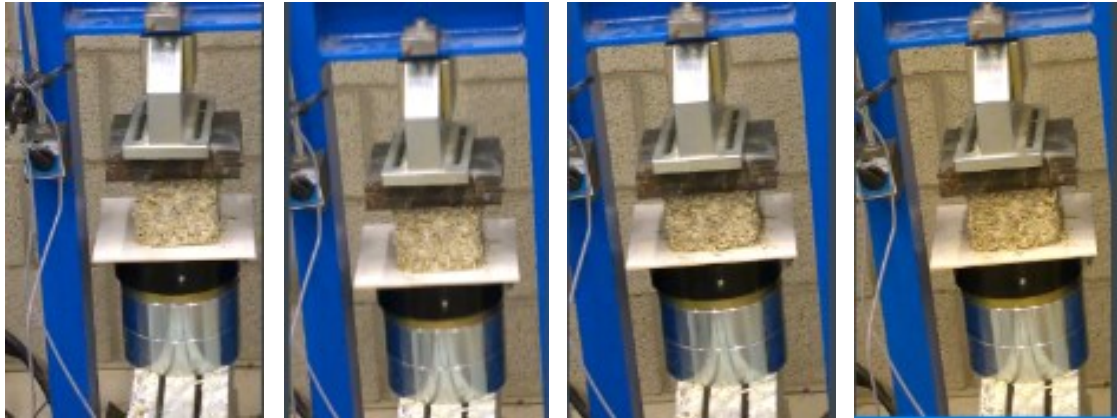
Figuur 97 toont het eindverloop van de drukproeven van de monsters gemaakt *in situ*. Hier is duidelijk te zien dat test G (zwarte lijn) een afwijkend verloop vertoont (na 80 sec.) ten opzichte van de andere testen naar het einde van de proef toe. De testen B tot en met F bereiken een relatief hoge maximale kracht tussen 1,57 en 3,30 kN.



Figuur 97: Eindverloop drukproeven monsters *in situ*

3.3.1.2 Weergave drukproeven

Van test A en B zijn geen foto's beschikbaar. Figuur 98 geeft een weergave van test C (samenstelling 2).



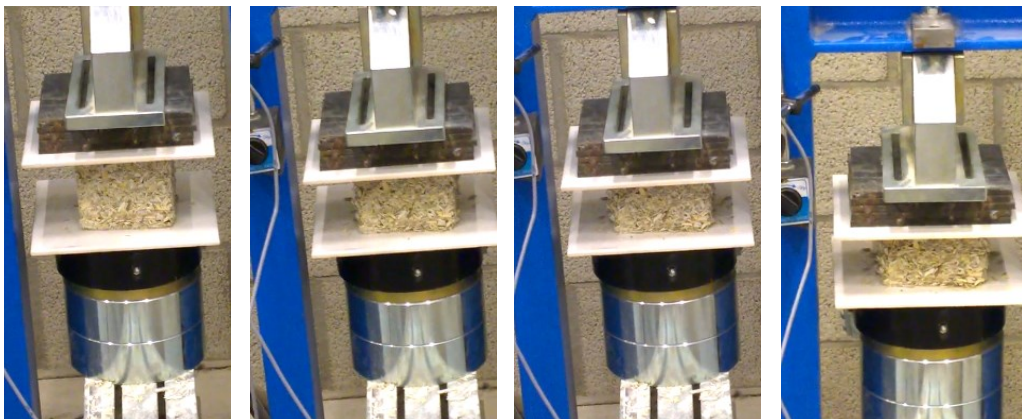
Figuur 98: Weergave test C

Figuur 99 geeft een weergave van test D (samenstelling 4).



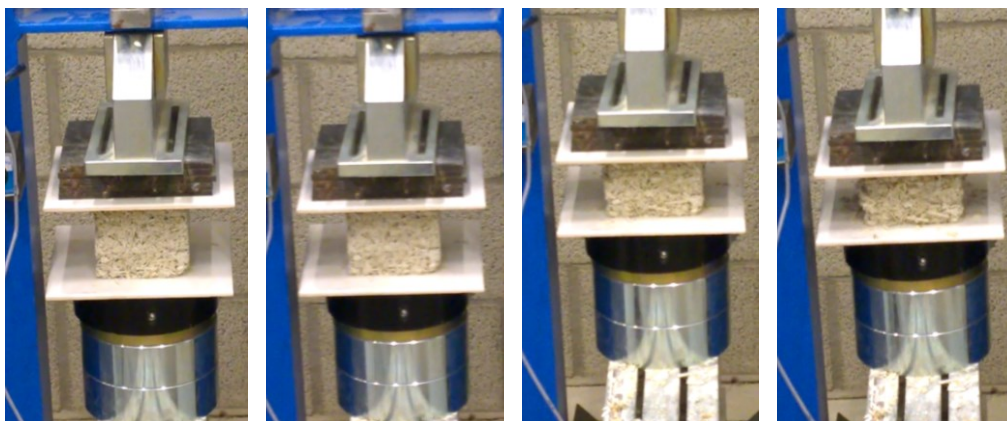
Figuur 99: Weergave test D

Figuur 100 geeft een weergave van test E (samenstelling 4).



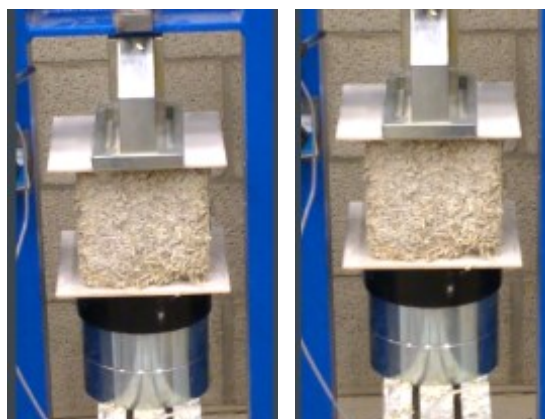
Figuur 100: Weergave test E

Figuur 101 geeft een weergave van test F (samenstelling 3).



Figuur 101: Weergave test F

Figuur 102 geeft een weergave van test G (samenstelling 1). Deze weergave van de test is beperkt tot het begin van de proef wegens een lege batterij.



Figuur 102: Weergave test G

3.3.1.3 Samenvatting resultaten

In Tabel 37 worden alle resultaten weergegeven van de drukproeven op de *in situ* gemaakte monsters. Er zijn in totaal zeven verschillende monsters gedrukt geweest, hierbij wordt er gebruikt gemaakt van 4 verschillende samenstellingen. De monsters met volumes 100x100x100 mm³ zijn aangemaakt op 19 oktober 2016. De grote kubus met volume 150x150x150 mm³ is aangemaakt op 12 oktober 2016. De massa m van elk monster is voor het uitvoeren van de drukproef gewogen, de drukproeven zijn uitgevoerd op 16 november 2016. De dichtheid ρ van de monsters kan berekend worden aan de hand van volgende formule (24):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (24)$$

Met:

- ρ : de dichtheid van het monster uitgedrukt in kg/m³
- m : de massa van het monster uitgedrukt in kg
- V : het volume van het monster uitgedrukt in m³

Tabel 37: Resultaten drukproeven (*in situ*)

TEST	A	B	C	D	E	F	G	
SAMENSTELLING	2	1	2	4	4	3	1	
MONSTER	1	2	2	2	1	3	1	
AANMAAKDATUM	19-10-2016	19-10-2016	19-10-2016	19-10-2016	19-10-2016	19-10-2016	12-10-2016	
MASSA (16-11-2016)	184,10	248,10	231,80	256,90	256,90	360,30	665,70	g
VOLUME	100 X100 X 100						150 X150 X 150	mm ³
DICHTHEID	184,10	248,10	231,80	256,90	256,90	360,30	197,24	kg/m ³
MAX. KRACHT (F)	0,401	1,570	2,135	3,185	3,299	3,046	0,528	kN
OPPERVLAK (A)	100 X 100	100 X 100	100 X 100	100 X 100	100 X 100	100 X 100	150 X 150	mm ²
MAX. STERKTE	0,040	0,157	0,213	0,318	0,330	0,305	0,023	Mpa
$\sigma = F/A$	0,040	0,157	0,214	0,319	0,330	0,305	0,023	Mpa
VERPLAATSING (U)	breuk	5	15	25	35	27	breuk	mm

De maximale kracht (F) (zie hor. blauwe rij) en maximale sterkte (zie hor. groene rij) zijn resultaten die bekomen zijn door middel van de drukbank. De grootste krachten worden gevonden voor samenstellingen 3 en 4. Er kan ook worden opgemerkt dat er een groot verschil is tussen monster 1 (test A) en 2 (test C) van samenstelling 2. Ondanks dat de dichtheid van test B tot en met E gelijkaardig zijn, verschillen de resultaten van B en C met deze van D en E.

Het oppervlak A geeft de afmetingen weer van het vlak waarop de drukbank een kracht F op uitoefende. Bij de *in situ* gemaakte monsters zijn de oppervlaktes egaal en nauwkeurig afgewerkt. Ter controle wordt de spanning σ berekenen met volgende formule:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (25)$$

Met:

- σ : de spanning uitgedrukt in N/mm²
- F : de kracht uitgedrukt in N
- A : de oppervlakte uitgedrukt in mm²

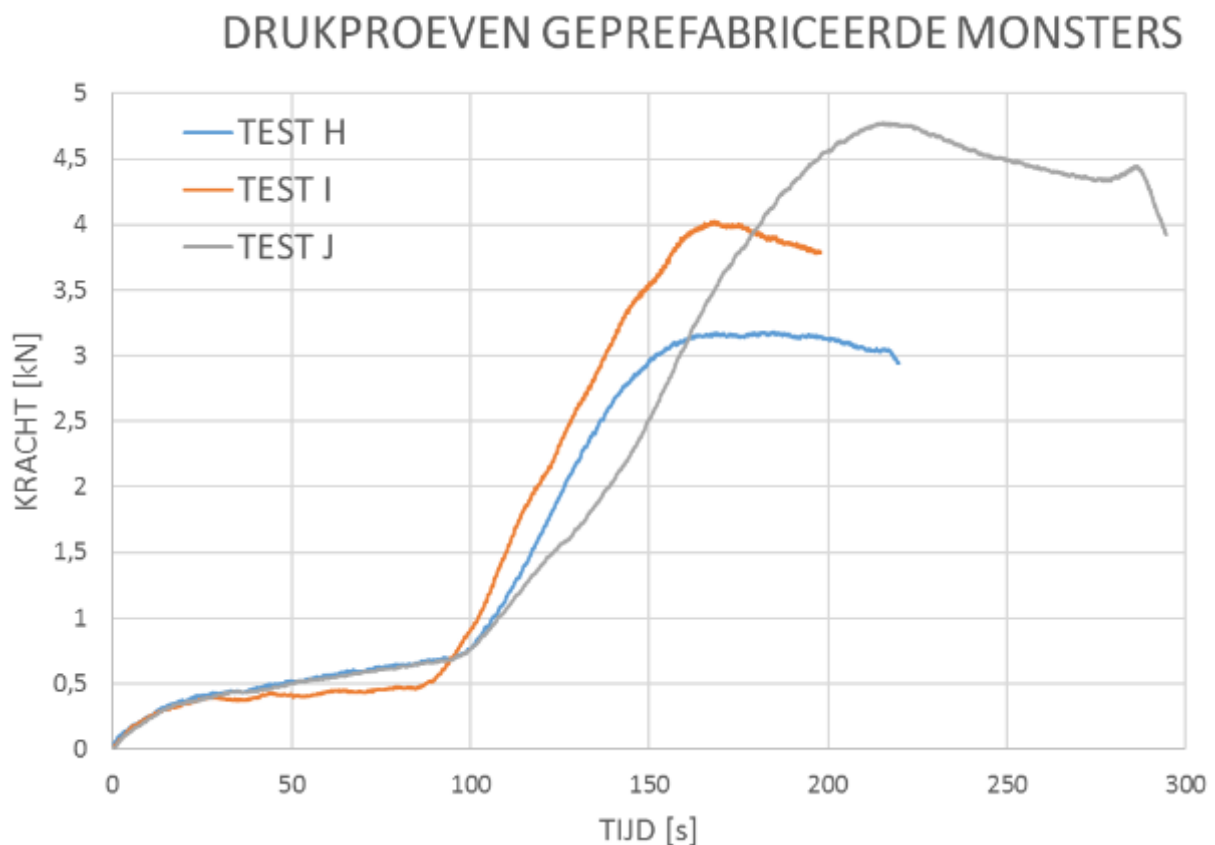
Hieruit blijkt dat de berekende spanning σ zeer goed overeenkomt met de maximale sterkte bekomen van de drukbank.

Na het uitoefenen van elke drukproef wordt ook de verplaatsing handmatig gemeten. Bij proef A en G kan er geen nauwkeurige verplaatsing gemeten worden omdat er breuk is opgetreden. Bij deze proeven worden ook lagere maximale krachten gemeten. Bij de andere proeven van B tot en met F treden er wel gelijkmatige verplaatsingen op over de gehele oppervlakte.

3.3.2 Geprefabriceerde monsters

3.3.2.1 Verloop

Figuur 103 toont het totale verloop van de drukproeven van de geprefabriceerde monsters. In het begin van de proef gaande van 0 tot 30 sec. vertonen de drie monsters een gelijklopend verloop. Vanaf ongeveer 100 sec. vertonen de monsters een relatief recht evenredig stijgend verloop tot ze hun maximale waarde bereiken. De evenredigheidsconstante (mate van stijging) van de drie curves zijn vergelijkbaar ondanks dat test J tussen ongeveer 110 sec. en 130 sec. een minder stijgend verloop kent.



Figuur 103: Verloop drukproeven geprefabriceerde monsters

3.3.2.2 Weergave drukproeven

Figuur 104 geeft een weergave van test H.



Figuur 104: Weergave test H

Figuur 105 geeft een weergave van test I.



Figuur 105: Weergave test I

Figuur 106 geeft een weergave van test J.



Figuur 106: Weergave test J

3.3.2.3 Samenvatting resultaten

In Tabel 38 worden alle resultaten weergegeven van de drukproeven op de geprefabriceerde monsters. Er zijn in totaal drie verschillende monsters gedrukt, hierbij wordt er gebruik gemaakt van een Isohempblok waaruit drie kubussen gezaagd zijn. De monsters hebben ongeveer hetzelfde volume namelijk $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$. De massa van elk monster is voor het uitvoeren van de drukproef gewogen, de drukproeven zijn uitgevoerd op 24 november 2016.

Tabel 38: Resultaten drukproeven geprefabriceerde monsters

TEST	H	I	J	
SAMENSTELLING	ISOHEMPBLOK			
MASSA (24-11-2016)	328,00	454,50	433,20	g
VOLUME	115 X 85 X 80	90 X 115 X 105	105 X 100 X 95	mm^3
DICHTHEID	419,44	418,22	434,29	kg/m^3
MAX. KRACHT (F)	3,182	4,025	4,776	kN
OPPERVLAK (A)	115 X 80	115 X 105	105 X 95	mm^2
MAX. STERKTE	0,141	0,179	0,212	Mpa
$\sigma = F/A$	0,346	0,333	0,479	Mpa
VERPLAATSING	breuk	breuk	breuk	mm

De dichtheid van de monsters wordt berekend op dezelfde manier als in vorig hoofdstuk (zie 3.3.1). Ondanks dat test H een hogere dichtheid vertoont dan test I heeft deze een lagere maximale kracht. Ook bij deze drukproeven kan er weer opgemerkt worden dat een betere verdichting, een grotere maximale kracht met zich meebrengt. Vervolgens kan er worden opgemerkt dat er een grote afwijking is tussen de berekende spanning (σ) en de maximale sterkte gemeten door de drukbank. Tenslotte vertonen alle drie de monsters breuk op het einde van de proef.

3.3.3 Conclusie

De testen voor de monsters *in situ* vertonen in de beginfase tot 80 sec. een gelijkaardig verloop met uitzondering van test A die reeds breuk vertoont. Hierna vertonen alle monsters met uitzondering van test G een relatief recht evenredig stijgend verloop tot ze hun maximale kracht bereiken. Test G vertoont geen stijgend verloop na 80 sec. maar blijft in evenwicht tot wanneer er breuk optreedt (120 sec.). De overige testen B tot en met F vertonen een maximale kracht tussen 1,57 en 3,30 kN. De grootste krachten komen overeen met de monsters van samenstelling 3 en 4. De berekende spanningen komen zeer goed overeen met de gemeten maximale sterkte uit de drukbank.

Voor de prefab monsters loopt de beginfase tot 30 sec. gelijkaardig en vertonen deze vanaf 100 sec. een relatief recht evenredig stijgend verloop tot ze hun maximale waarde bereiken gelegen tussen 3,18 en 4,78 kN. Hierna vertoont de curve een afbuigend verloop. De evenredigheidsconstante van de drie curves zijn vergelijkbaar op test J na, hier kent de curve tussen ongeveer 110 en 130 sec. een minder stijgend verloop.

Bij beide drukproeven kan worden opgemerkt dat een betere verdichting een grotere maximale kracht tot gevolg heeft. Er kan ook worden vastgesteld dat de dichtheden van de geprefabriceerde monsters dicht bij elkaar liggen. Dit in tegenstelling tot de *in situ* gemaakte monsters waar er wel opvallende verschillen zijn.

3.4 Absorptietesten

De resultaten die worden verkregen door het uitvoeren van twee absorptietesten worden in dit hoofdstuk weergegeven en verder in detail besproken. Ten eerste wordt er een korte test gedaan en hiervan worden de resultaten samengevat in Tabel 39 (zie 3.4.1). Daarna wordt er ook een lange absorptietest (zie 3.4.2) uitgevoerd, de resultaten hiervan kan u terugvinden in grafieken (zie Figuur 109 en Figuur 110).

3.4.1 Test 1: korte absorptietest

Tabel 39 geeft de resultaten weer van de korte absorptietest waarbij de monsters gedurende 20 sec. onderwater gedompeld worden. Het natgewicht wordt gewogen na 10, 15, 60 (1 u), 180 (3 u), 1440 (24 u), 9858 (≈ 164 u of ≈ 7 dagen) en 11320 (≈ 189 u of ≈ 8 dagen) minuten. Na het nat wegen van de monsters na 10 en 15 min. wordt er ondervonden dat de samenhang van sommige monsters verminderd. Hierna worden de monsters op een vloertegel geplaatst zodat deze niet meer met de handen vastgenomen moeten worden om te wegen. Hierdoor kan de samenhang van de monsters gegarandeerd blijven ondanks dat sommige al een slechte samenhang vertonen (zie Tabel 39).

Tabel 39: Overzicht korte absorptietest

Samenstelling	Monster	Afmeting [cm]	Drooggewicht [g]	Natgewicht [g] (20 sec. handmatig onderdompelen)							Samenhang na onderdompelen
			24 uur in oven (+/-50°C)	10' (17/11)	15' (17/11)	60' (17/11)	180' (17/11)	1440' (18/11)	9858' (24/11)	11320' (25/11)	
1	5	10x10x10	166,30	276,70	274,60	272,70	268,90	239,40	185,20	175,20	niet representatief
2	1	15x15x15	721,10	1295,50	1282,80	1280,70	1273,90	1211,60	1026,30	995,00	heel goed
2	5	10x10x10	184,50	362,30	333,00	346,30	343,20	312,40	242,10	231,30	slecht
3	1	15x15x15	784,10	1179,20	1167,30	1164,20	1158,60	1103,30	936,00	906,20	slecht
3	5	10x10x10	246,90	454,60	403,80	414,80	412,10	383,50	287,70	278,40	matig
4	2	15x15x15	706,00	1226,20	1213,60	1198,40	1190,60	1126,50	946,70	917,40	goed
4	3	10x10x10	188,40	348,40	319,50	339,70	336,50	305,90	241,70	233,30	slecht
4	4	10x10x10	188,80	393,60	395,70	394,70	391,60	359,70	272,70	261,90	goed
4	5	10x10x10	189,00	348,00	349,30	354,20	351,00	319,60	246,80	235,00	matig

De monsters worden gewogen totdat het gewichtsverschil van het monster, $\Delta massa_{monster}$ [%]:

$$\Delta massa_{monster} = \frac{natgewicht_{11320'} - natgewicht_{9858''}}{drooggewicht} = 4 \text{ à } 6 \% \quad (26)$$

De waterabsorberende factor ω van de verschillende monsters wordt bepaald door:

$$\omega = \frac{natgewicht_{10'}}{drooggewicht} = 1,5 \text{ à } 2,08 \quad (27)$$

Tabel 40 geeft de water absorberende factor ω weer van alle monsters, bepaald volgens bovenstaande formule (27). Er is te zien dat samenstelling 1 (S1.5) een opvallend lagere absorberende factor heeft dan de andere monsters. Verder valt het ook op dat de monsters met grotere afmetingen een lagere absorberende factor hebben dan de kleine monsters. Tenslotte vertoont samenstelling 3 een lagere factor dan samenstelling 2 en 4 waarbij deze een gelijkaardige factor vertonen.

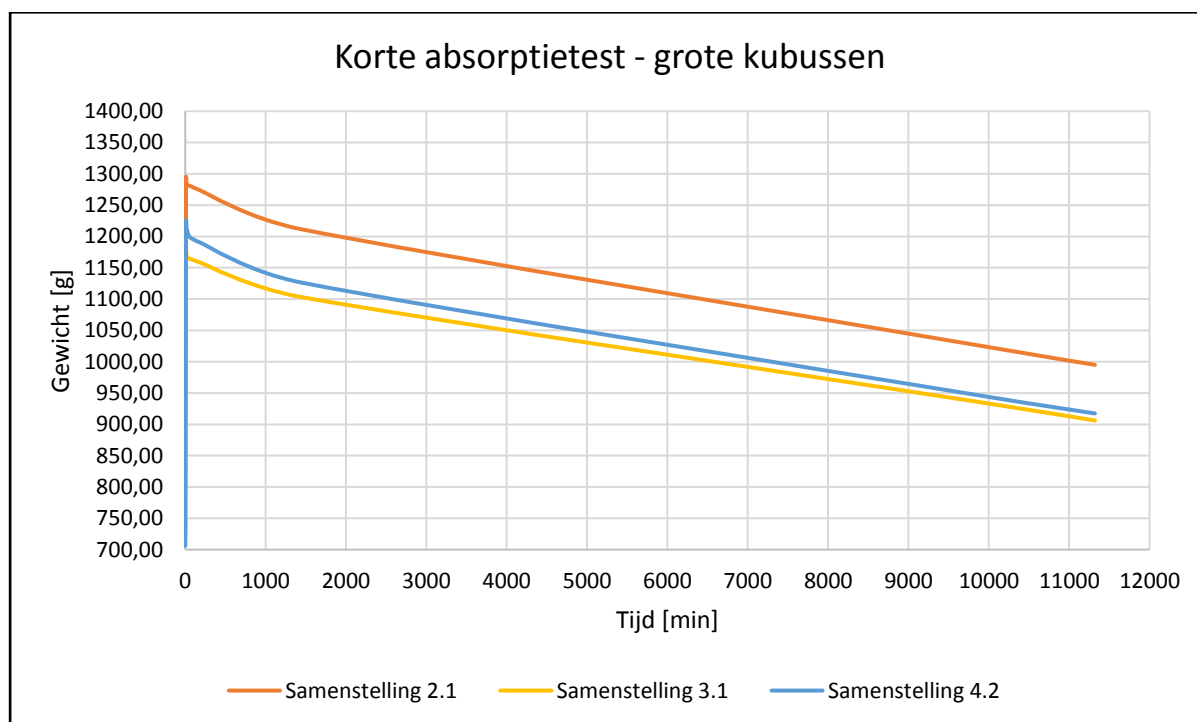
Tabel 40: Water absorberende factor

Samenstelling	Monster	Afmeting [cm]	Absorberend vermogen
1	5	10x10x10	1,66
2	1	15x15x15	1,80
2	5	10x10x10	1,96
3	1	15x15x15	1,50
3	5	10x10x10	1,84
4	2	15x15x15	1,74
4	3	10x10x10	1,85
4	4	10x10x10	2,08
4	5	10x10x10	1,84

Figuur 107 geeft de korte absorptietest weer van de drie grote kubussen. Het gaat hier om monsters van samenstelling 2, 3 en 4. Zoals de grafiek (Zie Figuur 107) weergeeft kan er opgemerkt worden dat er drie samenstellingen een gelijkaardig gewichtsverloop kennen. Samenstelling 2.1 (oranje lijn) weegt na 10 min. 1295,50 g of heeft met andere woorden na deze periode ongeveer 1,8 keer zijn drooggewicht opgenomen aan water. Na 8 dagen (11320 min.) bevat het monster nog steeds 1,38 keer zijn drooggewicht aan water. Verder vertoonde dit monster ook een zeer goede samenhang gedurende deze periode.

Wanneer samenstelling 3.1 (gele lijn) in rekening wordt gebracht kan er vastgesteld worden dat deze droog 784,10 g weegt en nat 1179,20 g weegt. Na 10 min. heeft dit monster dus 1,50 keer zijn drooggewicht opgenomen aan water. Verder is het opmerkelijk dat het drooggewicht groter is dan die van S2.1 en S4.2 maar het natgewicht lager is dan die van de andere twee monsters.

Samenstelling 4.2 (blauwe lijn) neemt 1,74 keer zijn drooggewicht op na 10 min. en vertoont een goede samenhang. Hieruit kan vastgesteld worden dat samenstelling 2 van de grote kubussen (Leemniscaat, zonder additief) beschikt over het grootst absorberend vermogen (factor 1,80) van de drie samenstellingen.

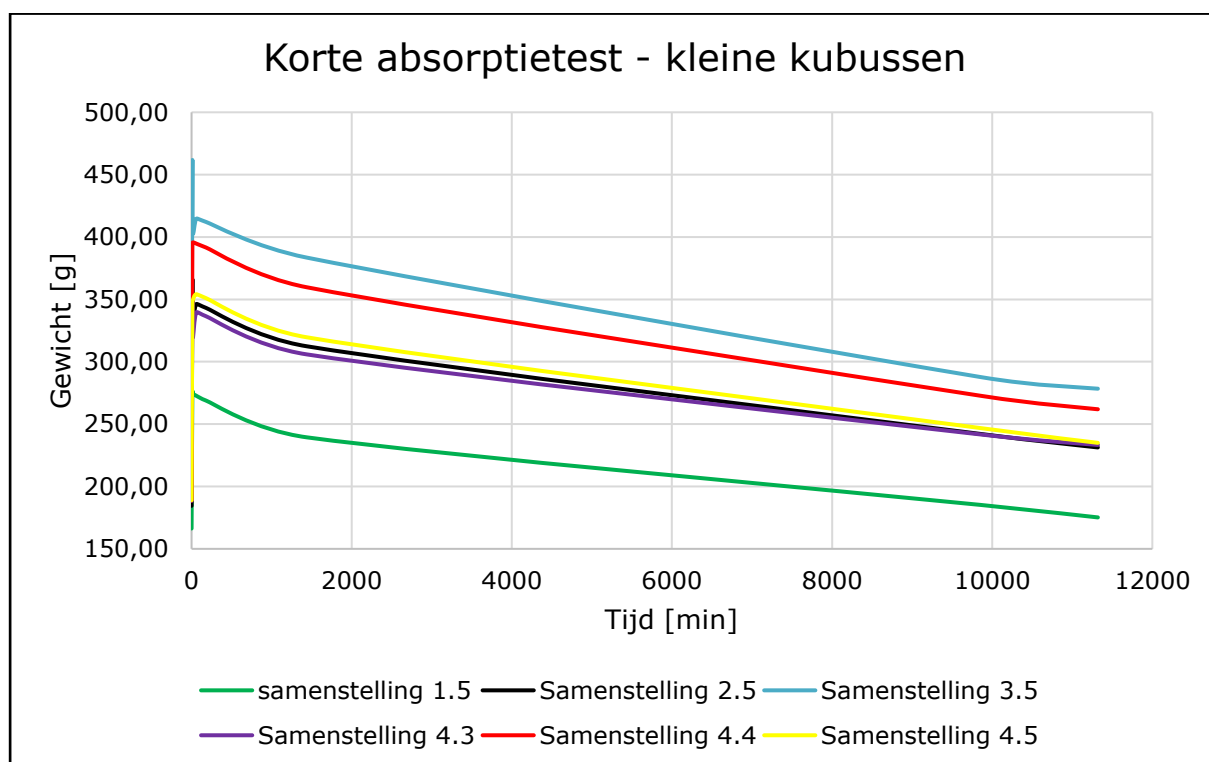


Figuur 107: Korte absorptietest - grote kubussen

Figuur 108 geeft de korte absorptietest weer van zes kleine kubussen. Het gaat hier om monsters van alle vier de samenstelling. Zoals de grafiek (Zie Figuur 108) weergeeft kan er opgemerkt worden dat de samenstellingen 4.3, 4.5 en 2.5 een gelijkaardig gewichtsverloop kennen. Hun drooggewicht zijn respectievelijk 188,40, 189,00 en 184,50 g en na 10 min. hebben deze monsters een natgewicht van 348,40; 348 en 362 g. Dit komt overeen met factoren van 1,85; 1,84 en 1,96 keer hun drooggewicht. Hun nat gewicht na 8 dagen bedraagt 233,30; 235,00 en 231,30 gram. Deze monsters vertonen gedurende de test eerder een matig tot slechte samenhang.

Samenstelling 3.5 vertoont een hoger drooggewicht t.o.v. de andere monsters en kent daarom gewichten (nat) die hoger liggen gedurende de proef. Na 10 min. heeft dit monster 1,84 keer zijn drooggewicht opgenomen aan water.

Samenstelling 4.4 vertoont het grootst absorberend vermogen na 10 min., namelijk een factor van 2,08 keer zijn drooggewicht. Daarentegen vertoont samenstelling 1.5 een zeer lage factor van 1,5 keer zijn drooggewicht, de samenhang van dit monster was gedurende de test ook niet representatief. Hieruit kan vastgesteld worden dat samenstelling 4 (Leemniscaat, additief: Hempad+) van de kleine kubussen beschikt over het grootst absorberend vermogen (factor van 2,08) van de drie samenstellingen



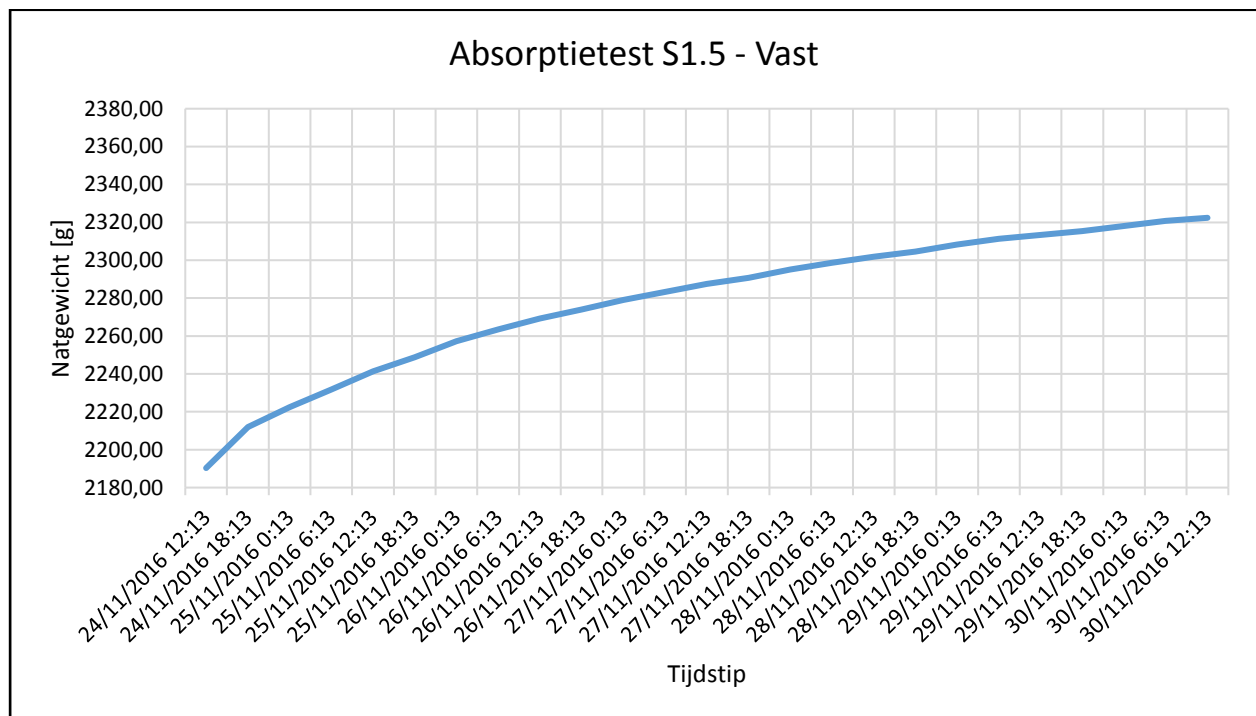
Figuur 108: Korte absorptietest - kleine kubussen

3.4.2 Test 2: lange absorptietest

Tijdens deze test worden de monsters gewogen totdat het gewichtsverschil van het monster kleiner is dan 0,1% (tussen de opeenvolgende metingen) van het gewicht bij de start van de absorptietest. Het drooggewicht van de monsters na het drogen bedragen 206,6 (vast) en 180 (los) gram. Bij de start worden deze in een mandje geplaatst van 807,2 gram en wordt op het monster een contragewicht geplaatst van 2003 gram om het opdrijven tegen te gaan.

Figuur 109 geeft het gewichtsverloop na het onderdompelen van monster 5 van samenstelling 1 (vast verdicht) gedurende 6 dagen weer. Door het laattijdig starten van de *software* kan de gewichtsmeting van de beginfase (onderdompeling) niet in kaart worden gebracht.

Zoals de grafiek weergeeft kan er vastgesteld worden dat het gewicht van het monster toeneemt in de loop van de tijd. Gedurende de eerste 24 u neemt het gewicht sterk toe met ongeveer 51 gram. Hierna neemt het gewicht evenredig toe en na 6 dagen bedraagt het totaal opgenomen nat gewicht 132,10 gram.



Figuur 109: Lange absorptietest S1.5, vaste verdichting

Het waterabsorberend vermogen ω van dit monster bij deze test wordt bepaald door:

$$\omega = \frac{\text{verzadigd gewicht [g]}}{\text{drooggewicht [g]}} = \frac{701}{206,8} = 3,39 \quad (28)$$

Het verzadigd gewicht wordt bekomen door het monster meteen na de test te wegen. Hieruit blijkt dat voor een vast verdicht monster van samenstelling 1 het drooggewicht met een factor van 3,39 vermeerderd na 6 dagen onderdompelen in water.

Figuur 110 geeft bovenaan de beginfase (duur: 30 min.) en onderaan het vervolg van het gewichtsverloop weer van monster 1 van samenstelling 1 (los verdicht), dit gedurende 7 dagen. In de beginfase kan er een val opgemerkt worden (758,4 g). Het monster wil namelijk opdrijven, deze opwaartse massa is even groot als het gewicht van het verplaatste water. In dit geval heeft het monster een volume V van 1000 cm^3 en bedraagt de massadichtheid ρ van water 1000 kg/m^3 , hierdoor komt dit neer op:

$$m = \rho \cdot V = 1000 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg} \quad (29)$$

Verder wordt er een contragewicht (uit staal) op het monster geplaatst om het opdrijven tegen te gaan. Aangezien de dichtheid van staal groter is als die van water gaat het gewicht willen zinken. In dit geval heeft het contragewicht een volume V van 257 cm^3 , hierdoor komt de neerwaartse massa neer op:

$$m = \rho \cdot V = 257 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 0,257 \text{ kg} \quad (30)$$

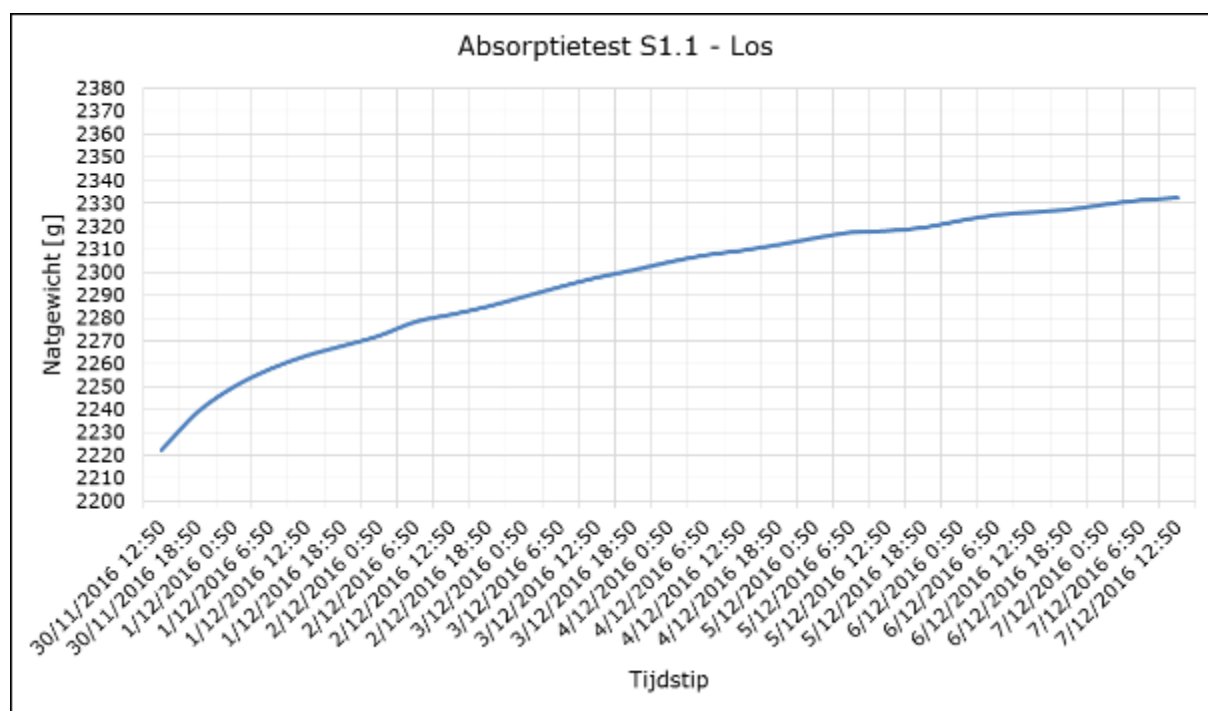
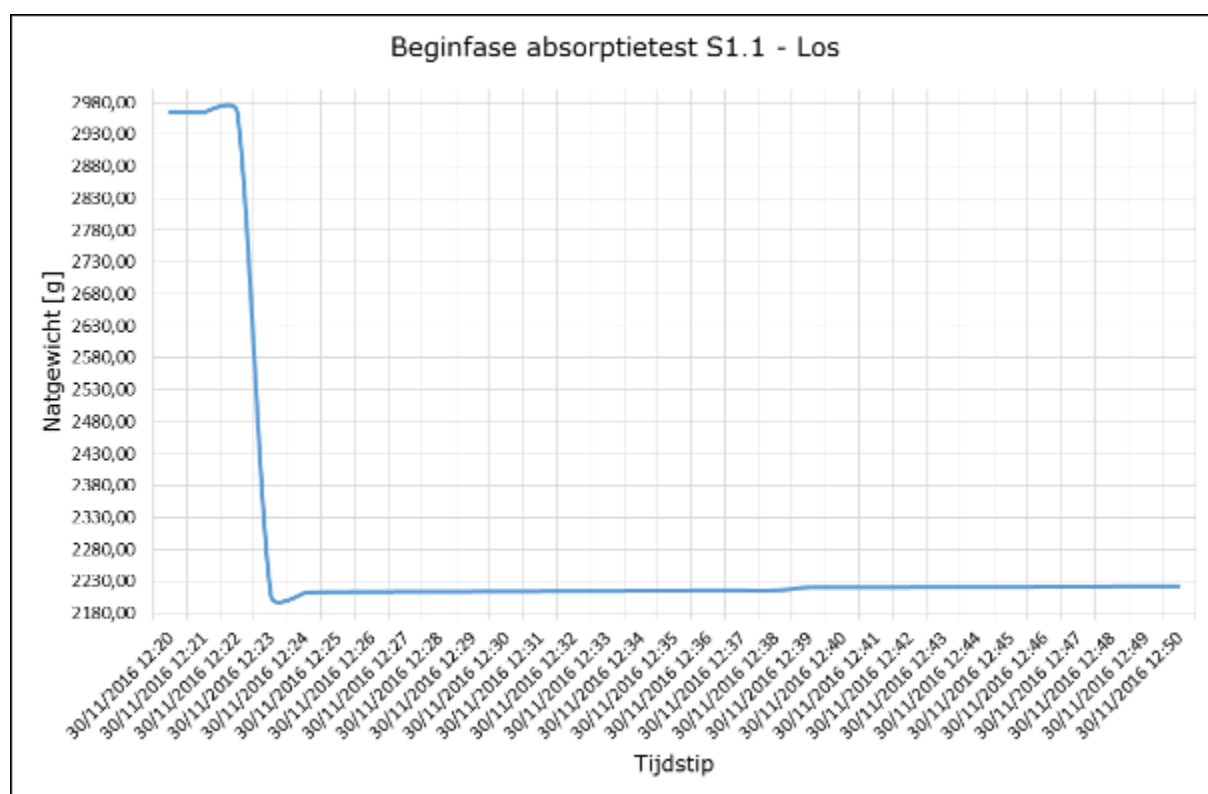
De resultante (val) van beide krachten komt dus neer op 743 g. Na deze val neemt het gewicht langzaam toe doordat het water geabsorbeerd wordt door het monster. Op de onderste grafiek (Figuur 110) neemt gedurende de eerste 24u het gewicht sterk toe met ongeveer 41 gram. Hierna neemt het gewicht evenredig toe en na respectievelijk 6 en 7 dagen bedraagt het totaal opgenomen gewicht 103,80 en 124,20 gram.

Het waterabsorberend vermogen ω van dit monster bij deze test wordt bepaald door:

$$\omega = \frac{\text{verzadigd gewicht [g]}}{\text{drooggewicht [g]}} = \frac{603,4}{180} = 3,35 \quad (31)$$

Het verzadigd gewicht wordt bekomen door het monster meteen na de test te wegen. Hieruit blijkt dat voor het los verdicht monster van samenstelling 1 het drooggewicht met een factor van 3,35 vermeerderd na 7 dagen onderdompelen in water.

Wanneer het absorberend vermogen vergeleken wordt voor de twee monsters met dezelfde samenstelling maar verschillende verdichtingswijze, neemt het vast verdicht monster in beperkte mate meer water op dan het los verdicht monster. Dit met een onderdompelingsduur van 6 dagen in vergelijking met het los monster dat zijn absorberend vermogen van 3,35 bereikte na 7 dagen.



Figuur 110: Lange absorptietest S1.1 - Losse verdichting

3.4.3 Conclusie

De drie grote kubussen ($15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$) vertonen een gelijkaardig gewichtsverloop bij de korte absorptietest. De drie monsters S2.1, S3.1 en S4.2 bevatten respectievelijk een drooggewicht van 721,10; 784,10 en 706 g. De water absorberende factor van deze monsters bedragen respectievelijk 1,80; 1,50 en 1,74. Hieruit kan vastgesteld worden dat ondanks monster S3.1 het grootste drooggewicht bevat toch beschikt over de laagst water absorberende factor.

Voor de zes kleine kubussen ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) vertonen alle monsters hetzelfde verloop. Waarbij monsters S2.5, S4.3 en S4.5 hetzelfde gewicht (348 tot 362 g) hebben in de beginfase na absorptie. Monster S1.5 vertoont het laagste gewicht (276,70 g) terwijl S3.5 en S4.4 een hoger gewicht (respectievelijk 454,60 en 393,60 g) vertonen in de beginfase na absorptie. Hieruit blijkt dat de grootste water absorberende factor overeenkomt met samenstelling 4 (S4.4), namelijk een factor van 2,08. Verder kan er ook opgemerkt worden dat voor samenstelling 4 een gelijkaardig drooggewicht vertonen maar dat S4.4 veel meer water absorbeert.

Voor de lange absorptietest bij het monster volgens vaste verdichting neemt het gewicht gedurende de eerste 24 u sterk toe met ongeveer 51 gram. Daarna neemt het gewicht evenredig toe tot een totaal opgenomen gewicht van 132,10 gram na 6 dagen. Het waterabsorberend vermogen van dit monster bedraagt 3,39 keer zijn drooggewicht na 6 dagen.

De lange absorptietest bij de losse verdichting toont aan dat het gewicht sterk toe neemt met ongeveer 41 gram gedurende de eerste 24 u. Hierna neemt het gewicht evenredig toe en na 6 dagen bedraagt het totaal opgenomen nat gewicht 103,80 gram. Het waterabsorberend vermogen van dit monster bedraagt 3,35 keer zijn drooggewicht na 7 dagen.

Wanneer het absorberend vermogen vergeleken wordt voor de twee monsters met dezelfde samenstelling kan er geconcludeerd worden dat het monster met vaste verdichting een grotere absorptie heeft gedurende de eerste 24 uur. Ook na 6 dagen is het absorberend vermogen groter voor de vaste verdichting. Zelfs na 7 dagen bereikt het monster met losse verdichting niet het absorberend vermogen van het vast verdichte monster na 6 dagen.

3.5 Capillariteitstesten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de capillariteitstesten weergegeven en verder in detail besproken. Ten eerste wordt de eerste proef weergegeven waarbij de 4 grote kubussen ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$) worden beproefd en daarna wordt dezelfde test herhaald maar met 3 kleine kubussen ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$) en één grote kubus.

3.5.1 Proef 1

Figuur 111 geeft een weergave van de eerste capillariteitstest in het begin van de proef (24/11 - 11:40 u). Beide zijden van de monsters wordt weergegeven. Er is duidelijk te merken dat het vochtfront in de monsters al een bepaalde hoogte heeft bereikt. De bereikte hoogte voor alle monsters zijn ongeveer gelijk.



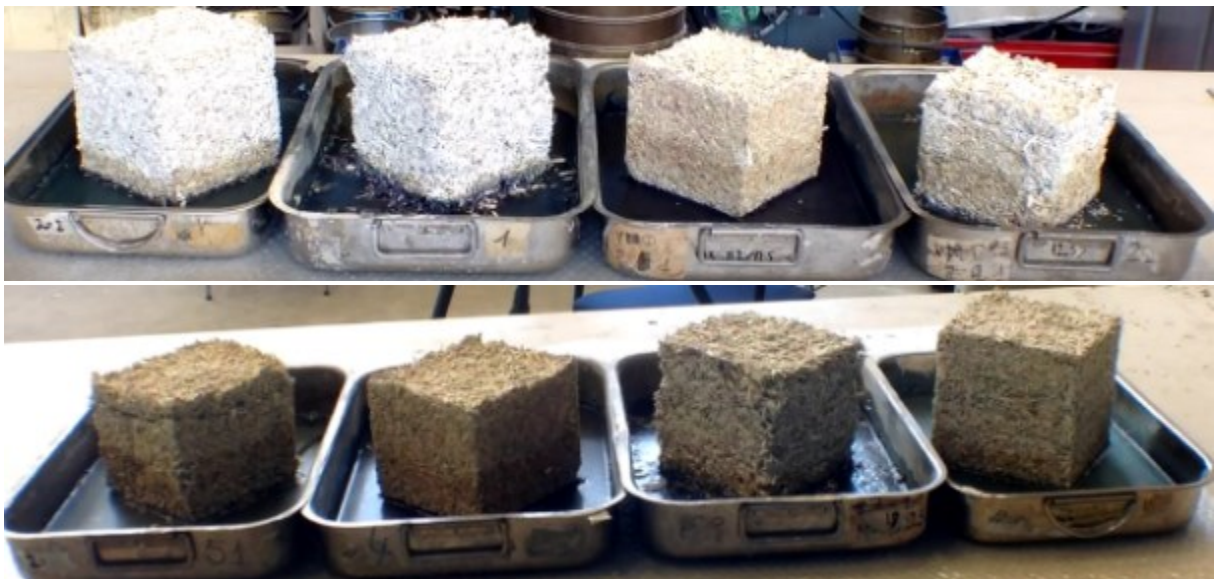
Figuur 111: Begin proef 1, bovenaan van links naar rechts: S1.2, S1.1, S3.2, S3.1 en onderaan van links naar rechts: S3.1, S3.2, S1.1 en S1.2

Figuur 112 geeft een weergave van de eerste capillariteitstest in het midden van de proef (12 u later). Er is een duidelijke verhoging van het vochtfront waar te nemen bij de monsters van samenstelling 3 (de twee rechtse op bovenste figuur en de twee linkse op de onderste figuur). Dit in tegenstelling tot de andere monsters van samenstelling 1 waarbij er nauwelijks een verhoging van het vochtfront is waar te nemen.



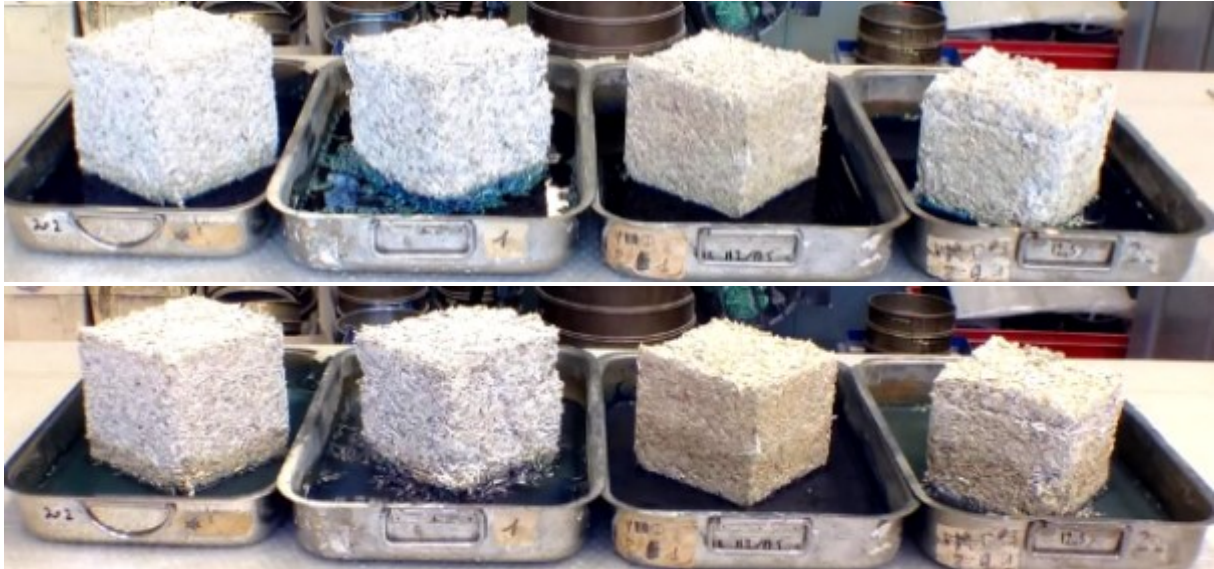
Figuur 112: Midden proef 1, bovenaan van links naar rechts: S1.2, S1.1, S3.2, S3.1 en onderaan van links naar rechts: S3.1, S3.2, S1.1 en S1.2

Figuur 113 geeft een weergave van de eerste capillariteitstest op het einde van de proef (24 u later). Er is op te merken dat de hoogte van het vochtfront van de monsters nauwelijks nog is gestegen in het laatste deel van de proef.



Figuur 113: Einde proef 1, bovenaan van links naar rechts: S1.2, S1.1, S3.2, S3.1 en onderaan van links naar rechts: S3.1, S3.2, S1.1 en S1.2

Figuur 114 toont de snelle verhoging aan van het vochtfront in het begin van de proef. Bovenaan de figuur (zie Figuur 114) is de proef begonnen en is er meteen een verhoging van het vochtfront waar te nemen. Een korte periode na het starten (≈ 1 u later) van de proef heeft het vochtfront al een opmerkelijke hoogte bereikt (zie onderaan Figuur 114). Merk op dat er een groot verschil in hoogte is waar te nemen tussen de bovenste en de onderste figuur (zie Figuur 114).



Figuur 114: Hoogte vochtfront, van links naar rechts: S1.2, S1.1, S3.2 en S3.1

3.5.1.1 S1.1 los

Figuur 115 geeft weer hoe het eerste monster van samenstelling 1 eruitzag vanbinnen na het uitvoeren de proef. Er is duidelijk te zien dat het monster zeer wit ziet vanbinnen en dat er nauwelijks vocht is opgenomen geweest. Op voorgaande figuren was ook al waar te nemen dat het vochtfront in dit monster een zeer beperkte hoogte bereikte.



Figuur 115: S1.1 los

3.5.1.2 S1.2 vast

Figuur 116 geeft weer hoe het tweede monster van samenstelling 1 eruitzag vanbinnen na het uitvoeren de proef. Er is weer duidelijk te zien dat het monster zeer wit ziet vanbinnen en dat er weinig vocht is opgenomen geweest. Het vochtfront (zie zwarte lijn Figuur 116) in dit monster is wel beter waar te nemen dan bij het voorgaande monster. Op voorgaande figuren was ook al waar te nemen dat het vochtfront in dit monster (S1.2) een beperkte hoogte bereikte maar wel hoger dan bij S1.1 los.



Figuur 116: S1.2 vast

3.5.1.3 S3.1 los

Figuur 117 geeft weer hoe het eerste monster van samenstelling 3 eruitzag vanbinnen na het uitvoeren de proef. Merk op dat er een veel grotere hoeveelheid vocht is opgenomen dan bij voorgaande monsters van samenstelling 1. Het vochtfront (zie zwarte lijn Figuur 117) heeft hierbij een opmerkelijke hoogte bereikt. Dit was ook al merkbaar op Figuur 113.



Figuur 117: S3.1 los

3.5.1.4 S3.2 vast

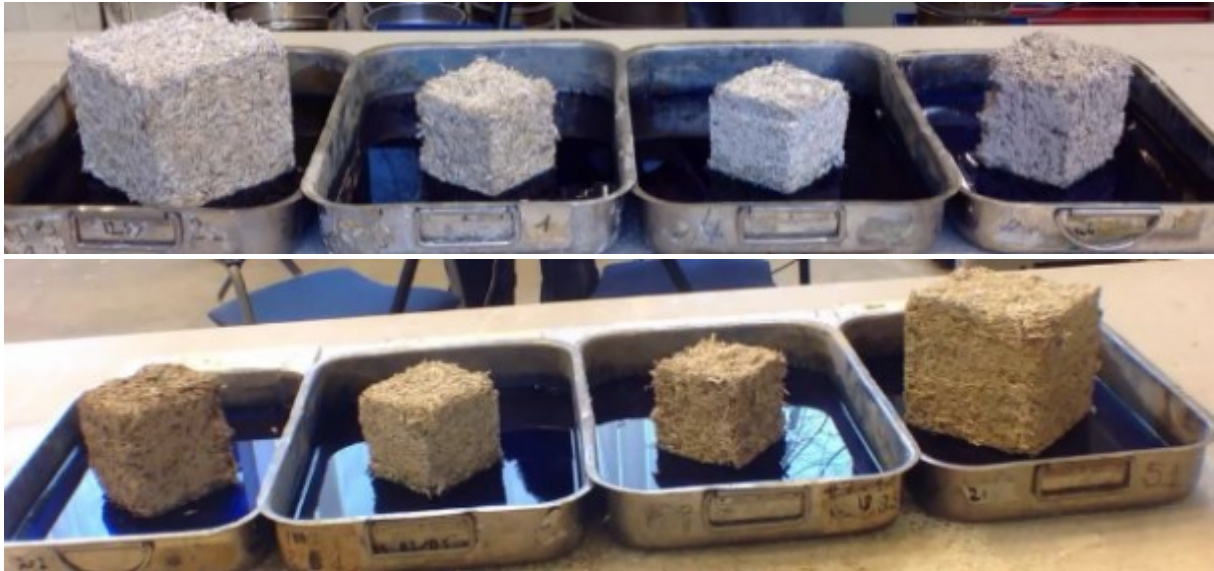
Figuur 118 geeft weer hoe het tweede monster van samenstelling 3 eruitzag vanbinnen na het uitvoeren de proef. Merk op dat er weer een veel grotere hoeveelheid vocht is opgenomen dan bij voorgaande monsters van samenstelling 1. Het vochtfront (zie zwarte lijn Figuur 118) heeft hierbij weer een opmerkelijke hoogte bereikt vergelijkbaar met dat van 3.1 los. Dit was ook al merkbaar op Figuur 113.



Figuur 118: S3.2 vast

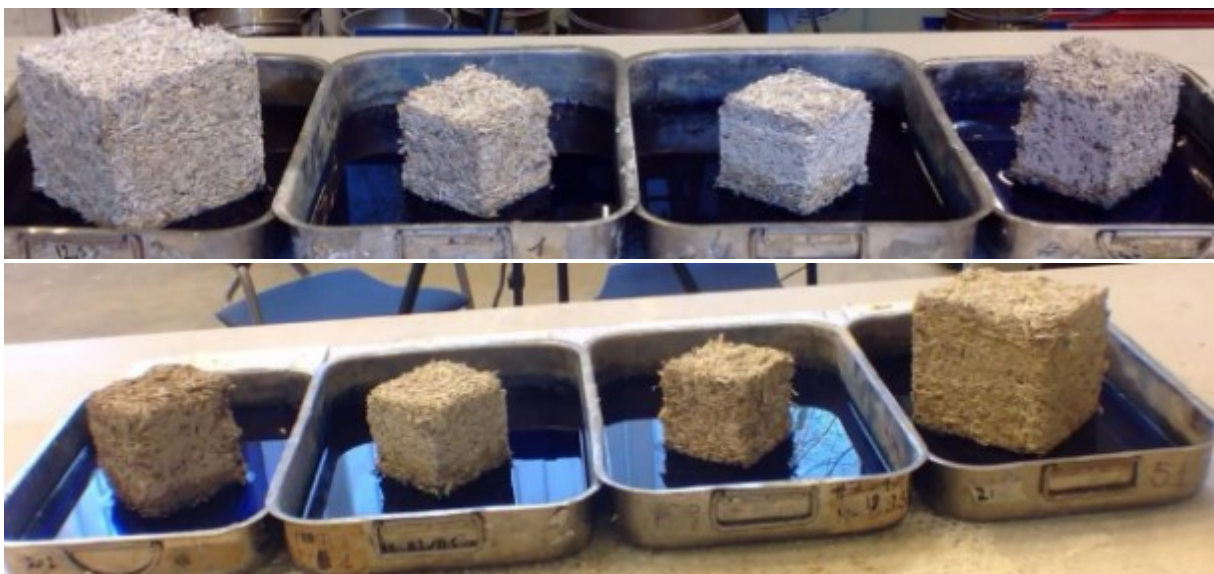
3.5.2 Proef 2

Figuur 119 geeft een weergave van de tweede capillariteitstest in het begin van de proef (25/11 – 13:55 u). Beide zijden van de monsters wordt weergegeven. Er is nog geen opmerkelijke vochtopname opgetreden bij alle monsters. Enkel bij S1.4 bovenaan is er een vochtfront merkbaar en ook de Isohemp links onderaan de figuur is er een zeer klein vochtfront merkbaar in het begin van de proef.



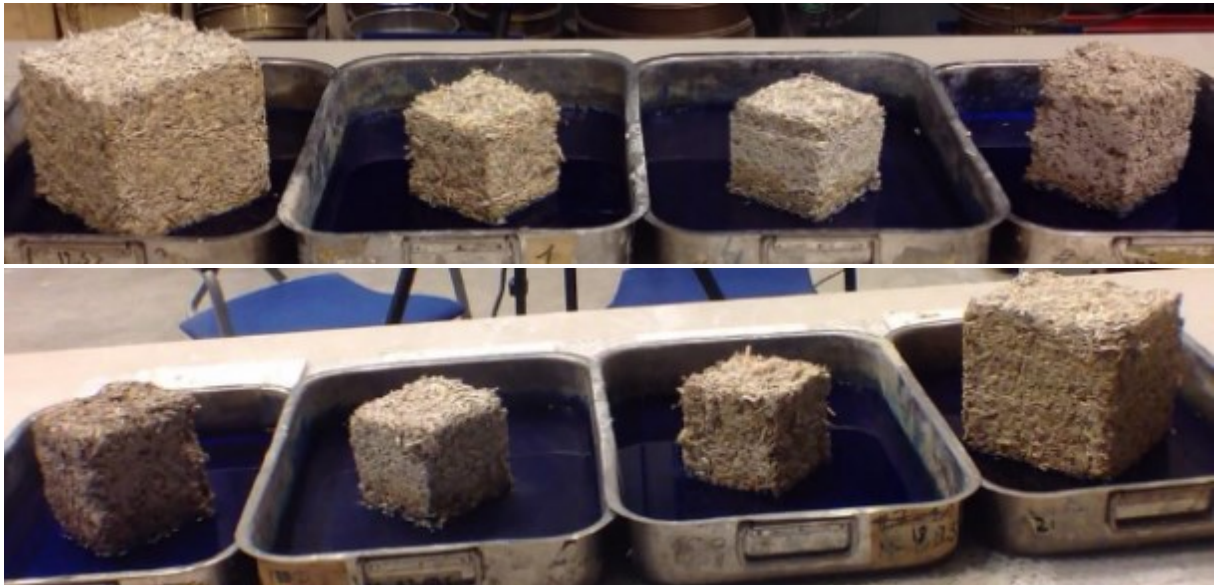
Figuur 119: Begin proef 2, bovenaan van links naar rechts: S2.1, S4.4, S1.4, Isohemp en onderaan van links naar rechts: Isohemp, S1.4, S4.4 en S2.1

Figuur 120 geeft een weergave van de tweede capillariteitstest na één uur. Merk op dat het vochtfront bij de Isohemp en S1.4 opmerkelijk gestegen zijn en dat bij de andere monsters er geen verschil op te merken is.



Figuur 120: Proef 2 na één uur, bovenaan van links naar rechts: S2.1, S4.4, S1.4, Isohemp en onderaan van links naar rechts: Isohemp, S1.4, S4.4 en S2.1

Figuur 121 geeft een weergave van de tweede capillariteitstest in het midden van de proef (≈ 58 u). Er is weer een verhoging van het vochtfront opgetreden bij de Isohemp en S1.4. Bij de andere monsters, namelijk S2.1 en S4.4, is er in het midden van de proef nog geen vochtfront merkbaar.



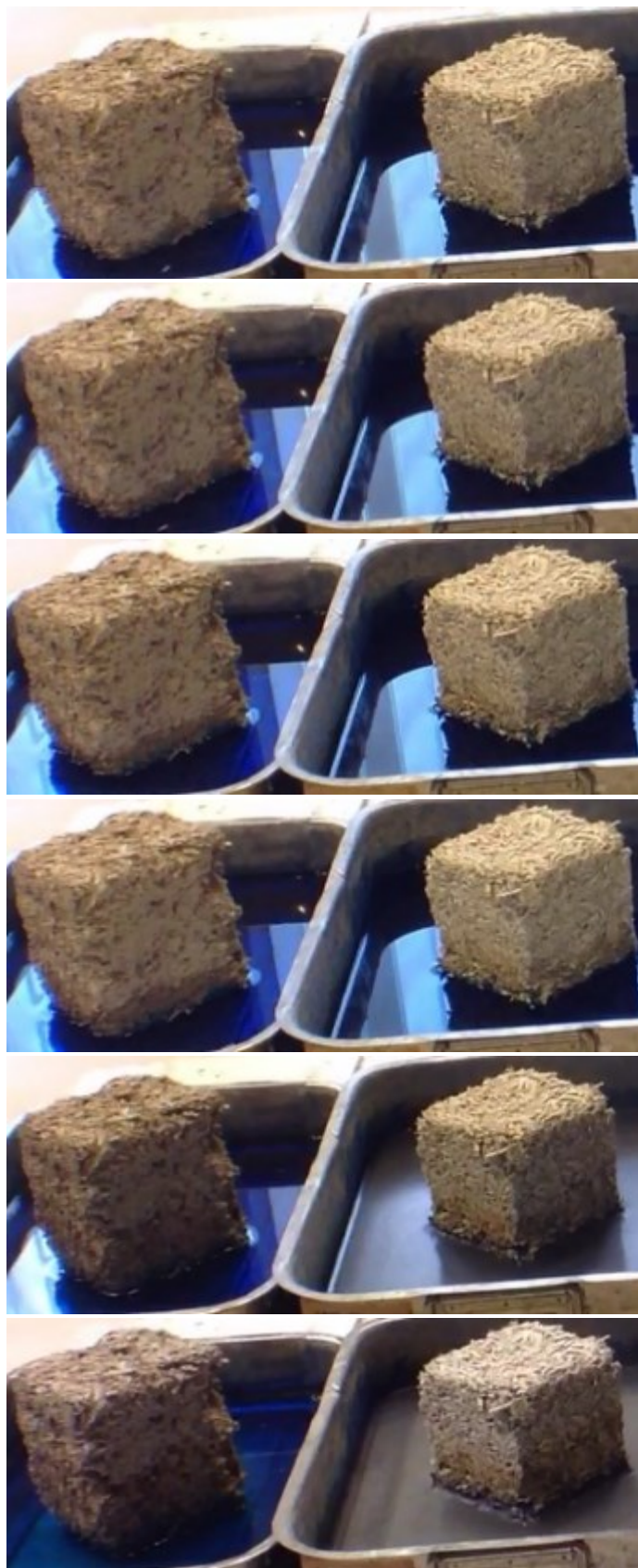
Figuur 121: Midden proef 2, bovenaan van links naar rechts: S2.1, S4.4, S1.4, Isohemp en onderaan van links naar rechts: Isohemp, S1.4, S4.4 en S2.1

Figuur 122 geeft een weergave van de tweede capillariteitstest op het einde van de proef (30/11 – 11:16 u). Er is op te merken dat de hoogte van het vochtfront van alle monsters nog is gestegen in het laatste deel van de proef. Dus bij de Isohemp en S1.4 is het vochtfront nog verder gestegen ten opzichte van het midden van de proef. Bij de andere monsters, namelijk S2.1 en S4.4, is er voor de eerste keer een merkbaar vochtfront opgetreden.



Figuur 122: Einde proef 2, bovenaan van links naar rechts: S2.1, S4.4, S1.4, Isohemp en onderaan van links naar rechts: Isohemp, S1.4, S4.4 en S2.1

Figuur 123 toont de hoogte van het vochtfront bij de Isohemp en S1.4 respectievelijk vanaf het begin van de proef (bovenste), na enkele minuten, na één half uur, na één uur, in het midden van de proef en op het einde van de proef (onderste).



Figuur 123: Hoogte vochtfront bij Isohemp (links) en S1.4 (rechts)

3.5.2.1 S2.1 los

Figuur 124 geeft weer hoe het eerste monster van samenstelling 2 eruitzag vanbinnen na het uitvoeren de proef. Er is te zien dat het monster zeer wit ziet vanbinnen en dat er weinig vocht is opgenomen geweest. Het vochtfront (zie zwarte lijn Figuur 124) is vrij goed waarneembaar maar is gedurende de proef zeer weinig gestegen. Op voorgaande figuren was ook al waar te nemen dat het vochtfront in dit monster een zeer beperkte hoogte bereikte.



Figuur 124: S2.1 groot

3.5.2.2 S4.4 los

Figuur 125 geeft weer hoe het vierde monster van samenstelling 4 eruitzag vanbinnen na het uitvoeren de proef. Er is duidelijk te zien dat het monster zeer wit ziet vanbinnen en dat er weinig vocht is opgenomen geweest. Het vochtfront (zie zwarte lijn Figuur 125) in dit monster is goed waarneembaar maar niet veel gestegen gedurende de proef. Op voorgaande figuren was ook al waar te nemen dat het vochtfront in dit monster een beperkte hoogte bereikte.



Figuur 125: S4.4 los

3.5.2.3 S1.4 los

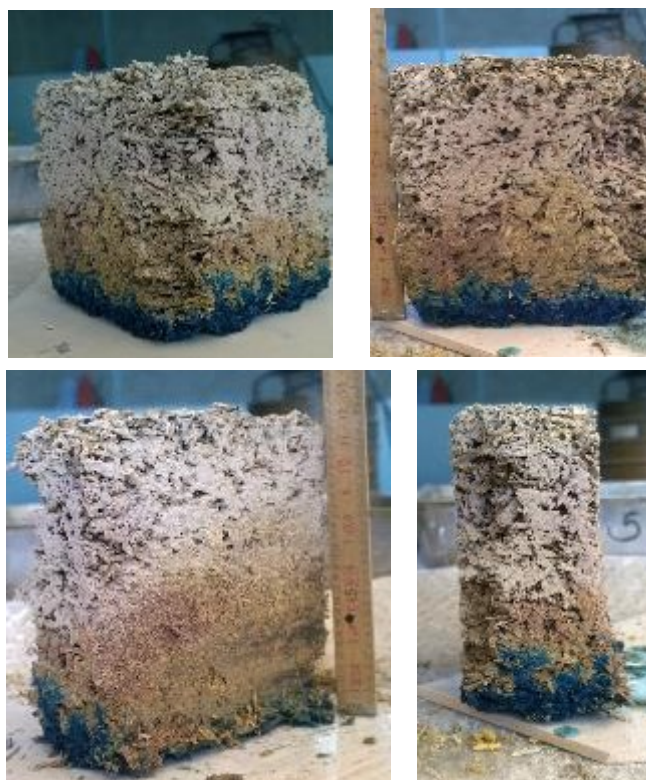
Figuur 126 geeft weer hoe het vierde monster van samenstelling 1 eruitzag vanbinnen na het uitvoeren de proef. Merk op dat er een veel grotere hoeveelheid vocht is opgenomen dan bij voorgaande monsters van proef 2. Het vochtfront is zeer goed waarneembaar en heeft hierbij een opmerkelijke hoogte bereikt. Dit was ook al merkbaar op Figuur 122.



Figuur 126: S1.4 los

3.5.2.4 Isohemp

Figuur 127 geeft weer hoe het Isohemp-monster eruitzag vanbinnen na het uitvoeren de proef. Merk op dat er een grote hoeveelheid vocht is opgenomen. Het vochtfront is ook hier zeer goed waar te nemen en heeft hierbij ook een opmerkelijke hoogte bereikt. Dit was ook al merkbaar op Figuur 122.



Figuur 127: Isohemp

3.5.3 Conclusie

De eerste proef toont aan dat de monsters uit samenstelling 3 het hoogste vochtfront vertonen. Verder vertonen de monsters van samenstelling 1 nauwelijks een verhoging van het vochtfront. Daarnaast vertoont het vast verdicht monster van samenstelling 1 een hoger vochtfront dan dat van het los verdicht monster. Bij samenstelling 3 is er nauwelijks een verschil tussen vast of los.

Gedurende de beginfase van de proef stijgt het vochtfront zeer snel terwijl na 12 uur nog nauwelijks een stijging is op te merken. Na de proef worden de monsters verticaal doorgesneden en kan hieruit vastgesteld worden dat het vochtfront gelijkmatig over de doorsnede stijgt.

Voor de tweede proef vertonen alle monsters nauwelijks tot geen vochtopname tijdens de beginfase van de proef. Na één uur is het vochtfront bij S1.4 en de Isohemp opmerkelijk gestegen ten opzichte van de andere twee monsters. Na ongeveer 58 uur stijgt het vochtfront bij dezelfde twee monsters. Gedurende het laatste deel (58 uur) van de proef is het vochtfront van alle monsters verder gestegen maar in beperkte mate. De uiteindelijk stijghoogte na 117 uur bedraagt 6 cm voor het Isohemp-monster.

4 Discussie

In dit hoofdstuk wordt de betrouwbaarheid van de onderzoeksopzet toegelicht. Verder worden de resultaten besproken waarbij aangegeven wordt of deze overeenkomen met de verwachtingen. Hierna worden de mogelijke beperkingen van dit onderzoek aangehaald. Tenslotte worden er suggesties gegeven voor een eventueel vervolgonderzoek.

4.1 Resultaten

De *in situ* metingen zijn in *real life* omstandigheden uitgevoerd bij twee verbouwingen. Hierdoor zijn de binnen- en buitencondities alsook de bouwschil in het onderzoek realistisch, dit in tegenstelling tot laboratoriumproeven. De metingen gebeuren door middel van een professioneel gekalibreerde meettoestel met een nauwkeurigheid van 1,5 +1,5 % van de meting en 0,3 °C [21]. Deze metingen worden vergeleken met simulaties uit de WUFI®-software. De versie van deze software is gratis en daardoor eerder beperkt in uitvoeringsmogelijkheden. Daarnaast worden er ook proeven op kalkhennepmonsters uitgevoerd in een laboratorium. Hiervoor worden verschillende monsters zelf handmatig aangemaakt en verdicht waardoor afwijkingen kunnen optreden. Verder worden in het laboratorium toestellen gebruikt die gekalibreerd zijn door Macben, een EN-ISO17025:2005 erkend laboratorium voor het kalibreren van drukbanken en weegschalen [23].

4.1.1 In situ metingen

De metingen tonen aan dat bij wand A een afwijking merkbaar is, namelijk een relatieve vochtigheid van 100 %. Deze is te verklaren door de positionering van de meetpunten van wand A die gekozen zijn net boven het afgewerkt vloerpeil. Hierdoor kan opstijgend vocht doorheen de bouwschil de kalkhennep bereiken en de meetwaarden beïnvloeden. Bovendien werd de kalkhennep aangezet ter plaatse van de funderingsplaat, waardoor de kans op opstijgend vocht vergoot wordt (zie 2.1.4). Tot slot wil een relatieve vochtigheid van 100% niet zeggen dat er effectief condensatie zal optreden. De waarde van 100 % kan verklaard worden door de aanwezigheid van opstijgend vocht, niet-verdampt of weggevoerd aanmaakwater, regendoorslag en/of sensorgevoeligheid bij hoge RV-waardes.

Wanneer de parameters uit de Glasermethode worden vergeleken met deze uit de software, kan er opgemerkt worden dat deze sterk van elkaar verschillen. De verschillen tussen de berekende warmtegeleidingscoëfficiënten en deze uit de software zijn relatief klein en hebben geen noemenswaardige temperatuurverschillen tot gevolg. Daarentegen zijn de berekende warmteweerstanden beduidend lager dan deze uit de software, dit geeft wel grote verschillen bij de U-waardeberekening.

Vervolgens is er ook een opmerkelijk verschil tussen enerzijds de berekende λ -waardes en anderzijds deze die gehanteerd wordt in de EPB-databank en deze bekomen uit andere onderzoeken. Dit heeft tot gevolg dat de kalkhennep in de praktijk minder isoleert dan wordt voorspeld. Hierdoor worden er hoge temperaturen gemeten op de overgang tussen de kalkhennep en het metselwerk en is er een opvallend klein temperatuurverschil merkbaar tussen isolatiediktes van 10 en 30 cm. Hierbij moet er wel rekening worden gehouden met het feit dat een kleine wijziging in temperatuur zorgt voor een groot verschil in λ -waarde.

Algemeen kan er geconcludeerd worden dat de locatie van de metingen een veel grotere invloed heeft dan de tijdstippen doorheen de dag. Verder speelt de aanvang van de knik ($T \downarrow$ en $RV \uparrow$) een rol naargelang de dikte van de kalkhennepwand. Hierbij vindt de knik in het midden plaats bij een isolatiedikte van 22 tot 23 cm en bij een isolatiedikte van 10 cm vindt deze plaats vlakbij de overgang tussen isolatie en metselwerk.

Vervolgens benadert de relatieve vochtigheid 100 % op de overgang bij isolatiediktes groter dan 20 cm. Er wordt enkel bij wand B een beduidend lagere relatieve vochtigheid gemeten. Dit kan verklaard worden door een dunnere isolatiedikte van 10 cm waardoor de wand sneller kan drogen. Vervolgens geeft het grotendeel van de metingen aan dat de relatieve vochtigheid lager is dan 100% op de overgang tussen de kalkhennep en het metselwerk. Enkel wand A was hierbij de uitzondering maar dit kan mogelijk verklaard worden zoals eerder aangehaald.

Tenslotte zijn de relatieve vochtigheden in de kalkhennep lager bij de wand van verbouwing 2 dan wand C van verbouwing 1 ondanks een vergelijkbare dikte. Dit is te verklaren door het langere drogingsproces (≈ 4 jaar) van de wand uit verbouwing 2. In tegenstelling tot deze waarden vertoont de wand van verbouwing 2 een hogere relatieve vochtigheid (97,7 %) op de overgang. Deze hoge vochtigheid is het gevolg van de aansluiting van de kelderwand met de vochtige ondergrond.

4.1.2 Numerieke analyse

De hoge relatieve vochtigheden in het metselwerk zijn te verklaren doordat dit materiaal capillair actief is. Hierdoor kan het dus regenwater bufferen. Daarnaast is metselwerk weinig hygroscopisch waardoor de relatieve vochtigheid zeer snel stijgt bij de minste wateropname. Dit heeft als gevolg dat er pieken van 100 % relatieve vochtigheid kunnen ontstaan bij de minste regenval.

Het metselwerk in contact met de buitenomgeving kan drogen en hierdoor daalt de relatieve vochtigheid. De aanwezigheid van zonnestraling op de buitengevel zorgt voor een betere droging. Verder wordt het drogingsproces ook bevorderd doordat de wandopbouw een dampopen karakter heeft.

De hoge relatieve vochtigheden op de overgang tussen het metselwerk en de kalkhennep, zijn te verklaren doordat kalkhennep capillair actief is. Hierdoor gaat de kalkhennep het water uit het metselwerk opzuigen en wordt het namelijk gebufferd in het materiaal. Kalkhennep heeft ook goede hygroscopische eigenschappen waardoor het veel water kan bufferen zonder dat er pieken ontstaan in relatieve vochtigheid. De hoge relatieve vochtigheden geven dus aan dat er zeer veel water wordt opgenomen door de kalkhennep.

De hoge relatieve vochtigheden over het grotendeel van de doorsnede bij wand A en C, met isolatiediktes groter dan 20 cm zijn te verklaren doordat het gebufferde water ingesloten zit en hierdoor moeilijk kan drogen. Dit heeft tot gevolg dat het watergehalte pas in evenwicht is na een periode van minstens één jaar. In tegenstelling tot wand B waar de relatieve vochtigheden overal kleiner zijn dan 100 %. Dit valt te verklaren door de dunnere isolatie (10 cm) waardoor het drogingsproces sneller verloopt en het watergehalte na twee maanden al een lineaire daling vertoont. Hierdoor daalt de relatieve vochtigheid over de volledige doorsnede van de kalkhennep. Het pleisterwerk kan dus ook sneller drogen waarbij het watergehalte in de beginfase zeer snel daalt en na twee maanden al in evenwicht is.

Hetzelfde effect kan worden waargenomen wanneer wand A en wand C met elkaar worden vergeleken. Omdat wand C een kleinere dikte heeft dan wand A, namelijk 22 cm i.p.v. 30 cm, kan de wand sneller drogen en daardoor heeft de relatieve vochtigheid een minder steil verloop doorheen de kalkhennep.

Wanneer de experimentele data met de numerieke data wordt vergeleken, vertonen de simulaties veel hogere relatieve vochtigheden en lagere temperaturen (kleine verschillen zie 4.1.1). Dit kan enerzijds verklaard worden doordat de materiaaleigenschappen in de *software* afwijken met deze in de praktijk. Dit is ook al aangetoond in vorig hoofdstuk (zie 4.1.1). Daarnaast kan het ook zijn dat het meettoestel (sonde), vervaardigd uit roestvrijstaal ($\lambda = 15 \text{ W/mK}$ [21]), de warmte vanuit de binnenruimte geleidt in de opening tot aan het meetpunt (sensor). Een andere mogelijkheid is dat de warme lucht vanuit de binnenruimte in de opening tot bij de sensor kan geraken waardoor er hogere temperaturen en lagere vochtigheden worden gemeten. Ondanks dat hierbij voorafgaand aandacht aan besteed is om dit fenomeen zoveel mogelijk te beperken, is er mogelijk toch een warmtelek ontstaan. Als er hierbij bijvoorbeeld een temperatuurverschil van 2°C ontstaat met de werkelijke situatie, kan dit een factor 3,5 verschil opleveren bij de λ -berekening. Dan komen de berekende waarden wel overeen met deze uit de literatuur.

4.1.3 Drukproeven

Monsters *in situ* van samenstelling 3 en 4 vertonen de grootste druksterktes. Dit kan verklaard worden door hun grotere dichtheid. Verder kan het verschil in dichtheid tussen monsters van dezelfde samenstelling verklaard worden door een verschillende handmatige verdichtingswijze tijdens het aanbrengen in de bekisting. Hierbij zal het tweede monster van samenstelling 2 beter zijn aangedrukt bij het aanbrengen in de bekisting. Dit geldt ook voor de twee monsters van samenstelling 1 waarbij het eerste monster beter is aangedrukt.

De verschillen tussen enerzijds de monsters B en C en anderzijds de monsters D en E zijn te verklaren doordat test B en C vroegtijdig zijn gestopt. Zowel de bijbehorende verplaatsingen als de grafiek (zie Figuur 97) tonen dit aan dat de test van B en C ongeveer 20 sec. eerder gestopt zijn dan D en E. Hierdoor worden er kleinere druksterktes gevonden bij de eerder gestopte testen.

De berekende spanningen bij de monsters *in situ* komen exact overeen met de gemeten maximale sterkte uit de drukbank. Dit kan verklaard worden door de egaal en nauwkeurig afgewerkte oppervlaktes van deze monsters die ervoor zorgen dat de uitgeoefende kracht gelijkmatig verdeeld wordt over het te drukken oppervlak.

De geprefabriceerde monsters vertonen een gelijkaardig verloop. Dit is een gevolg van de gelijke dichtheden van de drie monsters wat te verklaren is door de eenzijdige machinale verdichting. Dit in tegenstelling tot de *in situ* gevormde monsters waarbij de telkens afwijkende handmatige verdichting een groot verschil in dichtheden tot gevolg heeft.

Verder wordt er een lagere maximale kracht gevonden bij test H dan bij test I ondanks dat deze een hogere dichtheid heeft. Dit is te wijten aan het zeer golfvormige verloop van het te drukken oppervlak. Hierdoor wordt de uitgeoefende kracht niet gelijkmatig verdeeld over het volledige oppervlak waardoor afwijkingen worden verkregen. Ook kan er bij alle drie de monsters geen verplaatsing gemeten worden aangezien deze allemaal breuk vertonen.

Vervolgens kan bij beide drukproeven geconcludeerd worden dat een betere verdichting, een grotere maximale kracht met zich meebrengt. Hierbij moet er wel rekening gehouden worden dat de uitgeoefende kracht niet altijd op een egaal en nauwkeurig afgewerkt oppervlak wordt aangebracht. Bij de berekende spanning wordt van een egaal en nauwkeurig oppervlak uitgegaan waarbij de uitgeoefende kracht gelijkmatig wordt verdeeld over het volledige oppervlak, dit is in praktijk niet altijd het geval. Tenslotte volgt uit de proeven dat de verdichtingswijze een grotere invloed heeft op het bereiken van een grotere maximale kracht dan de samenstelling van de monsters.

4.1.4 Absorptietest

De waterabsorberende factor bij de korte absorptie test voor de drie grote kubussen van samenstelling 2 (S2.1), samenstelling 3 (S3.1) en samenstelling 4 (4.2) bedragen respectievelijk 1,80; 1,50 en 1,74. Bij het bepalen van deze factor speelt de samenhang een grote rol. Hierbij kan de lagere factor voor samenstelling 3 (S3.1), ondanks zijn groter drooggewicht, te wijten zijn aan de slechte samenhang van het monster na het onderdompelen waardoor er eventueel kalkhennepmengsel losweekt.

Voor de kleine monsters hebben de monsters van samenstelling 4 (S4.3, S4.4 en S4.5) een gelijkaardig drooggewicht. Toch absorbeert monster S4.4 meer water in de beginfase dan de andere twee. Dit kan verklaard worden door een betere samenhang van dit monster, terwijl de andere twee monsters een slecht tot matige samenhang vertonen na onderdompelen waardoor het natgewicht opvallend lager is.

Bij de lange absorptietest toegepast op samenstelling 1 bedraagt het waterabsorberend vermogen voor de losse verdichting 3,35 en voor de vaste verdichting 3,39 keer zijn drooggewicht. Dit ondanks de testduur voor de vaste verdichting 6 dagen bedraagt en die van de losse verdichting 7 dagen bedraagt. Hierdoor kan er geconcludeerd worden dat het monster met vaste verdichting een grotere waterabsorptie vertoont. Een mogelijke verklaring hiervoor kan zijn dat de vaste verdichting over een betere samenhang beschikt dan de losse verdichting waardoor tijdens het onderdompelingsproces er eventueel kalkhennepmengsel losweekt in de waterbak. Verder kan de permeabiliteit van het monster ook verschillen door de verschillende verdichtingswijze.

Bij de absorptietest wordt verwacht dat een losse verdichting beschikt over grote en open poriën waardoor het meer water zou kunnen absorberen. Uit de bekomen resultaten blijkt het omgekeerde waar. Wanneer nu de wateropnamecapaciteit vergeleken wordt met vermelde waarden, gaande van 3 tot 5 uit artikels van *Grow2Build* [2], [34], *Ecomat* [6], *Flower* [9] en *Snauwaert* [41] (zie 1.3.1), kan er vastgesteld worden dat deze resultaten overeenkomen. Vooral de meer betrouwbare waarden uit de lange absorptietest vallen binnen het interval van de waarden uit de literatuur.

4.1.5 Capillariteitstest

Voor de eerste proef worden er monsters gebruikt van samenstelling 1 (Leemniscaat) en 3 (Marion Wright). Voor iedere samenstelling is één monster los verdicht en het ander vast verdicht. Voor samenstelling 1 wordt er na 24 u nauwelijks een verhoging van het vochtfront waargenomen. Daarnaast vertoont het vast verdicht monster wel een hoger vochtfront dan het los verdicht. Dit kan verklaard worden aan de hand van de poreusheid van de twee monsters. Uit een studie van Evrard [10] blijkt dat poriën 1 mm tot een paar cm groot kunnen zijn (zie 1.4.2.2). Daarbij openen de grote poriën namelijk in de kleine poriën door de porositeit van de kalk als bindmiddel [10]. Hierbij kan een verschillende verdichtingswijze de poriënstructuur beïnvloeden waarbij een vastere verdichting zorgt voor een kleinere poriënstructuur.

Bij samenstelling 3 is er nauwelijks een verschil in hoogte van het vochtfront tussen een vaste en een losse verdichting. Dit is in tegenstelling tot de verwachtingen waarbij een vaste verdichting een veel hoger vochtfront zou vertonen dan een losse verdichting, dit door een kleinere poriënstructuur. Daarnaast is de stijghoogte na 24 u wel aanzienlijk hoger dan die van samenstelling 1. Dit kan verklaard worden door het hogere gewichtsgehalte aan water (41,41 %) en bindmiddel (35,82 %) en een lager gewichtsgehalte aan kalkhennep (22,77 %) bij de aanmaak van mengsel 3 (zie 2.3.1). Hierdoor kan eventueel door middel van een andere poriënstructuur het water sneller stijgen in het mengsel in tegenstelling tot samenstelling 1.

Bij proef twee vertoont monster 4 van samenstelling 1 een veel hoger vochtfront dan samenstelling 2 en 4 ondanks dat deze eenzelfde verdichtingswijze hebben. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de samenstelling een belangrijkere rol speelt dan de verdichtingswijze.

4.2 Beperkingen

4.2.1 In situ metingen en numerieke analyse

De lezer moet er rekening mee houden dat gedurende de *in situ* metingen voor verbouwingen enkel wanden met baksteenmassief in kaart worden gebracht. Daarnaast moet tijdens de metingen de sonde herstoken worden aangezien er maar één ter beschikking is. Hierdoor moet er een aanname gemaakt worden, namelijk wordt er verondersteld dat het klimaatverloop gedurende één dag hetzelfde blijft binnen de periode van de meetcampagne. Hierdoor kunnen de bekomen resultaten van éénzelfde wand en verschillende wanden met elkaar vergeleken worden.

Simulaties uit voorgaande studies [8], [9], [10] en [17] tonen aan hoe vocht kan variëren over kleine afstanden en over korte periodes in de kalkhennep. Daarom is een zeer voorzichtige en accurate plaatsing vereist bij het onderzoeken van de dynamische respons d.m.v. sensoren. Hierbij is de plaats zeer belangrijk waarbij er rekening moet gehouden worden met de isolatiedikte, diepte van de meting, binnen- en buitenklimaat (oriëntatie buitengevel) en externe factoren zoals vochtproductie binnenshuis, opstijgend vocht, regendoorslag, enz.

Het is belangrijk om een goede keuze te maken van het type van de sensoren waarbij er moet worden gekozen voor sensoren met een grote nauwkeurigheid. Deze nauwkeurigheid moet ook kunnen worden gegarandeerd bij het meten van hoge relatieve vochtigheden. Er moet ook een goed bereikbare plaats worden gekozen waarbij de sonde veilig kan worden geplaatst waarbij er geen openingen ontstaan rondom de sonde. Vervolgens moet er voor gezorgd worden dat de sonde uit een materiaal bestaat dat de warmte slecht geleidt ($\lambda \downarrow$). Waar bij huidige metingen een warmtelek is ontstaan doorheen de opening en de sonde, kan het instorten van speciale sensoren hierbij een oplossing bieden.

De studie kan helaas niet over een langere periode worden uitgevoerd. Hierdoor kunnen de *in situ* metingen niet gedurende langere tijd uitgevoerd worden. Hierbij zouden dan ook eventuele strenge winters en hete zomers in kaart gebracht kunnen worden. Ook zou de sonde op meerdere dieptes in de kalkhennep en eventueel in het metselwerk aangebracht kunnen worden waardoor er een beter inzicht verkregen wordt over de volledige wanddoorsnede. Vervolgens zijn er maar vier verschillende isolatiediktes aan bod gekomen tijdens huidig onderzoek. Verder onderzoek zou de invloed van nog meer kalkhennepdiktes kunnen analyseren. Tenslotte worden verschillende oriëntatierichtingen in rekening gebracht. Jammer genoeg is maar één wand georiënteerd in zuidwestelijke richting. Toekomstig onderzoek kan zich daarbij meer toespitsen op deze wanden omdat deze het meest worden blootgesteld aan regenval.

Verder is het ook de vraag wanneer condensatie met zekerheid kan aangegeven worden. Hierbij wil een meting van 100 % relatieve vochtigheid op de overgang nog niet zeggen dat er effectief condensatie optreedt. Een relatieve vochtigheid van 100% wordt ook gemeten wanneer de sonde in een vloeibare (bijvoorbeeld opstijgend vocht, regendoorslag, ...) substantie wordt aangebracht. Hierbij is metselwerk namelijk capillair actief en buffert het dus regenwater maar het is wel nagenoeg niet hygroscoopisch waardoor de relatieve vochtigheid bij de minste waterbelasting naar 100% piekt. Daarom moet er vooraf goed beredeneerd worden waar de sensoren exact worden aangebracht en tot op welke diepte.

In de gehanteerde *softwareversie* van WUFI® worden ééndimensionale simulaties weergegeven. Om deze reden kan er geen rekening worden gehouden met de hoogte waarop de sensoren in realiteit worden gestoken in de wanden. Ook hoeken in binnenruimtes worden genegeerd en worden ook luchtinfiltratie en -exfiltratie (zie 1.1.3) niet in rekening gebracht. Tenslotte gaat het ook om een gratis *softwareversie* en is deze eerder beperkt in optiemogelijkheden (vb.: ondergrond simuleren, materiaaleigenschappen handmatig aanpassen, enz.).

4.2.2 Proeven

De *in situ* gevormde monsters zijn allemaal zelf handmatige aangemaakt, handmatig gemengd en handmatig verdicht. Hierdoor kunnen er verschillen optreden in de mate waarin de monsters zijn gemengd en de mate waarin de monsters zijn verdicht. Het verschil in dichtheid, tussen monsters van verschillende samenstellingen, kan niet altijd verklaard worden door een verschil in handmatig aandrukken maar kan ook verklaard worden door een verschil in natuurlijke poriënstructuur. Ondanks dat monsters uit dezelfde samenstelling bestaan, kunnen er dus toch verschillen zijn in dichtheid. Daarom kan het in toekomstig onderzoek handig zijn als er gebruik kan gemaakt worden van een machinale menger waarbij afwijkingen in de mate van vermenging minimaal zijn.

Tijdens het ontkisten van de monsters kan er ondervonden worden dat ontkistingsolie niet werkt bij kalkhennep. Daarom is er gebruik gemaakt van een plasticfolie die wordt aangebracht in de kubusvormige bekistingen. Hierdoor kunnen de monsters vrij eenvoudig uit de bekistingen worden gehaald zonder dat deze beschadigd worden.

Om praktische redenen kunnen er enkel proeven op kubusvormige monsters met lengte van 100 mm en 150 mm toegepast worden. Het zou ook interessant zijn om monsters met andere afmetingen te testen. Daarnaast is er tot op heden nog geen gestandaardiseerde samenstelling en verdichtingswijze voorhanden voor kalkhennep. Dit wordt tijdens het onderzoek bepaald op basis van literatuur en praktijkervaringen. Hierdoor kunnen de eigenschappen van kalkhennep sterk variëren. Verder wordt om praktische reden het droogproces van de monsters beperkt tot 28 dagen.

Tegenwoordig zijn er ook prefab kalkhennepmuren op de markt [80]. Deze worden machinaal vervaardigd onder gecontroleerde omstandigheden in de fabriek waardoor verschillen in samenstelling en verdichting minimaal zijn [80]. Daarnaast zijn er ook geen problemen omtrent ontkisten, veranderlijke weersomstandigheden en droogproces [80]. Er moet hierbij wel worden aangegeven dat deze prefab muren enkel worden toegepast in nieuwbouwprojecten en niet in renovatieprojecten waar deze studie zich op focust [80].

Tenslotte wordt tijdens het uitvoeren van de proeven de drukkracht, het absorptievermogen en de capillariteit van kalkhennep bepaald in functie van samenstelling en/of verdichting. Hierbij wordt in deze studie de warmtegeleidingscoëfficiënt λ telkens buiten beschouwing gelaten omdat deze niet constant is onder veranderlijke vochtgehalten. Praktijkervaring toont aan dat de kalkhennep zo luchtig mogelijk moet gehouden worden om een lagere warmtegeleidingscoëfficiënt te verkrijgen zodat het materiaal beter isoleert [5]. Daarom wordt de kalkhennep enkel aan de contactvlakken met de andere materialen (bekisting en metselwerk) harder aangedrukt.

4.3 Vervolgonderzoek

Vorige studies [8], [9], [10] en [17] tonen aan dat de interacties op de overgangen bepalend zijn voor de dynamische prestaties bij het progressieve vochttransport in de kalkhennep waarbij er niet mag uitgaan worden van een stabiele U-waarde. Hierbij focust deze studie zich op het onderzoeken of er condensatie optreedt op de overgang tussen het baksteenmassief en de kalkhennep. Daarom kan er in toekomstig onderzoek gefocust worden op het in kaart brengen van het temperatuurverloop en de relatieve vochtigheid op de overgang tussen de kalkhennep en de leempleister. Daarnaast kan hetzelfde gebeuren voor de overgang tussen de leempleister en de binnenomgeving om de vochtregulerende werking van kalkhennep aan te tonen. Tenslotte kan er ook een studie gemaakt worden van het volledige verloop doorheen de volledige doorsnede van de kalkhennep (vochtbuffering). Hierbij kunnen de sensoren best op voorhand in de kalkhennep worden ingestort.

Om een volledig beeld te krijgen van een volledige woning, die geïsoleerd is met kalkhennep, kan het energieverbruik worden gemeten. Vervolgens kan aan de hand van een inverse warmteverliesberekening een werkelijke warmtegeleidingscoëfficiënt worden afgeleid.

Naast het uitvoeren van metingen *in situ*, kunnen er ook nog meer proeven worden uitgevoerd. Hierbij kunnen de warmtegeleidingscoëfficiënt en de bijhorende thermische prestaties, in functie van het vochtgehalte, in detail worden onderzocht. Vervolgens kan er op zoek gegaan worden naar de ideale samenstelling van kalkhennep in functie van de verschillende materiaaleigenschappen waarbij er dan één gehele samenstelling kan worden bekomen voor optimale prestaties in de praktijk.

Tenslotte focust deze studie zich op verbouwingen waarbij de kalkhennep telkens *in situ* wordt gevormd. Maar tegenwoordig kunnen ook volledige kalkhennepmuren vervaardigd worden onder gecontroleerde omstandigheden in de fabriek [80]. Deze geprefabriceerde elementen worden toegepast in nieuwbouwprojecten en brengen een aantal voordelen met zich mee die in toekomstig onderzoek kunnen worden onderzocht [80].

Besluit

Deze masterproef heeft als doel om aan te tonen of kalkhennep kan gebruikt worden als isolatiemateriaal aan de binnenzijde van een baksteenmassief en na te gaan of hierbij condensvorming optreedt op de overgang tussen de kalkhennep en het metselwerk.

De metingen hebben aangetoond dat de locatie (isolatiedikte, diepte en hoogte) een grotere invloed heeft dan de tijdstippen (binnen- en buitenklimaat) waarop gemeten wordt. Daarnaast benadert de relatieve vochtigheid 100 % op de overgang tussen de kalkhennep en het metselwerk voor isolatiediktes groter dan 20 cm. Voor een kalkhennepwand met een dikte van 10 cm wordt hier een beduidend lagere relatieve vochtigheid gemeten. Vervolgens kan er opgemerkt worden dat er hoge temperaturen worden gemeten op de overgang tussen het metselwerk en de kalkhennep en dat de temperatuurdaling over de kalkhennepdoorsnede beperkt is voor isolatiediktes gaande van 10 tot 30 cm. Hierbij zijn de berekende λ -waardes groter dan deze gehanteerd in de *software* en zijn ze opmerkelijk groter dan deze gehanteerd in de EPB-databank en ander studies. Tenslotte zijn de relatieve vochtigheden in de kalkhennep lager bij wanden die langer hebben kunnen drogen.

Uit de drukproeven is gebleken dat grotere druksterktes overeenkomen met een vaste verdichting van de kalkhennepmonsters. Daarnaast is vastgesteld dat de verdichtingswijze een grotere invloed heeft op het bereiken van maximale drukkrachten dan de samenstelling van de monsters. Verder is gebleken uit de korte absorptietest dat de samenhang van de monsters een bepalende factor is voor het bepalen van het waterabsorberend vermogen. Uit de lange absorptietest is voortgekomen dat een vaste verdichting een hoger waterabsorberend vermogen heeft dan een losse verdichting. Hierbij is aangetoond dat kalkhennep 3 tot 4 keer zijn drooggewicht kan absorberen. Tenslotte is bij de capillariteitstest naar voren gekomen dat de samenstelling van het monster een belangrijkere rol speelt dan de verdichtingswijze ervan.

Uit het grotendeel van de metingen is gebleken dat de relatieve vochtigheid lager is dan 100% en dat er hoge temperaturen heersen op de overgang tussen de kalkhennep en het metselwerk. Hierdoor kan er geconcludeerd worden dat er, alleszins op basis van de in deze studie uitgevoerde proeven, geen inwendige condensatie zal optreden op de overgang tussen het metselwerk en de kalkhennep. Dit sluit echter niet uit dat er effectief een grote hoeveelheid vocht aanwezig kan zijn in de kalkhennep.

De proeven hebben aangetoond dat kalkhennep goede eigenschappen bezit omtrent druksterkte, absorberend vermogen en capillariteit. Toch bezit kalkhennep, op basis van de drukproeven, te weinig druksterkte om als structureel dragend te worden beschouwd. Verder is gebleken uit de metingen dat kalkhennep ook langzamerhand kan drogen. Hieruit kan er geconcludeerd worden dat kalkhennep kan gebruikt worden als capillair-actief isolatiemateriaal aan de binnenzijde van een baksteenmassief mits een goede uitvoering en droging mogelijk is. Hierbij moet er wel rekening worden gehouden dat, op basis van de uitgevoerde metingen, kalkhennep niet de isolatiewaardes haalt die in de *software*, de EPB-databank en andere onderzoeken worden gehanteerd. Gezien de in de EPB-databank gerapporteerde isolatiewaardes echter bekomen worden via geijkte laboratoriumproeven, kan verondersteld worden dat de meetcampagne in deze masterproef niet optimaal verlopen is.

Bibliografie

- [1] DCLG, „Review of sustainability of existing buildings,” Crown copyright , London, 2006.
- [2] Grow2Build, „Duurzaam bouwen? Met vlas en hennep!,” [Online]. Available: <http://www.grow2build.eu/images/stories/Brochures/nieuw/Brochure%20General%20public%20-%20NL.pdf>. [Geopend Oktober 2016].
- [3] BAS, „Natuurlijke bouwmaterialen: vlas en hennep,” Mei 2015. [Online]. Available: http://www.basbouwen.be/sites/default/files/BAS_infobox_vlas_en_hennep_0.pdf. [Geopend Oktober 2016].
- [4] A. Janssens, „Binnenisolatie: fysische fenomenen van warmte- lucht en vochttransport,” Universiteit Gent, 2010.
- [5] A. Barchi, „Architectengroep Barchi,” [Online]. Available: www.barchi.be. [Geopend 28 September 2016].
- [6] Ecomat, „Pleisters&Stucerk EM-TF-PS-KALKHENNEPSTUC,” 2012. [Online]. Available: <http://ecomat.be/bestandenbank/EM-TF-PS-kalkhennepstuc-p.pdf>. [Geopend oktober 2016].
- [7] F. Collet, J. Chamoin, S. Pretot en C. Lanos, „Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes,” *Energy and Buildings*, nr. 62, pp. 294-303, 2013.
- [8] W. Marion, M. Naomi, F. Andrew en R. Ranyl, *Dry-lining versus a hemp and lime insulating render for internal thermal renovation of a stone cottage in West Wales, including embodied energy assessment, interstitial wall monitoring, In-situ U-Value and WUFI modeling*, Centre of Alternative Technology, Machynlleth, Wales: University of East London & Graduate School of the Environment.
- [9] A. R. Flower, „A comparison of real and simulated moisture data for,” University of East London, London, 2011.
- [10] A. Evrard, „Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials,” Univiversiteit Leuven, Leuven, 2008.
- [11] Ecomat , „Moeilijke isolatiewaarden,” Ecomat, [Online]. Available: <http://ecomat.be/kennisbank/detail/moeilijke-isolatiewaarden>. [Geopend oktober 2016].
- [12] Ecomat , „Isohemp natural building,” 2016. [Online]. [Geopend 1 Oktober 2016].
- [13] Het leemniscaat , „Bio-ecologische pleisterwerken-strobalenbouw,” [Online]. Available: <http://www.hetleemniscaat.be/nl/over-ons>. [Geopend november 2016].
- [14] A. Evrard en A. De Herde, „BIOCLIMATIC ENVELOPES MADE OF LIME AND HEMP CONCRETE,” *CISBAT*, 2005.

- [15] Kalkhennepbouw Nederland, „Bouwen met kalkhennep,” April 2015. [Online]. Available: <http://www.spoelhof.nl/wp-content/uploads/2015/05/Bouwen-met-Hennepkalk.april2015.pdf>. [Geopend Oktober 2016].
- [16] H. Künzel, „WUFI,” Fraunhofer IBP, 12 September 2016. [Online]. Available: <https://wufi.de/en/>. [Geopend 6 Oktober 2016].
- [17] M. F. wright, Monitoring a Real-Life Scenario: Will condensing conditions occur at the interface between a solid-stone masonry wall and two different internal insulation systems?, London : University of East London , 2010.
- [18] L. Arnaud, „Comparative Study of Hygro Thermal Performances of,” in *NOCOMAT*, Bath, 2009.
- [19] Isabel, „My green way of life,” [Online]. Available: <https://greenwayoflife.wordpress.com/2015/07/27/230-kalkhennep-what-how-to/>. [Geopend 7 Oktober 2016].
- [20] W. Jordan, „Wolf Jordan,” [Online]. Available: <https://wolfjordan.be/product/lime>. [Geopend 7 Oktober 2016].
- [21] Delta Ohm, „Delta Ohm, HD2101.1 -HD2101.2”.
- [22] Conrad, Conrad, [Online]. Available: <http://www.conrad.be/ce/nl/product/898898/TFA-KLIMALOGG-PRO-Luchtvochtigheidsmeter-hygrometer-1-Hrel-99-Hrel-TFA-binnenklimaat-Starter-set/?ref=detview1&rt=detview1&rb=1>. [Geopend 29 September 2016].
- [23] Macben, „Material testing equipment,” [Online]. Available: <http://www.macben.be/wp-content/uploads/2015/10/c230-n.pdf>. [Geopend November 2016].
- [24] S. Roels en E. Vereecken, *Binnenisolatie van Buitenmuren*, Leuven: KULeuven , 2012.
- [25] E. Mario D. Gonçalves, „Insulating Solid Masonry Walls,” Building envelope forum, Varennes, Québec.
- [26] J. d. Vree, „Damdiffusie en damdiffusieweerstand,” [Online]. Available: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/dampdiffusie.shtml>. [Geopend Oktober 2016].
- [27] Verhelst, „Inwendige condensatie,” Architect Verhelst, 2016. [Online]. Available: <http://architectverhelst.be/nuttige-tips/inwendige-condensatie/>. [Geopend Oktober 2016].
- [28] S. Wilkinson, „A study of the Moisture Buffering Potential of Hemp in Combination with Lime and Clay-Based Binders,” University of East London , 2009.
- [29] J. Toman, A. Vimmrola en R. Cerny, „Long-term on-site assessment of hydrothermal performance of interior thermal insulation systems without water vapour barrier,” *Energy and Buildings*, nr. 41, pp. 51-55, 2009.

- [30] International Energy Agency (IEA), „Integral Building Envelope Performance Assessment II Technical Synthesis Report,” IEA ECBCS annex 32, 2003.
- [31] BRE, „House longhorn beetles: geographical distribution and pest status in the UK,” BRE, Garston, 1994.
- [32] G. J. Scheffler G, „Material development and optimisation support by numerical simulation for capillary active inside insulation material,” Bulkema Publischers, 2003.
- [33] A. Evrard, „Sorption behaviour of Lime-Hemp Concrete and its relation to indoor comfort and energy demand,” In PLEA, Geneve, Switzerland , 2006.
- [34] Grow 2 Build, „Bouwen met vlas en hennep,” [Online]. Available: http://www.basbouwen.be/sites/default/files/brochure%20professionals_low%20resolution_NL.pdf. [Geopend Oktober 2016].
- [35] T. Bevan en R. Woolley, „Hemp Lime construction: A guide to building with hemp lime composites,” in *IHS BRE Press*, Bracknell, UK, 2008.
- [36] ChanvrEco, „Bouwen met Hennep,” ChanvrEco, [Online]. Available: <http://www.chanvreco.be/nl/produkten/isolatie-prohemp-gamma/>. [Geopend 6 Oktober 2016].
- [37] Isohemp, „Isohemp Natural Building,” Isohemp S.A. , 2014. [Online]. Available: <http://www.isohemp.be/nl/bloc-de-chanvre/>. [Geopend 6 Oktober 2016].
- [38] T. Yates, „Thermographic Inspection of the Masonry and Hemp Houses,” Building research establishment, Suffolk, 2003.
- [39] R. Rhydwen, „Hemp / Lime (1a) History and background to hemp,” *Cannabis Sativa L.*, 2009, pp. 85-103.
- [40] Vlaams Instituut voor Bio-Ecologisch bouwen & wonen, „Keuzefiche: Bouwmaterialen / isolatiematerialen,” Vlaamse overheid, Antwerpen-Berchem, 2007.
- [41] E. Snauwaert en G. Greet, „Industriële hennep,” Inagro, Rumbeke-Beitem, 2011.
- [42] F. Degrauwe, „Eigenschappen van cementgebonden materialen bij toevoeging van vlascomponenten,” Vakgroep Bouwkundige Constructies, UGent, 2005.
- [43] V. Munoz, „Chanvre et lin. Des plantes à bâtir l’avenir.,” 2007.
- [44] N. Defoirt en A. De Coster, „Thematische InnovatieStimulering. “Teelt en verwerking van vlas voor een bio-based economie in Vlaanderen”.” 2009.
- [45] P. Bouloc, „Le chanvre industriel. Production et utilisations.,” *France Agricole, Parijs*, pp. 217-234, 2006.
- [46] Vlaanderen is energie, „EPB-productgegevens databank - IN-SITU samengestelde isolatiematerialen,” Brussel , 2016.

- [47] F. Collet en S. Pretot, „Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete,” *Construction and Building Materials* , nr. 36, 2012.
- [48] T. Padfield, „The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity,” Technical university of Denmark, Denmark , 1998.
- [49] M. Mosquera, B. Silva, B. Prieto en E. Ruiz-Herrera, „Addition of cement to lime-based mortars:,” Elsevier , Spanje, 2004.
- [50] W. Jordan, „Soorten kalk,” Ecobouwers, 12 September 2007. [Online]. Available: <http://www.ecobouwers.be/forum/post/soorten-kalk>. [Geopend 6 Oktober 2016].
- [51] C. Harris en P. Borer, *The whole house book*, Sheffield: Department of the Environment , 1998.
- [52] N. Miskin, „The Carbon Sequestration Potential of Hemp-binder,” GSE, Centre for Alternative Technology, Machynlleth, 2010.
- [53] L. e. al, „Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars,” *Cement and Concrete Research*, nr. 34, pp. 2191-2201, 2004.
- [54] S. e. al, „Mineral Planning Factsheet – Natural Hydraulic Lime,” *The British Geological survey, Natural Environment Research Council*, 2005.
- [55] A. Arizzi, M. Brümmer, L. Martín-Sanchez, G. Cultrone en H. Viles, „The Influence of the Type of Lime on the Hygric Behaviour and Bio-Receptivity of Hemp Lime Composites Used for Rendering Applications in Sustainable New Construction and Repair Works,” *PLOS one*, 2015.
- [56] A. Shea, M. Lawrence en P. Walker, „Hygrothermal performance of an experimental hemp–lime building,” Elsevier, Bath, 2012.
- [57] R. Walker en S. Pavía, „Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for,” *Building and Environment*, nr. 94, pp. 155-165, 2015.
- [58] Tradical, „Building lime innovation,” Tradical, [Online]. Available: <http://www.tradical.com/>. [Geopend oktober 2016].
- [59] CESA, „Chaux formuée,” 2016. [Online]. [Geopend oktober 2016].
- [60] Reynchemie / CESA, „Natuurlijke kalk en pleisters van Saint-Astier,” St.Astier , [Online]. Available: <http://www.reynchemie.com/st-astier/nl/index.asp?paginaid=1&taal=nl>. [Geopend oktober 2016].
- [61] Chaux & enduits de St.Astier (CESA), „Hennep en natuurlijke kalk van Saint-Astier,” [Online]. Available: <http://www.reynchemie.com/rc/fiches/609034-fr.pdf>. [Geopend Oktober 2016].
- [62] P. Strandberg-de Bruijn en P. Johansson, „Moisture transport properties of limeehemp,” Elsevier Ltd., Sweden, 2014.

- [63] C. Magniont, G. Escadeillas, M. Coutand en C. Oms-Multon, „Use of plant aggregates in building ecomaterials,” *Use of plant aggregates in building ecomaterials*, nr. 16, pp. 17-33, 2012.
- [64] Eurocode, *NBN EN 196-1: 2016 Methods of testing cement - Part 1: Determination of strenght*, NBN, 2016.
- [65] H. Hens, „Peformance predictions for masonry walls with inside insulation using calculation procedures and laboratory testing,” *Journal of thermal environment and building science* , vol. 1, nr. 22, pp. 32-48, 1998.
- [66] V. Cerezo, „Propriétés mécaniques, thermique et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique,,” Ph.D. thesis at ENTPE, France, 2005.
- [67] S. Brunauer, P. Emmett en E. Teller, „Adsorption of Gases in Multimolecular Layers,,” *Journal of the American Chemical Society*, nr. 60, pp. 309-319, 1938.
- [68] Evrard, A. en A. De Herde, „Dynamical interactions between heat and mass flows in,” Taylor & Francis Group, London, 2006.
- [69] L. E. Nevander en B. Elmarsson, „Moisture handbook. Practice and theory,” in *Mölnlycke: Elanders Sverige AB*, Zweden, 1994.
- [70] P. Johansson, „Water absorption in two-layer masonry systems. Properties, profiles and predictions,” Lund Institute of Technology, Lund, 2005.
- [71] J. Arfvidsson en M. Janz, „Bestämning av fukttransportkoefficienter vid höga fukthalter med hjälp av en svit kapillärsugningsförsök,,” Department of Building Technology, Lund Institute of Technology., Lund, 1994.
- [72] L. Arnaud en V. Cérézo, „Qualification physique des matériaux de construction à base de,” ENTPE, France, 2001.
- [73] E. Vereecken, „Hygrothermal analysis of interior insulation,” 2013.
- [74] G. Berends, H. Janse en A. Slinger, „Natuursteen in monumenten,” Bosch & Keuning, Baarn / Rijksdienst voor de Monumentenzorg, Zeist, 1982.
- [75] Reynchemie , „Saint-Astier NHL 3.5 - witte pure kalk LC,” 26 mei 2014. [Online]. Available: <http://www.reynchemie.com/rc/fiches/60900-nl.pdf>. [Geopend november 2016].
- [76] Matest S.p.A. Unipersonale , „Material testing equipment,” [Online]. Available: <http://www.matest.com/en/Products/concrete/CONCRETE-FLEXURAL-AND-TRANSVERSE-TESTING-MACHINES/concrete-flexural-machines-150-kn-0/c090-03n-concrete-flexural-machine-150-kn-motorized-servo-plus-evolution>. [Geopend november 2016].
- [77] G. Verbeeck, „Warmteoverdracht door geleiding,” in *Bouwfysica, Deel 1: Warmtetransport en energieverbuik* , Universiteit Hasselt, 2013-2014, pp. 13-31.

- [78] V. i. energie, „EPB-productgegevens databank in situ samengestelde isolatiematerialen,” Brussels hoofdstedelijk gewest, 6/01/2017.
- [79] P. B, „In-situ thermal conductivity measurments of lime and hemp based materials using a thermal probe at Hartest Suffolk,” University of Plymouth, Plymouth, 2006.
- [80] H. i. a. b. bvba, „Ecologisch èn efficiënt bouwen met prefab kalkhennep muren,” Bekenholstraat 1a 9550 Herzele .
- [81] Nationale bouwguids, Nationale bouwguids, 29 Juli 2015. [Online]. Available: <http://www.nationalebouwguids.nl/woningbouw/nieuws/5133-kalkhennep-uit-groningen-kansrijk-voor-aardbevingsbestendig-bouwen.html>. [Geopend 29 September 2016].
- [82] „De productie van henneptextiel,” Sensi Seeds, [Online]. Available: <https://sensiseeds.com/nl/blog/de-productie-van-henneptextiel/>. [Geopend Oktober 2016].
- [83] J. Lewis, „Managing Moisture in the Renovation of the Solid Wall Housing Stock. A comparative study of Hemp-lime against Dry-lining (MSc Thesis),” Architecture: Advanced Environmental and Energy Studies, University of East London, 2010.
- [84] D. Permentier, Yves en K. Kerkhofs, „Bepaling van Vochtdistributies in een Klimaatkamer: Ontwerp,” Universiteit Gent, Gent , 2006.
- [85] L. Arnaud en E. Gourlay, „Experimental study of parameters influencing mechanical,” *Constr. and Build. Mat.*, nr. 28, pp. 50-56, 2012.
- [86] Carmeuse, „Carmeuse Bouwkunde,” 2015. [Online]. Available: <http://www.carmeuse-construction.com/nl/our-products/supercalco-nl>. [Geopend November 2016].

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Karakterisatie van kalkhennep als binnenisolatiemateriaal voor verbouwingen

Richting: **master in de industriële wetenschappen: bouwkunde**
Jaar: **2017**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Brepoels, Daan

Kox, Sean

Datum: **18/01/2017**